



**AHLAT TAŞI ESASLI GEOPOLİMER BETON
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Serdar Murat Uğur TOPRAK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliğı Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır)

**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI**

AHLAT TAŞI ESASLI GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI
(Investigation of Ahlat Stone Based Geopolymer Concrete Production)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar Murat Uğur TOPRAK

Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT

**Erzurum
Temmuz, 2021**

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Serdar Murat Uğur TOPRAK tarafından hazırlanan “Ahlat Taşı Esaslı Geopolimer Beton Üretiminin Araştırılması” başlıklı çalışması .../.../..... tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Mehmet burhan KARAKOÇ
İnönü üniversitesi
Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT
Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL
Atatürk Üniversitesi
.....

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih vesayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Pror. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Doç.Dr. Rıza POLAT* danışmanlığında sunulan “Ahlat Taşı Esaslı Geopolimer Beton Üretiminin Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	7	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	6	35
Bulgular	3	20
Tartışma	3	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Serdar Murat Uğur TOPRAK	Doç.Dr. Rıza POLAT
....../....../.....	/....../.....
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../..... tarih vesayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../..... tarih vesayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında öneri, destek, yardım ve ilgilerini esirgemedен yüksek lisans tez çalışmamın tamamlanmasını sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Rıza POLAT'a;

Çalışmalarımız süresince desteklerini esirgemeyen, her türlü katkı ve yardımı sağlayan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL'e ve Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET'e;

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince her türlü imkanla beni destekleyen meslek arkadaşım ve müdürüm Sayın Öğr. Gör. Mustafa VAROL'a;

Çalışmalarım sırasında maddi, manevi olarak destek veren meslektaşlarım İnşaat Mühendisi İhsan POLAT ve Oğuzhan KARACA'ya, aynı zamanda laboratuvar çalışmalarında dışarıdan destek veren Sedat Melih Umut TOPAK ve Muhammed Alperen ŞAHİN'e;

Ayrıca bugüne kadar her zaman maddi, manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme, kıymetli eşim İnşaat Yüksek Mühendisi Şeyda Nur TOPRAK'a ve oğlum Yusuf Eymen TOPRAK'a teşekkürü bir borç bilirim ve hepsine ayrı ayrı, tekrar tekrar en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamızın ülkemize ve bilime faydalı olmasını temenni ederim.

Serdar Murat Uğur TOPRAK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHLAT TAŞI ESASLI GEOPOLİMER BETON ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Serdar Murat Uğur TOPRAK

Danışman: Doç. Dr. Rıza POLAT

Amaç: Çimento üretimi sırasında ortaya çıkan çevresel problemlerden dolayı, bilim insanları tarafından yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkan alternatif bağlayıcılardan olan geopolimerler, alüminosilikat yapıdaki malzemelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesi sonucu elde edilirler. Geopolimerlerin üretiminde normal çimentoya göre daha az CO₂ salınımı meydana gelmekte olup, bu bağlayıcı ile üretilen betonlarda ise yeterli mekanik ve durabilite özelliklerinin sağlandığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise, yerel malzemelerin değerlendirilmesi açısından geopolimer beton üretimi için Ahlat Taşının kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, Ahlat Taşı, çimento tane boyutunda öğütülüp bağlayıcı olarak geopolimer beton üretiminde kullanılmıştır. Kimyasal analizler sonucunda Ahlat Taşının iki farklı rengi kullanılmıştır. Karışımlarda NaOH+Na₂SiO₃ ve KOH+Na₂SiO₃ olmak üzere iki farklı alkali aktivatör ve üç farklı dozaj (400, 500 ve 600 kg/m³) kullanılmış olup toplamda 12 farklı geopolimer beton tasarımı gerçekleştirilerek üretimleri yapılmıştır. Üretilen geopolimer betonlara 90°C’de 48 saatlik sıcaklık kürü uygulanmıştır. Üretilen numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, birim hacim ağırlıkları, kılcal geçirimsizlik katsayıları, boy değişimleri ve radyasyon soğurmaları tespit edilmiştir. Numuneler SEM, SEM/EDX ve FTIR içyapı analizleriyle değerlendirilmiştir.

Bulgular: En yüksek basınç dayanımı bej renk Ahlat Taşı+KOH+Na₂SiO₃+500 (dozaj) karışımında gözlemlenmiştir. Fakat, genel olarak tüm karışımlar değerlendirildiğinde siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin basınç dayanımları daha yüksektir. En yüksek dayanım sağlayan bağlayıcı dozajı 500 kg/m³ olarak belirlenmiştir. KOH’lı karışımlarla üretilen numunelerin mekanik, fiziksel ve durabilite deney sonuçlarının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir ve ayrıca içyapı analizleri sonuçlarına göre daha ağırsı ve kompakt yapıda olduğu görülmüştür.

Sonuç: Ahlat Taşı esaslı geopolimer beton üretiminde, aktivatör olarak KOH+Na₂SiO₃, karışım dozajı olarak 500 kg/m³ ve renk olarak siyah Ahlat Taşının kullanımı ile optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Ahlat Taşı, ignimbirit, alkali aktivatör, radyasyon soğurma, kılcal su emme, mekanik özellikler, SEM, SEM/EDX, FTIR

Temmuz 2021, 122 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION of AHLAT STONE BASED GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCTION

Serdar Murat Uğur TOPRAK

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Rıza POLAT

Purpose: Due to the environmental problems that arise during cement production, geopolymers, which are among the alternative binders that have emerged as a result of research by scientists, are obtained as a result of activating aluminosilicate materials with alkaline solutions. In the production of geopolymers, less CO₂ emission occurs compared to normal cement, and it has been determined that sufficient mechanical and durability properties are provided in the concretes produced with this binder. In this study, the usability of Ahlat Stone for the production of geopolymer concrete was investigated in terms of the evaluation of local materials.

Method: In this study, Ahlat Stone was ground to cement grain size and used as a binder in the production of geopolymer concrete. As a result of chemical analysis, two different colors of Ahlat Stone were used. Two different alkali activators, NaOH+Na₂SiO₃ and KOH+Na₂SiO₃, and three different dosages (400, 500 and 600 kg/m³) were used in the mixtures, and a total of 12 different geopolymer concrete designs were produced. The produced geopolymer concretes were cured at 90°C for 48 hours. Compressive strength, flexural strength, weights per unit of volume and consistencies, sorptivity coefficients, length changes and radiation absorption of the produced samples were determined. Samples were evaluated by SEM, SEM/EDX and FTIR microstructure analysis.

Findings: The highest compressive strength was observed in the beige color Ahlat Stone+KOH+Na₂SiO₃+500 (dosage) mixture. However, when all mixtures are evaluated in general, the samples produced with black colored Ahlat Stone have higher compressive strength. The binder dosage providing the highest strength was determined as 500 kg/m³. It was observed that the mechanical, physical and durability test results of the samples produced with KOH mixtures were better, and it was also seen that they had a more mesh and compact structure compared to the results of the internal structure analysis.

Results: In the production of Ahlat Stone based geopolymer concrete, optimum results were obtained by using KOH+Na₂SiO₃ as activator, 500 kg/m³ mixture dosage and black Ahlat Stone as color.

Keywords: Geopolymer, Ahlat Stone, ignimbrite, alkali activator, radiation absorption, capillary absorption, mechanical properties, SEM, SEM/EDX, FTIR

July 2021, 122 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri	3
Amaç ve Kapsam	3
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Portland Çimento Üretiminin Gelişimi ve Çevresel Etkileri	5
Portland Çimento Alternatifleri	7
Geopolimerler	7
Geopolimerlerin Kimyası.....	10
Alkali Aktivatörler	16
Geopolimerlerde Optimum Karışım	17
Geopolimerlerde Kür	18
Geopolimerlerin Durabilite Özellikleri	20
Geopolimerlerin Kullanım Alanları	23
Ham Maddenin Geopolimerlere Etkisi	26
Ahlat Taşı (İgnimbirit) ve Özellikleri	27
Ahlat Taşı Rezerv Potansiyeli	28
Ahlat Taşının Diğer Alanlardaki Uygulamaları	28
Puzolanik Aktivite.....	30
Radyasyon Soğurma	30
Etkin atom numarası (Z_{eff}).	30
Etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}).	31
Yarı karanlık değeri (HVL).....	31
MATERYAL ve YÖNTEM	32
Materyal	32

Deneylerde kullanılan malzemeler.....	32
Deneylerde kullanılan aletler	35
Yöntem.....	40
Agregalarda uygulanan deneysel yöntemler	40
Ahlat Taşının öğütülmesi	40
Ahlat Taşına uygulanan yöntemler	41
Puzolanik aktivite.....	42
Çözelti hazırlanması.....	43
Geopolimer beton karışım tipleri ve karışım hesapları	43
Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerleştirilmesi ve kuru	45
Geopolimer beton numunelerde uygulanan yöntemler	46
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	53
Hammadde Analizleri	53
Agrega Deneyleri	55
Puzolanik Aktivite İndeksi.....	56
Basınç Dayanımı	57
Eğilme Dayanımı	65
Birim Hacim Ağırlık ve Kıvam.....	67
Kılcal Su Emme	69
Boy Değişimi	72
Radyasyon Soğurma	76
İç Yapı İncelemesi.....	84
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	108

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı Malzemelere Ait Geçirgenlik Değerleri	24
Tablo 2. Ahlat Taşının (İğnimbiritinin) Kimyasal Analizi	28
Tablo 3. Ahlat Taşının Kimyasal Özellikleri	32
Tablo 4. Alkali Aktivatörlerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	33
Tablo 5. Kullanılan Strain Gaugelerin Teknik Özellikleri	39
Tablo 6. Puzolanik Aktivite İndeksi Karışım Oranları	42
Tablo 7. Karışım Kodları	44
Tablo 8. 1 m ³ Geopolimer Beton Karışım Hesapları	45
Tablo 9. Ahlat Taşının Kimyasal Özellikleri.....	53
Tablo 10. Ahlat Taşının Elementel Analizi	54
Tablo 11. Geopolimer Beton Üretiminde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	55
Tablo 12. Agregaların Su Emme Oranı ve Özgül Ağırlık Sonuçları.....	56
Tablo 13. Basınç Dayanım Sonuçları	58
Tablo 14. Geopolimer Beton Numunelerin Eğilme Dayanım ve Sehim Değerleri	65
Tablo 15. Geopolimer Beton Numunelerin Taze Birim Hacim Ağırlık ve Yayılma Değerleri.....	68
Tablo 16. Geopolimer Beton Numunelerin Kılcal Su Emme Miktarları.....	70
Tablo 17. Geopolimer Beton Numunelerin Kılcal Geçirimsizlik Katsayısı Değerleri	70
Tablo 18. 53,2–384 keV Enerji Aralığı İçin Numunelerin Teorik ve Deneysel Etkin Atom Numaraları	76
Tablo 19. 53,2–384 keV Enerji Aralığı İçin Numunelerin Teorik ve Deneysel Etkin Elektron Yoğunluğu	77
Tablo 20. SEM/EDX Element Analizi.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yıllara göre çimento üretimi ve CO ₂ salınımı.	5
Şekil 2. Çimento üretim aşamaları.	6
Şekil 3. Oksijen atomunun Si ⁺⁴ ve Al ⁺⁴ ile koordinasyon mekanizması.....	12
Şekil 4. Poli-sialat'ın üç boyutlu kristalize yapısı.....	13
Şekil 5. Poli-sialat-silokso'nun üç boyutlu kristalize yapısı	13
Şekil 6. Poli-sialat-disilokso'nun üç boyutlu kristalize yapısı	14
Şekil 7. Si/Al>3 sialate'nin üç boyutlu kristalize yapısı	14
Şekil 8. SEM görüntüleri.....	15
Şekil 9. Yüksek sıcaklık etkisi altında geopolimer betonun basınç dayanımı	21
Şekil 10. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası geopolimer betonların basınç dayanımı değişimleri.....	22
Şekil 11. E-Crete kullanılarak tamamlanan projeler.	25
Şekil 12. Ukrayna'da geopolimer beton ile üretilen konutlar.	25
Şekil 13. Ahlat Taşının kullanıldığı çeşitli yapılar.....	29
Şekil 14. Çalışmada kullanılan Ahlat Taşları.	32
Şekil 15. Kullanılan alkali aktivatörler.....	33
Şekil 16. Karışımlarda kullanılan dere agrega örnekleri.	34
Şekil 17. Elek takımı.	35
Şekil 18. Bilyalı-çubuklu değirmen.	35
Şekil 19. Harç karıştırıcı.....	36
Şekil 20. Kalıp.....	36
Şekil 21. Yayılma tablası.	36
Şekil 22. Basınç dayanım test cihazı.	37
Şekil 23. Etüv.	37
Şekil 24. Dijital terazi.....	38
Şekil 25. 3 noktalı eğilme dayanım cihazı.	38
Şekil 26. Strain-Gauge.	38
Şekil 27. a) Veri toplama sistemi, b) DASYLAB programı ve verilerin dijital ortamında görünümü.	39
Şekil 28. Toz halinde kullanılan Ahlat Taşları.....	40
Şekil 29. X-Işını Floresans Analizinin Işınları (XRF)	41
Şekil 30. Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numunesi ve etüve konulmak üzere hazırlanmış poşetli numune.	46

Şekil 31. Boy değişim ölçüm sistemi.	48
Şekil 32. Kılcal su emme düzeneği.	49
Şekil 33. Radyasyon soğurma deney düzeneği.	49
Şekil 34. Ba radyoaktif kaynak için numune yokken ve numune varken alınan spektrumlar.	50
Şekil 35. Am radyoaktif kaynak için numune yokken ve numune varken alınan spektrumlar.	50
Şekil 36. SEM cihazı.	51
Şekil 37. FTIR analiz cihazı.	52
Şekil 38. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.	55
Şekil 39. Puzolanik aktivite deney sonuçları.	56
Şekil 40. Tüm karışımlara ait geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.	58
Şekil 41. NaOH ve KOH içeren geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.	59
Şekil 42. Siyah ve bej renk Ahlat Taşlı geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.	60
Şekil 43. 400-500-600 dozajlı geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.	61
Şekil 44. Geopolimer beton numunelerin eğilme dayanım sonuçları.	66
Şekil 45. KOH içeren karışımların sehim değerleri.	66
Şekil 46. NaOH içeren karışımların sehim değerleri.	66
Şekil 47. Üretilen numunelerin deneysel ve teorik taze birim hacim ağırlık sonuçları.	68
Şekil 48. Geopolimer betonların zamana bağlı olarak kılcal geçirimlilik katsayılarının değişimini gösteren çizgi ve sütun grafikleri.	71
Şekil 49. Üretilen geopolimer numunelerin boy değişim grafiği.	73
Şekil 50. NaOH içeren karışımlara ait numunelerin boy değişim grafikleri.	73
Şekil 51. KOH içeren karışımlara ait numunelerin boy değişim grafikleri.	74
Şekil 52. Siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin boy değişim grafikleri.	74
Şekil 53. Bej renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin boy değişim grafikleri.	75
Şekil 54. 400 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	78
Şekil 55. 500 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	78
Şekil 56. 600 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	79
Şekil 57. Siyah renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	79
Şekil 58. Siyah renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	80
Şekil 59. Bej renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	80

Şekil 60. Bej renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.	81
Şekil 61. Siyah renk Ahlat Taşı, NaOH ve KOH içeren numuneler için yarı karanlık değerinin (HVL) enerjiye bağlı değişimi.	81
Şekil 62. Bej renk Ahlat Taşı, NaOH ve KOH içeren numuneler için yarı karanlık değerinin (HVL) enerjiye bağlı değişimi.	82
Şekil 63. 500 dozajlı numunelere ait SEM görüntüleri.	85
Şekil 64. Siyah renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numunelere ait SEM görüntüleri.....	86
Şekil 65. SEM/EDX spektrumları.	87
Şekil 66. S-N-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları	91
Şekil 67. S-K-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları	91
Şekil 68. B-N-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları.....	92
Şekil 69. B-K-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları.....	92
Şekil 70. S-K-4 karışımına ait FTIR analiz sonuçları	93
Şekil 71. S-K-6 karışımına ait FTIR analiz sonuçları	93

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
B-K-4	: Bej Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 400 (dozaj)
B-K-5	: Bej Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 500 (dozaj)
B-K-6	: Bej Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 600 (dozaj)
B-N-4	: Bej Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 400 (dozaj)
B-N-5	: Bej Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 500 (dozaj)
B-N-6	: Bej Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 600 (dozaj)
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit
CASH	: Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
C₃A	: Trikalsiyum Alüminat
Ç/B	: Çözelti/Bağlayıcı
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
FTIR	: Forurier Transform Infraed (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi)
K	: Potasyum
KOH	: Potasyum Hidroksit
M	: Molarite
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Na	: Sodyum
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NASH	: Sodyum Alüminosilikat Hidrat
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
SAK	: Süper Akışkanlaştırıcı Katkı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SEM/EDX	: Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
SiO₂	: Silisyum Oksit
S-K-4	: Siyah Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 400 (dozaj)
S-K-5	: Siyah Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 500 (dozaj)
S-K-6	: Siyah Renk Ahlat Taşı + KOH + Na ₂ SiO ₃ + 600 (dozaj)
S-N-4	: Siyah Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 400 (dozaj)
S-N-5	: Siyah Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 500 (dozaj)
S-N-6	: Siyah Renk Ahlat Taşı + NaOH + Na ₂ SiO ₃ + 600 (dozaj)
YÜTAM	: Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
XRF	: X Işını Floresansı
°C	: Santigrat Derece
%T	: %Geçirgenlik (%Transmittance)
µm	: Mikrometre

GİRİŞ

İnsanlığın bilgi birikimi her geçen gün artmakta ve gelişen bilimsel veriler doğrultusunda bilgiler hızlıca aktarılmakla beraber teknolojiye hızla ilerlemektedir. Bu ilerlemelerden biri de 1824 yılında İngiliz araştırmacı Josep Aspdin'in Portland Çimentosu'nun icadı ile birlikte beton üzerinde olmuştur ve beton üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Beton; su, agregası ve çimentoya gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddeleri ilave edilerek belirli oranlarda homojen olarak üretim teknolojisine uygun olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik ve akıcı kıvamda olup, şekil verilebilen ve zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu katılaşır, istenilen şekli alarak ve sertleşerek mukavemet kazanan kompozit önemli bir yapı malzemesidir.

Beton günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biridir ve her geçen gün tüketimi daha da artmaktadır ve dünyada tahmini olarak yıllık 10 milyar m³ hazır beton üretimi yapılmaktadır (Gümüşsoy 2019). Beton üretiminde önemli bir rol oynayan çimento; hidrolik bağlayıcı madde olup, başlıca Si, Ca, Al, Fe içeren hammaddelerin (kalker ve kil karışımının) sinterleşme derecelerine (1250-1450 °C) kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde olan klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi (alçı taşı, tras, kalker, cüruf vb.) katılarak öğütülmesi ile elde edilir. Çimentonun üretim aşamasında çokça enerji tüketilmekte ve bu enerji tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan CO₂ miktarı, her bir ton çimento üretimine karşılık yaklaşık bir ton civarındadır. Yapılan karşılaştırmalara bağlı olarak çimento sektörü dünya CO₂ salınımlarının %5 dolaylarındaki miktarını oluşturmaktadır ve ayrıca, 2006 ve 2050 yılları arasında ise yıllık bazda %2,5 oranında artması beklenmektedir (Salbaş 2016). Çimento üretimindeki fazla enerji kullanımından dolayı üretim maliyetleri artmakta ve ortaya çıkan CO₂ gazı çevresel sorunlar oluşturmaktadır. Bu nedenlerden dolayı araştırmacılar, enerji kaynakları, çevresel ve ekonomik sorunların çözümü için birçok araştırma yapmakta ve çimentoya alternatif bağlayıcı bulmak için çaba sarf etmektedirler. Bu alternatif bağlayıcılardan biri de geopolimer bağlayıcılarıdır.

Geopolimerler, endüstriyel atık ve puzolan malzemelerin farklı aktivatörler aracılığıyla aktive edilmesiyle oluşan alümino silikat tipi çimentoya alternatif bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimerlerin Davidovits tarafından 1978 yılında tanımlanmasından bu yana yapılan çalışmalar sonucunda istenilen özellikler bakımından olumlu sonuçlar göstermeye başlamasından ötürü kimya alanının yanında mühendislik alanının da dikkatini çekmiştir.

Geopolimer bağlayıcılar hem çevre dostu hem de bazı olumlu mühendislik özellikleri bakımından çimentoya alternatif iyi bir yapı malzemesi olabilir. Geopolimer bağlayıcı üretimi için, çimento üretiminde ihtiyaç duyulan yüksek enerjilere gerek duyulmadığından ötürü; çimento üretimine göre %60 oranında enerji sarfiyatı tasarrufu sağlamakta ve aynı zamanda %80 oranında daha az CO₂ salınımına olanak sağlamaktadır. Bunlarla birlikte geopolimer bağlayıcıların hidrasyonu sonucunda Ca(OH)₂ ve C₃A benzeri ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılarla üretilen betonların durabilite özellikleri Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha iyi olmaktadır. Ayrıca geopolimerlerin, üretimi için gerekli olan hammadde kaynaklarının; çeşitli ve bol olması (perlit, ignimbirit malzemeler, pomza vb.) ile birlikte atık malzemelerden oluşması (yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) nedeniyle kolay ulaşılabilir olması, basit hazırlanma metotları ve kısa zamanda dayanım kazanımı gibi olumlu özellikleri de vardır.

Türkiye coğrafyasında ise birçok volkanik hareketlerden dolayı ignimbirit rezervi oldukça fazladır. İgnimbirit volkanik tüflerden oluşan, kolay işlenebilir, yumuşak taştır. İgnimbiritler, volkanik püskürmelerle yeryüzüne çıkan katı parçalardan oluşmuştur. Bitlis yöresinde Ahlat Taşı ismiyle bilinen Ahlat Taşı da ignimbirit bir malzemedir (Dede 2009). Ahlat Taşı topraktan ilk çıkarıldığında lokal olarak işlenebilirliği kolaydır ve bu kolay işlenebilirliğinden dolayı el ve makine ile kolaylıkla şekil alabilmektedir. Daha sonrasında ise hava ile temas ettikçe içerisinde bulunan oksijen ve madensel suların yapıyı terk etmesiyle birlikte zamanla sertleşmektedir. Ahlat Taşının en belirgin fiziksel özelliği ocaklardan çıkarıldığında kolay bir şekilde işlenebilmesidir ve bunun nedeni ise gözenekli bir yapıda olması ve bu gözeneklerin su ve/veya rutubet dolu olması olarak ifade edilmiştir (Kazancı ve Gürbüz 2014). Ahlat Taşının içerisinde bol miktarda oksijen ve mineral suların bulunduğunu, taşın hava ile temasından sonra oksijenin ve mineral suların zamanla taştan ayrıldığını belirtmişlerdir (Bakış vd 2014). Ahlat Taşının hafif olması ve içerisinde bağımsız boşluklar bulunmasından dolayı binaların taşıyıcı olmayan kısımlarında, ses ve ısı izolasyonlarında, yapılarda ve mezar taşlarının süslemeleri ve kabartmalarında, az katlı kargir yapılar gibi birçok farklı alanda değerlendirilmek istenilmiş ve bu olumlu fiziksel özelliklerinden dolayı ses ve ısı yalıtımı, süsleme ve kabartma gibi bazı alanlarda kullanılmıştır. İgnimbiritlerin kimyasal bileşimleri bölgesel olarak farklılıklar göstermiş olsa da birbirlerine yakın kimyasal içerikleri bulunmaktadır. İgnimbirit malzemelerin geopolimer üretiminde efektif bir şekilde değerlendirilmesi ülkemiz ekonomisine olumlu katkı sağlamakla beraber çevresel duyarlılık bakımından da kazanımlar sağlayacaktır. Bölgedeki Nemrut yanardağının püskürmesi sonucu oluşan Ahlat Taşı, Si/Al oranı bakımından yüksek ve bölgede rezerv olarak ise oldukça zengin durumdadır.

Çalışma Alanının Yeri ve Coğrafi Özellikleri

Ahlat, Bitlis ilinin ilçelerinden biridir. Van Gölü'nün kuzeybatı kıyısında bulunan Ahlat, aynı zamanda deniz seviyesinden 4058 m ve 3050 m yükseklikteki Süphan ve Nemrut Dağlarının eteklerinde yer alır. Bölgedeki her yerleşim yeri gibi karasal iklime sahiptir fakat göle kıyısı olmasından dolayı diğer yerlere göre biraz daha ılıman olmaktadır (Sedef 2017).

Volkanik özelliği bulunan Nemrut Dağı en son 1441 yılında püskürmüştür ve bu dağın büyük çoğunluğu yaklaşık üçte ikisi Ahlat ilçesinin sınırlarında yer almaktadır. Bundan dolayı Ahlat ilçesinde volkanik püskürmelerin zamanla soğuması ve taşlaması sonucu oluşan Ahlat Taşı (ignimbirit) ocakları bulunmaktadır (Özdemir ve Tuğ 2010; Sedef 2017).

Sedef (2017) çalışmasında Ahlat'ın volkanik bir dağ olan Nemrut Dağı'nın eteklerine kurulduğunu ve Nemrut Dağı'nın volkanik hareketleri sonucu oluşan piroklastitlerin yaklaşık 4189 km²'lik alana yayıldığını ifade ederek Ahlat Taşının Nemrut Dağı'nın kuzeyinde ve güneyinde yayılım gösterdiğini belirtmiştir.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı; Bitlis ili Ahlat ilçesi bölgesinden temin edilen Ahlat Taşının (ignimbirit) geopolimer bağlayıcı olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır.

Bu çalışma kapsamında ise;

- Ülkemizde rezerv olarak çokça bulunan Ahlat Taşının geopolimer üretiminde değerlendirilerek efektif bir şekilde kullanılmasını sağlamak,
- Ahlat Taşının alkali aktivasyon mekanizmasını belirlemek,
- Geopolimer beton üretimini artırarak çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımını ve çevresel sorunları azaltmak, harcanan enerji sarfiyatından tasarruf etmek ve ülke kaynaklarının daha etkin ve efektif bir şekilde kullanılmasıyla ülke ekonomisine katkı sağlamak,
- Farklı alkali aktivatörler ile alkali aktive edilen Ahlat Taşından üretilen 12 farklı karışımdaki betonların; basınç ve eğilme dayanımı, birim hacim ağırlığı, kılcal su emmesi, boy değişimi, radyasyon soğurması ve iç yapı analizleriyle birlikte durabilite ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi,
- Geopolimer beton üretiminde, alkali aktivatör tipinin (NaOH ve KOH) ve molaritesinin belirlenmesi,

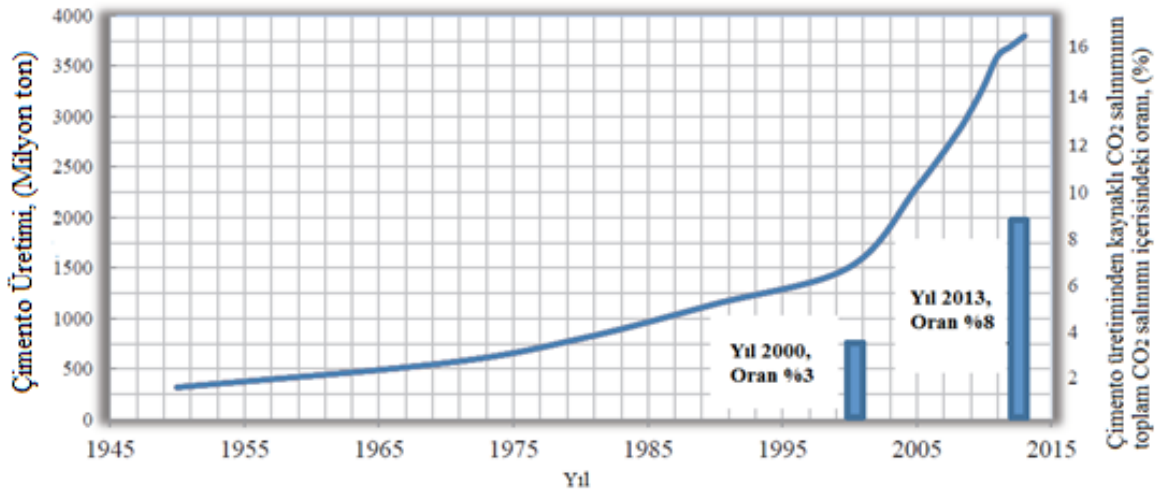
- Geopolimer beton üretiminde kullanılan Na_2SiO_3 'ün modül tipinin (2 modül) ve KOH-NaOH/ Na_2SiO_3 'ün optimum oranının belirlenmesi,
- Geopolimer beton numunelerde, çözelti/bağlayıcı oranı ve bağlayıcı dozajının karışımlardaki etkisinin saptanması,
- Geopolimer beton üretimi esnasında kullanılacak maddelerin karışım aşamasının belirlenmesi,
- Geopolimer beton numunelerin kür sıcaklığı, kür süresi ve kür şeklinin tespit edilmesi,
- Geopolimer beton numunelerde, farklı fiziksel renkteki Ahlat Taşlarının karışımlar üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Üretilen geopolimer beton numunelere SEM ve FTIR iç yapı analizi yapılarak iç yapı ile ilgili bulguların tespiti,

amaçlanarak gerekli çalışmalar yapılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

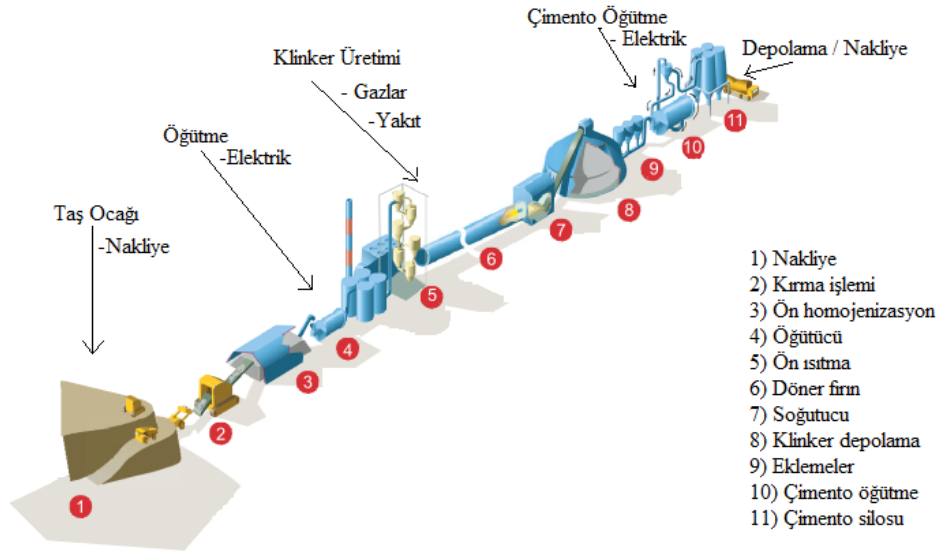
Portland Çimento Üretiminin Gelişimi ve Çevresel Etkileri

Liman, baraj, yapı, yol, köprü, tünel gibi farklı alan ve tatbiklerinde kullanılan beton, inşaat alanında çok kullanılan yapı malzemesidir (Choate 2003; USGS 2014; Blaszczyński and Krol 2015). Çimento, betonun en önemli ana bileşenidir. Yıllık ortalama 4 milyar ton imal edilen ve %4 büyüme oranı ile Portland çimentosu, dünyanın her yerinde tercih edilen yapı malzemesidir. (USGS 2014). Şekil 1’de görüldüğü gibi çimento üretimi her yıl artış göstermektedir.



Şekil 1. Yıllara göre çimento üretimi ve CO₂ salınımı (Blaszczyński and Krol 2015).

Çimento üretim aşamaları Şekil 2’de gösterilmiştir (Zeman and Lackner 2008). Çimento üretimiyle ilgili CO₂ salınımlarının %50’si kalsinasyon işleminden, %40’ı yakıtlardan ve geri kalanı ise çimento fabrikasının elektrik tüketiminden kaynaklanmaktadır. 1995 yılında dünyada CO₂ salınımının %3’ü kalsinasyon kaynaklıdır ve bu oran 2002 yılında %3,5’e yükselmiştir (Marland *et al.* 2005).



Şekil 2. Çimento üretim aşamaları (Zeman and Lackner 2008).

Normal çimentonun üretilmesinden bu yana, bu normal çimentodan üretilen beton dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi olmuştur ve günümüzde su hariç en çok tercih edilen malzemelerdendir (Duxson and Provis 2008).

Gelişmiş ve sanayileşmiş ülkelerde, geleneksel Portland çimentosu üretimi hâlihazırdaki inşaatların onarımı ve yeni yapıların inşası için gerekli olan miktarı karşılayacak şekilde artırılacaktır. Yalnızca ABD yıllık 7 milyar m³ beton kullanmaktadır ve bu beton miktarının büyük çoğunluğu 20 yıllık binaların tamir ihtiyaçları içindir ve yıldan yıla bu miktara 350 milyon m³ beton eklenmektedir (Emmons and Sordyl 2006).

Dünya nüfusunun artışı ve alt yapı modellerinin gelişip değişmesiyle bu yüzyılın sonlarına doğru normal Portland çimentosu üretiminin 2 katına çıkması beklenmektedir (Lawson and Dragusanu 2008).

CO₂ salınımının Dünya’da yaklaşık %7’sinin çimento üretiminden kaynaklı olduğu farklı yayınlarda belirtilmiştir. Önümüzdeki birkaç yılda ise çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımının, toplam CO₂ salınımının %17’lik kısmını oluşturacağı tahmin edilmektedir (Kantarıcı 2018).

Dünyada yılda 1 milyar ton beton üretildiği bilinmekte olup, bu beton üretimi için gerekli olan Portland çimentosu yılda 130 milyon tondur. Bunun yanı sıra, kullanılan su ve agreganın tüketilmesi dikkate alınmasa bile çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ salınımının ve diğer sera etkisi oluşturan gazların çevresel etkileri dikkate alındığında, beton üretim esnasında çimentonun kullanılıp kullanılmayacağı veya malzeme seçiminde sürdürülebilir bir malzeme olup olmaması temel tartışma konusudur (Davidovits 2008).

Portland Çimento Alternatifleri

Bilim insanları geleneksel Portland çimentosunun üretiminde meydana gelen ekonomik ve çevresel sorunların çözülmesi için araştırma yapmaktadırlar. Yapılan çalışmalarda, çimentoya alternatif olarak, ekonomik ve doğal malzemelerden üretilen geopolimer bağlayıcılar ön plana gelmiştir. Yapı malzemesi olarak geopolimer bağlayıcılar alümin-silikat esaslı malzemelerin alkali aktivasyonu sonucunda elde edilir. Çevreci ve ekonomik olan geopolimer bağlayıcılar, geleneksel çimentoya alternatif bir yapı malzemesi olarak ilerleyen zamanlarda karşımıza çıkabilir. 1990 yılından sonra geopolimer beton üretimi yaygınlaşmıştır (Joseph 2015).

Geopolimerler, normal Portland çimentosuna alternatif olarak üretilen ve normal Portland çimentosu ile benzer özellikleri gösteren yeni bir bağlayıcı malzeme türüdür. Geopolimer bağlayıcının hammaddesinin doğal malzeme veya atık malzeme olması dolayısıyla, normal Portland çimentosuna nazaran çevresel etkileri yönünden farklı bir öneme sahiptir (Kaur *et al.* 2018).

Geopolimerlerin üretilmesinden itibaren çevresel etkileri üzerine az sayıda incelemeler yapılmıştır ve bulunan sonuçlara göre küresel ısınma üzerine geopolimerlerin üretilmesinin geleneksel Portland çimentoya göre etkisinin daha az olacağı anlaşılmıştır (Duxson *et al.* 2007b; Meyer 2009; Damineli *et al.* 2010).

Geopolimer çimentolar geleneksel Portland çimentolardan farklı şekillerde üretilirler. Geopolimerlerin üretiminde yüksek ısı enerjisine ihtiyaç duyulmadığı için giderler büyük oranda azalmaktadır ve buna bağlı olarak enerji tüketimi de önemli ölçüde azalmaktadır. Beton ve çimento endüstrisinde geopolimer çimento üretimi, geleneksel çimento üretimine oranla CO₂ salınımını %80 oranında azaltmaktadır (Davidovits 1994a).

Geopolimerler

Kuhl 1930 yılında yapmış olduğu çalışmada KOH çözeltisi ile öğütülmüş cürufu aktive etmiş ve priz süresini araştırmıştır. Benzer şekilde Chassevent 1937 yılında NaOH ve KOH'ı birlikte kullanarak cürufu aktive etmiş ve cürufun reaktivitesini incelemiştir (Shi *et al.* 2011). Purdon ise 1940 yılında yaptığı çalışmada, NaOH çözeltisiyle Belçika cürufunu aktive etmiş ve sonucunda 25 MPa dayanım elde etmiştir. NaOH'ın cürufun priz süresinde önemli rol oynadığı ve tepkimede katalizör olarak görev aldığını belirtmiştir (Purdon 1940).

Geopolimer ifadesi Fransız araştırmacı Davidovits tarafından 1978 yılında alüminosilikat esaslı inorganik polimerlerin tarifi için kullanılmıştır. Geopolimerler

alüminosilikat veya puzolanik hammaddenin alkali çözelti ile sentezlenmesi (bileşimi) sonucu oluşur (Davidovits 1991b).

Davidovits tarafından 1978 yılında tanımlanan geopolimer bağlayıcılar, kimya faaliyet alanının yanında mühendislik bölümlerinin de dikkatini çekmiştir. Son zamanlarda, çevreci olmalarıyla birlikte asit ve sülfat direnci, erken yüksek dayanımlarından dolayı geopolimerler geleneksel Portland çimentolarına olası alternatif rakip olarak ortaya çıkmışlardır. Geopolimerler, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı benzeri yüksek silis ve alümin muhtevalı hammaddelerden üretiliyor olsa da günümüzde uçucu külden üretilen geopolimerler daha dikkat çekmektedir. Geopolimerler kalsiyum silikat hidrat bağlayıcılardan çok alüminosilikat esaslıdır ve bu sebeple durabilite açısından asit etkisine karşı dirençli beton üretimi adına iyi bir seçenektirler (Thokchom *et al.* 2009).

Geopolimerlerin, atık ve doğal puzolanların farklı tip alkali aktivatörler yardımıyla aktive edilmesiyle üretilen alümin silikat türü bağlayıcı malzemeler olduğu ve Portland çimentosu üretiminin geopolimer üretiminden 5 kat daha fazla CO₂ salınımına yol açtığı ve enerji tüketiminde %60 oranında fazladan tüketime neden olduğu farklı kaynaklarda belirtilmiştir (Comrie and Davidovits 1988; Davidovits *et al.* 1990; El-Gamal and Selim 2017).

Geopolimer üretim aşamasında tercih edilen malzemeler genellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül benzeri atık malzemelerdir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların yok edilmesi, taşınması ve depolanması sorun teşkil ettiğinden dolayı geopolimer üretiminde buna benzer malzemelerin kullanılması geopolimerlerin avantajlarından birisidir (Shi *et al.* 2012; Haddad and Alshbuol 2016).

Geopolimer bağlayıcılar, miktarı, maliyeti, kullanılabilirliği ve reaktivitesi farklı olan bir hayli fazla alüminosilikat hammaddeden üretilir (Davidovits 2008). Alkali aktive edilen bağlayıcılar prekast döküm ve yerinde döküm olmak üzere birçok metotla üretilirler. Alkali aktivatörlerin elverişli bir ortamda uygun bir biçimde karıştırılabileceği ve düzenli kür işleminin uygulanacağı prekast yapılarda yürütülmesinin daha iyi olduğu sık sık belirtilmiştir (Provis 2017).

İçerisinde alümin ve silikat bulunan puzolanik malzemeler, alkali karışımlarla tepkimeye girerek, agrega etrafında oluşan alüminosilikat jellerle birlikte geopolimeri oluşturur. Geopolimerler, Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na benzeri mineral molekülleri barındıran monomerler arasındaki polikondenzasyon ürün sonucu olan bilhassa karmaşık kovalent polimer zincirlerin doğuşundan ortaya çıkmaktadır (Görhan *et al.* 2015).

Bağlayıcı olarak Portland çimentosuna ihtiyaç duyulmadan üretilen geopolimer beton, yeni bir malzemedir. Çimentoya karşılık olarak, silisyum ve alüminyum muhtevası zengin olan uçucu kül benzeri hammaddeler alkali karışımlar ile aktive edilerek geopolimer bağlayıcılar elde edilmektedir. Sonuç olarak içerisinde normal Portland çimentosu bulunmayan beton üretilmektedir (Hardjito 2005).

Hammadde içerisindeki her mineral faz geopolimer tepkimesine katılmaz. Genellikle kristal yapıdakiler reaktif olmayıp ve geopolimerizasyon içerisinde aktif olmayan filler (dolgu) görevinde bulunurlar (He *et al.* 2012).

Alkali aktivatörler ile aktive edilmiş geopolimer bağlayıcılar (çimentolar), çimento dünyasında çok yeni bir malzemedir. Geopolimer bağlayıcı (çimento) üretimi için farklı alümino silikatlı ham maddeler potansiyel oluşturur. Geopolimer çimentoların bağlayıcılık özellikleri üretildikleri ham maddenin malzeme özelliklerine, uygulanan aktivasyon yöntemine ve tanelerin inceliğine (özellik yüzey) bağlıdır. Finlandiya’da ve eski Sovyet’te camısı cüruftan üretilen geopolimerler sıkça kullanılmıştır. Karışım hesaplamalarında su yerine NaOH veya KOH %10-30 arasında kullanılmıştır ve karışımda kullanılan ham maddeler çoğunlukla çok ince olacak şekilde öğütülmüşlerdir (Glasser 1995). Geopolimer çimentolar asit ve su ile çözülmemektedir ve kireç esaslı bağlayıcı değildir (Davidovits 1999).

Allahverdi *et al.* (2008) çalışmalarında, Na_2SiO_3 ve NaOH kullanarak pomzadan geopolimer bağlayıcı üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerden 28 gün sonunda basınç dayanımını 63 MPa olan geopolimer elde etmişlerdir ve üretilen geopolimer bağlayıcının çimento gibi bağlayıcı olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Songpiriyakij *et al.* (2011) Tayland’da yaptıkları bir çalışmada geopolimer ve donatı arasındaki bağlar incelenmiştir. 20 farklı karışım türü yapılmıştır ve karışımlardaki alkalinite ölçüleri değiştirilmiştir. Geopolimer ve donatı arasındaki bağlar ile basınç dayanımı incelenmiştir. Bu çalışmada silis dumanı ve pirinç kabuğu külü, uçucu kül ile kullanılmıştır. Silis dumanının kullanıldığı karışımlar da daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Pirinç kabuğu külünün kullanıldığı karışımlarda ise priz alma süresi uzamıştır. Bu çalışma sonucunda miktarca fazla silis dumanı ve yoğun NaOH karışımıyla üretilen geopolimerlerin kullanılması önerilmiştir ve bu karışım hesabıyla üretilen geopolimerlerde geopolimer beton ve donatı arasındaki kenetlenmenin iyi biçimde olduğu saptanmıştır.

Bina inşaatlarında kullanılmaları nedeniyle geopolimer harçların mekanik özellikleri ve akışkanlıkları üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Harçların özellikleri aktivatör molaritesine, aktivatör/bağlayıcı oranına, agrega/bağlayıcı oranına ve taze beton akışkanlığına göre en uygun şekilde tasarlanarak optimize edilmiştir (Singh *et al.* 2015).

Kong and Sanjayan (2010) çalışmalarında uçucu kül ve metakaolini birlikte kullanmışlardır ve bunları yüksek sıcaklığa tabi tutarak daha aktif hale getirmişlerdir. Metakaolinin 800 °C'de amorf yapıda olduğunu ve aktif bir alümino silikata dönüştüğünü belirlemişlerdir. Geopolimer bağlayıcı, harç ve beton üzerine yapılan çalışmalarında, Na_2SiO_3 ve NaOH alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada agrega tanelerinin büyüklüğü, sıcaklık ve akışkanlaştırıcıların geopolimer üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Üretilen numune ebatları büyüdükçe termal çatlaklardan ötürü basınç dayanımının düştüğü ifade edilmiştir. Agregatane çaplarının 10 mm'den düşük olması durumunda kabuk atmaların daha fazla görüldüğünü ve bunu gidermek için agregatane çaplarının 10 mm'den büyük olması gerektiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda agregatane çapları 10 mm'den büyük olan numunelerde hem normal şartlarda hem de yüksek sıcaklıklara maruz kalmış olan numunelerde daha iyi basınç dayanımları elde edilmiş ve yüksek sıcaklıklardaki hasarların sebebinin ise hamur ve agreganın birbiriyle uyumsuzluğundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Üretilen numunelerde süperakışkanlaştırıcı katkının dayanımı düşürdüğü ve işlenebilirlikte önemli bir rol oynamadığını ifade etmişlerdir.

Geopolimer beton üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır ve bu yöntemlerden biri de mikrodalga ışınları ile kür yöntemidir. Piriç kabuğu külü ve uçucu kül üzerinde yapılan çalışmada mikrodalga ışınlarının dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir ve sonuç olarak bu yöntemin etkili olduğu tespit edilmiştir (Kusbiantoro *et al.* 2012).

Ramujee and Potharajub (2017) yaptıkları çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer beton tasarımı yapmış ve üretmiştir. Aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksiti beraber kullanmıştır. Üretmiş olduğu geopolimer betonun uygun kıvamda olması için polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanmıştır.

Elyamany *et al.* (2018) çalışmasında aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksiti beraber kullanarak geopolimer beton üretmiş ve üretilen betonun kıvamı için de naftalin tabanlı (F tipi) süper akışkanlaştırıcı katkısını kullanmıştır.

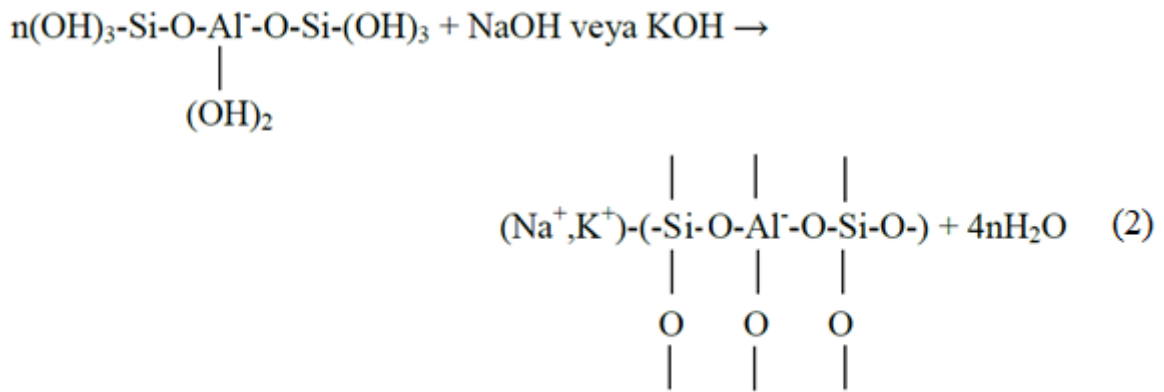
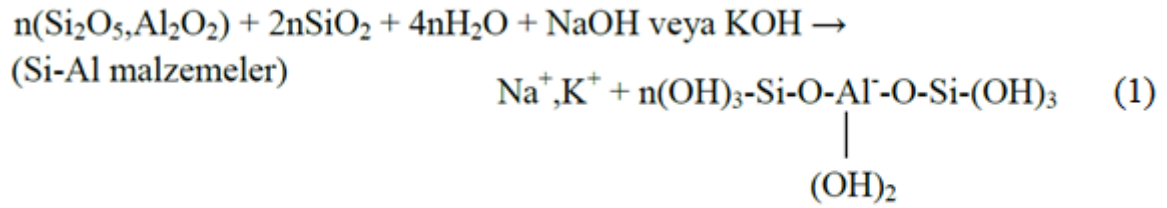
Geopolimerlerin Kimyası

İçerisinde Si/Al bulunan alüminosilikat kaynağı hammaddelerin alkali çözeltilerle kimyasal olarak aktive edilmesiyle bağlayıcı olarak kullanılması esasına dayanan reaksiyonlar zincirine geopolimerizasyon denir.

SiO_2 ve Al_2O_3 geopolimer reaksiyonlarına uygun bileşiklerdir. Alüminosilikat oksitlerin hidroksit tuzlarda çözünmesiyle birlikte geopolimer reaksiyon işlemleri başlamaktadır. Kullanılan malzemenin incelik modülünün fazla olması ile silisyum ve alüminyumlu

maddelerin çözünürlük oranları da reaksiyonu etkilemektedir (Van Jaarsveld *et al.* 1997). Ham maddeler üzerine uygulanan kür sıcaklığı ve süresi alüminosilikat jel solüsyon oluşum proseslerini etkilemektedir (Zeybek 2009).

Geopolimerizasyon oluşum sürecinde farklı alüminasilikat oksitleri ile alkalisilikatlar arasında hızlıca kimyasal tepkime gerçekleşir ve Si-O-Al-O polimer bağı meydana gelir. Aşağıda verilen denklem 1 ve 2 geopolimer malzeme oluşum şemasını daha iyi açıklayabilir (Davidovits 1991a, Xu and Van Deventer 2000).



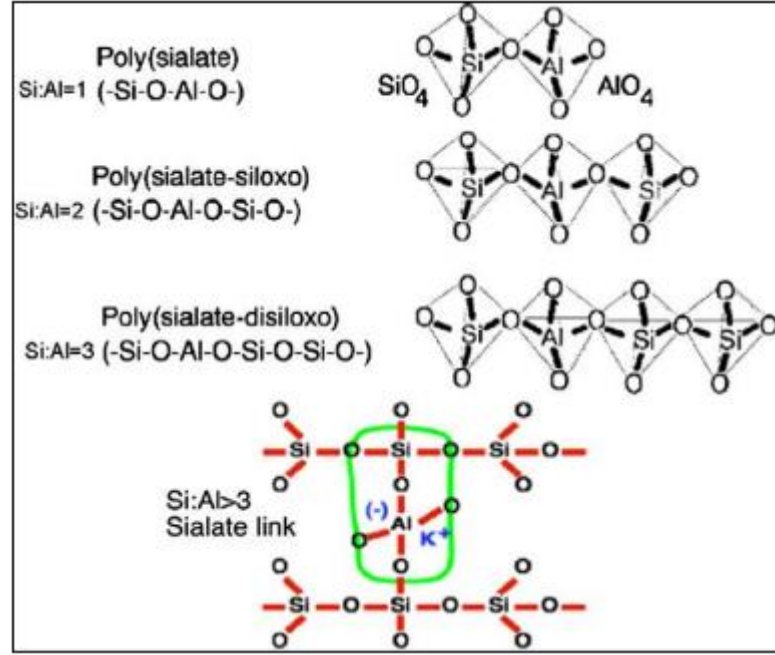
Denklem 1 ve 2’de görüldüğü üzere Si-Al barındırın bir malzeme geopolimerizasyonda hammadde olarak kullanılabilir. Alüminyum ve silisin çözünmesi için herhangi bir alkali metal tuza ve/veya hidroksite gereksinim duyulur (Xu and van Deventer 2000). Denklem 2’de görüldüğü üzere kimyasal tepkime sırasında serbest halde bulunan su geopolimer dizeyinden (matrisinden) ayrılmaktadır. Geopolimerlerin meydana gelmesinde suyun görevini önemsemek gereklidir. Geopolimerde bulunan su, kuruma ve kür süreçlerinde geopolimer dizeyinden dışarı atılmakta ve geopolimer dizeyinde nano boşluklar bırakmaktadır. Geopolimerlerin performanslarının geliştirilmesinde ve geçirimsiz beton tasarımlarında oldukça yararlıdır. Geopolimer karışım tasarımlarında suyun kimyasal tepkime sırasında hiçbir rolü bulunmamakla birlikte sadece işlenebilirliğe etkisi vardır ve bu normal Portland çimentosu karışımlarında bulunan suyun kimyasal tepkimesi ve hidrasyonundaki rolünün tam zıttı bir işlemdir (Hardjito and Rangan 2005; Rangan 2008). Karışımdaki suyun ortamdan ayrılması geopolimerlere ısı yalıtımı, yangın dayanımı ve hafiflik gibi pozitif özellikler kazandırmaktadır (Andini *et al.* 2008). Geopolimerler, birbirlerine uzay ağı veya zincir olarak bağlanmış kovalent bağlı moleküllerdir. Geopolimerlerin üç farklı amorf-yarı kristal üç boyutlu alüminosilikat yapı

olduğunu ifade etmiştir (Joseph 2015). Kimyasal grupları ve moleküler birimleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 3).

-Poli (sialat) tipi (Si-O-Al-O-)

-Poli (sialat-silokso) tipi (Si-O-Al-O-Si-O-)

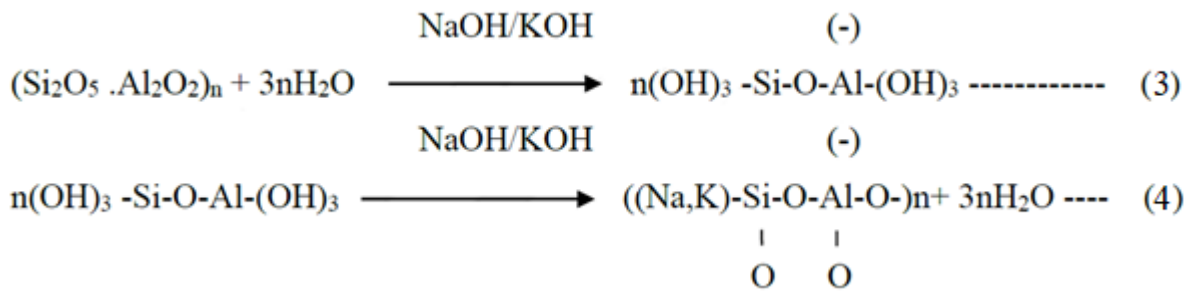
-Poli (sialat-disilokso) tipi (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



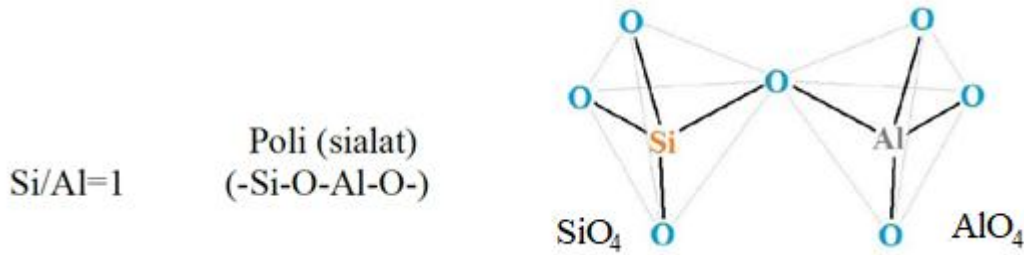
Şekil 3. Oksijen atomunun Si^{+4} ve Al^{+4} ile koordinasyon mekanizması (Joseph 2015).

Geopolimerlerin fiziksel özellikleri kullanılan ham madde içerisindeki Si/Al oranlarına göre değişiklik göstermektedir. Ham maddenin kimyasal özellikleri iyi bilinirse istenilen özellikleri elde edebilmek için uygun karışımlar oluşturulabilir (Davidovits 2008).

Hammadde içerisindeki Al ve Si oranlarına göre farklı kimyasal tepkimeler gerçekleşir. Si/Al oranı 1 olduğunda alkaliler ile kimyasal tepkimeler sonucunda orto-sialat oluşur. Oluşan bu ürün alkaliler ile tekrar kimyasal tepkimeye girerek poli-sialatları oluşturur. Bu kimyasal tepkime sistemi aşağıda denklem 3 ve 4'te açıklanmaktadır (Joseph 2015).

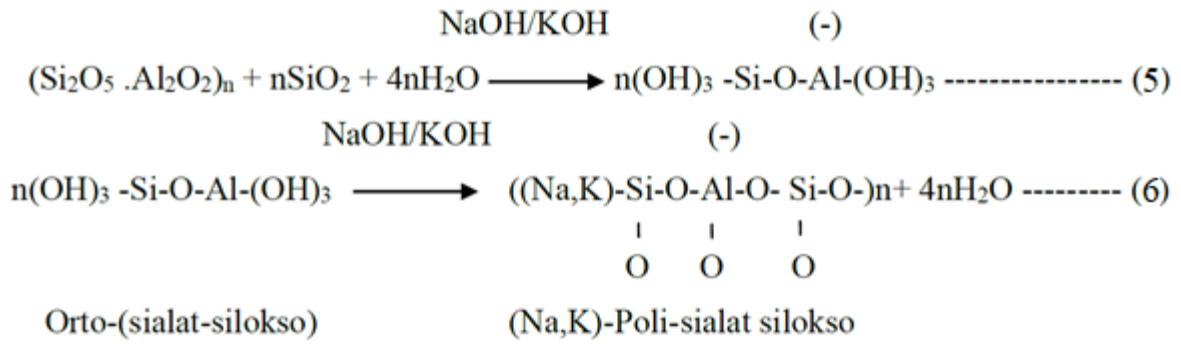


Geopolimerler, üç boyutlu siliko-alüminat yapılar olarak isimlendirilirler. Şekil 4'te Si/Al=1 poli-sialat kristalize yapısı verilmiştir (Davidovits 2002).

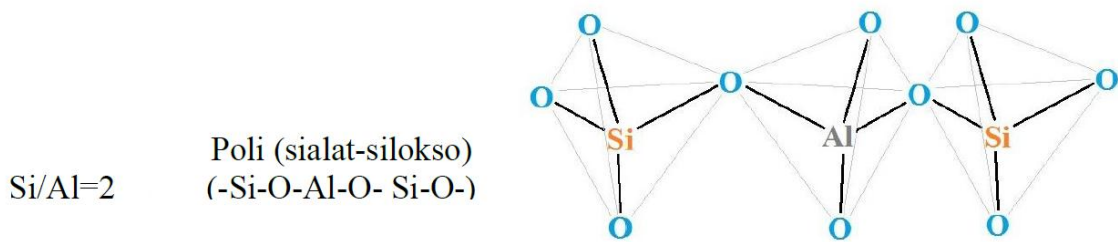


Şekil 4. Poli-sialat'ın üç boyutlu kristalize yapısı (Davidovits 2002).

Si/Al oranı 2 olduğunda alkaliler ile kimyasal tepkimeler sonucunda orto-sialat-silokso oluşur. Oluşan bu ürün alkaliler ile tekrar kimyasal tepkimeye girerek poli-sialat-siloksoları oluşturur. Bu kimyasal tepkime sistemi aşağıda denklem 5 ve 6'da açıklanmaktadır (Joseph 2015).

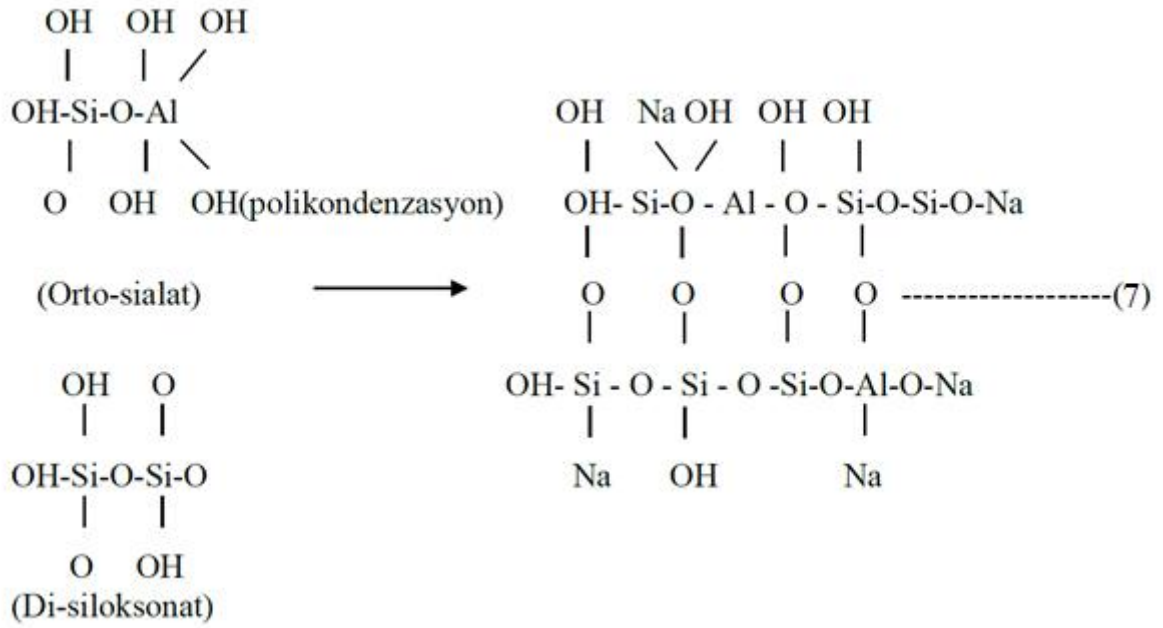


Şekil 5'te Si/Al=2 poli-sialat-silokso kristalize yapısı verilmiştir (Davidovits 2002).

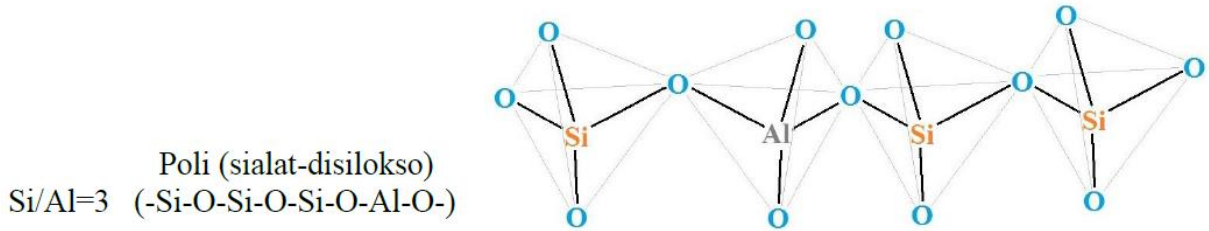


Şekil 5. Poli-sialat-silokso'nun üç boyutlu kristalize yapısı (Davidovits 2002).

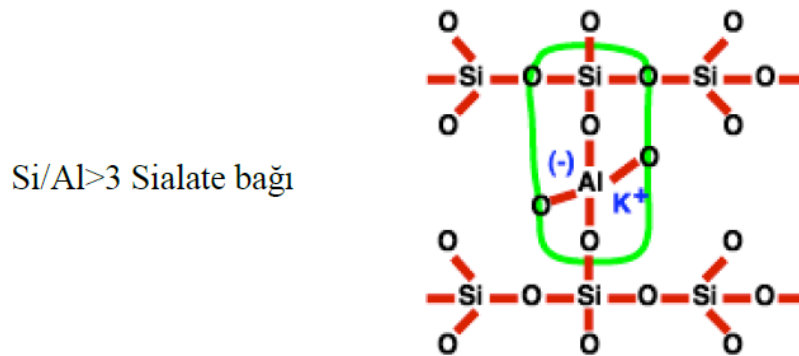
Si/Al oranı 3 ve 3'ten büyük olduğunda alkaliler ile kimyasal tepkimeler sonucunda orto-sialat ve di-siliksonat oluşur. Oluşan bu ürünlerin polikondenzasyonu sonucu di-silokso ve poli-sialatlar oluşur. Bu kimyasal tepkime sistemi aşağıda denklem 7'de açıklanmaktadır (Joseph 2015).



Şekil 6’da Si/Al=3 poli-sialat-disilokso kristalize yapısı ve Şekil 7’de Si/Al>3 kristalize yapısı verilmiştir (Davidovits 2002).



Şekil 6. Poli-sialat-disilokso’nun üç boyutlu kristalize yapısı (Davidovits 2002).

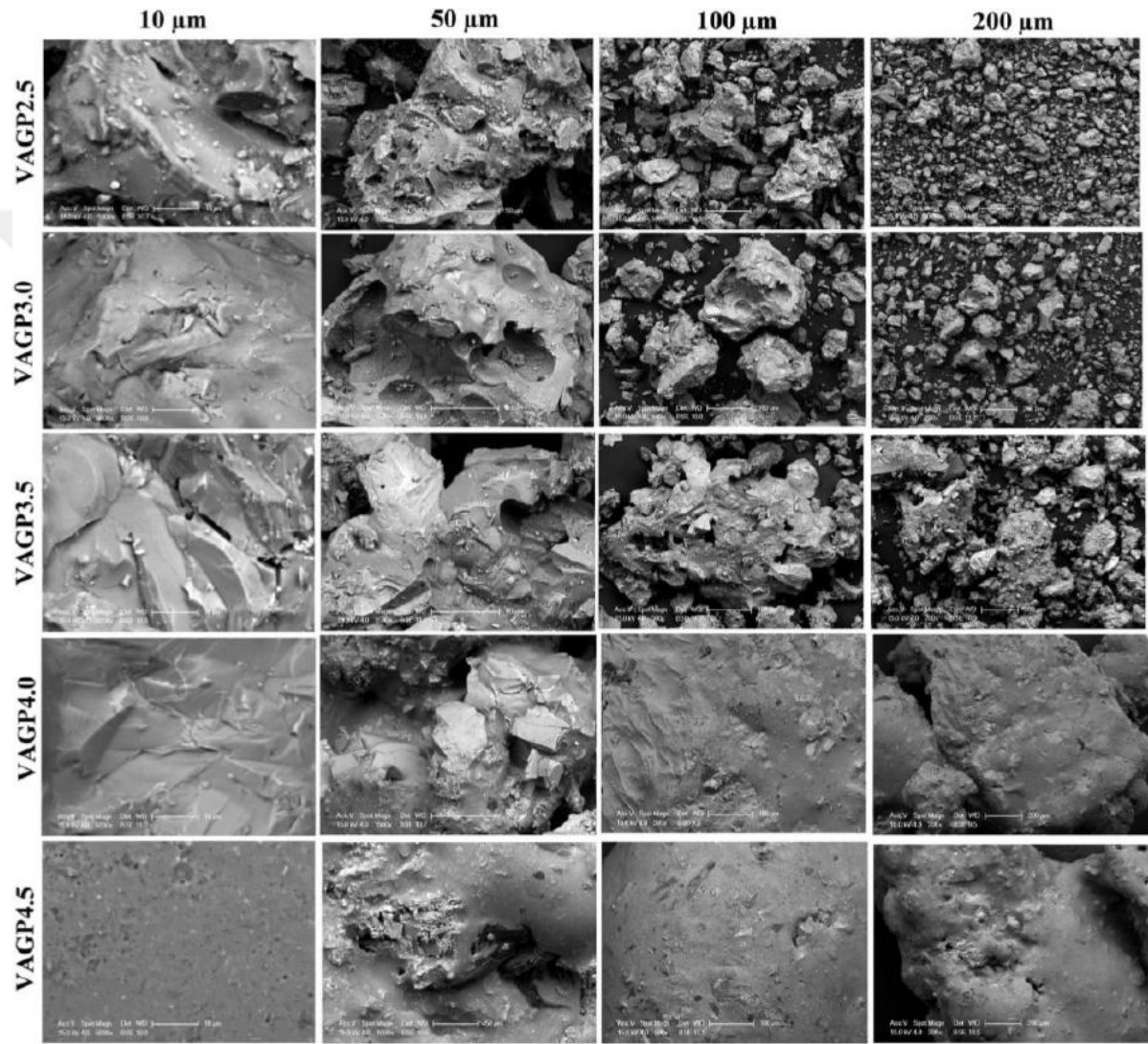


Şekil 7. Si/Al>3 sialate’nin üç boyutlu kristalize yapısı (Davidovits 2002).

Geopolimer bağlayıcılar, alkali aktivatör ile alüminosilikat yönünden zengin ham madde arasında gerçekleşen kimyasal tepkimeler sonucunda oluşurlar. Bu tepkimeler alümin ve silikat monomerler oluşturan Si-Al-O bağları meydana getirirler. Monomerler sonrasında oligomerlere ve sonradan silikat polimerlere dönüşürler. Alkali (Na_2O) ile alüminosilikat arasındaki tepkimeler sonucunda genellikle NASH alümin silikat hidrat jelleri meydana gelir. Bu jeller ortamdaki oksijen atomlarını bölüşerek birbirine bağlanan AlO_4 ve SiO_4 tetrahedral

birimlerini barındırır (Davidovits 1991b). Geopolimer dizeyinin yük dengesi Ca^{+2} , K^+ ve Na^+ benzeri ilave katyonlar aracılığıyla sağlanır. Mg ve Ca iyonlarını bünyesinde barındıran geopolimer bağlayıcılar, alüminosilikat esaslı geopolimerlere karşılık daha karmaşık tepkime mekanizmalarına sahiptir. Bu yapılar amorf NASH jellerinin dışında CASH ve CSH jelleride oluştururlar (Garcia-Lodeiro *et al.* 2014; Tennakoon 2016).

Araştırmacılar geopolimer kimyasını daha iyi anlayabilmek için iç yapı analizleri yapmışlardır. Volkanik külden üretilen geopolimerlerin SEM görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Si/Al ve Na/Al oranları arttıkça numunelerin daha kompakt bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu yüzden geopolimerizasyonda kullanılan volkanik hammaddesinin Si/Al ve Na/Al oranları arttıkça numunelerin daha iyi sonuçlar gösterdiği anlaşılmaktadır (Soyer-Uzun and Çetintaş 2018, Rocha *et al.* 2018).



Şekil 8. SEM görüntüleri (Soyer-Uzun and Çetintaş 2018).

Alkali Aktivatörler

Geopolimer üretiminde hammaddeden sonra en önemli malzeme aktivatörlerdir. Aktivatörler alüminosilikat esaslı hammadde kaynağını tepkimeye sokarak geopolimerizasyona yardımcı olmaktadır.

Geleneksel Portland çimentosunun üretiminden kaynaklı havaya yıllık 13,5 milyar ton CO₂ salınmaktadır. Çimento üretiminden kaynaklı salınan CO₂ gazları atmosfere salınan CO₂ gazlarının %5'ini oluşturmaktadır ve bu da oldukça sorun teşkil etmektedir. Ve bu Portland çimentosunun üretiminde fazlasıyla büyük ısılara ihtiyaç vardır. Fakat geopolimer çimentolar alkali aktivatörler aracılığıyla oluşturulduğundan dolayı düşük miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyduklarından dolayı hem enerji bakımından hemde atmosfere salınan CO₂ bakımından sorunun çözümünde oldukça büyük rol oynamaktadır ve bu sorun büyük oranda azalmıştır (Diaz *et al.* 2010)

Alkali aktive edilen uçucu küllü (F sınıfı) geopolimerlerin mikro yapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ca(OH)₂, NaOH, KOH, NaOH + Na₂CO₃ ve Na₂SiO₃ (cam suyu) gibi alkali aktivatörler kullanılmıştır. Alkali aktivasyon yönteminde başlıca parametrelerin, aktivatör yoğunluğu ve özelliği, aktive edilen uçucu külün ise ince olmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu külden üretilen geopolimerlerin (<43 µm) basınç dayanımlarının genel olarak yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Sodyum silikat kullanılanlarda en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanımının, Si/Al oranına önemli derecede bağlı olduğunu dile getirmişlerdir (Komljenovic *et al.* 2010).

Fernandez and Palomo (2005) çalışmalarında, Na₂SiO₃ ve NaOH alkali aktivatörlerini kullanarak bir günlük kürden sonra 90 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir.

Anuar *et al.* (2011) çalışmalarında Na₂SiO₃ ve NaOH (8M ve 14M) farklı oranlarda karıştırarak alkali aktivatör olarak kullanmışlardır. 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç mukavemetleri laboratuvar ortamında tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlar doğrultusunda 14 M NaOH ile üretilen numunelerin basınç mukavemetlerin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Bakharev *et al.* (2000) yaptıkları çalışmalarında sadece alkali aktive edilen cürufu bağlayıcı olarak kullanmışlar ve betondaki katkıların tesirlerini araştırmışlardır. İki bileşenli NaOH + Na₂CO₃ ve sıvı sodyum silikası aktivatör olarak kullanmışlardır. Aktivatör olarak sıvı sodyum silikatlı karışımlarda betonun mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Alçının, rötre azaltıcı katkı ve hava sürükleyici katkının basınç dayanımında olumsuz bir etkisinin olmadığını, işlenebilirliği iyileştirdiğini, rötreyi azalttığını ifade etmişlerdir.

KOH ve NaOH alkali aktivatörleri, yalnız başlarına veya Na_2SiO_3 ile beraber karıştırılarak geopolimer betonların üretiminde kullanılmaktadır. Yalnızca NaOH'ın kullanıldığı ve bilhassa düşük konsantrasyonlarda bir nebze daha düşük dayanımlı geopolimer ile neticelenir (Görhan and Kürklü 2014). Karışımlarda Na_2SiO_3 kullanılması dayanımın önemli ölçüde artmasını sağlar (Phoo-ngernkham *et al.* 2014). Esasında kullanılan alüminosilikat hammaddesinin basınç dayanımı üzerinde etkisi vardır (Dimas *et al.* 2009).

Palomo *et al.* (1999) yaptıkları çalışmalarında karışım dizaynlarında çözünebilen silis bulunduğunda alkali aktivatörlerin hızlı bir şekilde etki göstererek polimerizasyon tepkimelerinde büyük bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Criado *et al.* (2005) ise sodyum silikat kullanılmasının polimerizasyon sürecini takiben, yüksek basınç dayanımına sahip ve daha yüksek silis bulunduran reaksiyon ürünlerinin oluştuğunu saptamışlardır.

Geopolimerizasyon tepkimelerinde sıkça kullanılan alkali aktivatörler KOH veya NaOH, K_2SiO_3 veya Na_2SiO_3 ile karıştırılmasından elde edilir (Palomo *et al.* 1999; Davidovits 1999; Xu and Van Deventer 2000; Swanepoel and Strydom 2002). Yalnızca tek aktivatörün kullanılmış olduğu çalışmalarda vardır (Palomo *et al.* 1999; Teixeira-Pinto *et al.* 2002; Hardjito 2005).

Bondar *et al.* (2011) yaptıkları çalışmalarında ham madde olarak doğal puzolanları, alkali aktivatör olarak ise Na_2SiO_3 ve KOH'ı kullanmışlardır. Aynı zamanda geopolimer çimentonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için mineral katkı kullanmışlardır. Üretilen numunelerin basınç dayanımlarına ve SEM cihazıyla mikroyapı özelliklerine bakılmıştır. Sonuçta mineral katkısız olanlarda jel boşluklarının azaldığı ve mineral katkılı olanlarda ise 44 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Geopolimerlerde Optimum Karışım

Mermerdaş *et al.* (2020) uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçlarda çeşitli NaOH molariteleri, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları ve bağlayıcı miktarlarının, basınç dayanımı ve büzülme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, NaOH molaritesi ve bağlayıcı miktarı (dozaj) parametreleri kullanılarak toplam 27 farklı karışım hazırlanmıştır. NaOH molariteleri 6 M, 8 M ve 10 M, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranları 0,5, 1,5 ve 2,5 olarak belirlenmiş ve bağlayıcı miktarları 600, 700 ve 800 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Bu karışımlara 60°C'de bir gün boyunca sıcaklık kürü uygulanmıştır ve daha sonrasında uygulanacak testlere kadar oda sıcaklığında kür işlemine devam edilmiştir. Molaritenin artması, hamur ve harçların basınç dayanımını iyileştirmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, daha düşük mukavemet değerleriyle sonuçlanmıştır. Daha yüksek bağlayıcı miktarlarına ve NaOH

molaritelerine sahip geopolimer harçlar, daha düşük kuruma büzülme gerilmeleri gösterirken, otojen büzülme artışına neden olmuştur. NaOH molaritesi, bağlayıcı miktarı ve Na₂SiO₃/NaOH oranı parametreleri için optimum değerler sırasıyla 9,892 M, 600 kg ve 0,5 olarak belirlenmiştir.

Balun (2019) alkalilerle aktive edilmiş Bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcılar üzerine çalışma yapmış ve üretmiş olduğu numunelerin mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Alkali aktivatör olarak Na₂SiO₃, KOH ve Na₂SiO₃/KOH karışımını 1,2,3 oranında, alkali çözelti/bağlayıcı oranlarını 0,47, 0,50, 0,53 olarak, dozaj miktarlarını ise 350, 450, 550 ve 650 kg/m³ olmak üzere 4 farklı bağlayıcı dozajı kullanmıştır. Değişken parametreler ve karışım oranları belirlendikten sonra ise 6 farklı kür sıcaklığı, 4 farklı etüv süresi ve 3 farklı bekleme süresi uygulanmıştır. Sonuçta dozaj miktarı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarında artış olduğu tespit edilmiştir.

Geopolimerlerde Kür

Geopolimerlerde, sıcaklık arttıkça alkali aktivasyon tepkimeleri hızlanmaktadır. Bundan dolayı kür sıcaklığı geopolimer tepkimelerde önem arz etmektedir.

Uygun ham maddelerin aktive edilmesiyle üretilen geopolimer betonların geleneksel Portland çimentosuyla üretilen betonlara göre kıyaslandığında eşit veya yüksek basınç dayanımlarına ulaşabilmesi için sıcaklık kürünün uygulanması gerektiği farklı çalışmalarda belirtilmiştir (Ryu *et al.* 2013; He *et al.* 2013; Islam *et al.* 2014). Alüminosilikat esaslı ham maddelerin çözünmelerinin hızlanması ve sonrasında polikondenzasyon işlemlerine katılabilmesi için ısı kürü gereklidir. Geopolimerizasyon sürecinde sıcaklık kürünün belli bir sınırı aşmasından sonra geopolimerizasyon süreci engellenebilir ve bu işlem aynı zamanda geopolimer ürünlerin mekanik özelliklerine de olumsuz etkiler oluşturur (Nazari *et al.* 2011; Ahmari and Zhang 2012; Ken *et al.* 2015). Chindaprasirt *et al.* (2007) ürettikleri geopolimer harç numunelerine yüksek sıcaklıklarda 3 günden fazla uygulanan kür işleminin numunelerde basınç dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir ve bunun nedenini ise nem kayıplarından ötürü mikroyapının zayıflaması ve gözenekliliğin artması olarak ifade etmişlerdir. Cho *et al.* (2017) yüksek sıcaklıklarda uzun zamanlı kür işlemlerinin aşırı büzülmeye ve dehidrasyona neden olduğunu ve bu sebepten dolayı jel yapısında bozulmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Kirschner and Harmuth (2004) çalışmalarında, metakaolin esaslı geopolimer üretmişlerdir ve ürettikleri numunelere farklı kür sıcaklıkları uygulamışlardır. Ortam koşullarındaki sıcaklık kürünün üretilen malzemenin sertleşmesini geciktirdiğini ve bundan ötürü uygun olmadığını, 75 °C'lik sıcaklık küründe ise yeterli dayanım sonuçları elde edildiğini, bu sıcaklığın üzerindeki kür koşullarında basınç dayanımlarının düştüğünü belirtmişlerdir. Ca

oranı yüksek hammadde ile üretilen geopolimer genel olarak düşük sıcaklıklarda aktive edilebilirken, Ca oranı düşük olanlar daha yüksek sıcaklıklarda aktive edilebilmektedir.

Geopolimer ürünlere yapılan kür işlemleri geopolimerlerin priz alması ve plastikliklerinin azalması sırasında gerçekleştirilen nem, sıcaklık benzeri etkileri kapsar. Bu değişkenlerin geopolimer malzemeler üzerinde etkilerinin oldukça fazla olduğu bilinmektedir (Alonso and Palomo 2001; Duxson *et al.* 2007a; Montes and Allouche 2012). Kür sıcaklığının artmasıyla basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiş, fakat kürlerde yüksek sıcaklıklara çıktığında ise dayanıma etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Metakaolin esaslı ham maddenin aktive edilmesiyle üretilen geopolimerlere birçok farklı sıcaklıkla kür işlemleri uygulanmıştır ve bu kür işlemlerinde 60-70°C üzerindeki sıcaklıkların fazla süre uygulanmasının dayanıma olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan kür işleminin hızlı prize yol açtığı saptanmıştır (Rovnanik 2010; Bing-hui *et al.* 2014; Gasparini *et al.* 2015; Aredes *et al.* 2015). Kür sıcaklığı bazı volkanik kül ve uçucu kül esaslı üretilen geopolimerlerin kür işlemlerinde daha yüksektir, fakat genel olarak 100°C'yi geçmemektedir (Suksiripattanapong *et al.* 2015; Okoye *et al.* 2015; Lemougna *et al.* 2016).

Yapılan çalışmada metakaolinin NaOH ile aktive edilmesi yöntemi ile birlikte standart kum ve öğütülmüş halde bulunan yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimer harç yapılmıştır. Üretilen numunelere farklı sıcaklık ve farklı sürelerde poşetli ve poşetsiz kür yapılmıştır. Sonuçta yapılan kür işlemlerinden poşetli kürün daha iyi olduğu elde edilmiştir (Aygörmez 2018).

Heah *et al.* (2011) çalışmalarında kaolin esaslı geopolimer üretmişlerdir ve bu numuneler üzerinde kür koşullarının etkilerini gözlemlemişlerdir. Üretilen numunelere 1-3 gün arasında etüvde 40-60-80 ve 100 °C'de sıcaklık kürü uygulamışlardır. Optimum kür koşullarının 60 °C ve 3 gün olduğunu belirlemişlerdir. Optimum kür şartlarında üretilen numunelerin daha yoğun bir yapıda ve geopolimerizasyon tepkimelerinde daha fazla jel oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Noushini and Castel (2016) geopolimer beton üretiminde uçucu kül kullanılmışlardır. Üretilen numunelere farklı kür aşamaları denenmiştir. Bunlar 4 farklı süre (24, 18, 12, 8 saat) ve 3 farklı sıcaklık (90, 75 ve 60°C) olarak uygulanmıştır. Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Uygulanan kür işlemleriyle bağlantılı olarak farklı sonuçlar bulunmuştur. Kür süresinin 24 saate kadar ve kür sıcaklığının da 75°C'ye kadar artırılmasıyla birlikte basınç dayanımında önemli bir artışın görüldüğü belirtilmiştir. Aynı zamanda, F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer betonlara ortam kürü uygulanmış ve artışların oldukça düşük olduğu gözlemlenmiş ve bu kür yönteminin uygun olmadığını ifade etmişlerdir.

Geopolimerlerin Durabilite Özellikleri

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilmelerine dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite adı verilir (Baradan vd 2010).

Hardjito and Rangan (2005) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül içerikli geopolimer betonların dizaynlarında alkalilerin etkisi, kür koşulları ve su miktarı incelenmiştir ve betonun fiziksel özelliklerine de bakılmıştır. Sonuçta yüksek basınç dayanımı, NaOH çözeltisinin molaritesinin artmasıyla basınç dayanımlarında artış elde edildiğini, kütlece $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı arttıkça basınç dayanımlarının yükseldiğini, 30-90 °C aralığında kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımlarında artış olduğunu, H_2O ve Na_2O molaritesi arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar olduğunu tespit etmiştir. Wallah and Rangan (2006) tarafından yapılan çalışmada ise rötre, sünme, asit ve sülfat dayanıklılıkları ölçülmüştür ve sonuçta iyi bir basınç dayanımı, çok az büzülme, düşük sünme ve iyi derecede sülfat ve asit direnci olduğu belirtilmiştir.

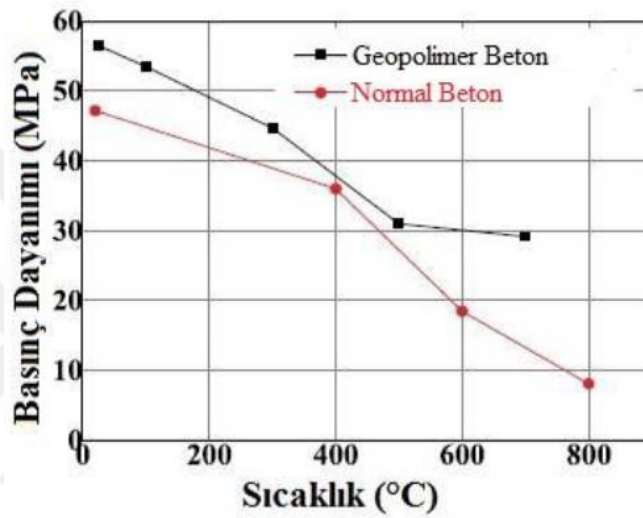
Bernal *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada lifli geopolimerin durabilite özellikleri; rötre, yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Çalışmada yangına dayanıklı olan alüminosilikat parçalarından yararlanılmıştır. Çalışma sonunda bulunan değerlere göre lifsiz ve yangına dayanıklı geopolimerlerin her ikisinde de daha yüksek eğilme ve basınç dayanımları görüldüğü ifade edilmiştir. 600-1000°C gibi yüksek sıcaklıklarla karşılaşan geopolimerler yüksek dayanıklılık göstermişlerdir. Bu elde edilen sonuçlara göre dizaynı iyi yapılmış geopolimerlerden yangına dayanıklı ve ucuz malzeme elde edilebilmektedir.

Geopolimer malzemelerin güçlü mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanında çok iyi kimyasal dayanıklılıkları vardır. Geopolimer harç ve hamurların sülfat ve asidik ortamlar, deniz suyu ve alkali silika reaksiyonlarına karşı yeterli dayanıklılıkları vardır (Comrie and Davidovits 1988; Fernandez-Jimenez *et al.* 2007). Geopolimer bağlayıcı hidratasyonunda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A gibi ürünler meydana gelmediğinden, geopolimer bağlayıcı ile üretilen betonların geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre durabilite özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür (Haddad and Alsbuol 2016).

Robayo-Salazar *et al.* (2016) volkanik esaslı puzolanlardan ürettikleri geopolimerde basınç dayanımları ve mikro yapılarına metakaolin etkisini araştırmışlardır. Geopolimer beton karışımlarında aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH ile birlikte bağlayıcı ağırlığının %0 ile %30'u aralığında metakaolin kullanılmıştır. Sonuç olarak, geopolimer bağlayıcı olarak uygulanan puzolan ile metakaolinin belli oranlarda yer değiştirmesi sonucu en iyi oranın %20 değişim ile olduğu ve maksimum basınç dayanımına bu orandaki değişimle ulaşıldığı tespit edilmiştir.

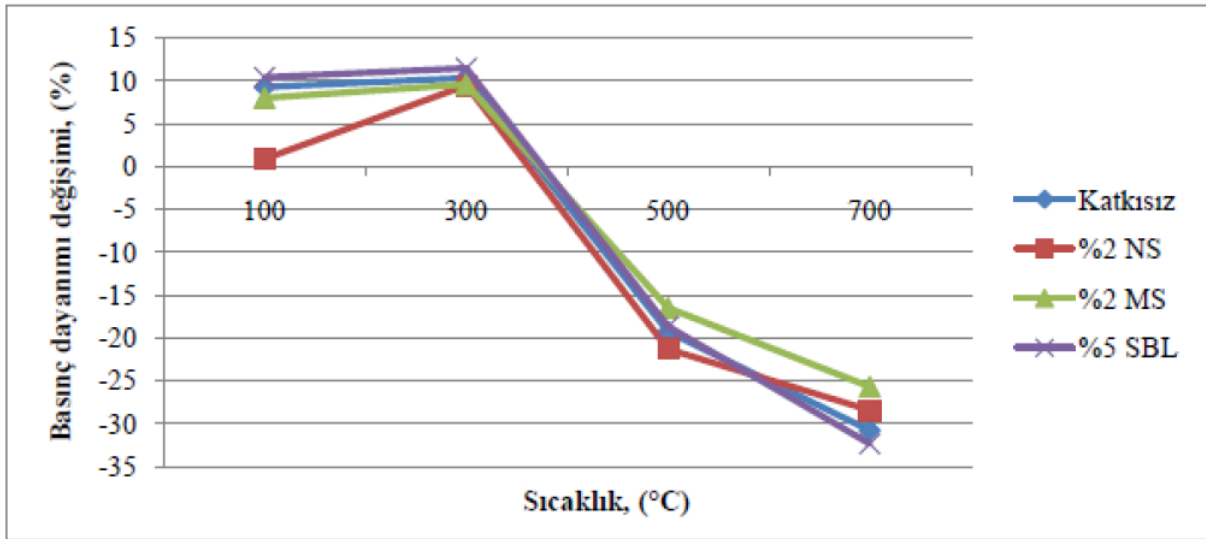
Bulunan sonuçların oda sıcaklığında yapılan kür ile elde edildiğini ve 68 MPa'a kadar varan sonuçlar bulunduğunu belirtmişlerdir.

Geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki basınç dayanım değişimleri normal betona göre farklılık göstermektedir. Şekil 9'da normal beton ile geopolimer betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki basınç dayanım değişikliği verilmiştir. Şekil 9'dan da görüleceği üzere 500 °C'ye kadar geopolimer betonun basınç dayanımında hızla azalma olduğu ancak 500-700 °C arasında bu azalmanın oldukça düşük hızda olduğu anlaşılmaktadır. 700 °C'deki basınç dayanımları kıyaslandığında, geopolimer betonun basınç dayanımının normal betona göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu görülmektedir (Zhang *et al.* 2020).



Şekil 9. Yüksek sıcaklık etkisi altında geopolimer betonun basınç dayanımı (Zhang *et al.* 2020).

Geopolimer üretiminde nano malzeme katılarak geopolimer betonun durabilite özelliklerini iyileştirmek amaçlanmıştır. Kantarcı (2018) çalışmasında, ürettiği geopolimer betonlara %2 mikro silika, %2 nano silis ve %5 lateks katmıştır ve ürettiği numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarını belirlemek için 100-300-500-700 °C de test etmiştir. Elde etmiş olduğu basınç dayanımlarının değişimini gösteren grafik Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere 300 °C'ye kadar numunelerin basınç dayanımlarında artış, 300 °C'den sonra basınç dayanımlarında düşüş görülmektedir.



Şekil 10. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası geopolimer betonların basınç dayanımı değişimleri (Kantarcı 2018).

Pilehvar *et al.* (2019) çalışmalarında, donma-çözülme etkisini araştırmışlardır. Sonuçta donma-çözülme etkisi sonrasında numune ağırlıklarında artış tespit etmişlerdir. Bunun nedenini ise, donma-çözülme etkisi sonrasında numunelerde oluşan mikro boşluk ve çatlakların içerisindeki suyun emilmesi olarak ifade etmişlerdir.

Bucher *et al.* (2011) çalışmalarında, metakaolin esaslı geopolimer üretmişlerdir ve alkali aktivatör olarak ise Na_2SiO_3 ve NaOH 'ı birlikte kullanmışlardır. Üretmiş oldukları numunelere Fransız standardı NF P18-424'e göre 40 donma-çözülme çevrimi uygulamışlardır. Sonuçta donma-çözülme etkisi sonrasında numunelerde ağırlık kaybı olduğunu tespit etmişlerdir.

Aygörmez *et al.* (2020) çalışmalarında, üretmiş oldukları numunelerin 56 donma-çözülme çevrimi uygulamışlardır. Donma-çözülme etkisi sonrası numunelerin ağırlıklarında artış tespit etmişlerdir ve bu ağırlık artışının nedenini ise donma-çözülme deneyi ortamının nemli olmasına ve bu nemin numunelerdeki boşlukları doldurmasına bağlamışlardır.

Nguyen and Skvara (2016) çalışmalarında, uçucu kül esaslı geopolimer üretmişlerdir. Üretmiş oldukları numuneleri farklı pH değerindeki NaOH ve HCl çözeltilerine bırakmışlardır. Sonuçta mekanik özelliklerinin çok değişmediği fakat zamanla geopolimerlerin kimyasal yapısının değiştiğini belirtmişlerdir.

Kwasny *et al.* (2018) çalışmalarında, üretmiş oldukları geopolimer numuneleri asit çözeltilerine maruz bırakmışlardır. Asit etkisine maruz kalan numunelerin ağırlıklarında, az artış tespit etmişlerdir fakat daha sonra yavaş yavaş azalmalar gözlemleyerek sonunda minimum ölçümler elde etmişlerdir.

Nuaklong *et al.* (2018) çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer betonlar üretmişlerdir. Üretmiş oldukları geopolimer betonlara, ağırlıkça uçucu külün yerine %10, %20

ve %30 oranında metakaolin eklemiştir. Ürettikleri numuneleri 120 gün boyunca %3 sülfirik asit çözeltisinde bekletmişlerdir. Sonuçta numuneler arasında en fazla ağırlık kaybı metakaolin kullanılmayan numunede elde edilmiştir.

Aygörmez (2018) çalışmasında üretmiş olduğu numuneleri 1 yıl boyunca magnezyum sülfat çözeltisi etkisine bırakmıştır. Üretilen numuneler 3 ay, 6 ay ve 12 ay magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş ve sonrasında basınç dayanımlarına bakılmıştır. Elde edilen basınç dayanımlarına göre 3 ay bekletilenlerde %2-7 arasında artış gözlenirken, 6 ay bekletilenlerde %6-12 arasında düşüş, 12 ay bekletilenlerde ise %15-21 arasında düşüş gözlenmiştir. Bu veriler normal betonda elde edilen verilere göre kıyaslandığında, geopolimer betonların normal betonlara göre sülfat etkisi karşısında daha iyi direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

Geopolimer betonlarda alüminosilikat kaynaklı hammaddeler kullanılmasından dolayı kimyasal tepkimeler sonucu alçı ve etrenjit gibi ürünler meydana gelmez. Bu durum geopolimer bağlayıcılı betonların çimento esaslı betonlara göre sülfat etkisinde daha iyi dirençler gösterdiği anlamına gelir (Chindaprasirt *et al.* 2014; Gu *et al.* 2019).

Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimerlerin kullanım alanları oldukça fazladır. Harç, hazır beton, normal beton, beton borular, hafif borular, betonarme gibi kullanım alanları bulunan geopolimer bağlayıcıların uygulama alanları gitgide artmaktadır (Provis 2017). Hindistan, Avustralya, Amerika ve Avrupa’da geopolimer betonlar ticari açıdan kullanılmaktadır (Rafeet *et al.* 2017).

Geopolimerler gösterdikleri özelliklerden dolayı; süsleme sanatı, heykeltçilik, prekast yapı, yapı malzemeleri, zemin iyileştirme, beton yol kaplamaları, uçak endüstrisi, güçlendirme, nükleer atıkların stoklanması, nükleer santrallerde ve tarihi yapıların restorasyon işlerinde kullanılabilmektedir (Davidovits 2008).

Geopolimerler hızlı katılaşma, yüksek dayanım ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık özellikleri nedeniyle yangın dayanıklılığında, yapı mühendisliğinde, atık arıtmada ve biyomalzemelerde kullanılmaktadır (Yaoa *et al.* 2009).

Ağır metallerin hapsedilmesi bakımından geopolimerizasyon gelecekte önem kazanacaktır (Khale and Chaudhary 2007). Yapılarındaki zeolite benzer özelliklerden dolayı geopolimerler radyoaktif atıklarında hapsedilmesi niyetiyle kullanılabılırler (Duxson *et al.* 2007b).

Geopolimer bağlayıcılar kimyasal tepkimeler sırasında kurşun, civa ve arsenik gibi zehirli atıkları bünyelerine emebilirler ve bu özellikleri nedeniyle zeolitler ile

karşılaştırılabilirler. Bu olumlu özellikler geopolimerlerin düşük geçirgenliklerinden ve asitlere karşı dirençlerinden kaynaklanmaktadır (Davidovits 1994b). Aşağıda Tablo 1’de farklı malzemelere ait geçirgenlik değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Farklı Malzemelere Ait Geçirgenlik Değerleri (cm/s)

Tip	Geçirgenlik değerleri (cm/s)
Kum	$10^{-1} - 10^{-3}$
Uçucu kül	10^{-6}
Kil	10^{-7}
Geopolimer çimento	10^{-7}
Portland çimento	10^{-7}
Granit	10^{-10}

Tablo 1’de görüldüğü üzere, geopolimerlerin bu olumlu özellikleri nedeniyle birçok alanda kullanılması düşünülmektedir. Örneğin;

- Harçlar, lifli levhalar ve beton paneller,
- Seramikler ve tuğlalar,
- Uçak pistleri ve yapıların üst yüzeylerinde.

Provis and Bernal (2014), uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin Avustralya’da E-Crete ismiyle patentlenerek pazarlandığını, yerel projelerde ve altyapı işlerinde kullanıldığını ifade etmişlerdir. Uygulama örnekleri Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. E-Crete kullanılarak tamamlanan projeler (Provis and Bernal 2014).

Geopolimer betonlarla yapılmış en büyük projelerden biri Ukrayna’da bulunan konutlardır (Şekil 12). Bu konutlarda demir-çelik atığından elde edilen malzemelerin alkali aktive edilmesi sonucu üretilen geopolimer beton kullanılmıştır. 1960 yılında inşa edilen bu konutlarda beton dayanımı olarak 7,5 MPa basınç dayanımı tasarlanmıştır. 2012 yılında bu konutlardan alınan numunelerde 14 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Hlavacek 2014).



Şekil 12. Ukrayna’da geopolimer beton ile üretilen konutlar (Hlavacek 2014).

Donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılıklarıyla nedeniyle geopolimerler ilgi görmektedirler. Tekrarlayan donma-çözülme çevrimleri sonucunda yapılarında az bozulmalar

oluşmaktadır. Ayrıca klor direnci de oldukça iyidir. Bu özelliklerinden dolayı soğuk bölgelerde yol yapımlarında geopolimerler kullanılabilirler. Çünkü Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre donma-çözülme çevrimlerinde ve tuza karşı dirençte geopolimer betonlar daha iyi performans göstermektedirler (Duxson *et al.* 2007b).

Ham Maddenin Geopolimerlere Etkisi

Ham maddenin öğütülerek tane çapının azaltılması işlemi, kimyasal yapıyı bozmadan ham maddenin reaktivitesini yükseltmek için iyi bir ekonomik yöntemdir (Paya *et al.* 1995; Kumar and Kumar 2010).

Geopolimer içerisindeki ham maddenin tane çapının, üretilen geopolimer hamurun mikro yapısı, fiziksel özellikleri ve basınç mukavemeti üzerinde etkisi oldukça fazladır (Sata *et al.* 2012; He *et al.* 2013). Genel olarak, ham maddenin daha küçük çaplarda kullanılması reaktiviteyi yükseltir ve daha sonra üstün fiziksel özellikli, yüksek basınç mukavemetli ve yoğun mikro yapıli geopolimer hamur üretimine yardımcı olur (Detphan and Chindaprasirt 2009; Nazari *et al.* 2011).

Filler malzeme gibi davranan, reaksiyona girmemiş ve aktif olmayan malzemelerin miktarı ve özellikleri (örneğin şekilleri, boyutları) geopolimer ürünlerini etkilemektedir. Reaktif fazda bazı durumlarda tepkimeye katılmayabilir ve tamamen dolgu malzemesi olarak kalabilirler. Dolgu malzemeleri ve agregalar geopolimerizasyon sürecinde olumlu etki yaparak dayanımı artırabilirler (He *et al.* 2012).

Ham maddenin daha küçük çaplarda kullanılması gözenekleri daha iyi ve fazla doldurur sonuçta daha kompakt yapıda geopolimer hamur elde edilir (Nazari *et al.* 2011; Ken *et al.* 2015).

Yüksek basınç dayanımları elde edebilmek için reaktivitesi yüksek hammaddeler kullanılmalıdır (Khale and Chaudhary 2007). Reaktivitesi yüksek hammaddeler, geopolimerizasyonda daha az tepkime süresi ve hızlı çözünme sağlamaktadırlar (He *et al.* 2012). Geopolimerizasyonda kullanılan hammaddeler, nihai ürünlerde ve mikroyapılarında oldukça önemlidir. Geopolimer tepkimelerde amorf ve reaktif olmayan kristal fazlar, Si/Al oranları farklılıklar göstermektedirler. Bu özellikler uygulamada önem teşkil eden mekanik özelliklerde ve kür işlemlerinde farklılıklar oluşturmaktadır (He *et al.* 2012).

Ahlat Taşı (İgnimbirit) ve Özellikleri

Volkanik kökenli kayaç türü olan Ahlat Taşı, Nemrut volkanının ürünü olan ignimbirit bir malzemedir. Koyu kahverengi, kül rengi ve açık kahverengi tonlarında Ahlat Taşı renkleri vardır (Şimşek ve Erdal 2004; Bakış 2016).

Ahlat Taşının en belirgin fiziksel özelliği ocaklardan çıkarıldığında kolay bir şekilde işlenebilmesidir ve bunun nedeni ise gözenekli bir yapıda olması ve bu gözeneklerin su ve/veya rutubet dolu olması olarak ifade edilmiştir (Kazancı ve Gürbüz 2014). Ahlat Taşının içerisinde bol miktarda oksijen ve mineral suların bulunduğunu, taşın hava ile temasından sonra oksijenin ve mineral suların zamanla taştan ayrıldığını belirtmişlerdir (Bakış vd 2014).

Topraktan çıkarıldıklarında lokal şekilde yumuşak yerleri bulunan Ahlat Taşları hava ile temas edince sertleşmektedirler. Toprak altından çıkarıldıktan sonra kolayca işlenebilmesi Ahlat Taşının önemli bir fiziksel özelliğidir. Ahlat Taşının kolay işlenebilmesinin nedeni bünyesindeki gözeneklerde mineral suların ve oksijenin bulunmasıdır (Bakış vd 2014, Kazancı ve Gürbüz 2014). İlk çıkarıldığında yumuşak durumda olmasından dolayı makineler ve el ile Ahlat Taşına şekiller verilebilmektedir. Bunun nedeni ise Ahlat Taşının gözenekli yapıya sahip olmasıdır. İçerisinde küçük kılcal boşlukları vardır. Bundan ötürü su emme potansiyeli fazladır ve bu durum yağışlı ve ıslak ortamlarda dayanımın düşmesine yol açmaktadır (Şimşek ve Erdal 2004; Bakış 2016).

Ahlat Taşı jeolojik olarak piroklastik kayaçlar kategorisi içerisinde yer alan ignimbirit bir malzemedir. Volkanik patlama sırasında birikmiş olan gazın dışarı atılması esnasında püsküren lav kütlelerine piroklastik kayaçlar denir. Bu püskürtmeler sırasında piroklastik kayaçlar çok uzak mesafelere erişebilir ve etrafa zarar verebilirler. Piroklastik kayaçlar kategorisinde en sık görülen tür ignimbiritlerdir. İgnimbiritlerin bünyesinde bolca pomza ve volkanik cam bulunurken az oranda da litik parçaları bulunur. Bünyelerinde bulundurdıkları pomza gözenekli yapıdadır. Gözeneklerin oluşma sebebi ise sıcak akıntı esnasında gazların dışarı çıkmasıdır. İşte bu gözenekli yapıdan dolayı ignimbiritler diğer kayaçlara göre ağırlıkça hafif malzemelerdir (Watt 2008; Lutgens and Tarbuck 2012; Bakış vd 2014).

Bakış vd (2014) çalışmalarında Ahlat Taşının doğal bir malzeme olduğunu ve bünyesinde mikro ve makro boyutlarda gözenekler bulunduğunu bu gözeneklerden dolayı binalarda taşıyıcı olmayan bölümlerde yalıtım amacı doğrultusunda taş duvar şeklinde veya hafif beton şeklinde kullanılabildiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada Ahlat Taşının kütleli olarak ağırlığının az olduğu belirtmiştir. Bu hafiflikten ve içerisinde bulundurduğu bağımsız boşluklardan dolayı Ahlat Taşı yapıları depreme karşı dayanıklılık göstermektedir. Ahlat Taşının kullanıldığı binaların ölü yükleri azaldığından ötürü binaya etki edecek deprem

kuvvetleri de azalmaktadır ve bu da binaların taşıyıcı sistemlerine olumlu bir etki oluşturmaktadır. Aynı zamanda, ısı dayanımının yüksek olmasından dolayı Ahlat Taşı yangına dayanıklıdır.

Piroklastik kayaç kategorisinde yer alan ignimbiritler, kolay işlenebilmesi ve hafif olma özelliğinden dolayı oldukça tercih edilmektedir. Eski zamanlardan bu yana Ahlat civarında Selçuklu mimarisinde çokça kullanılan ignimbiritler (Ahlat Taşı), bölgedeki insanlar tarafından halen kullanımı sürdürülmektedir (Antep 2018).

Ahlat Taşına yaptırılan analiz sonuçları Tablo 2’de verilmiştir (Erdal ve Şimşek 2011).

Tablo 2. Ahlat Taşının (İgnimbiritinin) Kimyasal Analizi

Kimyasal Bileşim	Açık Kahverengi Ahlat Taşı	Koyu Kahverengi Ahlat Taşı
Na ₂ O	5,51	5,46
MgO	0,24	0,53
Al ₂ O ₃	16,01	15,33
SiO ₂	61,11	64,05
K ₂ O	4,78	4,81
CaO	1,64	2,00
TiO ₂	0,44	0,42
Fe ₂ O ₃	4,91	4,90
Toplam	97,64	97,50

Ahlat Taşı Rezerv Potansiyeli

Van Gölü etrafından başlayarak Ahlat ilçesi etrafında bir hayli geniş alanda Ahlat Taşı işletmeleri bulunan Ahlat Taşı ismiyle bilinen ignimbiritler, o bölgede bulunan Nemrut yanardağının patlayarak püskürmesi sonucu lavlarının bölgeye sıçraması ve sonrasında soğuyarak oluşan proklastik kayaç malzemelerdir ve rezerv olarak önemli miktarlarda bulunmaktadır (Bakış vd 2014; Aslan 2018; Antep 2018).

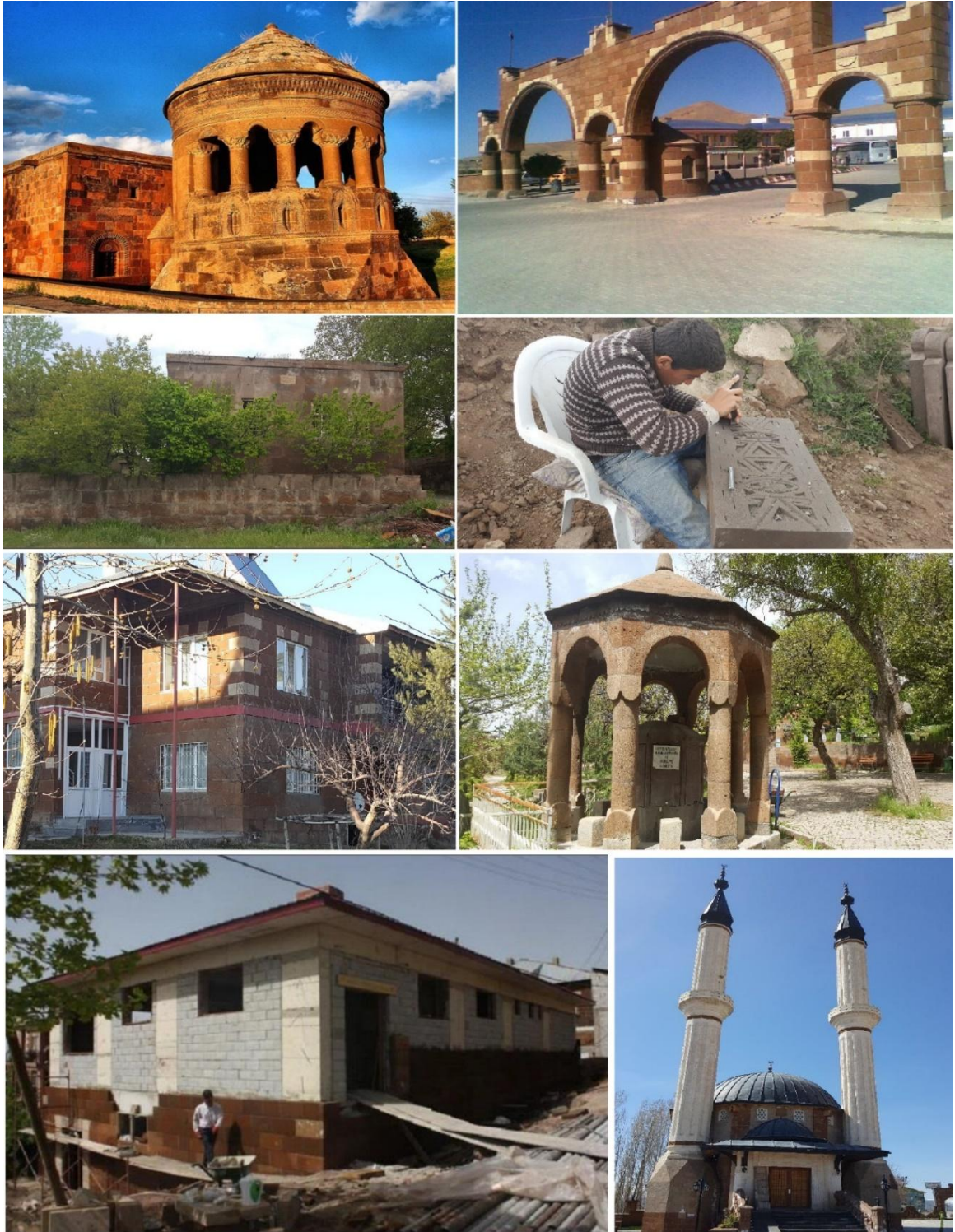
Van gölü havzasında doğal kaynak potansiyeli olarak Ahlat Taşında büyük rezervler olduğunu fakat yeterli araştırmaların bulunmadığını ifade etmişlerdir (Çiftçi vd 2008).

Ahlat Taşının Diğer Alanlardaki Uygulamaları

Ahlat Taşı birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Cami minaresi, konut yapımı, duvar malzemesi, kaplama malzemesi, mezar taşı kullanımı, kümbet yapımı gibi birçok alanda

kullanılmaktadır ve Selçuklular zamanında yapılan yapılar hala ayaktadır (Aydar *et al.* 2003; Şimşek and Erdal 2010; Bakış vd 2014).

Ahlat Taşı, bahçe duvarları, yığma yapılar, cephe kaplamaları, camii yapımları, dekoratif taş süslemeleri, mezar taşları, şadırvan yapımı vb. gibi çeşitli yapılarda kullanılmıştır (Bakış vd 2014; Sedef 2017). Ahlat Taşının kullanıldığı farklı alanlara ait görüntüler Şekil 13'te verilmiştir (Bakış vd 2014; Sedef 2017).



Şekil 13. Ahlat Taşının kullanıldığı çeşitli yapılar (Bakış vd 2014; Sedef 2017).

Puzolanik Aktivite

Puzolan, tek başına kullanımlarında bağlayıcı özelliği olmayan veya çok az olan, ancak çok ince bir şekilde öğütülerek bir bağlayıcı ve su ile karıştırıldıklarında tepkime sonrasında bağlayıcı madde özelliği kazanan silisli veya silis-alüminli malzemelerdir. Doğal ve yapay olarak bulunmakta olup, endüstriyel yan ürünlerden elde edilenlerin dışındakiler doğal puzolanlardır. Doğal puzolanlar çoğunlukla volkanik kökenli olup Ahlat Taşı, volkanik kül ve volkanik tüfler birer örnektir.

Puzolanik aktivite, su ve kirecin puzolanik malzemeler ile hangi oranda tepkimeye girebileceği, hangi oranda bağlayıcılık gösterebileceği “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemeler ile ilgili olarak TSE EN 450-1 (2013) standartlarında verilen aktivite indeksi deneyine göre uygun yöntemle deney yapılır. Aktivite indeksi, aynı yaştaki numuneler üzerinde uygulanan deney doğrultusunda, kütlece %25 puzolanik malzeme ve %75 referans çimentosu ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımlarının, %100 referans çimentosu ile üretilen harç numunelerin basınç dayanımlarına oranına denir (Erdoğan 2003).

Puzolanik aktivite deneyi ASTM C311/C311M-18 standartlarına göre yapılmıştır.

Radyasyon Soğurma

Monokromatik paralel bir X-ışını demeti bir maddeden geçirildiğinde çıkan demetin şiddetinde bir azalma olur. I_0 şiddetinde bir X-ışını demeti, x kalınlığındaki bir maddeyi geçtikten sonra şiddetindeki azalma, $I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)t}$ olarak ifade edilir. Bu Lambert kanunu olarak bilinir. Burada μ lineer soğurma katsayısıdır. Lineer soğurma katsayısı birim kalınlık başına düşen soğurulma olarak tanımlanır. μ/ρ kütle soğurma katsayısı olup, birim alanda birim kütle başına düşen azaltmayı ifade eder ve birimi cm^2/g 'dır. t birim alan başına kütleyi ifade eder. Madde içine giren elektromanyetik radyasyon, madde atomuna bağlı elektronlar, serbest elektronlar ve çekirdeklerle etkileşir. Bu etkileşimler sırasında Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşum gibi olaylar farklı enerji aralıklarında baskın olmak kaydıyla gerçekleşir. Radyasyonun azalması (veya soğurulması), gelen fotonun enerjisine ve soğurucu ortamın atom numarasına (Z) bağlı olarak değişir (Levet and Özdemir 2017).

Etkin atom numarası (Z_{eff}).

Kimyasal bileşiklerin veya karışımların atom numaralarını, elementlerde olduğu gibi tek bir sayı ile ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle, farklı elementlerin bir araya gelmesiyle oluşan kompozit malzemeler için etkin atom numarası (Z_{eff}) terimi kullanılır.

Malzemelerin etkin atom numarası bileşiği oluşturan elementlerin atom numarasına ve üzerine düşen fotonun enerjisine bağlı olarak değişmektedir.

Numunelerin etkili atom numarası (Z_{eff}), atomik tesir kesitin (σ_a) elektronik tesir kesite (σ_e) oranı kullanılarak elde edilebilir (Singh *et al.* 2002).

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e}$$

Atomik tesir kesitini;

$$\sigma_a = \frac{(\mu/\rho)_c A_c}{N_a}$$

benzer şekilde elektronik tesir kesitini ise;

$$\sigma_e = \frac{1}{N_a} \sum \frac{f_i A_i (\mu/\rho)_i}{Z_i}$$

formülleri yardımıyla bulabiliriz. Burada $(\mu/\rho)_c$ bileşiğin kütle soğurma katsayısı olup WinXCom programı yardımıyla bulunur. A_c bileşiğin toplam atom ağırlığını ifade etmektedir. f_i ve A_i bileşikte bulunan her bir elementin mol kesrini ve atom ağırlığını ifade eder. Z_i atom numarası ve N_a Avagadro sayısıdır.

Etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}).

Birim kütle başına elektron sayısı olarak ifade edilen elektron yoğunluğu N_{eff} , etkin atom numarası (Z_{eff}) ile yakından ilişkilidir. Etkin elektron yoğunluğunu aşağıdaki formülle ifade etmek mümkündür (Manohara *et al.* 2008).

$$N_{eff} = \frac{N_a Z_{eff}}{A_c}$$

Aynı zamanda bu eşitlik, $N_{eff} = \frac{(\mu/\rho)_c}{\sigma_e}$ şeklinde de ifade edilebilir.

Yarı karanlık değeri (HVL).

Radyasyon demeti yoğunluğunu yarı değerine düşüren, zırlama için kullanılan malzeme kalınlığı olarak ifade edilir. Radyasyondan korunmak amacıyla tasarlanan veya seçilen malzemeler için kullanılan önemli bir parametredir ve şu şekilde formüle edilir (Shamshad *et al.* 2017);

$$HVL = \frac{0,693}{\mu}$$

burada μ lineer soğurma katsayısıdır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Deneylerde kullanılan malzemeler

Ahlat Taşı

Bitlis ili Ahlat ilçesi ve civarında çıkarılarak farklı alanlarda kullanılan Ahlat Taşı (ignimbirit) yerel bir işletmeden temin edilerek bu çalışmada geopolimer alüminosilikat kaynağı olarak kullanıldı. Temin edilen Ahlat Taşlarının büyüklükleri yaklaşık olarak 40x20x10 cm ebatlarında olup kullanım için büyük olduğundan dolayı öncelikle bilyalı malzeme öğütücüye sığabilecek boyutlara (0-8 mm) kadar küçültüldü ve öğütücüye konulmadan hemen önce 24 saat süresince 105°C sıcaklıktaki etüvde kurutuldu. Etüv kurusu malzemeler bilyalı malzeme öğütücüsünde 30-45 mikron boyutuna kadar öğütüldü. Kullanılan Ahlat Taşlarının kimyasal ve elementel analizleri yaptırıldı. Bu Ahlat Taşlarının analiz sonuçları Tablo 3'te ve görselleri de Şekil 14'te verildi.

Tablo 3. Ahlat Taşının Kimyasal Özellikleri

Numune Adı	% Bileşim								
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	A.Za*
Bej Ahlat Taşı	70,65	4,05	0,70	4,70	11,30	<0,05	4,60	0,70	2,90
Siyah Ahlat Taşı	63,75	4,40	2,65	5,55	16,15	0,20	4,60	0,80	1,5

*Ateş zahiyatı , kızdırma kaybı



(a)

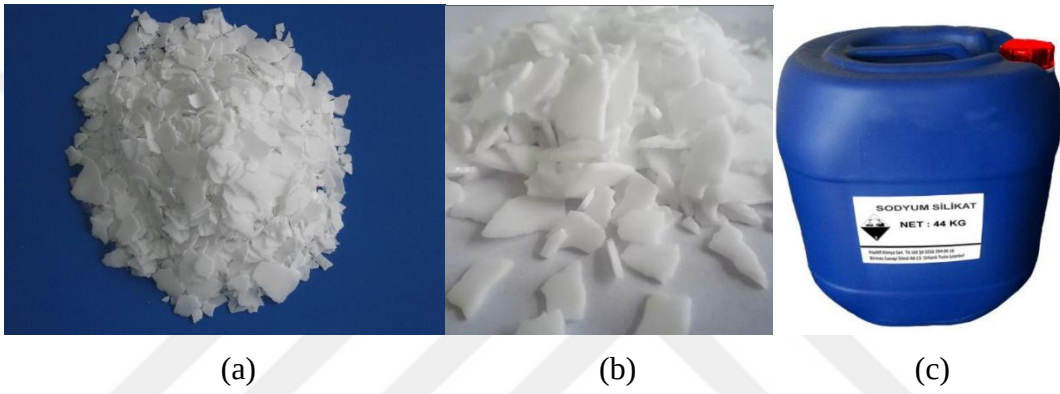


(b)

Şekil 14. Çalışmada kullanılan Ahlat Taşları; a) Bej Ahlat Taşı, (b) Siyah Ahlat Taşı.

Alkali aktivatör

Literatür taramalarından bilindiği üzere alkali aktivatör tipi ve kullanılan konsantrasyonu, geopolimer bağlayıcıların durabilite ve mekanik özelliklerine önemli etkisi vardır. Bu çalışmadaki geopolimer üretiminde, araştırmalarda en çok kullanılan Na_2SiO_3 , NaOH ve KOH alkali aktivatörleri tercih edildi (Şekil 15). NaOH ve KOH %99 saflıkta pelet formunda 25 kilogramlık çuvallarda temin edildi. Na_2SiO_3 sıvı olarak temin edildi. Alkali aktivatör çözeltiler literatüre uygun olarak 24 saat öncesinden hazırlandı. Öğütülmüş Ahlat Taşı NaOH + Na_2SiO_3 ve KOH + Na_2SiO_3 çözeltileriyle aktive edilerek geopolimer beton numuneler üretildi. Kullanılan alkali aktivatörlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4'te verildi.



Şekil 15. Kullanılan alkali aktivatörler; a) KOH, b) NaOH, c) Na_2SiO_3 .

Tablo 4. Alkali Aktivatörlerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Fiziksel ve kimyasal özellikler	Sodyum hidroksit	Potasyum hidroksit	Sodyum silikat (2 modül)
Molekül formülü	NaOH	KOH	Na_2SiO_3
Molekül kütlesi (g/mol)	40,00	56,11	122,06
Renk	Beyaz	Beyaz	Renksiz Sıvı
pH	13-14	14	11-12,5
Yoğunluk (gr/cm^3)	2,13	2,12	1,37-1,41
Na_2O içeriği (%)	-	-	11,0-12,5
SiO_2 içeriği (%)	-	-	21,5-24,5
H_2O içeriği (%)	-	-	63,0-67,5

Çimento

Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R tipi çimento puzolanik aktivite indeksi tespitinde kullanıldı.

Süper akışkanlaştırıcı

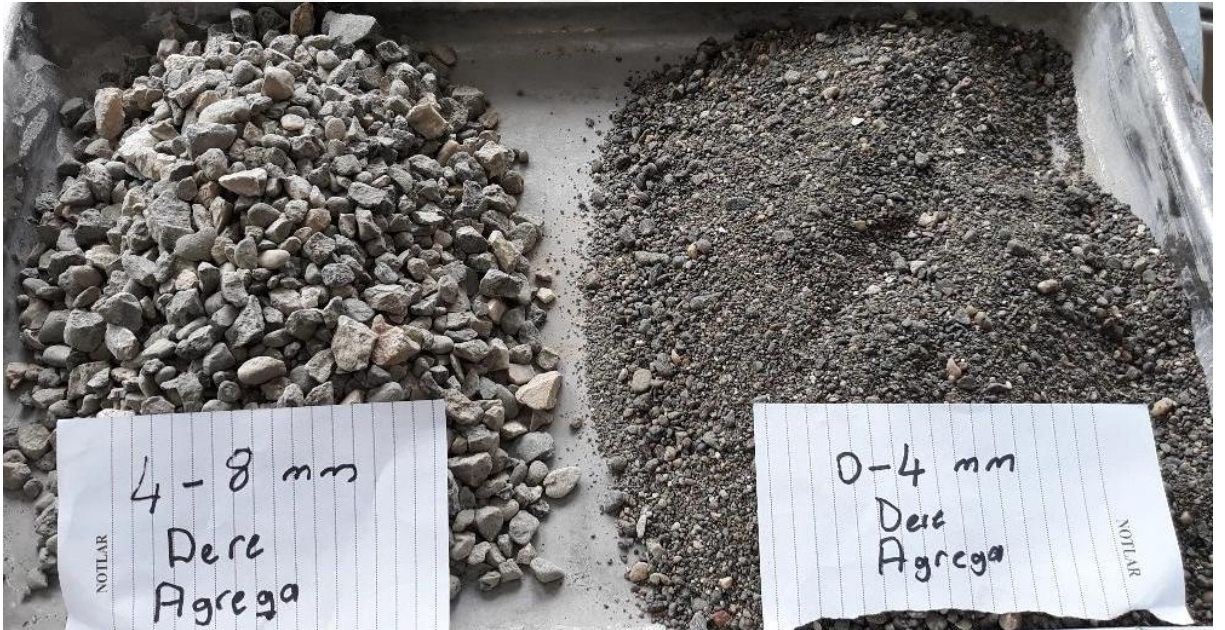
Üretilen numunelere iyi bir oranda akışkanlık kazandıran BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.'nin bir ürünü olan lignin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzeme ürünü olan EBA914 bu çalışmadaki geopolimer beton üretiminde kıvam düzenleyici olarak kullanıldı.

CEN standart kum

Özellikle en ince taneleri silisli olan doğal bir kumdur. Temiz ve parçacıkları genelde izometrik ve yuvarlak şekildedir. 1350 ± 5 g içeren paketler şeklinde bulunur. Bu çalışmada puzolanik aktivite indeksi tespitinde kullanıldı.

Agrega

Bu çalışma süresince dere agregası tercih edildi. Yapılan ön deneme dökümleri sonucunda maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak seçildi. Kullanılan agregaların tane dağılımları maksimum tane çapı göz önünde bulundurularak TS 802 (2016)'da belirtilen ideal bölgeye göre uygun olarak oluşturuldu. Agregalar 0-4 mm ve 4-8 mm olmak üzere tane sınıflarına ayrıldı. Tane sınıflarına ayrılan agrega örnekleri Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 16. Karışımlarda kullanılan dere agrega örnekleri.

Karışım suyu

Deneyisel çalışmalarda kullanılan suyun temiz olması ve tasarlanıp üretilen numuneler üzerinde olumsuz etki oluşturmaması gerekmektedir. Bu çalışmada Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi şebeke suyu kullanıldı.

Deneylerde kullanılan aletler

Elekler

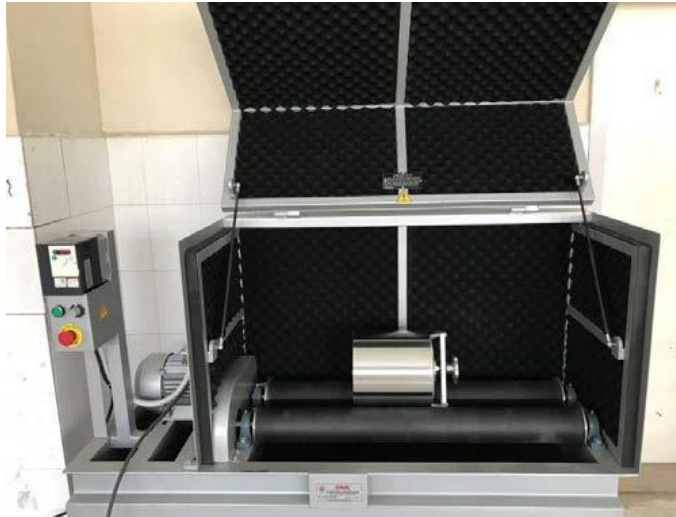
Bu çalışmadaki deneylerde TS ISO 3310-2 (2015) standartlarına uygun olan agrega elek seti kullanıldı. Kullanılan elek takımı Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. Elek takımı.

Bilyalı-çubuklu değirmen

Kullanılan ham maddenin tane çapının öğütülerek küçültülmesi, ham maddenin reaktivitesinin artırılmasında sürekli kullanılan ekonomik bir işlemdir. Bu amaçla etüvde kurutulan Ahlat Taşı, 30-45 μm gelinceye kadar öğütüldü. Numune öğütme işleminde kullanılan bilyalı-çubuklu değirmen Şekil 18’de görülmektedir. Bu değirmenin genel özellikleri kısaca şöyledir; Ø200x300 mm boyutlarında 9 lt’lik iç hacimli ve Ø200x200 mm boyutların 6 lt’lik iç hacimli iki adet değirmen tüpü bulunmaktadır. Aynı anda iki tüple çalışılabilen değirmende aynı zamanda dönme hızı da 0-300 dev/dk aralığında ayarlanabilmektedir.



Şekil 18. Bilyalı-çubuklu değirmen.

Harç karıştırıcı

Harç karıştırıcı, TS EN 196-1 (2016) standardına uygun bir şekilde geopolimer harç ve hamurların homojen bir şekilde karıştırılması için kullanılan bir cihazdır. Bu çalışmada

kullanılan harç karıştırıcı 10 dm³ kapasiteli 280 dev/dk karıştırma hızına sahip harç karıştırıcı kullanıldı (Şekil 19).



Şekil 19. Harç karıştırıcı.

Kalıplar

Bu çalışmada çelikten imal edilmiş, TS EN 196-1 ve ASTM C109 standartlarına uygun ve boyutları 50x50x50 mm olan kalıplar, geopolimer beton üretiminde kullanıldı (Şekil 20).



Şekil 20. Kalıp.

Yayılma tablası

Yayılma tablası, akıcı karışımların işlenebilirliklerinin değerlendirilmesi için yapılan kıvam tayini yöntemlerinden biridir. Kullanılan yayılma tablası deney aleti TS EN 1015-3'e uygun olup, Şekil 21'de görülmektedir.



Şekil 21. Yayılma tablası.

Basınç dayanım test cihazı

Bu çalışmada üretilen numunelerin basınç dayanımlarının tayininde 3000 kN (300 ton) yükleme kapasitesine sahip, yükleme hızını otomatik ayarlayabilen, tek eksenli ve bilgisayar kontrollü hidrolik basınç test cihazı kullanıldı. Kullanılan basınç dayanım test cihazı Şekil 22’de görülmektedir.



Şekil 22. Basınç dayanım test cihazı.

Etüv

Bu çalışmanın birçok aşamasında; Ahlat Taşının öğütülmeden önce kurutulmasında, agrega deneylerinde ve geopolimer için önemli olan ısıl kürün sağlanması aşamalarının tamamında dijital termostatlı etüv kullanıldı (Şekil 23).



Şekil 23. Etüv.

Dijital terazi

Karışım hesaplarında belirlenen miktarların ölçülmesinde kullanılan ve led ekranına yansıtarak okuma yapılmasını sağlayan dijital terazi kullanılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. Dijital terazi.

3 noktalı eğilme dayanım cihazı

İki mesnet üzerinde duran numunenin tam ortasından dik yönde düşey yük uygulanması yöntemiyle yapılan deneyde, bu çalışma için bilgisayar kontrollü hidrolik cihaz kullanıldı. Kullanılan test cihazı Şekil 25’te görülmektedir.



Şekil 25. 3 noktalı eğilme dayanım cihazı.

Strain-Gauge

Şekil değiştirme ölçerler (strain gauge), bir nesnenin gerilimsiz ilk uzunluğuna referansla uzunluktaki değişim oranını ölçmeye yarayan sensörlerdir. Strain gaugeler, dış bir kuvvetin veya iç yapıdaki gerinimlerin neden olduğu değişimleri ölçerek bu ölçüm verilerini dijital değerlere dönüştürüp analiz edilebilir bir şekilde veri toplama sistemine iletirler (Şekil 26). Bu çalışmada kullanılan strain gaugelerin teknik özellikleri Tablo 5’te belirtilmiştir.



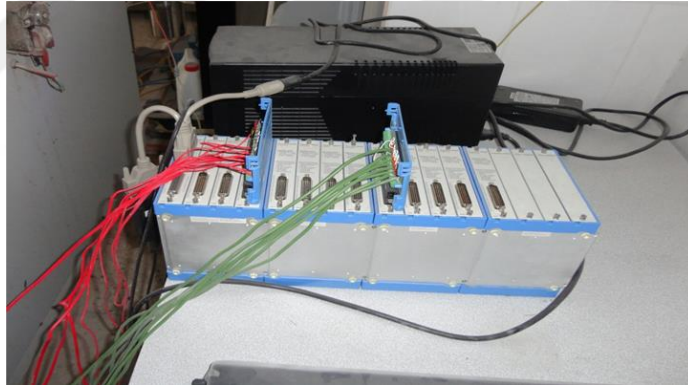
Şekil 26. Strain-Gauge.

Tablo 5. Kullanılan Strain Gaugelerin Teknik Özellikleri

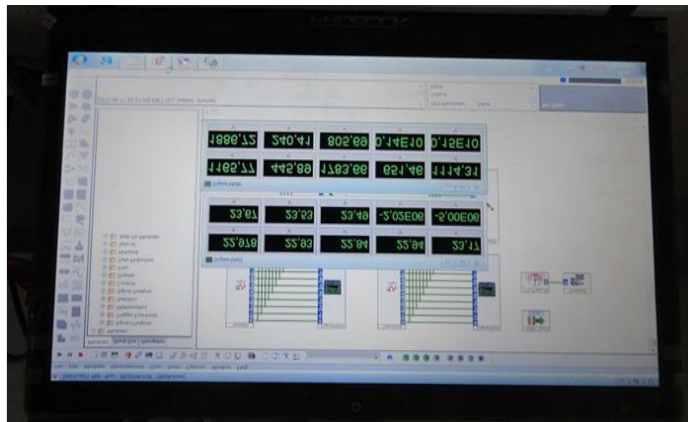
Ölçü cihazı boyu, mm	30
Ölçü cihazı faktörü, %	2,11 ±1
Ölçü cihazı direnci, Ω	120±0,5
Sıcaklık kompanzasyonu, /°C	11 x 10 ⁻⁶
Test koşulu, 50 % RH	23°C
Enine duyarlılık, %	-0,6
Giriş-çıkış kabloları, m	5

Data logger (Veri toplama sistemi)

Data logger numuneler üzerine bağlanan strain gaugelerden alınacak olan verilerin dijital ortamda sürekli olarak depolanması için kullanılan bir cihazdır. Şekil 27-a’da görüldüğü üzere strain gauge modüller aracılığıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Elde edilen verilerin dijital ortama aktarılmasında DAYSLAB ve Instrunet programları kullanılmıştır ve Şekil 27-b’de verilmiştir. Elde edilen tüm veriler, Microsoft Access programı altında saklanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 27. a) Veri toplama sistemi, b) DAYSLAB programı ve verilerin dijital ortamında görünümü.

Yöntem

Agregalarda uygulanan deneysel yöntemler

Deneyleerde, kullanılmak üzere tercih edilen doğal dere agregalarının deneylerini yapmak üzere TS 706 EN 12620+A1 (2009)'de belirtilen numune alma prosedürüne uygun bir şekilde dörde bölerek çeyrekleme metodu kullanıldı. Sonrasında ise deneyleerde kullanılmak üzere depolandı. Agregaların su emme oranları ve özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 (2013)'ya göre belirlendi. Her bir deney için üç defa tekrar yapıldı ve bulunan sonuçların aritmetik ortalamaları alındı. Bulunan değerler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verildi. Su emme miktarı tespit edilen agregalar sonrasında geopolimer beton üretimi esnasında doygun kuru yüzey duruma getirilerek kullanıldı. Dere agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1 (2012)'e göre belirlendi. Üretilcek geopolimer beton numunelerinde agreganın en büyük çapı 8 mm olarak belirlendi. 4-8 mm arası iri, 0-4 mm arası ise ince agrega olarak seçildi. Bu çalışmada, geopolimer beton üretiminde agregaların oranları hacimce %15 iri, %85 ince agrega olacak şekilde kullanıldı.

Ahlat Taşının öğütülmesi

Bitlis ili Ahlat ilçesi yöresinden temin edilen Ahlat Taşı öncelikle bilyalı-çubuklu değirmene sığacak şekilde küçültüldü. Nemli olan malzemeden belli miktarda tartıldıktan sonra etüve konuldu ve ağırlığı değişmeyecek şekilde sabitleninceye kadar kurutuldu. Kurutulan Ahlat Taşının tane boyutu 45 μm 'den küçük olacak şekilde bilyalı-çubuklu değirmende öğütülerek (4 saat) toz haline getirildi. Öğütülerek toz haline getirilen Ahlat Taşı tozları Şekil 28'de görülmektedir.

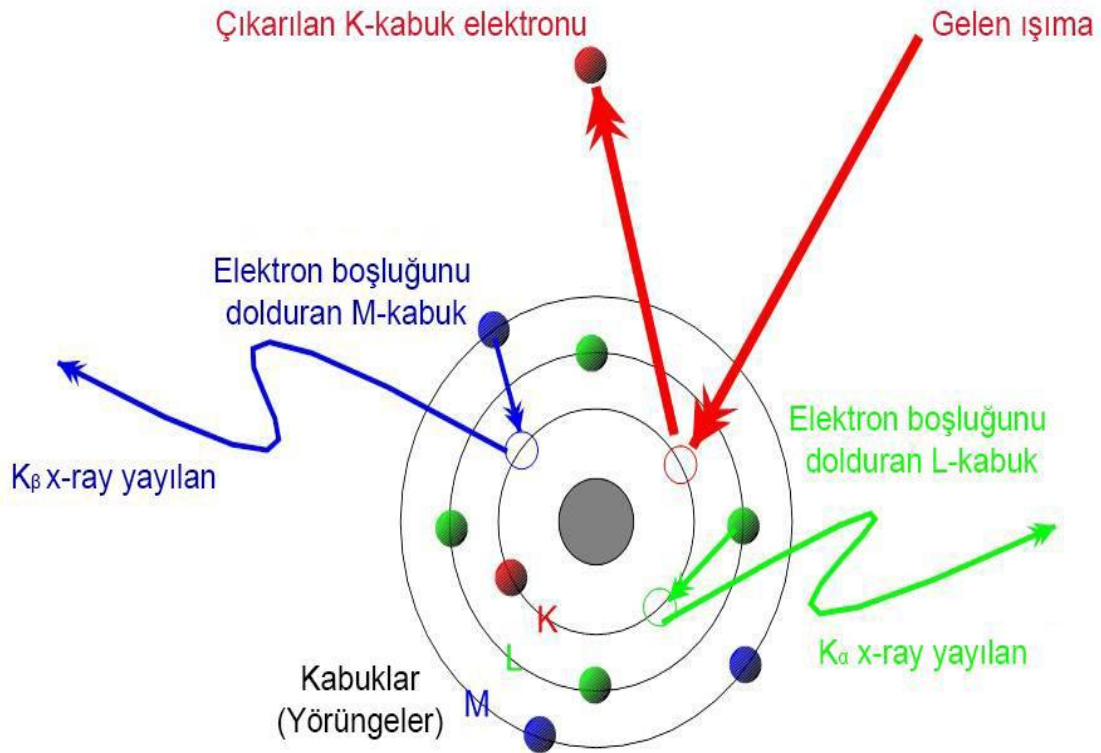


Şekil 28. Toz halinde kullanılan Ahlat Taşları; (a) Siyah Ahlat Taşı, (b) Bej Ahlat Taşı.

Ahlat Taşına uygulanan yöntemler

X-ışını floresans analizi (XRF)

Deneysel çalışmalarımıza hemen başlamadan önce malzememizin kimyasal içeriğini belirlemek için MTA’da XRF analizi yaptırıldı. Enerji dağılımlı X-ışını floresans (XRF) numune üzerine gönderilen x ışını ile oluşan floresans x ışınları kristal spektrometre ile analiz edilerek farklı açılardan gelen pik şiddetlerine bağlı olarak malzeme elementleri ve konsantrasyonları belirlenir (Benlice 2020). Şekil 29’da X-ışını floresans analizinin ışınları verilmiştir.



Şekil 29. X-ışını Floresans Analizinin Işınları (XRF) (Benlice 2020).

İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS)

Deneysel çalışmalarımıza hemen başlamadan önce Ahlat Taşı türlerinin elementel analizini belirlemek için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma (DAYTAM)’da ICP-MS analizi yaptırıldı. ICP-MS, örneklerin uygun bir forma dönüştürüldükten sonra yüksek sıcaklığa sahip Ar plazmasına gönderilmesi sonrasında iyonlaşan atomların kütle analizöründe ayrılması ve dedektörde prensibine dayanan bir analitik yöntemdir. ICP-MS; katı ve sıvı örneklerde çok sayıda elementin hızlı, hassas ve yüksek doğrulukta kantitatif ya da kalitatif olarak ölçümüne olanak sağlayan ileri teknoloji bir analitik metottur (Haliloğlu 2020).

Puzolanik aktivite

Puzolanik aktivite deneyi ASTM C311/C311M-18 standartlarına göre şu şekilde yapılmaktadır. Öncelikle 1375 gr standart kum, 500 gr normal Portland çimentosu ve 242 ml sudan yararlanılarak kontrol harcı üretilmektedir. Daha sonra kullanılan tüm malzemeler aynı kalmak şartıyla sadece normal Portland çimentosunun %20'sinin yerine puzolan ikame ettirilerek ve suya 5 ml eklenerek veya çıkarılarak puzolanlı harç üretilmektedir. Üretilen bu 2 farklı harçtan 5 cm'lik küp kalıplar kullanılarak yeterli miktarda numuneler üretilir ve sonrasında üretilen bu numunelere 7 ve 28 günlük basınç deneyleri uygulanır. Bulunan sonuçların arasında ilgili formüller kullanılarak dayanım aktivite indeksi değeri hesaplanır. Bu hesap ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

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

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

Şeklinde ifade edilirler.

Sonuç olarak bulunan dayanım aktivite indeksinin belli koşulları sağlaması gerekir ve bu koşullar şu şekilde sınırlandırılmıştır. ASTM C618 standardına göre doğal puzolanlarla yapılan bu deneyde hesaplanan dayanım aktivite indeksinin en az 75 olması gerektiği, TS 25 standardına göre ise bu değer 70'ten az olmaması gerektiği belirtilmektedir.

ASTM C311/C311-18 standartlarında belirtilen deney yöntemine uygun olarak Ahlat Taşının puzolanik aktivite indeksi belirlenmesi deneyi yapıldı. Puzolanik aktivite indeksi deneyi için yapılan karışım hesabı Tablo 6'da verildi.

Tablo 6. Puzolanik Aktivite İndeksi Karışım Oranları (g)

6 Adet 50x50x50 mm Küp Numune için				
Puzolanik Aktivite İndeksi Deneyi Karışım Hesabı (ASTM C311/C311M – 18)				
	Çimento	Puzolan	Standart Kum	Su
Kontrol Karışımı	500	0	1375	242
Test Karışımı (Bej)	400	100	1375	242+5
Test Karışımı (Siyah)	400	100	1375	242+5

Çözelti hazırlanması

Deneylerde kullanılması belirlenen uygun molaritedeki alkali aktivatör, geopolimer beton üretiminde kullanılmasından en az 24 saat önce ve 15 dk karıştırılarak hazırlandı. Alkali aktivatör çözeltilerin hazırlanması ise aşağıda belirtilen maddeler doğrultusunda;

- Belirlenen uygun molaritede alkali çözelti hazırlamak için NaOH ve KOH'ın molar ağırlıklarına göre dijital terazide 0,01 gr hassasiyetle tartımları yapıldı.
- Çözelti hazırlanırken, hazırlanacak molaritede tartımı yapılan katı haldeki aktivatör 1 litrelik cam beher içerisine eklenerek daha sonra üzerine 1 litreye gelinceye kadar su eklendi. Su eklendikten sonra çözünme hızını artırmak için cam bir karıştırıcı ile karıştırıldı. Karıştırma sonucunda 1 litrenin altında kalan kısmı için su ilavesi yapıldı. Tekrar karıştırılma yapılarak çözelti hazırlanması tamamlandı.
- Hazırlanan çözeltilerin bir süre soğumaları beklenildikten sonra hava almayacak kapaklı kapların içerisinde numunelerin üretileceği zamana kadar saklandı.
- 1 litre çözelti hazırlamak için gerekli olan aktivatör miktarları ise molekül ağırlığına (g/mol) bağlı olarak şu şekildedir;
 - NaOH'ın molekül ağırlığı 40 (g/mol) ve 1 litre 10 mol alkali aktivatör karışım için gerekli miktar ise 400,0 gr,
 - KOH'ın molekül ağırlığı 56,11 (g/mol) ve 1 litre 10 mol alkali aktivatör karışım için gerekli miktar ise 561,1 gr,

olacak şekilde ölçümler yapılarak çözeltiler hazırlandı.

Geopolimer beton karışım tipleri ve karışım hesapları

Üretilen geopolimer beton numunelerinde bağlayıcı olarak Ahlat Taşı tozu kullanıldı. Yapılan ön deneme çalışmalarında farklı molaritelerde KOH ve NaOH kullanıldı ve bulunan sonuçlara göre optimum molarite oranı 10 M olarak belirlendi. Literatürde yapılan çalışmalarda ise daha iyi özelliklerde geopolimer beton üretebilmek için artık tek alkali aktivatörün kullanımı değil, çeşitli aktivatörlerin karıştırılması şeklinde hazırlanan alkali aktivatörlerin daha iyi sonuçlar doğurduğu saptanmıştır. Bu nedenden dolayı bu çalışmada alkali aktivatör olarak KOH + Na₂SiO₃ ve NaOH + Na₂SiO₃ alkali aktivatör karışımları kullanılmıştır. Ön denemelerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda Na₂SiO₃'ün türü 2 modül olarak seçildi. Aynı zamanda KOH ve NaOH 10 M'de sabit tutularak, KOH/Na₂SiO₃=1 ve NaOH/Na₂SiO₃=1 olarak kullanıldı. Ön denemeler sonucunda değişkenlik göstermeyen diğer parametreler ise

şunlardır; çözelti/bağlayıcı oranı 0,53, kür sıcaklığı 90°C ve kür süresi ise 48 saattir. Üretilcek geopolimer beton numunelerde bazı parametrelerin sabit tutulmasından sonra diğer değişkenlerin; Ahlat Taşının 2 farklı renginin kullanılması, 3 farklı dozajın kullanılması (400-500-600 kg/m³) ve 2 farklı alkali aktivatör karışımı kullanılması olacak şekilde belirlendi ve toplamda 12 farklı geopolimer beton karışımı üretildi. Üretilen karışımlara verilen kodlar Tablo 7’de gösterildi. Üretilen geopolimer beton karışımlarına yeterli işlenebilirliği sağlamak amacıyla %2 oranına kadar lignin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Tüm bu belirlenen değerlere göre 1 m³’lük geopolimer beton karışım hesabında öncelikle bağlayıcı miktarı ve hacmi, aktivatör miktarı ve hacmi ve hava miktarı hacmi hesaplandı ve bu hesaplanan verilerin tamamı 1 m³’lük geopolimer beton hacminden çıkarıldıktan sonra kullanılacak olan agrega hacmi hesaplandı. Tablo 8’de hesaplanan karışım değerleri verildi.

Tablo 7. Karışım Kodları

Karışım Kodu	Değişken Parametreler		
	Ahlat Taşı Rengi	Alkali Aktivatör Tipi	Dozaj (kg/m ³)
S-N-4	Siyah	NaOH/Na ₂ SiO ₃	400
S-N-5	Siyah	NaOH/Na ₂ SiO ₃	500
S-N-6	Siyah	NaOH/Na ₂ SiO ₃	600
B-N-4	Bej	NaOH/Na ₂ SiO ₃	400
B-N-5	Bej	NaOH/Na ₂ SiO ₃	500
B-N-6	Bej	NaOH/Na ₂ SiO ₃	600
S-K-4	Siyah	KOH/Na ₂ SiO ₃	400
S-K-5	Siyah	KOH/Na ₂ SiO ₃	500
S-K-6	Siyah	KOH/Na ₂ SiO ₃	600
B-K-4	Bej	KOH/Na ₂ SiO ₃	400
B-K-5	Bej	KOH/Na ₂ SiO ₃	500
B-K-6	Bej	KOH/Na ₂ SiO ₃	600

Tablo 8. 1 m³ Geopolimer Beton Karışım Hesapları (kg/m³)

Karışım Kodu	Ç/B Oranı	Ahlat Taşı Rengi	Ahlat Taşı Dozaj	Na ₂ SiO ₃	NaOH Çözeltisi	KOH Çözeltisi	0-4 mm Agrega	4-8 mm Agrega
S-N-4	0,53	Siyah	400	106	106	-	1457,61	257,23
S-N-5	0,53	Siyah	500	133	133	-	1275,78	225,14
S-N-6	0,53	Siyah	600	159	159	-	1093,95	193,05
B-N-4	0,53	Bej	400	106	106	-	1450,43	255,96
B-N-5	0,53	Bej	500	133	133	-	1266,81	223,55
B-N-6	0,53	Bej	600	159	159	-	1083,18	191,15
S-K-4	0,53	Siyah	400	106	-	106	1465,70	258,65
S-K-5	0,53	Siyah	500	133	-	133	1285,89	226,92
S-K-6	0,53	Siyah	600	159	-	159	1106,09	195,19
B-K-4	0,53	Bej	400	106	-	106	1458,52	257,39
B-K-5	0,53	Bej	500	133	-	133	1276,92	225,34
B-K-6	0,53	Bej	600	159	-	159	1095,32	193,29

Geopolimer beton üretimi, numunelerin yerleştirilmesi ve kürü

Ön denemeler sonucunda belirlenen ve karışımda kullanılacak olan 10 M yoğunluktaki KOH ve NaOH çözeltileri, dökümden 24 saat önce literatüre uygun olarak hazırlandıktan sonra numunelerin üretileceği zamana kadar kapalı kaplarda saklandı ve üretilecek numunelerin standartlarının hep aynı olması için kullanılacak malzeme sıcaklıklarının ortalama 25 °C'de olmasına dikkat edildi. Geopolimer beton üretimi esnasında kullanılacak olan malzemeler karışım hesabında belirlenen ölçüler doğrultusunda 0,1 g hassasiyette dijital terazide tartılarak numune karışımlarını yapmak üzere hazırlandı. Geopolimer beton üretim aşaması şu şekilde yapıldı;

- Karışım için öncelikle kullanılacak Ahlat Taşı tozu ve kullanılacak KOH veya NaOH'tan herhangi biri 3 dk boyunca karıştırıldı,
- Ardından Na₂SiO₃ eklenerek 2 dk boyunca daha karıştırıldı,
- Sonrasında ise agregaların tamamı ve SAK eklenerek 3 dk daha karıştırıldı.

Toplamda 8 dk'lık bir karıştırma işlemi sonunda taze haldeki geopolimer beton üretimi tamamlandı.

Üretilen numunelerin kalıba yapışmaması için kalıplar yağlandı. Fakat geopolimer üretiminde ısı kürü uygulandığı için kalıplarda kullanılan yağın normal kalıp yağı değil ısıya dayanıklı, ısıdan etkilenmeyen, sıcaklık doğrultusunda akışkanlığı artmayan ve sonuçta kalıba tutunabilen bir yağ olması gerektiğinden dolayı bu özellikler doğrultusunda sıvı gres yağı kullanıldı.

Hazırlanan taze haldeki geopolimer beton numuneleri, yağlanan 50x50x50 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirildi. Kalıplara yerleştirme işlemleri 3 aşamada yapıldı ve her aşamasında 25 defa şişleme ve her şişleme sonrasında sarsma tablasında yerleştirme işlemleri uygulandı. Kalıplara düzgün bir şekilde yerleştirilen geopolimer beton numuneleri, ön denemelerde belirlenen 90 °C'lik kür sıcaklığı ve poşetli kür doğrultusunda etüve konulmak üzere her bir numune iki defa ısıya karşı dayanıklı fırın poşetlerinin içerisine konuldu ve etüve yerleştirildi. Etüve konulan numuneler 48 saat boyunca kür işlemine tabi tutuldu. Numuneler etüvde 24 saat sonra yeterli sertliğe ulaşınca kalıplardan çıkarılıp tekrar fırın poşetlerine konularak yüzeyleri kapatıldıktan sonra kür işlemine devam edildi. Kür işlem süresi (48 saat) tamamlandıktan sonra etüvden çıkarılan numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletildi. Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numunesi ve etüve konulmak üzere hazırlanmış poşetli numune örnekleri Şekil 30'da gösterildi.



Şekil 30. Sertleşmiş haldeki geopolimer beton numunesi ve etüve konulmak üzere hazırlanmış poşetli numune.

Geopolimer beton numunelerde uygulanan yöntemler

Basınç dayanım deneyi

ASTM C39/C39M ve TS EN 12390-3 (2019) test metotları kullanılarak geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri belirlendi.

Küp geopolimer beton numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik gelecek şekilde yerleştirildi. Numuneler, makinenin alt yükleme başlığının üzerine merkezine gelecek şekilde düzgünce yerleştirildi. Numuneler yerleştirip ve cihaz ekranından numune boyutları seçildikten sonra, yükleme hızı 0,4 MPa/s yük hızı olacak şekilde ayarlandı. Basınç dayanım değerlerinin tespitinde, her grup için 50x50x50 mm boyutlarında en az üç adet numune üretildi ve üretilen bu üç numunenin basınç değerlerinin aritmetik ortalaması sonuç olarak kaydedildi.

Numunelerin basınç dayanım değerleri, denklem 8'deki eşitlik kullanılarak hesaplandı:

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (8)$$

Burada;

F_c : Basınç dayanımı, MPa,

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm². Bu alan, numune üzerinde ölçülen gerçek boyutlar kullanılarak hesaplandı.

Eğilme dayanım deneyi

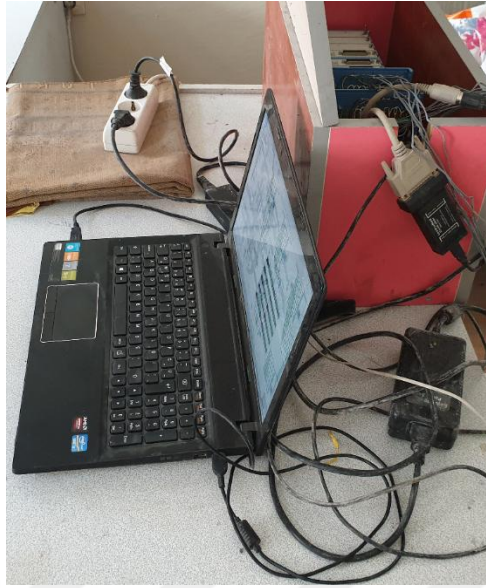
TS EN 12390-5 (2010) standardına göre geopolimer beton numunelerin eğilme dayanımının tayini belirlendi.

Yükleme tablasındaki mesnet noktaları üretilen numunelerin boyuna uygun olan yataklara oturtuldu. Numunelerin üretim esnasında kalıp içinde iken üstte kalan yüzeyi, deney sırasında yüklemenin yönüne paralel olacak şekilde dikkat edilerek konuldu. Numuneler yatay bir şekilde, yükleme yönü numunenin yükleme uygulanacak yüzeyine dik gelecek şekilde yerleştirildi. Tam otomatik cihazda gerekli veriler yerlerine girildikten sonra yükleme yapılarak numunelerin kırılması sağlandı. Bu sırada darbeli bir yükleme olmaması için yükleme hızına dikkat edildi. Eğilme dayanım değerlerinin tespitinde, her grup için 40x40x160 mm boyutlarında üç adet numune üretildi ve üretilen bu üç numunenin eğilme dayanımı değerlerinin aritmetik ortalaması sonuç olarak kaydedildi.

Boy değişim deneyi

Boy değişimlerinin tespiti; strain gauge ve data logger vasıtasıyla elde edilen verilerin DAYSLAB ve Instruner programları kullanılarak, numuneler üzerinde her 5 dk'da bir veri okumalarının bilgisayar ortamına aktarılmasıyla yapıldı. Boy değişimlerin tespiti için tasarlanan bu ölçüm sistemi Şekil 31'de gösterilmiştir. Kür işleminin tamamlanmasının hemen ardından tüm karışım tiplerine ait numuneler üzerinde, 80 gün boyunca strain gauge, data logger

ve bağı bilgisayar yardımıyla sürekli olarak alınan veriler Microsoft Access programı altında kayıt altına alındı. Elde edilen tüm verilerle ilgili gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra grafiksel değerlendirmelerle birlikte boy değişim verileri (birim şekil değiştirme) tespit edildi.



Şekil 31. Boy değişim ölçüm sistemi.

Kılcal su emme (kapilarite) deneyi

Geopolimer beton numunelerin kılcallık katsayılarının belirlenmesinde ASTM C 1585 ve TS EN 772-11 (2011)'e uygun olarak belirli zaman aralıklarında numunelere tabandan su emdirme yöntemi kullanıldı. Kılcallık katsayısını belirlemek amacıyla hazırlanan numunelere deney prosedürü uygulanmadan önce, numuneler 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletildi. Etüvden çıkarılan numunelerin ağırlıkları ölçüldükten sonra yan yüzeylerinden su almayacak şekilde, Şekil 32'de verildiği gibi yan yüzeyleri kaplanarak yalıtıldı. Yalıtılan numuneler, hazırlanan düzeneğin içerisinde 5 mm yüksekliğinde tabandan su emecek şekilde konuldu. Numuneler düzeneğe konulduktan sonra deney başlangıcından itibaren 5, 15, 30, 60, 120, 240 ve 1440. dakikalarda düzeneğten alınarak hassas bir şekilde terazi de tartılarak kaydedildi.

Numunelerin kılcal su emme katsayılarıyla ilgili hesaplamalar, denklem 9'daki eşitlik kullanılarak hesaplandı:

$$q^2 = \frac{Q^2}{A^2} = k \times t \quad (9)$$

Burada;

q : Birim alanda emilen su miktarı, (cm^3/cm^2)

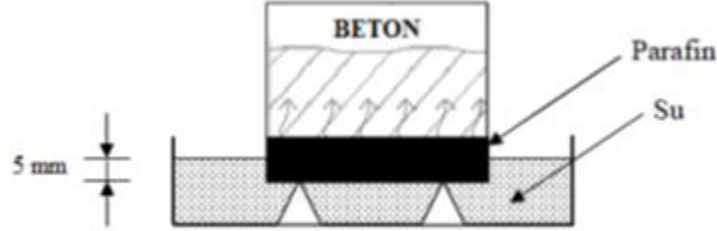
k : Kılcallık katsayısı, (cm^2/sn)

t : Geçen zaman, (sn)

Q : Deney numunesinin (t) süreyle emmiş olduğu su miktarı, (cm³)

A : Deney numunesinin suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı, (cm²)

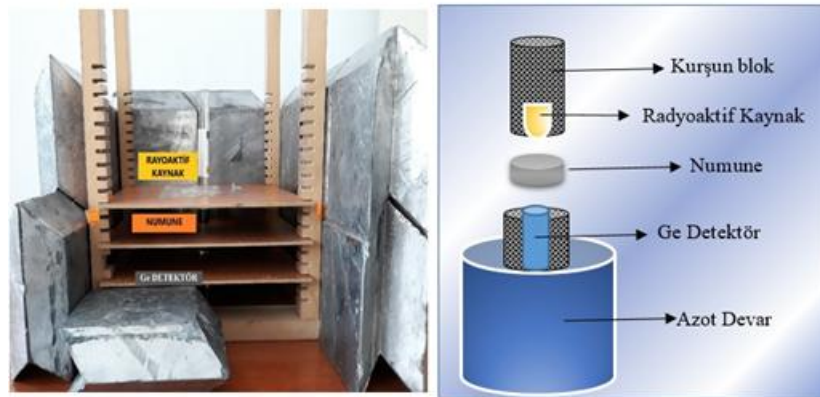
belirtmektedir.



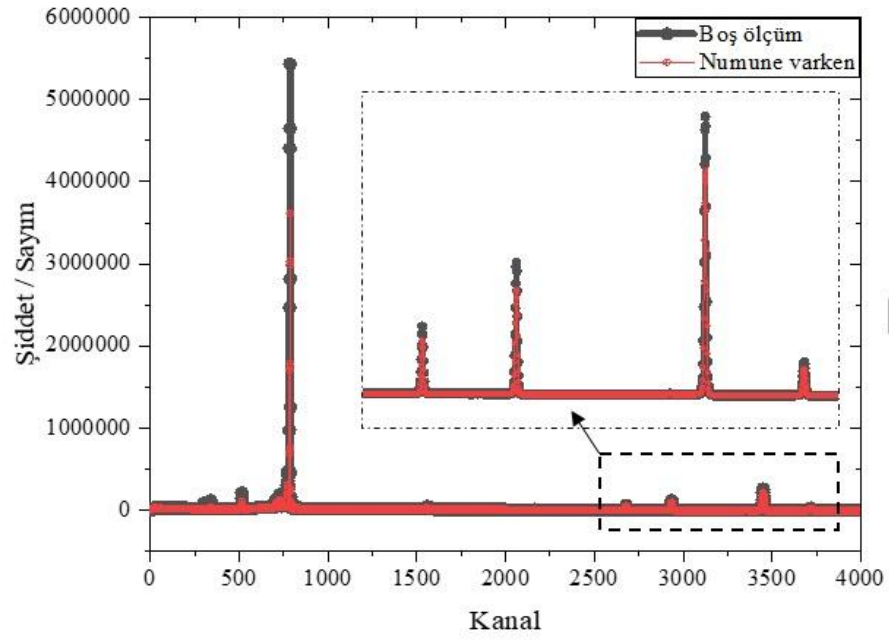
Şekil 32. Kılcal su emme düzeneği.

Radyasyon değeri

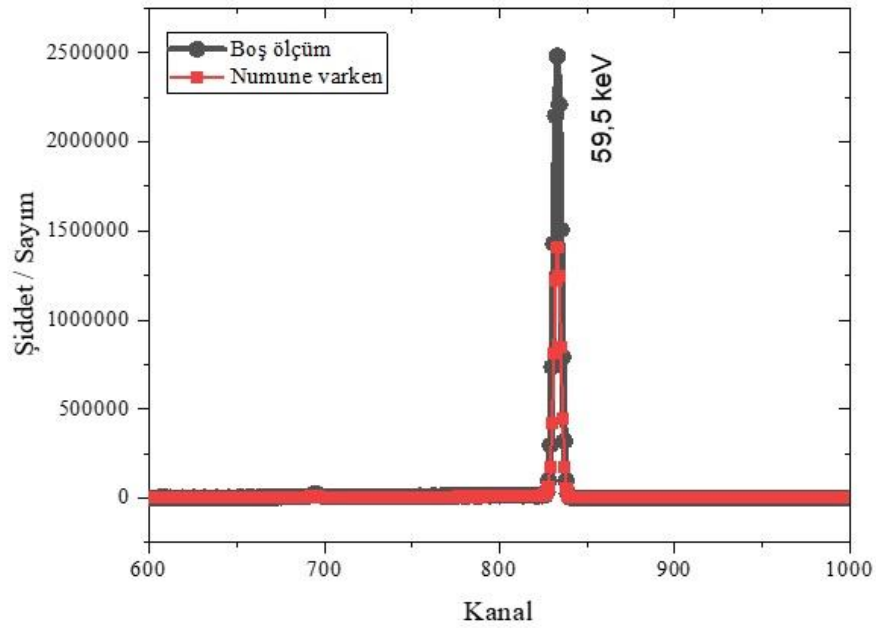
Deney düzeneği Şekil 33'te gösterilmiştir. Deneyde malzemeleri ışınlamak için 53,2–59,5–72,8–75–79,6–81–276–303–356–384 keV enerjili gama fotonu yayınlayan 241Am ve 133Ba radyoaktif nokta kaynakları kullanıldı. Kaynaklardan gelen radyasyon şiddetleri Ultra Ge detektörü tarafından belirlendi. İlk olarak kaynak ve detektör arasında herhangi bir numune yokken boş ölçüm (I_0) alındı. Daha sonra kaynak ve numune arasına numuneler tek tek yerleştirilerek soğrulma ölçümleri (I) alındı. Hata payını azaltmak için ölçümler 3 kez tekrar edildi. Çevreden gelebilecek radyasyonları bertaraf etmek için deney düzeneğinin çevresi kurşun bloklarla kapatıldı. Aynı şekilde düzgün bir ışın şuası oluşturabilmek için radyasyon kaynağı ve detektör de kurşun kolimatörler içerisine alındı. Radyasyon spektrumları bilgisayar yazılımı MAESTRO (6.08 versiyonu) tarafından oluşturuldu. Ölçüm sonuçlarından elde edilen spektrumların pik alanlarını hesaplamak için Origin 2018 programı kullanıldı. Elde edilen spektrumlar Şekil 34 ve Şekil 35'te örnek olarak verilmiştir.



Şekil 33. Radyasyon soğurma deney düzeneği.



Şekil 34. Ba radyoaktif kaynak için numune yokken ve numune varken alınan spektrumlar.



Şekil 35. Am radyoaktif kaynak için numune yokken ve numune varken alınan spektrumlar.

Birim hacim ağırlık deneyi

Numunelerin taze beton ağırlığının (M), numunelerin tüm hacmine (V) bölünmesi ile taze birim hacim ağırlık (B_a) belirlendi. Birimi kg/m^3 'tür. Numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri, denklem 10'daki eşitlik kullanılarak hesaplandı:

$$B_a = \frac{M}{V} \quad (10)$$

Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope) (SEM)

Üretilen geopolimer beton numunelerin yüksek çözünürlüklü görüntüleri ve mikro yapıları, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM’da bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-Quanta FEG 250) ile incelenmiştir. Ayrıca SEM/EDX element analizi ve SEM/EDX element spektrumlarının da analizleri yapılarak incelenmiştir.

SEM sistemi enerji dağılımlı spektrometre, dalga boyu dağılımlı X-Işınları spektroskopisi ve elektron geri yansıması kırınımı gibi analitik sistemlerle donatılmıştır. Bunlara ilave olarak, alan emisyon tabancası sistemleri, parlak alanlı ve karanlık alanlı örnek görüntüleme için bir S/TEM dedektörü içerir. SEM, numunedeki atomlarla elektronların etkileşmesi sonucu, farklı sinyaller üretilerek numune hakkında bilgiler verir. Numune yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntülerin alınması ile çalışan taramalı elektron mikroskobu numunenin üç boyutlu görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır. SEM cihazı Şekil 36’da gösterilmiştir.

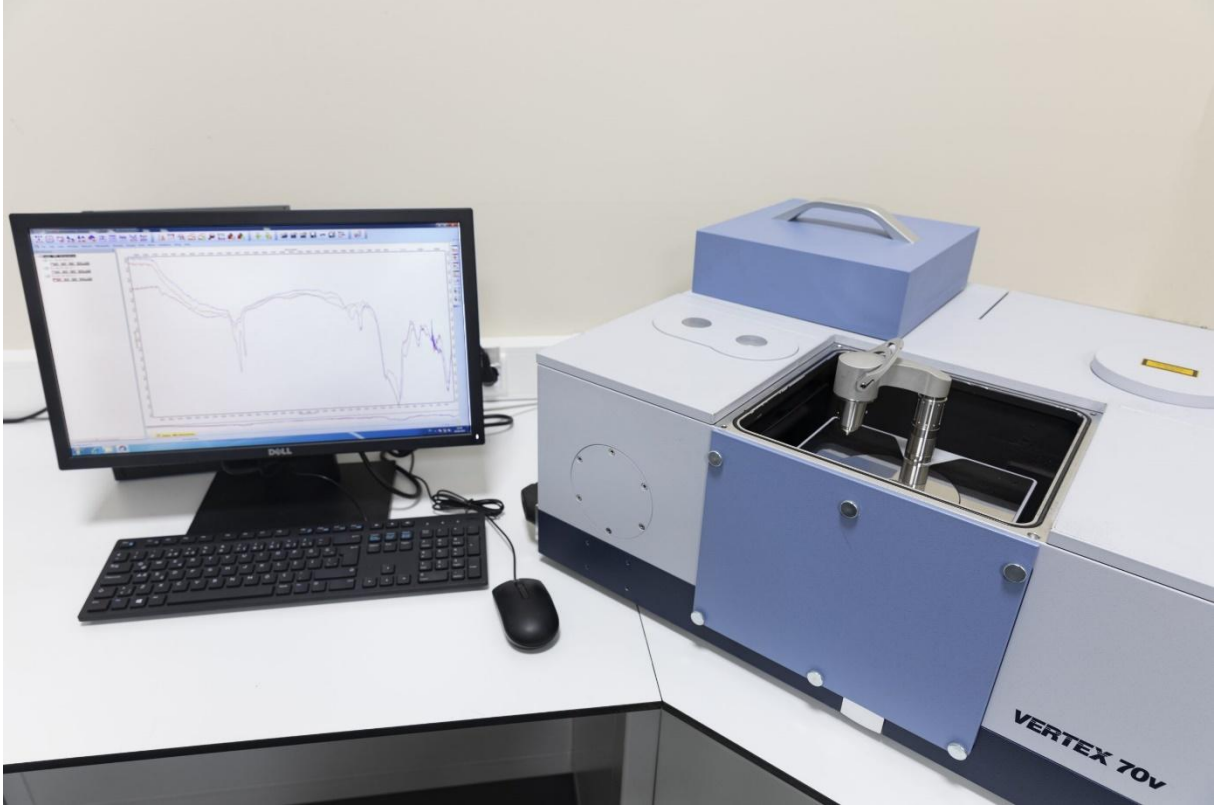


Şekil 36. SEM cihazı.

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (fourier transform infrared spectroscopy) (FTIR)

FTIR, bileşik veya molekül yapısında bulunan kimyasal bağlar hakkında bilgi edinilmesi için akademik alanda geniş uygulaması bulunan bir tekniktir. Bu yöntemin temeli, bileşik veya molekül içi bağlar üzerine iletilen kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır. Bu yöntem ile organik veya inorganik yapıdaki malzemelerin, IR aktif molekül özellikleri kullanılarak kalitatif ve kantitatif analizlerini

yapmak mümkündür. Üretilen geopolimer beton numunelerin bileşik yapılarını belirlemek için Atatürk Üniversitesi DAYTAM’da bulunan Bruker VERTEX 70v cihazı kullanılmıştır (Şekil 37). Analizlerde $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığı kullanılmıştır. Numuneler analize verilmeden önce öğütülüp, 200 nolu elekten geçirilerek toz haline getirildikten sonra deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 37. FTIR analiz cihazı.

Moleküllerin titreşim hareketleri tarafından soğurulan kızılötesi (IR) ışınları; bir tür titreşim spektroskopisidir. Kızılötesi (IR) spektrumları, atomlar arasındaki bağların titreşimi sonrası meydana gelen frekanslara karşılık gelen absorpsiyon piklerini göstermektedir. Pik değerlerini hangi kimyasal bağları gösterdiği çeşitli tablolarla ifade edilmiştir ve bu tablolara korelasyon tabloları denir. Spektrumların değerlendirilmesiyle moleküllerde hangi bağların olup olmadığı anlaşılabilir (Lin and Wang 2012; Yaddollahi 2013; Büyüksırt ve Kuleaşan 2014).

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, agrega ve hammadde üzerinde yapılan deneyler ile ilgili bulgular ve 12 farklı karışım dizaynıyla üretilen geopolimer beton numunelerin fiziksel, mekanik, durabilite sonuçlarıyla beraber iç yapı analizleri ile ilgili bulgular verilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiklerle desteklenerek incelenmiş ve daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bulunan sonuçlar ayrı ayrı başlıklar altında incelenerek daha önce yapılan literatür çalışmaları ile kıyaslanmıştır.

Hammadde Analizleri

Hammaddenin kimyasal yapısını değiştirmeden reaktivitesini artırmak için en sık başvurulan yöntemlerden biri de ekonomik olması nedeniyle tane çapının küçültülmesi işlemidir. Bu amaçla çalışmada kullanılan Ahlat Taşları etüvde kurutulduktan sonra bilyalı malzeme öğütücünde öğütülerek tane çapı küçültülüp, 45 µm çaplı elekten elenerek çimento tane çapı boyutlarına indirilmiştir. Ahlat Taşının kimyasal bileşimi MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında XRF analizi ile, elementel analizi ise Atatürk Üniversitesi DAYTAM laboratuvarlarında ICP-MS ile tayin edilmiştir. Ahlat Taşının kimyasal bileşimi Tablo 9’da elementel analizi ise Tablo 10’da verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında bej, siyah ve kahverengi olmak üzere üç farklı rengi olan Ahlat Taşlarının kullanılması amaçlanmıştır. Hammadde analizleri sonuçlarına göre yapılan değerlendirme doğrultusunda siyah renkli Ahlat Taşı ile kahverengi renkli Ahlat Taşı verilerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle geopolimer üretiminde siyah renkli Ahlat Taşı tercih edilmiş olup, bej ve siyah renk olmak üzere Ahlat Taşının iki rengi kullanılmıştır.

Tablo 9. Ahlat Taşının Kimyasal Özellikleri

Numune Adı	% Bileşim								
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	A.Za*
Bej Ahlat Taşı	70,65	4,05	0,70	4,70	11,30	<0,05	4,60	0,70	2,90
Siyah Ahlat Taşı	63,75	4,40	2,65	5,55	16,15	0,20	4,60	0,80	1,5
Kahverengi Ahlat Taşı	64,55	4,20	2,55	5,40	15,75	0,20	4,55	0,60	1,60

*Ateş Zayıyatı, Kızdırma Kaybı

Tablo 10. Ahlat Taşının Elementel Analizi

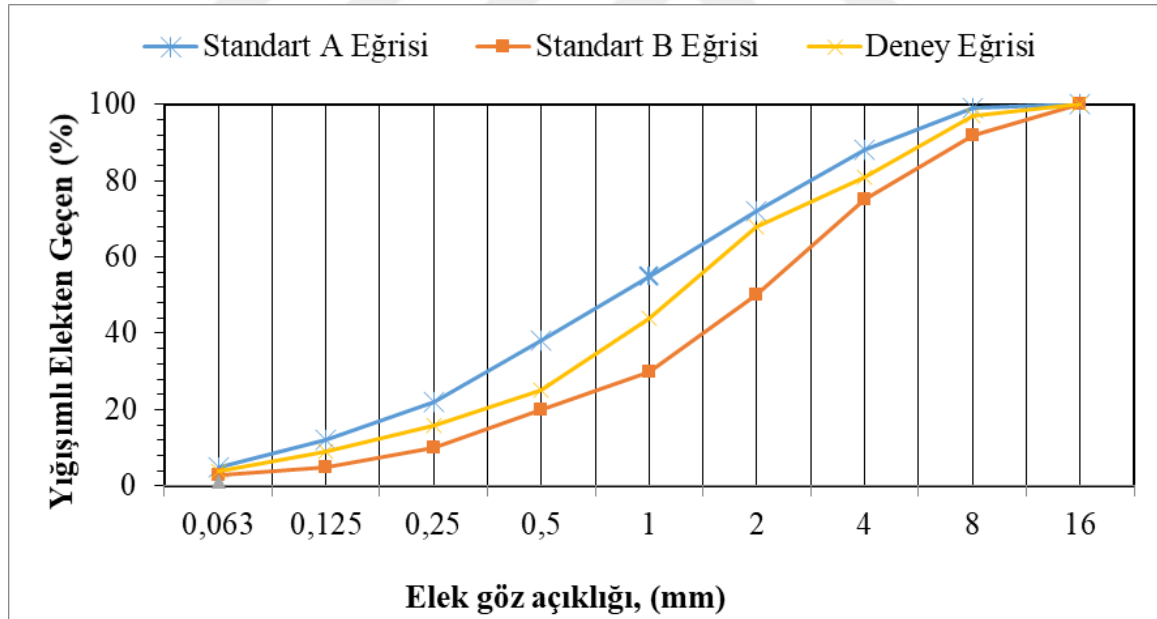
[illegible]

Agrega Deneyleri

Temin edilen dere agregalarının deneyleri Materyal Yöntem kısmında verilen standartlara göre yapıldı. Geopolimer beton üretiminde maksimum agregata tane çapı 8 mm olarak seçildi. Temin edilen agregalar üretilen karışımlara doğal halleri ile değil, tane sınıflarına ayrılmış olarak kullanıldı. Kullanılacak agregalar için ayarlanmış granülometri eğrisi ve her bir grup agreganın karışımdaki yüzdeleri sınır eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Üretilen numunelerde kullanılan agregalara ait elek analizi sonuçları, Tablo 11’de ve TS 802’de verilen sınır granülometri eğrileri ve numunelerin üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi, Şekil 38’de verildi. Ayrıca kullanılan dere agregaları üzerinde su emme ve özgül ağırlık deneyleri yapıldı. Su emme oranları, kuru özgül ağırlık ve doymuş kuru yüzey özgül ağırlık tayini her agregata tane sınıfı için yapıldı. Elde edilen sonuçlar Tablo 12’de verildi.

Tablo 11. Geopolimer Beton Üretiminde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
Elekten Geçen (%)	99,7	97	88,3	81,3	68,1	44,5	25	16	9	4



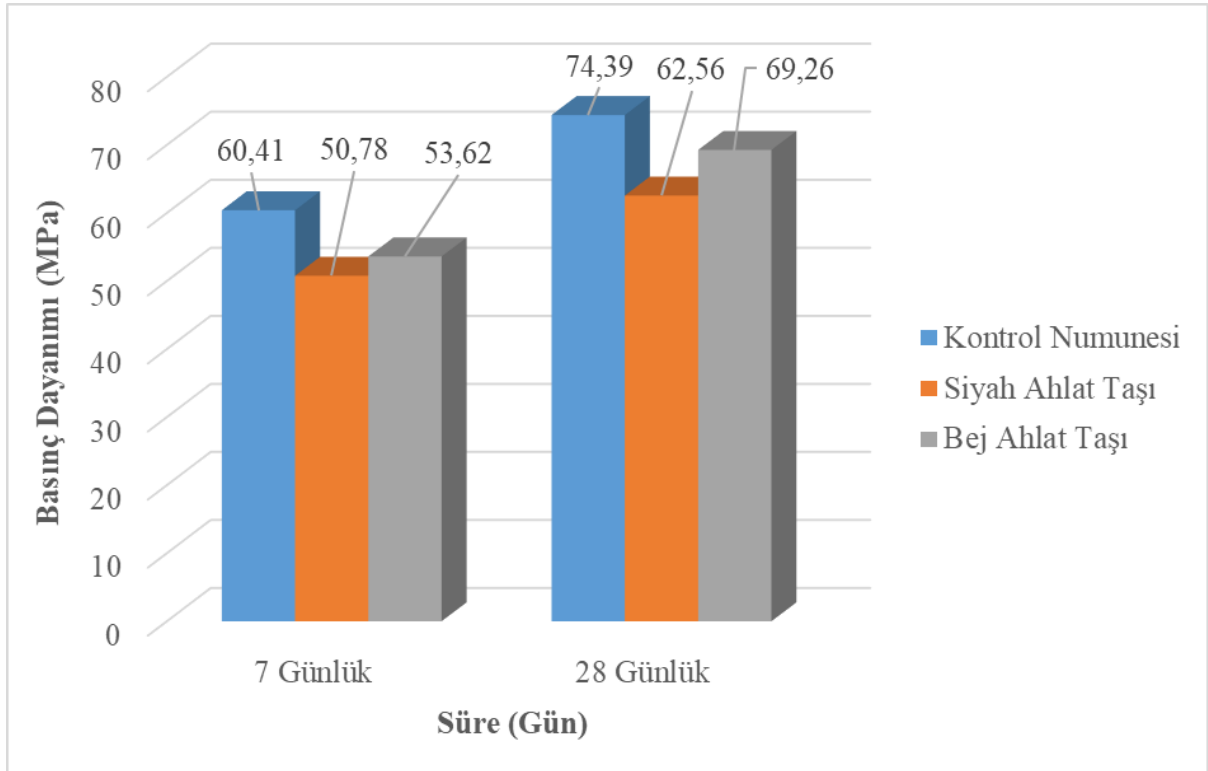
Şekil 38. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

Tablo 12. Agregaların Su Emme Oranı ve Özgöl Ağırlık Sonuçları

Özellik	0-4 mm	4-8 mm
Kuru birim ağırlık (gr/cm ³)	2,66	2,58
Doygun kuru yüzey birim ağırlık (gr/cm ³)	2,66	2,62
Su emme oranı (%)	0,26	1,66

Puzolanik Aktivite İndeksi

Öğütülmüş halde kullanılan Ahlat Taşlarının ASTM C311/C311-18 standartlarına göre puzolanik aktivite deneyi yapıldı. Üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanım sonuçları Şekil 39’da verilmiştir. Burada, bulunan 7 ve 28 günlük basınç dayanım sonuçları doğrultusunda Dayanım Aktivite İndeksi (DAİ) hesaplanmıştır.



Şekil 39. Puzolanik aktivite deney sonuçları.

Doğal puzolanlar için, dayanım indeksi TS 25 standartlarına göre en az 70, ASTM C618 standartlarına göre ise en az 75 olması gerektiği belirtilmektedir.

$$(A/B) \times 100 = \text{Dayanım aktivite indeksi} \quad (11)$$

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

Denklem 11’e göre puzolanik dayanım aktivite indeksi hesaplanmaktadır. Her bir deney grubu için 3 numune ile deney yapılmış olup, basınç dayanımlarının ortalaması alındı. Yapılan

hesaplamalar sonucunda; 7 günlük dayanım aktivite indeksi bej Ahlat Taşında 88,76, siyah Ahlat Taşında 84,06 ve 28 günlük dayanım aktivite indeksi bej Ahlat Taşında 93,1, siyah Ahlat Taşının 84,1 olarak bulundu. Bulunan sonuçlar, her iki standarda göre de değerlendirildiğinde Ahlat Taşları doğal puzolan olarak değerlendirilir.

Basınç Dayanımı

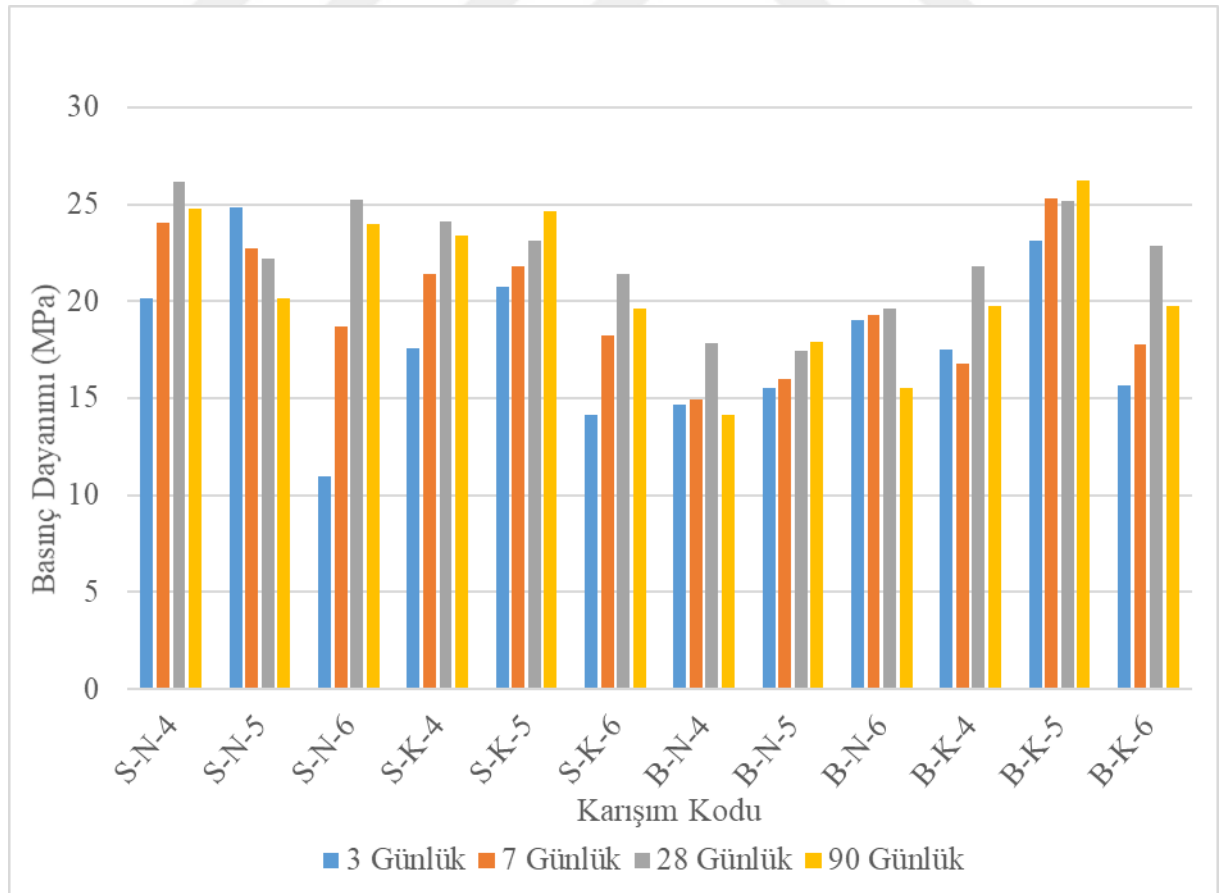
Ahlat Taşından geopolimer beton üretiminin araştırılması amacıyla yaptığımız ön deneyler sonucunda bazı parametreler tespit edilerek sabit tutuldu. Yapılan ön denemeler sonucunda KOH ve NaOH için optimum molarite olarak 10 M, üretilen numuneler için optimum kür koşullarının 90°C de 48 saat poşetli ısı kürü ve en uygun çözelti/bağlayıcı oranının 0,53 olduğu tespit edildi. Tüm üretilen karışımlara aynı kür metodu uygulandı. Tüm karışım dizaynlarında çözelti/bağlayıcı oranı 0,53 olarak sabitlenmesine rağmen uygun bir işlenebilirlik kıvamı elde etmek için karışımların tamamında %2 oranına kadar süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldı.

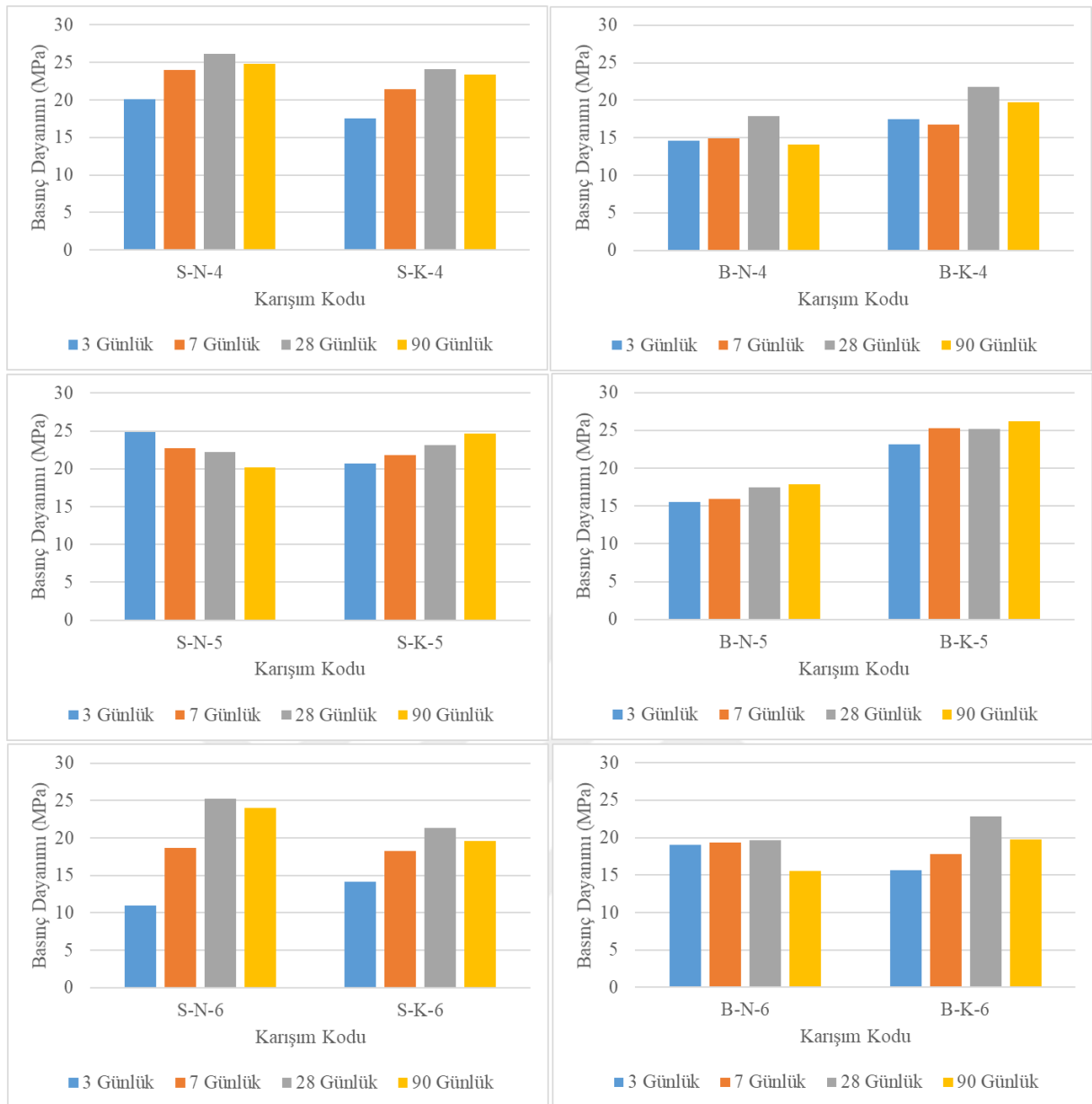
Ön deneyler sonucundan tespit edilip sabit tutulan değerleri dışında bu çalışmada; KOH + Na₂SiO₃ ve NaOH + Na₂SiO₃ olmak üzere 2 farklı alkali aktivatör, geopolimer beton üretiminde temel alümina silikat kaynağı olarak Ahlat Taşının iki farklı rengi olan bej ve siyah Ahlat Taşı, aynı zamanda kullanılan Ahlat Taşlarının 400-500-600 kg/m³ olmak üzere 3 farklı dozaj miktarı kullanıldı. Bu çalışma kapsamında toplamda 12 farklı grup geopolimer beton üretimi yapıldı.

Üretilen geopolimer beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri belirlendi. Basınç dayanımlarının tespiti için her karışım grubundan en az 3'er adet numune alınarak hesaplamalar yapıldı. Bulunan basınç dayanım sonuçları Tablo 13'te ve grafiksel gösterimleri Şekil 40-43'te verildi.

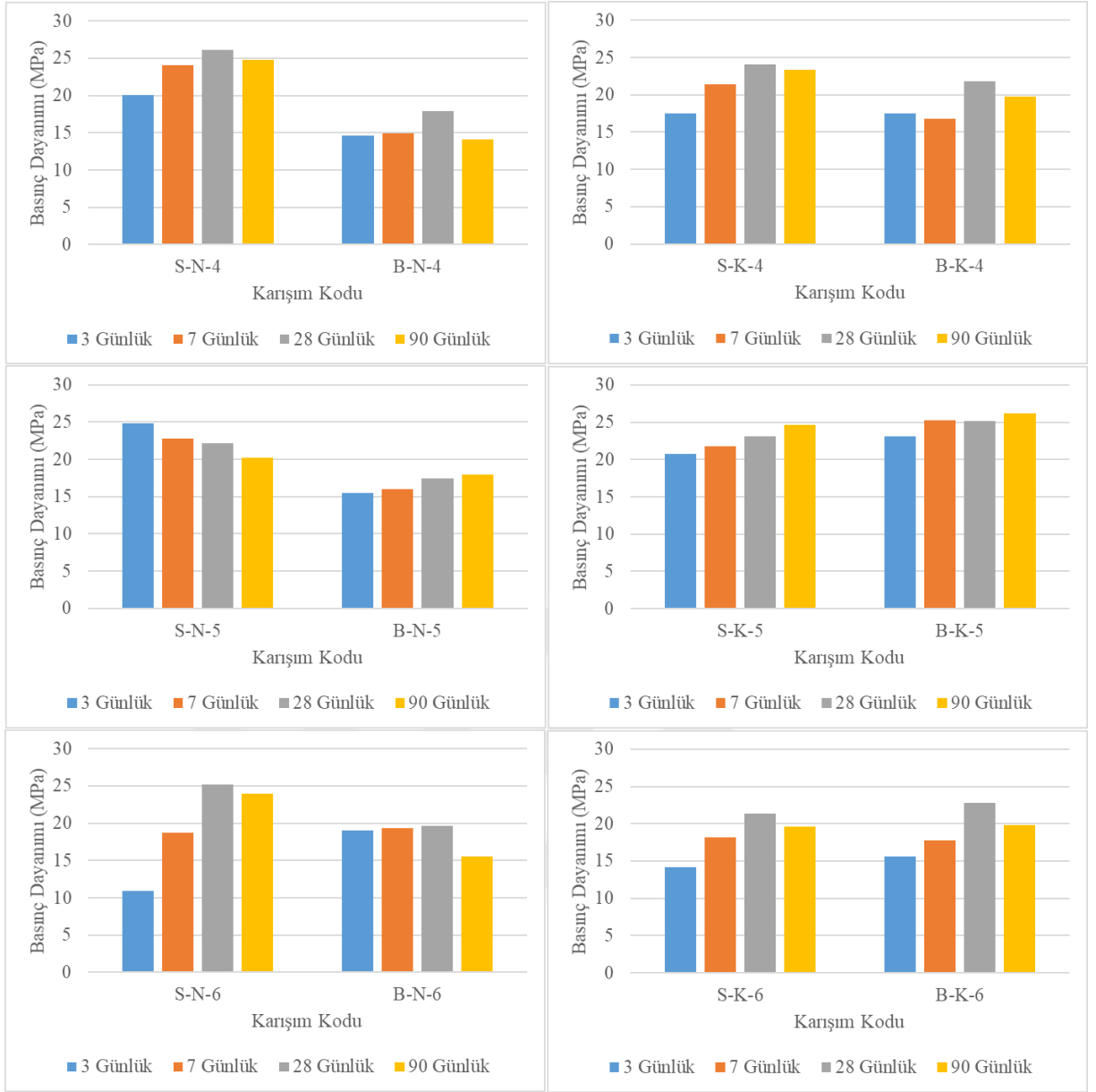
Tablo 13. Basınç Dayanım Sonuçları

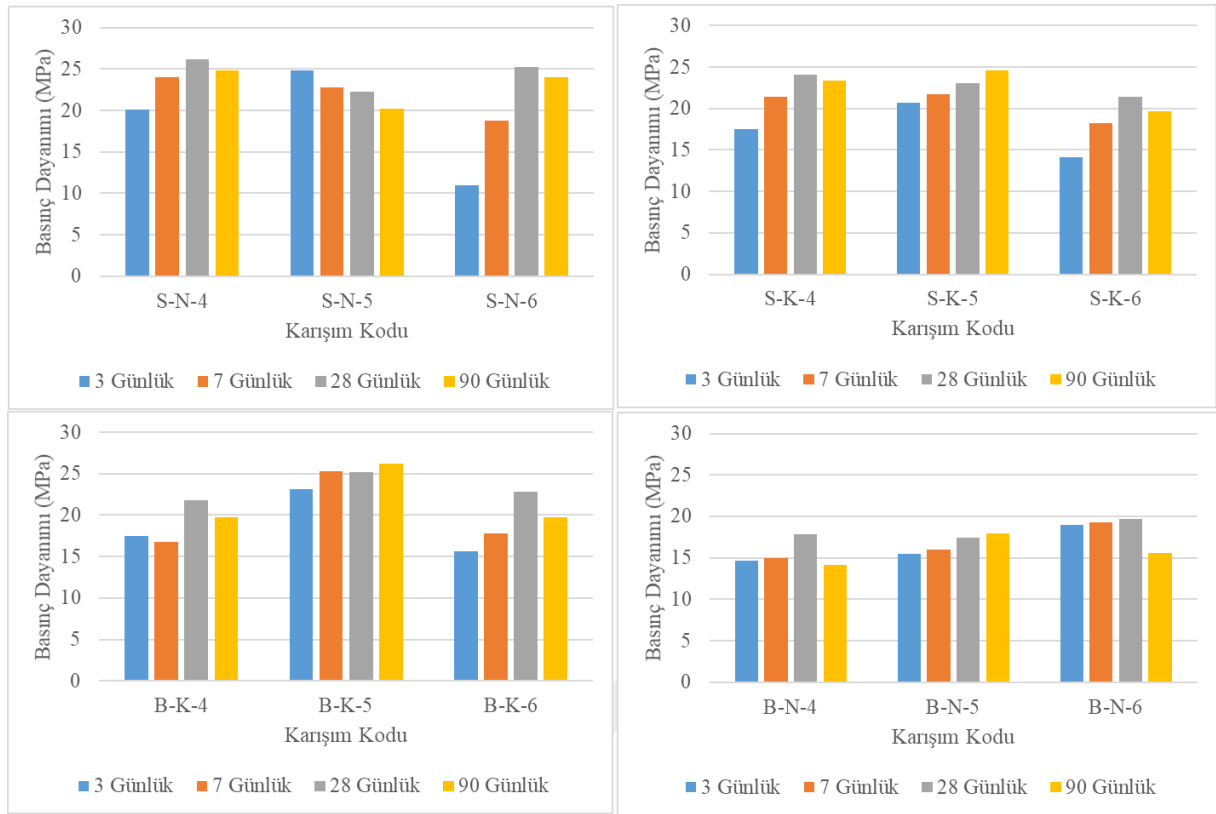
Karışım	Basınç Dayanımı Sonuçları (MPa)			
	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
S-N-4	20,12	24,03	26,14	24,79
S-N-5	24,84	22,75	22,21	20,18
S-N-6	10,94	18,72	25,21	23,96
S-K-4	17,55	21,39	24,12	23,40
S-K-5	20,74	21,77	23,09	24,64
S-K-6	14,15	18,21	21,38	19,64
B-N-4	14,65	14,91	17,87	14,12
B-N-5	15,51	15,96	17,43	17,92
B-N-6	19,01	19,31	19,65	15,54
B-K-4	17,50	16,77	21,81	19,77
B-K-5	23,14	25,28	25,19	26,23
B-K-6	15,65	17,79	22,83	19,78

**Şekil 40.** Tüm karışımlara ait geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.



Şekil 41. NaOH ve KOH içeren geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.





Şekil 43. 400-500-600 dozajlı geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçları.

Şekil 40'ta tüm karışımlara ait geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, 90 günlük nihai basınç dayanımlar doğrultusunda en iyi sonuçlar S-N'li karışımlar içerisinde S-N-4 karışımında, S-K'lı karışımlar içerisinde S-K-5 karışımında, B-N'li karışımlar içerisinde B-N-5 karışımında ve B-K'lı karışımlar içerisinde B-K-5 karışımında elde edilmiştir. Bu dört karışım ele alınarak 3 günlük basınç dayanım sonuçları referans alınırsa; S-N-4 karışımlı geopolimer betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerinde %19,43, 28 günlük basınç dayanım değerinde %29,92, 90 günlük basınç dayanım değerinde ise %23,21 oranında artış, S-K-5 karışımlı geopolimer betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerinde %4,97, 28 günlük basınç dayanım değerinde %11,33, 90 günlük basınç dayanım değerinde ise %18,80 oranında artış, B-N-5 karışımlı geopolimer betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerinde %2,90, 28 günlük basınç dayanım değerinde %12,38, 90 günlük basınç dayanım değerinde ise %15,54 oranında artış, B-K-5 karışımlı geopolimer betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerinde %9,25, 28 günlük basınç dayanım değerinde %8,86, 90 günlük basınç dayanım değerinde ise %13,35 oranında artış gözlenmiştir. Şekil 40'ta tüm geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri doğrultusunda en düşük basınç dayanım değeri 10,94 MPa ile 3 günlük S-N-6 karışımlı geopolimer betonlarda, en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,23 MPa ile 90 günlük B-K-5 karışımlı geopolimer betonlarda tespit edilmiştir.

Şekil 41 incelendiğinde, Ahlat Taşının rengi ve dozajlar sabit tutularak NaOH'lı ve KOH'lı karışımlar karşılaştırılmıştır. Şekil 41'de siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde

en düşük basınç dayanım değeri 10,94 MPa ile 3 günlük S-N-6 karışımı geopolimer betonlarda, en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,14 MPa ile 28 günlük S-N-4 karışımı geopolimer betonlarda elde edilmiştir. Genel olarak 28 ve 90 günlük nihai basınç dayanımları incelendiğinde, çoğunlukla NaOH'lı karışımlarla üretilen geopolimer beton numunelerin daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaştığı görüldü. 500 kg/m³ dozaj ile üretilen numunelerde KOH'lı karışımlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Sonuçta, siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen 400 ve 600 kg/m³ dozajlarda NaOH'lı ve 500 kg/m³ dozajda KOH'lı karışımlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Şekil 41'de bej renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde ise en düşük basınç dayanım değeri 14,12 MPa ile 90 günlük B-N-4 karışımı geopolimer betonlarda, en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,23 MPa ile 90 günlük B-K-5 karışımı geopolimer betonlarda elde edilmiştir. Genel olarak 28 ve 90 günlük nihai dayanımlar incelendiğinde, KOH'lı karışımlarla üretilen geopolimer beton numunelerin NaOH'lı karışımlarla üretilen geopolimer beton numunelere göre daha yüksek basınç dayanım değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Sonuçta bej renkli Ahlat Taşı ve farklı dozajlarda üretilen geopolimer beton numunelerde en iyi sonuçların KOH'lı karışımlarda elde edildiği görülmüştür. Bondar *et al.* (2011), doğal puzolanlarda atom numarası daha büyük olan K iyonunun, $Al(OH)_4^-$ 'ün bağlandığı büyük silikat ologomerlerin oluşumunu destekleyerek KOH çözeltileriyle üretilen geopolimerlerin, NaOH çözeltileriyle üretilen geopolimerlere göre daha yüksek basınç dayanımı elde edildiğini ve daha hızlı sertleşme gösterdiğini belirtmişlerdir. Arıöz (2015), geopolimer elde edilmesini ve katyon, pH ve ısı işlemin geopolimer üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ kullanarak uçucu külü aktifleştirmiştir. NaOH ve KOH'ı 3 farklı molaritede (4, 8 ve 12 M) kullanmıştır. Aynı zamanda ısı kürünü, 3 farklı sıcaklıkta (40, 80 ve 120 °C) ve 3 farklı sürede (6, 15 ve 24 saat) uygulamıştır. Sonuç olarak 90 günlük nihai basınç dayanım değerleri ele alındığında, 6, 15 ve 24 saat ve 40, 80 ve 120 °C'de bazı numunelerde NaOH kullanılan geopolimerlerde, bazı numunelerde ise KOH kullanılan geopolimerlerde daha yüksek basınç dayanımları elde etmiştir.

Şekil 42 incelendiğinde, karışımlarda dozaj ve çözelti tipi sabit tutularak hammadde olarak kullanılan Ahlat Taşının farklı renkleri karşılaştırılmıştır. Şekil 42'de 400-500-600 dozaj ve NaOH içeren numunelerde en düşük basınç dayanım değeri 10,94 MPa ile 3 günlük S-N-6 karışımı geopolimer betonlarda, en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,14 MPa ile 28 günlük S-N-4 karışımı geopolimer betonlarda elde edilmiştir. 28 ve 90 günlük nihai dayanımları incelendiğinde, NaOH'lı ve aynı dozajda üretilen karışımlarda genel olarak siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen geopolimer beton numunelerin daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaştığı görülmüştür. Şekil 42'de 400-500-600 dozaj ve KOH içeren numunelerde ise en düşük

basınç dayanım değeri 14,15 MPa ile 3 günlük S-K-6 karışimli geopolimer betonlarda, en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,23 MPa ile 90 günlük B-K-5 karışimli geopolimer betonlarda elde edilmiştir. 28 ve 90 günlük nihai dayanımları incelendiğinde, KOH'lı ve aynı dozajda üretilen karışımlarda siyah ve bej renk Ahlat Taşı ile üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanım sonuçlarında birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Şekil 43 incelendiğinde, karışımlarda kullanılan Ahlat Taşı renkleri ve çözelti tipleri sabit tutularak dozaj miktarları incelenmiştir. Şekil 43'te siyah renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren karışımlarda en düşük basınç dayanımı 10,94 MPa ile 3 günlük S-N-6 karışımında, en yüksek basınç dayanımı 26,14 MPa ile 28 günlük S-N-4 karışımında, siyah renk Ahlat Taşı ve KOH içeren karışımlarda en düşük basınç dayanımı 14,15 MPa ile 3 günlük S-K-6 karışımında, en yüksek basınç dayanımı 26,64 MPa ile S-K-5 karışımında, bej renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren karışımlarda en düşük basınç dayanımı 14,12 MPa ile B-N-4 karışımında, en yüksek basınç dayanımı 19,65 ile B-N-6 karışımında, bej renk Ahlat Taşı ve KOH içeren karışımlarda en düşük basınç dayanımı 15,65 MPa ile B-K-6 karışımında, en yüksek basınç dayanımı 26,23 MPa ile B-K-5 karışımında elde edilmiştir. 90 günlük nihai dayanımlar incelendiğinde, çoğunlukla 500 dozaj ile üretilen geopolimer beton numunelerde daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Karadağ (2021) öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruf bazlı geopolimer beton üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmada 400-500-600 kg/m³ olmak üzere 3 farklı dozaj miktarı ve alkali aktivatör/bağlayıcı olarak 0,45 ve 0,55 oranlarını kullanmıştır. Sonuç olarak 150. gün basınç dayanım sonuçlarına göre bağlayıcı miktarı arttıkça basınç dayanımlarının arttığını ifade etmiştir. Olcay (2021) yüksek oranda cüruf içeren geopolimer beton üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmasında alkali aktivatör/bağlayıcı oranı olarak 0,45 ve 0,55 oranlarını ve bağlayıcı miktarı olarak ise 400-500-600 kg/m³ olmak üzere 3 farklı bağlayıcı miktarı kullanmıştır. Sonuç olarak 150 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre hem 0,45 hem de 0,55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranında en yüksek basınç dayanımını 400 kg/m³ bağlayıcı miktarında, en düşük basınç dayanımını ise 600 kg/m³ bağlayıcı miktarında elde etmiştir. Uğurlu (2020), yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda geri dönüştürülmüş agreganın etkisini incelemiştir. Kontrol numunelerinde normal agregaya kullanmıştır. Çalışmasında 300-400-500 kg/m³ olmak üzere 3 farklı dozaj miktarı kullanmıştır. Sonuç olarak basınç dayanımlarında, dozaj miktarı arttıkça artış, geri dönüştürülmüş agregaya (GDA) arttıkça düşüş elde etmiştir.

Tüm karışımların basınç dayanım değerleri incelendiğinde 400 ve 600 kg/m³ dozajla üretilen geopolimer beton karışımlarında 28. günde en yüksek basınç dayanımları elde edilirken 90. günde basınç dayanımlarında düşüşler görüldü. 500 kg/m³ dozajla üretilen geopolimer

beton karışımlarında ise 90. güne kadar genel olarak sürekli dayanım artışı olduğu gözlenirken sadece S-N-5 karışımı geopolymer betonlarda en yüksek basınç dayanım değerine 3. günde ulaşılmış olup daha sonrasında ise 90. güne kadar olan basınç dayanım değerlerinin tamamında %2-10 oranında düşüş gözlenmiştir. Genel olarak tüm karışımların basınç dayanım değerleri incelendiğinde en optimum dozaj miktarının 500 kg/m^3 olduğu sonucuna varılmıştır.

Tüm karışım tipleri incelendiğinde siyah Ahlat Taşı ile üretilen geopolymer beton karışımların genellikle daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bunun nedenin ise Ca ve Fe oranının siyah Ahlat Taşında daha fazla olmasından kaynaklı olarak CaCO_3 'ün yüksek dayanıma etkisi ve Fe_2O_3 moleküllerinin alüminosilikat yapılarının yanında ferrisilikatlar oluşturması olarak düşünülmektedir. Kaze *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada Fe oranı fazla olan alüminosilikat malzemelerden geopolymer üretmişlerdir ve sonuç olarak mikro yapı ve eğilme mukavemetleri üzerinde etkisi olan ferrisilikatların oluşumunu belirlemişlerdir. Bu oluşumların geopolymer kompozit malzemelerin üzerinde önemli bir rolü olduğunu ve basınç dayanımlarına olumlu yönde katkı yaptığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Aziz *et al.* (2021) yaptıkları geopolymerizasyon çalışmasında öğütülmüş yüksek fırın cürufunun etkisini incelerken silika ve alümina bölgelerinde Ca yoğunluğunun fazla olduğunu tespit etmişler, oluşan tobermorit (C-S-H) ve CaCO_3 'ün basınç dayanımına olumlu katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Siyah Ahlat Taşıyla üretilen geopolymer betonlarda genellikle NaOH'lı karışımların daha iyi sonuçlar verdiği, bej Ahlat Taşıyla üretilen geopolymer betonlarda ise genellikle KOH'lı karışımların daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Kimyasal analizler ve elementel analiz sonuçlar doğrultusunda bej Ahlat Taşındaki Si oranı daha fazladır. Fakat Si oranı fazla olmasına rağmen basınç dayanımları çoğunlukla siyah Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarından düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise fazla bulunan Si, tepkimeye girecek alkali aktivatör bulamadığından dolayı karışımda filler görevi üstlendiği düşünülmektedir. Mikro ve nano silis katkıları geopolymerizasyon tepkimelerinde filler (dolgu) malzemesi olarak yer aldığı tahmin edilmektedir (Deb *et al.* 2016, Zhang *et al.* 2017).

Şekil 40'teki grafikte görüldüğü üzere tüm karışım tiplerinde nihai dayanımların en az %78'ini erken yaşlarda (7 günlük dayanım) kazandıkları gözlenmektedir. Benzer şekilde Haddad and Alshbuol (2016) yaptıkları çalışmada doğal puzolan kullanarak üretmiş oldukları geopolymer betonların durabilite, mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişler ve sonuçta üretmiş oldukları numunelerin 3 günlük kür boyunca kazanmış olduğu erken dayanım, nihai dayanımlarının %70'ini geçtiğini tespit etmişlerdir.

Vijai *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak uçucu kül esaslı geopolymer beton üretmişlerdir. Üretmiş oldukları

numunelere ortam kürü ve 60°C'lik ısıtılma kür uygulanmış ve sonuç olarak ısıtılma kür uygulanan numunelerin basınç dayanımlarının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Isıtılma kür uygulanan numunelerin ilk 7 günlük basınç dayanımlarını 28,31 MPa, 28 günlük basınç dayanımlarını ise 33,22 MPa olarak bulmuşlardır.

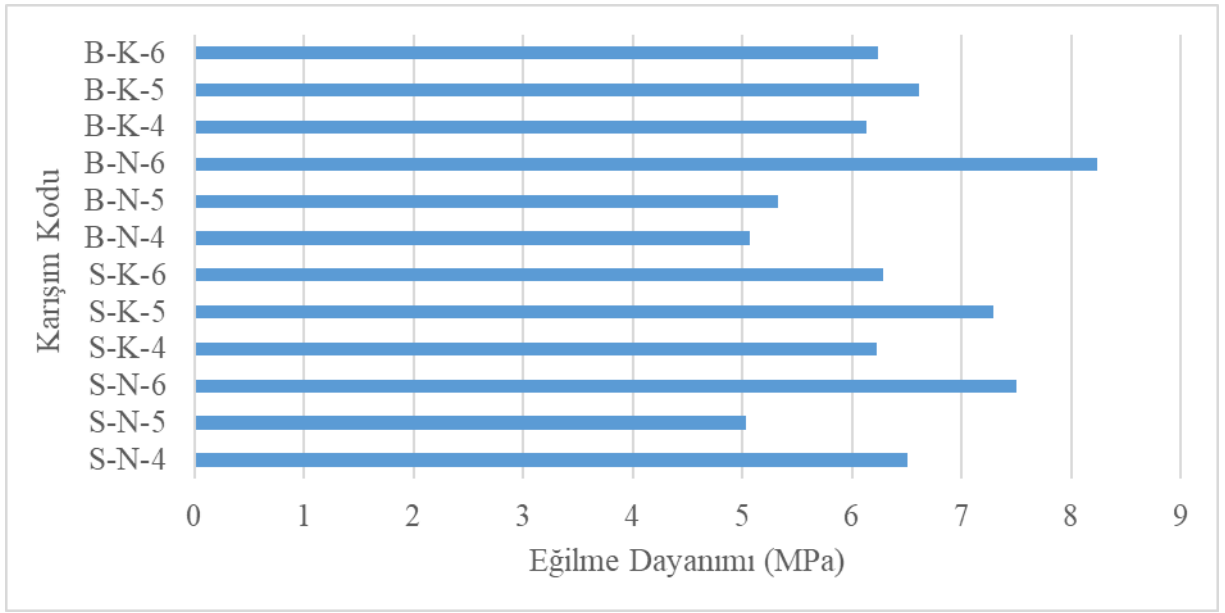
Akbulut (2020) çalışmasında perlit esaslı geopolimer betonlarda kırmızı çamur ve yüksek fırın cürufunun etkisini araştırmıştır. Numunelerde perlitin yerine ağırlıkça %10-30 arasında yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur eklemiştir. Üretilen numunelerin 150 günlük nihai basınç dayanımlarının %85'ini 3 günlük basınç dayanımlarında kazandığı görülmektedir.

Eğilme Dayanımı

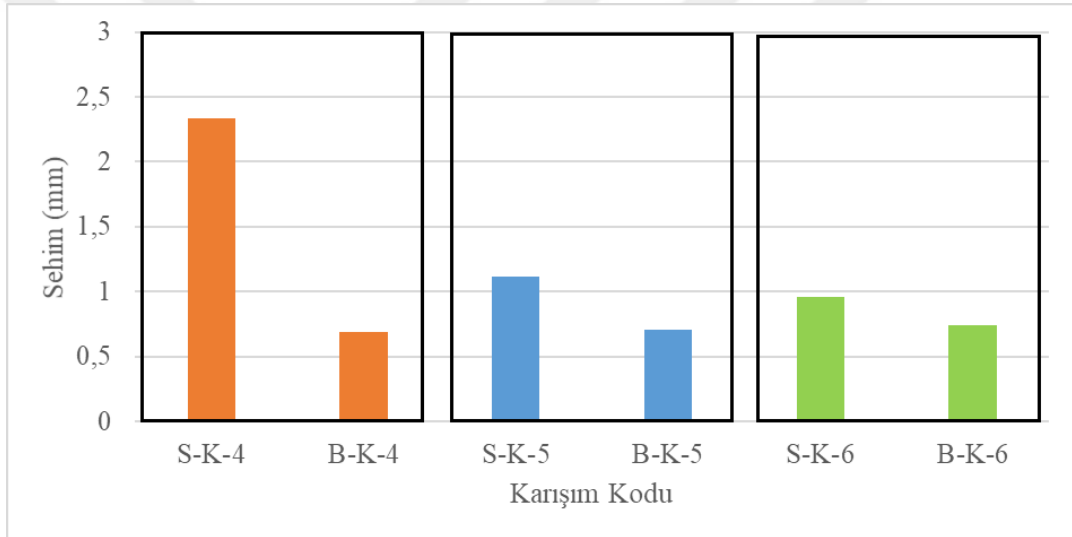
Çalışma kapsamında üretilen farklı karışım türlerine ait geopolimer beton numunelerin eğilme sonuçları ve sehim hareketleri Tablo 14'te ve grafiksel gösterimleri ise Şekil 44, 45 ve 46'da verildi.

Tablo 14. Geopolimer Beton Numunelerin Eğilme Dayanım ve Sehimi Değerleri

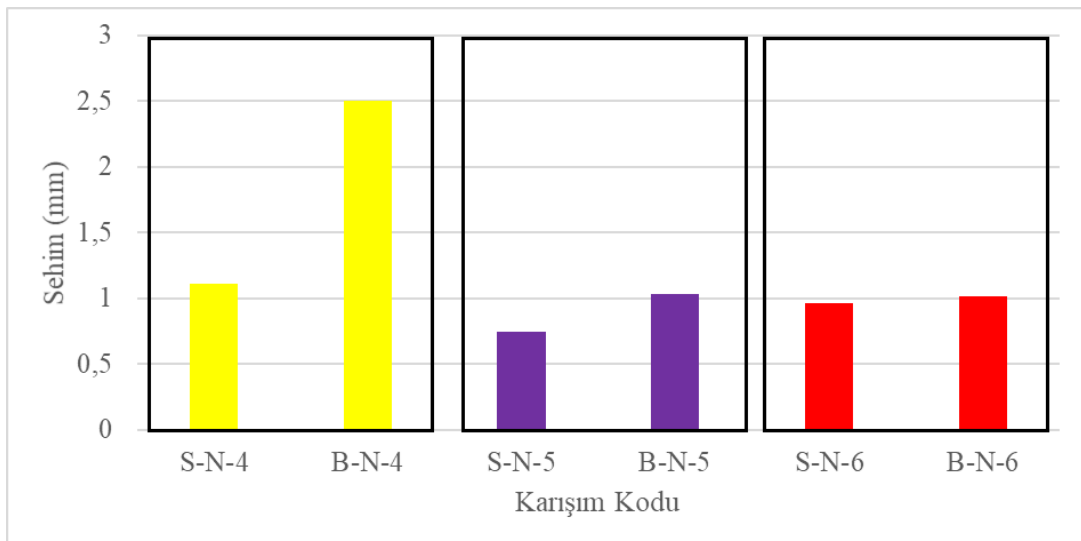
Karışım	Eğilme Dayanımı (MPa)	Sehim (mm)
S-N-4	6,51	1,107
S-N-5	5,03	0,747
S-N-6	7,50	0,961
S-K-4	6,23	2,333
S-K-5	7,29	1,114
S-K-6	6,29	0,958
B-N-4	5,07	2,501
B-N-5	5,33	1,028
B-N-6	8,24	1,011
B-K-4	6,13	0,690
B-K-5	6,61	0,705
B-K-6	6,24	0,740



Şekil 44. Geopolimer beton numunelerin eğilme dayanım sonuçları.



Şekil 45. KOH içeren karışımların sehim değerleri.



Şekil 46. NaOH içeren karışımların sehim değerleri.

Şekil 44'te tüm karışımların eğilme dayanım değerleri incelendiğinde; %0,8'lik gibi küçük bir değişim ihmal edilirse, en düşük eğilme dayanım değerleri S-N-5 karışımında 5,03 MPa ve B-N-4 karışımında ise 5,07 MPa olarak, en yüksek eğilme dayanım değeri ise B-N-6 karışımında 8,24 MPa olarak tespit edildi. Sehim ölçülerinde ise en düşük sehim B-K-4 karışımında 0,690 mm, en yüksek sehim ise B-N-4 karışımında 2,501 mm olarak görüldü.

Tüm karışım tipleri incelendiğinde KOH'lı karışımlarda en yüksek eğilme dayanım değerleri 500 dozaj ile üretilen geopolimer betonlarda, NaOH'lı karışımlarda ise en yüksek eğilme dayanım değeri 600 dozaj ile üretilen geopolimer betonlarda olduğu görüldü.

Genel olarak NaOH ile üretilen karışımlarda dozaj arttıkça eğilme dayanımında artış gözlemlendi. KOH ile üretilen karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 500 kg/m³ dozaj ile üretilen numunelerde görülmüştür.

Şekil 45 ve 46 incelendiğinde S-K-4'ün B-K-4'ten, S-K-5'in B-K-5'ten, S-K-6'nın ise B-K-6'dan daha yüksek sehim değerleri olduğu görülmüştür. Benzer şekilde bir inceleme yapıldığında B-N-4'ün S-N-4'ten, B-N-5'in S-N-5'ten, B-N-6'nın ise S-N-6'dan daha yüksek sehim değerleri olduğu görülmüştür.

Başçık (2019), kalsine edilmiş doğal puzolan esaslı geopolimer harç üzerine yaptığı çalışmada, geopolimer harcın 3 günlük kür sonrası eğilme dayanım sonuçlarının 7,2 MPa olduğunu belirtmiştir.

Kuranlı (2020), farklı bağlayıcı ve lif içeren geopolimer betonlar üzerine araştırma yapmıştır. %100 cüruf bağlayıcı serilerde ortalama olarak 6,5 MPa, %50 kül ikameli serilerde ise ortalama olarak 6 MPa'lık eğilme dayanım sonuçları elde etmiştir.

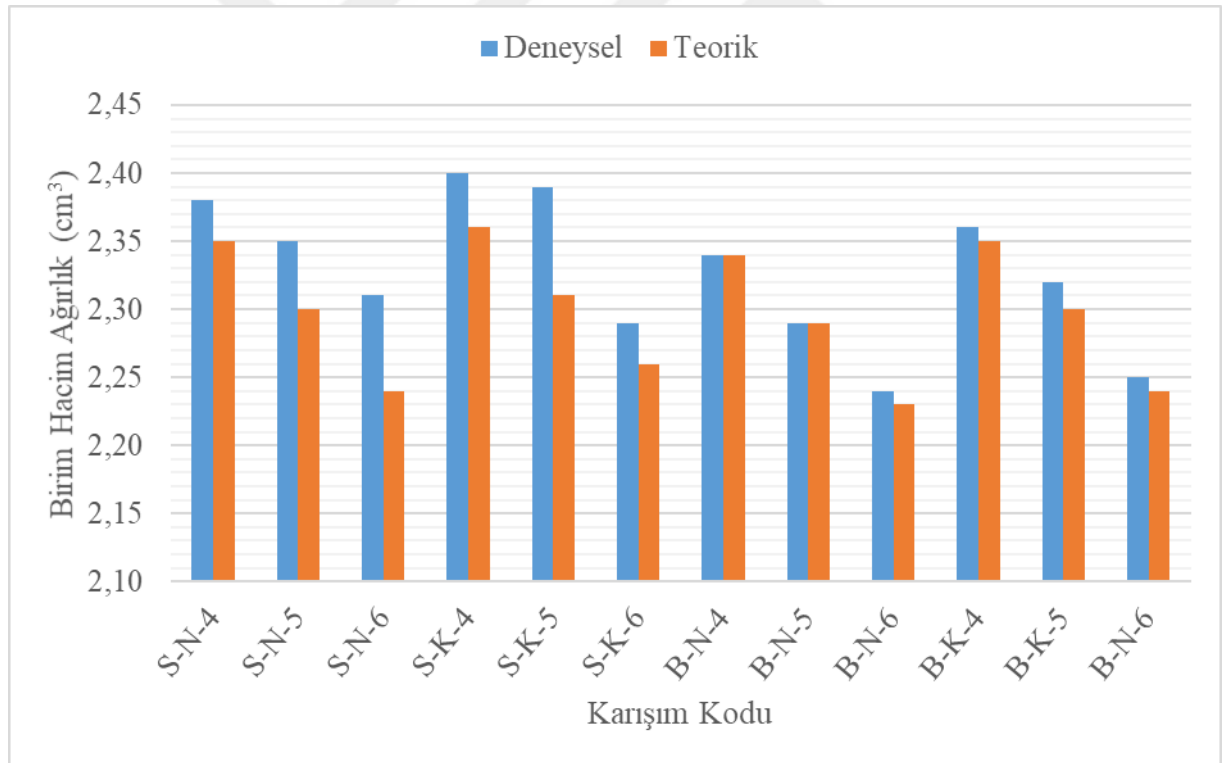
Bu çalışmada bulunan eğilme dayanım sonuçları genel olarak incelendiğinde literatür ile paralel ve kabul edilebilir olduğu görülmektedir (Manjunatha *et al.* 2014; Arie *et al.* 2017; Jordan *et al.* 2021).

Birim Hacim Ağırlık ve Kıvam

Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretmiş olduğumuz numunelerin taze birim hacim ağırlık sonuçları belirlendi ve ayrıca üretilen tüm numunelerin kıvamlarıyla ilgili bilgi edinmek amacıyla yayılma tablası deneyleri yapıldı. Bulunan sonuçlar Tablo 15 ve Şekil 47'de verildi.

Tablo 15. Geopolimer Beton Numunelerin Taze Birim Hacim Ağırlık ve Yayılma Değerleri

Karışım	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yayılma (cm)
S-N-4	2,38	10,5
S-N-5	2,35	12,6
S-N-6	2,31	14,8
S-K-4	2,40	11,5
S-K-5	2,39	14,9
S-K-6	2,29	20,9
B-N-4	2,34	11,5
B-N-5	2,29	12,6
B-N-6	2,24	13,5
B-K-4	2,36	11,4
B-K-5	2,32	14,4
B-K-6	2,25	19,0

**Şekil 47.** Üretilen numunelerin deneysel ve teorik taze birim hacim ağırlık sonuçları.

Şekil 47’de karışımların tamamı incelendiğinde; KOH’lı karışımların (S-N-6 hariç) birim hacim ağırlıkları NaOH’lı karışımlara göre daha fazla olduğu, siyah Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin bej Ahlat Taşı ile üretilen numunelere göre birim hacim ağırlıklarının daha fazla olduğu ve üretilen numunelerde dozaj miktarı arttıkça birim hacim ağırlıklarının düştüğü tespit

edildi. Bunun nedeni ise Ahlat Taşlarının yoğunluklarının agregalara göre daha düşük olmasıdır.

Şekil 47 ve Tablo 15’te görüldüğü üzere üretilen geopolimer betonların birim hacim ağırlıkları 2,24-2,43 gr/cm³ arasında değişmektedir. Geopolimer beton üretiminde perlit ve perlitin yerine ağırlıkça farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur kullanılmıştır. Üretilen numunelerin birim hacim ağırlıkları 2,15-2,36 gr/cm³ arasında bulunmuştur. En düşük birim hacim ağırlık %100 perlit kullanılan numunede, en fazla birim hacim ağırlık ise %30 kırmızı çamur ikameli numunelerde elde edilmiştir (Akbulut 2020). Bir başka çalışmada ise volkanik kül esaslı geopolimer beton üretilmiş ve volkanik külün yerine ağırlıkça %30 oranında yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur, %1-3 arasında ise nano malzemeler kullanılmıştır. Geopolimer betonların birim hacim ağırlıkları 2200-2355 kg/m³ arasında bulunmuştur (Yegin 2020).

Geopolimer betonların hacimsel yoğunlukları mikroyapılarında bulunan boşluklara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mikro silis ve nano silis katkıları, hacimsel yoğunlukları artırması; bu katkıların geopolimerizasyon tepkimeleri artırması ve filler (dolgu) malzemesi olarak yer almasından kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir (Deb *et al.* 2016, Zhang *et al.* 2017).

Karışımların tamamı incelendiğinde; Tablo 15’te görüldüğü üzere aynı renk Ahlat Taşı ve aynı dozaj ile üretilen geopolimer beton numunelerde çoğunlukla KOH’lı karışımların NaOH’lı karışımlara göre yayılma tablasındaki yayılma değerlerinin daha fazla olduğu, aynı tip çözelti ve aynı dozaj ile üretilen geopolimer beton numunelerde çoğunluk olarak siyah Ahlat Taşı ile üretilen karışımların bej Ahlat Taşı ile üretilen numunelere göre yayılma tablasındaki yayılma değerlerinin daha fazla olduğu ve aynı renk ve aynı çözelti tipinin kullanılmasıyla üretilen karışımlarda dozaj miktarı arttıkça yayılma tablasındaki yayılma değerinin arttığı görülmektedir. Sonuçta yayılma tablasındaki yayılma değeri arttıkça viskozitesi düşük bir geopolimer beton elde edilmektedir.

Kılcal Su Emme

Beton malzemeler farklı zamanlarda ve muhtelif durumlarda su ve farklı sıvı türleriyle temas edebilirler. Betonun bu tür farklı sıvılar ile temas etmesi betonda olumsuz etkilere neden olabilir. Beton malzemeler içerisinde sıvılar, kılcallık olarak bilinen fiziksel bir metotla ilerler. Beton malzemenin alt yüzeyinin sıvı ile temas etmesini takiben zaman ilerledikçe (t) sıvı beton içerisinde yol alarak yükselir. Zamana bağlı olarak yükselen sıvı değerinin veya numune ağırlıklarının tayini ile kılcal geçirimsizlik (kapiler) katsayısı belirlenir.

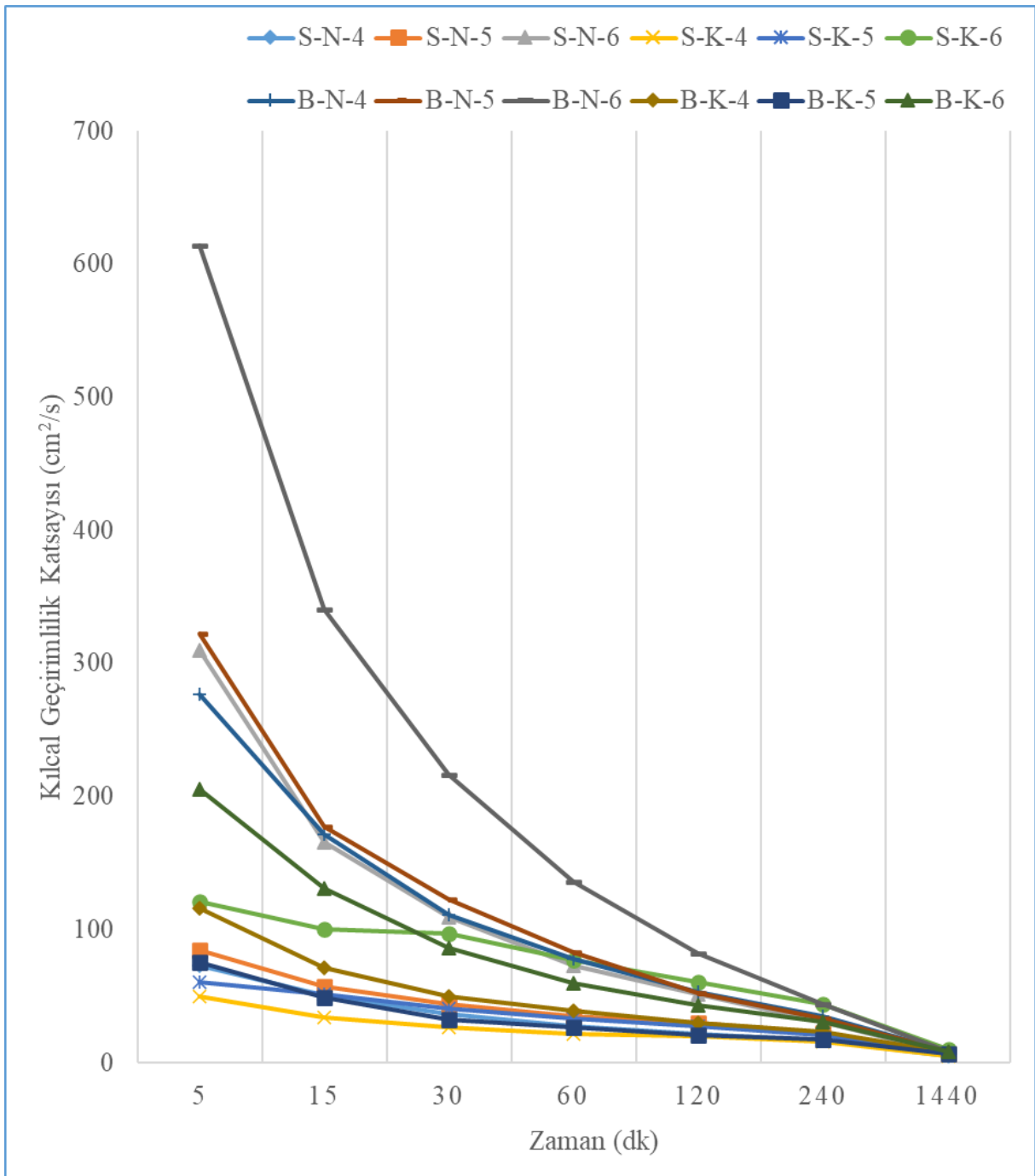
Bu çalışma kapsamında 12 farklı karışım şeklinde hazırlanan geopolimer beton numunelerin kılcal geçirimlilik deney sonuçları Tablo 16 ve Tablo 17’de verildi. Ayrıca bulunan sonuçların değerlendirildiği veriler Şekil 48 ’de verildi.

Tablo 16. Geopolimer Beton Numunelerin Kılcal Su Emme Miktarları

Karışım	Kuru Ağırlık	Kılcal Su Emme Miktarları (gr)						
		5 dk	15 dk	30 dk	60 dk	120 dk	240 dk	1440 dk
S-N-4	278,77	282,47	284,09	285,18	286,62	288,62	290,86	294,59
S-N-5	276,26	280,25	281,92	283,29	285,12	287,78	290,40	294,87
S-N-6	258,13	265,75	267,78	269,21	270,91	273,36	274,82	277,08
S-K-4	281,39	284,45	285,78	286,86	288,38	290,77	293,31	298,30
S-K-5	269,86	273,23	275,23	276,65	278,55	281,04	283,40	288,70
S-K-6	267,32	272,08	274,82	277,75	280,47	283,79	287,16	290,35
B-N-4	267,31	274,51	277,13	278,49	280,53	282,79	284,95	288,98
B-N-5	261,19	268,96	271,17	272,94	274,83	276,55	278,52	281,97
B-N-6	252,26	260,92	264,03	265,80	267,69	269,4	270,13	271,68
B-K-4	278,56	283,22	284,91	286,07	287,96	290,2	292,90	297,77
B-K-5	267,80	271,57	273,04	273,87	275,48	277,47	280,24	286,61
B-K-6	256,50	262,71	265,09	266,37	268,13	270,47	273,02	278,06

Tablo 17. Geopolimer Beton Numunelerin Kılcal Geçirimlilik Katsayısı Değerleri

Karışım	Kılcal Geçirimlilik Katsayısı (cm ² /sn)						
	K ₅ X 10 ⁻⁶	K ₁₅ X 10 ⁻⁶	K ₃₀ X 10 ⁻⁶	K ₆₀ X 10 ⁻⁶	K ₁₂₀ X 10 ⁻⁶	K ₂₄₀ X 10 ⁻⁶	K ₁₄₄₀ X 10 ⁻⁶
S-N-4	73,01	50,32	36,52	27,39	21,56	16,24	4,63
S-N-5	84,91	56,95	43,93	34,89	29,49	22,22	6,41
S-N-6	309,68	165,55	109,13	72,59	51,55	30,95	6,65
S-K-4	49,94	34,26	26,60	21,72	19,55	15,79	5,30
S-K-5	60,57	51,27	40,98	33,56	27,78	20,37	6,57
S-K-6	120,84	100,00	96,70	76,85	60,28	43,74	9,82
B-N-4	276,48	171,44	111,10	77,67	53,25	34,57	8,70
B-N-5	321,99	177,07	122,72	82,69	52,43	33,37	8,00
B-N-6	614,04	340,53	216,60	136,11	82,01	44,18	8,55
B-K-4	115,82	71,68	50,13	39,27	30,11	22,85	7,56
B-K-5	75,80	48,81	32,75	26,21	20,78	17,19	6,55
B-K-6	205,68	131,18	86,59	60,11	43,37	30,32	8,61



Şekil 48. Geopolimer betonların zamana bağlı olarak kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimini gösteren çizgi ve sütun grafikleri.

Şekil 48’de görüleceği üzere tüm karışım tiplerinde kılcal yolla su emme miktarları ilk dakikalarda büyük bir hızla, süre ilerledikçe ise gitgide daha düşük hızlarda artış göstermektedir. En düşük kılcal geçirimsizlik katsayısı S-K-4 karışımlı numunelerde, en yüksek kılcal geçirimsizlik katsayısı ise B-N-6 karışımlı numunelerde olmuştur.

İlk 5 dakikada kılcal yolla emilen su miktarları; S-N-4’te 3,7 gr, S-N-5’te 3,99 gr, S-N-6’da 7,62 gr, S-K-4’te 3,06 gr, S-K-5’te 3,37 gr, S-K-6’da 4,76 gr, B-N-4’te 7,2 gr, B-N-5’te 7,77 gr, B-N-6’da 8,66 gr, B-K-4’te 4,66 gr, B-K-5’te 3,77 gr ve B-K-6’da 6,21 gr olarak ölçüldü. Sonuçlardan da görüleceği üzere KOH’lı karışımlardaki su emme miktarı NaOH’lı

karışımlara göre daha az olduğu, fakat NaOH'lı karışımların kılcal geçirimsizlik katsayılarının zaman ilerledikçe hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Yine sonuçlardan görüleceği üzere üretilen numunelerin dozaj miktarı arttıkça su emme miktarı da artmaktadır. Yine tüm karışım tiplerinin sonuçları incelendiğinde bej Ahlat Taşı ile üretilen geopolimer betonların su emme miktarları siyah Ahlat Taşı ile üretilen geopolimer betonlara göre daha fazladır.

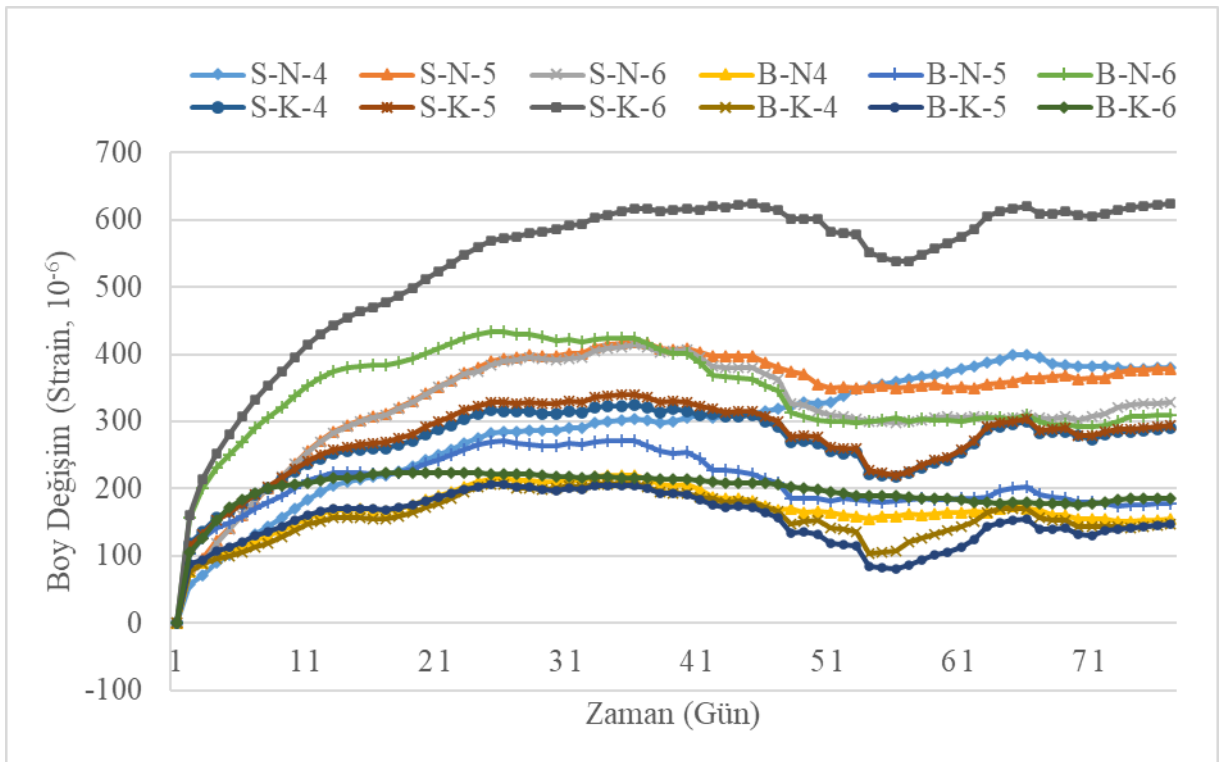
Başçık (2019), tras ile üretilen geopolimerlerin aynı basınç dayanımındaki çimento harcına göre durabilite özelliklerinin (kılcal su emme, dayanım kazanma hızı, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık) daha üstün olduğunu ifade etmiştir.

Karşılaştırma yapmak adına, piyasada en çok tercih edilen bazı yapı malzemelerinin kılcal su emme değerleri ($10^{-3} \times \text{cm} / \text{sn}^{0,5}$) verilmiştir; kalker: 0,56-0,83, granit: 0,01-0,17, normal beton: 5,75-7,64, bims beton: 5,41-6,47 ve gaz beton: 12,12- 13,50 (Turgut 2018). Bulunan sonuçlar değerlendirildiğinde bu çalışma kapsamında üretmiş olduğumuz numunelerin kılcal su emme değerleri piyasa da en çok tercih edilen yapı malzemelerinin kılcal su emme değerlerinden genel olarak daha düşüktür.

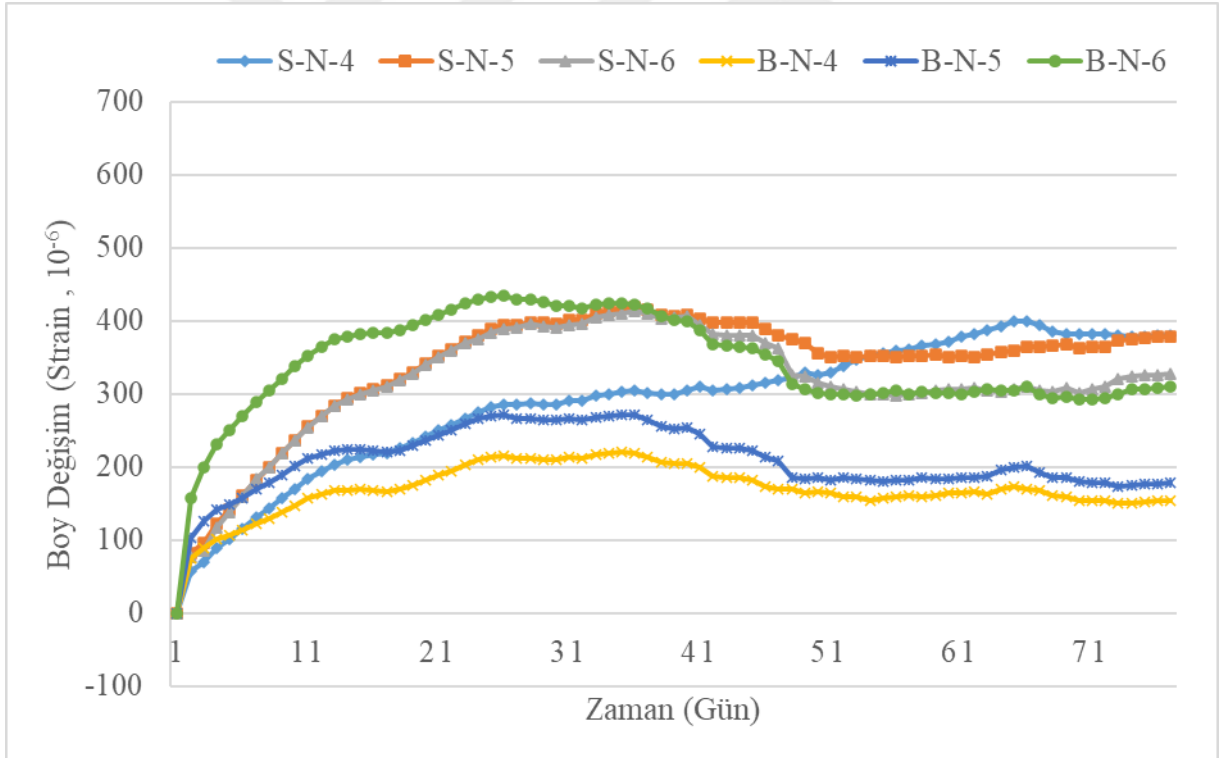
Malzemelerin içerisinde boşluk oranı ne kadar fazla ise kapiler su emme miktarı da o kadar yüksek, boşluk oranı ne kadar az ise kapiler su emme miktarı da o kadar düşük olur. Malzemenin kılcal geçirimsizliği; yani kapiler olarak su emme miktarları, malzemenin su ile temas eden yüzey alanına, zamana, boşluklarına ve kuruluk oranına bağlıdır (Reinhardt and Jooss 1998). Malzemenin kapiler su emme miktarları, malzemenin bünyesinde bulunan gözle görülen veya görülemeyen boşluklarla alakalıdır (Akyıldız 2012).

Boy Değişimi

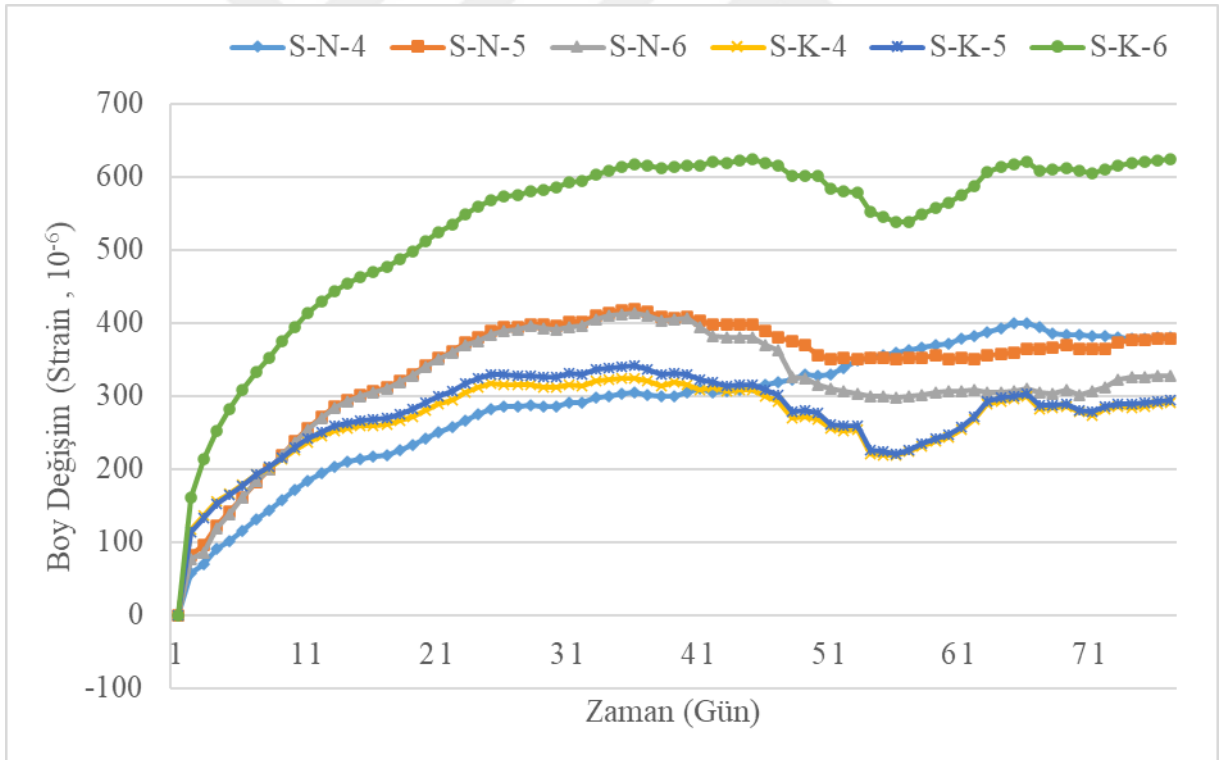
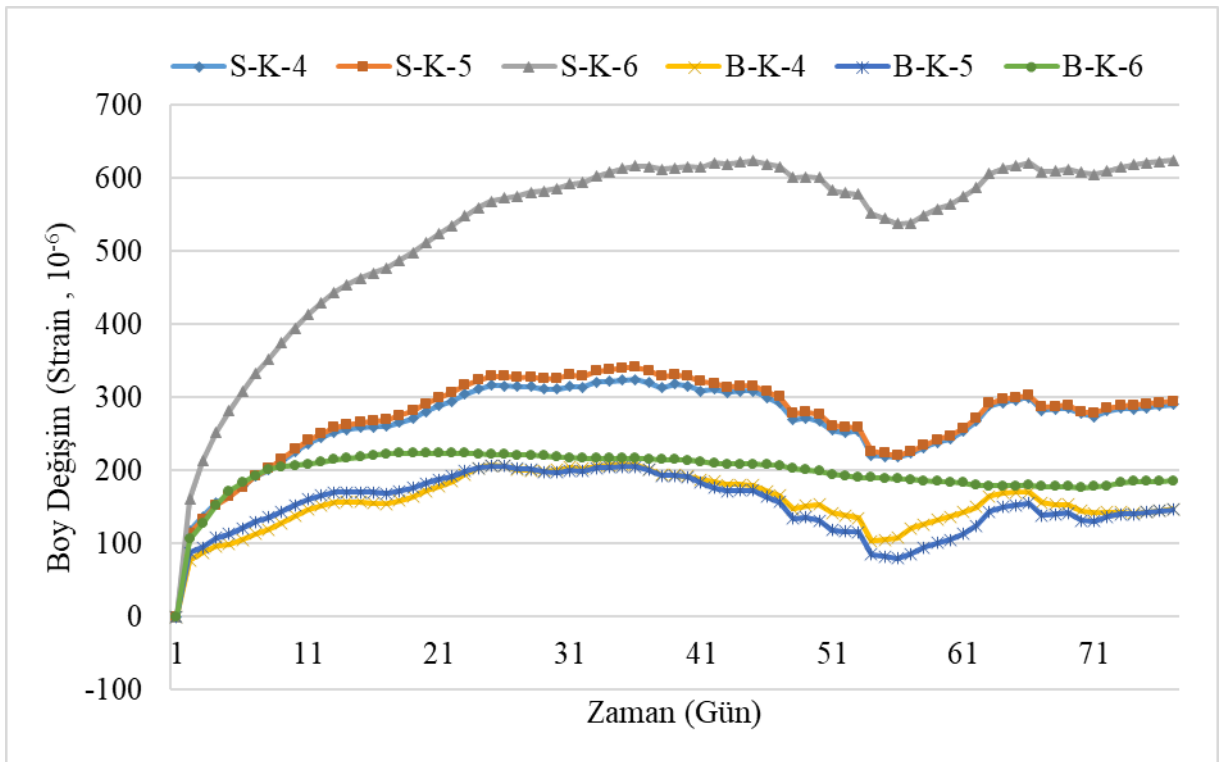
Boy değişim değerlerinin ölçümü için üretilen numunelerin üzerine strain gaugelerin yerleştirilmesiyle şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Elde edilen birim şekil değişimler 'strain' olarak isimlendirilirken birimsizdir ve 10^{-6} büyüklüğündedir. Ölçümler kür işleminin hemen ardından alınmıştır. Strain gaugeden alınan veriler her 5 dakika arayla veri toplama cihazıyla Microsoft Access programı altında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen 80 günlük veriler 1'er günlük ortalama verileriyle değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bulunan deney sonuçları Şekil 49, 50, 51, 52 ve 53 'te verilmiştir.

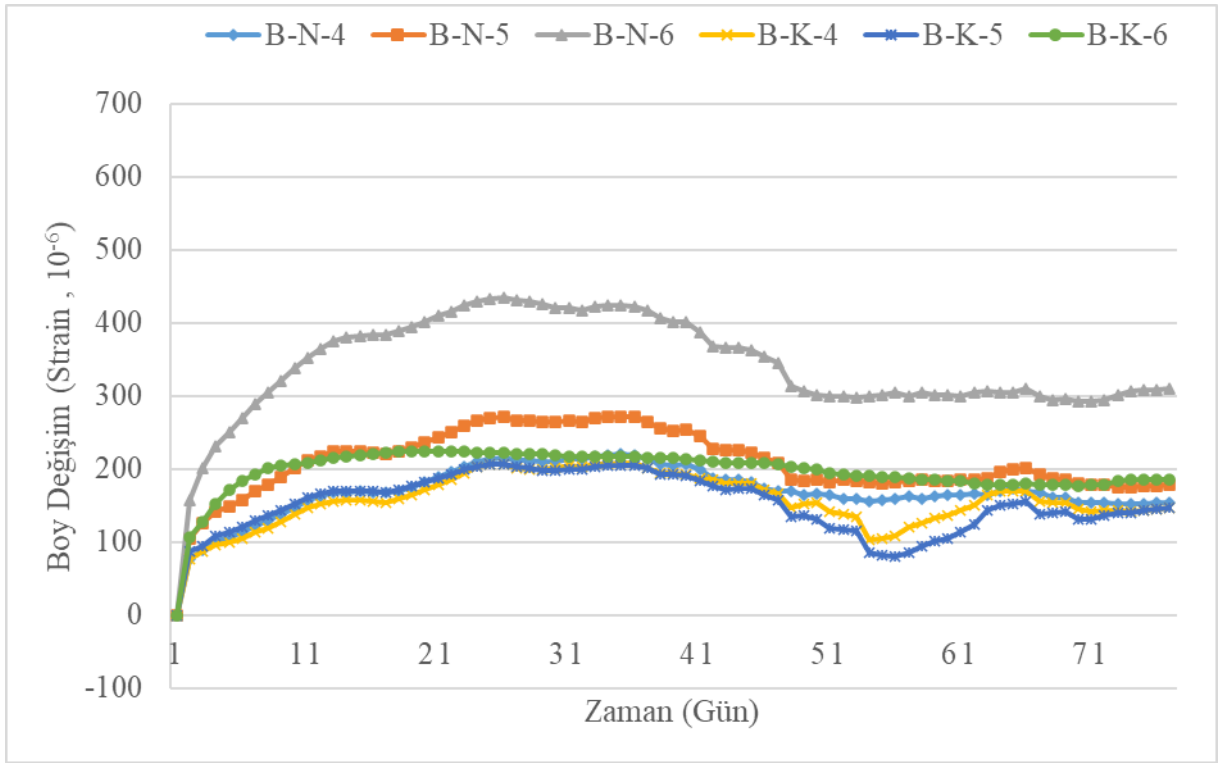


Şekil 49. Üretilen geopolimer numunelerin boy değişim grafiği.



Şekil 50. NaOH içeren karışımlara ait numunelerin boy değişim grafikleri.





Şekil 53. Bej renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin boy değişim grafikleri.

S-N-4, S-N-5, S-N-6, B-N-4, B-N-5, B-N-6, S-K-4, S-K-5, S-K-6, B-K-4, B-K-5 ve B-K-6 numunelerine ait sonuçlar sırasıyla 381, 379, 328, 154, 179, 310, 290, 295, 625, 147, 147 ve 186 strain'dir. Şekil 50 ve Şekil 51 incelendiğinde, aynı dozaj ve alkali aktivatörde siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin bej renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelere göre boy değişim miktarlarının fazla olduğu görülmektedir. Haha *et al.* (2011) çalışmalarında MgO içeriğinin artması sonucu hidratların hacminde %9 oranında artış ve basınç dayanımlarında ise 28. gün ve sonrasında %50-80 oranında artış olduğunu belirtmişlerdir. Ahlat Taşı kimyasal ve elementel analizler sonucunda siyah renk Ahlat Taşında MgO içeriğinin fazla olduğu görülmektedir. Bu durum siyah renk Ahlat Taşlarıyla üretilen numunelerin boy değişimlerinin fazla olduğunu kanıtlar niteliktedir. Aynı zamanda boy değişim değerleri numunelerin basınç dayanımlarıyla paralellik göstermektedir.

Şekil 52 ve Şekil 53 incelendiğinde; Siyah renk Ahlat Taşı ile 400-500 dozajlardaki numunelerde NaOH'lı karışımlarda, 600 dozajdaki numunelerde ise KOH'lı karışımlarda; Bej renk Ahlat Taşı ile 400-500-600 dozajlarda üretilen tüm numunelerde NaOH'lı karışımlarda boy değişim miktarlarının fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Sodyum konsantrasyonundaki artışın kuruma büzölmelerini artırdığını ifade etmişlerdir (Atiş *et al.* 2009; Jiao *et al.* 2018; Ekmen 2021).

Şekil 50, Şekil 51, Şekil 52 ve Şekil 53 incelendiğinde, B-N'li, S-K'lı ve B-K'lı karışımlarda dozaj miktarı arttıkça boy değişim miktarlarının arttığı, S-N'li karışımlarda ise

dozaj miktarı arttıkça boy değişim miktarının azaldığı görülmektedir. Bej renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin ortalama ilk 1 haftada boy değişimlerinin büyük kısmını tamamladıkları görülürken, bu durum siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde ortalama 4 haftayı bulmaktadır.

Radyasyon Soğurma

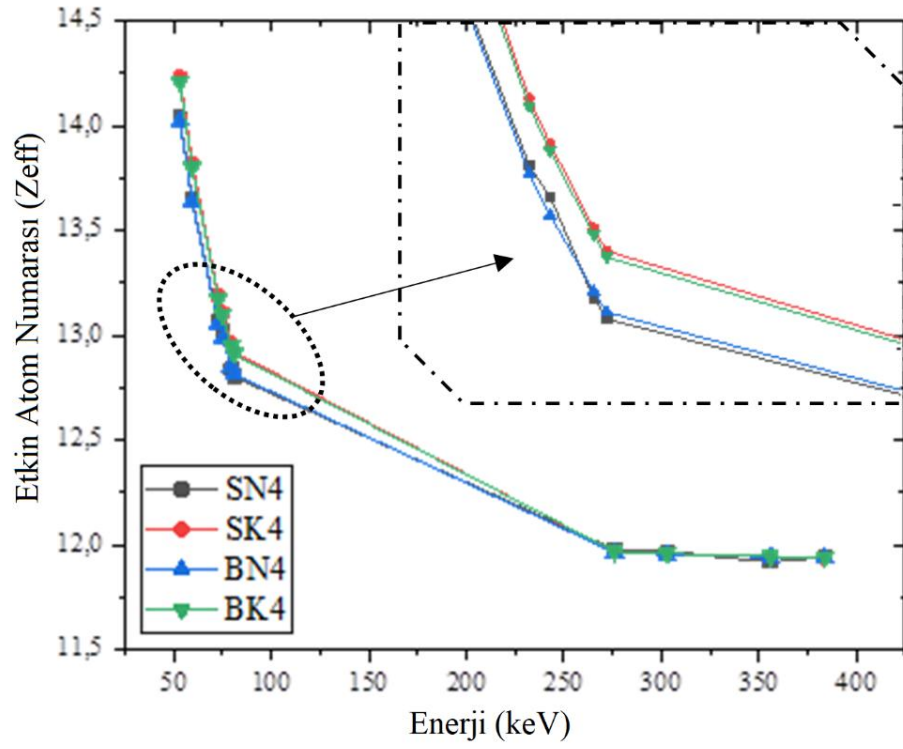
Bu çalışma kapsamında üretmiş olduğumuz 12 farklı karışım oranlı geopolimer beton numunelere radyasyon soğurma deney ve analizleri yapıldı. Bulunan sonuçlara ait veriler Tablo 18 ve 19’da verilmiştir. Bulunan sonuçların değerlendirildiği veriler Şekil 54-62’de verilmiştir.

Tablo 18. 53,2–384 keV Enerji Aralığı İçin Numunelerin Teorik ve Deneysel Etkin Atom Numaraları

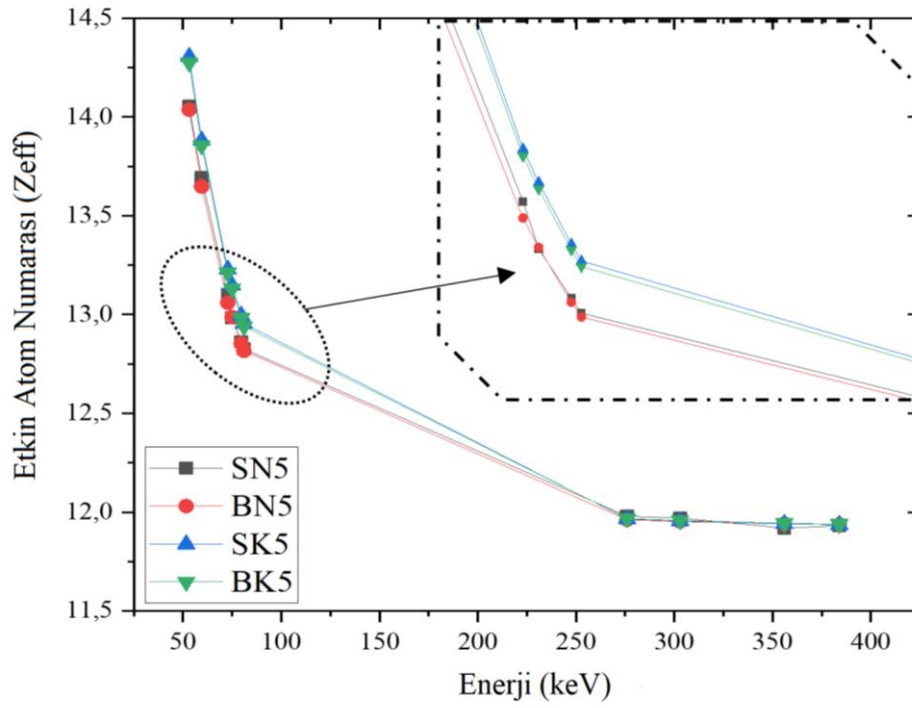
	Enerji (keV)	53,2	59,5	72,8	75	79,6	81	276	303	356	384
S-N-4	Teorik	14,039	13,648	13,071	13,016	12,839	12,803	11,978	11,970	11,919	11,943
	Deneysel	14,165	13,591	12,892	12,821	12,504	12,865	12,117	12,237	12,040	11,915
S-N-5	Teorik	14,054	13,694	13,100	12,984	12,863	12,826	11,980	11,971	11,920	11,931
	Deneysel	14,256	13,520	13,186	12,749	12,751	12,748	11,915	11,965	12,260	11,789
S-N-6	Teorik	14,095	13,694	13,088	13,013	12,875	12,837	11,957	11,947	11,935	11,931
	Deneysel	14,228	13,791	13,095	13,277	12,620	12,822	11,823	11,724	12,010	12,031
S-K-4	Teorik	14,233	13,821	13,188	13,108	12,961	12,921	11,967	11,957	11,944	11,939
	Deneysel	14,354	13,662	12,901	13,077	12,823	12,828	12,084	11,921	11,885	11,921
S-K-5	Teorik	14,306	13,882	13,229	13,147	12,996	12,954	11,966	11,955	11,941	11,936
	Deneysel	14,478	13,905	13,022	12,979	13,099	12,844	12,197	12,012	12,016	12,034
S-K-6	Teorik	14,379	13,944	13,272	13,187	13,031	12,988	11,964	11,953	11,939	11,934
	Deneysel	14,275	13,690	13,064	12,998	12,943	13,049	12,043	12,265	12,078	11,926
B-N-4	Teorik	14,025	13,639	13,057	12,985	12,851	12,815	11,964	11,955	11,944	11,939
	Deneysel	14,075	13,849	13,162	12,984	12,873	12,891	12,207	11,941	12,294	11,975
B-N-5	Teorik	14,037	13,648	13,060	12,987	12,853	12,817	11,962	11,953	11,941	11,937
	Deneysel	13,919	13,466	13,152	12,772	12,926	12,976	11,750	11,696	12,008	11,920
B-N-6	Teorik	14,049	13,656	13,063	12,990	12,855	12,818	11,959	11,950	11,938	11,934
	Deneysel	14,127	13,518	13,246	12,709	13,050	12,763	12,238	12,088	12,102	11,956
B-K-4	Teorik	14,209	13,801	13,174	13,096	12,951	12,911	11,969	11,959	11,946	11,941
	Deneysel	14,122	13,958	13,004	13,117	13,124	13,047	11,758	11,712	11,996	11,957
B-K-5	Teorik	14,274	13,856	13,211	13,131	12,981	12,940	11,968	11,957	11,944	11,939
	Deneysel	14,156	13,668	13,114	12,987	12,961	12,761	12,390	12,278	12,079	11,979
B-K-6	Teorik	14,343	13,913	13,251	13,168	13,014	12,971	11,967	11,956	11,942	11,937
	Deneysel	14,436	13,828	12,941	13,160	13,265	13,143	11,957	11,996	12,243	11,993

Tablo 19. 53,2–384 keV Enerji Aralığı İçin Numunelerin Teorik ve Deneysel Etkin Elektron Yoğunluğu ($\times 10^{23}$ elektron/g).

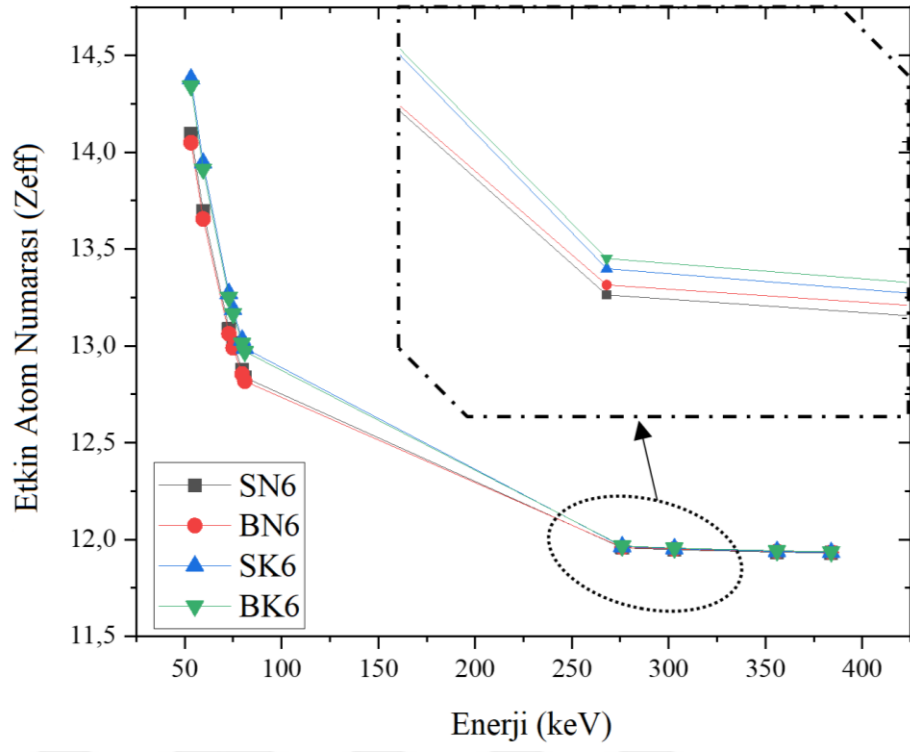
	Enerji (keV)	53,2	59,5	72,8	75	79,6	81	276	303	356	384
S-N-4	Teorik	3,525	3,427	3,282	3,268	3,224	3,215	3,008	3,006	2,993	2,999
	Deneysel	3,557	3,413	3,237	3,219	3,140	3,230	3,043	3,073	3,023	2,992
S-N-5	Teorik	3,529	3,439	3,289	3,260	3,230	3,221	3,008	3,006	2,993	2,996
	Deneysel	3,580	3,395	3,311	3,201	3,202	3,201	2,992	3,004	3,079	2,960
S-N-6	Teorik	3,539	3,439	3,286	3,268	3,233	3,223	3,002	3,000	2,997	2,996
	Deneysel	3,573	3,463	3,288	3,334	3,169	3,220	2,969	2,944	3,016	3,021
S-K-4	Teorik	3,574	3,470	3,311	3,292	3,255	3,245	3,005	3,002	2,999	2,998
	Deneysel	3,604	3,431	3,239	3,284	3,220	3,221	3,034	2,993	2,984	2,993
S-K-5	Teorik	3,592	3,486	3,322	3,301	3,263	3,253	3,005	3,002	2,998	2,997
	Deneysel	3,635	3,491	3,270	3,259	3,289	3,225	3,063	3,016	3,017	3,022
S-K-6	Teorik	3,611	3,501	3,332	3,311	3,272	3,261	3,004	3,001	2,998	2,996
	Deneysel	3,585	3,438	3,280	3,264	3,250	3,277	3,024	3,080	3,033	2,995
B-N-4	Teorik	3,522	3,425	3,279	3,260	3,227	3,218	3,004	3,002	2,999	2,998
	Deneysel	3,534	3,477	3,305	3,260	3,232	3,237	3,065	2,998	3,087	3,007
B-N-5	Teorik	3,525	3,427	3,279	3,261	3,227	3,218	3,004	3,001	2,998	2,997
	Deneysel	3,495	3,381	3,302	3,207	3,246	3,258	2,950	2,937	3,015	2,993
B-N-6	Teorik	3,528	3,429	3,280	3,262	3,228	3,219	3,003	3,001	2,998	2,997
	Deneysel	3,547	3,394	3,326	3,191	3,277	3,205	3,073	3,035	3,039	3,002
B-K-4	Teorik	3,568	3,465	3,308	3,288	3,252	3,242	3,005	3,003	3,000	2,998
	Deneysel	3,546	3,505	3,265	3,294	3,296	3,276	2,952	2,941	3,012	3,002
B-K-5	Teorik	3,584	3,479	3,317	3,297	3,260	3,249	3,005	3,003	2,999	2,998
	Deneysel	3,554	3,432	3,293	3,261	3,254	3,204	3,111	3,083	3,033	3,008
B-K-6	Teorik	3,602	3,494	3,327	3,306	3,268	3,257	3,005	3,002	2,999	2,997
	Deneysel	3,625	3,472	3,249	3,304	3,331	3,300	3,002	3,012	3,074	3,011



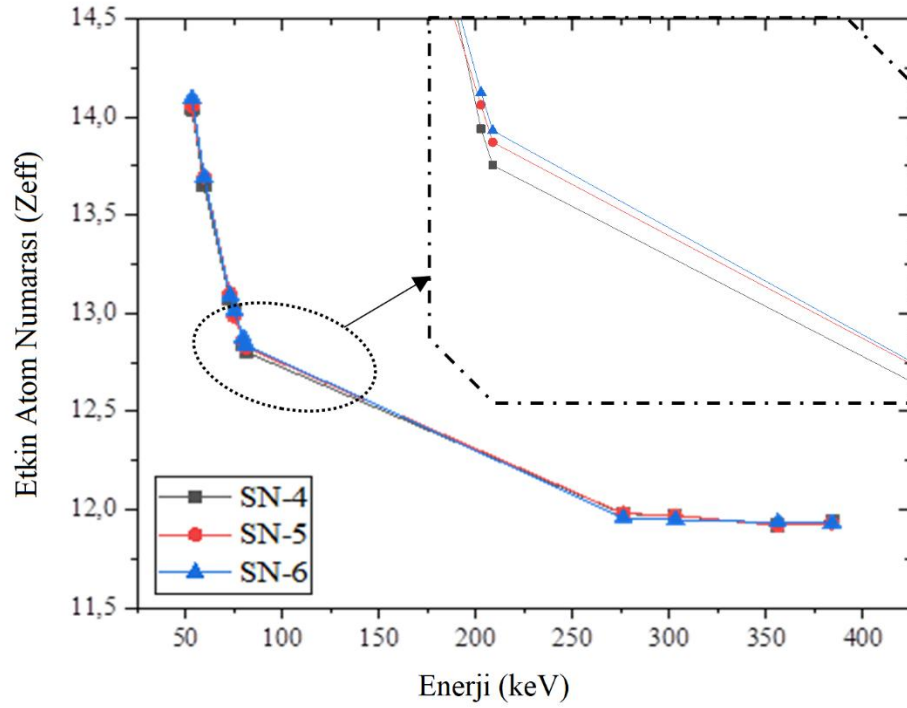
Şekil 54. 400 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



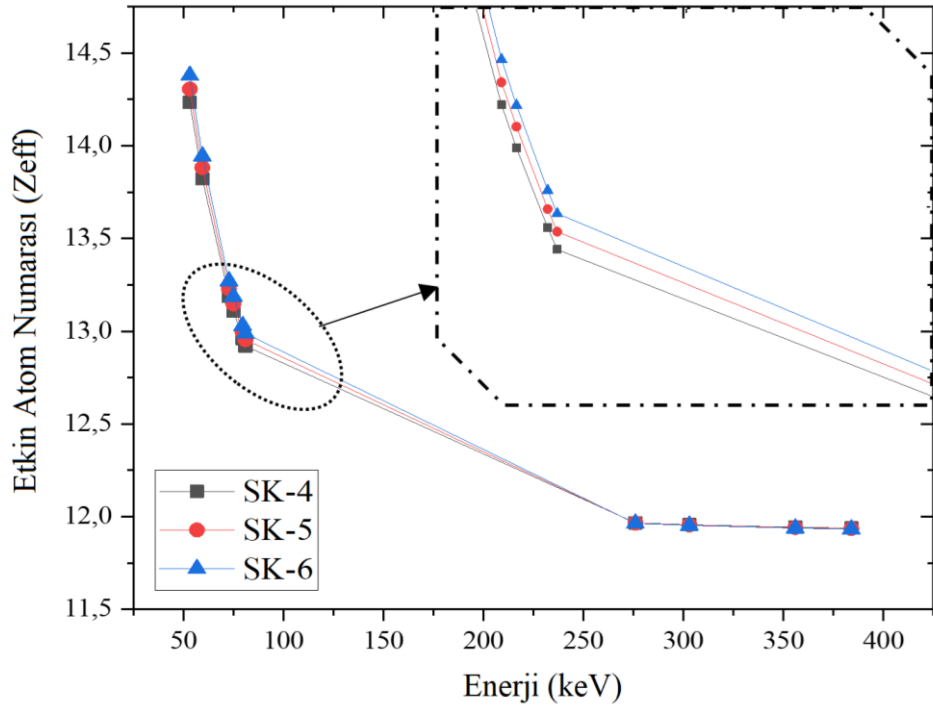
Şekil 55. 500 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



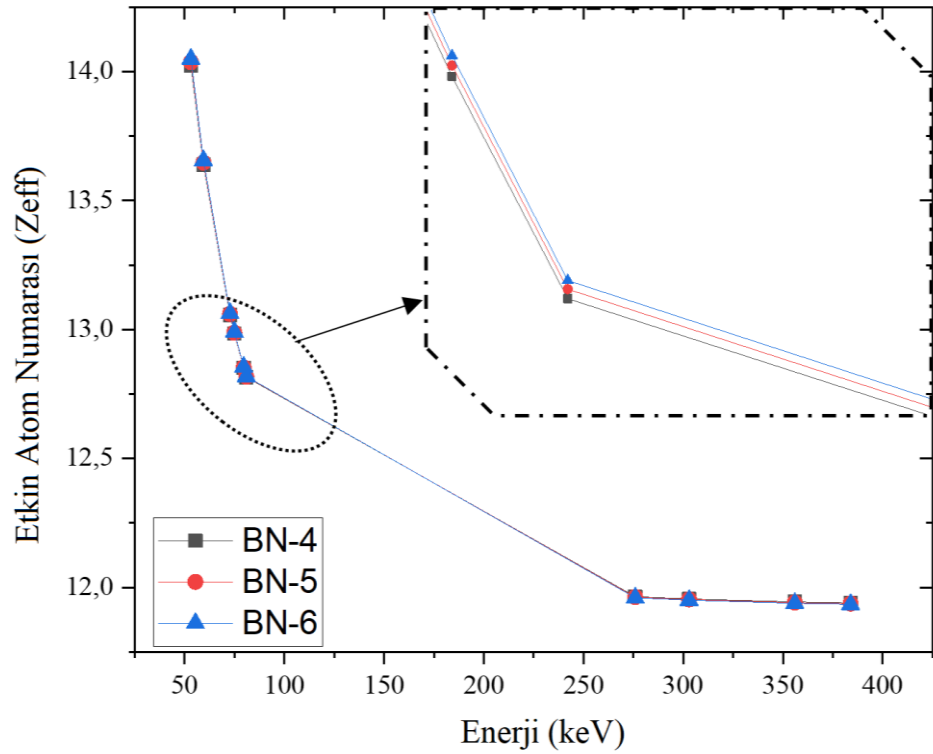
Şekil 56. 600 dozajlı numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



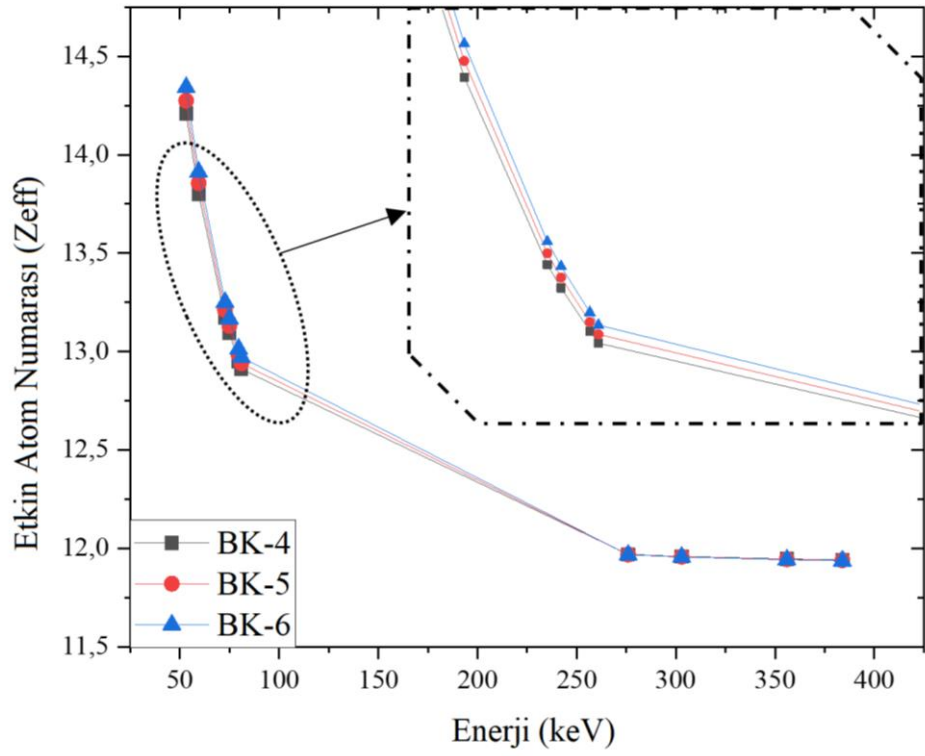
Şekil 57. Siyah renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



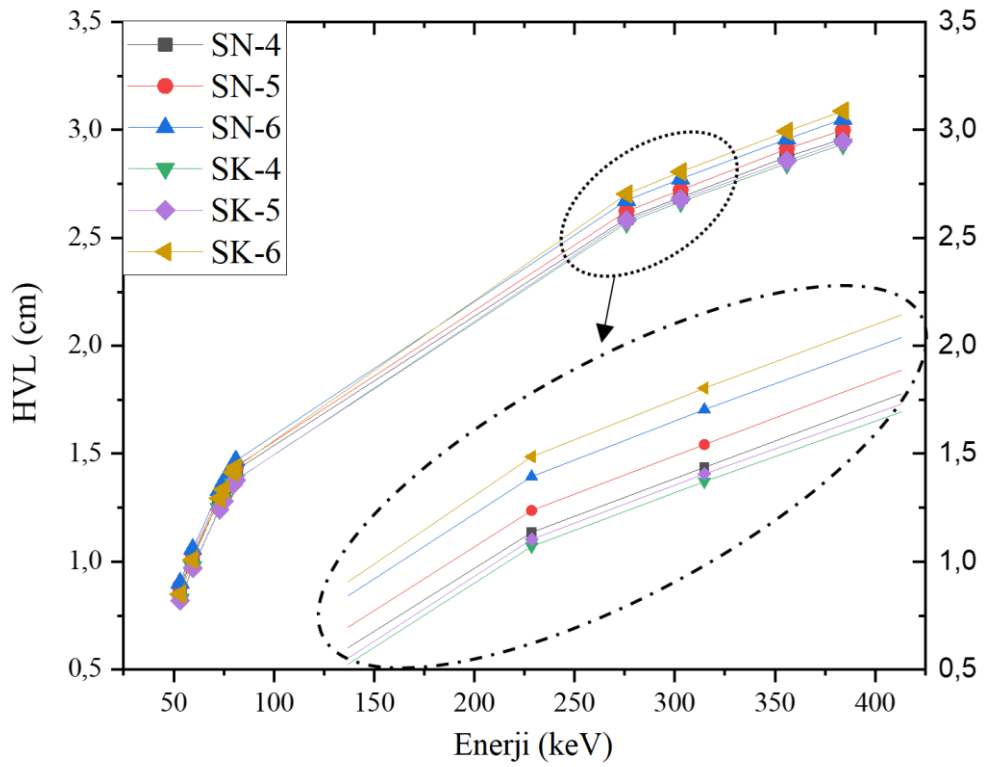
Şekil 58. Siyah renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



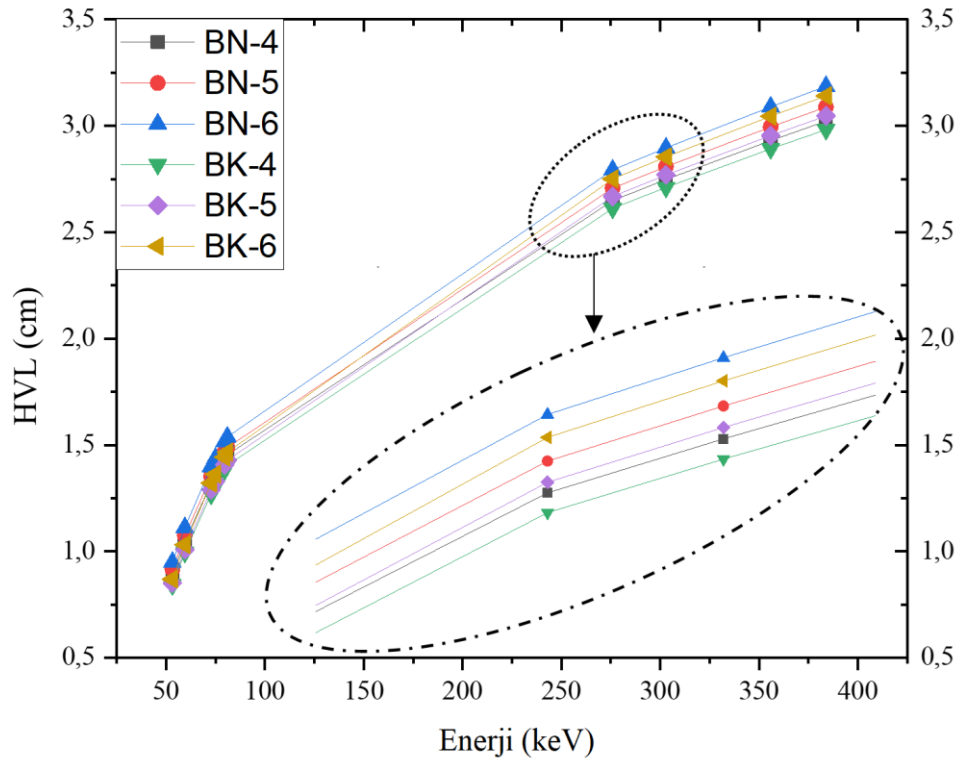
Şekil 59. Bej renk Ahlat Taşı ve NaOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



Şekil 60. Bej renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.



Şekil 61. Siyah renk Ahlat Taşı, NaOH ve KOH içeren numuneler için yarı karanlık değerinin (HVL) enerjiye bağlı değişimi.



Şekil 62. Bej renk Ahlat Taşı, NaOH ve KOH içeren numuneler için yarı karanlık değerinin (HVL) enerjiye bağlı değişimi.

Şekil 54, 55, 56, 57, 58, 59 ve 60'ta çalışmada kullanılan numuneler için etkin atom numarasının enerjiyle değişimi verilmiştir. Açıkça görüleceği gibi etkin atom numarası, enerjiye bağlı olarak değişmektedir. Etkin atom numarası (Z_{eff}), 0 – 100 keV enerji aralığında tüm numuneler için keskin bir azalma eğilimi göstermiştir. Bu enerji aralığında fotoelektrik olay baskındır. Fotoelektrik tesir kesiti atom numarasının 3,5–5. kuvveti ($Z^{3,5}/Z^{4,5}$) ile ters orantılı olarak gerçekleştiğinden dolayı etkin atom numarası keskin bir şekilde azalmıştır (Levet *et al.* 2020). 100 keV – 300 keV enerji aralığında fotoelektrik olayla beraber Compton saçılması olayı da görüldüğü için bu enerji aralığındaki azalma daha yumuşak bir hal almıştır. Etkin atom numarasındaki bu azalmanın sebebi ise, Compton saçılması tesir kesitinin Z ile ters orantılı olarak değişmesindendir. 300 keV den sonra fotoelektrik olayın baskınlığı azalırken Compton saçılması daha baskın hale geldiğinden etkin atom numarasındaki değişim 100 keV – 300 keV enerji aralığındakine göre daha azdır.

Çalışmada kullanılan bej ve siyah Ahlat Taşı içeren numuneler için radyasyondan koruma parametrelerinin küçük farklarla birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Bej ve siyah Ahlat Taşı element analizlerine bakıldığında içerik olarak birbirine yakın element yüzdelere sahip olduğu görülmektedir. Radyasyon soğurma kabiliyeti malzemeyi içeren elementlerin atom numarası ile doğrudan ilişkili olduğu için sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.

Şekil 54,55 ve 56 'da KOH içeren numunelerin etkin atom numaralarının, NaOH içeren numunelerden daha büyük değerler aldığı açıkça görülmektedir. Böylece siyah Ahlat Taşı ve KOH içeren (SK) ve bej Ahlat Taşı ve KOH içeren (BK) numunelerinin radyasyonu soğurmada daha etkili olduğu söylenebilir.

Ağırlık olarak, karışımların içerisindeki agregaların azalıp, KOH ve Na₂SiO₃ bileşikli alkali aktivatörlerin miktarlarının artması ile üretilen numunelerin etkin atom numaralarının enerjiye bağlı değişimi Şekil 57, 58, 59 ve 60'ta gösterilmiştir. Burada KOH ve Na₂SiO₃ bileşiklerin miktarının artması ile etkin atom numarasının arttığı görülüyor. Katkı malzemesi artan numunelerin radyasyondan koruma için daha etkili olduğu açıktır.

HVL, bir malzemenin radyasyondan korunma yeteneğini gösteren kolay bir diğer parametredir ve gelen radyasyon yoğunluğunun %50 değerine düşmesini sağlayan kalınlık değerini temsil eder. Şekil 61 ve Şekil 62 53,2–384 keV foton enerjileri için gelen foton enerjisine karşı HVL değerlerini temsil etmektedir. Kütle soğurma katsayısının (μ/ρ) aksine, foton enerjisi arttıkça HVL değerleri artar. HVL değerleri, ters orantılı olarak numunenin yoğunluğuna da bağlıdır. Yoğunluk değeri en yüksek olan numunemiz S-K-4 (2,40 gr/cm³) için HVL en düşük değeri almıştır. Diğer taraftan yoğunluğu en düşük olan B-N-6 (2,24 gr/cm³) numunesi en yüksek HVL değerine sahiptir. Düşük enerjiler için HVL değeri hızlı bir artış eğiliminde iken foton enerjisinin artmasıyla HVL deki artış daha yavaş bir yükselme eğilimi göstermektedir. Ayrıca düşük enerjilerde HVL, materyalin içeriğine daha az bağımlı olduğu görülmektedir (Kavaz *et al.* 2020).

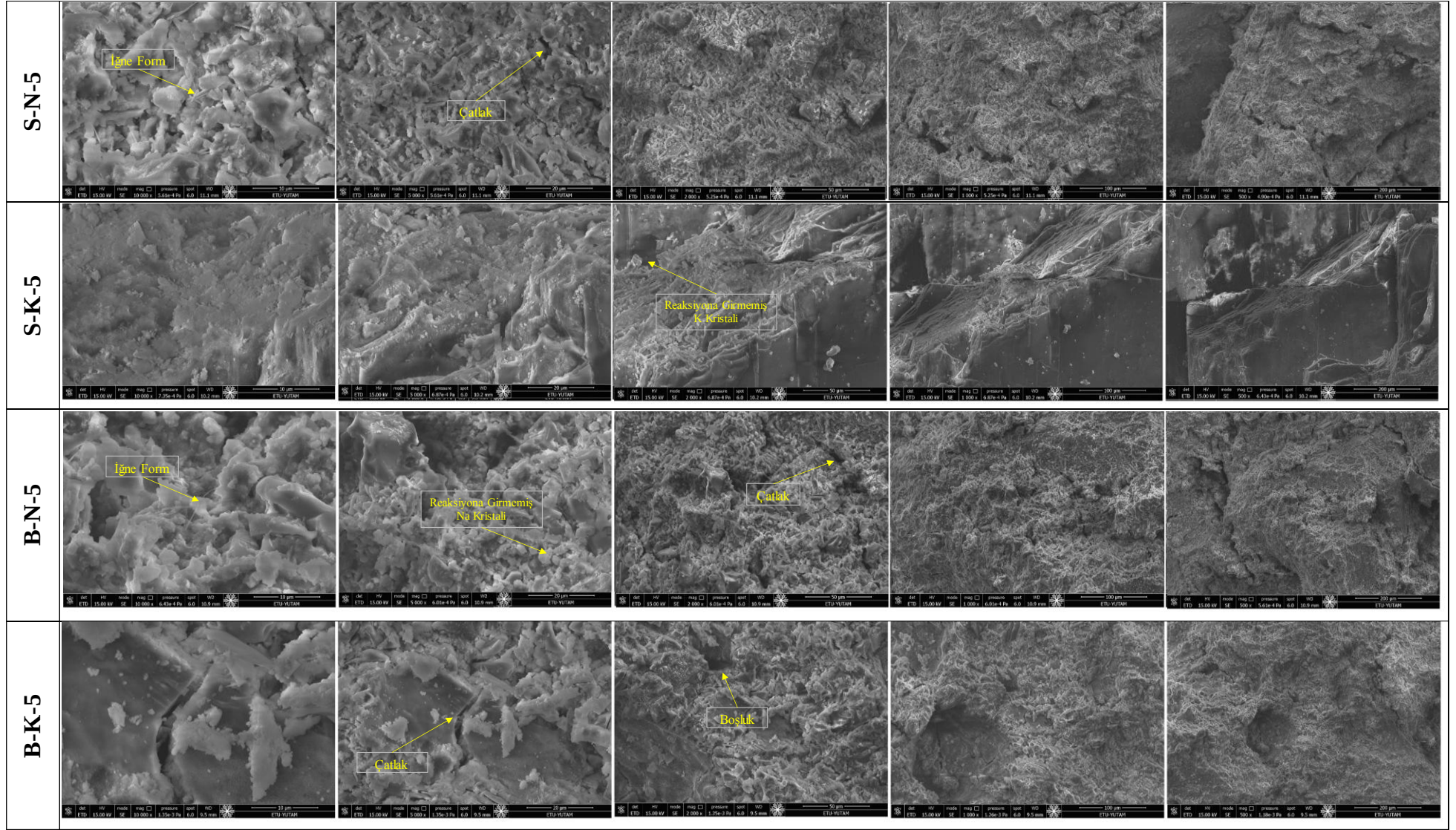
Tablo 18 ve 19'da 53,2–384 keV enerji aralığı için numunelerin etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunlukları verilmiştir. Tablolardan görüleceği gibi teorik ve deneysel değerler birbiriyle uyumlu olup yakın değerler almıştır. Numunelerin sahip olduğu bileşik yapıları ve yüzdeleri WinXCom bilgisayar programına tanımlanmış ve elde edilen kütle soğurma katsayıları kullanılarak teorik veriler elde edilmiştir (Gerward *et al.* 2004). Deneysel veriler için soğurma şiddetlerinin oranları (I/I_0) ve deneysel kütle soğuma katsayıları Lambert yasası yardımıyla bulunmuştur. Bu veriler kullanılarak etkin atom numaraları ve etkin elektron yoğunlukları deneysel olarak hesaplanmıştır. Etkin atom numarası ile etkin elektron yoğunluğu arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Deneysel ve teorik değerler arasındaki küçük farkların pik alan analizleri, deney geometrisi, dedektör sayım hataları gibi ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İç Yapı İncelemesi

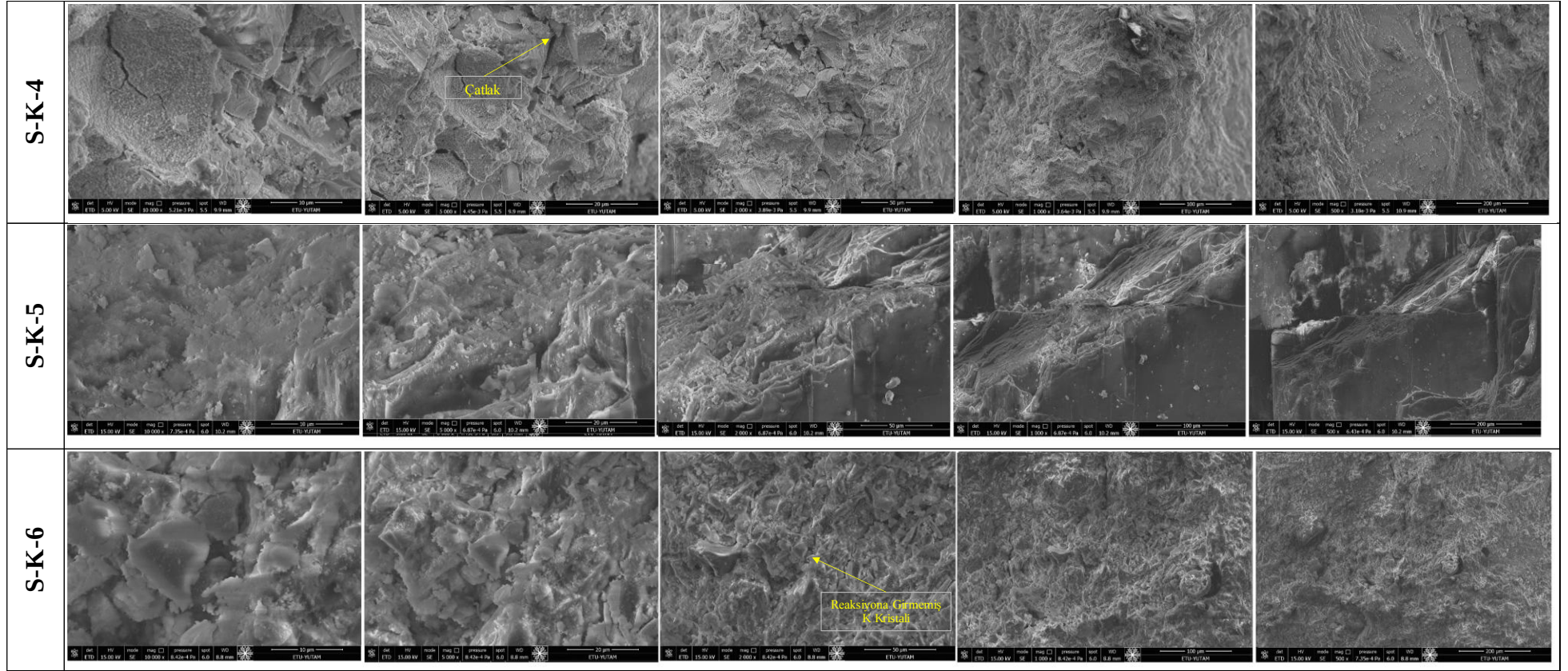
Üretilen geopolimer beton numunelerin mikro yapı incelemelerini yapmak üzere SEM (taramalı elektron mikroskobu) – EDX (enerji ayırmalı X-ışını) ve FTIR (fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) analizleri kullanılmıştır.

Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu) (SEM)

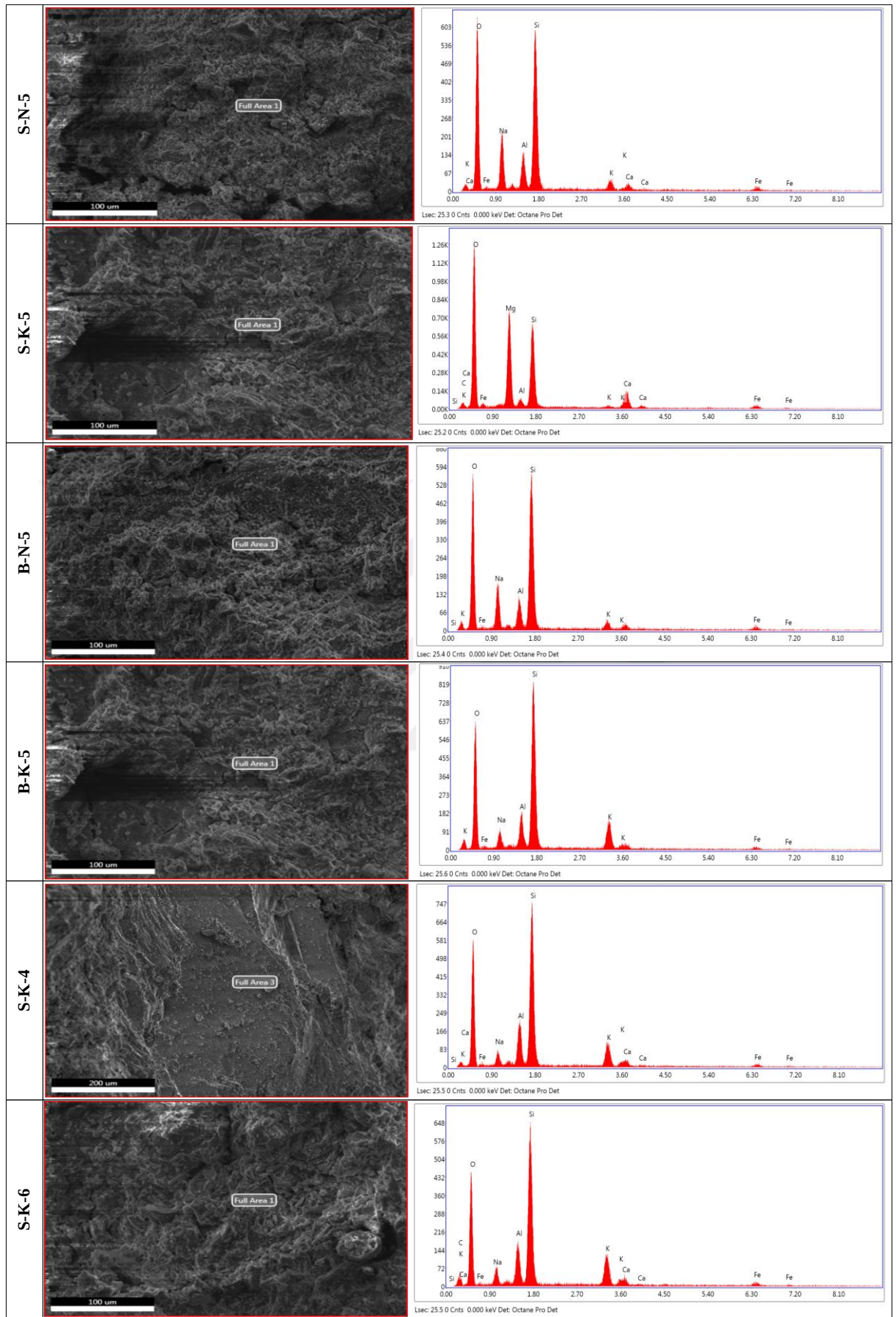
Üretilen numuneler arasından en iyi optimum karışım (dozaj) miktarı olan 500 dozajlı S-N-5, S-K-5, B-N-5 ve B-K-5 numuneleri seçilerek Ahlat Taşının rengi ve kullanılan aktivatör hakkında, bunların yanına S-K-4 ve S-K-6 numuneleri eklenerek dozaj hakkında bilgi edinilmek istenmiş ve bu doğrultuda numunelerin 28 günlük mikro yapıları incelenmiştir. Sırasıyla S-N-5, S-K-5, B-N-5, B-K-5, S-K-4 ve S-K-6 numunelerine ait SEM görüntüleri ve SEM/EDX spektrumları Şekil 63, 64 ve 65'te, SEM/EDX element analizi Tablo 20'de verilmiştir ve bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 22,21, 23,09, 17,43, 25,19, 24,12 ve 21,38 MPa'dır.



Şekil 63. 500 dozajlı numunelere ait SEM görüntüleri.



Şekil 64. Siyah renk Ahlat Taşı ve KOH içeren numunelere ait SEM görüntüleri.



Şekil 65. SEM/EDX spektrumları.

Tablo 20. SEM/EDX Element Analizi

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
S-N-5	O	45,25	59,44
	Na	13,41	12,26
	Al	5,60	4,36
	Si	25,99	19,45
	K	3,11	1,67
	Ca	2,15	1,13
	Fe	4,49	1,69

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
B-N-5	O	44,10	58,35
	Na	12,30	11,33
	Al	5,45	4,28
	Si	29,59	22,30
	K	3,15	1,71
	Fe	5,39	2,04

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
S-K-4	O	45,39	61,27
	Na	3,59	3,37
	Al	7,68	6,15
	Si	27,66	21,26
	K	8,75	4,83
	Ca	2,90	1,56
	Fe	4,02	1,55

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
S-K-5	C	4,15	6,80
	O	51,06	62,87
	Mg	16,74	13,56
	Al	1,55	1,13
	Si	14,91	10,46
	K	0,67	0,34
	Ca	7,13	3,50
	Fe	3,79	1,34

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
B-K-5	O	46,32	61,81
	Na	4,36	4,04
	Al	5,80	4,59
	Si	29,57	22,48
	K	10,66	5,82
	Fe	3,29	1,26

Karışım	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
S-K-6	C	12,30	20,15
	O	40,56	49,88
	Na	3,11	2,66
	Al	5,63	4,11
	Si	22,86	16,01
	K	9,36	4,71
	Ca	2,20	1,08
	Fe	3,98	1,40

S-N-5, S-K-5, B-N-5 ve B-K-5 numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 63) incelendiğinde NaOH'lı karışımlarda KOH'lı karışımlara göre iğne formundaki geopolimer ürünlerin daha fazla olduğu, tepkimeye girmeyen Na kristallerinin K kristallerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Mikro çatlakların genel itibarıyla KOH'lı karışımlara göre NaOH'lı karışımlarda daha fazla olduğu, KOH'lı karışımların daha kompakt yapıda olduğu ve geopolimerizasyonun daha fazla olduğu görülmektedir. Yegin (2020) geopolimerizasyonda iğne formundaki geopolimer ürünlerin kristal yapıyı gösterdiğini ve bunun sonucunda da dayanım düşüşleri olduğunu ifade etmiştir. Bu doğrultuda S-N-5'in basınç dayanımında %10'luk bir düşüş gözlenmiştir.

S-N-5, S-K-5, B-N-5 ve B-K-5 numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 63) incelendiğinde mikro boşlukların bej renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilenlere göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ise bej renkli

Ahlat Taşındaki Si oranının fazla olmasından dolayı geopolimerizasyonda tepkimeye girecek alkali aktivatör bulamamasından ötürü silisyumların filler görevi üstlendiği düşünülmektedir. Mikro silis ve nano silis katkıları, hacimsel yoğunlukları artırması; bu katkıların geopolimerizasyon tepkimeleri artırması ve filler (dolgu) malzemesi olarak yer almasından kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir (Deb *et al.* 2016, Zhang *et al.* 2017). Kullanılan hammaddelerin ince tanelere sahip olması mikro gözeneklerin dolmasına yardımcı olmuştur (Martin *et al.* 2015, Zheng *et al.* 2016, Nath and Kumar 2020).

S-N-5, S-K-5, B-N-5 ve B-K-5 numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 63) incelendiğinde siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin bej renkli Ahlat Taşı ile üretilenlere göre daha ağsı yapıda olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeninin ise Ahlat Taşı analizlerinde görüldüğü üzere Ca ve Mg oranlarının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM ve EDX analizleriyle de bu durum örtüşmektedir. Balun (2019) çalışmasında matris yapıda daha fazla oranda Ca bulunmasının daha fazla C-S-H/C-A-S-H veya (K,C)-A-S-H jelleri oluşturduğunu belirtmiştir. Aziz *et al.* (2021) çalışmalarında yüksek fırın cürufunun puzolan esaslı geopolimerlerde fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan L1 yüksek fırın cürufunun L2 yüksek fırın cürufuna göre daha alüminli ve magnezyumlu olduğunu ifade etmiştir. Sonuç olarak L1 yüksek fırın cürufunun %50 oranında eklenmesiyle yüksek basınç dayanımı, yoğun ve kompakt yapı bir geopolimer elde edilmiştir. Abdel-Gawwad and Abd El-Aleem (2015) çalışmalarında reaktif magnezyum oksitin alkali aktive edilmiş cürufu ile üretilen geopolimerler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak reaktif MgO'nin çözünmesi reaksiyon ortamına ısı vererek cürufun hidratasyon reaksiyonunu desteklemiştir. Winnefeld *et al.* (2014) daha fazla MgO içeriği bulunan sodyum metasilikatla aktive edilmiş cürufun hidratasyon sonucunda oluşan ürünleri artırdığını, gözenekliliğin azaldığını ve basınç dayanımının arttığını ifade etmişlerdir. Haha *et al.* (2011) ağırlıkça %8-13 arasında MgO içeriğine sahip üç farklı cürufu iki farklı alkali aktivatör NaOH ve Na₂SiO₃·5H₂O (WG) ile aktive etmiştir. WG ile aktive edilen cüruf hamurunda, cürufun MgO içeriği %8'den %13'e çıktığında hidratların hacminin %9 arttığı ve basınç dayanımlarının 28. gün ve sonrasında %50-80 aralığında arttığını belirtmişlerdir.

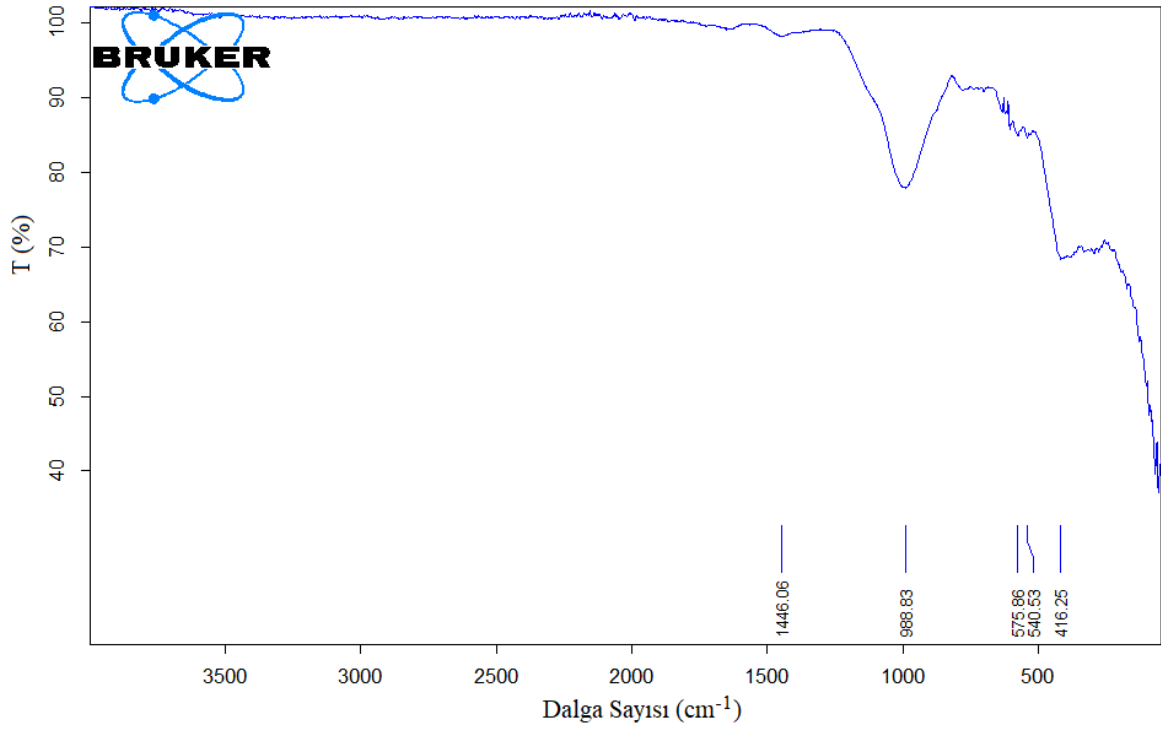
S-K-4, S-K-5 ve S-K-6 numunelerinin SEM görüntüleri (Şekil 64) incelendiğinde dozaj miktarı arttıkça tepkimeye girmeyen K kristalleri de artmaktadır. Balun (2019) çalışmasında geopolimer tepkimesine katılmayan potasyum kristalleri olduğunu ve bunun nedeninin ise ortamda amorf silikanın yeteri kadar bulunmaması veya potasyumun tamamen çözünmemesi olabileceğini ifade etmiştir. En az mikro boşluk ve çatlakların görüldüğü karışım S-K-5 karışımında görülmüştür. S-K-4 karışımında ise S-K-6 karışımına göre daha ağsı yapı olduğu

görülmektedir. Si/K oranı arttıkça basınç dayanımlarında artış görülmekte ve daha ağırsı yapı oluşmaktadır. Bu durum Şekil 65 ve Tablo 20 incelendiğinde EDX analizlerinde görülmektedir. Bu sonuçların basınç dayanımlarıyla paralellik gösterdiği görülmektedir. Balun (2019) çalışmasında Si/K ve Si/Al oranları yükseldikçe basınç dayanımlarının da arttığını tespit etmiştir. Sonuçta mikro yapı incelemeleri ve basınç dayanım sonuçları doğrultusunda optimum karışım miktarının 500 dozaj olduğu birbirini desteklemektedir.

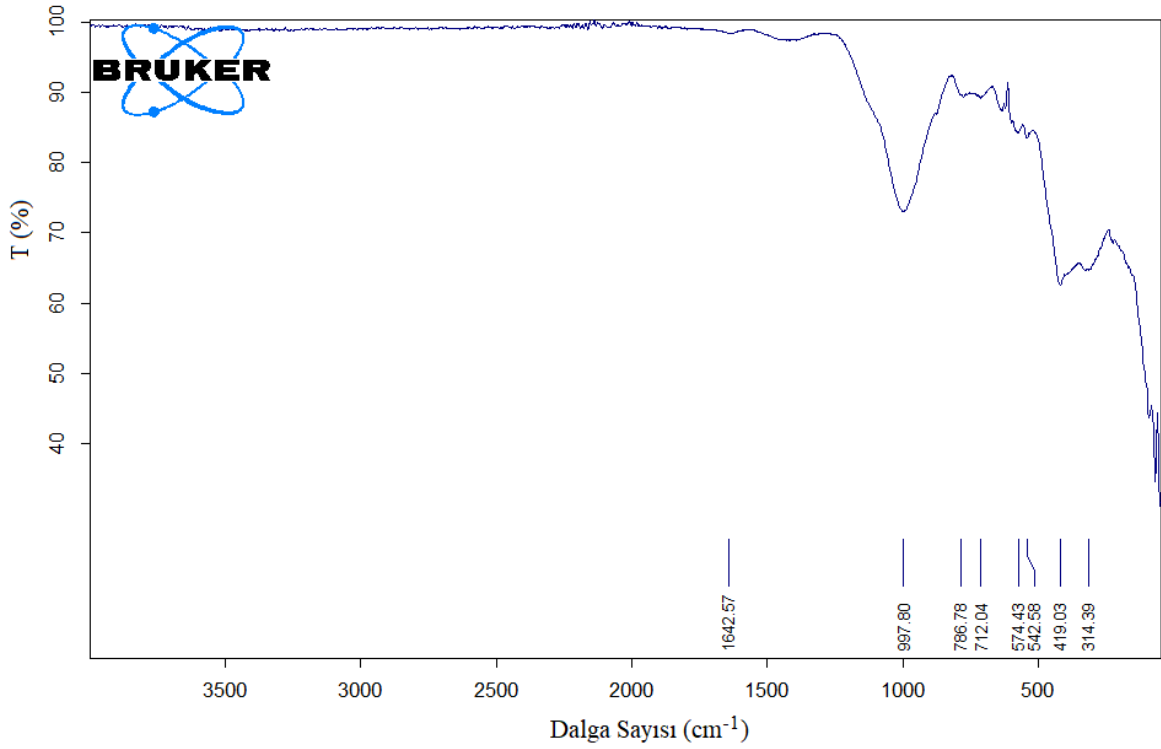
Tüm SEM görüntüleri (Şekil 63 ve Şekil 64) incelendiğinde KOH'lı karışımlara göre NaOH'lı karışımlarda iğne formundaki geopolimerlerin ve mikro çatlakların fazla olduğu görülmektedir. KOH'lı karışımların daha ağırsı ve kompakt yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen analizler ve basınç dayanımları sonucunda Ahlat Taşı ile geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak KOH'ın kullanımının daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Finocchiaro *et al.* (2020) iki farklı alkali çözelti kullanarak piroklastik tortuları (Mt. Etna, Sicilya, İtalya) alkali aktive etmişler ve üretmiş oldukları numuneleri FTIR analizleriyle incelemişlerdir. Sonuçta alkali aktivatör olarak KOH kullanılan numunelerin, NaOH kullanılan numunelerden daha az gözenekli olduğunu ve daha yoğun yapıda olduğunu belirtmişlerdir.

Fourier transform infrared spectroscopy (fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) (FTIR)

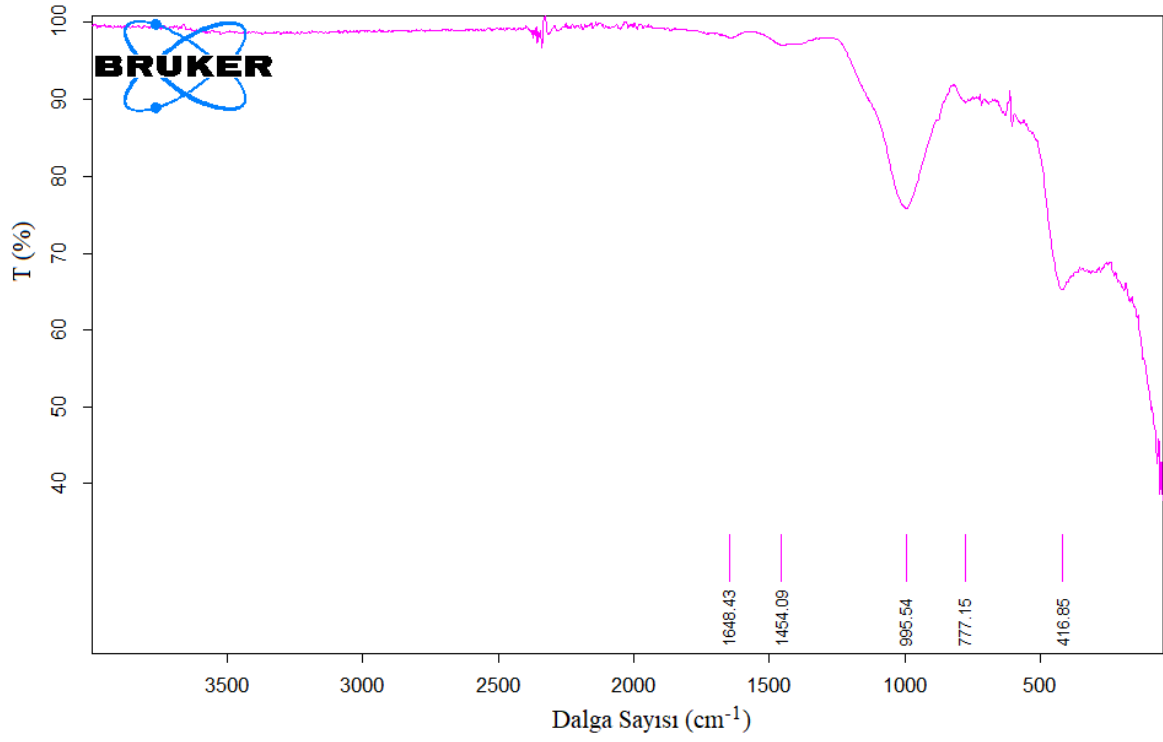
S-N-5, S-K-5, B-N-5, B-K-5, S-K-4 ve S-K-6 karışımlarının kızılötesi spektroskopileri sırasıyla Şekil 66, 67, 68, 69, 70 ve 71'de verilmiştir. FTIR analiz sonuçlarına göre; birinci bant değerleri $314,39\text{ cm}^{-1}$ ile $315,21\text{ cm}^{-1}$ arasında, ikinci bant değerleri $416,25\text{ cm}^{-1}$ ile $423,73\text{ cm}^{-1}$ arasında, üçüncü bant değerleri $540,53\text{ cm}^{-1}$ ile $543,58\text{ cm}^{-1}$ arasında, dördüncü bant değerleri $574,43\text{ cm}^{-1}$ ile $576,05\text{ cm}^{-1}$ arasında, beşinci bant değerleri $712,04\text{ cm}^{-1}$ ile $718,15\text{ cm}^{-1}$ arasında, altıncı bant değerleri $776,31\text{ cm}^{-1}$ ile $786,78\text{ cm}^{-1}$ arasında, yedinci bant değerleri $988,83\text{ cm}^{-1}$ ile $1000,27\text{ cm}^{-1}$ arasında, sekizinci bant değerleri $1446,06\text{ cm}^{-1}$ ile $1454,09\text{ cm}^{-1}$ arasında ve dokuzuncu bant değerleri $1628,95\text{ cm}^{-1}$ ile $1648,43\text{ cm}^{-1}$ arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir.



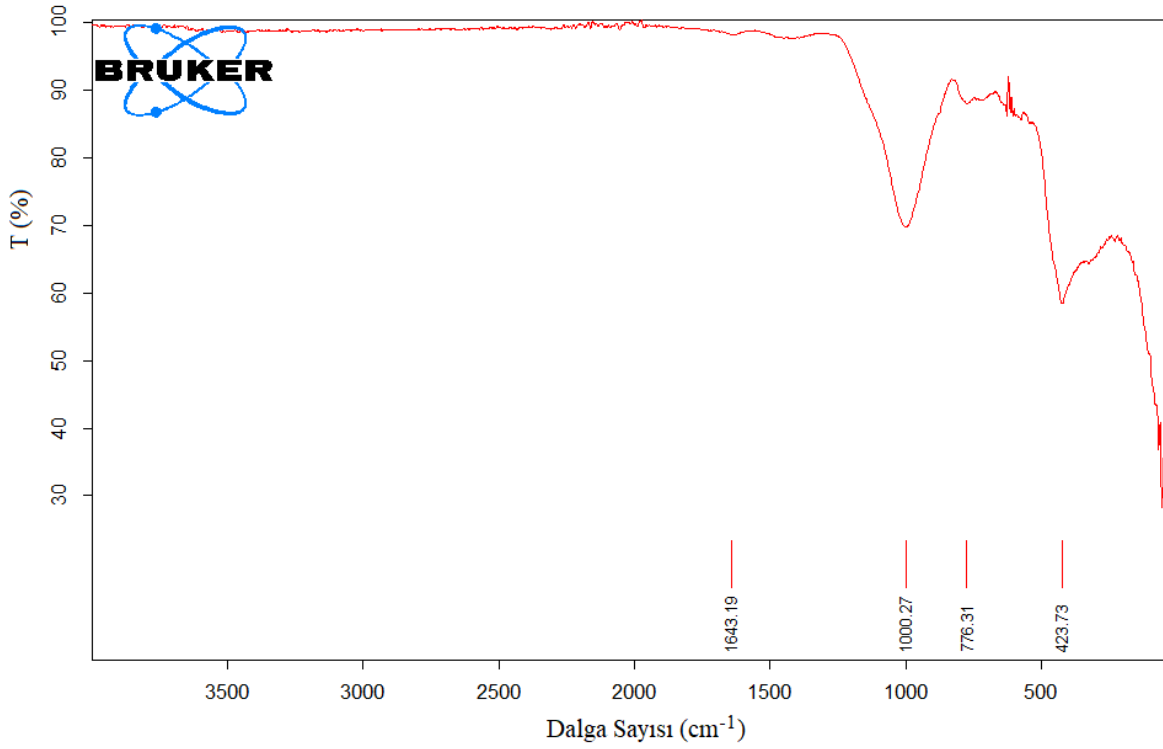
Şekil 66. S-N-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları



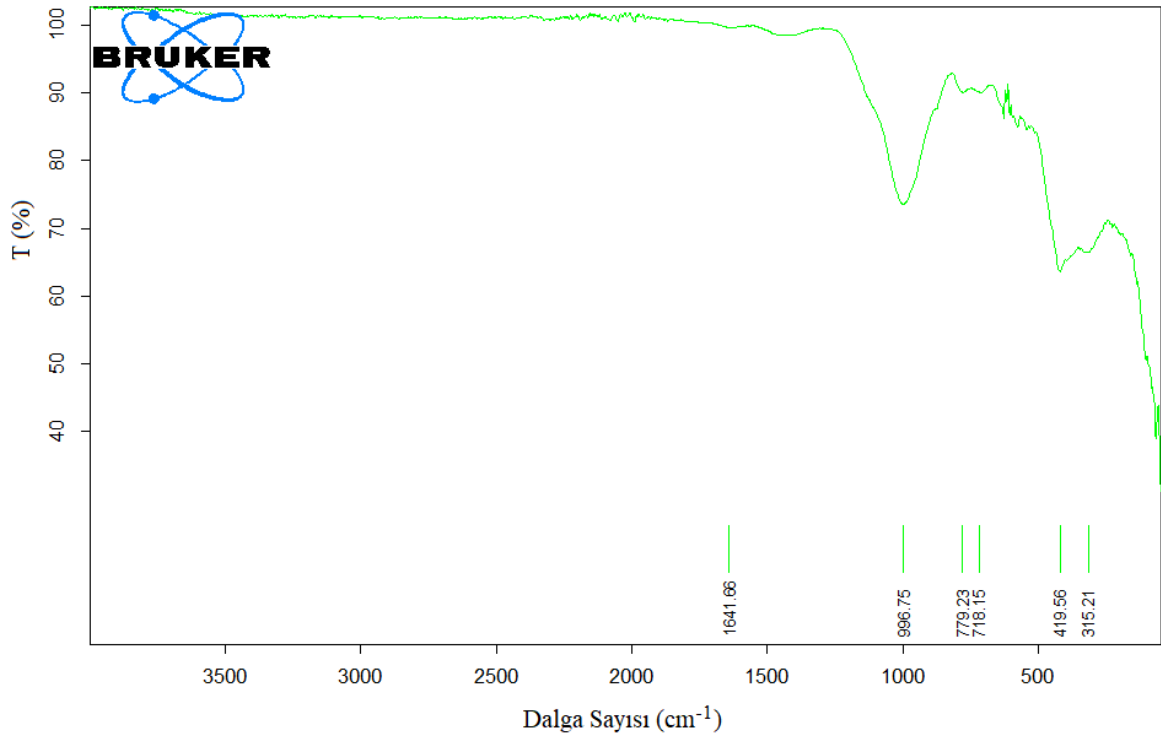
Şekil 67. S-K-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları



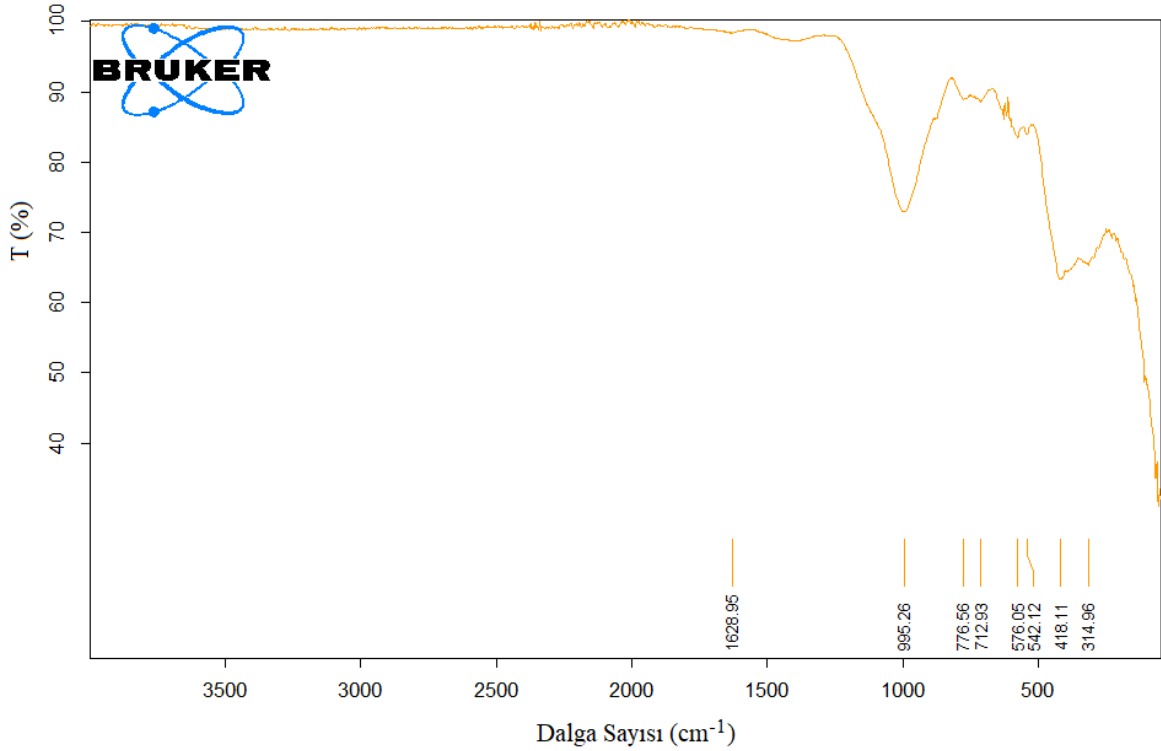
Şekil 68. B-N-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları



Şekil 69. B-K-5 karışımına ait FTIR analiz sonuçları



Şekil 70. S-K-4 karışımına ait FTIR analiz sonuçları



Şekil 71. S-K-6 karışımına ait FTIR analiz sonuçları

1650-3500 cm⁻¹ aralığındaki bant değerleri, H-O-H ve O-H bağlarının gerilme titreşimlerini, 1607-1648 cm⁻¹ aralığındaki bant değerlerinin H-O-H eğilme titreşimini, 1630 cm⁻¹ bandının H-O-H bağı temsil ettiğini ifade etmişlerdir (Gao *et al.* 2014; Ekmen 2021, Song *et al.* 2021). Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen numunelerde 1454 cm⁻¹ civarında

gözlenen bant değerlerinin Na_2CO_3 oluşumundan kaynaklandığını ifade etmiştir (Demir 2020). 980-1025 cm^{-1} bant aralığının Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının gerilme titreşim bağlarını, 1007-1093 cm^{-1} bant aralığının Si/Al-O-Si bağlarının gerilme titreşimini belirttiğini ifade etmişlerdir (Aziz *et al.* 2021; Ekmen 2021). 500-800 cm^{-1} bant aralığının Si/Al-O bağlarını, 510-574 cm^{-1} bant aralığının Si/Al-O eğilme modunu temsil ettiğini belirtmişlerdir (Palomo *et al.* 2007; Ekmen 2021). 791 cm^{-1} bandının Al-O olduğunu ifade etmiştir (Demir 2020). 432-476 cm^{-1} bant aralığının Si-O-Si ve O-Si-O eğilme titreşimlerini, 455-461 cm^{-1} bant aralığının güçlü alkali ortamlarda kimyasal olarak inert Si-O-Si ve O-Si-O bağlarını temsil ettiğini ifade etmişlerdir (Song *et al.* 2021; Zhou *et al.* 2021).

Literatür çalışmalarında elde edilen veriler incelendiğinde 1628,95-1648,43 cm^{-1} aralığındaki bant değerlerinin H-O-H bağlarını, 1446,06-1454,09 aralığındaki bant değerlerinin Na_2CO_3 'ü, 988,83-1000,27 aralığındaki bant değerlerinin Si/Al-O-Si bağlarını, 540,53-576,05 aralığındaki bant değerlerinin Si/Al-O bağlarını, 776,31-786,78 aralığındaki bant değerlerinin Al-O bağlarını ve 416,25-423,73 aralığındaki bant değerlerinin O-Si-O bağlarını belirttiği görülmektedir. Bant genişlikleri arasında kaymalar görülmektedir. FTIR analizleri sonucunda bulunan spektrumlar literatürde yapılan çalışmalarla örtüşmektedir.

Sadece NaOH'lı karışımlarda ortaya çıkan 1446,06-1454,09 cm^{-1} bant aralığındaki bağlar Na_2CO_3 'ü belirtmektedir. Bunun nedeni ise ortamda serbest halde bulunan Na kristallerini CO_2 ile tepkimeye girmesinden kaynaklanmaktadır. 1418 cm^{-1} bant civarının harç kompozitlerde serbest Na^+ ile atmosferik CO_2 arasındaki karbonasyon tepkimesi sonucunda oluşmuş olabileceğini ve sodyumkarbonatın (Na_2CO_3) varlığını gösterdiğini ifade etmişlerdir (Tchadjie *et al.* 2021).

712,04-718,15 cm^{-1} bant aralığı ile 314,39-315,21 cm^{-1} bant aralığındaki bağ yapıları sadece siyah Ahlat Taşı ve KOH içeren (SK) karışımlarda görülmektedir. SEM/EDX analizleri incelendiğinde SK'lı karışımlarda fazladan Mg ve C görülmektedir. Bu bantlar arasında oluşan bağların Mg ve C'dan kaynaklı olduğu düşünülmektedir ve SEM görüntüleriyle birleştirildiğinde siyah Ahlat Taşı ve KOH'la üretilen numunelerin daha ağırsı yapıda olduğu FTIR sonuçlarında da görülmektedir.

Balun (2019) çalışmasında asimetrik Si-O-Si veya Al-O-Si bağlarının, tipik C-S-H jellerini karakterize ettiğini belirtmiştir. Bu çalışmadaki FTIR analizleri incelendiğinde, keskin pik noktalarının 988,83-1000,27 cm^{-1} aralığında fazla olduğunu bununda Si/Al-O-Si bağlarını belirttiğini ve üretilen numunelerde diğer bağ yapılarına göre oldukça fazla olduğu çukur eğrilikten anlaşılmaktadır. Si/Al-O-Si bağları analizleri yapılan karışımların basınç dayanımlarıyla paralellik göstermektedir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Bitlis ili Ahlat ilçesi bölgesinden temin edilen Ahlat Taşından geopolimer beton üretimi araştırılmıştır. Yapılan ön denemeler ve çalışmalar sonucunda geopolimer beton üretimi için, alkali aktivatör olarak NaOH/Na₂SiO₃ ve KOH/Na₂SiO₃ karışımları kullanılmıştır. Na₂SiO₃'ün 2 modülü, NaOH ve KOH'ın molaritelerinin 10 M olarak kullanılması belirlenmiştir. Optimum kür koşulu olarak ise 90 °C'de 48 saat ısı kürü ve nem kaybını önleyecek şekilde numunelerin poşetlenmesi tespit edilmiştir. Üretilen numunelere fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri ve iç yapı analizleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Üretilen geopolimer beton numunelerin, 90 günlük nihai basınç dayanımları değerlendirildiğinde karışım tipleri içerisinde en düşük sonuç 14,12 MPa ile B-N-4 karışımı iken en yüksek basınç dayanım değeri ise 26,23 MPa ile B-K-5 karışımında elde edilmiştir.
- Genel olarak, siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde NaOH içeren, bej renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerde ise KOH içeren alkali aktivatör kullanıldığında daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.
- Üretilen numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde optimum dozajın 500 kg/m³ olduğu görülmüştür.
- Geopolimer beton numunelerin tamamı incelendiğinde 90 günlük nihai dayanımlarının en az %78'ini erken yaşta, 7 günlük dayanımlarında kazanmışlardır.
- Kür işlemlerinin tamamlanmasının ardından 3 günlük basınç dayanımlarından 90 günlük nihai basınç dayanımlarına kadar, basınç dayanımlarında en yüksek artış %119,01 ile S-N-6'da ve en yüksek düşüş ise %18,76 ile S-N-5'te tespit edilmiştir.
- Geopolimer beton numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımı 8,24 MPa ile B-N-6 karışımında, en düşük eğilme dayanımı ise 5,03 MPa ile S-N-5 karışımında tespit edilmiştir. Sehim değerleri incelendiğinde ise en fazla sehim değeri 2,501 mm ile B-N-4 karışımında, en az sehim değeri ise 0,690 mm ile B-K-4 karışımında elde edilmiştir. Tüm numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde KOH ile üretilen karışımlarda en yüksek eğilme dayanım değerleri 500 kg/m³ dozajda, NaOH ile üretilen karışımlarda ise en yüksek eğilme dayanım değerleri 600 kg/m³ dozajda tespit edilmiştir.

- NaOH ile üretilen karışımların KOH ile üretilen karışımlara göre kılcal geçirimsizlik katsayılarının yüksek olduğu, tüm numunelerde genel olarak dozaj miktarı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısının arttığı tespit edilmiştir.
- Boy değişim değerlerinde siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin bej renk Ahlat Taşı ile üretilenlere göre fazla olduğu görülmüştür.
- Geopolimer beton numunelerin radyasyon soğurma verileri incelendiğinde, KOH içeren karışımların NaOH içeren karışımlara göre radyasyon soğurmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Farklı dozaj ve renklerde üretilen numunelerin radyasyon soğurma verileri incelendiğinde ise değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Birim hacim ağırlıklarda, genel olarak siyah renkli Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlıklarının bej renkli Ahlat Taşı ile üretilenlere, KOH'lı karışımlarla üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlıklarının NaOH'lı karışımlarla üretilenlere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- FTIR, SEM ve EDX analizleri doğrultusunda siyah Ahlat Taşı ve KOH içeren (SK) karışımların daha ağsı yapıda olduğu görülmüştür.
- Yapılan deneylerden elde edilen verilere göre, Ahlat Taşından geopolimer beton üretilebileceği ve genel olarak siyah renk Ahlat Taşı ile üretilen numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği kanaatine varılmıştır.
- Tüm fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleriyle birlikte iç yapı analizleri de değerlendirdiğinde Ahlat Taşı ile geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak KOH'lı çözeltilerin kullanıldığı numunelerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Gelecekteki araştırmalarda, Ahlat Taşı ile üretilecek geopolimer ürünlere farklı katkı ve atık malzemelerin ilavesinin sonuçları incelenebilir. Yapay ve/veya doğal hafif agrega çeşitleri kullanılarak Ahlat Taşından hafif geopolimer yapı malzemelerinin üretilebilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Gawwad, H.A. and Abd El-Aleem, S., 2015. Effect of reactive magnesium oxide on properties of alkali activated slag geopolymer cement pastes. *Ceramics*, 59 (1), 37-47.
- Ahmari, S. and Zhang, L., 2012. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Constr. Build. Mater.* 29, 323–331.
- Akbulut, F., 2020. Kırmızı Çamur ve Yüksek Fırın Cürufunun Perlit Esaslı Geopolimer Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akyıldız, A., 2012. Beton Üretiminde Bor Atıklarının Pozzolan Materyal Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Allahverdi, A., Mehrpour, K. and Kani, E. N., 2008. Taftan pozzolan-based geopolymer cement. *IUST International Journal of Engineering Science*, 19, 1-5.
- Alonso, S. and Palomo, A., 2001. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Mater. Lett.* 47(1-2), 55–62.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. and Santoro, L., 2008. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymerbased products. *Waste Management*, 28, 416–423.
- Antep, B., 2018. Ahlat İlçesindeki Tarihi Yapıların Yapısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis.
- Anuar, K.A., Ridzuan, A.R.M. and Ismail, S., 2011. Strength characteristic of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate. *International Journal of Civil Environmental Engineering*, 11 (1), 81-85.
- Aredes, F.G.M., Campos, T.M.B., Machado, J.P.B., Sakane, K.K., Thim, G.P. and Brunelli, D.D., 2015. Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. *Ceram. Int.*, 41(6), 7302–7311.
- Ariöz, E., 2015. Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Arie, W., Gunasekara, C., Law, D. W. and Setunge, S., 2017. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 143, 272-279.
- Aslan, M., 2018. Mastik Asfalt Üretiminde Pomza, Perlit ve Ahlat Taşı Agregasının Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis.
- Atiş, C.D., Bilim, C., Çelik, Ö. and Karahan, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, 238 (1), 548-555.
- Aydar, E., Gourgaud, A., Ulusoy, I., Digonnet, F., Labazuy, P., Sen, E., Bayhan, H., Kurtas, T. and Tolluoglu, A.U., 2003. Morphological analysis of active mount nemrut stratovolcano, eastern turkey: evidences and possible impact areas of future eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, 301-312.

- Aygörmez, Y., 2018. Kulemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M. and Uysal, M., 2020. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*. 235, 117502.
- Aziz, A., Stocker, O., Hassani, I.E.A.E., Laborier, A.P., Jacotot, E., Khadiri, A.E. and Bousari, A.E., 2021. Effect of blast-furnace slag on physicochemical properties of puzzolan-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123880.
- Bakharev, T., Sanjayana, J.G. and Cheng, Y.B., 2000. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 1367-1374.
- Bakış, A., 2016. Rijit yol kaplama beton inşasında Ahlat Taşının kullanılabilirliği. *Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 164-171.
- Bakış, A., Işık, E., Hattatoğlu, F. ve El, A.A., 2014. Jeolojik miras nitelikli Ahlat Taşının inşaat sektöründe kullanımı. 3. Uluslararası Ahlat-Avrasya Bilim Kültür ve Sanat Sempozyumu, Ahlat/Bitlis.
- Balun, B., 2019. Alkalilerle Aktive Edilmiş Bitlis Yöresi Pomzası İçeren Hibrit Bağlayıcıların Üretilebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Baradan, B., Yazıcı H. ve Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). *Türkiye Hazır Beton Birliği*, 318, İstanbul, Türkiye.
- Başçık, H.İ., 2019. Kalsine edilmiş doğal puzolan esaslı geopolimer harç geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Benlice, E., 2020. Tel Çekme Prosesinde Kullanılmış Atık Toz Sabunun Geri Kazanımı İçin Endüstriyel Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Bernal, S.A., Bejarano, J., Garzon, C., Gutierrez, R.M., Delvasto, S. and Rodriguez, E.D., 2012. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. *Composites, Part B*, 43, 1919-1928.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H. and Si-yu, G., 2014. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* 99, 144–148.
- Blaszczynski, T. and Krol, M., 2015. Usage of green concrete technology in civil engineering. *Procedia Eng.* 122, 296 – 301.
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N. and Ramezani pour, A.A., 2011. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33, 251-260.
- Bucher, R., Cyr, M., Idir, R. and Habert, G., 2011. Etude de durabilité et analyse de cycle de vie des géopolymères à base de verre de recyclage et de métakaolin. *Université de Toulouse*.
- Büyüksırt, T. ve Kuleaşan, H., 2014. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi ve Gıda Analizlerinde Kullanımı, 39, 235-241.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem. Concr. Compos.* 29(3), 224–229.

- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P. and Rattanasak, U., 2014. Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkaliactivated composite. *Advanced Powder Technology*, 25 (3), 1087-1093.
- Cho, Y.K., Yoo, S.W., Jung, S.H., Lee, K.M. and Kwon, S.J., 2017. Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 145, 253–260.
- Choate, W.T., 2003. Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry. Report: Industrial Technological Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, USA.
- Comrie, D.C. and Davidovits, J., 1988. Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals. Geopolymer88; First European Conference on Soft Mineralurgy, June 2-3, Compiègne.
- Criado, M., Palomo, A. and Fernandez-Jimenez, A., 2005. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, (84) 2048-2054.
- Çiftçi, Y., Işık, M.A., Alkeçli, T. ve Yeşilova, Ç., 2008. Van Gölü havzasının çevre jeolojisi. *Jeolojisi Mühendisliği Dergisi*, 32 (2).
- Damineli, B.L., Kemeid, F.M., Aguiar, P. S. and John, M., 2010. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement Concrete Comp*, 32, 555-62.
- Davidovits, J., 1991a. Properties of geopolymer cements. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.
- Davidovits, J., 1991b. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Therm. Anal.* 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J., 1994a. Geopolymers: Man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials Education*, 91-137.
- Davidovits, J., 1994b. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, 6(2), 263–278
- Davidovits, J., 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, Proc. Geopolymer '99 International Conference, June 30-July 2, Saint-Quentin.
- Davidovits, J., 2002. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Proceedings of the Geopolymer 2002 Turning potential into profit Third International Conference, Melbourne, Australia.
- Davidovits J., 2008, Geopolymer chemistry and applications, Saint Quantin, France.
- Davidovits, J., Comrie, D.C., Paterson, J.H. and Ritcey, D.J., 1990. Geopolymeric concretes for environmental protection. *Concr. Int.* 12(7), 30–40.
- Deb, P.S., Sarker, P.K. and Barbhuiya, S., 2016. Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cem. Concr. Compos.* 72, 235-245.
- Dede, E., 2009. Ahlat Taşının (Ahlat-Bitlis) Mineralojik ve Jeokimyasal İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüzüncüyl Üniversitesi, Van.
- Demir, S., 2020. Kaolin ve Sodyum Silikat Esaslı İnorganik Bağlayıcının Basma Dayanımına Kimyasal Kompozisyonunun Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük.

- Detphan, S. and Chindaprasirt, P., 2009. Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 16(6), 720–726.
- Diaz, E.I., Loya, P.D., Candidate E. N. and Allouche, P.E., 2010, Engineering Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, International Concrete Sustainability Conference, Dubai, UAE.
- Dimas, D., Giannopoulou, I. and Papias, D., 2009. Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. *J. Mater. Sci.* 44(14), 3719–3730.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A. and Van Deventer, J. S. J., 2007a. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Material Science*, 42, 2917–2933.
- Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C. and Van Deventer J.S.J., 2007b. The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 1590-1597.
- Duxson, P. and Provis, J. L., 2008. Low CO₂ concrete: Are we making any progress?, BEDP environment design guide. Royal Australian Institute of Architects.
- Ekmen, Ş., 2021. Uçucu Kül Esaslı Hafif Geopolimer Harçların Taze ve Sertleşmiş Özelliklerinin İncelenmesi, Modellenmesi ve Optimizasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Elyamany, H.E., Elmoaty, M.A. and Elshaboury, A.M., 2018. Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. *Construction and Building Materials* 187, 974–983.
- El-Gamal, S.M.A. and Selim, F.A., 2017. Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production. *Sustainable Mater.Technol.* 12, 9–17.
- Emmons, P. H. and Sordyl, D. J., 2006. The state of the concrete repair industry, and a vision for its future. *Concrete Repair Bulletin*, July/August, 7–14.
- Erdal, M. ve Şimşek O., 2011. Ahlat Taşı (ignimbrit) atıklarının taşunu olarak beton içinde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 14(3), 173-177.
- Erdoğan, Y.T., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara.
- Fernandez A. and Palomo J., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35, 1984–1992.
- Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I. and Palomo, A., 2007. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *J. Mater. Sci.* 42(9), 3055–3065.
- Finocchiaro, C., Barone, G., Mazzoleni, P., Leonelli, C., Gharzouni, A. And Rossignol, S., 2020. FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (Mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions. *Construction and Building Materials*. 262, 120095.
- Gao, K., Lin, K.L., Wang, D., Hwang, C.L., Shiu, H.S., Chang, Y.M. and Cheng, T.W., 2014. Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 53, 503-510.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. and Fernandez-Jimenez, A., 2014. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 1-29 Mortars and Concretes, Elsevier Science, London.
- Gasparini, E., Tarantino, S.C., Conti, M., Biesuz, R., Ghigna, P., Auricchio, F., Riccardi, M.P. and Zema, M., 2015. Geopolymers from low-T activated kaolin: Implications for the use of alunite-bearing raw materials. *Appl. Clay Sci.* 114, 530–539.

- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. and Levring, H., 2004. WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiat. Phys. Chem.* 71,653-654.
- Glasser, F.P., 1995. Advanced cementitious materials. Insight into speciality inorganic chemicals (Ed, Thomson, D.). The Royal Society of Chemistry, 369-389.
- Görhan, G. and Kürklü, G., 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B.* 58, 371–377.
- Görhan, G., Kürklü, G. and Demir, İ., 2015. Effect of thermal curing processes on the properties of geopolymer paste. *Electronic Journal of Construction Technologies.* 11(2), 20-24.
- Gu, Y., Martin, R. P., Metalssi, O. O., Fen-Chong, T. and Dangla, P., 2019. Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 123, 105766.
- Gümüşsoy, M., 2019. Geri Dönüştürülmüş Agregaların Harç Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, Bartın.
- Haddad, R.H. and Alshbuol, O., 2016. Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Constr. Build. Mater.* 114(1), 699-707.
- Haha, M.B., Lothenbach, B., Le Saout, G. And Winnefeld., 2011. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag-part 1: effect of MgO. *Cement and Concrete Research*. 41(9), 955-963.
- Haliloğlu, Ç, Z., 2020. ICP-MS ile Saç Örneklerinde Element Tayini., Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Hardjito, D., 2005. Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Doctor Of Philosophy Thesis, Curtin University of Technology, Perth.
- Hardjito, D. and Rangan, B.V., 2005. Development and properties of low- calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- He, J., Zhang J., Yu, Y. and Zhang G., 2012. 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.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y. and Zhang, G., 2013. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* 37, 108–118.
- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M. and Liew, Y.M., 2011. Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 305-311.
- Hlavacek, P., 2014. Engineering Properties of Alkali Activated Composites. Doctor Of Philosophy Thesis, Czech Technical University In Prague, Prague.
- Islam, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. and Bashar, I.I., 2014. The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Mater. Des.* 56, 833–841.
- Jiao, Z., Wang, Y., Zheng, W. And Huang, W., 2018. Effect of dosage of sodium carbonate on the strength and drying shrinkage of sodium hydroxide based alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*, 179: 11- 24.
- Jordan, V.S.M, Cyriaque, R.K, Juvenal, G.D, Paul, V., Achile, N., Elie, K., Uphie, C.M. and Thomas, T.T., 2021. Evaluation of performances of volcanic-ash-laterite based blended

- geopolymer concretes: Mechanical properties and durability. *Journal of Building Engineering* 34 (2021) 101935.
- Joseph, B., 2015. Behaviour Of Geopolymer Concrete Exposed To Elevated Temperatures. Doctor Of Philosophy Thesis, Cochin University of Science and Technology, Kerala.
- Kantarıcı, F., 2018. Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tuf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Karadağ, S., 2021. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruf Bazlı Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Ortamında Mekanik Özelliklerinin ve Kimyasal Durabilitesinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Kaur, M., Jaspal, S. and Kaur, M., 2018. Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin, *Construction and Building Materials*. 190, 672–679.
- Kavaz, E., Armoosh, S. R., Perişanoğlu, U., Ahmadi, N. and Oltulu, M., 2020. Gamma ray shielding effectiveness of the Portland cement pastes doped with brass-copper: An experimental study. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108526.
- Kazancı, N. ve Gürbüz, A., 2014. Jeolojik miras nitelikli Türkiye doğal taşları. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 57, Sayı 1.
- Kaze, R. C., à Moungam, L. M. B., Cannio, M., Rosa, R., Kamseu, E., Melo, U. C. and Leonelli, C., 2018. Microstructure and engineering properties of Fe_2O_3 (FeO)- Al_2O_3 - SiO_2 based geopolymer composites. *Journal of Cleaner Production*, 199, 849-859.
- Ken, P.W., Ramli, M. and Ban, C.C., 2015. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Constr. Build. Mater.* 77, 370–395.
- Khale, D. and Chaudhary, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review. *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- Kirschner, A.V. and Harmuth, H., 2004. Investigation of geopolymer binder with respect to their application for building materials. *Ceramics-Silikaty*, 48, 117-120.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z. And Bradic, V., 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181,35-42.
- Kong, D.L.Y. and Sanjayan, J.G., 2010. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40, 334-339.
- Kumar, S. And Kumar, R., 2010. Tailoring geopolymer properties trough mechanical activation of fly ash. *Proc. Second International Conference on Sustainable construction*. June 28-30, Ancona.
- Kuranlı, Ö. F., 2020. Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerini İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kusbianoro, A., Nuruddin, M.F., Nasir Shafiq, N. And Anwar Qazi, S., 2012. The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 36,695–703.

- Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A. and Cleland, D. J., 2018. Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*. 166, 537–553.
- Lawson, S. and Dragusanu, R., 2008. *Building the world: Mapping infrastructure demand*. New York, NY: Goldman Sachs and Co.
- Lemougna, P.N., Wang, K., Tang, Q., Melo, U.C. and Cui, X., 2016. Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. *Ceram. Int.* 42(14), 15142–15159
- Levet, A. and Özdemir, Y. 2017. Determination of effective atomic numbers, effective electrons numbers, total atomic cross-sections and buildup factor of some compounds for different radiation sources. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 171–176.
- Levet, A., Kavaz, E. and Özdemir, Y., 2020. An experimental study on the investigation of nuclear radiation shielding characteristics in iron-boron alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 819, 152946.
- Lin, S.Y. and Wang, S.L., 2012. Advances in simultaneous DSC-FTIR microspectroscopy for rapid solid-state chemical stability studies: some dipeptide drugs as examples. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 461-478.
- Lutgens, F.K. and Tarbuck. E.J., 2012 . *Essentials of geology*. Eleventh Edition. Edinburg: Pearson, 98-99.
- Manjunatha, G.S., Radhakrishna, Venugopal, K. and Sasalatti, V. M., 2014. Strength characteristics of open air cured geopolymer concrete. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 73(2), pp. 149-156.
- Manohara, S.R., Hanagodimath, S.M., Thind, K.S. and Gerward, L., 2008. On the effective atomic number and electron density: a comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nucl Instrum. Methods B* 266, 3906-3912.
- Marland, G., Boden, T. and Andres, R., 2005, Global, regional, and national CO₂ emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*.
- Martin, A., Pastor, J.Y., Palomo, A. and Jimenez, A.F., 2015. Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates geopolymers. *Construction and Building Materials*, 93:1188-1196,
- Mermerdaş, K., Algin, Z. and Ekmen, Ş., 2020. Experimental assessment and optimization of mix parameters of fly ash-based lightweight geopolymer mortar with respect to shrinkage and strength. *Journal of Building Engineering*, 31, 101351.
- Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement Concrete Comp*, 31,601-605.
- Montes, C. and Allouche, E.N., 2012. Influence of activator solution formulation on fresh and hardened properties of low calcium fly ash geopolymer concrete. *Coal Combust. Gasif. Prod.* 4, 1–9.
- Nath, P. and Kumar, S., 2020. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer. *Construction and Building Materials*, 233:117294.
- Nazari, A., Bagheri, A. and Riahi, S., 2011. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Mater. Sci. Eng., A*. 528(24), 7395–7401.
- Nguyen, A.D. and Skvara, F., 2016. The influence of ambient pH on fly ash-based geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 72, 275-283.

- Noushini, A. and Castel, A., 2016. The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 112, 464-477.
- Nuaklong, P., Sata, V. and Chindaprasirt, P., 2018. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*. 161, 365-373.
- Okoye, F.N., Durgaprasad, J. and Singh, N.B., 2015. Mechanical properties of alkali activated fly ash / Kaolin based geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* 98, 685–691.
- Olçay, S., 2021. Yüksek Oranda Cüruf İçeren Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Mekanik ve Durabilite Performanslarının Zamanla İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Özdemir, A. ve Tuğ, O. Ç., 2010. Jeolojik bir değer: Nemrut stratovulkanı. *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi*. 4, 36-38.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., 1999. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Palomo, A., Criado, M. and Ferna, A., 2007. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. *Microporous and Mesoporous Materials*, 86, 207-214.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V. and Peris-Mora, E., 1995. Mechanical treatment of fly ashes. Part I: Physico-chemical characterization of ground fly ashes. *Cem. Concr. Res.* 25(7), 1469-1479.
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S. and Hatanaka, S., 2014. The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Mater. Des.* 55, 58–65.
- Pilehvar, S., Szczotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R. and Kjoniksen, A. L., 2019. Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*. 200, 94–103.
- Provis, J.L. and Bernal, S.A., 2014. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299–327.
- Provis, J.L., 2017. Alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.* (Accepted, In Press) <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Purdon, A., 1940. The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59 (9), 191-202.
- Rafeet, A., Vinai, R., Soutsos, M. and Sha, W., 2017. Guidelines for mix proportioning of fly ash/GGBS based alkali activated concretes. *Constr. Build. Mater.* 147, 130–142.
- Ramujee, K. and PothaRajub, M., 2017. Mechanical properties of geopolymer concrete composites. 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), 2937–2945.
- Rangan, B.V., 2008. Studies on fly ash-based geopolymer concrete. *Malaysia Construction Research Journal*, 3 (2), 1–20.
- Reinhardt, H.W. and Jooss, M., 1998. Permeability, diffusion, and capillary absorption of concrete at elevated temperature in the service range. *Otto-Graf-Journal*, 9, 34-47.
- Robayo-Salazar, R.A., Gutiérrez, R.M. and Puertas, F., 2016. Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*. 133, 491-497.

- Rocha, S.T., Dias, D.P., França, F.C., Guerra, R.R. and Marques, L.R., 2018. Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na^+ and K^+). *Construction and Building Materials*, 178, 453–461.
- Rovnaník, P., 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 24(7), 1176–1183.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T. and Chung, Y.S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr. Build. Mater.* 47, 409–18.
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A. and Chindaprasirt, P., 2012. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cem. Concr. Compos.* 34(5), 700–708.
- Sedef, G., 2017. Sivil Mimaride Doğal Malzeme Kullanımının Mimariye ve Sürdürülebilirliğe Etkileri: Ahlat Taşı Örneği. Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi,
- Shamshad, L., Rooh, G., Limkitjaroenporn, P., Srisittipokakun, N., Chaiphaksa, W., Kim, H.J. and Kaewkhao, J., 2017. A Comparative study of gadolinium based oxide and oxyfluoride glasses as low energy radiation shielding materials. *Prog. Nucl. Energy*, 97 (2017), pp. 53-59,
- Shi, C., Jiménez, A.F. and Palomo, A., 2011. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 750-763.
- Shi, X.S., Wang, Q.Y., Zhao, X.L. and Collins, F., 2012. Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Adv. Mater. Res.* 450-451, 1577-1583.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuram, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti, S.S. and Sahota, H.S., 2002. Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses. *Nucl Instrum. Methods B* 194, 1-6.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. and Bhattacharyya, S.K., 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 78-90.
- Song, D., Huang, T., Fang, Q., Liu, A., Gu, Y., Liu, Y., Liu, L. and Zhang, S., 2021. Feasibility exploration on the geopolymerization activation of volcanic tuff, parametrical optimization, and reaction mechanisms. *Journal Of Materials Research And Technology*, 11,618-632.
- Songpiriyakij, S., Pungern, Pungpremtrakul, T. and Jaturapitakkul, C., 2011. Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. *Materials and Design* (32) 3021–3028.
- Soyer-Uzun, S. and Çetintaş R., 2018. Relations between structural characteristics and compressive strength in volcanic ash based one-part geopolymer systems. *Journal of Building Engineering*, 20, 130–136.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P. and Arulrajah, A., 2015. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Constr. Build. Mater.* 82, 20–30.
- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Appl. Geochem.* 17(8), 1143-1148.
- Şimşek, O. ve Erdal, M., 2004. Ahlat Taşının (ignimbrit) bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(4): 71-78.
- Şimşek, O. and Erdal, M., 2010. Investigation of some mechanical and physical properties of the ahlat stone (ignimbrite). *Gazi University Journal of Science*, 17(4):71-78.

- Tchadjie, L.N., Ekolu, S.O., Quainoo, H. and Tematio, P., 2021. Incorporation of activated bauxite to enhance engineering properties and microstructure of volcanic ash geopolymer mortar composites. *Journal of Building Engineering*, 41, 102384.
- Teixeira-Pinto, A., Fernandes, P. and Jalali, S., 2002. Geopolymer manufacture and application-Main problems when using concrete technology. *Proc. Geopolymers 2002 International Conference*, October 28-29, Melbourne.
- Tennakoon, C.K., 2016. Assessment of Properties of Ambient Cured Geopolymer Concrete for Construction Applications. Doctor Of Philosophy Thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne.
- Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S., 2009. Effect of Na₂O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid. *Int. J. Civil Environ. Eng.* 3(3), 193-199.
- Turgut, P., 2018. Uçucu kül, kireç ve cam tozu kullanarak blok üretimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 413-418.
- Uğurlu, A. İ., 2020. Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme ve Sülfat Direncine Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- USGS., 2014. United States Geological Survey Mineral Commodity Summaries- Cement. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S. and Lorenzon, L., 1997. Factors effecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash, part 1 theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.
- Vijai, K., Kumutha, R. and Vishnuram B.G., 2010. Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(9), 1419-1423.
- Wallah, S.E. and Rangan, B.V., 2006. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long term properties. Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Western Australia.
- Watt, F., 2008. Deprem ve yanardağlar. Türkiye: Tübitak Yayınları, 19.
- Winnefeld, F., Haha, M.B., Le Saout, G., Costoya, M., Ko, S. And Lothenbach, B., 2014. Influence of slag composition on the hydration of alkali-activated slags. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2), 85-100.
- Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., 2000. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *Int. J. Miner. Process.* 59(3), 247-266.
- Yaddollahi, M.M., 2013. Hasankale Pomzasından Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Geopolimer Çimentosunun Üretilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H. and Chen, Y., 2009. Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by gsothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493, 49-54.
- Yegin, Y., 2020. Isparta Gölcük Yöresi Volkanik Külünden Üretilen Geopolimer Betonun Özelliklerinin Fabrika Atıkları ve Nano Malzemeler ile İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Zeman, F. and Lackner, K., 2008. The reduced emission oxygen kiln. Lenfest Center For Sustainable Energy Columbia University in New York. Report No. 2008.01
- Zeybek, O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

- Zhang, H.Y., Qiu, G.H., Kodur, V. and Yuan, Z. S., 2020. Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites*. 106, 103483.
- Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z. and Ou, Z., 2017. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Constr. Build. Mater.* 152, 598-613.
- Zheng, K., Chen, L. and Gbozee, M., 2016. Thermal stability of geopolymers used as supporting materials for TiO₂ film coating through sol-gel process: Feasibility and improvement. *Construction and Building Materials*, 125,1114-1126.
- Zhou, S., Lu, C., Zhu, X. and Li, F., 2021. Upcycling of natural volcanic resources for geopolymer: Comparative study on synthesis, reaction mechanism and rheological behaviour. *Construction and Building Materials*, 268, 121184.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Serdar Murat Uğur TOPRAK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Ilıca Yavuz Selim Anadolu Öğretmen Lisesi (2008)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (2013)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı (2021)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	