



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

TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ  
ÜRETİMİ VE RADYASYON SÖNÜMLEMESİNİN BELİRLENMESİ

ELİF SÜZGEÇ

Ekim 2020



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

TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ  
ÜRETİMİ VE RADYASYON SÖNÜMLEMESİNİN BELİRLENMESİ

ELİF SÜZGEÇ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ekim 2020

**Elif SÜZGEÇ** tarafından **Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR** danışmanlığında hazırlanan “**Termik Santral Uçucu Küllerinden Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi ve Radyasyon Sönmemesinin Belirlenmesi**” 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. Mehmet Sinan BİLGİLİ (Yıldız Teknik Üniversitesi)

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

Üye : Sefa ERTÜRK (Niğde Ömer Halisdemir 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.



Elif SÜZGEÇ

## ÖZET

### TERMİK SANTRAL UÇUCU KÜLLERİNDEN GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİ VE RADYASYON SÖNÜMLEMESİNİN BELİRLENMESİ

SÜZGEÇ, Elif

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ekim 2020, 102 sayfa

Termik santral uçucu külleri ve radyasyon, çevre ve insan sağlığı için çözüm bulunması gereken sorunlardır. Bu tez çalışmasında, Zonguldak Çatalağzı ve Adana İsken Sugözü Termik Santral (Türkiye) atık külleri, Rilem Cembureau standart kumu ve alkali aktivatörler ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ) kullanılarak geopolimer yapı malzemesi üretimi, bu malzemelerde kül tipi, kürleme sıcaklığı, alkali aktivatör/materyal (A/M) ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranlarının etkisinin belirlenmesi, fiziksel ve mekanik testlerin yapılması, yeni tasarlanmış sistemde radyasyon sönmlemelerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Deneylede iki farklı A/M oranı (0,2 ve 0,4) kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 'i ağırlıkça 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 oranlarında içeren geopolimerler, 70 ve 100 °C sıcaklıklarda kürlenmiş ve test yaşlarına kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Fiziksel testler (birim hacim ağırlık (BHA), su emme, porozite ve radyasyon sönmleme) ve mekanik testler (eğilme ve basınç dayanımı) yapılmıştır. Bu tezde üretilen geopolimerler -BHA'ları 2000  $\text{kg/m}^3$ 'den az olduğundan- hafif yapı malzemesidirler, çimento içermediklerinden sera etkisine neden olmaz, radyasyon sönmlemesi Portland çimentoyla üretilen yapı malzemesinden (%9,52) daha yüksek ve basınç dayanımı 30 MPa'dan fazla olanları inşaat sektöründe kullanmaya uygundur.

*Anahtar Sözcükler:* Çevre, geopolimer, radyasyon sönmleme, uçucu kül, yeniden kullanım

## ABSTRACT

### PRODUCTION OF GEOPOLYMER BUILDING MATERIAL USING FLY ASHES OF THERMAL POWER PLANTS AND DETERMINATION OF ITS RADIATION ABSORPTION

SÜZGEÇ, Elif

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

Supervisor : Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

October 2020, 102 pages

Fly ashes (FA) of thermal power plants (TPPs) and radiation are important problems necessary to solve for environment and human health. In this thesis, it is aimed to produce geopolymer building materials using Zonguldak Çatalağzı and Adana İsken Sugözü TPPs' fly ashes, Rilem Cembureau sand and alkaline activators ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ), determine the effects of ashes, curing temperature, alkaline activator/material (A/M) and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratios on these geopolymers and measure the radiation absorption (RA) of the materials by newly designed system. Two different A/M ratios (0.2 and 0.4) were used. Geopolymers that contain  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  in ratios of 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 by weight were cured at 70 and 100 °C, and kept at room temperature until the test ages. Physical tests (bulk density (BD), water absorption, porosity and RA) and mechanical tests (flexural and compressive strength (CS)) were applied to them. Geopolymers produced in this thesis are lightweight building materials since their BDs are less than 2000  $\text{kg/m}^3$ . They are cementless, therefore they don't cause to greenhouse effect. The specimens absorbing RA higher than cemented building material (9.52%) and having CS above 30 MPa and are suitable to be used in construction industry.

*Keywords:* Environment, geopolymer, radiation absorption, fly ash, reuse

## ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, Zonguldak Çatalağzı ve Adana İsken Sugözü Termik Santrallerinden (Türkiye) açığa çıkan uçucu küller ve alkali aktivatörler ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ) kullanılarak farklı kül tipi, kürlenme sıcaklığı, alkali aktivatör/materyal (A/M) ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranlarında 70 ve 100 °C sıcaklıklarda kürlenerek geopolimer yapı malzemeleri üretilmiş, bu malzemelerin temel fiziksel-mekanik testleri yapılmış ve yeni tasarlanan sistemde radyasyon sönümlenme durumları incelenmiştir. Tezde üretilen geopolimerler malzemelere fiziksel (birim hacim ağırlık, porozite, su emme ve radyasyon sönümlenme) ve mekanik (eğilme ve basınç dayanım) testler uygulanmıştır. Çevre dostu çimentosuz geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme kapasitelerinin, Portland çimentosu ile üretilen geleneksel yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme kapasitelerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek lisans tez danışmanlığı kabul eden, bu tez çalışmasının ilk aşamasından son aşamasına kadar olan her sürecinde yol gösteren, engin bilgilerini ve değerli yardımlarını esirgemeyen, kısa sürede büyük işler bitirmeme yardımcı olan, fikirleriyle ve yorumlarıyla çalışmanın nihayete ermesinde katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli akademik danışmanım Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NOHU) Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

NOHU Rektörü Prof. Dr. Muhsin KAR, Mühendislik Fakültesi Dekanı Kutsi Savaş ERDURAN ve Merkezi Araştırma Laboratuvarı Müdürü Prof. Dr. Mehmet ŞENER'in destekleri ile Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda akademik danışmanımca kurulan Atık Teknolojileri Laboratuvarı'nda yüksek lisans tezimin geopolimer yapı malzemesi üretimlerini gerçekleştirdim, kendilerine teşekkürlerimi sunarım. NOHU Çevre Mühendisliği Bölümü Başkanı Prof. Dr. Fehiman ÇİNER'e her türlü idari konudaki desteklerinden dolayı teşekkürler ederim.

Tez çalışmasında, deney aşaması ve fiziksel-mekanik testlerin gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen NOHU İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Ahmet

BİLGİL ve Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ'e, yeni tasarlanan sistemde NOHU Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü laboratuvarında radyasyon sönümlemesi testlerinin gerçekleştirilmesinde emeği olan Fizik Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Vakkas BOZKURT'a teşekkür ederim.

Jüri üyeleri Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ'ye tezin bilimsel içeriğine olan değerli katkıları, NOHU Fizik Bölümü'nden Prof. Dr. Sefa ERTÜRK'e hem radyasyon teorisi, radyasyon sönümleme sistemi tasarımı ve çalışır hale gelmesindeki hem de tezin bilimsel içeriğindeki kıymetli katkıları için teşekkür ederim.

Tezin ön denemelerinde beraber çalıştığımız Çevre Yüksek Mühendisi Türkan VURAL, kader birliği yaptığımız ve radyasyon sönümleme sistemi tasarımı ve çalıştırılmasında beraber çalıştığımız Çevre Mühendisleri Arife Gözde AKAN, Pervin NAS ve Betül DİKKAYA'ya teşekkür ederim. Bu tezin geopolimer kısmı, Avrupa Birliği (AB) 7. Çerçeve Programı (FP7) kapsamında kabul alan 7 ülke katılımlı ELAC2015/T02-0721 nolu "Development of Eco-friendly Composite Materials based on Geopolymer Matrix and Reinforced with Waste Fibers" başlıklı -Türkiye temsilci kuruluşu TÜBİTAK tarafından 116Y549 numara ve "Geopolimer Matrikse Dayalı Atık Lifler ile Güçlendirilmiş Çevre Dostu Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi" başlıkla kayıtlarına alınan- uluslararası ARGE projesinin bir parçasıdır. Tezin radyasyon sönümleme kısmı ise TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı'nca desteklenen "Termik Santral Atık Külünden Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi ve Bu Malzemenin Manyetik-Radyasyon Sönümleme Durumunun Değerlendirilmesi" başlıklı ulusal projenin bir parçasıdır. AB Çerçeve Program Sekreteryası'na ve projenin Türk partneri adına işlemleri yürüten TÜBİTAK ve NOHU Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Tezimi, bugünlere gelmemde çok büyük emek göstermiş olan kıymetli annem Bedriye SÜZGEÇ ve babam Metin SÜZGEÇ'e, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve bana güvenen kardeşlerim Sinan SÜZGEÇ, Tuba SÜZGEÇ, Kezban SÜZGEÇ, Muhammed SÜZGEÇ ve Büşra GÜNEY'e ve sevgili yeğenlerime (Sırdar, Fatih, Hilal, Aslı, Sertuğ, Agraşah, Hamza, Eymen ve Hira) ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	xv
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xvi
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Uçucu Kül .....	5
2.1.1 UKL'nin genel özellikleri.....	5
2.1.1.1 UKL'nin fiziksel özellikleri .....	6
2.1.1.2 UKL'nin kimyasal özellikleri .....	7
2.1.1.3 UKL'nin mineralojik özellikleri.....	8
2.1.1.4 UKL'nin morfolojik özellikleri.....	10
2.1.2 UKL'nin kullanım alanları .....	11
2.1.2.1 Çimentoda UKL kullanımı.....	11
2.1.2.2 Agregada olarak UKL kullanımı.....	13
2.1.2.3 Betonda UKL kullanımı .....	13
2.1.2.4 Tuğla ve kerpiç yapımında UKL kullanımı .....	14
2.1.2.5 Yapı malzemesi üretiminde UKL kullanımı .....	14
2.1.2.6 Geoteknik çalışmalarda UKL kullanımı .....	14
2.2 Geopolimer .....	15
2.2.1 Geopolimerin tarihçesi.....	15
2.2.2 Geopolimerin tanımı ve kimyası .....	16
2.2.3 Geopolimerin bileşenleri .....	19
2.2.4 Geopolimer kullanımının çimento üzerine etkileri.....	24
2.3 Radyasyon.....	26
2.3.1 Radyasyon türleri.....	26

2.3.2 Radyasyon kaynakları.....	28
2.3.3 Radyoaktif bozunum.....	31
2.3.3.1 Alfa ışınımları .....	32
2.3.3.2 Beta ışınımları .....	32
2.3.3.3 Gama ışınımları .....	32
2.3.4 Radyasyonun kullanım alanları .....	33
2.3.5 Radyasyonun zararlı etkileri .....	36
2.3.6 Radyasyonun zararlı etkilerinden korunma yöntemleri.....	39
2.3.6.1 Zaman kuralı .....	40
2.3.6.2 Mesafe kuralı.....	40
2.3.6.3 Müsaade edilen maksimum doz .....	40
2.3.7 Yapı malzemelerinin radyasyon geçirgenliği ve zırlama .....	41
2.4 Önceki Çalışmalar.....	42
<b>BÖLÜM III MATERYAL METOT .....</b>	<b>50</b>
3.1 Materyal .....	50
3.1.1 UKL'ye uygulanan test ve analizler .....	50
3.1.2 Rilem Cembureau standart kumu .....	54
3.1.3 Alkali aktivatör .....	55
3.1.4 Su .....	55
3.2 Metot.....	55
3.2.1 Geopolimer yapı malzemesi numunelerinin üretimi .....	56
3.2.2 UKL'lerin sıkışık BHA deneyi.....	58
3.2.3 Geopolimer yapı malzemelerinde eğilme dayanım testi .....	58
3.2.4 Geopolimer numunelerinde basınç dayanım testi.....	59
3.2.5 Geopolimer malzemelerde su emme deneyi.....	59
3.2.6 Geopolimer malzemelerde porozite deneyi .....	60
3.2.7 Geopolimer malzemelerin radyasyon sönmleme durumunun belirlenmesi ..	60
<b>BÖLÜM IV BULGULAR.....</b>	<b>62</b>
<b>BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>75</b>
5.1 Karışım 1 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Fiziksel-Mekanik Test	
Sonuçları .....	75
5.1.1 Birim hacim ağırlık, porozite ve su emme.....	75
5.1.2 Basınç ve eğilme dayanımları.....	76
5.2 Karışım 2 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Fiziksel-Mekanik Test	

Sonuçları .....	77
5.2.1 Birim hacim ağırlık, porozite ve su emme.....	77
5.2.2 Basınç ve eğilme dayanımları.....	79
5.3 Karışım 1 ve 2 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Radyasyon Sönümlenme Sonuçları .....	81
5.4 Genel Değerlendirme .....	82
KAYNAKLAR .....	84
ÖZ GEÇMİŞ .....	99
TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN ESERLER .....	100



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. ASTM C618 standardına göre UKL'nin fiziksel özellikleri .....	7
Çizelge 2.2. UKL'lerin kimyasal özellikleri.....	8
Çizelge 2.3. UKL'lerin mineralojik yapısı .....	9
Çizelge 2.4. Geopolimerin uygulaması.....	19
Çizelge 2.5. Yapı malzemelerinde alkali aktivasyon uygulamalarının tarihsel gelişimi.....	23
Çizelge 2.6. Radyasyonun deterministik etkileri.....	38
Çizelge 2.7. Radyasyonun sitokastik etkileri.....	39
Çizelge 2.8. Yıllık izin verilen radyasyon doz miktarları.....	41
Çizelge 3.1. UKL'lerin kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları .....	50
Çizelge 3.2. Rilem Cembureau standart kumunun elek analizi.....	54
Çizelge 3.3. Sadece UKL (Karışım 1) kullanılarak üretilen geopolimer malzemelerin karışım oranları .....	56
Çizelge 3.4. UKL+agrega (Karışım 2) kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinin karışım oranları .....	57

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. UKL SEM görüntüleri .....	10
Şekil 2.2. Geopolimer türleri .....	18
Şekil 2.3. Radyasyon çeşitleri.....	27
Şekil 2.4. Nüfus etmelerine göre iyonlaştırıcı radyasyonlar.....	28
Şekil 2.5. Dünya üzerinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları .....	29
Şekil 2.6. Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon türleri .....	29
Şekil 2.7. Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozları .....	31
Şekil 2.8. Radyasyonun kullanım alanları .....	33
Şekil 2.9. Radyasyon zararlarının gelişim aşamaları .....	37
Şekil 2.10. Radyasyon DNA üzerindeki direkt ve indirekt etkisi.....	37
Şekil 2.11. Radyasyondan korunma yöntemleri .....	40
Şekil 3.1. Çatalağzı (a) ve İsken (b) UKL SEM görüntüleri .....	52
Şekil 3.2. UKL elek analizi sonuçları .....	53
Şekil 3.3. Geiger-Müller sayacı ile radyoaktif kaynağın önünde geopolimer malzeme yokken (sol) ve varken (sağ) yaklaşık 1 saatlik süre içinde yapılan ölçüm....	60
Şekil 4.1. Sadece ÇUKL ve İUKL'leri (Karışım 1) kullanılarak üretilen 70 °C'de 48 saat kürlenmiş geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri.....	62
Şekil 4.2. Sadece ÇUKL ve İUKL'leri (Karışım 1) kullanılarak üretilen 100 °C'de 24 saat kürlenmiş geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri.....	63
Şekil 4.3. Rilem Cembureau kumu ile birlikte ÇUKL ve İUKL'leri kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri.....	64
Şekil 4.4. Rilem Cembureau kumu ile birlikte ÇUKL ve İUKL'leri kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri.....	64
Şekil 4.5. Karışım 1 kullanılarak 70 °C'de kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri.....	64
Şekil 4.6. Karışım 1 kullanılarak 100 °C'de kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri.....	65

Şekil 4.7. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri.....	65
Şekil 4.8. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri.....	66
Şekil 4.9. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri .....	67
Şekil 4.10. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri .....	67
Şekil 4.11. Karışım 2 ile 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri .....	67
Şekil 4.12. Karışım 2 ile 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri .....	68
Şekil 4.13. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri .....	68
Şekil 4.14. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri .....	69
Şekil 4.15. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri .....	69
Şekil 4.16. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri .....	70
Şekil 4.17. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri .....	71
Şekil 4.18. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri .....	71
Şekil 4.19. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri .....	71
Şekil 4.20. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri .....	72
Şekil 4.21. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değerleri.....	72
Şekil 4.22. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değerleri.....	73
Şekil 4.23. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değerleri.....	73

Şekil 4.24. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kütleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme değerleri..... 74



## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. UKL'lerin kimyasal analizinde kullanılan XRF cihazı.....	51
Fotoğraf 3.2. UKL'lerin morfolojisinin incelenmesi amacıyla kullanılan SEM cihazı..	51
Fotoğraf 3.3. UKL'lerin yüzey alanı ölçümünün yapıldığı BET cihazı .....	52
Fotoğraf 3.4. UKL'lere yapılan elek analizi .....	53
Fotoğraf 3.5. Rilem Cembureau standart kumunun deney için tartım aşaması .....	55
Fotoğraf 3.6. Üretilen geopolimer numunesi .....	58
Fotoğraf 3.7. Geopolimer numunelerde eğilme deneyinin gerçekleştirilmesi.....	58
Fotoğraf 3.8. Geopolimer malzemelerde basınç dayanım deneyinin gerçekleştirilmesi.....	59
Fotoğraf 3.9. Tez çalışmasında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi için tasarlanmış kurşun levha ile kaplanmış kafes, radyasyon kaynağı ve Geiger-Müller sayacı.....	61

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\gamma_k$	BHA (g/cm <sup>3</sup> )
$\gamma_s$	Özgöl ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BET	Yüzey Alanı Ölçüm Analizi
BHA	Birim Hacim Ağırlık
GeV	Gigaelektron Volt
KeV	Kiloelektron Volt
LOI	Kızdırma Kaybı
mSv	Milisievert
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
OPC	Sıradan Portland Çimentosu
P	Porozite (%)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
Sv	Sievert
TGA	Termogravimetrik Analiz
TS	Termik Santral
TS EN	Türk Standartları Avrupa Normu
UKL	Uçucu Kül
XRD	X-Işını Kırınımı
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
YFC	Yüksek Fırın Curüfu

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Günümüzde özellikle gelişmekte olan ülkelerde farklı katı atık tiplerinin miktarlarındaki artıştan dolayı atık yönetimi ciddi bir sorun haline gelmiştir. Birçok ülke gibi Türkiye de etkin bir katı atık yönetimine sahip olmadığından atık dönüşümü konusunda bilgi eksikliği ve ekonomik nedenlerden dolayı bazı sorunlar yaşamaktadır.

Ülkelerin hızlı gelişmeleri sonucu enerji tüketimleri artmış ve enerji ihtiyaçları ortaya çıkmıştır. Enerji tüketimindeki artışlar ve gelişen sanayiden dolayı farklı tiplerde katı atık oluşmakta ve bu atıklar ciddi çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Çağımızın en büyük sorunlarından biri olan küresel ısınmada fosil kaynak yakıtların rolü fazladır. Fosil kaynak kullanımının çevreye verdiği zararı en az seviyeye indirmek veya tamamen yok etmek için yenilenebilir kaynaklar kullanılmalıdır (Kaplan ve Gültekin, 2010). Eğer artan enerji tüketimi göz önünde tutulmaz ve gerekli önlemler alınmaz ise öncelikle tarım alanlarının verimliliği azalacak, topraktaki besin ve mineraller değişime uğrayacak, daha sonra büyük su sorunları yaşanacak ve başta sucul canlılar olmak üzere bütün canlılar zarar görecektir. Bunların yanı sıra küresel baz da iklim değişikliklerine bağlı olarak ekosistemde bozulmalar oluşacaktır (Doğan, 2011).

Çevre kirliliği; endüstri başta olmak üzere çeşitli insan aktiviteleri sonucunda ortaya çıkan gaz, sıvı ve katı gibi atıkların hava, su ve toprağa bırakılması, radyoaktif maddelerin yayılması ve havada oluşan titreşimin meydana getirdiği gürültü ile doğanın ekolojik dengesinin bozulması ve bunun sonucunda bütün canlıların zarar görmesi olarak tanımlanmaktadır (Karabulut, 2000). Artan enerji kullanımına bağlı olarak endüstriyel faaliyetler sonucunda atmosfere yıllık yaklaşık 20 milyar ton oranında karbondioksit (CO<sub>2</sub>), 100 milyar ton kükürt bileşenleri, 2 milyar ton kurşun ve diğer birçok zararlı kimyasal salınmaktadır (DPT, 1992). Bütün Dünya ülkelerinde fosil yakıtlar çevreye ve doğaya çok büyük zarar vermektedir. Doğalgaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtların kullanılması sonucunda son 150 yılda atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun %116 oranında artarak küresel ısınmaya sebep olduğu bilinmektedir (Doğan, 2011).

Dünyada nüfus artışı devam ettikçe, insanların temel ihtiyaçları da artmaktadır. Bu temel ihtiyaçları karşılamak amacıyla kaliteli, sürdürülebilir ve dayanıklı betonarme yapılar inşa edilmelidir. Bu yapılar inşa edilirken kullanılan temel malzeme ise betondur. Beton, basitçe çimento, su, agrega ve ihtiyaca göre kimyasal katkı maddelerinin belli oranlarda homojen bir şekilde karıştırılmasıyla oluşur. Endüstriler arasında beton ve çimento endüstrisi, doğal kaynakların en çok tüketildiği ve tüketilirken de doğanın ekolojik dengesine en çok zarar verildiği endüstridir (Demirtaş, 2006).

Türkiye’de yıllık yaklaşık 100 milyon m<sup>3</sup> civarında beton üretilmektedir ve bu betonu üretebilmek için 30 milyar ton çimento, 165 milyar ton agrega ve 15 milyar ton su tüketilmektedir. Kullanılan malzemeler ve büyüklükleri dikkate alındığında beton üretiminin doğaya verdiği zarar açıkça görülebilir.

Termik santrallerde (TS) pulverize kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan ve elektrostatik fitrelerde tutulan, depolanması ve bertaraf edilmesi açısından çevreye oldukça zararlı olan uçucu kül (UKL), yeniden kullanılabilen bir endüstriyel atıktır.

Sürdürülebilir kalkınma için doğal kaynaklar doğru ve verimli kullanılmalıdır. Bunu sağlayabilmek için de doğal kaynakları tüketmek yerine geri dönüştürülebilir endüstriyel atıkları başka bir endüstride ham madde olarak yeniden kullanmak iyi bir çözüm olacaktır (Demirtaş, 2006).

Bu tez çalışmasına UKL’nin sebep olduğu çevresel sorunları gideren inşaat sektöründe kullanmaya uygun mekanik-fiziksel özelliklerde ve modern hayatın getirisi olan radyasyonu sönmüleyebilen, çevre dostu yapı malzemesi üretmek ve radyasyonu sönmüleme sistemi tasarlamak amaçlanmıştır. Zonguldak Çatalağzı ve Adana İsken TS, UKL’lerinden farklı kombinasyon ve karışımlar kullanılarak alkali (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) aktivasyonu ile 70 ve 100 °C kütleme sıcaklıklarında geopolimer yapı malzemeleri üretilmiş bu malzemelerin radyasyon sönmülemesini belirlemek için bir düzenek dizayn edilmiş ve malzemeler üzerine fiziksel-mekanik testler uygulanmıştır.

## BÖLÜM II

### GENEL BİLGİLER

Sanayi devriminden 20. yüzyıl sonlarına kadar çevre sorunları ihmal edilmiş ve gerektiği kadar üzerinde durulmamıştır. Büyük boyutlara ulaşan çevre sorunlarının ekolojik açıdan olduğu kadar ekonomik açıdan da önemli olduğu anlaşılmış. 20. yüzyıl sonlarına doğru araştırmacıların ve birçok bilim dalının konusu olmuştur (Toprak, 2006).

Hızla artan nüfus, kentleşme ve teknolojik yenilikler nedeniyle yükselen yaşam standartları, endüstri, madencilik, evsel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan katı atıkların miktarının ve çeşitliliğinin artmasına katkı sağlamıştır. 2002 yılında üretilen atık miktarı yaklaşık olarak 12 milyar ton olup bunun 11 milyar tonunu endüstriyel atıklar oluşturmaktadır. 2025 yılına kadar yılda yaklaşık 19 milyar ton katı atık üretilmesi beklenmektedir (Pappu vd., 2007).

İnsanların yaşam standardı ve ihtiyaçları arttıkça enerji gereksinimleri de artmaktadır. Bu gereksinimlerini karşılayabilmek adına özellikle düşük kalorili ve yüksek kül oranına sahip kömürden yararlanılmaktadır. Bu sebeple de Dünya’da ve Türkiye’de kömür yakılarak işletilen TS’ler kurulmuştur (Şengül, 2007).

TS’lerde kömürün yakılması sonucunda açığa çıkan UKL, yanan kömürün içerisinde, yanma gazı sırasında eriyerek yanma gazının etkisinde şişen inorganik materyallerin oluşturduğu, içi boş veya dolu küreciklerin baca gazıyla sürüklenen yanmış kömürün bir atığıdır. Büyük oranda ince taneciklerden oluşan UKL, elektrostatik çöktürücü mekanik filtrelerle tutulur ya da bacadan salınır. Türkiye’deki enerji üreten TS’lerden bir yılda yaklaşık olarak 15 mt UKL atığı oluşmaktadır ve günümüzde ise yıllık UKL miktarının 50 mt geçmesi beklenmektedir (Kaplan ve Gültekin, 2010). Dünyada UKL salınımı devam edecek ve giderek artacaktır; eğer gerekli tedbirler alınmaz ise bu artış ciddi çevresel sorunlara neden olacaktır (Şengül, 2007).

Çimento üretimi her yıl yaklaşık %3 artmaktadır (McCaffrey, 2002). Bir ton çimento üretebilmek için fosil yakıtların yanması sırasında fırında kireçtaşının karbondan arındırılması sonucu atmosfere yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> salınmaktadır (Roy, 1999).

Betonarme yapılar için üretilen Portland çimentosunun Dünya çapında sera gazı emisyonuna katkısı yıllık yaklaşık olarak 1,35 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir (Malhotra, 2002; Hardjito ve Rangan, 2005). Çimento, alüminyum ve çelikten sonra inşaat sektöründe enerji açısından en yoğun olarak kullanılan malzemedir. Sıradan Portland çimentosunun (OPC) beton dayanıklılığı incelendiğinde, özellikle aşındırıcı ortamlarda, inşa edilen birçok beton yapının 50 yıldan fazla hizmet ömrü için tasarlanmış olmasına rağmen 20-30 yıl sonra deformasyonların başladığı gözlenmiştir (Mehta ve Burrows, 2001; Hardjito ve Rangan, 2005).

Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu, başta çimento endüstrisi olmak üzere diğer birçok endüstriler için de kritik bir faktördür. Çünkü CO<sub>2</sub> emisyonlarının yarattığı sera etkisi, iklim değişikliklerine neden olabilecek küresel sıcaklıkta bir artışa neden olmaktadır. Kabul edilebilir emisyonlar, Dünya'daki ülkelerin Birleşmiş Milletler toplantılarıyla belirlenen emisyon azaltma hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olması beklenen ekonomik mekanizmaları ifade eder. Bunların sonucunda 1 ton emisyonun işlem değerinin yaklaşık olarak 10 ABD doları olabileceği yönünde spekülasyonlar ortaya çıkmıştır (Malhotra, 1999a; Malhotra, 2004b).

Beton endüstrisindeki bu sorunlar Dünya çapında ilgi görmeye başladı ve Amerika'da bu konuları ele almak için ABD Beton Endüstrisi Vizyon 2030 adlı bir belge hazırladı. Bu belgeye göre betonu altyapı gelişimi için tercih edilen bir inşaat malzemesi olarak tutma ve aynı zamanda onu gelecek için çevre dostu bir malzeme yapma stratejileri özetlenmiştir. Beton teknolojisi uzmanları, betonu tercih edilen bir inşaat malzemesi olarak yansıtırken, çevresel kaliteyi koruyacak şekilde gelecekteki gelişmelere öncülük etme zorluğu ile karşı karşıyadırlar.

Hava kirliliğine karşı gerekli önlemler alınmaz ise atmosferdeki kirlilik ve küresel ısınmanın etkisi artacaktır. Bu sorunlar Dünya ülkeleri tarafından daha ciddiye alınmalı, etkisini azaltmak için yapılan endüstriyel işler daha fazla dikkate alınmalı ve çaba gösterilmelidir.

Çevre dostu beton üretmek için daha az doğal kaynak ve enerji kullanılmalı ve CO<sub>2</sub> emisyonu en aza indirilmelidir (Mehta, 2002; Hardjito ve Rangan, 2005). Bu çabalar “endüstriyel ekoloji” olarak adlandırılmıştır. McCaffrey (2002), çimento üreten endüstriler tarafından CO<sub>2</sub> emisyon, çimentoda kullanılan kalsine edilmiş malzeme ve betonda çimento kullanım miktarının ve çimento kullanarak üretilen bina sayısının azaltılması ile çevreye verilen olumsuz etkinin azaltılabileceğini öne sürmüştür.

## **2.1 Uçucu Kül**

Amerikan Beton Enstitüsü Komitesi (ACI)'ne göre UKL, toprak veya toz kömürün yanması sonucu oluşan ve baca gazları tarafından yanma bölgesinden parçacık giderme sistemine taşınan ince bölünmüş kalıntı olarak tanımlanmaktadır (ACI, 2004). ASTM'ye göre ise toz kömür veya zemin yanma sürecinden kaynaklanan ve baca gazları ile aktarılan ince boyuttaki kalıntı olarak tanımlanmıştır. UKL, yanma gazlarından toz toplama sistemi tarafından çevreyi olumsuz etkilememeleri için mekanik olarak veya elektrostatik çökticiler kullanılarak atmosfere boşaltılmadan önce çıkarılır. UKL parçacıkları genel olarak küresel şekildedir ve OPC'den daha ince olup, çapı 1 µm'den küçüktür.

Yüksek sıcaklıkta kimyasal olarak fazla değişmeyen kuvars dışında diğer kömür minerallerinin çoğu yanma sırasında ayrışmaktadır. Kil mineralleri su kaybederler ve çeşitli camsı birleşiklere dönüşürler. Kömürdeki yanmaz maddenin türleri ve göreceli miktarları, UKL'nin kimyasal bileşimini belirlemektedir. Kimyasal bileşim esas olarak alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silisyum oksit (SiO<sub>2</sub>) ve kalsiyum oksitten (CaO) oluşurken, potasyum, sodyum, magnezyum, titanyum ve kükürt de daha az miktarda bulunur. UKL kimyasal bileşimi üzerindeki en büyük etki kömür türünden gelir. Bitümlü kömürün yanması, bitümlü kömürden UKL'den daha fazla kalsiyum ve daha az demir içermektedir. UKL'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri yanma yöntemlerine, kömür kaynağına ve parçacık şekline bağlıdır.

### **2.1.1 UKL'nin genel özellikleri**

UKL genellikle buhar üreten santraller ve kömür yakıtlı elektrikli termik santraller tarafından üretilir. Karakteristik olarak ise kömür yakılarak toz haline getirildikten

hemen sonra doğrudan kazanın ateşleme odasına hava ile üflenir, burada ısı ve erimiş bir mineral kalıntı oluşur. Kazan boruları kazandan ısıyı alır, baca gazını soğutur ve erimiş mineral kalıntısının sertleşmesine ve kül oluşturmasına neden olur. Daha hafif ince kül parçacıkları UKL olarak adlandırılır ve bu parçacıklar baca gazında asılı kalır. Taban altı külü olarak adlandırılan kaba kül parçacıkları ise yanma odasının altına düşer ve orada birikir.

ASTM C618 (2000)'de yakılan kömürün türünden kaynaklanan kimyasal bileşime bağlı olarak C ve F olmak üzere iki ana UKL sınıfı belirlenmiştir. Yüksek kalsiyuma (%20-40 fazla) sahip olan ve genellikle alt bitümlü veya linyit kömürün yakılması sonucu oluşan kül C sınıfı UKL'dir. C sınıfı UKL'ye göre daha az kalsiyum içeren ve bitümlü veya antrasit kömürün yakılmasıyla oluşan kül ise F sınıfı UKL'dir.

ASTM standardına göre C ve F sınıfı UKL'ler arasındaki en önemli fark UKL'deki silika, kalsiyum, alümina ve demir içeriğidir. C sınıfı UKL, F sınıfı ile karşılaştırıldığında daha az miktarda silika ve alümina içerirken, yüksek kalsiyum oksit (CaO) miktarı ile reaksiyon hızı artar. Bunların yanı sıra C sınıfı UKL'deki yüksek kalsiyum miktarı hızlı bir reaksiyonda ürün oluşturabilir ve daha uzun priz süresi veya işlenebilirlik gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilir (Humur, 2018). UKL'nin bu özellikleri dışında tekdüzelik, incelik, renk ve ateşleme kaybı (LOI) da önemli özelliklerindedir (Humur, 2018).

#### **2.1.1.1 UKL'nin fiziksel özellikleri**

UKL, çok küçük tane yapısına ve genellikle grinin koyu tonlarına sahip olan bir yanmış kömür atığıdır. UKL'nin rengini belirleyen yakılan kömürün cinsi ve yanma şeklidir. Eğer termik santralde yakılan kömür tam olarak yanmaz ise UKL'nin rengi yanmamış karbondan dolayı siyah renkte olacaktır. Kömür verimli bir şekilde yakılırsa UKL'nin rengi gri olacaktır.

UKL boyutu termik santrallerde yakılan kömürün öğütülme miktarı ve termik santrallerin bacaların da toplanma şekillerine göre farklılıklar gösterir. UKL'lerin boyutları genellikle 0,5-200 µm arasında değişirken yüzey alanları ise 2800-3800 cm<sup>2</sup>/g

arasındadır. UKL'ler içi dolu küresel taneciklerdir ve bu taneciklerin yoğunluğu genel olarak 2,2-2,7 g/cm<sup>3</sup> arasındadır (Güler vd., 2015; Humur, 2019).

UKL'nin fiziksel karakteristikleri TS EN 450-1 (2013) standardında genişleme, priz başlangıç zamanı, tanecik yoğunluğu, su, aktivite indeksi ve incelik olarak belirtilmiştir. TS EN de belirtilen bu fiziksel özellikler, yakılan kömürlerin kimyasal bileşimleri, öğütülme inceliğine, yanma derecesine, yakma sisteminin tipine, yanma miktarına ve UKL'nin toplanma şekline göre farklılık göstermektedir. UKL'nin fiziksel özellikleri çimentonun sertleşmiş ve taze haldeki özelliklerini etkilemektedir. ASTM C618 (2000) standardında verilen UKL'lerin fiziksel özelliklerine ait sınır değerleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** ASTM C618 standardına göre UKL'nin fiziksel özellikleri

<b>Fiziksel Özellikler</b>	<b>(%)</b>	<b>F sınıfı</b>	<b>C sınıfı</b>	<b>N sınıfı</b>
İncelik (+45 µm)	maksimum	34	34	34
Dayanım Aktivite İndeksi	minimum	75	75	75
Su İhtiyacı	maksimum	105	105	115
Genleşme Miktarı	maksimum	0,8	0,8	0,8
Yoğunluktan Sapma Miktarı	maksimum	5	5	5
45 µm Elekte Kalan Sapma	maksimum	5	5	5

Dayanım aktivite indeksi, UKL'lerin dayanım kazanma özellikleri tespit edilirken dikkate alınmaktadır. Dayanım aktivite indeksi ASTM C618'e (2000) göre F, C ve N sınıfı küller için en az %75 olmalıdır bu değer TS EN 450'ye (2013) göre ise 28 günlük numuneler için %75 iken 90 günlük numuneler için en az %85 olmalıdır (Durak, 2019; Erdoğan, 2015; ASTM C618, 2000; TS EN 450, 2013).

### **2.1.1.2 UKL'nin kimyasal özellikleri**

UKL'ler kimyasal özellikleri açısından incelendiğinde yakılan kömürün yapısı, kömürün yakılma şekli, külün toplanma şekli, jeolojik kökeni ve desülfürizasyon gibi özelliklerinin etkili olduğu görülür. UKL asıl olarak silika (SiO<sub>2</sub>), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve demir oksitten (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) meydana gelmektedir. Bunların yanı sıra SO<sub>3</sub>, MgO, CaO, alkaliler ve yanmamış kömür parçacıkları (karbon) da UKL bünyesinde yer alabilir.

UKL’de az miktarda bulunan oksitler, alkaliler ve karbon UKL’nin kimyası için iyi bir durumdur. En fazla %5 oranında MgO, alkali oksitler ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) %5’in altında,  $\text{SO}_3$  miktarı ise genel olarak %0,2-2,5 arasında değişmektedir (Durak, 2019; Baradan vd., 2015; TS EN 450, 2013).

Genellikle F sınıfı UKL’lerin kimyasal içeriğinde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %85’in üzerinde olmalıdır. UKL’nin yeterli oranda puzolanik aktivite gösterebilmesi için bu üç temel oksitin F sınıfı UKL’de en %70 oranında C sınıfı UKL’de ise en az %50 oranında olması gerekmektedir. UKL’lerin betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi için gereken kimyasal özelliklerine ait sınır değerler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir (Durak, 2019; Erdoğan, 2015).

**Çizelge 2.2.** UKL’lerin kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	(%)	TS EN-450	ASTM C618	
			F sınıfı	C sınıfı
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	minimum	0	70	50
$\text{SO}_3$	maksimum	3	5	5
Nem İçeriği	maksimum	0	3	3
MgO	maksimum	0	0	0
$\text{Na}_2\text{O}$ , Alkaliler	maksimum	0	1.5	1.5
Cl	maksimum	0.1	0	0
Kızdırma Kaybı	maksimum	0	6	6

UKL’ler arasında yalnızca F sınıfı UKL’ler puzolanik özellik gösterebilmektedir; bunun nedeni ise  $\text{CaO}$ ’in F sınıfı UKL’lerde %10’dan daha az olmasıdır.  $\text{CaO}$  miktarı %10’dan fazla olan C sınıfı gibi diğer küllerin bağlayıcılık özellikleri daha azdır (Durak, 2019; Erdoğan, 2015).

### 2.1.1.3 UKL’nin mineralojik özellikleri

UKL’nin mineralojik özellikleri incelendiğinde genel olarak yakılan kömürün bünyesinde bulunan alçıtaşı, kuvars, karbonat ve kil gibi minerallerin miktarı, kömürün yakıldığı sistemin özellikleri ve jeolojik kökeni gibi özelliklere göre değişiklik göstermektedir. UKL’ler kristalize ve camsı yapılara sahiptirler. Kimyasal yapılarında alüminyum, demir, kalsiyum, silisyum ve kükürt gibi başlıca elementlerin yanı sıra

MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> gibi oksitlerde bulunmaktadır. Kömürün yakılma şekline göre bu elementler CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SO<sub>3</sub> gibi temel bileşenleri meydana getirirler. F sınıfı gibi düşük miktarlarda CaO içeren küller camsı faz, kuvars (SiO<sub>2</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ve mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) içermektedir. C sınıfı UKL'ler gibi yüksek CaO içeren küller ise camsı faz ile birlikte kuvars, hematit, gehlenit, serbest kireç, mellilit, anhidrit (CaSO<sub>4</sub>), C<sub>3</sub>A (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), CS (CaO.SiO<sub>2</sub>), C<sub>2</sub>S(2CaO.SiO<sub>2</sub>), ve mervinit gibi mineraller içermektedir. Bunların yanı sıra bu bileşenlerle birlikte yüksek kireçli küllerin bünyesinde kalsit, trisülfoalüminat (4CaO.3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O), portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>), ve mullit de bulunabilmektedir (Durak, 2019; Enders, 1996; Karahan, 2006).

UKL son zamanlarda çimento ile birlikte yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. UKL'nin çimento ile birlikte kullanımını etkileyen en önemli özelliği mineralojik özelliğidir. UKL'nin puzolanik özelliğini etkileyen mineralojik yapısının camsı faz ve kristal olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle camsı fazı, UKL'nin puzolanik özelliğini büyük oranda belirler. Düşük ve yüksek kireçli UKL'lerde camsı fazda değişim göstermektedir. Düşük kireçli UKL'lerde puzolanik aktivite, yüksek kireçli küllerdeki puzolanik aktiviteye göre daha iyidir (Durak, 2019; Türker vd., 2009). UKL'lere ait mineralojik özellikler Çizelge 2.3'de verilmiştir.

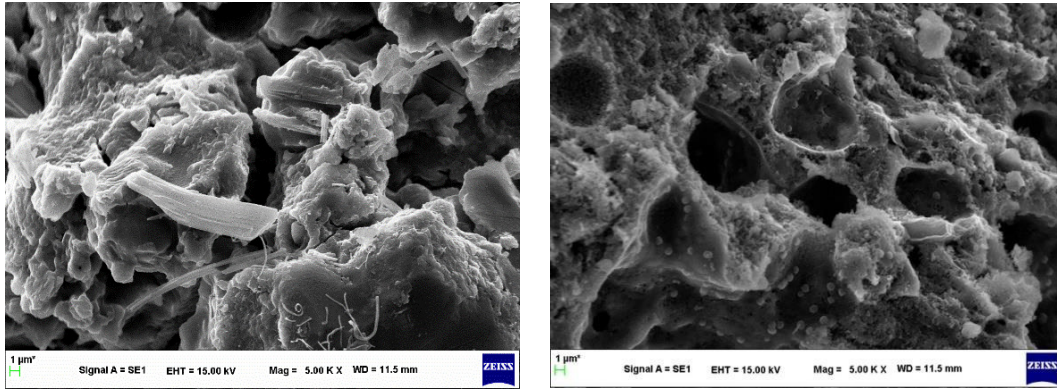
**Çizelge 2.3.** UKL'lerin mineralojik yapısı (Durak, 2019; Şimşek, 2004)

<b>Mineral (%)</b>	<b>Silikoaluminöz</b>	<b>Sülfokalsik</b>	<b>Silikokalsik</b>
Camsı ve amorf faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuvars	5	5	5
Anhidrit	0	15	5
Serbest kireç	0	20	10
Feldspat ve gehlenit	0	≥20	≥15

#### 2.1.1.4 UKL'nin morfolojik özellikleri

UKL'lerin şekilleri ve tanecik boyutları yakılması sonucu elde edilen kömürün kaynağına, hangi sistemde ve nasıl yakıldığına, yanma sonucu oluşan taneciklerin toplanma şekillerine göre farklılık göstermektedir (Durak, 2019).

UKL, boyutu 0,5-150 µm arasında farklılık gösteren küresel ve düzensiz şekilli taneciklerdir. UKL'de bulunan kireç miktarı taneciklerin şekil ve büyüklüklerini belirlemektedir. Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluklu veya boşluksuz küresel yapılar, büyük bir küre içerisinde, küçük kürecikler kümesi bulunduran yapılar, yüzeyi düzensiz biçimde dağılmış ve şekilsiz boşluklar bulunduran yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları yer alan yapılar, yüzeyi kristal kaplanmış yapılar, formu bozulan yapılar, yüzeyinde şekilsiz kalıntılar bulunduran yapılar gibi çeşitli şekillerde yer alabilirler (Durak, 2019; Bosbach ve Michael, 1998). Küresel olmayan dağınık tanecikler ise kömürde yanma reaksiyonlarına girmemiş kuvars gibi minerallerin düzensiz şekilli ve gözenekli yapılarından oluşmaktadır (Durak, 2019). Şekil 2.1'de UKL'nin morfolojik yapısına ait örnek SEM görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 2.1. UKL SEM görüntüleri

Kireç miktarı az olan UKL'ler içi tamamen dolu ve şekil olarak küreseldirler; yüksek miktarda kireçli olan UKL'ler küresel ve köşeli düzensiz bir şekle sahiptirler. UKL'lerin sahip oldukları bu şekiller homojen olup olmadıkları konusunda belirleyici bir özelliktir. Bünyesindeki kireç miktarı az olan küller yüksek olan küllere kıyasla şekil dağılımı bakımından daha homojen bir yapıya sahiptirler (Tanosaki vd., 1998; Durak, 2019). UKL'nin puzolanik aktivitesini arttıran bir diğer özellik ise tane büyüklüğüdür,

UKL'nin tane büyüklüğü 40 µm'nin altında olmalıdır. Pürüzsüz yüzeye sahip olan küresel şekildeki UKL'ler, daha geniş yüzey alanına sahip oldukları için kireç silikat reaksiyonuna daha çabuk girerek dayanım hızını artırmaktadır. Bundan dolayı yüksek kireç miktarına sahip UKL'lerde kristalize aktif fazlar ve az camsı faz önemlidir. Kireç miktarı az olan UKL'ler de ise boyut dağılımı, fazla miktardaki camsı faz ve tanecik şekli önemlidir.

### **2.1.2 UKL'nin kullanım alanları**

Enerji ihtiyacına bağlı olarak artış gösteren TS'lerden dolayı UKL miktarı da artmıştır. Giderek artan bir çevre sorunu haline gelen UKL'ler, son zamanların ilgi gören konuları arasında yerini almıştır. Başlarda UKL'lerin genel özellikleri, yapısı ve kullanım alanlarına yönelik çalışmalar, zaman içinde laboratuvar ortamında ve arazilerde geliştirilmiştir (Güler vd., 2005). Yapılan UKL çalışmalarında inşaat sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılarak değerlendirileceği sonucuna varılmıştır.

Dünyada yıllık olarak 600 milyon ton UKL elde edilmektedir. Türkiye'de ise bu miktar 13 milyon ton civarlarındadır. Enerjide ithal bağımlılığı azaltmak için kömürün kullanılmasından dolayı bu rakamların artması beklenmektedir. Bu sebepten ve UKL'nin çevresel zararları göz önüne alındığında UKL'yi değerlendirme çalışmalarına karşı ilgi de giderek artmıştır. Günümüzde açığa çıkan UKL'nin sadece %15'i değerlendirilmektedir. Birçok ülkede UKL'nin kullanılma sebebi, beton üretimi esnasında hidrasyon ısını açığa çıkarmak ve baraj inşaatında kullanılmasıdır. UKL ülkemizde ilk olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamalarının yanında Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'de çeşitli köprü ve yol yapımında UKL kullanmıştır. Hazır beton endüstrisinin gelişmeye sürekli açık olması UKL'ye olan ilgiyi arttırmaktadır (Tokay, 2019; Türker vd., 2009).

#### **2.1.2.1 Çimentoda UKL kullanımı**

Çimento sanayisi UKL'nin en çok kullanıldığı alanların başında gelmektedir. Türkiye'de 1980'den sonra katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, %90'nın

üstündedir (Aruntaş, 2006; Öztekin ve Cimilli, 1987). UKL'ların çimento üretiminde, hammadde, katkı maddesi ve ikame malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Aruntaş, 2006).

Çimentonun başlıca ham maddelerinden olan kil ve kalkere karıştırılan UKL, klinker üretiminde kullanılmaktadır. Eğer UKL çimentoda katkı maddesi ya da ikame malzemesi olarak kullanılır ise enerji tasarrufu sağlamakta ve daha uygun fiyatlarda çimento üretimine katkıda bulunmaktadır. Türkiye'deki birçok TS'lerden çıkan UKL'ler üzerine yapılan çalışmalarda UKL'lerin spesifik yüzey alan değerleri çimento standartlarında aranan en az 2800 cm<sup>2</sup>/g değerinden fazla ya da yaklaşık olarak eşit bulunmuştur (Aruntaş, 2006; Tokyay ve Erdoğan, 1998). Bu sonuçlar, UKL'lerin direkt çimento üretiminde veya üretim sonrası çimento yerine kullanılabileceğini göstermektedir. UKL'nin çimentonun yerine kullanılması, çimento üretiminin çevreye verdiği olumsuz etkileri ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda enerji tüketiminin ve çimento üretimi sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> gibi zararlı gazların miktarının azalacağı öngörülmektedir.

UKL'nin çimento ile birlikte yapı malzemesi olarak kullanılması, beton özelliklerinde olumlu ve olumsuz bazı etkileri ortaya çıkarmaktadır. UKL, taze betonda işlenebilirliği artırabilirken terlemeyi azaltmakta ve betonun hidratasyon hızını azaltmaktadır, sertleşmiş haldeki betonda su geçirme miktarını azaltabilirken, sülfatlara karşı direncini artırabilmektedir. Bu etkilerin yanı sıra ekonomiktir (Erdoğan, 2015; Durak, 2019). UKL'nin sebep olduğu olumsuz etkiler; betonun priz süresini bir miktar geciktirir, betonun özellikle erken yaşlarda dayanım kazanma hızını yavaşlatır, betonun kür süresinin artmasına neden olur, betonda belirli bir miktar sürüklenmiş hava elde edebilmek için kullanılması gerekli olan hava sürükleyici katkı maddesi miktarının artmasına sebep olmaktadır (Erdoğan, 2015; Durak, 2019).

Birçok Avrupa ülkesinde UKL çimento üretiminde kullanılmıştır. İtalya'da UKL'nin %1'i ve Fransa'da 4 mt/yıl UKL'nin %25'i çimento üretiminde kullanılmıştır. ABD'deki UKL'nin %25'i çimentoda kullanılırken Çin'de UKL+kireç karışımı 50 yıldır duvar çimentosu olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de çimento üretiminde kullanılan UKL, 1980 yılına kadar 40.000 tondu (Jueshi vd., 2001; Aruntaş, 2006).

### **2.1.2.2 Agregada olarak UKL kullanımı**

UKL agregada olarak betonda ve harç üretiminde kullanılmaktadır. UKL'nin betonda üç farklı amaçla kullanılabilir. Bunlar, yapay hafif agregada, ince agregada ve hafif iri agregadadır. Sinterlenmiş UKL hafif agregada, içi dolu ya da boş blok üretiminde normal agregada yerine kullanılabilir hatta yüksek binaların inşaatında zati yükü azaltmaktadır (Aruntaş, 2006; Verma vd., 1998).

Literatürde, UKL sinterlenerek yapay iri hafif agregada olarak üretilmiş, hafif beton yapımında kullanılmış ve betonun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun yanı sıra Kaplan ve Gültekin (2010), araştırmalarında UKL ve OPC karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların hafif beton ve taşıyıcı beton üretiminde kullanılabileceğini açıklamışlardır. Collivignarelli ve Sorlini (2001), endüstriyel atıkların inşaat malzemesi olarak kullanılması üzerine yaptıkları bir araştırmada, beton üretiminde normal agregada yerine “geri dönüştürülmüş agregada” olarak adlandırılan atık agregada kullanılması açıklamış ve çalışmalarını sonucunda atık agregada ile üretilen betonda normal agregada içeren betonun aynı sonuçlar verdiğini açıklamışlardır. İngiltere’de nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş UKL, hafif agregada olarak betona ilave edilerek kullanılmıştır (Aruntaş, 2006; Davies ve Kitchener, 1996).

### **2.1.2.3 Betonda UKL kullanımı**

UKL, normal ve hafif betonun yanı sıra giderek yayılan hazır beton üretiminde hem katkı hem de ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. UKL inşaat sektöründe genellikle betonda kullanılmaktadır. Beton üretiminde UKL kullanımı, betonun dayanımını arttırmakta ve betonun radyasyonu sönmeme durumuna katkı sağlamaktadır. Binici vd. (2012) çalışmasında UKL kullanılarak üretilen bir betonda radyoaktif geçirgenliğinin olduğunu belirtmiştir. UKL'nin etkin kullanım alanlarından biri de betonarme çeliğidir. Montemor vd. (2000) bağlayıcı miktarının yarısı kadar UKL kullanarak beton üretimi yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda UKL ilavesinin beton direncini arttırdığını ve çeliğin oksitlenme oranını azalttığını açıklamışlardır. Dünya ve Türkiye’de betonun hidrasyon ısısını düşürmesinden dolayı UKL birçok baraj yapımında kullanılmıştır. ABD’deki bir barajın ve İngiltere’deki nükleer enerji santralinin inşaatında binlerce ton UKL katkı malzemesi olarak kullanılmıştır (Aruntaş, 2006).

#### **2.1.2.4 Tuğla ve kerpiç yapımında UKL kullanımı**

UKL belli oranlarda ve çeşitli malzemelerle beraber tuğla üretiminde kullanılabilir. Manuel olarak çalışan tuğla makinesinin kullanıldığı bir araştırmada UKL, kum ve kireç birlikte belli oranlarda karıştırılarak tuğla üretmek amacıyla kullanılmıştır (Aruntaş, 2006).

Kerpiç üretilirken, killi toprak ve saman kullanılmaktadır. Kerpiç suya karşı dayanıksız ve dayanımı düşük bir yapı malzemesidir. Kerpiçin özelliklerini iyileştirmek amacıyla UKL ile birlikte kullanıldığı çalışmalar literatür de yer almaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, UKL'nin kerpiçin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve kerpiç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak UKL'nin kullanılabileceğini göstermektedir (Aruntaş, 2006).

#### **2.1.2.5 Yapı malzemesi üretiminde UKL kullanımı**

UKL'ler, yalıtım malzemesi, duvar, gaz beton, beton boru, cam ve harç gibi yapı malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır (Baradan, 1987; Aruntaş, 2006). Yapılan bazı çalışmalar sonucunda, UKL'nin yük taşımayan panel ve blok üretiminde kullanılabileceği açıklanmıştır. Başka bir araştırmada UKL içerisinde bulunan silisten dolayı, gaz beton eldesin de silis kaynağı olarak ham maddeyle beraber kullanılmıştır (Ropelewski ve Neufeld, 1999; Aruntaş, 2006).

Literatürde yer alan diğer birçok çalışmada UKL, seramik kaplama malzemesi üretiminde, içeriğinde silikatlı oksitler olmasından dolayı cam seramik üretiminde, suya karşı dayanıklı seramik benzeri yapı malzemesi ve prina ile beraber kullanılmasında ise suya dayanıklı ahşap benzeri yapı malzemesi üretiminde kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

#### **2.1.2.6 Geoteknik çalışmalarda UKL kullanımı**

UKL geoteknik çalışmalarda, zemin iyileştirmede, dolgu ve set yapmak maksadıyla kullanılmaktadır. Ayrıca UKL, sızıntıları önlemek amacıyla katı atık depolama sahalarında, donatılı zemin istinat duvarlarında arka dolgu olarak, yol kaplamasında

dolgu tabakası yapımında ve atık sahalarının üstüne yapılan beton kaplama ya da döşemelerdeki oturma deformasyonlarının onarımı için kireç ile birlikte enjeksiyon uygulamasında kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

## 2.2 Geopolimer

### 2.2.1 Geopolimerin tarihçesi

Geopolimer terimi 1978 yılında ilk olarak Prof. Dr. J. Davidovits tarafından zeolit benzeri kimyasal bileşime sahip ancak amorf mikroskobik ile metal hacimleri ailesini karakterize etmek için kullanılmıştır (Humur, 2018). Elde edilen malzemenin plastik gibi parlak ve pürüzsüz olması polimer ismini almasında önemli olmaktadır. Geopolimer teknolojisi bir polimerleşme prosesidir ve özellikle Si, Ca, Al, Na, K, Mg ve P moleküllerini bulunduran monomerlerin birbirleri arasında polimerleşme reaksiyonları sonucunda oluşan karmaşık kovalent zincir bağlı polimer kurmasıyla oluşmaktadır (Gümüş, 2016).

Geopolimer, hidrotermal polimerleşme reaksiyonları sonucunda -içinde bulunan suyu fiziksel ve kimyasal yollarla kaybederek zeolit kayaçlarının tanecik yapısına benzer bir yapıya ulaşan- zeolit kayaçların kristallerinden farklı olarak şekilsiz hegzagonal moleküler bağ yapısına sahip alümina silikat topraklardan oluşan malzemedir (Keyte vd., 2006; Gümüş, 2016). Geopolimerin ve zeolitin arasındaki en önemli fark 80 °C'de sentezlenebilmesidir. Geopolimer malzeme bu farklılıktan dolayı su moleküllerinin bir kısmını bünyesinde tutmaktadır (Zeybek, 2009).

Avrupa'da 1950'lerde OPC'nin olumsuz etkileri dikkat çekmeye başlamış ve bilim adamları tarafından araştırma konusu olmuştur. 1950 yılında Victor Glukhovsky hidrosodalit elde edilmesi çalışmalarına başlamış ve zeolitin alt yapısını oluşturmuştur. Glukhovsky ve arkadaşları tarafından, Al ve Si içeren malzemelerin alkali aktivatörlerle olan tepkimesi sonucunda ilgili araştırmalar yapılmıştır. Portland çimentosunun oluşturduğu çevresel zararlara karşı Glukhovsky çimento yerine yüksek fırın cürufu (YFC) kullanarak sorunu çözmeye dair girişimlerde bulunmuştur. Glukhovsky'nin yaptığı çalışmalarda ürettiği malzemenin dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Cüruf gibi kalsiyum bakımından zengin hafif metallerde, çimento hidrasyonundaki gibi kalsiyum

silikat hidrat jeli (C-S-H) de oluşmaktadır. Kullanılan bağlayıcı, aktivatör türleri ve kür sıcaklığı koşulları dikkate alınarak OPC'ye göre daha dayanıklı, 1000-12000 °C sıcaklığa maruz kaldığında bozulmayan, donma-çözülme, yüksek korozyon dayanıklılığına sahip ve alkali agrega genişmesi düşük geopolimer malzeme üretmek mümkündür (Gümüş, 2016).

## 2.2.2 Geopolimerin tanımı ve kimyası

Davidovits, silisyum ve alüminyum ile jeolojik kökenli bir kaynak malzeme veya bağlayıcı üretmek için UKL, metakaolin, silis dumanı, YFC ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürün malzemeleri ile reaksiyona girmek için alkali bir sıvının kullanılabileceğini önermiştir. Üretilen bu tip malzemeler için birçok isim kullanılmıştır. Bu isimlerden en sık kullanılanlarından bazıları, düşük sıcaklık alüminosilikatlar, alkali aktive edilmiş çimentolar, alkali bağlı seramikler, inorganik polimer beton ve hidroseramiktir (Yonar, 2014).

Bu durumlarda gerçekleşen kimyasal reaksiyon bir polimerizasyon süreci olduğundan, Davidovits bu bağlayıcıları ifade etmek için ilk kez 1978'de geopolimer terimini ortaya atmıştır. Geopolimerler inorganik polimerler sınıfında yer almaktadır. Aktivatörler ve çeşitli yan ürünlerle oluşturulan geopolimer malzemenin kimyasal birleşimi doğal zeolitik malzemelere benzer fakat mikro yapısı kristal yerine amorfudur (Hardjito ve Rangan, 2005; Palomo vd., 1999; Xu ve van Deventer, 2000).

Geopolimerizasyon, alümino-silikat oksitler ile alkali metal silikat çözeltileri arasında Si-O-Al bağlarından oluşan yarı kristal üç boyutlu polimerik yapılara amorf olan yüksek alkali koşullar altında kimyasal reaksiyonu içermektedir (Hardjito ve Rangan, 2005; Davidovits, 1999). Geopolimerizasyon reaksiyonu ekzotermiktir ve 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda atmosfer basıncı altında gerçekleşmektedir. Geopolimer malzemelerin geliştirilmesi üzerine literatürde birçok araştırma olmasına rağmen geopolimerizasyon sırasında gerçekleşen mekanizma tam olarak anlaşılmamaktadır. Geopolimerizasyon için önerilen en önemli mekanizmalar (1) Si ve Al elementlerinin, kuvvetli alkali sulu çözeltideki katı alüminosilikat malzemelerde çözünmesi, (2) Si-O-Si ve/veya Si-O-Al tipinin polimerik bağlarından oluşan oligomer türlerinin (geopolimerin öncü iyonları) oluşumu, (3) üç boyutlu bir alüminosilikat çerçeve (geopolimerik çerçeve oluşturmak

için oligomerlerin polimerizasyonu), (4) çözünmemiş katı partiküllerin geopolimer çerçeveye bağlanması ve tüm sistemin bir nihai katı polimerik yapıya sertleştirilmesi gibi paralel olarak ilerleyen bu dört aşamayı içermektedir (Durak, 2019). Bunun yanı sıra, bu dört adım birbiriyle çakışabilir ve aynı anda gerçekleşebilir, bu durumda her birini ayrı ayrı incelemeyi zorlaştırmaktadır (Hardjito ve Rangan, 2005; Palomo vd., 1999).

Polimerizasyon süreci geopolimer malzemelerde 40-100 °C kürlleme sıcaklıkları ile uzatılmaktadır. Bu amaçla, geopolimer malzemenin fiziksel özelliklerinin de iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Geopolimerin kimyasal işleyişi ve tepkimenin toplam enerji değerleri tam olarak tanımlanamamaktadır. Bunun yanı sıra metakaolinit içerisindeki silisyum ve alüminyumlu parçacıkların üç boyutlu ve dörtyüzlü bağlı olan sertleşen ve ısıtıldığında yumuşayan polimerlerin mikro moleküler yapıyı oluşturmasıyla birlikte oluşan amorf yapı meydana gelmektedir (Gümüş, 2016; Komnitsas ve Zaharaki, 2007).

Alkali tuzlardaki kalsiyum, sodyum ve potasyum gibi metallerin elektron vererek Si ve Al'un oksijen atomlarını paylaşması ile birlikte kimyasal bağ kurulmaktadır. Böylelikle Si-O-Al moleküllerinden oluşan 'sialat' adı verilen yapı oluşmaktadır. Oksijen elementinin dizilme sıklığına göre oluşan sialatların yapısı ise SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> arasında tüm oksijen atomlarının dörtyüzlü bağlar kurması ile oluşmaktadır (Gümüş, 2016; Hamalı, 2007).

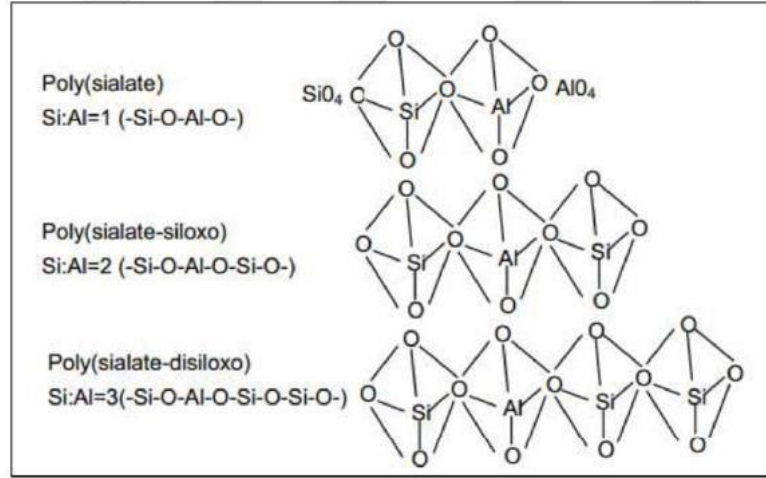
Davidovits'a göre bir geopolimer reaksiyonunda oluşan bağlarda Si/Al oranları üç farklı bağ yapısı ile meydana gelmektedir (Davidovits, 1999).

Bunlar:

(1) Poly(sialate) [-Si-O-Al-O-],

(2) Poly(sialate-siloxo) [-Si-O-Al-O-Si-O-] ve

(3) Poly(sialate-disiloxo) [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]'dir (Şekil 2.2)



**Şekil 2.2.** Geopolimer türleri

Geopolimer oluşumunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sırasında su serbest bırakılmaktadır. Geopolimer prosesinden kürlenme ve daha ileri kurutma dönemlerinde atılan bu su, prosesteki süresiz nano gözenekleri geride bırakmaktadır ve bu da geopolimerlerin performansını olumlu yönde etkilemektedir. Hidrasyon işlemi sırasında bir Portland çimentosu karışımındaki suyun kimyasal reaksiyonunun aksine geopolimer karışımındaki su, gerçekleşen kimyasal reaksiyonda hiçbir rol oynamaz sadece işlem sırasında karışıma işlenebilirlik sağlamaktadır.

Alkali ortamda bulunan hidroksil iyonlarının etkisiyle silikat ve alüminatların çözünmesi hızlanmaktadır. Eğer ortam fazla alkali ise silikatlar arasındaki bağı gevşetmektedir (Gümüş, 2016; Zeybek, 2009). Bünyesinde sodyum bulunduran alkali tuzlar potasyum bulunduranlara göre daha fazla çözünmektedirler. Bunun sonucunda ise daha hafif olan sodyum atomu, silikat atomlarını kolayca işleyerek stabilize etmektedir. Sodyumun elektron ilgisinin daha az olması da hidroksil iyonlarını bırakmasını kolaylaştırmaktadır (Gümüş, 2016; Zhang vd., 2008). Geopolimer malzemenin fiziksel özelliklerini iyileştirebilmek adına UKL'deki ana bileşenler ile alkali tuzların ayrışabilmesi için sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum alüminat ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) çözeltileri ilave edilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan su miktarındaki artış üretilen malzemenin basınç dayanımını azaltmaktadır. İçeriğinde fazlasıyla Si-Al içeren UKL sodyum alüminatların dörtyüzlü alüminyum bağ yapısı oluşumunu kolaylaştırırken, sodyum silikat moleküllerini arttırmaktadır (Gümüş, 2016).

Geopolimer harcın pH'ı genellikle 10-12 arasında değişmektedir. Geopolimerin kürlleme sıcaklığı yükseldikçe harcın pH'ı düşer. Ayrıca geopolimer basınç dayanımı kazandıkça pH düzeyinin düşüşü de önemli olmaktadır. Geopolimer ile ilgili yapılan çalışmaların önemli amaçlarından biri de kullanıcıya zarar vermeyen karışımları elde etmektir. Bu sebepten pH değeri az olan geopolimer formülleri geliştirmek hem doğa hem de insan sağlığı açısından önemli olduğundan geopolimerin kullanım alanlarını genişletip yapılan çalışmaları da arttıracaktır (Gümüş, 2016; Zeybek, 2009).

Davidovits (1999), Çizelge 2.4'de verildiği gibi Si/Al molar oranına bağlı olarak geopolimerlerin olası uygulamalarını önermiştir.

**Çizelge 2.4.** Geopolimerin uygulaması

Si/Al	Uygulama Alanları
1	Tuğla üretimi, seramik üretimi ve yangından koruma
2	Düşük CO <sub>2</sub> üreten çimento, beton, radyoaktif ve toksik atık kapsülleme
3	Isıya dayanıklı kompozit malzeme, dökümhane ekipmanları
>3	Sanayi için sızdırmazlık ürünleri
20<Si/Al<35	Yangına dayanıklılık ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Geopolimerin fiziksel özellikleri, kullanılan ham maddedeki Si/Al oranına göre değişebilmektedir. Geopolimer de istenilen fiziksel özellikleri elde edebilmek için ham maddenin kimyasal içeriği iyi belirlenerek farklı karışımlar oluşturulabilmektedir (Yonar, 2014).

### 2.2.3 Geopolimerin bileşenleri

Bir mühendislik malzemesi olan geopolimerin üretimi için amorf formda silisyum (Si) ve alüminyum (Al) içeriği açısından zengin herhangi bir malzeme kullanılabilir (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu malzemelerden araştırmalara konu olanlardan bazıları sıralanmıştır.

- UKL
- YFC

- Metakaolin
- Kaolinit kil
- UKL ve YFC karışımı
- UKL ve metakaolin karışımı
- Cüruf ve metakaolin karışımı
- Cüruf ve kırmızı çamur karışımları
- UKL ve kalsine edilmemiş malzemelerin karışımları (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer üretimi için kaynak malzeme seçimi maliyet, bulunabilirlik, son kullanıcıların talebi, kimyasal içeriği ve uygulama türü gibi birçok faktöre bağlıdır. Atık malzemeler arasında en yaygın olanı UKL ve YFC'dir. Çünkü içeriği ve bileşenleri sayesinde geopolimer kaynağı olma potansiyelini en çok taşıyan malzemelerdir.

Hemen hemen tüm kaynak malzeme bulunduran geopolimer betonların avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin, UKL YFC'den daha ince parçacık boyutuna sahip olmasından dolayı yüksek reaktiviteye sahiptir. Kullanılacak olan kaynak malzemenin incelik modülü ve mineral kompozisyonu geopolimer malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Kaynak malzemenin kimyasal içeriği de tercih edilme sebeplerindedir. UKL'nin içerisinde yüksek miktarda kalsiyum bulunması polimerizasyon sürecine etki etmekte ve mikro yapıyı ayarlayabilmektedir. Aksine, daha fazla miktarda CaO içeren UKL, özellikle erken yaşlarda kalsiyum alümina hidrat ve diğer kalsiyum bileşiklerinin oluşmasına neden olan daha yüksek geopolimer basınç dayanımı oluşturmaktadır (Humur, 2018).

Fernández-Jimenez ve Palomo (2003), çeşitli UKL türlerinin geopolimer kaynak malzeme olarak kullanılmasındaki uygunluğu araştırmışlardır. Bu araştırmacılar, optimal bağlanma özellikleri üretmek için düşük kalsiyuma sahip UKL'nin yanmamış malzeme yüzdesine (LOI) %5'ten az, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğinin %10 olması ve düşük CaO içeriğine sahip olması gerektiğini, reaktif silika içeriğinin ise %40-50 arasında olması ve parçacıkların %80-90'nı 45 µm'den küçük olması gerektiğini açıklamışlardır. Bunun aksine Van Jaarsveld ve arkadaşları (2003), özellikle erken yaşlarda, kalsiyum-alüminat-hidrat ve diğer kalsiyum bileşiklerinin oluşmasından dolayı, daha yüksek CaO

miktarına sahip UKL'nin daha yüksek basınç dayanımı ürettiğini bulmuşlardır. Geopolimer için UKL'nin kaynak malzeme olarak uygunluğunu etkileyen diğer faktörler ise parçacık boyutu, şekilsiz yapısı, morfolojisi ve UKL'nin kaynağıdır (Hardjito ve Rangan, 2005).

Geopolimer üretiminde kullanılan önemli alkaliler ise aşağıdaki gibidir (Özodabaş, 2014; Durak, 2019).

- Kostik alkaliler: MOH
- Zayıf asitli tuzlar:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$  vd.
- Silikatlar:  $M_2O.nSiO_2$
- Alüminatlar:  $M_2O.nAl_2O_3$
- Alüminosilikatlar:  $M_2O.nAl_2O_3.(2-6).SiO_2$
- Güçlü asitli tuzlar:  $M_2SO_4$

Geopolimer beton üretiminde yaygın olarak tercih edilen alkali aktivatörler, sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ), sodyum karbonat, sodyum sülfat ve potasyum silikattır (Davidovits, 1999). Palomo vd, tek bir kimyasalın da yeterli olabileceğini açıklamışlardır. Alkali aktivatörün tipi polimerizasyon işleminde önemli rol oynamaktadır. Alkali aktivatör kullanımı, çözeltinin maliyeti, aktivatörün temini ve reaktivite gibi faktörlere bağlıdır (Humur, 2018). Sodyum silikat ve sodyum hidroksit endüstriyel olarak üretilip kullanılırken, sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan temin edilmektedir (Durak, 2019; Pacheco-Torgal, 2008).

Bilim adamları geopolimer beton üretiminde alkali aktivasyonu ile ilgili birçok çalışma yapmışlardır. 1940'larda Purdon alkali ile aktive olan bağlayıcılar hakkında çalışmalar başlatmıştır (Durak, 2019). Purdon, YFC ile sodyum hidroksiti kullanarak malzeme üretmiş ve reaksiyonların iki adımda gerçekleştiğini öne sürmüştür. Öncelikle silika, alüminyum ve kalsiyum hidroksit serbest kalmıştır. Daha sonra, silika ve alümina hidratların oluştuğunu gözlemlemiştir. Yaptığı çalışmanın sonucunda ise alkali hidroksitin katalizör işlevi olduğunu tespit etmiştir. Palomo vd., (1999) UKL'yi aktive etmek için kullanılan alkali aktivatörünün reaksiyonu önemli ölçüde etkilediğini

açıklamışlardır. Ayrıca, bir alkali aktivatör çözeltisi, sadece hidroksit kullanımına kıyasla silikat, potasyum veya sodyum silikat içeriğinde yüksek reaksiyonun meydana geldiğini bildirmişlerdir (Humur, 2018). Xu ve van Deventer (2000), alkali aktivatör olarak NaOH ile beraber  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisinin kullanılmasının ham madde ile çözelti arasında oluşan reaksiyonu arttırdığını söylemişlerdir. Ayrıca, 16 doğal Al-Si mineralinin geopolimerizasyonu üzerine yapılan bir çalışmadan sonra, genellikle NaOH çözeltisinin, KOH çözeltisinden daha yüksek oranda mineral çözünmesine neden olduğunu bulmuşlardır (Hardjito ve Rangan, 2005).

Rattanasak ve Chindaprasirt (2009), yaptıkları bir çalışma sonucunda UKL'nin kimyasal içeriğinde silika ve alüminalar yer aldığını ve bu iyonlar çözünebilmek için alkali aktivatörler ile temas kurmaları gerektiğini açıklamışlardır. UKL ile temas eden alkali çözeltide silikatlar hemen çözünmeye başlar. Geopolimerizasyon prosesi alümina silika bağına göre değişkenlik gösterdiğinden UKL'lerin geopolimer malzeme üretiminde kullanımının uygun olabileceğini açıklamışlardır (Tokay, 2019).

Geopolimer oluşumunda etkili olan bağlayıcılar aktif ya da reaktif olmayan dolgu malzemelerinin birbirine bağlanmasını sağlayarak OPC gibi rol oynayabilir. Geopolimerizasyona dâhil olamayan kristal fazlar gibi ham maddedeki amorf fazlarda tümüyle geopolimere dönüşmeyebilir. Geopolimer üretiminde reaktif ham maddeleri geopolimerizasyon prosesine dâhil etmek amacıyla malzemelerin ve alkali aktivatörlerin 15 dakika veya daha fazla süreyle karıştırılması gerekmektedir (Tokay, 2019; He vd., 2012).

İlk kez 1979 yılında Davidovits tarafından ortaya atılan geopolimer terimi yıllar içinde birçok araştırmacının konusu olmuştur. 1939-40 yıllarında Purdon ve Ferret ile başlayan alkali aktivasyon süreci birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve ilerleyen zamanlarda çalışma konusu olmuştur. Alkali aktivasyonun tarihsel gelişimi Çizelge 2.5'de sunulmuştur (Pacheco-Torgal vd., 2008; Humur, 2018).

**Çizelge 2.5.** Yapı malzemelerinde alkali aktivasyon uygulamalarının tarihsel gelişimi (Roy, 1999; Pacheco-Torgal vd., 2008; Duxon vd., 2007; Girgin, 2016; Yadollahi vd., 2017; Bilenler-Altundal, 2019; Sigit Darmawan vd., 2020)

Tarih	Araştırmacılar	Araştırma konusu
1939	Feret	Cürufun çimento içerisinde kullanımı
1940	Purdon	Alkali-cüruf kombinasyonu
1959	Glukhovsky	Alkali çimentoların kuramsal esasları ve gelişimi
1965	Glukhovsky	Alkalın çimentolar isminin ilk kullanımı
1979	Davidovits	Geopolymer teriminin ortaya konulması
1979	Malinowski	Eski su kemerlerinin karakterizasyonu
1983	Forss	F-Çimentolar (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
1984	Langton and Roy	Tarihi bina materyallerinin karakterizasyonu
1985	Davidovits ve Sawyer	Piramit çimentosunun patenti
1986	Krivenko	$R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
1986	Malolepsy ve Petri	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
1987	Davidovits	Tarihi ve modern betonların karşılaştırılması
1989	Deja ve Malolepsy	Klor direnci
1989	Kaushal vd.	Alkali karışımlarından adyabatik işlem görmüş nükleer atıklar
1989	Roy ve Langton	Tarihi beton analogları
1989	Majundar vd.	C12A7-Cüruf aktivasyonu
1989	Talling ve Brandstetr	Cürufun alkali aktivasyonu
1990	Wu vd.	Cürufu çimentoların aktivasyonu
1991	Roy vd.	Hızlı priz alan alkali ile aktive edilmiş çimentolar
1992	Roy and Silsbee	Alkali aktive edilmiş çimentolar: Genel bir bakış
1992	Palomo ve Glasser	Kalsine kahverengi kil ile metakaolin
1993	Roy ve Malek	Cüruf çimentosu
1994	Glukhovsky	Tarihi, modern ve geleceğin betonları
1994	Krivenko	Alkalın çimentolar
1995	Wang ve Scrivener	Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikro yapısı
1997	Fernández ve Puertas	Alkalilerle aktive edilmiş cüruflar
1998	Katz	Alkalilerle elde edilmiş UKL'lerin mikro yapısı
1999	Davidovits	Geopolimer matrislerin kimyası
2000	Puertas vd.	Alkalilerle aktive edilmiş UKL ve cüruf çimentosu
2007	Duxon vd.	Geopolimerler teknolojisi: en son teknoloji
2016	Girgin	NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması
2017	Yadollahi vd.	$Na_2O$ , silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri
2019	Bilenler-Altundal	YFC ve UKL katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı
2020	Sigit Darmawan vd.	Yüksek kalsiyum UKL'nin performans bazlı klorür ortamda geopolimer beton

## 2.2.4 Geopolimer kullanımının çimento üzerine etkileri

1911 yılında İstanbul'da kurulan 20000 t/yıl kapasiteli çimento fabrikası ile ülkemizde çimento sanayinin kuruluşu ve gelişimi başlamıştır. Günümüzde ise ülkemizdeki çimento fabrikası sayısı 40'ın üzerine çıkmıştır.

Endüstride hava kirletici fabrikalar arasında çimento fabrikaları ilk sıralarda yer almaktadır. Çimento üretiminin her aşamasında atmosfere partikül madde emisyonu yayılmaktadır. Bunun sebebi çimento üretiminde oluşan bütün maddelerin ve en son oluşan çimentonun toz halinde olmasıdır. Çimento üretilirken oluşan ve çevreye yayılıp zarar veren en önemli emisyonlar sırasıyla; çeşitli partikül maddeler, ham madde kömür, klinker, farin ve çimento tozu, alçı, döner fırında veya kurutma işlemlerinde kullanılan yakıtlardan öğütülmüş toz kömür, fuel-oil veya doğal gazdan çıkan normal yanma ürünleri olan kükürt ve azot oksitleridir.

Çimento endüstrisinin oluşturduğu partikül ve hava kirliliği yanında kullanılan ham maddelere ve alternatif yakıt olarak kullanıldığı maddelere bağlı olarak, Cd, Ni, Cr, Cu, Hg, Pb, Mn, Se, V ve Zn gibi birçok metal çevreye yayılarak çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Çimento endüstrisinde oluşan bu metallerin çevreye verdiği partikül ve hava emisyonları, bitki türleri üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak olumsuz etkilere neden olmaktadır. Başta toz emisyonları olmak üzere bu zararlı kirleticiler, kısa vadede bitkilerin yapraklarının ölümüne, uzun dönemde ise toprağın yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Toprakta olan bu olumsuz etkiler bitki hastalıklarına, verimin azalmasına ve tarımsal üretimin yok olmasına neden olmaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan bir çalışmada, Çanakkale'de kurulan bir çimento fabrikasının çevreye yaydığı gazların zeytin ağaçları üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonucunda ise çimento fabrikasından uzaklaştıkça bitki boylarında artışlar olduğu gözlenmiştir (Yonar, 2014).

Partikül maddelerden dolayı oluşan kirlilik, mikroskobik seviyede katı ya da sıvı damlacıklardan oluşmakta ve akciğerlerimizde birikerek önemli sağlık problemlerine neden olmaktadır. Yapılan çoğu çalışma sonucunda partikül madde kirliliğinin çeşitli sağlık problemlerine neden bilgisine ulaşılmaktadır. Bu sorunlardan bazıları, solunum yollarında irritasyon, öksürme, soluk alıp-vermede zorlanma, akciğerin solunum kapasitesinde olumsuz değişiklikler, astım atakları, kronik bronşit, kalbin düzensiz

ritimlerle atması, ciddi olmayan kalp krizleri, kalp rahatsızlığı ve akciğer sağlığı sorunu bulunanlarda erken dönem ölümleridir. Bir araştırma sonucunda çimento fabrikalarından kadmiyumun açığa çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu araştırma Eskişehir Çimento Fabrikası çevresinde yapılmış ve fabrikadan uzakta olan yerleşim yerindeki insanların kan örneklerinde kadmiyum miktarının fabrikaya yakın yerleşim yerindeki insanların kanındaki göre daha az olduğu belirtilmiştir (Yonar, 2014).

Geopolimerin fiziksel ve kimyasal özellikleri endüstriyel ve bilimsel birçok alanda inorganik kimya, fizikokimya, koloidal kimya, mineraloji ve mühendislik araştırılmaktadır. Bu araştırmalar özellikle çimento kullanımını azaltarak çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirebilmeyi hedeflemektedir.

Çimentonun belirlenen bütün bu olumsuz özellikleri sonucunda araştırmacılar ve bilim adamları çimentonun yerini alabilecek daha sağlıklı, dayanıklı, olumsuz çevre şartlarına karşı deforme olmayan, yangına dayanıklı, çevre dostu, ekonomik ve radyasyon sönümlene kapasitesi olan yeni bir yapı malzemesi araştırmışlardır. Bütün bu olumlu özelliklere sahip olan geopolimer malzemesi, uzun yıllardır araştırılıp geliştirilerek birçok uygulama alanına sahip olmuştur. Bu uygulama alanlarından bazıları, yapısal betonlar, duvar blok elamanı üretimi, dekoratif taş eserler, seramik karolar, zemin iyileştirme çalışmaları, petrol kuyuları, tehlikeli ve radyoaktif alanlardaki beton uygulamaları, refrakter malzemeler, biyoteknoloji, sulama sistemleri ve dalga kırın beton uygulamaları, döküm sanayi, altyapı için kompozit üretimi, uçak iç mekanların da ileri teknoloji ürünlerin üretimi, otomobiller, yüksek teknolojili reçine ürünleri, radyoaktif madde ve toksik atık önleme, sanat ve dekorasyon, kültürel miras, arkeoloji ve bilimler tarihi gibi alanlarda malzeme üretimleri, elektrik direkleri ve gaz beton uygulamaları, yüksek ısıya dayanıklı beton üretimi ve prefabrik imalatıdır (Tokay, 2019; Özodabaş, 2014).

Geopolimer ile ilgili yapılan çalışmalarda geopolimer harcın Portland çimentoyla benzer özellikler gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca geopolimer üretiminde kullanılan kaynak malzemelerin Portland çimentosuyla beraber kullanılacağı da literatür de açıklanmıştır. Yapılan bir araştırmada %80 oranında OPC ve %20 oranında ise geopolimer malzeme içeren bir karışım hazırlanmış ve hazırlanan karışım hızlı ve yüksek dayanım gösterdiğinden inşaat sektörü tarafından kısa sürede tanınmıştır.

Araştırmacılar ürettikleri malzemenin endüstriyel kaplamalar, otoban yollar ve pist onarımı için dökülen betonlar için uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen malzeme, pistte 4-6 saat arasında sertleşebilirken düz beton birkaç günde sertleşebilmektedir (Yonar, 2014).

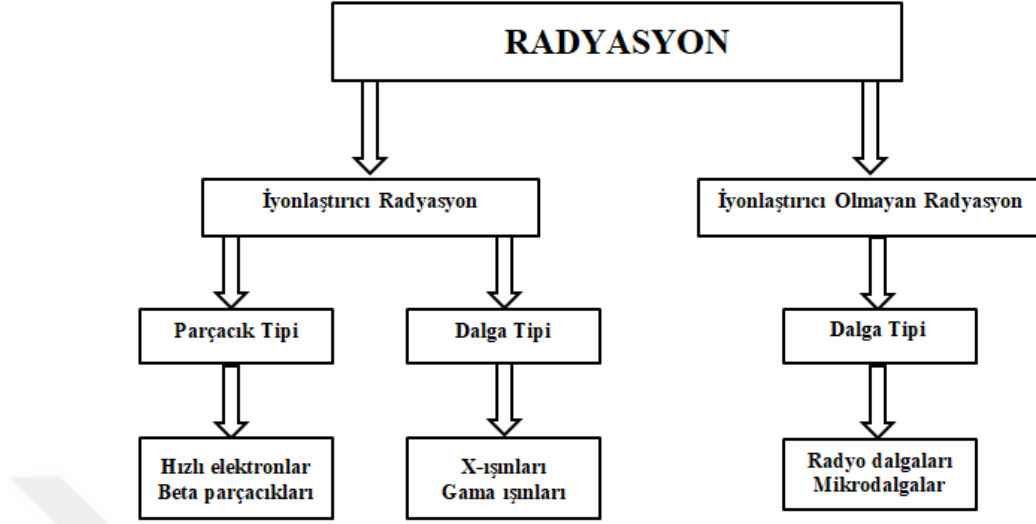
## **2.3 Radyasyon**

Radyasyon, elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar şeklindeki enerji aktarımı olarak tanımlanmaktadır. Atom, bilindiği üzere maddenin en küçük yapı taşıdır. Atom, proton ve nötronlar (nükleon) tarafından oluşturulan bir çekirdek ve bu çekirdeğin etrafında dönen elektronlardan oluşmaktadır. Çekirdeğinde 83'den fazla proton bulunduran (ağır) elementler kararsızdır bu yüzden de daha küçük atomlara dönüşmektedirler. Atom çekirdeğinde gerçekteşen bu parçalanma sırasında gözle görülmeyen bazı enerji dalgaları ortaya çıkmaktadır. Bu tepkimeler sonucunda parçalanarak enerji veren maddelere radyoaktif madde, çevreye saçılan ışınlara (alfa, beta ve gama) ise radyasyon adı verilmektedir.

Radyoaktivite ilk olarak 1895 yılında W. Röntgen'in yaptığı deneyler sonucunda X-ışını keşfetmesiyle ortaya çıkmıştır. Ardından 1896 yılında fizikçi Henri Becquerel ilk olarak uranyum tuzunun görünmez ışınlar yaydığını fark etmiş ve 2 yıl sonra Marie Curie benzer ışınlara rastlamıştır. Son olarak 1899 senesindeki çalışmalarında uranyumun alfa ve beta yayınladığını keşfetmişlerdir. Gama ışının keşfi ise 1900'lü yıllarda P. Villard tarafından yapılmıştır (URL 1, 2015).

### **2.3.1 Radyasyon türleri**

Genel olarak radyasyon tanımı yapılırken 3 ana parametre dikkate alınmaktadır. Bu parametreler şekil 2.3'de gösterildiği gibi sırasıyla; enerji (düşük enerjili ve yüksek enerjili radyasyon), türü (parçacık radyasyonu ve dalga radyasyon), kaynağı (doğal radyasyon ve yapay radyasyon kaynakları)'dır (Başyığit ve Kaçar, 2006).



Şekil 2.3. Radyasyon çeşitleri

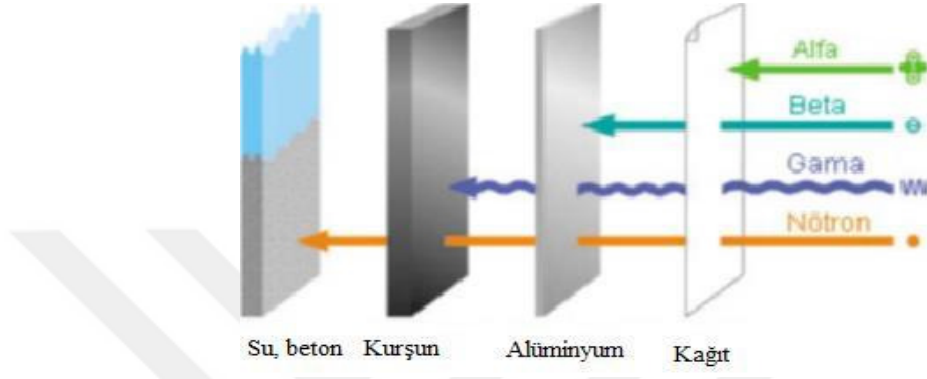
Radyasyon iyonlaştırma özelliğine (düşük ve yüksek enerjili radyasyon) göre iki gruba ayrılmaktadır.

***İyonlaştırıcı radyasyon:*** Yüksek enerji seviyesine sahip radyasyon olarak da tanımlanır. Karşılaştığı atomun yörüngesinden elektron kopararak iyon çiftleri oluşturabilecek kadar yüksek enerjiye sahip radyasyon türüdür. Etkileşime girdiği atomu iyonlaştırırken enerji kaybederler (Kalyon, 2019; Gökharman vd., 2016).

İyonlaştırıcı radyasyonlar kendi bünyesinde parçacık ve dalga türü olarak iki gruba ayrılır:

- (i) Parçacık türü radyasyon, belirgin bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket edebilen parçacıklardır. Parçacık türü radyasyonun en bilinen ışınları alfa, beta ve nötrondur. Alfa, beta ve nötron yüklü parçacıklar oldukları için doğrudan iyonlaşabilirler.
- (ii) Dalga türü radyasyon, belli bir enerjiye sahip fakat kütesiz olan radyasyon türüdür. Bu sınıfta X ve gama ışınları vardır. Bu ışınlar yüksüz olduklarından dolaylı iyonlaşmaya neden olurlar. Bu iki ışın arasındaki fark ise X-ışını atomu çevreleyen elektron bulutunda meydana gelirken gama ışını atomun çekirdeğinde meydana gelmektedir (Kalyon, 2019; Toygar, 2002).

Yüklü ve kütleli olan alfa ve beta parçacıkları madde içerisinde çok fazla derine inemezken yüksüz ve kütesiz olan gama ışınları ve yüksüz olan nötronlar madde içerisinde çok daha derine inebilirler (Kalyon, 2019). Şekil 2.4’de alfa, beta, gama ve nötronların nüfuz ediciliği ile ilgili şema gösterilmektedir.

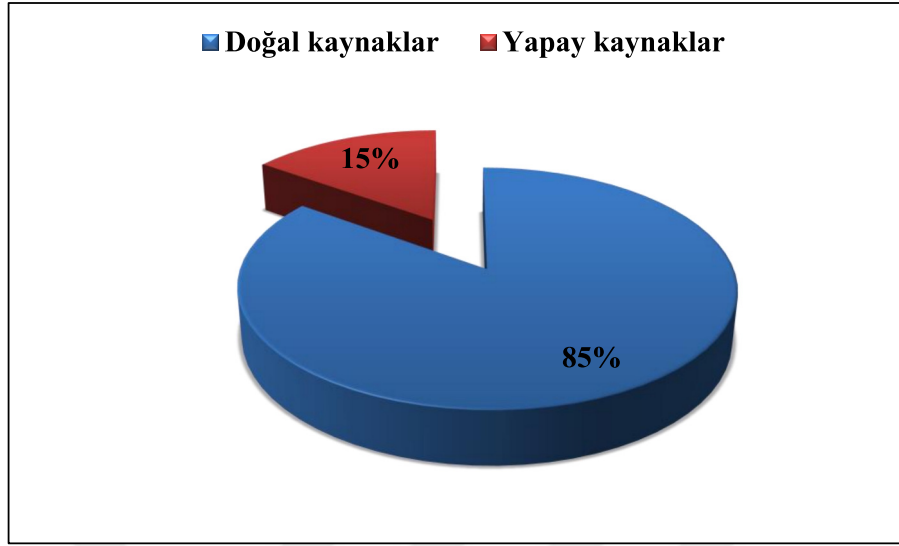


Şekil 2.4. Nüfuz etmelerine göre iyonlaştırıcı radyasyonlar

***İyonlaştırıcı olmayan radyasyon:*** Bu radyasyonun enerji seviyesi düşük olduğu için etkileşime girdikleri atomlarla iyon oluşturamaz. Ancak atomu uyarıp bir üst seviyedeki enerjiye çıkarabilirler. İyonlaştırıcı olmayan radyasyona, radyo dalgaları, mikro dalgalar, görünür bölge, kırmızı altı ve mor üstü (ultraviyole) örnek olarak verilebilmektedir.

### 2.3.2 Radyasyon kaynakları

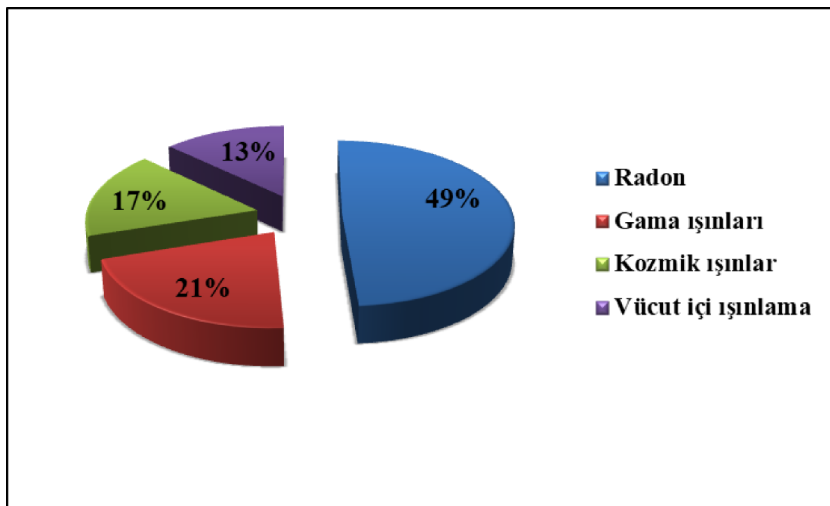
Dünyadaki bütün canlılar ve cansızlar asırlardan günümüze kadar evrenden gelen, yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan ve insanlar tarafından üretilen yapay radyoaktif maddelerden yayılan radyasyona ışınımına maruz kalmaktadırlar. Bu radyasyonu hava, su, sindirim yolu, hayvansal ve bitkisel besinlerle vücutlarına almaktadırlar. Doğal ve yapay radyasyon ışınlarına sürekli maruz kalan insanların vücudundaki organlarda zamanla bu radyoaktif maddeler birikip zarar vermektedir. Giderek gelişen teknoloji sayesinde yapay radyasyon kaynakları olan nükleer santraller, tıp, endüstri, tarım ve hayvancılık gibi alanlardan yayılan radyoaktif madde miktarı da artmaktadır. Tüm insanlar Dünya üzerinde yıllık ortalama kişi başına 2.8 mSv radyasyona maruz kalmaktadır (Kalyon, 2019; URL 2, 2017). Şekil 2.5’de doğal ve yapay radyasyon kaynaklardan alınan miktarların oranı gösterilmiştir.



**Şekil 2.5.** Dünya üzerinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından alınan doz oranları

Evrenden gelen ışınların bir kısmı doğal radyasyonu oluşturmaktadır. Bu ışınların büyük bir miktarı atmosferde tutulurken az bir miktarı ise yeryüzüne ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra insanlar tükettikleri gıdalardan da çok az miktarlarda da olsa radyasyon almaktadırlar. Böylece insanlar iç ve dış radyasyon ışımalarına maruz kalmaktadır.

Doğal radyasyon kaynakları insanların katkısı olmadan kendiliğinden oluşan radyasyon türleridir. Dünya üzerinde bu kaynaklardan oluşan radyasyon türleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



**Şekil 2.6.** Doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon türleri

Yüksek enerjili parçacıklara sahip olan kozmik ışınlar, elektron, proton, helyum çekirdeği ve fotonlardan oluşmaktadır. Yükü ve enerjisi sayesinde protonlar Dünya'ya ulaşarak manyetik alana girerler. Yüksek enerjili kozmik ışınların bir kısmı atmosferde tutulur; fakat bir kısmı ise yeryüzüne ulaşmaktadır. Yeryüzüne ulaşan kozmik ışınlar Dünya'nın her yerinde aynı dağılımı göstermezler. Örneğin manyetik alan kutuplara gittikçe artar ve oradaki canlıların maruz kaldığı radyasyon miktarı da artmaktadır. Kutupların aksine deniz seviyesine yaklaştıkça alınan radyasyon miktarı ise azalmaktadır (Kalyon, 2019).

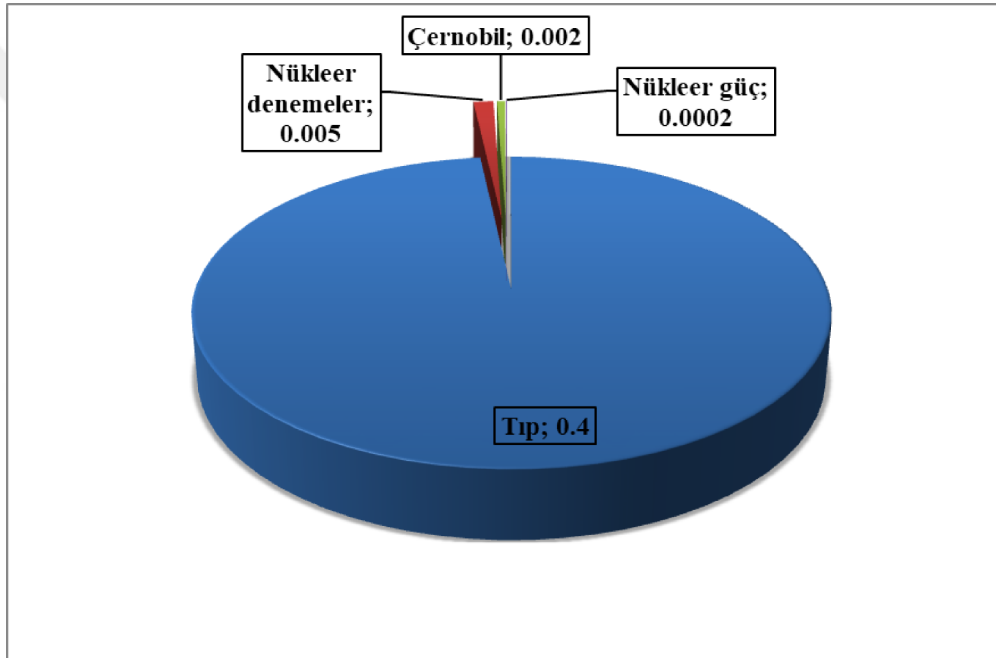
Yeryüzündeki dağılımı farklı olan doğal radyasyon kaynaklarının insanlar üzerinde gösterdiği etki de farklı olmaktadır. Mesela doğal radyasyon kaynakları fazla olan bir bölgede yaşayan insanlar da kanser gibi radyasyona bağlı hastalıklarla karşılaşma ihtimali radyasyonun kaynaklarının az olduğu bölgeye göre daha yüksektir. İnsanların barınma ihtiyaçları sonucunda inşa ettikleri binaların yapı malzemelerinin ham maddesi yer küredir. Bu yapı malzemeleri bilinçsiz olarak kullanıldığında radyoaktif ışınlar duvarlara taşınmaktadır (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Gönen, 2012). Işıma yapan radyoaktif maddeler havayı iyonize ederek solunum anında akciğerlere geçmektedir. Akciğerlerdeki DNA'lar üzerinde timin dimerleri oluşur ve bu sırada DNA yanlış bağlanarak kansere sebep olmaktadır. Bir çalışma sonucunda doğal radyasyon kaynağı fazla olan bölgelerde yaşayan insanlarda akciğer ve gırtlak kanserleri görülme sıklığının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Higgy vd., 2000).

Uzaydan gelen radyasyonlar dışında yeryüzündeki radyasyonların kaynakları, yer kürede bulunan radyoizotoplardır. Radyoizotoplar iç ve dış olmak üzere iki ışınlanmaya maruz kalmaktadır.

Dış ışınlanmanın nedeni gama ışınlarıdır. Bazı yapı malzemelerinin bünyesinde az miktarlarda da olsa radyoaktivite vardır; bu yüzden de betonarme yapılarda ağaç yapılarına göre fazla radyasyona rastlanmaktadır (Kalyon, 2019).

İç ışınlanma olayı, yeryüzündeki doğal radyoizotopların solunum yolu ve sindirim yoluyla vücuda alınmasından kaynaklanmaktadır. Tükettiğimiz gıdalar ve hava ile vücuda alınan radyoizotoplar zaman içinde organlarda birikmektedir. Organlarda oluşan bu birikme hücrelere zarar vermektedir (Kalyon, 2019).

Gelişen teknolojiyle beraber radyasyonun kullanım alanları artmaktadır. Radyasyonun en çok kullanıldığı alanlardan biri ise nükleer tıptır. Hastalıkların tanısı ve tedavisi için kullanılmasının yanı sıra tıbbi görüntüleme de X-ışınları kullanılmaktadır. Hastalara verilen radyoaktif maddeler hücrede iç ışınlanma yaparak hasta hücreleri tedavi etmektedir. Yapay radyasyon kaynaklarına sadece hastalar değil hastaları tedavi eden hastane personelleri de maruz kalmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları nükleer tıp dışında bazı endüstriyel alanlarda ve nükleer santrallerde kullanılmaktadır. Yapay radyasyona maruz kalınan dozların dağılımı Şekil 2.7’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.7. Yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozları

### 2.3.3 Radyoaktif bozunum

Radyoaktif maddelerden oluşan radyasyon parçacık ve elektromanyetik radyasyon olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Parçacık radyasyonlar alfa, beta ve nötron ışınları olarak kendi içinde 3 türe ayrılmaktadır. Elektromanyetik radyasyon ise gama ve X-ışınları olarak ikiye ayrılır. Gama ışınları nükleer kaynaklıyken X-ışınları atom yörüngesinden kaynaklı radyasyon türleridir. Radyoaktif maddelerden çıkan alfa, beta ve gama ışınları birçok olaya sebep olmaktadır. Bu olaylar sonucunda katı, sıvı ve gaz fazında bulunan maddeleri iyonlaştırmaktadır (Sarıkaya ve Soykan, 2018).

### 2.3.3.1 Alfa ışınları

Alfa ( $\alpha$ ) parçacıkları ilk kez Rutherford tarafından keşfedilmiştir. Manyetik ve elektrik alanlarda sapmalara uğrar ve bu sapsmalar sonucunda alfa ışınlarının yüklü parçacıklar olduğu anlaşılmaktadır. Radyoaktif çekirdekler kararsız halden kararlı hale geçebilmek için öncelikle alfa bozunumu yapmaktadırlar (Kalyon, 2019).

Belli bir süre fizik yasalarıyla bile açıklanamayan alfa parçacıkları ilerleyen zamanlarda Gamow, Gurney ve Condon tarafından kuantum tünelleme metoduyla açıklanmıştır (Kalyon, 2019; Akyıldırım, 2011). Alfa parçacıkları çok zararlıdır; fakat zararlarından korunabilmek için ince bir kâğıt yeterlidir (Kalyon, 2019; Erdem, 2014). Bunun nedeni diğer radyasyon türlerine kıyasla daha fazla elektrik yüküne sahip olmalarıdır. Alfa parçacıkları bu elektrik yükü sayesinde madde içerisinde geçerken yoğun bir iyonlaşma meydana gelmekte ve bunun sonucunda ise enerjisini kaybetmektedir. Enerjilerini hızla kaybeden alfa parçacıklarının erişme uzaklıkları kısadır bundan dolayı da dış radyasyon tehdidi oluşturmazlar (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Turhan vd., 2009).

### 2.3.3.2 Beta ışınları

Beta parçacıkları, pozitif ve negatif yüklü olan elektronlardır. Çekirdek yapılarında nötron sayısının fazlalığından dolayı kararsız olan beta parçacıkları, kararlı hale geçmek için fazla olan nötronu protona dönüştürür. Beta parçacıkları bir yük veya kütleyle sahip değildirler. Bu sebepten de madde içerisinde geçecekleri zaman iyonlaşmaya neden olmaktadır. Geçiş sırasında oluşan bu iyonlaşma alfa parçacıklarının oluşturduğu iyonlaşmadan daha farklı ve azdır. Her ne kadar alfa parçacıklarından daha hafif olsalar da koruma önlemlerine ihtiyaç vardır (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Turhan vd., 2009).

### 2.3.3.3 Gama ışınları

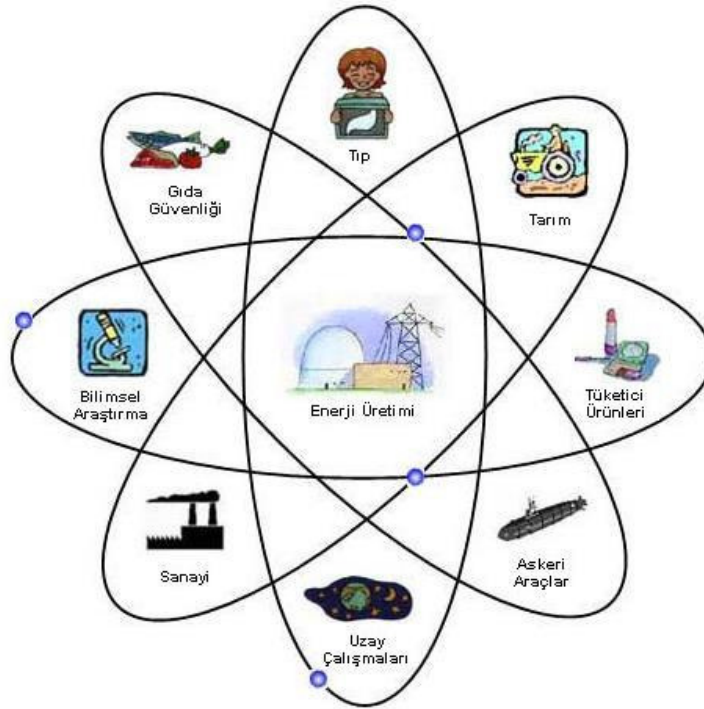
Paul Villard, 1900 yılında uranyum elementi ile ilgili çalışmalar yapmış ve bu çalışmaları sonucunda gama ışınlarının yüksüz ve kütesiz olduğunu açıklamıştır. Gama ( $\gamma$ ) ışınları, atom altı parçacıkların etkileşiminden kaynaklanan, belirli bir titreşim sayısına sahip elektromanyetik dalga formundaki ışınlardır; genelde uzayda gerçekleşen çekirdeksel tepkimelerin sonucunda üretilmektedir. Yüksek enerjiye sahip

olmalarının yanı sıra asıl kaynakları atom çekirdeğidir. Gama ışının kaynakları ise uranyum, toryum ve potasyum-40 elementleridir. Önemli bir kaynağı olan uranyum, nükleer özellik göstermesinden ötürü, fisyon olayı (ağır atomların parçalanması) sayesinde enerji üretiminde kullanılmaktadır (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Walley El-Dine vd., 2001). Oluşan ışınlar atom çekirdeğinin bünyesinde mevcut olan enerji seviyelerindeki farklılıklardan oluşmaktadır (Sarıkaya ve Soykan, 2018). Atom çekirdeği kararlı duruma gelmek için gama ışınmasını yaptığı geçişlere izomerik geçiş adı verilmektedir (Sarıkaya ve Soykan, 2018; Akyıldırım, 2011; Kalyon, 2019).

#### 2.3.4 Radyasyonun kullanım alanları

Gelişen teknolojiyle beraber radyasyonun kullanım alanı da artmaktadır. Radyasyonun zararlı etkilerinin yanı sıra tıpta bazı hastalıkların tedavisinde kullanılması gibi bilinen yararlı özellikleri de vardır.

Radyasyonun sağlık hizmetlerinden endüstriye kadar birçok alanda kullanımı söz konusudur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Radyasyonun kullanım alanları

Sağlık alanında: Tıp alanındaki radyasyon kullanımı genellikle X-ışınları ile yapılmaktadır. Radyasyon tıpta, kanserli hücrelerin tedavi edilmesi, görüntü elde etme ve zararlı hücreleri yok etme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Bu durumlarda kanserli hücreye radyoaktif atomlar verilerek bu atomların ışıma yapması sağlandıktan sonra kanserli hücrenin yok olması sağlanmaktadır. Radyoloji, nükleer tıp ve ışın tedavisi alanlarında kullanılarak radyasyon hastalıklarının teşhisi ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır (URL 2, 2017). Gelişen teknoloji sayesinde röntgen ve bilgisayarlı tomografi gibi cihazlarla görüntüleme işlemi yapılırken X-ışınlarından faydalanılmaktadır. Günümüzde tıp alanında birçok tanı ve tedavi yöntemlerinde radyasyondan yararlanılmaktadır (Kalyon, 2019).

Endüstri alanında: Radyasyon uygulamalarının analiz, kontrol, tahribatsız muayene, kalınlık-seviye ölçümleri ve daha birçok amaçlı uygulamada süreklilik sağlama ve hızlı sonuç alınabilmesi, farklı radyasyon kaynaklarının kullanıldığı bu uygulamaları en hassas ve güvenilir teknikler sınıfına dâhil etmiştir. Modern endüstri, üretimde verimliliği artırmak ve ürün kalitesini iyileştirmek için, günümüzde giderek daha fazla radyasyon kaynağından yararlanmaya başlamaktadır. Radyasyon, endüstride genellikle X-ışını tomografisi, izleme teknikleri, yoğunluk, kalınlık ve kaplama kalınlığı ölçümü, X ve gama ışını radyografisi, nötron aktivasyon analizi, X-ışını floresans analizi, çevre koruması, emniyet ve seviye ölçümü gibi birçok alanda kullanılmaktadır (URL 3, 2020).

Tarım ve hayvancılıkta: Tarımda radyasyon kullanımı tohumların mutasyon işleminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra radyasyon özellikle tarım araştırmaları alanlarında kullanılmaktadır. Bu alanlardan bazıları ürün üretimi, gübreleme işlemi, böceklenmenin engellenmesi ve topraktaki nem oranının azaltılmasıdır. Radyasyonun hayvancılıkta kullanımı ise genellikle hayvancılığın iyileştirilmesi ve hayvansal üretimin artırılması alanlarında kullanılmaktadır.

Enerji üretiminde: Radyasyonun en büyük kullanım alanlarından biri elektrik enerjisinin üretildiği nükleer güç santralleridir. Bu güç santrallerinde radyasyonun temel elementlerinden olan uranyum yakıt olarak kullanıp elektrik enerjisi üretilmektedir. Günümüzde birçok ülke elektrik enerjisini bu santrallerden sağlamakta hatta küresel enerjinin %17'sini oluşturmaktadır. Bugün, Dünya üzerinde birçok ülkede 440

civarında nükleer santral elektrik üretmek amacıyla hizmet vermektedir. Nükleer santrallerin en büyük avantajlarından biri sera etkisi yaratacak zararlı gazların açığa çıkmasıdır (URL 2, 2017).

Tüketici ürünleri: Radyoaktif maddeler tüketici ürünlerinin üretilmesi sırasında sık sık kullanılmaktadır. Örneğin, araba lastiklerinin sertleştirilmesinde, teflon tavaların kaplanmasında, kozmetik ürünlerin ve lens sıvılarının mikroptan arınması gibi birçok işlemde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra seramik yapımında porselenin canlı ve parlak renklere sahip olması için uranyum çekirdeği kullanılmaktadır. Radyasyon teknolojileri sayesinde daha hassas ve sağlam ürünler elde etmek, daha iyi köprü ve yapılar yapmak mümkün olmaktadır.

Askeri araçlar ve silahlar: Elektrik enerjisi elde etmek için TS'ler de kullanılan basınçlı su reaktörleri, uçak gemilerinin ve denizaltılarının enerjilerini temin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu teknoloji sayesinde günümüzde denizaltılar, 1 milyon deniz mili yakıt değiştirmeden hareket edebilmektedir. Nükleer teknolojinin askeri alanda daha birçok uygulaması mevcuttur. Bunlardan en zararlı olanı nükleer silahlardır.

Uzay çalışmaları: Uzay ve güneş sisteminin araştırılması amacı ile uzaya fırlatılan insansız uzay araçlarında enerji sağlamak için nükleer teknolojilerden faydalanılmaktadır. Uzay gemileri için iki farklı nükleer enerji kaynağı geliştirilmiştir. Bu kaynaklardan birincisi radyoaktif çekirdekli ısı-elektrik üretici, ikincisi ise küçük nükleer reaktörlerdir.

Bilimsel araştırma: Radyoaktif maddeler AIDS, kanser ve Alzheimer gibi birçok hastalığın araştırılmasında kullanılmaktadır. Nükleer teknoloji sayesinde C-14 çekirdeği ile tarihi eserlerin, kayaların, taşların ve dünyanın yaşının belirlenmektedir.

Gıda güvenliği: Bir radyoaktif madde olan Co-60 baharat, meyve, sebze ve et gibi birçok ürünün raf ömrünü uzatmak için kullanılmaktadır. Bu özelliğinin yanı sıra gıda paketleme de kullanılan malzemelerin mikroplardan temizlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

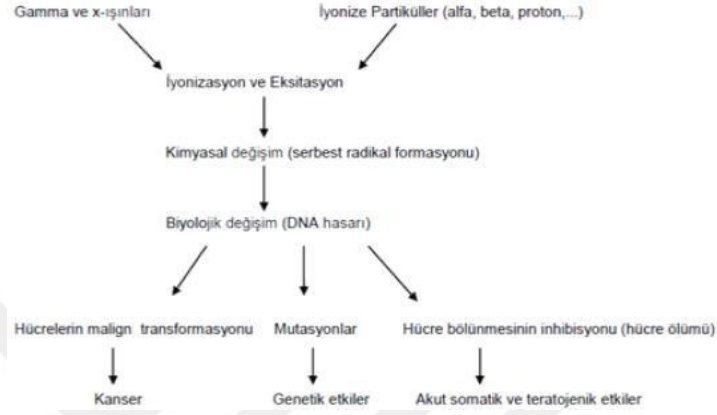
### 2.3.5 Radyasyonun zararlı etkileri

Radyasyonun insanın doku ve organlarını oluşturan hücrelerinde fiziksel, biyolojik ve kimyasal olmak üzere zararlı birçok etkisi vardır. Hücrelerin ve dokuların şekil ve özellikleri farklı olduğundan radyasyona duyarlılıkları da farklı olmaktadır. Örneğin, bir hücrenin metabolik aktivitesi ne kadar fazlaysa hücrenin radyasyona karşı duyarlılığı o kadar fazladır ya da dokudaki oksijen miktarının azalması radyasyonun etkisinin de azalma sebebidir.

Radyasyonun biyolojik zararları, radyasyon türüne, radyasyonun enerji seviyesine, doku tarafından soğurulan doza, dozun alındığı süreye ve canlı doku özelliklerine göre değişim göstermektedir (IAEA, 1994). Örneğin, enerji seviyeleri yüksek olan radyasyonlar, hücre bünyesinde uyarılmış halde atom ve iyon çifti oluşturmaktadır. Bu olay sonucunda meydana gelen çeşitli biyolojik ve kimyasal tepkimeler sonunda hücrelerde düzensizlik başlamaktadır. Bununla birlikte radyasyonun zararlı etkisi vücutta radyasyona maruz kalan bölgeye ve bölgenin büyüklüğüne de bağlıdır. Mesela, kalça bölgesinde bir belirlenen bir alana yüksek dozda radyasyon verildiğinde sadece deri reaksiyonları oluşurken aynı doz miktarı, karın bölgesine eşit büyüklükteki bir alana verildiğinde deri reaksiyonlarıyla birlikte bulantı ve kusma benzeri sistemik bozukluklar görülmektedir. Radyasyonun biyolojik etkileri ortaya çıkarken yaşanan olaylar sırasıyla:

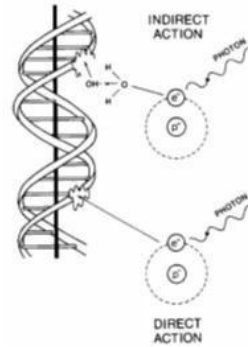
- Canlı doku ve hücreler radyasyonun bir kısmını absorblar,
- Atom iyonizasyonu gerçekleşir yani bir ya da birkaç elektron atomdan ayrılıp harekete geçer,
- Harekete geçen elektronlar, komşu atomun yörüngesine girer ve kimyasal reaksiyonları başlattıktan sonra serbest radikalleri oluşturur,
- Gerçekleşen kimyasal olayların sonunda ise enzimler inaktive olur,
- Genler mutasyona uğrar,
- Kromozomlar zarar görür,
- Hücre fonksiyonları bozulur,
- Son olarak hücre ölümü gerçekleşir (URL 2, 2017).

Radyasyona maruz kalınması sonucunda hücrelerde meydana gelen değişiklikler üreme hücrelerinde gözlemlenirse gelecek nesillere aktarılabilir. Radyasyon zararları bazı aşamalarda gerçekleşmektedir. Bu aşamalar, Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Radyasyon zararlarının gelişim aşamaları

Radyasyonun moleküler etkileri: Radyasyon dokularda direkt ve indirekt yolla biyolojik zarar oluşturmaktadır. Şekil 2.10'da radyasyonun direkt ve indirekt etkisini göstermektedir. Direkt olan etki, iyonize radyasyon enerjisine maruz kalan moleküllerin DNA tarafından absorbe edilmesidir. DNA'da meydana gelen hasar, genetiği etkilediğinden, kalıtsal değişikliklere sebep olmaktadır. Radyasyonun indirekt olan etkisi ise iyonize radyasyon enerjisinin sonucunda biyolojik sistemin içinde olduğu ortam molekülleri tarafından absorbe edilmesiyle oluşmaktadır. İndirekt etkide bazı serbest radikaller sayesinde DNA zedelenmesi oluşmaktadır (Özalphan, 2000). Radyasyonun etkisi sonucunda reaksiyona girdiği molekül, tamamıyla rastlantıya dayanmaktadır.



Şekil 2.10. Radyasyonun DNA üzerindeki direkt ve indirekt etkisi

Radyasyonun hücreesel etkileri: Enerji seviyeleri oldukça fazla olan radyasyonlar (nükleer radyasyonlar), hücre içinde uyarılmış atom ve iyon çifti oluşturmaktadır. Oluşan atom ve iyonlar, nükleer radyasyonun hücreler tarafından soğurulmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda oluşan bazı biyolojik ve kimyasal tepkimelerden sonra hücrelerde bozulmalar başlamaktadır.

Radyasyon, akut ve kronik etkilere neden olmaktadır. Akut etkiler, yüksek dozlarda radyasyona maruz kalınması sonucunda kısa zamanda ortaya çıkan ve ölümlerle sonuçlanan etkilere dir. Kronik etkiler ise radyasyona maruz kaldıktan uzun süre sonra etkisini gösterebilir. Zamanla ortaya çıkan etkiler hücre hasarına neden olduğundan hücrenin kendisini yenilemesine izin verilmez ve kanser oluşumuna neden olur (Kalyon, 2019). Bu etkilerin yanı sıra radyasyonun direkt veya indirekt olarak oluşturduğu moleküler hasarlar deterministik ya da sitokastik etkiler ile sonuçlanmaktadır.

Deterministik etkiler: Radyasyon dozunun şiddeti ve hızı ile doğru orantılıdır. Bu etkinin gözlemlenebilmesi için eşik doz değeri aşılmalıdır. Deterministik etkiler, atrofiye yol açan hücre kaybı ile ortaya çıkmaktadır (URL 2, 2017; Gökharman vd., 2016). Alfa ve beta parçacıkları yüklü parçacıklardır bu sebeple direkt iyonize etkisi olan radyasyonlardır. Üst dokuyla etkileşime girdiklerinde iç dokuya geçemez orada birikirler. Üst dokuda biriken cilt yanığı gibi deterministik etkilere sebep olurlar. Deterministik etkilere başka bir örnek ise göz merceğinin uzun sürelerle yılda 0.1 Sv'in üzerindeki bir doza maruz kalmasıyla gözde opasiteye neden olurken; etki eden doz 0.15 Sv'den fazla olduğunda katarakt meydana gelmektedir (Kalyon, 2019; Akyıldırım 2011; Gökharman vd., 2016). Radyasyondan kaynaklanan deterministik etkilerin bazıları Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Radyasyonun deterministik etkileri

<b>Deterministik Etkiler</b>
Ölüm
Cilt yanıkları
Katarakt
Kısırlık
Fetüs gelişiminin durması

Sitokastik etkiler: Belli zaman aralıklarıyla düşük miktardaki dozlara maruz kalınmasıyla ortaya çıkmaktadır. Alınan dozun şiddetinden çok var olma olasılığı doza bağlı olan değişikliklerdir. Alınan büyük doz arttıkça şiddetini değil etkinin olma olasılığını arttıracaktır (URL 2, 2017; Gökharman vd., 2016). Radyasyonun verdiği zararlar tamamıyla onarılmaz ise meydana gelen değişim yavru hücrelere aktarılır ve sonucunda ışınlanan bireyde kanser oluşumuna neden olmaktadır. Bu sebeple stokastik etkiler daha ciddi ve zararlıdır. Gama ışınları ve nötronlar yüksüz parçacıklar olduğundan dokunun iç kısmına kadar ulaşabilir ve buradaki yapıyı bozarak kalıcı hasarlara sebep olmaktadır (Kalyon, 2019; Akyıldırım 2011). Eğer genetik bilgileri aktaran germ hücreleri etkilenirse kalıtsal bozukluklar meydana gelmektedir. Çizelge 2.7’de radyasyonun sitokastik etkileri belirtilmiştir.

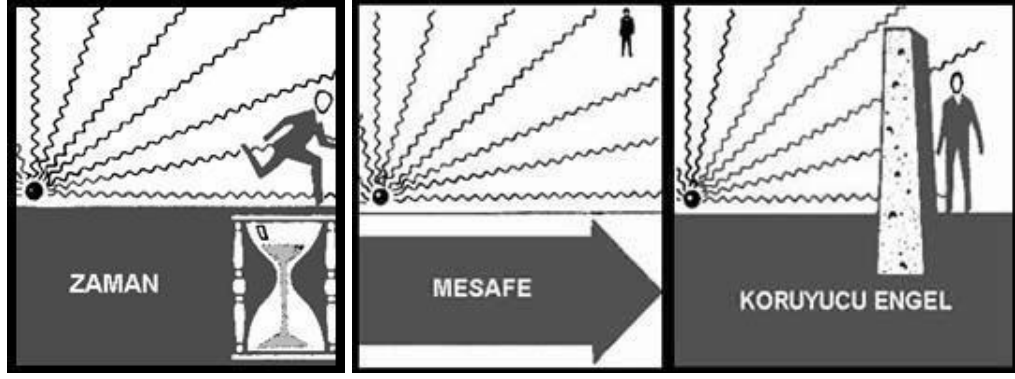
**Çizelge 2.7.** Radyasyonun sitokastik etkileri

<b>Stokastik Etkiler</b>
Lösemi
Genetik bozukluklar
Tiroid kanseri
Tükürük bezi tümörleri
Kanser

### **2.3.6 Radyasyonun zararlı etkilerinden korunma yöntemleri**

Yeryüzündeki bütün canlılar, insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon ve uzaydan atmosferi geçerek yer küreye ulaşan radyasyon kaynaklarının zararlı ışınlarına maruz kalmaktadırlar. Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber radyasyon üreten kaynaklar artmakta ve bununla birlikte canlılar radyasyonun zararlı özelliklerinden her geçen gün daha fazla etkilenmektedir.

Yaşamımızın her alanında maruz kaldığımız radyasyonun zararlı etkilerinden dolayı korunma gereksinimi duyulmaktadır. Alınan dozların kontrol altına alınması gerekmektedir. Dış radyasyondan kaynaklarından korunmak için üç tane önemli kural geliştirilmiştir. Bu kurallar sırasıyla zaman, mesafe ve zırhlamadır (Kalyon, 2019; EPA, 2018). Günlük hayatta zaman ve mesafe kurallarının uygulaması zor olabilir fakat zırhlama kuralında taviz verilmemesi gerekmektedir (Kılınçarslan vd., 2011).



Şekil 2.11. Radyasyondan korunma yöntemleri

### 2.3.6.1 Zaman kuralı

Bu kuralın amacı, mümkün olan en az seviyede radyasyona maruz kalmaktır. Radyasyon kaynaklarından yayılan ve canlılar tarafından alınan doz, zaman ve doz hızının çarpımına eşittir yani zaman ve doz doğru orantılıdır (Kılınçarslan vd., 2011).

### 2.3.6.2 Mesafe kuralı

Alfa ve beta parçacıklarının havada aldıkları yol oldukça kısa mesafelidir. Yüksüz olan gama ve nötronlar ise uzun mesafeye gidebilirler; ancak şiddetlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Mesafe kuralına göre radyasyon kaynağından uzaklaştıkça radyasyona şiddeti de azalacaktır (Kalyon, 2019; EPA, 2018). Maruz kalınan radyasyon dozu radyasyon kaynağına olan mesafenin karesiyle ters orantılıdır.

### 2.3.6.3 Müsaade edilen maksimum doz

1931 yılında radyasyondan korunmanın sınırlarını belirlemek için Amerika Ulusal Radyasyondan Korunma konseyi toplanmış ve bir insanın tüm vücudunun yıllık alabileceği en yüksek radyasyon dozunu 500 mSv olarak belirlemişlerdir. Günümüzde yıllık alınabilecek en yüksek doz miktarı 50 mSv'dir. Yıllık toplam doz iç ve dış ışınlanmadan alınan toplam doz miktarıdır. Bireylerin, belirlenen yıllık doz miktarlarının üstündeki radyasyon dozlarına (Çizelge 2.8) maruz kalmalarına izin verilmemektedir. Kurumlar tarafından belirlenen yıllık doz miktarları, mesleği sebebiyle radyasyona maruz kalan kişiler için ayrı halk için ayrı belirlenmiştir.

**Çizelge 2.8. Yıllık izin verilen radyasyon doz miktarları**

<b>İzin Verilen Maksimum Radyasyon Doz Miktarları</b>			
<b>Yıllık Etkin Doz</b>		<b>Görevli (mSv)</b>	<b>Halk (mSv)</b>
		20	1
Yıllık Eşdeğer Doz	Göz	150	15
	Cilt	500	50
	Kol-Bacak	500	50

### **2.3.7 Yapı malzemelerinin radyasyon geçirgenliği ve zırlama**

Çeşitli malzemelerin kendilerine özgü davranış ve özelliklerini, bunlar arasındaki farkları anlamak için malzemelerin atomsal ölçekteki içyapılarının bilinmesi gerekmektedir. Bütün malzeme sınıflarına ait karakteristik özellikler, atomsal veya mikroskobik boyuttaki yapısal özellik ve mekanizmalardan kaynaklanmaktadır. Var olan tüm malzemeler atomların bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Maddeyi oluşturan atom ve moleküller sıvı, katı ve gaz olmak üzere farklı düzenlerde bulunmaktadır. Sıvılar ve gazlar ayrı düzendeki moleküllerden oluşurken katılar kristal, moleküllü ve karma yapılardan oluşmaktadır. Karma yapıya sahip yapı malzemelerine doğal taşlar, beton, pişmiş toprak ürünleri ve camlar örnek olarak verilebilir (Başyigit ve Kaçar, 2006).

Yapı malzemelerinin dayanımı, elektriksel ve ısı özellikleri içyapıya bağlıdır. Atomlar arasındaki bağlar güçlü olursa buna bağlı olarak yapı malzemesinin ergime sıcaklığı, elastisite modülü ve dayanımı artarken ısı genleşmesi azalmaktadır. Yapı malzemesinin atomları tarafından oluşturulan bağ kuvvetleri, malzemelere uygulanan dış kuvvetlere karşı direnç göstererek şekil değişimini ve kırılmayı önlemektedir (Başyigit ve Kaçar, 2006).

Zırlama kavramı, radyasyon kaynaklarından yayılan ışınlara maruz kalan canlı veya cansız varlıklarla, radyasyona karşı dirençli bir engelin yardımı ile ayrılması ve radyasyon etkisinin azaltılması ya da minimum seviyeye indirilmesi demektir. Zırlama kuralının amacı, radyasyon kaynağından yayılan ışınların zırlama amacıyla kullanılan malzemenin atomlarıyla doğrudan veya dolaylı olarak iyonizasyon yapmaları yani

enerjilerini zırh malzemesinin atomlarına bırakarak tüketmeleri veya en az seviyeye indirerek canlılar için zararsız olmalarıdır (Kalyon, 2019).

## 2.4 Önceki Çalışmalar

Geopolimer yapı malzemeleri, uygulama kolaylığı ve üretiminde birçok farklı türde atık malzeme kullanılması nedeniyle birçok uygulama için uygundur. UKL bazlı geopolimer yapı malzemeleri OPC ile üretilen betonlara göre daha iyi fiziksel ve mekanik özellik göstermesinden dolayı son dönemlerin en çok araştırılan konularındandır.

Davidovits (1982), çalışmasında geopolimerin üretim metotları hakkında bazı bilgiler vermiş ve Polisialatlar adı verilen yeni mineral polimerleri anlatmıştır. Polimer üretmek için gerekli zaman ve içerik hakkında açıklamalar yapmıştır.

Jaarsveld ve Deventer (1999), UKL ile üretilen geopolimer malzemenin mekanik özelliklerini ve mikro yapısal bileşimlerini incelemişlerdir. Ürettikleri malzemeye Cu ve Pb elementlerini ekleyip malzeme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Eklenen elementlerin geopolimer yapı malzemesi üzerinde belli etkiler yarattığını gözlemlemişlerdir.

Topçu vd. (2001), yaptıkları çalışmada endüstriyel bir atık olan UKL'nin betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanılması halinde betonun fiziksel ve kimyasal etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneylerle UKL'nin beton üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir.

Bakharev (2005), asetik ve sülfürik asitlerin sıradan OPC ve UKL bazlı geopolimer üzerindeki etkilerini dayanım ve içyapı bakımından inceleyip karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise UKL bazlı geopolimerlerin sıradan Portland çimentosuna göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Xu vd. (2006), UKL bazlı geopolimerler malzemelerde ağır metal ve alkali aktivatörlerin etkilerini incelemişlerdir. Geopolimerik matris üretilirken kullanılan metallerin bağlayıcılığının etkili bir şekilde elde edilebileceğini ve çalışmada kullanılan

alkali aktivatörlerin ve ağır metallerin üretilen numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Kaçar ve Başıyigit (2006), çalışmalarında yapı malzemelerinin radyasyon zırlama malzemesi olarak kullanılabilmesi ve olan radyasyon tutuculuk katsayısını ( $\mu$ ) araştırmışlardır. Çalışmalarını normal ve baritli beton, ahşap, karbon çeliği ve cam gibi yapı malzemeleri üzerinde 10keV ile 100 GeV enerji aralığında incelemişlerdir. Deney sonuçlarında hesaplanan radyasyon tutuculuk katsayısının orta enerji bölgesinde sabit kaldığını ancak düşük enerji ve yüksek enerji bölgelerinde değişiklikler gösterdiğini açıklamışlardır.

Panias vd. (2007), su ve bazı kimyasal çözeltilerin geopolimer harçlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sırasında üretilen numunelerin mikro yapısal özelliklerini de incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda ise kullanılan su miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımı azalırken sodyum silikat miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

Kong ve Sanjayan (2008), UKL ve alkali aktivatör ile üretilen geopolimer yapı malzemeler üzerinde alkali aktivatör oranları, sıcaklık ve numunelerin yaşı gibi parametreleri incelemişlerdir. Sıcaklığın numuneler üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için numuneleri 800 °C'de kür sıcaklığında üretmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda genel olarak yüksek sıcaklıkta üretilen geopolimer yapı malzemelerde sıcaklık artışına bağlı olarak numunelerde belli mukavemet artışı gözlemlemişlerdir.

Skvara vd. (2009), UKL bazlı geopolimer malzemeyi ağır metallerle üreterek, X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskopisi (SEM), nükleer manyetik rezonans (NMR) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) gibi mikro yapı analizlerini kullanarak ağır metallerin geopolimer malzeme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu analizlerin yanı sıra numunelerin mekanik özelliklerini de incelemişlerdir. Ürettikleri numunelerde 50 MPa'dan fazla bir basınç dayanımı elde etmişlerdir. Daha sonra ise yapılan mikro yapısal analizler sonucunda hiçbir kristal fazı gözlemlememişlerdir. Bu sonuçların yanı sıra son olarak ağır metaller ile üretilen numunelerde kabul edilebilir performanslar bulmuşlardır.

Diaz vd. (2010), geopolimer matriste kimyasal bileşim, mukavemet davranışı ve mikro yapısal karakterizasyonu ile birlikte priz süresi açısından farklı UKL tiplerinin performansı üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma sonucunda, UKL tipi ve silikat içeriğinin numunelerin mekanik özelliklerini etkileyen ana faktörler olduğunu açıklamışlardır.

Komljenovic vd. (2010), farklı kimyasal aktivatörlerle UKL bazlı geopolimerlerin özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise kullanılan aktivatör tipinin ve konsantrasyonun geopolimer matrisin mekanik ve mikro yapısal özellikleri ile ilgili önemli faktörler olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca yüksek basınç dayanımının, ortaya çıkan geopolimer matrisin yüksek Si/Al oranını yanı sıra numunelerin üretiminde kullanılan UKL'nin kimyasal içeriğinin de etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Temuujin vd. (2011), alkali aktivatör ve asit ile elde edilen UKL bazlı geopolimer harçlar hakkında bir araştırma yapmışlardır. Üretilen numunelerin mineralojik yapısı, alkali ve asit varlığında fiziksel-mekanik davranışı etkileyen ana faktörler olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca kalsine geopolimer kompozitlerin daha az amorf faz ve daha düşük mukavemet değerleri ile sonuçlandığını bulmuşlardır.

Akkurt vd. (2011), çalışmalarında %10, 20 ve 30 oranlarında YFC kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Numuneler üzerinde  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  ölçüm kaynaklarını kullanarak radyasyon geçirgenliğini incelemişlerdir. Numunelere yapılan ölçümler sonucunda ise eklenen YFC oranının artırılmasıyla üretilen betonun radyasyon geçirgenliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Akyıldırım (2011), yaptığı tez çalışmasında hafif ve ağır betonun gama zırlama özelliği bakımından ortalama serbest yol yarı değer katmanlarını ve zayıflatma katsayılarını hesaplamıştır. Deneysel çalışmasında sadece barit ilaveli beton, yarı yarıya agrega ve barit ilaveli beton ve tamamen agregadan üretilmiş betonları incelemiştir. Deneylemlerin sonucunda elde ettiği verileri kurşun kullanılarak üretilen beton sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Başıyigit vd. (2011), yaptıkları çalışmada radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için çeşitli mineral kökenli agregalar kullanılarak farklı beton karışımlarıyla radyasyon

zırh malzemeleri üretmiş ve bu malzemelerin özelliklerini incelemiştir. Farklı mineral kökenli çeşitli agregalarla hazırlanan ağır betonda radyasyon zırhlama ölçümü ile ilgili deneysel sonuçlarda beton karışımlarında kullanıldıklarında yararlı radyasyon sönümleyici olduklarını açıklamışlardır.

Ochbelagh ve Azimkhani (2012), araştırmalarında farklı miktarlarda sadece kurşun eklenerek üretilen betonların gama zayıflatma katsayıları üzerindeki etkisini incelemiştir. Ölçüm kaynakları olarak  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{137}\text{Cs}$  yanı sıra TI detektörü kullanmışlardır. Betondaki kurşun miktarı arttıkça gama zayıflatma katsayılarının da arttığını gözlemlemiştir. Kurşun oranı %100'ün üzerine çıkarıldığında ise katsayının arttığı ancak mukavemetin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Binici vd. (2012), araştırmalarında pomza, silis kumu, UKL ve cüruf ilaveli geopolimer numunelerin mekanik, fiziksel ve radyasyon geçirgenlik özelliklerini incelemiştir. Başta YFC olmak üzere diğer katkı malzemelerinin radyoaktif geçirgenliğinin olduğunu belirlemiştir. Çalışmalarında UKL'nin radyoaktif geçirgenliği %2,5 iken YFC'nin radyoaktif geçirgenliğinin %6 olduğu sonucuna varmışlardır. Ürettikleri bu malzemelerin radyasyon seviyesine maruz kalan yapılarda kullanılabileceğini açıklamışlardır.

Rickard vd. (2012), yüksek sıcaklıklarda UKL bazlı geopolimerlerin performansını araştırmak ve bu kompozitlerin yangına dayanıklı binalarda ve termal yapı uygulamalarında kullanılma olasılığını değerlendirmek için beş farklı UKL'den üretilen geopolimerlerin termal özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen numunelerin mekanik, termal ve mikro yapısal özelliklerini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlarda genel olarak, Si/Al oranının, numunelerin termal ve mekanik davranışlarında çok önemli bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır. Si/Al oranı, 2'den az olan malzemeler numune boyutları açısından daha az güçlü ve zayıf kararlılık sergilerken kimyasal oranı 5'den fazla olan numunelerin daha güçlü olduğunu ve kararlılık sergilediğini belirtmişlerdir.

Geopolimer malzemenin yüksek basınç dayanım ve hızlı dayanım kazanmasını etkileyen faktörler birçok bilim insanı tarafından araştırılmıştır. Örneğin, Chindaprasirt vd. (2013), üretilen malzemenin basınç dayanımını arttırmak amacıyla hammaddelerin boyu, türü, kür sıcaklığı, kimyasal aktivatör türü, aktivatör konsantrasyonu, agrega tipi,

boyutları ve hatta geopolimer malzemeler için farklı atık malzemeler gibi faktörleri dikkate alarak geopolimer malzeme üretmişlerdir. Üretilen UKL geopolimerleri için hızlı bir dayanım belirlemek amacıyla, mikrodalga radyasyonunun kürleme sistemi olarak kullanılması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kısa bir süre için 90 W'lık bir mikrodalga radyasyon ısı işlemi uygulayarak bu prosedürün UKL geopolimer yapı malzemelerinin önceki kürleme işlemleri ile karşılaştırılabilir olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerinde önemli derecede bir geopolimerizasyon gözlemlemişler, bu çalışmada alınan mikrograflarda üretilen matristeki belirli bir kompaktlık ve amorf fazların görüldüğünü belirtmişlerdir.

Geopolimerik yapı malzemeleri üretilirken gerçekleşen reaksiyonlar ile ilgili olarak birçok araştırmacı, geopolimerizasyon işlemi sırasında oluşan bileşikler, üretilen reaksiyonun kimyasal reaksiyonu, reaktivite derecesi ve kimyasal stabilitesinden kaynaklanan fazların türlerini tanımlamakla ilgilenmişlerdir. Fang ve Kayali (2013), geopolimerik reaksiyonun doğasını incelemişler ve geopolimerik matrisi oluşturan diğer bileşiklerle buharlaşan veya birleşen su miktarını belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmaları sonucunda genel olarak, çalışmaları sırasında üretilen geopolimer kompozitlerin sistem içinde buharlaşmamış veya reaksiyona girmemiş belirli bir miktarda su içerdiğini belirtmişlerdir.

Geopolimer matrisin davranışını etkileyen pek çok faktör arasında kürlenme, özellikle kuvvet ve mikro yapısal bağlanma derecesi açısından ortaya çıkan matrisin şeklini ve fazını oluşturmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda ve UKL termal profili, geopolimer sentezinde yaygın olarak kullanılan diğer hammaddelere göre daha aktif olduğu için, kürlenmenin üretilen geopolimer malzeme özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için birçok araştırma yapılmıştır. Adam ve Horiato (2014), farklı zaman dilimlerinde ve sıcaklıklarda UKL geopolimerlerinin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmadaki bulguları, numune ne kadar fazla ısı alırsa, o kadar fazla güç kazanmasıydı. Böylece, en yüksek sıcaklık en yüksek dayanımı vermiştir.

Chindaprasirt ve Chalee (2014), NaOH'ın farklı molaritelerinin, deniz suyu kullanılarak UKL bazlı geopolimer betonun dayanımı, klorür direnci ve korozyon fenomenleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. NaOH molaritesi artmasının korozyon bakımından

daha iyi sonuçlar verdiğini ve korozyonun her zaman basınç dayanımı ile alakalı olmasından dolayı daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır.

Doğan (2015), yaptığı tez çalışmasında tuğla, bims blok, gaz beton ve beton malzemelerin zırhlama özelliklerini araştırmıştır. Deneysel ölçümlerinde  $^{137}\text{Cs}$  ve  $^{60}\text{Co}$  kaynaklarını kullanmış, bununla birlikte teorik hesapları ise XCom bilgisayar kodu ile yapmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda ise malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak gama zayıflatma katsayısının arttığını incelemiştir. Yapılan ölçümler ve hesaplamaların paralel olduğunu açıklamıştır.

Atis vd. (2015), dayanım açısından en iyi sonuçları veren karışımı belirlemek için, kürleme sıcaklığı, kimyasal aktivatör konsantrasyonu ve kürleme süreleri ile ilgili birçok deney yaparak UKL'den üretilmiş yüksek mukavemetli geopolimer harçlar elde etmişlerdir. Optimum bir noktaya kadar hem kürleme sıcaklığı hem de kimyasal aktivatör miktarı, üretilen geopolimer harçların mukavemetini arttıran başlıca faktörler olarak kabul edildiğini bulmuşlardır. Geopolimer alanında çok fazla araştırma yapıldıktan sonra, bazı araştırmacılar standart karışım tasarımlarını sentezlemek için çeşitli deneyler yaparak, geopolimer harç için bir standart karışım belirlemeye çalışmışlardır. Jo vd. (2015), ürettikleri geopolimer karışımın performansını etkileyen farklı birçok faktörün harç üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu faktörler, sodyum hidroksit konsantrasyonları ve aktivatörün UKL'ye oranını UKL bazlı geopolimer harçlar üzerinde incelemişlerdir. Araştırmaları neticesinde, sodyum hidroksit konsantrasyonunun dayanımı arttırdığını, ancak üretilen harçların akış özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Karışım tasarımı için Taguchi yöntemi, son zamanlarda yazılım simülasyonu açısından en umut verici platformlardan biri olarak incelenmiştir. Geopolimer sentezi aktivatörler, dolgu maddeleri, kürleme rejimleri ve diğer detaylar gibi birçok faktöre bağlı olduğundan, karışım tasarımı için Taguchi yöntemi, profesyonel veri tabanı ve sağlayabildiği entegre bilgiler nedeniyle geopolimer alanındaki araştırmalar için oldukça uygundur. Pek çok araştırmacı bu yöntemi geopolimerler ile ilgili araştırmalarına uygulamaya çalışmıştır. Siyal vd. (2016), karışımları Taguchi yöntemi ile tasarlayarak UKL bazlı geopolimerlerin sertleşmesine çeşitli faktörlerin etkisi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, priz süresi Taguchi

yöntemiyle hesaplanmış ve geopolimerlerin tasarımında uygulanabilir bir yöntem olarak kabul edilmiştir.

Ünal vd. (2016), çalışmalarında barit agregası kullanarak ağır beton üretmişlerdir. Bu betonun soğurma özelliklerini ve radyasyon zırlamasını incelemişlerdir. Bu amaçla üç farklı tane boyutta barit agregası ve 2 farklı tane boyutunda normal ve taş unu ilaveli agrega ve bağlayıcı olarak ise yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Üretilen numunelerde birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, ultra ses hızı, radyasyon soğurma katsayısı deneyleri yapılarak beton özelliklerini incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre üretilen numunelerde taş unu miktarının azalması ile birim hacim ağırlığında artış görülürken betonun soğurma miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Barit agregalı betonların basınç dayanımlarının uygun değerlerde olduğunu açıklamışlardır.

Genellikle geopolimerler çevre dostu bağlayıcı sistemlerden biri olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte geopolimerler, diğer bağlayıcılar gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlara örnek olarak, çoğu geopolimer malzemenin sadece ısıl işleme iyileştirilebilmesi, geopolimer kürlenme işlemi sırasında açığa çıkan ısı nedeniyle beklenen düzeyde enerji tasarrufu sağlanamaması verilebilir. Geopolimerik matrisin oluşturduğu tüm ana malzemeler, Dünya çapında ucuz olarak temin edilebilir. Ancak bazı ülkeler geopolimerizasyon için uygun UKL türlerine sahip değildir. Bu gerçekler, bazı araştırmacıların geopolimer üretim sürecini kolaylaştırmak için daha pratik çözümler düşünmelerine yol açtı. Bagheri vd. (2017) bu çalışmalarında borik asit tuzlarından birinin, yani boroaluminosilikatın, uygun maliyetli, mukavemetli ve elastik davranışı iyi olan bir malzeme üretmek için sodyum veya potasyum silikatlara alternatif olarak kullanılma olasılığını araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, bu alternatifin belirli bir içeriğe kadar kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel kısım ile bu araştırmada yürütülen simülasyon programı arasında iyi bir korelasyon olduğunu gözlemlenmiştir.

Bağıl nem, elde edilen geopolimer matrisin mukavemet özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak düşünülmüştür. Bu nedenle, önemli miktarda araştırmanın başlıca noktasını oluşturmaktadır, Oderji vd. (2017), UKL bazlı geopolimerlerin mukavemet özellikleri üzerindeki çeşitli bağıl nemin etkisini

incelemişlerdir. Belli bir bağıl nem değerine kadar, mukavemet özelliklerinin belirli bir gelişme eğilimi gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Assi vd. (2018), parçacığın etkisi ve kullanılan UKL'nin incelik derecesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. UKL'nin partikül boyutu, türü ve inceliğinin, üretilen numunelerin mukavemetinin ve mikro yapısal özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığını bulmuşlardır.

Doğan-Sağlamtimur vd. (2019), yaptıkları çalışmada geopolimer kompozit malzemeler için en yüksek basınç dayanımını, L/M=0.2 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH=2 (ağırlıkça) oranları ile 24 saatte 70 °C'de kürlenerek üretilen karışımda 76,0 MPa (28 gün) olarak bulmuşlardır. Çalışmaları sonucunda, alkali aktivatör oranı için optimum bir sınır olduğunu ve bu sınır aşıldığında geopolimer malzemelerin dayanım özellikleri için ters etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yardım (2020), çalışmasında F ve C sınıfı UKL'lerin geopolimer betonun mekanik özelliklerine etkisinin karşılaştırmıştır. Geopolimer beton üretimine katkı olarak %15, 20 ve 25 oranında F ve C sınıfı UKL ayrı ayrı kullanılarak geopolimer beton üretimi yapılmış ve numunelere mekanik testler uygulanmıştır. Sonuç olarak, C sınıfı UKL'nin F sınıfı UKL'ye kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve daha iyi eğilme dayanımı sağladığını bulmuştur.

Topçu ve Sofuoğlu (2020), çalışmalarında pres filtre atığı, UKL ve alkali aktivatör kullanarak geopolimer harç hazırlamışlardır. Bu harç numuneler üzerinde farklı elek, kür koşullarına ve su içeriği değişkenlerine bağlı olarak taze ve sertleşmiş harç özellikleri birim ağırlık ve basınç dayanım testleri uygulanarak, değerlendirilmişlerdir. 28 günde en yüksek basınç dayanımını 19,58 MPa olarak bulmuşlardır.

## BÖLÜM III

### MATERYAL METOT

#### 3.1 Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan materyaller UKL, Rilem Cembureau kumu, alkali aktivatörler (NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve şebeke suyudur. Geopolimer malzeme üretiminde ham madde olarak kullanılan endüstriyel atık UKL, Çatalağzı TS (Zonguldak, Türkiye) ve İsken Sugözü TS'nden (Adana, Türkiye) temin edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda bu iki farklı külün yapısında kütlece Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiO<sub>2</sub> miktarının %70'den fazla ve içeriklerinde CaO oranının %10'dan az olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 3.1). ASTM C618 (2000) standardına göre, UKL'lerin az kireçli F sınıfı UKL olduğu belirtildiğinden, tezde kullanılan UKL'ler F sınıfıdır. UKL, Rilem Cembureau kumu, alkali aktivatörler ve şebeke suyunun özellikleri alt bölümlerde verilmiştir.

#### 3.1.1 UKL'ye uygulanan test ve analizler

UKL'ye uygulanan test ve analizler, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. UKL'lerin kimyasal kompozisyon analizi X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF, Fotoğraf 3.1) ile yapılmıştır ve sonucu Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** UKL'lerin kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

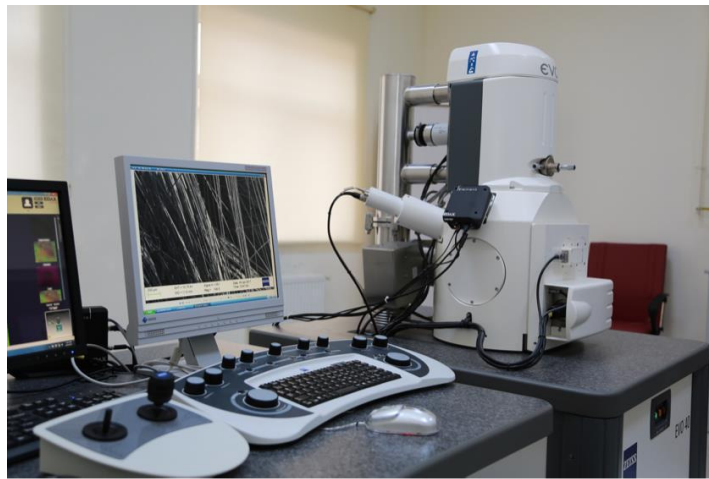
Kimyasal kompozisyon (%)	Çatalağzı TS UKL	İsken TS UKL
CaO	2,00	1,53
SiO <sub>2</sub>	54,08	62,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,08	21,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,68	7,01
MgO	2,67	2,37
SO <sub>3</sub>	0,73	0,07
K <sub>2</sub> O	4,53	3,81
Na <sub>2</sub> O	0,79	0,26
Diğer	2,44	1,21
Kızdırma kaybı (LOI)	1,52	1,78
Özgül ağırlık	2,04	2,25
BET (m <sup>2</sup> /g)	1,11	2,26



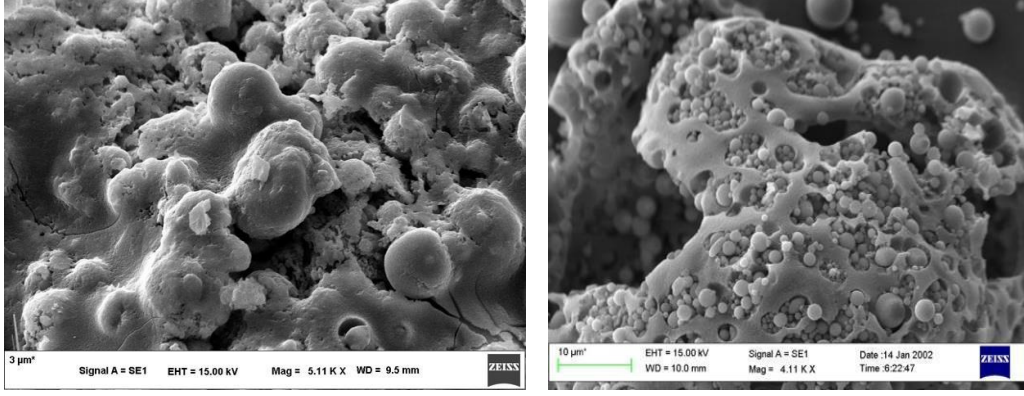
**Fotoğraf 3.1.** UKL'lerin kimyasal analizinde kullanılan XRF cihazı

Çatalağzı ve İsken TS UKL'lerinde alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ )'leri %20'den ve silisyum oksit ( $SiO_2$ )'leri ise %40'dan fazla, diğer bileşenlerin miktarı ise %7'den az bulunmuştur (Çizelge 3.1). Ayrıca TS EN 933 (2010) standardına göre kullanılan küllerin CaO içerikleri %10'dan düşük olduğu için silisli UKL sınıfındadır. Küllerin kimyasal içerikleri incelendiğinde  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  bileşiklerinin toplamının fazla olması, bu UKL'lerin geopolimer malzeme üretimi için uygun olduklarını göstermektedir.

Kullanılan UKL'lerin -Zeiss/Evo 40 marka- (Fotoğraf 3.2) SEM ile görüntüleri incelenerek mikro yapısı hakkında bilgi edinilmiştir. Elde edilen görüntülerde (Fotoğraf 3.3) UKL'lerin yüzeylerinin pürüzsüz olduğu gözlemlenmiştir.



**Fotoğraf 3.2.** UKL'lerin morfolojisinin incelenmesi amacıyla kullanılan SEM cihazı



(a)

(b)

**Şekil 3.3.** Çatalağzı (a) ve İsken (b) UKL SEM görüntüleri

UKL'lere uygulanan yüzey alanı ölçüm (BET) analizi, Quantachrome/NOVA Touch LX4 marka BET cihazı (Fotoğraf 3.4) ile gerçekleştirilmiştir. BET ölçümleri UKL'lerin fiziksel adsorpsiyon metodu ile düşük basınç, makro ve mezo gözenek boyutunu, yüzey alanı ve gözeneklerin boyut dağılımlarını belirlemektedir. Tez çalışmasında kullanılan İsken ve Çatalağzı UKL'sinin yüzey alan ölçüm sonuçları sırasıyla 2,26 ve 1,11 m<sup>2</sup>/g bulunmuştur (Çizelge 3.1).



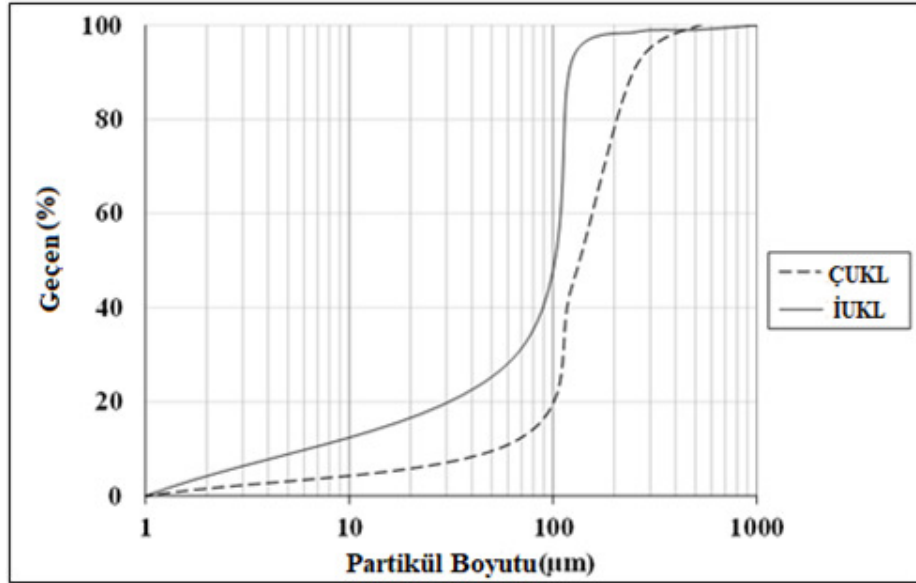
**Fotoğraf 3.4.** UKL'lerin yüzey alanı ölçümünün yapıldığı BET cihazı

TS EN 933-10 standardına göre UKL'lere elek analizi (Fotoğraf 3.5) yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda ise İsken UKL (İUKL)'sinin tanecik boyutunun Çatalağzı UKL

(ÇUKL)'sine göre daha ince olduğu bulunmuştur. İki kül arasındaki tanecik boyu farkı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



**Fotoğraf 3.5.** UKL'lere yapılan elek analizi



**Şekil 3.2.** UKL elek analizi sonuçları

UKL'lere yanabilir madde verim hesabı yapılırken ilk önce kullanılacak krozelerin darası alınmıştır. Krozeler 105 °C'deki etüvde 24 saat bekletildikten sonra desikatörde

soğuması için bekletilmiştir. Etüv kurusuna getirilen krozelere 20 g UKL konulduktan sonra 750 °C'ye ayarlanmış kül fırınında 2 saat boyunca ve son olarak desikatörde bekletilmiştir. Yanabilir madde verim hesabı aşağıdaki formül kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{Yanabilir madde verim} = (\text{Numune ağırlığı} - (y-x) / \text{Numune ağırlığı}) * 100 \quad (3.1)$$

Burada;

Etüv sonrası kroze+UKL=y,

Kroze darası=x,

Numune ağırlığı=20 g'dır.

Yapılan deney ve hesaplamalar sonucunda ÇUKL'sinin yanabilir madde miktarı %7 iken İUKL'sinin %9 olarak bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan UKL'lerin sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlığı (BHA) hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler UKL'lerin küresel yapısına, malzemenin granülometrisine, agreganın özgül ağırlığına ve yerleşme şekline bağlıdır. ÇUKL'si için etüv kurusu sıkışık ve gevşek BHA değerleri sırasıyla; 0,88 ve 0,75 g/cm<sup>3</sup>, hava kurusu sıkışık ve gevşek BHA değerleri sırasıyla 1,04 ve 0,87 g/cm<sup>3</sup>'dür. İUKL'si için etüv kurusu sıkışık ve gevşek BHA değerleri ise sırasıyla; 1,05 ve 0,98 g/cm<sup>3</sup>, hava kurusu sıkışık ve gevşek BHA değerleri sırasıyla 1,14 ve 1,10 g/cm<sup>3</sup>'dür.

### 3.1.2 Rilem Cembureau standart kumu

Bu tezde ince agrega olarak TSE EN 196-1 (2009) standardındaki Rilem Cembureau standart kumu kullanılmıştır. Yoğunluğu 1,35 g/cm<sup>3</sup> ve özgül ağırlığı 2,56 g/cm<sup>3</sup> olan bu kuma ait elek analizi Çizelge 3.2'de ve deneysel tartımı Fotoğraf 3.6'te verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Rilem Cembureau standart kumunun elek analizi

Tane çapı (mm)	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	2.0
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Spesifik sınırları (%)	99±1	99±5	67±5	33±5	7±5	0



**Fotoğraf 3.6.** Rilem Cembureau standart kumunun deney için tartım aşaması

### 3.1.3 Alkali aktivatör

Geopolimer yapı malzemesi üretiminde iki farklı alkali aktivatör kullanılmıştır. Bu alkali aktivatörler sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve 12 M çözelti halinde olan sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ( $\text{Na}_2\text{O}=\%14,7$ ,  $\text{SiO}_2=\%29,4$  ve  $\text{H}_2\text{O}=\%55,9$ ).

### 3.1.4 Su

Bu tez çalışmasında geopolimer malzeme üretim aşamasında kullanılan su, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi kampüsü şebeke suyudur.

### 3.2 Metot

Deneylerde kullanılan malzemelerin temini ve deneylerin yapılmasında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı, Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve Fizik Bölümü Laboratuvarı kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, iki farklı UKL ve agrega ile farklı karışımlarda ÇUKL, İUKL, ÇUKL+agrega ve İUKL+agrega malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere test günleri geldiğinde temel fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır. ASTM standartları dikkate alınarak yapılan fiziksel testler sırasıyla yayılma yöntemi ile kül/su oranı belirleme, BHA, su emme, porozite ve radyasyon durumunun belirlenmesi iken mekanik testler eğilme dayanımı ve basınç dayanım testleridir.

### 3.2.1 Geopolimer yapı malzemesi numunelerinin üretimi

Çatalağzı ve İsken UKL'leri 500 mm'lik eleklerden elenmiş ve elekten geçen UKL'ler malzeme üretimi için hazır hale getirilmiştir. Numuneler farklı karışım miktarları ve farklı kür sıcaklıklarıyla üretilmiştir. Geopolimer yapı malzemesi üretiminde UKL ve standart kumun ağırlık esasına dikkate alınmış sadece UKL ve UKL+agrega olmak üzere iki farklı karışım ile numune üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelerin karışım oranları, kullanılan alkali aktivatör oranı ve kürleme sıcaklığı ayrıntılı olarak Çizelge 3.3 ve 3.4'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Sadece UKL (Karışım 1) kullanılarak üretilen geopolimer malzemelerin karışım oranları

UKL (g)	A/M Oranı	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH Oranı	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	Kür Sıcaklığı (°C)	
1000	%20	1	120	120	70	100
		1.5	96	144		
		2	80	160		
		2.5	68	172		
		3	60	180		
	%40	1	240	240		
		1.5	192	288		
		2	160	320		
		2.5	136	344		
		3	120	360		

**Çizelge 3.4.** UKL+agrega (Karışım 2) kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinin karışım oranları

UKL (g)	Kum (g)	Alkali Aktivatör/Materyal Oranı	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH Oranı	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	Kür Sıcaklığı (°C)	
600	600	%20	1	120	120	70	100
			1.5	96	144		
			2	80	160		
			2.5	68	172		
			3	60	180		
		%40	1	240	240		
			1.5	192	288		
			2	160	320		
			2.5	136	344		
			3	120	360		

Tez çalışması kapsamında sadece UKL (Karışım 1) ile üretilen numuneler için 1000 g Rilem Çatalağzı ve İskan UKL'leri ile birlikte alkali aktivatörler kullanılarak iki farklı kütleme sıcaklığı (70 ve 100 °C) kullanılmıştır. Üretim detayları şu şekildedir: Karışım 1'den geopolimer yapı malzemeleri hazırlanırken ilk olarak masa tipi mikserin içerisine daha önce optimizasyonu yapıp belirlenen oranlarda- su konulmuştur. Hassas terazide tartılan UKL ile suyun masa tipi mikserde 1 dakika yavaş karışım işlemi takiben NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> eklenip 5 dakika boyunca hızlı karıştırılmıştır. Hazır hale gelen harçlar, şekil kazandırmak amacıyla, 40x40x160 mm boyutundaki dikdörtgen prizma biçimindeki kalıplara dökülmüştür. Ardından laboratuvar tipi etüvde 70 ve 100 °C sıcaklıklarda sırasıyla 48 ve 24 saat kürlenmiştir.

Tezde üretilen Karışım 2 numuneleri, 600 g Rilem Cembureau kumu ve 600 g Çatalağzı ve İskan UKL'leri ile birlikte alkali aktivatörler kullanılarak iki farklı kütleme sıcaklığında (70 ve 100 °C) üretilmiştir. Üretim detayları şöyledir: UKL ve agregadan (Karışım 2) oluşan geopolimer harç hazırlanırken de Karışım 1'de olduğu gibi mikserde, daha önceden optimizasyonu belirlenen oranda, su konulmuştur. Daha sonra hassas terazide tartılan kül ve standart kum sırasıyla mikserin içine eklenmiş ve 1 dakika boyunca yavaş hızda karıştırılmıştır. Mikserin hızı artırıldıktan hemen sonra NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> eklenip 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan harç 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülmüş, daha sonra etüvde 70 ve 100 °C

sıcaklıklarda sırasıyla 48 ve 24 saat kürlenmiştir. Karışım 1 ve 2 numunelerin -bu kürlenme işlemi bittikten sonra- test yaşlarına (7, 28 ve 90. günler) kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir.

### 3.2.2 UKL'lerin sıkışık BHA deneyi

Geopolimer malzemelerin (BHA)'sı, numuneler etüvde kürlenip oda sıcaklığında tutulduktan sonra 1, 7, 28 ve 90 günlerde hesaplanmıştır. Her bir kalıptaki 3'er adet bulunan numunelerin (Fotoğraf 3.7) BHA'sının aritmetik ortalaması alınarak o numuneye ait BHA elde edilmiştir. ASTM C642 (2013) standardına göre numunelerin BHA'sı hesaplanmıştır.



**Fotoğraf 3.7.** Üretilen geopolimer numunesi

### 3.2.3 Geopolimer yapı malzemelerinde eğilme dayanım testi

Üretilen geopolimer yapı malzemeleri, boyutları 40\*40\*160 mm olan dikdörtgen prizmalar şeklinde hazırlanmış ve pres cihazına (Fotoğraf 3.8) yerleştirilmiştir.



**Fotoğraf 3.8.** Geopolimer numunelerde eğilme deneyinin gerçekleştirilmesi

Geopolimer yapı malzemeleri tek yönlü yük uygulanarak kırılmış, ASTM C348 (2014) standardı dikkate alınarak 7, 28 ve 90. günde eğilme dayanım testi gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.4 Geopolimer numunelerinde basınç dayanım testi

Üretilen geopolimer yapı malzemelerin basınç dayanım testleri ASTM C349 (2014) standardına göre yapılmıştır. Numune eksenini ile pres makinasının basınç merkezi paralel olacak şekilde numune yerine yerleştirilmiştir. Daha sonra 3 dakikalık yükleme hızı ile ne kadarlık bir yüke dayandığını belirlemek amacıyla numune tam ortadan kırılmıştır. Verilen yük sonucunda kazanılan dayanıma dair sonuç pres makinasının ekranında gösterilmiş ve kaydedilmiştir (Fotoğraf 3.9).



**Fotoğraf 3.9.** Geopolimer malzemelerde basınç dayanım deneyinin gerçekleştirilmesi

### 3.2.5 Geopolimer malzemelerde su emme deneyi

Üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme deneyi ASTM C642 (2013) standardına göre yapılmıştır. Geopolimer malzemeler ilk olarak laboratuvar tipi etüvde 105 °C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Daha sonra bir süre oda sıcaklığında bekletilmiş ve hassas terazi ile tartımları yapılmıştır. Tartımları alınıp ağırlıkları ölçülen numuneler, içi 20-25 °C sıcaklıktaki su ile dolu olan geniş kaba yerleştirilip, 24 saat bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numunelerin üzerindeki su damlaları nemli bir havlu yardımı ile temizlenmiş ve hemen ardından hassas terazide yeniden ölçümleri yapılmıştır. Bu işlem 24 saat içinde belli sürelerde tekrarlanmış ve sabit ağırlığı

bulunmuştur. Bu işlemlerin en sonunda ise numuneler suya doymun hale gelmiş ve Archimedes terazisinde tartılıp su içerisindeki kütleleri belirlenmiştir.

### 3.2.6 Geopolimer malzemelerde porozite deneyi

Üretilen geopolimer yapı malzemelerini porozite deneyi ASTM C642 (2013) standardına göre yapılmıştır. Malzemelerin hacimce olan su emme oranları görünür poroziteye eşittir. Bu malzemelerin porozite hesabı yapılırken su emme deneyinde kullanılan parametreler dikkate alınmıştır. Porozite hesabı aşağıdaki eşitlikte açıklanmıştır.

$$P = 1 - \frac{\gamma_k}{\gamma_s} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

Burada;

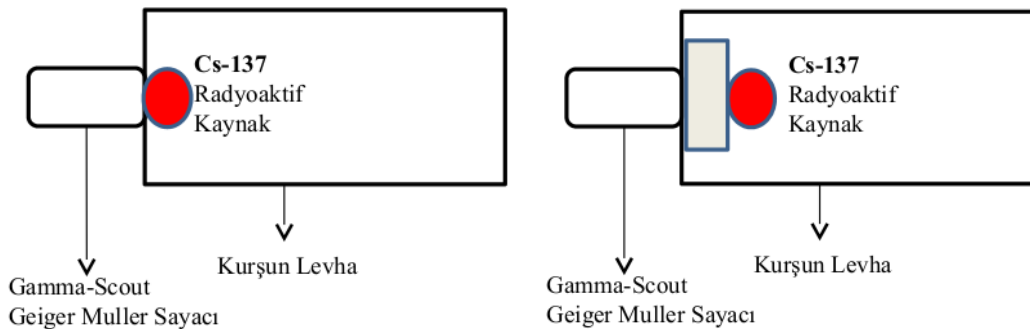
$\gamma_k$ : BHA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\gamma_s$ : Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

P: Porozite (%)

### 3.2.7 Geopolimer malzemelerin radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi

Tez çalışmasında üretilen geopolimer yapı malzemelerin radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi için 4 mm kalınlığında kurşun levha kaplı kafes sistemi tasarlanmış (Şekil 3.3) ve kullanılmıştır (Fotoğraf 3.10).



**Şekil 3.3.** Geiger-Müller sayacı ile radyoaktif kaynağın önünde geopolimer malzeme yokken (sol) ve varken (sağ) yaklaşık 1 saatlik süre içinde yapılan ölçüm

Bu sistemin dışına, radyoaktif kaynaktan (Cs-137) yayılan gama ışınlarının miktarını belirlemek için, Geiger-Müller sayacı yerleştirilmiştir. Geopolimer malzeme yokken şahit ölçüm yapılmıştır. Geiger-Müller sayacı ile kafesin içine yerleştirilmiş radyoaktif kaynak arasına geopolimer yapı malzemesi yerleştirilmiştir. Ölçümler, malzemenin arkasına yerleştirilen ve numuneden absorplanan gama ışınlarından arta kalan gama ışınlarını algılayan sayacın okuma ekranı üzerinde gösterilen değerler kaydedilerek gerçekleştirilmiştir. Böylece ölçümü yapılan malzemenin absorpladığı radyasyon miktarı belirlenmiştir.



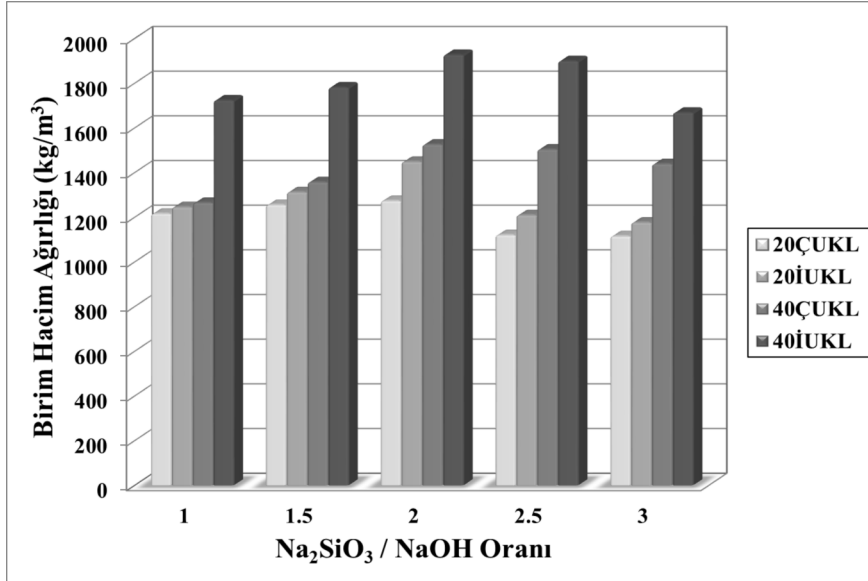
**Fotoğraf 3.10.** Tez çalışmasında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi için tasarlanmış kurşun levha ile kaplanmış kafes, radyasyon kaynağı ve Geiger-Müller sayacı

## BÖLÜM IV

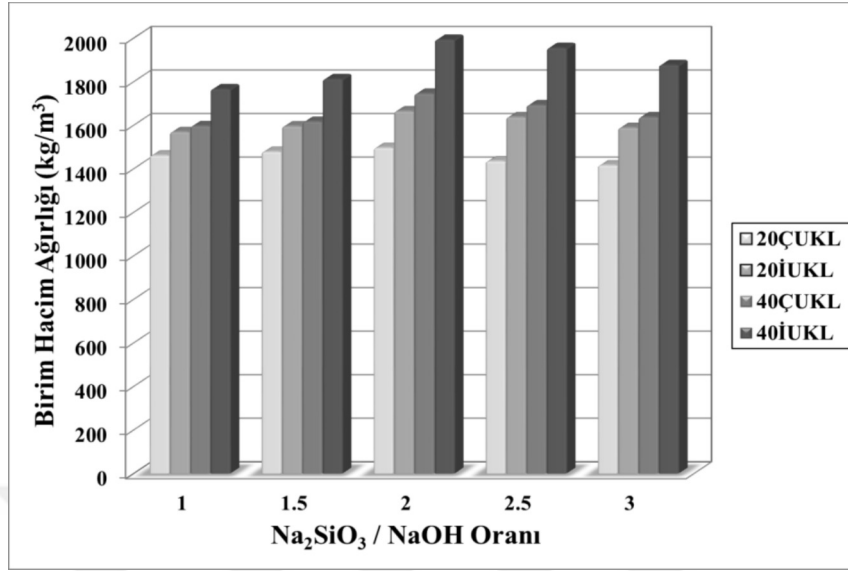
### BULGULAR

Tez çalışması kapsamında ÇUKL ve İUKL'den Karışım 1 (sadece UKL) ve Karışım 2 (UKL+agrega) ile üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 1, 7, 28 ve 90 günlük BHA değerleri belirlenmiştir; çünkü yapı malzemeleri ilk 14 günde basınç dayanımının %90'nını kazanmaktadır. 28 günde dayanım seviyesi %99'a ulaşır; malzemenin sonraki günlerde devam eden dayanım artışı çok az olduğundan grafikte sadece 28 günlük değerler gösterilmiştir.

Bu tezde 70 ve 100 °C kürlenme sıcaklıklarında Karışım 1 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 28 günlük değerleri Şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. Karışım 1 için BHA değerleri 1115-1993 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. 70 °C'de 48 saat kürlenmiş geopolimer malzemelerin en düşük BHA değeri 20ÇUKL-3'de 1115 kg/m<sup>3</sup> iken en yüksek değeri ise 40İUKL-2'de 1927 kg/m<sup>3</sup>'dür (Şekil 4.1). Diğer yandan 100 °C'de 24 saat kürlenmiş geopolimer yapı malzemelerinin en düşük değeri 20ÇUKL-3'de 1416 kg/m<sup>3</sup> iken en yüksek değeri 40İUKL-2'de 1993 kg/m<sup>3</sup>'dür (Şekil 4.2).

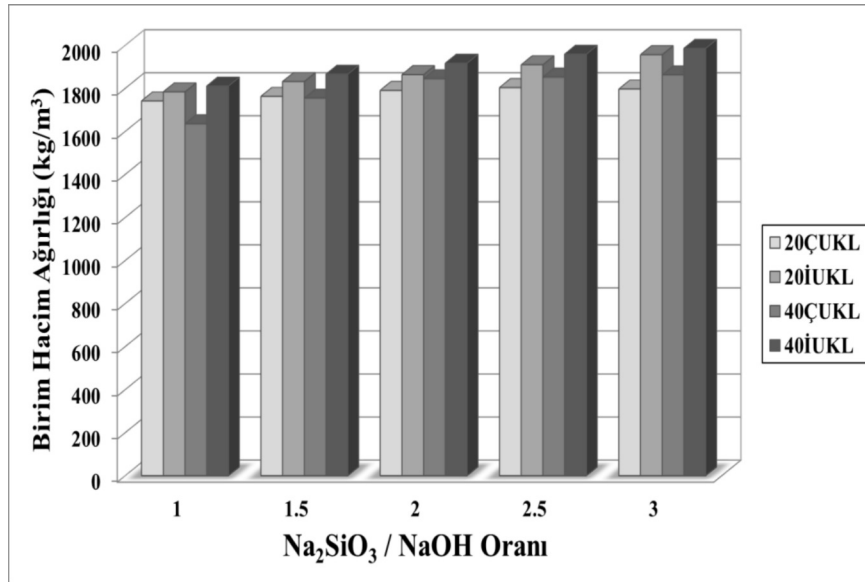


**Şekil 4.1.** Sadece ÇUKL ve İUKL'leri (Karışım 1) kullanılarak üretilen 70 °C'de 48 saat kürlenmiş geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri



**Şekil 4.2.** Sadece ÇUKL ve İUKL'leri (Karışım 1) kullanılarak üretilen 100 °C'de 24 saat kürlenmiş geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri

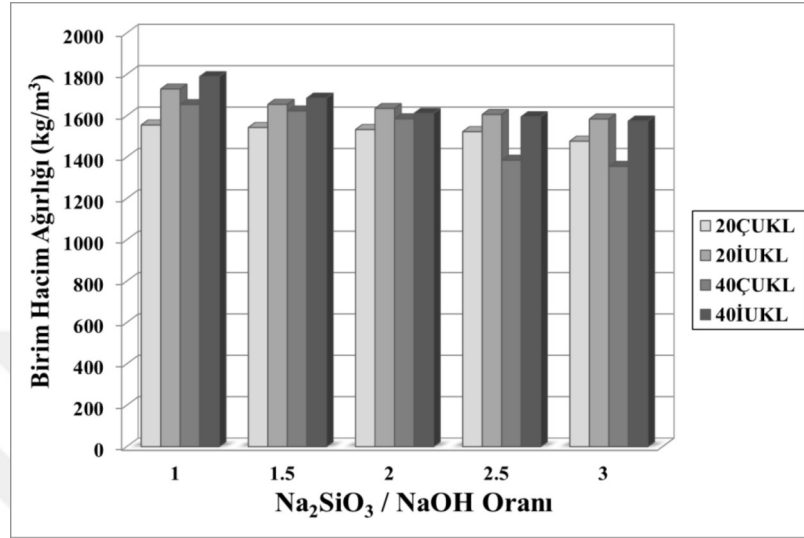
Bu tezde 70 ve 100 °C kürlenme sıcaklığında Karışım 2 kullanılarak üretilen geopolimerlerin 28-gün BHA değerleri 1355-1985 kg/m<sup>3</sup> aralığındadır (Şekil 4.3, 4.4).



**Şekil 4.3.** Rilem Cembureau kumu ile birlikte ÇUKL ve İUKL'leri kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri

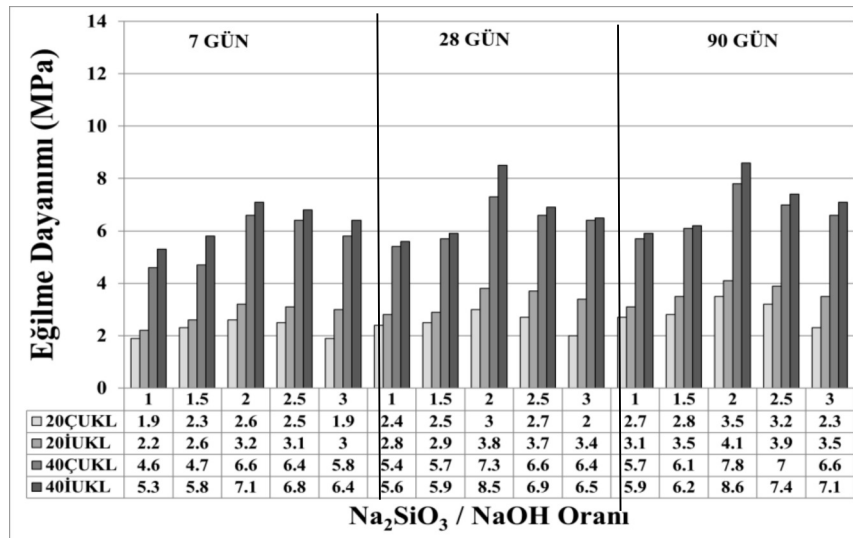
Kürlenme sıcaklığı 70 °C olan numunelerin en düşük BHA değeri 40 ÇUKL-1'de 1635 kg/m<sup>3</sup> iken en yüksek değeri 40İUKL-3'de 1985 kg/m<sup>3</sup>'dür (Şekil 4.3). 100 °C'de

kürlenen geopolimer numunelerin en düşük değeri 40ÇUKL-3'de 1355 kg/m<sup>3</sup> iken en yüksek değeri 40İUKL-1'de 1789 kg/m<sup>3</sup>'dür (Şekil 4.4).



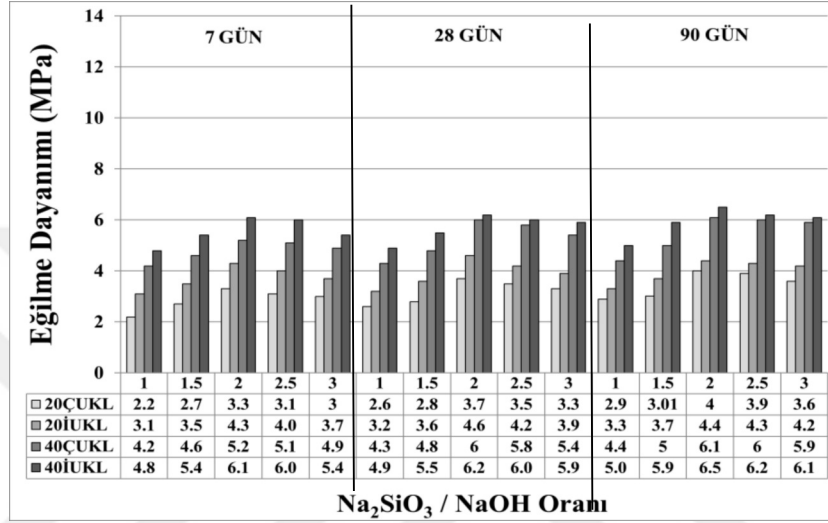
Şekil 4.4. Rilem Cembureau kumu ile birlikte ÇUKL ve İUKL'leri kullanılarak 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin BHA değerleri

Karışım 1 ile 70 ve 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimerlerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları 1,9-8,6 MPa aralığında değişmektedir (Şekil 4.5 ve 4.6).



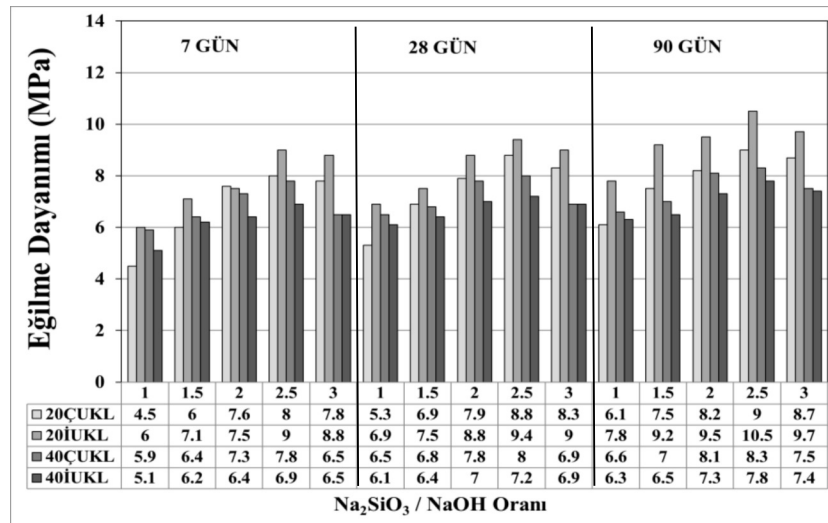
Şekil 4.5. Karışım 1 kullanılarak 70 °C'de kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri

70 °C’de kürlenmiş geopolimer numunelerin en düşük eğilme dayanım değeri, 20ÇUKL-1’de 1,9 MPa (7. gün) iken en yüksek değeri ise 40İUKL-2’de 8,6 MPa (90. gün)’dür (Şekil 4.5). 100 °C’de kürlenmiş geopolimer numunelerin en düşük değeri 20ÇUKL-1’de 2,2 MPa (7. gün) iken en yüksek değeri 40İUKL-2’de 6,5 MPa (90. gün)’dür (Şekil 4.6).



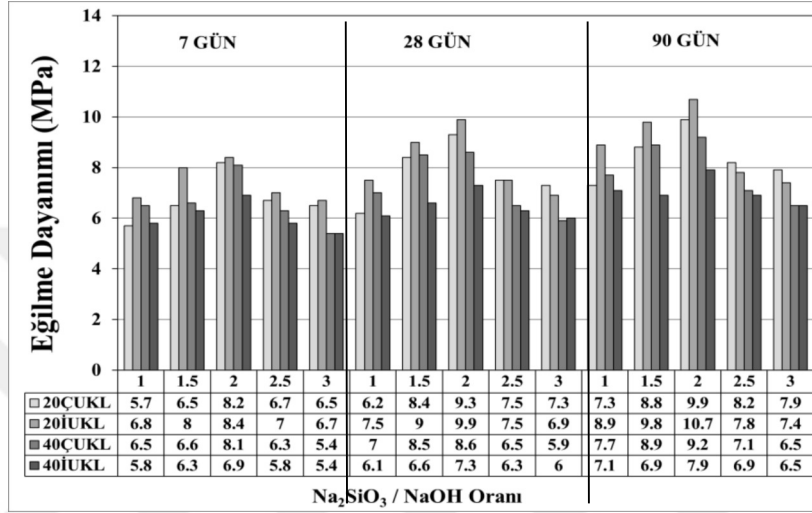
Şekil 4.6. Karışım 1 kullanılarak 100 °C’de kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri

Tez çalışması kapsamında Karışım 2 ile üretilen geopolimer numunelerin eğilme dayanım değerleri 4,5-10,7 MPa arasında değişmektedir (Şekil 4.7 ve 4.8).



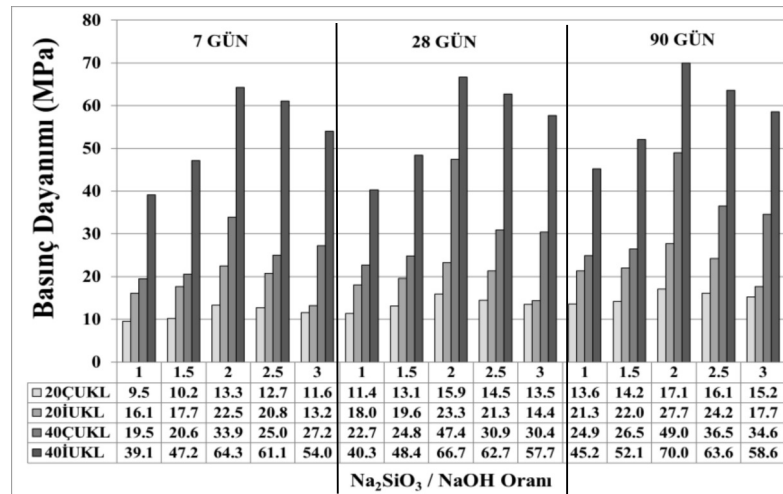
Şekil 4.7. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri

70 °C kürlenmiş geopolimerlerin en düşük eğilme dayanım değeri 20ÇUKL-1’de 4,5 MPa (7. gün) iken en yüksek değeri 20İUKL-2,5’de 10,5 MPa’dır (90. gün) (Şekil 4.7). 100 °C’de kürlenmiş geopolimerlerin en düşük eğilme dayanım değeri 20ÇUKL-1’de 5,7 MPa (7. gün) ve en yüksek değeri 20İUKL-2’de 10,7 MPa (90. gün)’dir (Şekil 4.8).



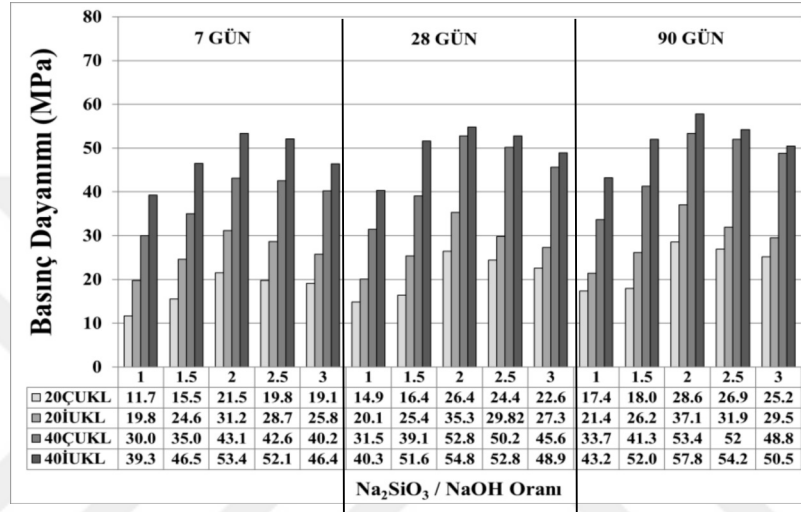
Şekil 4.8. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin eğilme dayanım değerleri

Bu tez çalışması kapsamında ÇUKL ve İUKL’lerinden üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.9 ve 4.10).



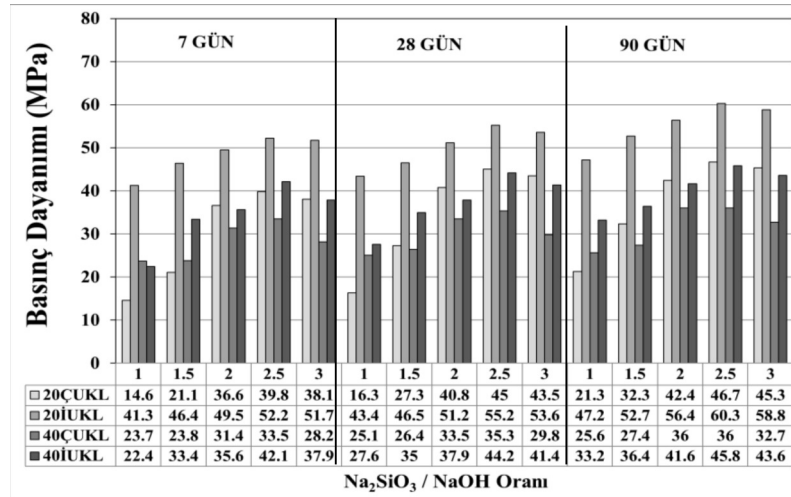
Şekil 4.9. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri

Karışım 1 geopolimerlerin basınç dayanımları 9,5-70 MPa aralığındadır. 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş geopolimerlerin en düşük ve yüksek basınç dayanımları 20ÇUKL-1’de 9,5 MPa (7. gün) ve 40İUKL-2’de 70 MPa (90. gün)’dür (Şekil 4.9). 100 °C’de kürlenmiş geopolimerlerin en düşük ve yüksek basınç dayanımları 20ÇUKL-1’de 11,7 MPa (7. gün) ve 40İUKL-2’de 57,8 MPa (90. gün)’dür (Şekil 4.10).



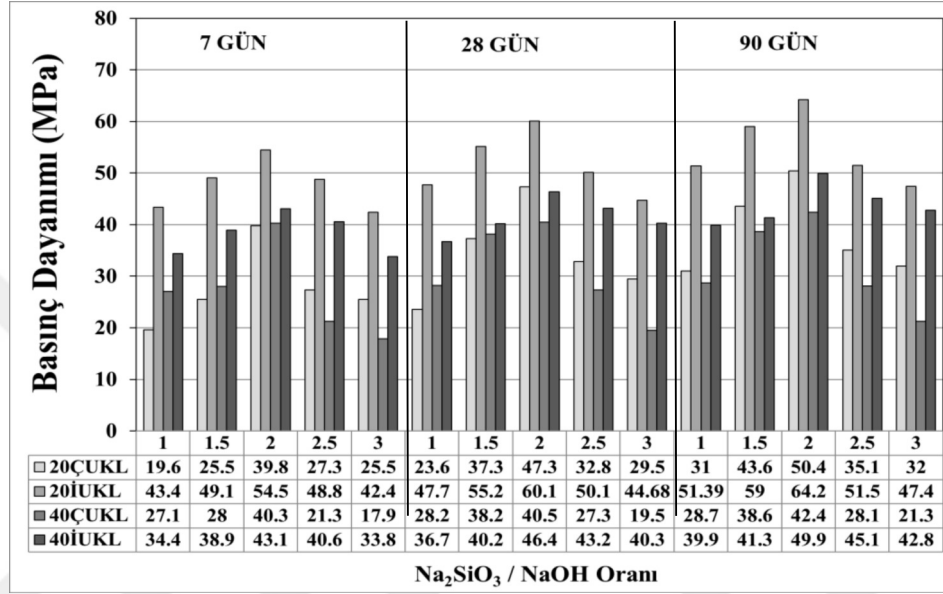
Şekil 4.10. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri

Bu tezde 70 ve 100 °C kürlenme sıcaklıklarında üretilen Karışım 2 numunelerinin basınç dayanım değerleri 14,6-64,2 MPa arasındadır (Şekil 4.11 ve 4.12).



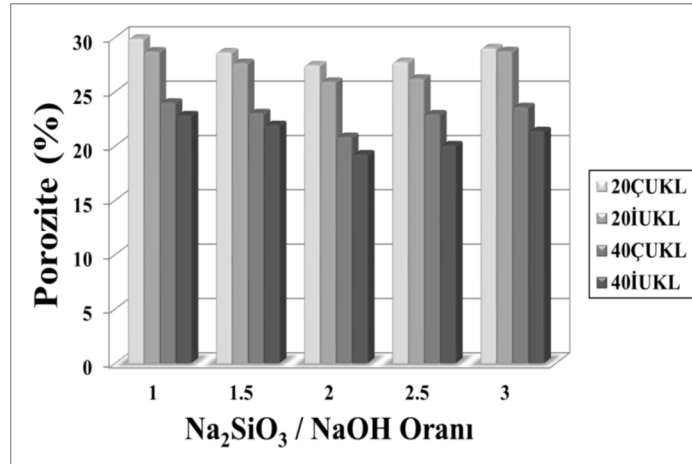
Şekil 4.11. Karışım 2 ile 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri

Kürleme sıcaklığı 70 °C olan geopolimerlerin en düşük ve yüksek basınç dayanım değerleri 20ÇUKL-1’de 14,6 MPa (7. gün) ve 20İUKL-2,5’da 60,3 MPa (90. gün)’dır (Şekil 4.11). 100 °C’de kürlenmiş geopolimerlerin en düşük basınç dayanım değeri 20ÇUKL-1’de 19,6 MPa iken en yüksek değeri 20İUKL-2’de 64,2 MPa’dır (Şekil 4.12).



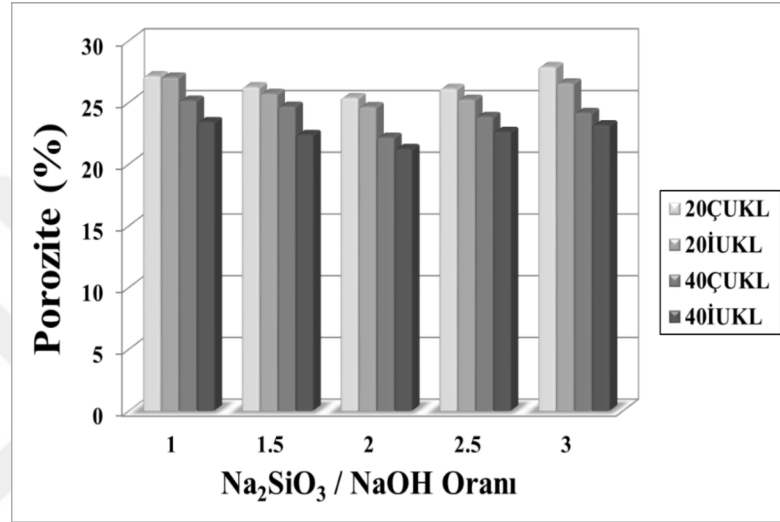
Şekil 4.12. Karışım 2 ile 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanım değerleri

Bu tez çalışması kapsamında ÇUKL ve İUKL’lerinden üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 28 günlük porozite değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.13 ve 4.14).



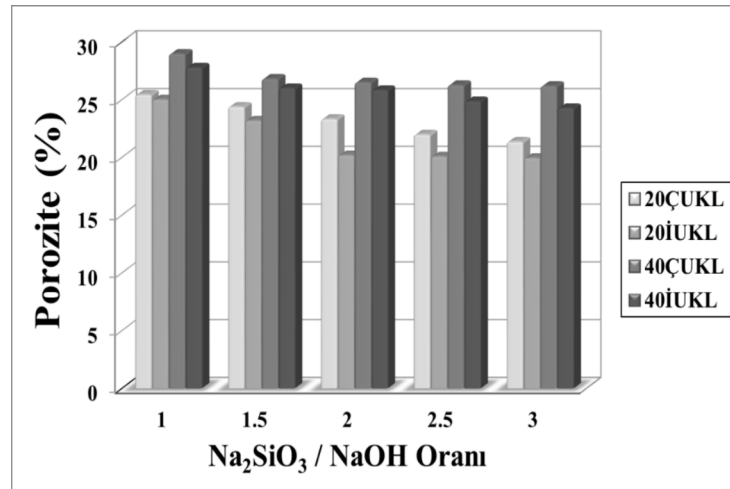
Şekil 4.13. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri

70 ve 100 °C kürleme sıcaklığı kullanılarak Karışım 1 ile üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri %19,21-29,86 aralığındadır. 70 °C sıcaklıkta kürlenmiş geopolimerlerin en düşük ve yüksek porozite değerleri 40İUKL-2'de %19,21 ve 20ÇUKL-1'de %29,86'dır (Şekil 4.13). 100 °C'de kürlenmiş geopolimerlerin en düşük ve yüksek değerleri 40İUKL-2'de %21,22 ve 20ÇUKL-3'de %27,85'dir (Şekil 4.14).



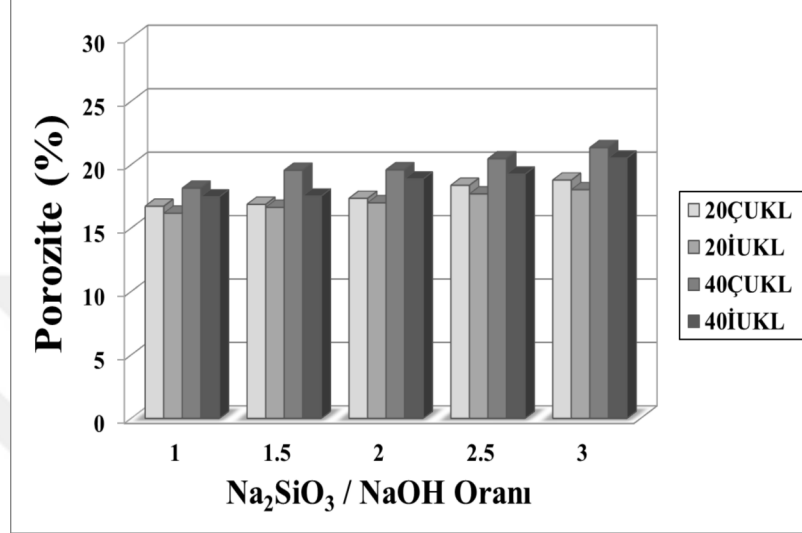
Şekil 4.14. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri

Karışım 2 ile hazırlanan geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri %16,16-28,96 arasında değişmekte olup grafikleri Şekil 4.15 ve 4.16'de verilmiştir.



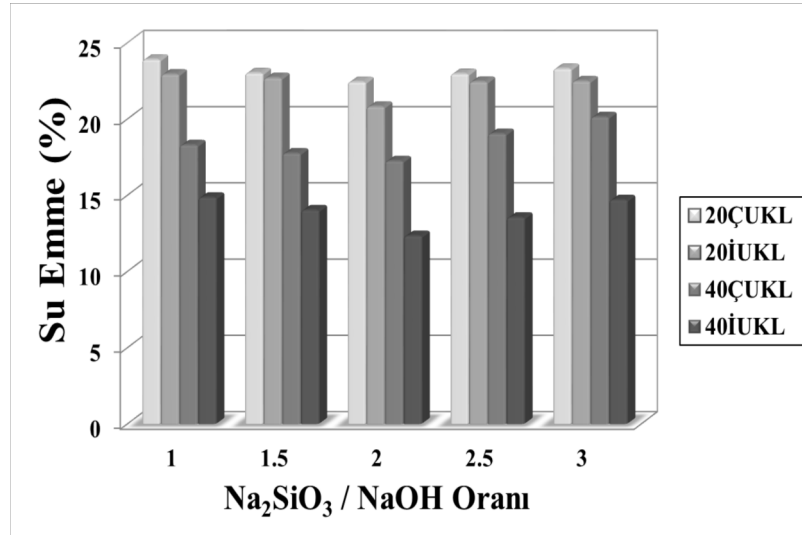
Şekil 4.15. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri

Tezde üretilen geopolimerlerin en düşük ve yüksek porozite değerleri 70 °C’de kürlenelerde 20İUKL-3’de %19,93 ve 40ÇUKL-1’de %28,96 iken 100 °C’de kürlenelerde 20İUKL-1’de %16,16 ve 40ÇUKL-3’de %21,33’dır (Şekil 4.16 ve 4.17).



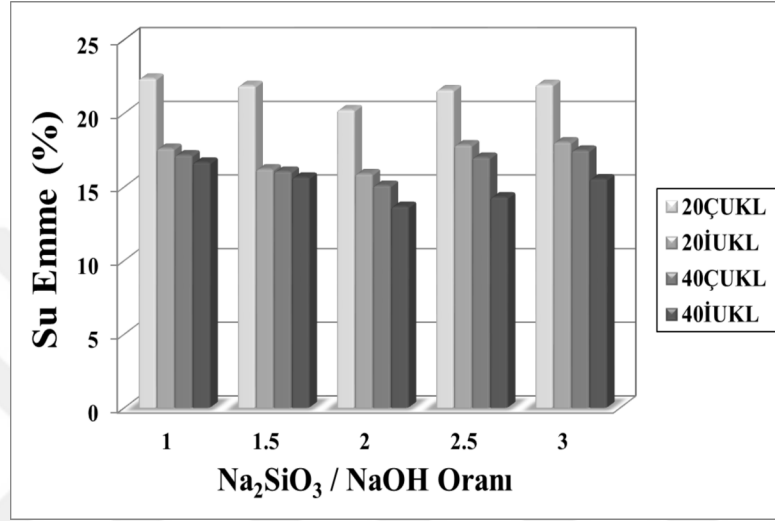
Şekil 4.16. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değerleri

Bu tez çalışması kapsamında ÇUKL ve İUKL’lerinden üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 28 günlük su emme değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.17-4.20).



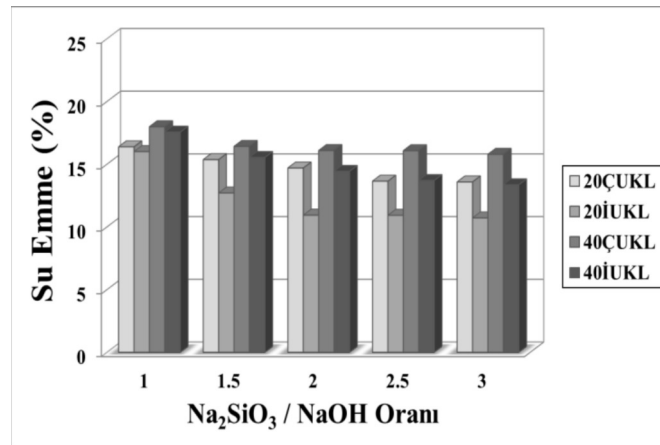
Şekil 4.17. Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri

Karışım 1 kullanılarak üretilen geopolimerlerde su emme değerleri %12,32-23,89 aralığındadır. Geopolimerlerin en düşük ve yüksek su emme değerleri, 70 °C’de kürlenelerde 40İUKL-2’de %12,32 ve 20ÇUKL-1’de %23,89 (Şekil 4.17), 100 °C’de kürlenelerde 40İUKL-2’de %13,65 ve 20ÇUKL-1’de %22,35’dir (Şekil 4.18).

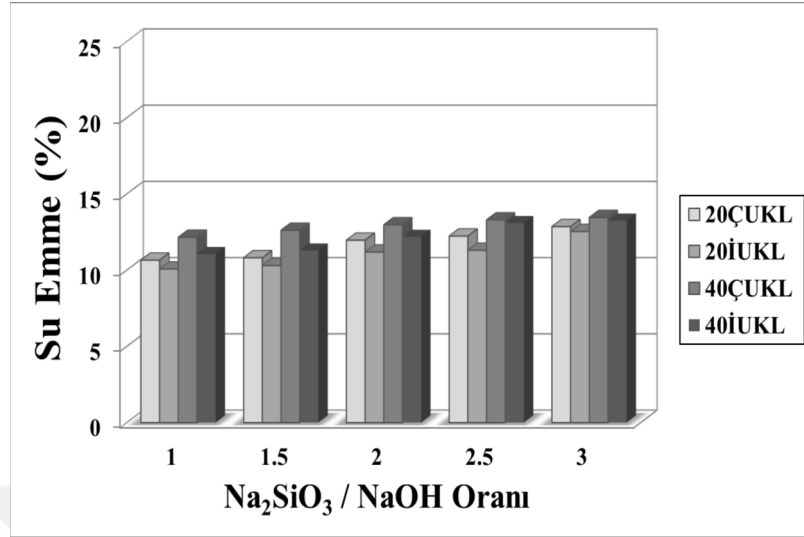


Şekil 4.18. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri

Karışım 2 kullanılarak üretilen geopolimerlerin su emme değerleri %10,07-17,98 aralığındadır. Bu geopolimerlerin en düşük ve yüksek su emme değerleri, kürlenme sıcaklığı 70 °C iken 20İUKL-3’de %10,71 ve 40ÇUKL-3’de %17,98 (Şekil 4.19) ve 100 °C’de iken 20İUKL-1’de %10,07 ve 40ÇUKL-3’de %13,45’dir (Şekil 4.20).

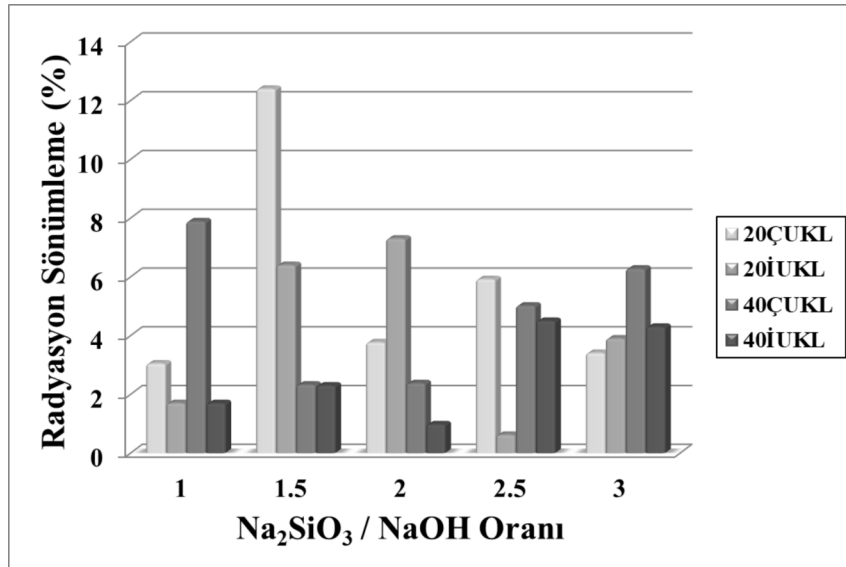


Şekil 4.19. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürlenme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri



**Şekil 4.20.** Karışım 2 kullanılarak 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emme değerleri

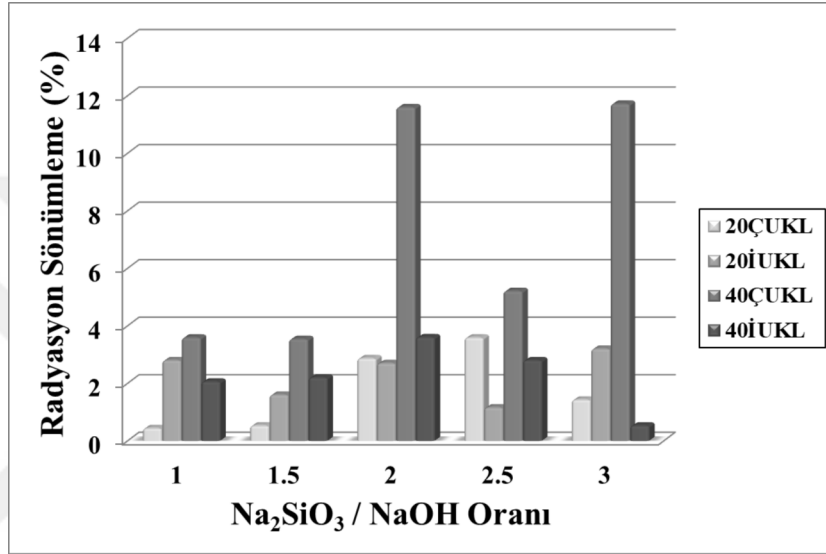
Bu tez çalışması kapsamında ÇUKL ve İUKL'lerinden üretilen geopolimer yapı malzemelerinin 28 günlük radyasyon sönmleme değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.21 ve 4.22).



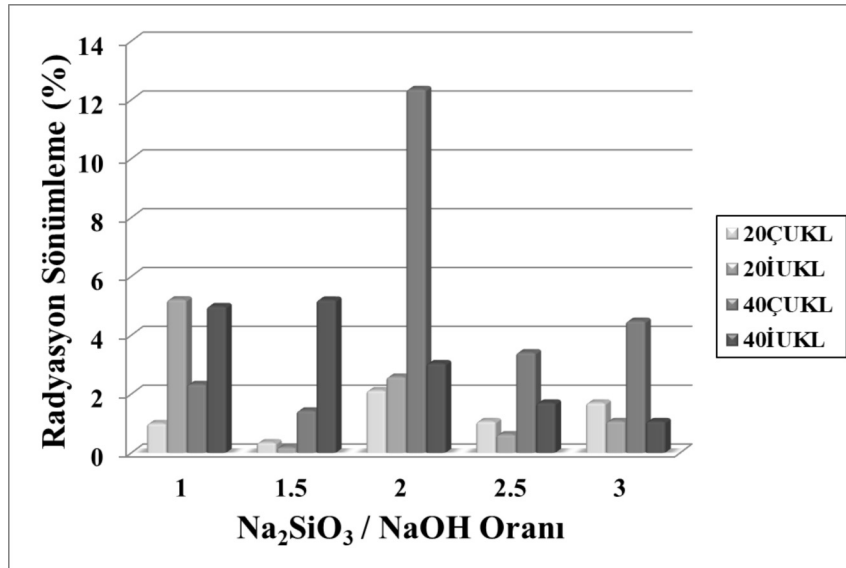
**Şekil 4.21.** Karışım 1 kullanılarak 70 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değerleri

Karışım 1 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerin radyasyon sönmleme değerleri Şekil 4.21 ve 4.22'de gösterilmiştir. Karışım 1 için radyasyon sönmleme

değerleri %0,44-12,4 aralığında değişmektedir. 70 °C’de kürlenmiş geopolimer numunelerin en düşük radyasyon sönmleme değeri 20İUKL-2,5’da %0,62 iken en yüksek değeri ise 20ÇUKL-1,5’da %12,4’dür (Şekil 4.21). Bununla birlikte 100 °C’de kürlenmiş geopolimer numunelerin en düşük değeri 20ÇUKL-1’de %0,44 iken en yüksek değeri 40ÇUKL-3’de %11,72’dir (Şekil 4.22).

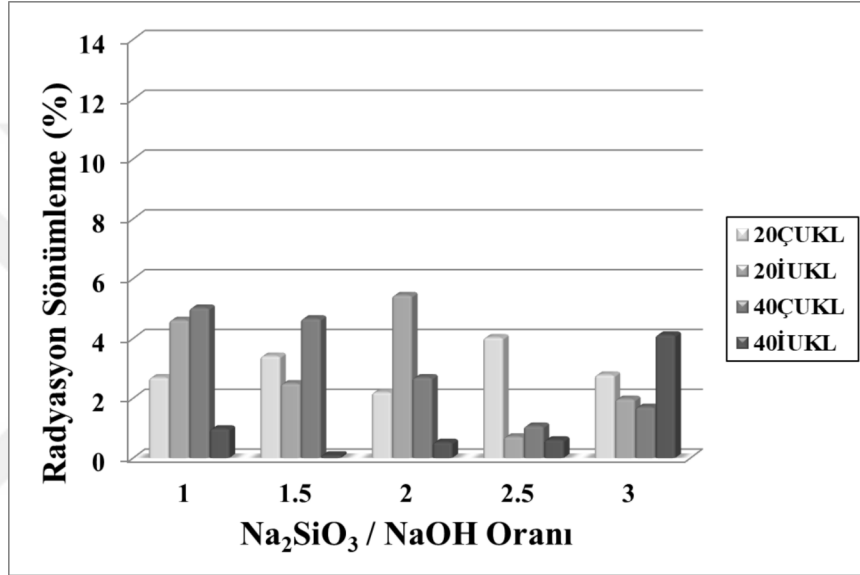


Şekil 4.22. Karışım 1 kullanılarak 100 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değeri



Şekil 4.23. Karışım 2 kullanılarak 70 °C kürleme sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönmleme değeri

Karışım 2 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerin radyasyon sönümleme değerleri, Şekil 4.23 ve 4.24’de gösterilmiştir, %0,09-12,36 arasında değişmektedir. Kurlama sıcaklığı 70 °C olan numunelerin en düşük radyasyon sönümleme değeri 20İUKL-1,5’da %0,18 iken en yüksek değeri 40ÇUKL-2’de %12,36’dır (Şekil 4.23). Bununla birlikte 100 °C’de kurlenen geopolimer numunelerin en düşük değeri 40İUKL-1,5’da %0,09 iken en yüksek değeri 20İUKL-2’de %5,44’dür (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Karışım 2 kullanılarak 100 °C kurlama sıcaklığında üretilen geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümleme değerleri

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 5.1 Karışım 1 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Fiziksel-Mekanik Test Sonuçları

##### 5.1.1 Birim hacim ağırlık, porozite ve su emme

Geopolimer yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde UKL'lerin partikül büyüklüğü, kütleme sıcaklığı, alkali aktivatör/materyal (A/M) ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranları önemli parametrelerdir. Karışım 1'den artan kütleme sıcaklığında daha ince partikül boyutundaki UKL'den üretilen geopolimer numunelerin BHA'sı daha fazla bulunmuştur. Ayrıca aktivatör oranı 2'ye kadar olan ve 100 °C'de kürlenmiş numunelerde A/M oranındaki artış, numunelerin BHA'sında iyi sonuçlara ulaştırmıştır. Bu durum, reaksiyon sırasında geopolimer harçların genişlemesine neden olan aşırı miktarda alkali aktivatör ile ilgili olabilir. Böylece 20ÇUKL-3'de en düşük BHA elde edilmiştir.

Kütleme sıcaklığı ve A/M oranı ne olursa olsun sertleştirilmiş harçların BHA değerlerine dayanarak,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$ 'ye kadar olan geopolimer yapı malzemelerinin su emme ve porozite değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Geopolimer yapı malzemelerinde gözenek boyutu küçüldükçe su emme oranı da azalmaktadır. Yüksek kütleme sıcaklığında A/M oranı 0,4 olan geopolimer harçların, A/M oranı 0,2 olan malzemelere göre su emme ve porozite değerleri daha düşüktür. Üretilen geopolimer yapı malzemelerinde porozite değerleri incelendiğinde en düşük değer 40UKL tasarımında en yüksek değer ise 20ÇUKL tasarımında bulunması, kül tipinin ve kullanılan kimyasal aktivatör oranının fiziksel özellikler üzerindeki etkisini göstermektedir. Yapılan tez çalışmasında, kullanılan alkali aktivatör oranı arttıkça numunelerdeki gözeneklilik değeri azalmakta ve buna bağlı olarak su emme oranı düşmektedir. Thokchom vd. (2009) yaptıkları bir çalışmada yüksek alkali aktivatör oranına sahip geopolimer harçlar üretmişler ve bu harçlarda düşük miktarlarda porozite ve su emme değerleri elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucundaki bulguları bu tezdeki sonucu desteklemektedir.

Geopolimer yapı malzemelerinde gözenek boyutunun azalmasına paralel olarak numunelerdeki su emme oranları da azalmaktadır. Kürleme sıcaklığının artması alkali çözeltilerin daha hızlı buharlaşmasına ve numunelerde kılcal çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu çatlaklar sayesinde malzemelerin su emme değerleri artar. İUKL ile üretilen numunelerde en düşük su emme değeri bulunurken ÇUKL ile üretilen numunelerde en yüksek su emme değerinin bulunması, kullanılan kül tipinin su emme değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

### 5.1.2 Basınç ve eğilme dayanımları

Üretilen geopolimer yapı malzemelerinin basınç dayanımı, Şekil 4.9 ve 4.10'da görüldüğü gibi test süresine bağlı olarak az miktarda artış göstermiştir. Bunun nedeni, kürlenmiş harçların 7. günden 90. güne kadar gelişen yoğun kristal yapısıdır. Elde edilen en yüksek basınç dayanımı 40İUKL-2 tasarımıyla üretilen ve 70 °C'de kürlenen numunede gözlenmiştir. Palomo (1999), bu durumu alüminosilikat jellerin oluşumunun bir sonucu olarak açıklamışlardır. Gümüş, (2016); polimerizasyon döneminde, alümina ve silikanın belirli bir miktarda çözülerek ve hammadde parçacıklarının yüzey hidrolizini artırarak güçlü bir alkali ortama ihtiyaç duyduklarını gözlemiştir. Bu durumun gerçekleşmesi, ortamdaki alkali çözeltilerin aktive edilmesiyle sağlanmaktadır. Bu nedenle, A/M oranı 0,2'den 0,4'e yükseldiğinde, numunelerin basınç dayanımı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$ 'ye kadar artıp daha sonra azalmıştır. Bu, Si açısından zengin bir jel olan çözünür silikalar oluşturarak silis pıhtılaşmasındaki artışına bağlanabilir. Üretilen geopolimer harçların konsantrasyon değeri arttıkça, mevcut silikon ve alüminyumun yüksek konsantrasyonlarda çözünmesi nedeniyle basınç dayanımı sınırlı bir değere kadar yükselmiştir. Kürleme sıcaklığının ve süresinin basınç dayanımında etkili olabilmesi için aktivatör konsantrasyonu eşik değerinin altında olmamalıdır.

Petermann ve Hammons (2010)'a göre; ÇUKL'nin İUKL'den daha düşük basınç dayanımına sahip olmasının nedeni düşük çözünürlüklü Al ve Si olabilir. Bununla birlikte UKL'lerin inceliğinin basınç dayanımını etkileyebileceğini açıklamışlardır. Fernando-Jimenez vd. (1999); sodyum silikat ve sodyum hidroksiti birlikte kullanarak ürettikleri geopolimer harçlarda daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşmışlardır.

Criado vd. (2007); bu olayı sodyum silikatın geopolimerizasyon fazı sırasında silikon reaksiyonları oluşturarak Si içeren ürünleri arttırması yönünde açıklamışlardır.

Numunelerin en yüksek eğilme dayanımı, 70 °C kütleme sıcaklığında 40İUKL-2 için elde edilmiştir. Eğilme dayanımında 40İUKL-2'den 20ÇUKL-1'e azalma, matrisin ara yüz özellikleri ile açıklanabilir. Başka bir deyişle, 40İUKL-2'nin kimyasal bağlanma enerjisi ve sürtünme direnci, örnek yapısında liflerin birleşmesiyle sonuçlanmıştır ve diğer geopolimer numunelerinden daha fazla kırılma direnci göstermiştir. Eğilme dayanımı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı için belirli bir değere yükselmiştir. Çözünmüş jelin polimerizasyon kalitesi çözünür silikatlardan etkilenmesine rağmen; aşırı silikat kullanımı, geopolimer reaksiyonlarının gecikmesi ve silika pıhtılaşması nedeniyle güç özelliklerini bozmuştur. Dolayısıyla basınç dayanımı için elde edilen sonuç ve bulguların eğilme dayanımı ile aynı olduğu söylenebilir. Basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına dayalı olarak geopolimerlerin dayanım özellikleri değerlendirildiğinde, 40İUKL-2 tasarımıyla üretilen numunenin 70 ve 100 °C'de en yüksek eğilme ve basınç dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Böylece, alkali aktivatör oranının ve A/M oranının en baskın parametre olduğu ve geopolimerizasyon sırasında mukavemet özelliklerini etkilediği sonucuna varılabilir.

## **5.2 Karışım 2 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Fiziksel-Mekanik Test Sonuçları**

### **5.2.1 Birim hacim ağırlık, porozite ve su emme**

Karışım 2'den üretilen geopolimer yapı malzemesinde ham madde olarak kullanılan kum, BHA, porozitesi ve su emmeyi etkilemektedir. Bunun yanı sıra UKL'nin incelik ve parçacık boyutu geopolimer numunelerin fiziksel özellikleri açısından ana parametrelerden biridir. ÇUKL ile üretilen geopolimer malzemelerin en yüksek BHA'sı  $1862 \text{ kg/m}^3$  iken İUKL ile üretilen malzemelerin en yüksek BHA değeri  $1985 \text{ kg/m}^3$ 'dir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere daha ince boyutlara sahip olan İUKL'sinin ÇUKL'sine göre yoğunluğu fazladır. Şekil 4.3 ve 4.4'de gösterildiği gibi 70 °C'de kürlenmiş harçların BHA'sı alkali çözelti/materyal (A/M) ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranlarına bağlı olarak artmıştır. Kür sıcaklığı 70 °C olan numunelerin geopolimerizasyon reaksiyonunu tam olarak tamamlamadığı açıklanabilir. Ayrıca belirli

bir aktivatör oranı için kürlenme sıcaklığı arttırıldığında her bir UKL için geopolimer yapı malzemelerinin yoğunluğunun azaldığı gözlenmiştir. Kürlenme sıcaklığı arttıkça (100 °C'de) numunelerin genişmesi ve dayanıklı yapısı gibi fiziksel özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olmuştur. Bu durum Kong ve Sanjayan (2010) tarafından, ince agregaların varlığı ile harç için homojenliğin değişmesinin, agrega ve harç arasında diferansiyel termal genişmeye neden olarak polimer ağında parçalanmaya yol açtığı belirtilmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.4'de gösterildiği gibi 100 °C kürlenme sıcaklığında artan A/M 2'ye kadar Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı için artan yoğunluğa sebep olmaktadır. Geopolimer reaksiyon sırasında harçların genişmesinin bir başka nedeni ise fazla miktarda kullanılan alkali aktivatör çözeltilisidir. Bu nedenle de 100 °C'de kürlenmiş 40ÇUKL-3 harç da en düşük yoğunluk elde edilmiştir. Ayrıca üretilen geopolimer yapı malzemelerinin su emmesi, BHA'nın artması ile azalmıştır.

Üretilen geopolimer yapı malzemelerinde kürlenme sıcaklığı arttıkça su emme oranları azalmıştır (Şekil 19 ve 20). 24 saat boyunca 100 °C'de kürlenmiş numunelerde gözenekler geopolimerik reaksiyon sonucunda oluşan jel ile dolmuştur. Şekil 17 ve 18'de gösterildiği gibi geopolimer numunelerin porozite değerleri su emme değerleri ile benzerlik göstermektedir. Porozite gözenek boyutunun azalmasıyla azalmaktadır; böylece numunelerin emdiği su da azalmaktadır. Düşük kürlenme sıcaklığında (70 °C) üretilen geopolimer yapı malzemelerde, daha yüksek A/M oranına sahip numunelerde daha yüksek su emme ve porozite değerleri bulunmuştur. Örneğin, 70 °C kürlenme sıcaklığında 20ÇUKL-3'ün su emme kapasitesi % 13,58 iken 40ÇUKL-3 için su emme kapasitesi %15,78'dir. Bunun yanı sıra 0,4 A/M oranı ile tasarlanıp üretilen geopolimer harçların kütle yoğunluğu 0,2 A/M oranı ile tasarlanan harçların kütle yoğunluğundan daha yüksektir; ancak 70 °C kürlenme sıcaklığında 0,4 A/M oranlı malzemenin porozitesi, 0,2 A/M oranına göre daha yüksektir. Bu durum diğer birçok yazar tarafından da açıklanmıştır (Alvarez-Ayuso vd., 2008). Bunun nedeni 0,4 A/M oranında üretilen numunelerin porozitesinin, 0,2 A/M oranına sahip olan numunelerden daha yüksek olmasıdır. Literatür doğrultusunda bu çalışmadan daha yüksek alkali içerikli (% Na<sub>2</sub>O) üretilen ve daha yüksek sıcaklıkta kürlenmiş geopolimer harcın daha düşük su emme ve porozite değerlerine sahip olduğu açıklanmıştır (Atiş vd., 2015; Thokchom vd., 2009). Benzer olarak geopolimer numunelerin sadece BHA değerlerine bakılarak, 100 °C'de kürlenmiş numuneler için Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranının artmasıyla birlikte su emme ve porozite değerleri artmıştır. Tez çalışmasında yapılan fiziksel testler

sonucunda, en düşük su emme ve porozite değerleri 0,2 A/M oranı ile tasarlanan ve 100 °C’de kürlenmiş geopolymer numunelerde bulunmuştur.

### 5.2.2 Basınç ve eğilme dayanımları

Şekil 4.11 ve 4.12’de Karışım 2’ye ait farklı tasarım parametreleri (UKL tipi, kütleme sıcaklığı ve A/M oranı gibi) ile üretilen geopolymer numunelerin basınç dayanımları gösterilmektedir. Basınç dayanımı, UKL bazlı geopolymerin tasarım özelliğini tanımlayan en genel özelliktir. Grafiklerde de görüldüğü gibi basınç dayanım değerleri 7. günden sonra birkaç MPa artmıştır. Van Jaarsveld ve arkadaşları (1999) çalışmaları sonucunda 4 saat boyunca kürlenmiş geopolymer harçların nihai dayanımlarının %70’ine ulaşabileceğini açıklamışlardır. Bu tez çalışmasında ise nihai dayanımın yaklaşık olarak %68-99’unun 7 günlük test yaşında elde edildiği gözlenmiştir. Geopolymer yapı malzemelerinin basınç dayanımının test yaşı arttığında fazla artmamıştır, bunun sonucunda ise literatür çalışmaları ile basınç dayanım değerleri paraleldir (Khale ve Chaudhary, 2007; Thaarrini ve Ramasamy, 2015). ÇUKL’inde düşük çözünmeye sahip olan Al ve Si miktarı, İUKL’ine göre daha düşük basınç dayanımına sebep olmaktadır. Basınç dayanımı etkileyen faktörlerden biri UKL’nin inceliği olabilir. Karışım 2’de elde edilen bütün basınç dayanımlarında en yüksek değerler (20İUKL-2.5-70 ve 20İUKL-2-100 gibi) en ince tanecik boyutuna sahip İUKL’si ile üretilen geopolymer yapı malzemelerinde bulunmuştur. Daha ince boyutlara sahip olan İUKL’si reaksiyonlarda daha aktiftir ve bu sonucu Komljenovi vd. (2010) yaptıkları bir çalışmada desteklemişlerdir. UKL tanecik boyutu yanı sıra A/M oranında basınç dayanımını etkileyen diğer önemli faktörlerden biridir. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi A/M oranı 0,2’den 0,4’e yükseldiğinde, ÇUKL ile üretilen geopolymer yapı malzemelerinde belli bir alkali çözeltiye kadar basınç dayanımında artışlar gözlemlenirken İUKL ile üretilen malzemelerde bu olay gerçekleşmez. Alkali aktivatör oranı geopolymerizasyon sırasında mukavemet özelliklerini etkilemektedir. Bunun sonucunda alkali aktivatör oranının en baskın parametre olduğu sonucuna varılabilir. Artan kütleme sıcaklığı (Şekil 4.11 ve 4.12), farklı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranlarına sahip malzemeler için basınç dayanımının artmasına sebep olmuştur; ancak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı 2’den büyük olan diğer örnekler için bu eğilim gözlenmemiştir. İyileştirme kinetik enerjisinin yanı sıra geopolymer harcı daha güçlü bir Al-Si-O ağı ile üreten reaksiyonun derecesinin de olduğu açıklanmaktadır (Ling, 2018). Bununla birlikte, sabit bir sertleşme sıcaklığında

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranındaki bir artış belli bir değere ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$ ) kadar basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Geopolimerizasyon da daha yüksek miktarda çözünür silisin, iyonik silika türlerinin doygunluğundaki iyileşmeye bağlı olarak UKL'nin çözünmesini geciktirdiği ve daha büyük moleküler türlerin çöktürülmesini desteklenmesinin daha güçlü bir geopolimer harc ile sonuçlandığı bilinmektedir (Yang vd., 2012). Reaksiyon kinetiği ve kristalleşme oranı, çözünür silis varlığından doğrudan etkilenir, malzeme dayanımının gelişmesinden sorumlu olan Si zengin bir harc oluşumunu teşvik eder (Connie vd., 2018). Bu bilgilerin doğrultusunda, çalışmada 20İUKL-2-100 karışım oranı en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Geopolimer yapı malzemelerinde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının 2'den sonra basınç dayanımının azalması silis pıhtılaşmasındaki bir artışa bağlanmıştır (Patankar vd., 2014; Joseph ve Mathew, 2012). Basınç dayanımındaki bu azalma, Yang vd., (2012) aşırı aktivatör çözeltilerinin kullanılmasının bağın zayıflaması ve geopolimerin mekanik özelliklerinin azalması için gereksiz su veya daha az alkali reaksiyonu sağladığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Khale ve Chaudhar (2007)'nin, her aktivatör tipinin konsantrasyonu için optimum bir sınır olduğunu açıklamışlardır; böylece bu sınırın aşılması mukavemet özellikleri için ters etki vermiştir. Ayrıca, 20İUKL-2,5, 20İUKL-3, 40İUKL-2 ve 40İUKL-3 karışımlarından gözlemlendiği gibi, yüksek kür sıcaklığı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$  oranına sahip numuneler için basınç dayanımını belirgin bir şekilde azaltmıştır. Bu numunelerin mukavemet gelişimi için 24 saatlik kür süresi yeterli görünmemektedir. Ancak, Atiş vd., (2015) karışımda mevcut olan suyun, UKL'nin bünyesinde bulunan silisin çözünmesine izin vermeden artan sıcaklık ile hemen buharlaşabileceğini belirtmiştir.

Geopolimer numunelerinin 7, 28 ve 90. günlerdeki eğilme dayanımları basınç dayanımından da gözlemlendiği gibi test süresince birkaç MPa artmıştır. Bunun nedeni, sertleştirilmiş harcın yoğun yapısında 7. günden 90. güne kadar geliştirilmiş kristalinite olabilir. Üretilen numunelerde  $A/M=0,4$  oranında tasarlanan harçların eğilme dayanımı  $A/M=0,2$  oranında tasarlanan harçlara göre daha düşük değerlere sahiptir. Bu, daha yüksek su-çimento-malzeme oranının OPC macunu olarak mukavemet değerlerinde bir azalmaya neden olabileceği açıklanabilir (Rattanasak ve Chindapasirt, 2009). Böylece, 20ÇUKL-1 oranı ile tasarlanan geopolimer harc 24 saat boyunca  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kürlendiğinde en düşük eğilme mukavemetini (Şekil 4.9 ve 4.10'da) göstermiştir. Basınç dayanımı test sonuçlarına benzer şekilde, eğilme dayanımı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı için belirli bir değere kadar artmıştır. Katı kül parçacıklarının çözünmesinden sorumlu alkaliler geopolimerik

reaksiyon miktarını düzenlemişlerdir. Bununla birlikte, çözünmüş jelin polimerizasyon derecesi çözüner silikatlardan da etkilenmiştir. Ancak, aşırı silikatlar kullanıldığında, silis koagülasyonunun sonucu olarak gecikmiş ve geopolimerik reaksiyonlarla mukavemet karakteristikleri bozulmuştur (Alvarez-Ayuso vd., 2008; Patankar vd., 2014; Zuda, 2006). Bu nedenle, en yüksek eğilme dayanım değerleri sırasıyla 28 günde 20ÇUKL-2-100 için 9.3 ve 20İUKL-2-100 için ise 9.9 MPa, olarak bulunmuştur.

### **5.3 Karışım 1 ve 2 ile Üretilen Geopolimer Yapı Malzemelerinin Radyasyon**

#### **Sönümlenme Sonuçları**

Radyasyonun dozunu azaltan veya yok eden malzemelere zırlama malzemesi denir. Zırlama malzemesi olarak kurşun, tuğla, beton ve duvar gibi malzemeler kullanılabilir, bu malzemeler radyasyonun türüne göre farklılık göstermektedir. Zırlama malzemesi olarak en yaygın kullanılan element, atom numarası büyük olan kurşundur (Kılınçarslan vd., 2011). Bu zırlama malzemelerinin yoğunluğu arttıkça gama ve X-ışınlarını durdurma özelliği de o kadar artmaktadır (Yülek, 1992). Bir zırlama malzemesi tasarlanırken ekonomikliği, malzemenin ağırlığı ve boşluklu yapısı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Zırlama malzemesi tasarlanırken dikkat edilmesi gereken diğer önemli konu ise radyasyondan korunması gerekenlerin öncelikle canlılar olduğunu bilmektir (Başyigit ve Kaçar, 2006). Zırlama malzemesi doğru seçilir ve uygulanırsa yayılan radyasyonun zararları da en aza indirilebilir.

Beton, bir yapı malzemesidir. Hidrojen yoğunluğu fazla olanlar betonlar, nötronların durdurulmasında faydalı olan malzemelerdir. Yüksek yoğunluğa sahip a<sup>gr</sup>egalar (barit, magnetit, limonit ve bor) kullanılarak elde edilen ağır betonlar güvenilir olmayan yapılarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra radyoaktif maddelerden yayılan nötron ve gama ışınlarından korumaktadır. Ağır betonlar ayrıca zırlama amacıyla nükleer reaktörlerde ve hastaneler bulunan ışın tedavi birimlerinin duvar yapımlarında kullanılmaktadır. Bazı durumlarda bu yapılarda demir ya da kurşun agregalarından yararlanılmaktadır (Kalyon, 2019).

Yapı malzemeleri yoğunluklarına göre 3 gruba ayrılmaktadır. Etüv kurusu durumundaki yoğunluğu 800-2000 kg/m<sup>3</sup> arasında olanlar hafif, 2000-2600 kg/m<sup>3</sup> arasında olanlar

normal ve 2600 kg/m<sup>3</sup> den büyük olanlar ise ağır yapı malzemeleri olarak adlandırılmaktadır (Kalyon, 2019).

Bu tezde Karışım 1 ve 2'den üretilen geopolimer yapı malzemeleri -BHA'ları 800-2000 kg/m<sup>3</sup> aralığında olduğundan- hafif yapı malzemesidirler. Çimentosuz olarak üretilen bu malzemelerin radyasyon sönümlenme değerleri -gözenekli yapıları sayesinde- geleneksel çimentolu betonun radyasyon sönümlenme oranına yakın, bazı numunelerde ise yüksek, değerlerde bulunmuştur. Tezin üst kısımlarında detayları belirtildiği gibi radyasyon sönümlenme kapasitesi olan yapı malzemeleri ağırdırlar. Bu tezde Karışım 1 ve 2'den üretilen çimentosuz çevre dostu geopolimer yapı malzemelerinin bazılarının yüksek radyasyon sönümleneyebilen durumda olmaları -hafif yapı malzemesi olmaları göz önünde tutulduğunda- bir avantajdır. Malzeme üretiminde kullanılan kürlenme sıcaklığı azaldıkça radyasyon sönümlenme değerinin artması da diğer dikkat çekici avantajdır.

#### **5.4 Genel Değerlendirme**

İnşaat sektörünü çevre dostu ve sürdürülebilir kılmak için yapı malzemelerinde yeterli dayanıma sahip alternatif çözümler üretmeye ihtiyaç vardır. Böyle bir malzemenin radyasyondan korunma için faydalı olup olmadığını bilmek de önemlidir. Geopolimer, ulusal ve uluslararası ölçekte özellikle UKL'ye dayalı çevre sorunlarına çözüm bulmak için iyi bir alternatiftir; ekonomik avantajlarının yanı sıra endüstriyel simbiyoz için de uygun bir malzemedir. Bu tez çalışmasında endüstriyel bir katı atık olan UKL'den geopolimer yapı malzemesi üretilmiş ve bu malzemenin tasarlanan sistemde radyasyon sönümlenme yüzdesi belirlenmiştir.

Geopolimer yapı malzemelerinin radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi oldukça önemli olsa da bu parametreyle ilgili literatürdeki çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışmasında geopolimer yapı malzemesinin üretim kombinasyonları ve radyasyon sönümlenme durumunun belirlenmesi, literatürdeki diğer çalışmalardan farklıdır.

Bu tezde, çimentolu geleneksel OPC yapı malzemesi de üretilmiş ve radyasyon sönümlenme değeri %9,52 olarak ölçülmüştür. Çalışmada üretilen çimentosuz geopolimer yapı malzemeleri arasından tespit edilen en yüksek radyasyon sönümlenme değeri %12,4'dür ve 70 °C'de kürlenmiş 20ÇUKL-1,5 karışım malzemedeki ölçülmüştür.

70 °C’de kürlenen 40ÇUKL-2 ve 20ÇUKL-1,5 karışımlarında 100 °C’de kürlenen geopolimer numunelerinden daha yüksek radyasyon sönümlene değeri (sırasıyla 12,36 ve 12,4) bulunmuştur. Düşük sıcaklıklarda kürlenen malzemelerde yüksek sönümlene değeri bulmak, kullanılan enerjide ekonomi sağlama anlamında önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Tezde UKL kullanılarak üretilen çimentosuz geopolimer yapı malzemelerinden bazıları, herhangi bir atık olmadan çimento kullanılarak üretilen normal yapı malzemelerinden daha yüksek veya yaklaşık radyasyon sönümlene değerlerine sahiptir. Bu geopolimer yapı malzemeleri, radyasyona maruz kalan yapılarda kullanılabilceği gibi günlük hayatta binalarda maruz kalınan radyasyonu sönümleyerek de fayda sağlayabilir. Çimento üretimi sırasında, hava kirleticilerden ve sera gazlarından olan CO<sub>2</sub> yoğun olarak salınmaktadır. İnşaat sektöründe çimentosuz geopolimer yapı malzemelerinin kullanılması CO<sub>2</sub> emisyonunu ve küresel ısınmayı azaltacak, endüstriyel katı atık sorununun çözümüne katkıda sağlayacaktır.

Bu tezde üretilen yüksek basınç dayanımı ve düşük BHA değerine sahip hafif geopolimer yapı malzemelerinin, düşük BHA oranlarında yüksek basınç sağlama da önemli bir avantajdır. En iyi fiziksel-mekanik test kombinasyonunu, radyasyon sönümlene avantajını sunan malzeme seri olarak üretilirse, endüstriyel katı atık (UKL) ve küresel ısınma sorununun çözümüne, ekonomi ve insan sağlığına katkıda bulunacaktır. Bu yüksek lisans tezi, sıfır atık prensibi ve endüstriyel simbiyozu destekleyen bir yeşil mühendislik çalışmasıdır.

## KAYNAKLAR

ACI Committee 232. Use of Fly Ash in Concrete. Farmington Hills, Michigan, USA, *American Concrete Institute*, 41, 2004.

Adam, A.A. and Horianto, “The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar”, *Procedia Engineering* 95, 410–414, 2014.

Akkurt, I., Basyıgıt C., Akkas, A., Mavi, B. ve Gunoglu, K., “Yüksek fırın cürüflü betonların radyasyon soğurma karakteristiklerinin belirlenmesi”, *Journal of New World Sciences Academy* 6 (4), 1175-1181, 2011.

Akkurt, I., Basyıgıt, C., Mavi, B., Gunoglu, K., Kılınçarslan, S. ve Akkas, A., “Ağır betonların radyasyon zırhlama özellikleri”, *Journal of New World Sciences Academy* 6 (4), 1481-1485, 2011.

Akyıldırım, H., Ağır betonların nükleer radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 95, 2011.

Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vázquez, E. and Barra, M., “Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes”, *J Hazard Mater* 154, 175–183, 2008.

Aruntaş, H.Y. “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21 (1), 193-203, 2006.

Assi, L. N., Eddie, E. and Ziehl, P., “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete”, *Construction and Building Materials* 167, 372–380, 2018.

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.

Atiş, C. D., Gorur, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., and Luga, E., “Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration”, *Construction and Building Materials* 96, 673-678, 2015.

Bagheri, A., Nazari, A., Sanjayan, J.G., Rajeev, P. and Duan, W., “Fly ash-based borosilicate geopolymers: Experimental and molecular simulations”, *Ceramics International* 43, 4119–4126, 2017.

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

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., Beton, 2nd ed., *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 2015.

Baradan, B., “Fly ash-cement based structural materials”, *Int. Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 9 (4), 225- 228, 1987.

Başıyigit, C. ve Kaçar, A., “Bazı Yapı Malzemelerinin Radyasyon Tutuculuk Özellikleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10 (2), 307-310, 2006.

Binici H., Eken M. ve Aksoğan O., “Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri”, *Yapı Teknolojileri Dergisi* 8 (1), 12-25, 2012.

Bilenler-Altundal, M. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2019.

Bor, D., Buyan, G. ve Meriç, N., “Tanısal Radyolojide Radyasyondan Korunmada Yeni Kavramlar 2”, *Radyoloji Gündemi*, 5-10, 2000.

Bosbach, D. and Michael, E., “Microphotography of high calcium fly ash particle surfaces”, *Advances in Cement Research* 10, 17–24, 1998.

Chindapasirt, P. and Chalee, W., “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 303–310, 2014.

Chindapasirt, P., Rattanasak, U. and Taebuanhuad, S., “Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer”, *Advanced Powder Technology* 24, 703–707, 2013.

Collivignarelli, C. and Sorlini, S., “Optimisation of industrial wastes reuse as construction materials”, *Waste Management & Research* 19 (6), 539-544, 2001.

Connie, N. G., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z. and Ramesh, S., “A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete”, *Constr. Build. Mater.* 186, 550-576, 2018.

Criado, M., Fernandez-Jimenez, A., de la Torre, A. G., Aranda, M. A. G. and Palomo, A., “An XRD Study of the Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O Ratio on the Alkali Activation of Fly”, *Ash. Cem. and Concr. Res.* 37, 671-679, 2007.

Davidovits, J., “Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”, *Geopolymer '99 International Conference*, France, 1999.

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

Demirtaş, O., Zonguldak çevresindeki endüstriyel katı atıkların betonda kullanım olanaklarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 2006.

Devlet Planlama Teşkilatı, Enerji Üretiminde Çevre Politikaları Raporu, *DPT Yayınları*, Yayın No: 2314, Ankara, 1992.

Diaz, E. I., Allouche, E. N. and Eklund, S., “Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers”, *Fuel* 89, 992–996, 2010.

Dogan, B., Yapı Malzemelerinin Gama Radyasyonu Karşısındaki Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 2015.

Dogan, Z. M., Limonit ve Siderit Agregalarının Ağır Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 61, 2012.

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

Doğan-Sağlamtimur N., z, H. ., Bilgil, A., Vural, T. ve Süzgeç, E., “The effect of alkali activation solutions with different water glass/NaOH solution ratios on geopolymer composite materials”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660, 2019.

Durak, U., Nanoparacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2019.

Duxon, 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, 2917-293, 2007.

Enders, M., “The CaO distribution to mineral phases in a high calcium fly ash from Eastern Germany”, *Cement and Concrete Research* 26, pp. 243-251, 1996.

EPA, Radiation Protection, Protecting Yourself from Radiation.  
<https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation>, 03.08.2018

Erdem, S., Bir niversite Hastanesinde İyonizan Radyasyon Kaynakları ile alışan Sağlık alışanlarında İş Sağlığı ve Gvenliği Durumlarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2014.

Erdoğan, T., Beton, 5th ed., *Odt Yayıncılık*, Ankara, 2015.

Fang, Y. and Kayali, O., “The fate of water in fly ash-based geopolymers”, *Construction and Building Materials* 39, 89–94, 2013.

Fernandez - Jimenez, A. and Palomo, A., “Characterisation of fly ashes Potential reactivity as alkaline cements”, *Fuel* 82, 2259–65, 2003.

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G. and Puertas, F., “Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour”, *Cement and Concrete Research* 29, 1313-1321, 1999.

Girgin, S., NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2016.

Gökharman, F. D., Aydın, S. ve Koşar, P. N., “Radyasyon güvenliğinde mesleki olarak bilmemiz gerekenler”, *S.D.Ü. Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7 (2), 2016.

Gönen, E., Edirne ilinin çevresel radyoaktivitesinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 2012.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları”, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET2Q05. İzmir. Türkiye, 09-12 Haziran 2005

Gümüş, A., Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2016.

Hamalı, Y., Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Hardjito, D. ve Rangan B. V., Development and properties of low-calcium fly ash based geopolimer concrete, *Research Report GC 1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth*, Australia, 2005.

He, J., Zhang, J., Yu, Y. ve Zhang, G., “The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study”, *Construction and Building Materials* 30, 80-91, 2012.

Higgy, R.H., El-Tahawy, M.S., Abdel-Fattah, A.T., and Al Akabawy, U.A., “Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 253-261, 2000.

Humur, G. H., Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete, Yüksek Lisans Tezi, **Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 11-12, 2018.

IAEA, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series 115, <https://www.iaea.org/>, 1994.

Jaarsveld, J. V., Deventer, J. V. and Lukey. G., “The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers”, **Mater. Lett.** 57, 1272–1280, 2003.

Jo, M., Soto, L., Arocho, M., John, J. S. and Hwang, S., “Optimum mix design of fly ash geopolymer paste and its use in pervious concrete for removal of fecal coliforms and phosphorus in water”, **Construction and Building Materials** 93, 1097–1104, 2015.

Joseph, B. and Mathew, G. “Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete”, **Sci. Iran. A** 19 (5), 1188–1194, 2012.

Jueshi, Q., Caijun, S. and Zhi, W., “Activation of Blended Cements Containing Fly Ash”, **Cement and Concrete Research** 31 (8), 1121- 1127, 2001.

Kalyon, M., Radyasyon içeren birimlerin zırhlanmasında kullanılan farklı tipteki betonların radyasyon güvenliği ile iş sağlığı ve güvenliği açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2019.

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

Karabulut, Y., Türkiye Enerji Kaynakları, **Ankara Üniversitesi Basımevi**, Ankara, 2000.

Karahan, O., Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 2006.

Keyte, L.M., Lukey, G.C. and van Deventer J.S.J., The Effect Of Coal Ash Composition On Properties Of Waste Based Geopolymers' Advances in geopolymer science and technology, *Springer Science LLC*, 2006.

Khale, D. and Chaudhary, R., "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review", *J. Mater Sci.* 42, 729–746, 2007.

Kılınçarslan, S., Başığit, C., Molla, T. ve Sancar, S., "Radyoaktif Işınlardan Korunaklı Ekolojik Yapılar", *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic* 14 (2), 93-99, 2011.

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.

Komljenovic, M., Bascarevic, Z. and Bradic, V., "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers." *Journal of Hazardous Materials* 181, 35–42, 2010.

Komnitsas K. and Zaharaki D., "Geopolymerisation: a review and prospects for mineral industry", *Elsevier Science Direct Minerals Engineering* 20, 1261-1277, 2007.

Kong, D. and Sanjayan, J., "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete", *Cem and Concr Res* 40, 334–39, 2010.

Kong, D.L.Y. and Sanjayan, J.G., "Cement & Concrete Composites Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures", *Cement and Concrete Composites* 30, 986–991, 2008.

Ling, Y., Proportion and performance evaluation of fly ash based geopolymer and its application in engineered composites, PhD Thesis, *Iowa State University*, 2018.

Malhotra, V. M. "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", *ACI Concrete International* 24 (7): 22, 2002.

Malhotra, V. M. "Making Concrete "Greener" With Fly Ash", *ACI Concrete International* 21 (5), 61-66, 1999.

Malhotra, V. M., Role of Supplementary Cementing Materials and Superplasticisers in Reducing Greenhouse Gas Emissions. ICFRC, Chennai, India, *Allied Publishers Private Ltd.*, 2004.

McCaffrey, R. "Climate Change and the Cement Industry", *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, 15-19, 2002.

Mehta, P. K. "Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development", *ACI Concrete International* 24 (7), 23-28, 2002.

Mehta, P. K. and Burrows, R. W., "Building durable structures in the 21st century", *ACI Concrete International* 23 (3), 57-63, 2001.

Montemor, M.F., Simoes, A.M.P. and Salta, M.M., "Effect of Fly Ash on Concrete Reinforcement Corrosion Studied by EIS", *Cement&Concrete Composites* 22 ( 3), 175-185, 2000.

Oderji, S.Y., Chen, B., Taseer, S. and Jaffar, A., "Effects of relative humidity on the properties of fly ash-based geopolymers." *Construction and Building Materials* 153, 268–273, 2017.

Özalphan, A., Temel Radyobioloji. *Haliç Üniversitesi Yayınları* 1. Basım, 1-3, İstanbul, 2001.

Özodabaş, A., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2014.

Öztekın, E. and Cimilli, T., "History and Use of Blended Cements in Turkey", *Cement, Concrete and Aggregates* 9 (1), 44-48, 1987.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S., “Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products”, *Construction and Building Materials* 22 (7), 1305–1314, 2008.

Palomo, A., M. W. Grutzeck and M.T. Blanco, "Alkali-Activated Fly Ashes, A Cement for the Future." *Cement and Concrete Research* 29 (8), 1323-1329, 1999.

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

Pappu, A., Saxena, M. and Asolekar, S. R., “Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials”, *Building and Environment* 42 (6), 2311-2320, 2007.

Patankar, S. V., Ghugal, Y. M. and Jamkar, S.S., “Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar”, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 2014, 1–6, 2014.

Petermann, J. C., Saeed, A. and Hammons, M. I., Alkali- activated geopolymers: a literature review, *Air Force Research Laboratory Materials And Manufacturing Directorate*, 2010.

Rattanasak, U. and Chindapasirt, P., “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, *Minerals Engineering* 22 (12), 1073– 1078, 2009.

Rezaei-Ochbelagh, D., and Azimkhani, S., “Investigation of gamma-ray shielding properties of concrete containing different percentages of lead”, *Applied Radiation and Isotopes* 70 (10), 2282–2286, 2012.

Rickard, W.D.A., Temuujin, J. and Riessen, A.V., “Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition”, *Journal of Non-Crystalline Solids* 358, 1830–1839, 2012.

Ropelowski, L. and Neufeld, R.D., “Thermal Inertia Properties of Autoclaved Aerated Concrete”, *Journal of Energy Engineering-ASCE* 125 (2), 59-75, 1999.

Roy, D. M. “Alkali-Activated Cements, Opportunities and Challenges”, *Cement and Concrete Research* 29 (2): 249-254, 1999.

Sarıkaya, H. ve Soykan, O. Uşak ili ve çevresinde kullanılan yapı malzemelerinin doğal radyoaktivitesinin belirlenmesi”, *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 7 (1), 2018.

Sigit Darmawan, M., Tajunnisa, Y., Bayuaji, R., Husin, N. A. and Suprobo, P. “Performance of high calcium fly ash based geopolymer concrete in chloride environment” *International Journal of GEOMATE* 19 (74), 107-113, 2020.

Siyal, A. A., Azizli, K. A., Man, Z. and Ullah, H., “Effects of Parameters on the Setting Time of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method”, *Procedia Engineering* 148, 302–307, 2016.

Skvára, F., Kopecky, L., Smilauer, V. and Bittnar Z., “Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash”, *Journal of Hazardous Materials* 168, 711–720, 2009.

Şengül, Ü., “Uçucu kül ve çevresel etkileri”, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi* 7 (1), 89-104, 2007.

Şimşek, O., Beton ve Beton Teknolojisi, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 2004.

Tanosaki, T., Matsumoto, M., Nozaki, K., Izumi, K., Nakamura, K., Nambu, M. and Maruta, T., “Characterization of Incineration Ashes in Japan”, *Journal of Research Chichibu Onoda Cement Corporation* 49, 145–154, 1998.

Temuujin, J., Minjigmaa, A., Lee, M., Chen-tan, N. and Van Riessen, A., “Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions”, *Cement and Concrete Composites* 33, 1086–1091, 2011.

Thaarrini, J. and Ramasamy, V., “Feasibility studies on compressive strength of ground coal ash geopolymer mortar”, *Period Polytech Civ. Eng.* 59 (3), 373–379, 2015.

Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S., “Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars”, *ARPJ of Eng and Ap Sci* 4, 1819-6608, 2009.

Togay, Y. E., Radyasyon ve biz, *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları*, Ankara, 2002

Tokay, H., Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, 2019.

Tokyay, M. ve Erdoğan, K., Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, *TÇMB*, Ankara, 1998.

Topçu, İ. B. ve Sofuoğlu, T., “Pres filtre atığı ve uçucu kül ile elde edilen geopolimer harçların farklı koşullar altında birim ağırlığı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* 7 (2), 806-823, 2020.

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

Toprak, D., “Sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde çevre politikaları ve mali araçlar”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 2, 4, 2006.

TS EN 206-1, Beton-Bölüm1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

TS EN 450-1, Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, *TSE*, 2013.

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.

Turhan, Ş., Yücel, B., Acar B., B., Gökeri, G. ve Arıkan İ., H., Türkiye’de kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyasyon dozunun değerlendirilmesi, *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu*, 2008-7, Ankara, 2009.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 2009.

URL 1: Wikipedia: radyasyon nedir, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Radyasyon>  
22.03.2020

URL 2: TAEK Bilgi Köşesi, Doğal Radyasyon Kaynakları.  
<http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>  
21.02.2020

URL 3: [http://www.nukleer.web.tr/temel\\_konular/faydalar.html](http://www.nukleer.web.tr/temel_konular/faydalar.html) 18.03.2020

Ünal, O., İçağa, Y. ve Çoşkun, A., “Barit agregalı betonların radyasyon soğurma özelliklerinin araştırılması”, *AKÜ FEMÜBİD* 16 ,125-131, 2016.

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

Verma, C. L., Handa, S. K., Jain, S.K., “Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India”, *Construction and Building Materials* 12 (6-7), 341-346, 1998.

Walley El-Dine, N., El-Shershaby, A., Ahmed, F. and Abdel Haleem, A.S., “Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites”, *Applied Radiation and Isotopes* 55, 853–860, 2001.

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

Xu, J. Z., Zhou, Y.L., Chang, Q. ve Qu, H.Q., “Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers” *Materials Letters* 60, 820–822, 2006.

Yadollahi, M. M., Varolgüneş, S. ve İşsever, F., “Na<sub>2</sub>O silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri”, *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 6 (2), 26-31, 2017.

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”, *J. of Mari. Sci. and Tech.* 20 (3), 311-318, 2012.

Yardam, M. N., “F ve C Sınıfı Uçucu Küllerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Karşılaştırılması”, *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi* 3 (1), 32-37, 2020.

Yonar, Y., Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2014.

Yülek, G., Radyasyon Fiziği ve Radyasyonda Korunma, *SEK Yayınları*, No:14, 198 Ankara, 1992.

Zeybek, O., Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2009.

Zhang, J., Provis, J.L., Feng D., and van Deventer, J.S.J., “Geopolymers for immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>”, *Journal of Hazardous Materials* 157 (2-3), 587-598, 2008.

Zuda, L., Pavlik, Z., Rovnanikova, P., Bayer, P. and Cerny, R., “Properties of alkali activated aluminosilicate material after thermal load”, *Int. J. Thermophys.* 27 (4), 1250-1263, 2006.



## ÖZ GEÇMİŞ

Elif SÜZGEÇ, 20.03.1996 yılında Muş'ta doğdu. İlk öğretimini Ankara'da, orta ve lise öğretimini Niğde'de tamamladı. Lisans eğitimini 2014-2018 yıllarında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2018 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Avrupa Birliği (AB) FP7 kapsamında kabul alan 7 ülke katılımlı ELAC2015/T02-0721 nolu projeyi, Türkiye'yi temsil eden TÜBİTAK 116Y549 numara ve "Geopolimer Matrikse Dayalı Atık Lifler ile Güçlendirilmiş Çevre Dostu Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi" başlığı ile kayıtlarına almıştı. Elif SÜZGEÇ, bu uluslararası AB FP7 projesinde 2 yıl Proje Bursiyeri olarak çalıştı.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 3 adet uluslararası indekslerce taranan hakemli dergi makalesi ve 7 adet uluslararası bildiri yayınlanmıştır. Bu çalışmaların detayları aşağıda sunulmuştur.

### **A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:**

**A1. SÜZGEÇ, E., DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BOZKURT, V., ERTÜRK, S.** (2019) “Geopolymer’s Radiation Absorption detected by Geiger-Muller Counter”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 706, 012004, 1-5, DOI:10.1088/1757-899X/706/1/012004.

**A2. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., ÖZ, H.Ö., BİLGİL, A., SÜZGEÇ, E., VURAL, T.** (2019) “Production of Geopolymer Composites by using Different Alkaline Solution/Material Ratio”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 706, 012005, 1-7, DOI:10.1088/1757-899X/706/1/012005.

**A3. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., ÖZ, H.Ö. BİLGİL, A., VURAL, T., SÜZGEÇ, E.** (2019) “The Effect of Alkali Activation Solutions with Different Water Glass/NaOH Solution Ratios on Geopolymer Composite Materials”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660, 012003, 1-9, DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012003.

### **B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sözlü sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:**

**B1. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., ÖZ, H.Ö., BİLGİL, A., SÜZGEÇ, E., VURAL, T.** (2019) “Production of Geopolymer Composites by using Different Alkaline Solution/Material Ratio”, *International Conference “Development of Eco-Friendly Composite Materials Based on Geopolymer Matrix and Reinforced with Waste Fibers” (FIBRE)*, Montevideo, Uruguay, 28-29 November 2019.

**B2. SÜZGEÇ, E., DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BOZKURT, V., ERTÜRK, S.** (2019) “Geopolymer’s Radiation Absorption Detected by Geiger-Muller Counter”, *International Conference “Development of Eco-Friendly Composite Materials Based on Geopolymer Matrix and Reinforced with Waste Fibers” (FIBRE)*, Montevideo, Uruguay, 28-29 November 2019.

**B3. ÖZ, H.Ö., DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BİLGİL, A., VURAL, T., SÜZGEÇ, E.** (2019) “The Effect of Different Alkaline Ratios on Geopolymer Composite Materials”, *4<sup>th</sup> International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies” (IMST 2019)*, Book of Abstracts, pp. 120-121, ISBN: 978-9934-22-356-3, Riga, Latvia, 25-27 September 2019.

**B4. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., ÖZ, H.Ö., BİLGİL, A., SÜZGEÇ, E., VURAL, T.** (2019) “Production of Geopolymer Composite Material from Fly Ash: A Case Study Conducted by Design Parameters”, *1<sup>st</sup> International Conference on Environment, Technology and Management (ICETEM)* Proceedings Book, pp. 1188-1195, ISBN: 978-975-8062-33-1, Niğde, Turkey, 27-29 June 2019.

**B5. SÜZGEÇ, E., DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BOZKURT, V., ERTÜRK, S.** (2019) “Radiation Absorption of Geopolymer Building Materials: Preliminary Results from New Design Measurement System”, *1<sup>st</sup> International Conference on Environment, Technology and Management (ICETEM)* Proceedings Book, pp. 1196-1203, ISBN: 978-975-8062-33-1, Niğde, Turkey, 27-29 June 2019.

**B6. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BİLGİL, A., ERTÜRK, S., BOZKURT, V., DİKKAYA, B., SÜZGEÇ, E., NAS, P., AKAN, A.G.** (2018) “Production of Geopolymer Building Material from Fly Ash (An Industrial Solid Waste) using Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Mixture”, Book of Abstracts of *4<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS 2018)*, Kiev, Ukraine, pp. 181, ISBN: 978-605-67955-2-7, 2-6 May 2018.

**B7. DOĞAN-SAĞLAMTİMUR, N., BİLGİL, A., ERTÜRK, S., BOZKURT, V., ÖZ, H.Ö., NAS, P., AKAN, A.G., SÜZGEÇ, E., DİKKAYA, B. (2018) “Reuse of Industrial Solid Waste Fly Ash in Geopolymer Construction Material Production”, *International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (Eurasianbiochem 2018)* Abstract Book, Ankara, Türkiye, pp. 58, 26-27 April 2018.**



