

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI BAĞLAYICI VE OTOKLAVLANMIŞ GAZBETON ATIĞI
İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN DAYANIM VE MİKROYAPI
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SELDA KILIÇ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Süleyman İPEK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Erhan GÜNEYİSİ

BİNGÖL-2024

**FARKLI BAĞLAYICI VE OTOKLAVLANMIŞ GAZBETON ATIĞI İÇEREN
GEOPOLİMER HARÇLARIN DAYANIM VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Süleyman İPEK danışmanlığında, Selda KILIÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 20/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kasım MERMERDAŞ *İmza* :
Üye : Doç. Dr. Ahmet BENLİ *İmza* :
Üye : Doç. Dr. Süleyman İPEK *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 222M473

ÖNSÖZ

Tez çalışma konumu belirleyen, özellikle TÜBİTAK projesi kapsamında çalışmamı sağlayan, deneysel çalışmalarını yürütürken bana rehberlik eden değerli tez danışmanım Doç. Dr. Süleyman İpek'e, tez süresince hem bilgi ve tecrübeleriyle hem de teze katkılarıyla desteğini esirgemeyen yardımcı danışmanım Prof. Dr. Erhan Güneyisi'ye, girdiğim bu yolda kendime güvenmemi sağlayan ve jüri üyem olan Doç. Dr. Ahmet Benli hocama, diğer jüri üyem olan Prof. Dr. Kasım Mermerdaş hocama,

Deney çalışmalarında bana yardımcı olan ve gerekli tüm materyalleri sunan Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığına,

Tez çalışmalarım sırasında ve deney çalışmalarımı yürütürken bana her anlamda destek olan sevgili eşim Ali Osman Kılıç'a, bu süreçte benim yanımda olan canım kızlarım Meryem Kılıç ve Rabia Kılıç'a,

Son olarak hayatımın her alanında olduğu gibi bu alanda da bana her zaman destek veren ve dualarını esirgemeyen annem Leyla Kasap ve babam Nurettin Kasap'a ve sevgili kardeşlerim Esat Ender Kasap ve Lale İnci Karataş'a,

Saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 222M473 numaralı araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Selda KILIÇ

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Geopolimer Beton	3
2.2. Geopolimerizasyon	4
2.3. Geopolimer Bileşenleri	7
2.3.1. Uçucu Kül.....	7
2.3.2. Silis Dumanı	8
2.3.3. Alkali Aktivatörler	9
2.3.3.1. Sodyum Hidroksit	10
2.3.3.2. Sodyum Silikat.....	11
2.3.4. Agregalar	11
2.3.5. Su.....	12
2.4. Kür Süresi ve Sıcaklığın Geopolimer Betona Etkisi.....	12
2.5. Geopolimer Betonun Özellikleri.....	14
2.5.1. Basınç Dayanımı	14
2.5.2. Yarmada Çekme Dayanımı	15

2.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	16
2.5.4. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDX) Analizi.....	16
2.5.5. X-ışını Kırınımı Difraksiyonu (XRD) Analizi.....	17
2.6. Geopolimer Kompozitler İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	17
2.7. Otoklavlanmış Gazbeton.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	25
3.1.1. Uçucu Kül.....	25
3.1.2. Silis Dumanı	27
3.1.3. Doğal Kum	28
3.1.4. Otoklavlanmış Gazbeton Atığı Agregası	30
3.1.5. Alkali Aktivatörler	33
3.1.6. Su.....	34
3.1.7. Süperakışkanlaştırıcı.....	34
3.2. Karışım Oranları, Üretim ve Numunelerin Hazırlanması.....	34
3.2.1. Numunelerin Hazırlanması.....	37
3.3. Yöntem.....	38
3.3.1. Deneysel Çalışmalar.....	38
3.3.1.1. Yayılma Tablası ve Taze Birim Ağırlık.....	38
3.3.1.2. Basınç Dayanımı	39
3.3.1.3. Yarmada Çekme.....	39
3.3.1.4. SEM/EDX Analizleri ve Mapping.....	40
3.3.1.5. X-ışını Difraksiyonu (XRD) Analizi	41
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	42
4.1. Yayılma Tablası Deneysel Sonuçları	42
4.2. Taze Birim Ağırlık Sonuçları.....	44
4.3. Basınç Dayanımı Deneysel Sonuçları	46

4.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları	49
4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri Sonuçları.....	52
4.6. Enerji Dağılımı X-Işını Spektrometresi (EDX) Analizleri Sonuçları.....	63
4.7. Mapping (Haritalama) Analizleri Sonuçları	69
4.8. X-ışınları Difraksiyonu (XRD) Analizleri Sonuçları.....	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
EKLER.....	91



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDX	: Enerji dağılımı spektrometresi
XRD	: X-ışınları difraksiyon analizi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
CO ₂	: Karbondioksit
SiO ₂	: Silisyum dioksit
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
SiO ₂	: Silika dioksit
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
Na ₂ CO ₃	: Sodyum karbonat
UK	: Uçucu kül
FA	: F sınıfı uçucu kül
S-0	: Silis dumanı içermeyen harç
S-10	: %10 silis dumanı içeren harç
GGA1	: 0,125-1 mm-0-1mm gazbeton atığı agrega tane boyutu
GGA2	: 0,125-2 mm gazbeton atığı agrega tane boyutu
GGA4	: 0,125-4 mm gazbeton atığı agrega tane boyutu
CASH	: Kalsiyum alüminat hidrat
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Geopolimer harç üretim süreci	3
Şekil 2.2.	Geopolimer oluşumunun bağ görüntüsü [21].....	5
Şekil 2.3.	Geopolimerizasyon süreci [22]	6
Şekil 2.4.	Geopolimer oluşumunun denklemleri [22]	6
Şekil 2.5.	Genel XRD çalışma prensibi [59]	17
Şekil 2.6.	a) Na ₂ O/SiO ₂ oranı 0,98 olduğunda basınç dayanımı ve b) Na ₂ O/SiO ₂ oranı 0,29 olduğunda basınç dayanımı.....	21
Şekil 3.1.	Uçucu külün fotoğraf görüntüsü	26
Şekil 3.2.	Uçucu külün mikro analizleri: a) SEM görüntüsü ve b) XRD spektroskopisi.....	26
Şekil 3.3.	Silis dumanının fotoğraf görüntüsü.....	27
Şekil 3.4.	Silis dumanının mikro analizleri: a) SEM görüntüsü ve b) XRD spektroskopisi.....	28
Şekil 3.5.	Doğal kumun fotoğrafı	29
Şekil 3.6.	Doğal kumun SEM görüntüleri: a)1000X SEM görüntüsü ve b) 5000X SEM görüntüsü.....	29
Şekil 3.7.	Doğal kumun XRD spektroskopisi.....	30
Şekil 3.8.	Doğal kum, GGA4, GGA2 ve GGA1 agregalarının elek analizi sonuçları	31
Şekil 3.9.	GGA'nın fotoğraf görüntüleri: a) GGA4, b) GGA2 ve c) GGA1	32
Şekil 3.10.	GGA'ların SEM görüntüleri: a) 10.000X SEM görüntüsü ve b) 5000X SEM görüntüsü.....	33
Şekil 3.11.	GGA'nın XRD spektroskopisi	33
Şekil 3.12.	Deney numuneleri	37
Şekil 3.13.	(a) geopolimer harçların kıvamını ölçmek için kullanılacak huni ve sarsma tablası ve (b) geopolimer harcın yayılma çapının ölçümü	38
Şekil 3.14.	a) Press dayanım test presi ve b) numune boyutlarının ölçümü.....	39
Şekil 3.15.	Yarmada çekme deneyi yapılmış numune	40
Şekil 3.16.	SEM/EDX cihazı.....	41

Şekil 3.17. XRD cihazı	41
Şekil 4.1. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların akış tablası değerlerindeki değişim:	44
Şekil 4.2. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların taze birim ağırlıklarındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar	46
Şekil 4.3. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların 28 günlük ortalama basınç dayanımındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar	49
Şekil 4.4. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanımındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar	52
Şekil 4.5. SD-0/GGA-0 karışıma ait SEM görüntüleri; a) 2000X görüntüleme ve b) 5000X görüntüleme	53
Şekil 4.6. SD-10/GGA-0 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x2000 görüntüleme)	53
Şekil 4.7. SD-0/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	54
Şekil 4.8. SD-10/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	54
Şekil 4.9. SD-0/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	55
Şekil 4.10. SD-10/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	55
Şekil 4.11. SD-0/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	56
Şekil 4.12. SD-10/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	56
Şekil 4.13. SD-0/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	57
Şekil 4.14. SD-10/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	57

Şekil 4.15. SD-0/GGA2-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	58
Şekil 4.16. SD-10/GGA2-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	58
Şekil 4.17. SD-0/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	59
Şekil 4.18. SD-10/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	59
Şekil 4.19. SD-0/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	60
Şekil 4.20. SD-10/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	60
Şekil 4.21. SD-0/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	61
Şekil 4.22. SD-10/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	61
Şekil 4.23. SD-0/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	62
Şekil 4.24. SD-10/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)	62
Şekil 4.25. Doğal kum numunesi obje 85 kesitinin EDX analizi	64
Şekil 4.26. GGA numunesi obje 90 kesitinin EDX analizi	65
Şekil 4.27. SD-0/GGA0 kodlu karışıma ait numunenin obje1 kesitinin EDX analizi	66
Şekil 4.28. SD-10/GGA0 kodlu karışıma ait numunenin obje 5 kesitinin EDX analizi	67
Şekil 4.29. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA	69
Şekil 4. 30. Mapping Si elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA	69
Şekil 4.31. Mapping Al elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA.....	69
Şekil 4.32. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0	70
Şekil 4.33. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0.....	70
Şekil 4.34. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0.....	70
Şekil 4.35. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 ve b) SD-0/GGA1- 60.....	71

Şekil 4.36. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 ve b) SD-0/GGA1-60.....	71
Şekil 4.37. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-10/GGA1-20 ve b) SD-10/GGA1-60.....	72
Şekil 4.38. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-10/GGA1-20 ve b) SD-10/GGA1-60.....	72
Şekil 4.39. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 b) SD-10/GGA1-20.....	73
Şekil 4.40. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-40 b) SD-10/GGA1-40.....	73
Şekil 4.41. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-60 b) SD-10/GGA1-60.....	73
Şekil 4.42. SD-0/GGA-0 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	74
Şekil 4.43. SD-10/GGA-0 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	75
Şekil 4.44. SD-0/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	75
Şekil 4.45. SD-10/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	76
Şekil 4.46. SD-0/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	76
Şekil 4.47. SD-10/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	77
Şekil 4.48. SD-0/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	77
Şekil 4.49. SD-10/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi.....	78

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Geopolimer betonların farklı kür yöntemleri.....	14
Tablo 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi.....	25
Tablo 3.2. Silis dumanının kimyasal bileşimi.....	27
Tablo 3.3. Doğal kumun kimyasal bileşimi	28
Tablo 3.4. Geri dönüşüm gazbeton agregasının kimyasal bileşimi	31
Tablo 3.5. Geri dönüşüm gazbeton agregasının fiziksel özellikleri.....	31
Tablo 3.6. Sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal bileşenleri (kütlece yüzde).....	34
Tablo 3.7. Sodyum silikatın (Na ₂ SiO ₃) kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri	34
Tablo 3.8. Geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemelerin miktarları (kg/m ³).....	36

FARKLI BAĞLAYICI VE OTOKLAVLANMIŞ GAZBETON ATIĞI İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN DAYANIM VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışması, geleneksel Portland çimentosunun çevresel etkilerini en aza indirmek ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirmek için atık malzemelerin beton üretimindeki potansiyelini değerlendirerek yeniden kullanılması için önemli çıkarımların sağlanması amacıyla hazırlanmıştır. Bu bağlamda, farklı bağlayıcı ve otoklavlanmış gazbeton atıklarının geopolimer harç üretiminde doğal ince agrega yerine kısmen kullanımının, geopolimer harçların dayanımının ve mikroyapısındaki değişimlerine olan etkisinin kapsamlı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle, iki farklı prekürsör tipine göre, üç farklı gazbeton atığı agrega tane boyutu dağılımına sahip (0,125-1 mm; 0,125-2 mm; 0,125-4 mm), altı farklı gazbeton atığı agrega ikame seviyesi için toplam 38 geopolimer harç karışımı (2'si kontrol, 36'sı geri dönüşüm gazbeton agregası içeren) tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada, geopolimer harç üretiminde doğal kum yerine geri dönüştürülmüş gaz beton agregaları kullanılmıştır. İkame seviyeleri hacimce %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 olarak belirlenmiştir. Karışımların 19'unda (bir kontrol ve 18 gazbeton atığı agregası içeren), prekürsör olarak sadece F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kalan 19 karışımda (bir kontrol ve 18 gazbeton atığı agregası içeren), öncül olarak %90 F sınıfı uçucu kül ve %10 silis dumanı kombinasyonu kullanılmıştır. Geopolimer harçların üretiminde alkali aktivatör olarak ise NaOH ve Na₂SiO₃ karışımı kullanılmıştır. Geopolimer harçların 28 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Tüm karışımlarda kontrol karışımlarına göre geri dönüşüm gazbeton agregasının ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile dayanım performansının düştüğü görülmüştür. Ayrıca geopolimer harç karışımlarının mikroyapıları, geopolimer hamur yapısı ile agregalar arasındaki bağlanma derecesinin tespiti, karışımların matrislerindeki elementlerin dağılımının belirlenmesi ve bu elementlerin dağılımının görselleştirilmesi ve karışımların amorf ve kristal yapılarının incelenmesi için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX), haritalama (mapping) ve X-ışınları Difraktometresi (XRD) analizleri yapılmıştır. SEM/EDX, haritalama ve XRD analizleri ile yapılan mikroyapısal incelemede gazbeton atığı agregasının ikame seviyesindeki artış, geopolimerik matrisin kompaktlığını önemli ölçüde azaltarak malzemenin genel performansını olumsuz etkilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç Dayanımı, Geopolimer Kompozit, Geri Dönüşüm, SEM/EDX, Silis Dumanı, Uçucu Kül, Yarmada Çekme Dayanımı, XRD.

INVESTIGATION OF THE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS CONTAINING DIFFERENT BINDERS AND AUTOCLAVED AAC WASTE

ABSTRACT

The objective of this thesis is to assess the potential of waste materials in concrete production with a view to reducing the environmental impact of conventional Portland cement and to develop sustainable construction materials. In this context, it was aimed to comprehensively investigate the effect of partial use of different binders and autoclaved aerated concrete wastes instead of natural fine aggregate in geopolymer mortar production on the strength and microstructural changes of geopolymer mortars. Therefore, a total of 38 geopolymer mortar mixtures (2 control and 36 containing recycled aerated concrete aggregate) were designed for six different aerated concrete waste aggregate substitution levels with three different aerated concrete waste aggregate grain size distributions (0.125-1 mm; 0.125-2 mm; 0.125-4 mm) according to two different precursor types. In this study, recycled aerated concrete aggregates were employed as a replacement for natural sand in the production of geopolymer mortar. The replacement levels were 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, and 60% by volume. In 19 of the mixtures (comprising one control and 18 including aerated concrete waste aggregates), only F-class fly ash was employed as a precursor. In the remaining 19 mixtures (comprising one control and 18 including aerated concrete waste aggregates), a combination of 90% F-class fly ash and 10% silica fume was used as the precursor. NaOH and Na₂SiO₃ mixture was used as alkali activator in the production of geopolymer mortars. It was observed that the strength performance of all mixtures decreased with the increase in the substitution level of recycled aerated concrete aggregate and the fineness ratio, in comparison to the control mixtures. Furthermore, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectrometry (EDX), mapping and X-ray diffraction (XRD) analyses were conducted to determine the microstructure of the geopolymer mortar mixtures, the degree of bonding between the geopolymer paste structure and the aggregates, the distribution of the elements in the matrices of the mixtures and to visualise the distribution of these elements, and the amorphous and crystalline structures of the mixtures. Microstructural examination by SEM/EDX, mapping, and XRD analyses showed that the increase in the substitution level of aerated concrete waste aggregate significantly decreased the compactness of the geopolymeric matrix and negatively affected the overall performance of the material.

Keywords: Compressive Strength, Geopolymer Composite, Recycling, SEM/EDX, Silica Fume, Fly Ash, Splitting Tensile Strength, XRD.

1. GİRİŞ

İnşaatlarda yoğun olarak kullanılan beton, uygun fiyatı, kolay şekillendirilebilmesi, yüksek mukavemeti, uzun ömürlü olması ve her yerde kolayca temin edilebilmesi gibi birçok avantajı ile öne çıkar. Üretiminde ise en çok Portland çimentosu kullanılır [1]. Ancak çimentonun üretim aşamasında bazı dezavantajları da mevcuttur. Ana bileşenlerinin üretimi sırasında yüksek miktarda enerji harcanması ve bunun sonucunda CO₂ ve sera gazı salınımı, çimentonun çevresel etkilerini ön plana çıkarmaktadır. Bu durum, küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevresel problemlere sebep olmaktadır [2].

Ayrıca çimento endüstrisi su kaynaklarının kirlenmesine ve hava kirliliğine neden olurken, çimento üretimi için kireçtaşı, kum ve kil gibi büyük miktarda doğal hammaddeye ihtiyaç duyulur. Bu hammaddelerin aşırı kullanımı, doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel tahribata yol açar ve birçok doğal alanın yok olmasına neden olarak ekosistemlerin dengesini bozar [3].

Bağlayıcı olarak inşaatta en fazla kullanılan malzeme geleneksel Portland çimentosudur. Bir başka açıdan, yaklaşık 1,5 milyar ton CO₂ emisyonu ve %36 oranındaki küresel enerji tüketiminden sorumlu olması nedeniyle Portland çimentosu kullanımı uzun yıllardır sorgulanmaktadır. Portland çimentosu üretiminin çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için araştırmacılar alternatif bağlayıcılar geliştirmeye odaklanmışlardır. Geopolimerler bu alternatiflerden biridir. Daha az CO₂ salınımıyla üretilen bu ürünler, sadece ekonomik açıdan avantajlı olmakla kalmayıp aynı zamanda çevreye de duyarlıdır. Bunun sebebi ise, üretimde kullanılan hammaddelerin veya öncülerin büyük ölçüde uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi atık ürünlerden oluşmasıdır [4].

Alüminasilikat bazlı geopolimerlerin alkali aktivatörlerle tepkimeye girerek yeni bir bağlayıcı malzemenin üretilebileceği ve bu malzemenin inşaat sektöründe Portland çimentosu gibi kullanılabileceği bilimsel çalışmalar sonucunda kanıtlanmıştır [5].

Yeni nesil yapı malzemesi olarak öne çıkan geopolimerin üretim aşamalarında oldukça düşük CO₂ salınımı, az enerji ihtiyacı ve alkali silikat içerikli endüstriyel atıkların (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi) hammadde olarak kullanımı, inşaat sektöründe kullanılmasını oldukça cazip hale getirmektedir. Bu sayede hem doğal kaynaklara olan bağlılık azalmakta hem de stoklama sorunlarına çözüm bulunmaktadır [6].

Geopolimerlerin geleneksel Portland çimento yerine tercih edilmesinin temel sebepleri, atık ürün stoklarının azaltılması, doğal kaynakların korunması ve çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımında önemli bir düşüş sağlanmasıdır [7]. İnşaat sektörü, hammadde üretiminden, saha inşaatına, yeniden inşa veya rehabilitasyona kadar her aşamada birçok olumsuz çevresel etkiye neden olmaktadır. Değişken inşaat atıklarının yönetimi, kentsel yenilemenin hızlanması, hızlı kentleşme gelişiminin yanı sıra devasa inşaat, yenileme ve yıkım gibi diğer birçok faaliyetle bağlantılı olarak son yıllarda önemli bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle, inşaat atıklarının çevresel etkisi daha az olacak şekilde bertaraf edilmesi ve “çöp yığını” olgusunun önlenmesi dünya çapında hükümetler için acil bir konu haline gelmiştir [8]. Gazbeton atığı da bu yapı malzemelerden biri olarak değerlendirilir.

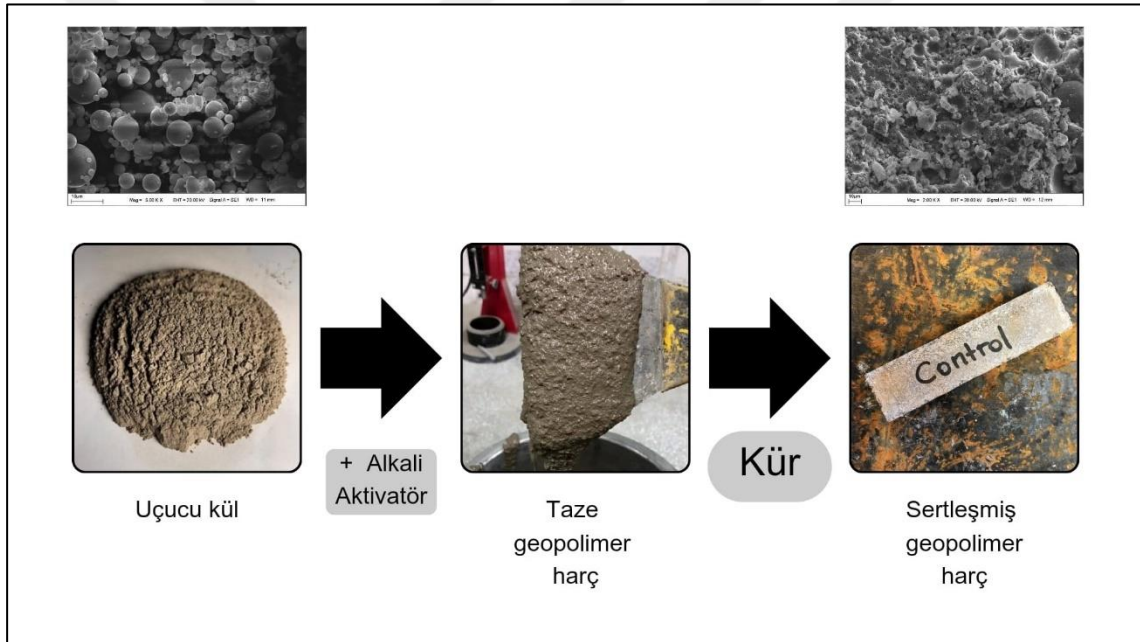
Otoklavlanmış gazbetonun, 1940’lardan beri Avrupa’da, 1963’ten beri ise Türkiye’de kullanılmasının binaların yaşlanması ile önümüzdeki 10-20 yıl içerisinde büyük bir gazbeton atık dalgasına yol açması beklenmektedir [9]. Shenzhen’de 2018-2025 yılları arasında inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan yaklaşık 30 milyon m³ yapı malzemesi atığının oluşması öngörülmektedir ve bu atıkların %40’ının gazbeton atığı olması beklenmektedir [10].

Bu tez çalışması tamamen doğal kaynakların korunması amacıyla planlandığı için üretilen geopolimer harcı oluşturan agregalar, atık malzeme olan otoklavlanmış gazbetonların belirli oranlarda doğal kum ile yeri değiştirilmesi ile oluşturulmuştur. Böylece daha çevresel ve daha ekonomik olması düşünülen bir beton üretimi gerçekleştirip bilime bir katkı sağlanması düşünülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geopolimer Beton

Geopolimer, Davidovits tarafından 1979'da tanımlanan, alüminosilikat kaynaklı malzemelerin alkali çözeltilerle reaksiyona girmesiyle oluşan inorganik polimerik bir bağlayıcıdır [11]. En kolay haliyle geopolimerler Şekil 2.1'deki gibi oluşmaktadır. Bu şekilde uçucu kül yerine başka bir alümina silikat malzeme kullanılabilir.



Şekil 2.1. Geopolimer harç üretim süreci

Geopolimerler, uçucu kül ve silis dumanı gibi serbest silis ve alümin içeren hammaddelerin sodyum silikat, potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit gibi alkalilerle aktive edilmesi sonucu oluşan alüminosilikat esaslı bağlayıcı malzemelerdir [12]. Bu bağlayıcıların yüksek performanslı olması çevresel koşullara dayanıklılığı ve Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif sunması nedeniyle araştırma ve geliştirme çalışmaları hızla devam etmektedir [13]. Geopolimer üretimi, geleneksel betona kıyasla 6 kat daha az CO₂ salınımla hem atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de çimentoya

alternatif kaynak malzeme sağlanması açısından sera gazı emisyonu bağlamında oldukça önemlidir [14].

Neupane [15] yaptığı bir çalışmada; %20 oranında uçucu kül ikame etmiş çimento ile aynı şekilde üretilen geopolimeri kıyaslandığında CO₂ üretiminin %66 azaldığını tespit ettiğini bildirmiştir.

Mahmoodi vd. [16] geopolimer kullanımı ile küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin %73 oranında azaltılabileceğini ileri sürmüştür.

Çimento esaslı yüksek dayanımlı beton bir geopolimer esaslı betona göre kıyaslandığında ise yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mekanik özellikler nedeniyle üstün yangın direnci sağlaması ve geopolimerde bulunan gözenek sistemi nedeniyle yayılmasının engellenmesi avantajlarından biridir [17].

Geopolimerlerin endüstriyel atık minerallerden üretilmesi, onları düşük maliyetli ve çevre dostu bir seçenek haline getirir. Alkali aktivasyon ile hızlı basınç dayanımı kazanan, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük enerji tüketimi sunan geopolimerler, oda sıcaklığında da reaksiyona girerek birçok alanda kullanım avantajı sağlar [18].

Geopolimerler, kimya, fizikokimya, mineraloji, jeoloji ve mühendislik gibi birçok bilim dalında araştırma konusu olan ve geniş bir kullanım yelpazesine sahip yenilikçi malzemelerdir. Yangına dayanıklı malzemelerden, estetik açıdan önemli taşlı yapılara, düşük enerjili seramiklerden, çimento ve beton üretimlerine kadar pek çok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, atık su arıtma tünellerinde ve atık malzemelerin değerlendirilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır [19].

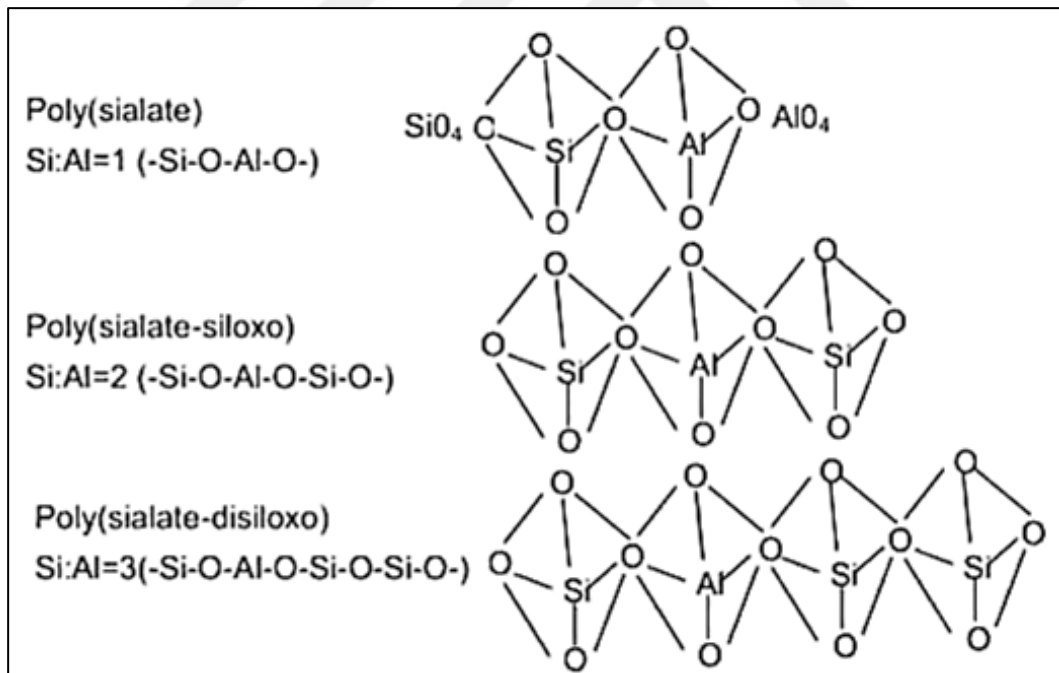
2.2. Geopolimerizasyon

Geopolimerizasyon, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi atık mineral kaynaklı malzemelerin alkali silikatlarla düşük sıcaklıklarda reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelen bir kimyasal süreçtir. Geopolimerin istenilen fiziksel özellikleri, katı hammadde bileşimi, kullanılan kimyasalların oranları, kütleme veya

kalsinasyon işleminin ısı ve süresi gibi parametrelerin etkisiyle değişen molekül yapısına bağlıdır.

Geopolimer sentezi, fırınlanmış kildeki alüminyum ve silikat atomlarının oksijen atomu elektronlarını paylaşarak kovalent bağ oluşturması prensibine dayanmaktadır. Silikat (SiO_2) mineralleri oldukça kararlı yapılara sahiptir. Bu kararlılığı aşmak için alkali aktifleştiriciler kullanılır. Alkali aktifleştiriciler, silikat yapısını zayıflatarak zamanla geopolimerin temel bileşeni olan Si-O-Al bağlarının oluşmasına imkan tanır. Bu bağlar, üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturarak geopolimerin sağlam ve dayanıklı bir malzeme olmasını sağlar [20].

Geopolimerin Si/Al molar oranı, bu malzemenin performansını ve kullanım alanlarını önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktördür ve kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması Şekil.2.2'deki gibidir [21].



Şekil 2.2. Geopolimer oluşumunun bağ görüntüsü [21]

Geopolimerizasyon işlemi alkali aktifleştirici çözelti hammaddelerdeki silikat ve alüminat iyonlarını çözerek moleküler düzeye getirmesi aşaması ile başlar. Daha sonraki aşama, yeni bir kimyasal yapı oluşturmak üzere çözülmüş silikat ve alüminat iyonlarının

Geopolimer betonda mukavemet geliştirme mekanizması kullanılan alüminosilikat kaynak malzemenin türüne bağlıdır. Örneğin, düşük kalsiyum içerikli kaynak malzemeler (metakaolin, F sınıfı uçucu kül gibi) kullanıldığında, sodyum alüminosilikat hidrat (N–A–S–H) ürünleri oluşurken; yüksek kalsiyum içerikli kaynak malzemeler (yüksek fırın cürufu, C sınıfı UK gibi) kullanıldığında, kalsiyum alüminosilikat hidrat (C–A–S–H) jel ürünlerin baskın olduğu reaksiyon ürünleri oluşmaktadır. Geopolimerizasyon sonucu oluşan bu nihai ürünler geopolimer betonun mekanik özelliklerini belirlemektedir [23].

2.3. Geopolimer Bileşenleri

2.3.1. Uçucu Kül

Elektrik üretiminde kömür yakıldığında geriye kalan ince kül tabakası uçucu kül olarak adlandırılır. Kömür tozu yanma odasına püskürtülürken, ağır kül parçacıkları (cüruf veya alt kül) tabana çökerken, çok daha hafif kül parçacıkları (uçucu kül) baca gazıyla birlikte dışarı atılır ve bu şekilde uçucu kül oluşur [24]. Kömür bazlı termik santrallerde enerji üretimi sırasında açığa çıkan uçucu kül, hava, su ve toprağı kirleterek insan sağlığı ve çevre üzerinde önemli olumsuz etkilere yol açmaktadır [25]. Uçucu kül emisyonlarını kontrol altına almak için bu kül parçacıklarının atmosfere salınmadan önce kütleden ayrılması önemlidir. Bu amaçla elektrostatik çöktürücüler, torba filtreleri ve farklı teknolojiler kullanılmaktadır. [24].

Kömürün cinsi ve yanma koşulları, uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Alüminyum ve silis bakımından zengin olması nedeniyle puzolanik özellik gösteren uçucu kül, çimento ile birlikte veya doğrudan betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca, ince taneli ve yuvarlak yapısı sayesinde taze betonda işlenebilirliği artırır [26].

Kendiliğinden bağlayıcılık özelliği bulunmayan uçucu küller, sönmüş kireç ile kimyasal reaksiyona girerek sertleşebilecek bir malzemedir [27]. Çimento ile suyun kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşan kireçle tepkimeye girerek yeni bağlayıcı bileşikler oluşturan uçucu küller, betonda birçok fayda sağlar. Küresel yapısı sayesinde ayrışmayı önler, işlenebilirliği kolaylaştırır, hidrasyon ısısını düşürerek erken yaşta çatlamayı

engeller, çimentodaki boşlukları doldurarak dayanımı artırır ve betonun uzun ömürlü olmasını sağlar [28].

Uçucu kül, amorf fazda bulunan ve içeriğindeki silika dioksit, alüminyum oksit, sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi bileşiklerle reaksiyona girebilen bir malzemedir [29].

Uçucu küller, silika dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi bileşenlerden oluşur. Bu bileşenlerin oranları, uçucu külün hangi sınıfa ait olduğunu belirler. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller ikiye ayrılır:

F Sınıfı Uçucu Küller: Bitümlü kömürün yakılmasından elde edilir. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 toplam oranı %70'den fazladır ve CaO oranı %10'un altındadır. Bu küller puzolanik özellik gösterir.

C Sınıfı Uçucu Küller: Linyit kömürünün yakılmasından elde edilir. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 toplam oranı %50 ile %70 arasındadır ve CaO oranı %10'un üzerindedir. Yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinir [30].

Uçucu kül, betonun işlenebilirliğini, su geçirmezliğini ve sülfat direncini artırarak maliyeti düşürse de priz gecikmesi ve erken dayanım kazanma kaybı gibi bazı olumsuz etkilere de neden olabilir. Bu nedenle, uçucu kül kullanımı, betonun türüne, istenen özelliklerine ve uygulama koşullarına göre dikkatlice değerlendirilmelidir [31].

2.3.2. Silis Dumanı

Silis dumanı, yüksek saflıkta kuvarsın 2000°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrik ark fırınlarında indirgenmesi sonucu açığa çıkan bir endüstriyel yan üründür. Silisyum metali ve ferro-silisyum alaşımlarının üretimi sırasında oluşur [32].

Silis dumanı, $15.000\text{-}25.000\text{ m}^2/\text{kg}$ gibi oldukça yüksek bir özgül yüzey alanına sahip, küresel veya mikro küresel partiküllerden oluşan son derece ince bir tozdur. Bu mikro kürelerin ortalama çapı $0,15\text{ mikron}$ dur ve bu da onları bir çimento tanesinden yaklaşık 100 kat daha küçük yapar [33].

Silis dumanı, yüksek özgül yüzeyi ve küçük partikül boyutu ile son derece reaktif bir puzolanik malzemedir. Bu özellikler betona birçok fayda sağlar, ancak taşınma, işleme ve depolamayı zorlaştırır [34].

Silis dumanı, ana bileşeni amorf silika (kristal olmayan saf silikon) olan bir malzemedir. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, farklı silis dumanı örneklerinin çoğunlukla camsı silika formunda kristobalit içerdiğini göstermiştir. Silis dumanı tipik olarak %90'dan fazla silika dioksit (SiO_2) içerir ve az miktarda demir oksit (Fe_2O_3), magnezyum oksit (MgO) ve alkali oksitler (Na_2O , K_2O) gibi diğer bileşenleri de barındırır [35].

Beton üretiminde, çimento miktarının yaklaşık %10'unu silis dumanı ile değiştirmek yaygın bir uygulamadır. Bu sayede hem erken yaşlarda hem de nihai dayanımda oldukça yüksek mukavemetlere sahip betonlar elde edilebilmektedir. Silis dumanının bu etkinliği, son derece ince tane yapısına ve yüksek oranda amorf silika dioksit içermesine bağlıdır. Silis dumanı, betona birçok fayda sağlayan bir katkı maddesi olsa da çok ince tanelerden oluşması bazı dezavantajlara da yol açmaktadır. Bu dezavantajlardan biri, taze betonun işlenebilirliğini zorlaştırması ve daha fazla su ihtiyacı duymasıdır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretiminde silis dumanı kullanıldığında, işlenebilirliği ve su ihtiyacını dengelemek için su azaltıcı katkıları ile birlikte kullanılması gerekir [36].

2.3.3. Alkali Aktivatörler

1908 yılında, Alman bilim insanı Kühl, alümin ve silikat içerikli toz malzemelerin alkaliler ile reaksiyona sokulup aktifleştirilerek yeni bir bağlayıcı malzeme üretilebileceğini keşfetti. Bu, geleneksel çimentodan farklı bir bağlayıcı malzemesi geliştirmek için ilk önemli adımdı ve alkali aktivasyon olarak bilinen bir sürecin temelini oluşturdu. Kühl'ün 1908 yılında yaptığı öncü araştırmalar, alkali aktive ürünlerin geleneksel çimentoya benzer özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, yeni bir bağlayıcı malzeme türünün geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. 1940'lı yıllarda ise Purdon, alkali aktive bağlayıcıların inşaat sektöründe kullanımına yönelik ilk bilimsel çalışmaları sunmuştur [37].

Geopolimer üretiminde en yaygın kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) karışımlarından oluşan çözeltilerdir. Bu alkali çözeltilerin temel işlevi, geopolimer hamurundaki alüminyum ve silikat bileşiklerini aktifleştirerek polimerizasyon reaksiyonunu başlatmaktır. Geopolimerizasyon reaksiyonunda sadece NaOH kullanılması, Na_2SiO_3 gibi bir silikat kaynağı eklenmemesi halinde, NaOH geopolimerizasyon reaksiyonunda Al ve Si iyonlarının polimerleşmesini sağlayarak bağlayıcı matriksin oluşumuna katkıda bulunan OH^- iyonları sağlar. Fakat silikat kaynağı eksikliği nedeniyle OH^- iyonlarının yeterli olması sağlanamaz. Bu da polimerizasyon reaksiyonunun tamamlanamamasına ve zayıf, gözenekli bir yapı oluşmasına neden olur [18,37].

2.3.3.1. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, NaOH formülüyle bilinen ve “kostik soda” olarak da adlandırılan, sodyum karbonattan elde edilen bir kimyasal bileşiktir. Sodyum hidroksit, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti sayesinde birçok endüstriyel alanda en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir. Sodyum hidroksit, koyu beyaz renkli ve toz halinde olan, güçlü bazik özelliklere sahip bir kimyasal bileşiktir. 13,5’lik yüksek pH değeri, suda kolayca çözünürlüğü ve reaksiyona girebilme yeteneği sayesinde birçok endüstriyel alanda geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, sabun ve deterjan yapımından tekstil endüstrisine, kimyasal madde üretimindeki geniş kullanım alanıyla birçok farklı sektörde önemli bir rol oynamaktadır. Sodyum hidroksit, su ortamında kimyasal ayrışma göstererek OH^- iyonları ve Na^+ iyonlarına parçalanır. Bu iyonlar, su çözeltisinde serbestçe hareket edebilirler. Daha sonra, bu sulu ortamda karbondioksit (CO_2) gazı ile reaksiyona girerek karbonatlaşma adı verilen bir kimyasal reaksiyon meydana gelir.

Geopolimer üretimi için kullanılan alkali aktivatörler arasında sodyum hidroksit, önemli bir yere sahiptir ve yaygın olarak tercih edilir. Hazırlanan karışımdaki molarite ve yoğunluk üretilen harcın dayanımını belirlemektedir Geopolimer harçlarda sodyum hidroksit oranının artması, molarite ve yoğunluk artışı ile erken yaş dayanımını önemli ölçüde artırırken, aşırı kullanımı yapısal düzensizliğe neden olabilir. Bu nedenle, sodyum

hidroksit oranı dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir. Geopolimer harç üretiminde NaOH kullanımı, C-S-H ürünlerinin oluşumunu sağlayarak bağlayıcı matrisin oluşmasına yardımcı olurken, aynı zamanda kürlenme sırasında ısı üretimini de artırır [38].

2.3.3.2. Sodyum Silikat

Su camı olarak da bilinen sodyum silikat, $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ formülüyle temsil edilen ve katı veya sıvı formda bulunan bir inorganik bileşiktir. Saf sodyum silikat, renksiz veya beyaz renktedir. Fakat endüstriyel ve kimyasal uygulamalarda kullanılan sodyum silikat, yabancı maddelerin etkisiyle yeşil veya mavi renk alabilir. Bu renk değişimi, sodyum silikatın saflık derecesini ve yabancı maddelerin türünü gösteren bir gösterge olabilir.

Sodyum silikat, inşaat, tekstil, madencilik, su arıtma ve temizlik gibi birçok farklı sektörde geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Sodyum silikat, silikon dioksit ve sodyum karbonatın yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girmesiyle üretilir ve bu işlem sırasında karbondioksit gazı açığa çıkar [38].

2.3.4. Agregalar

Farklı boyutlarda taneli malzemeden oluşan ve betonda dolgu görevi gören mineral esaslı maddeye agrega adı verilir. Doğal agregalar kum, çakıl ve kırma taş gibi malzemeleri kapsar [39].

Betonun temelini oluşturan agregalar, hem büzülmeden kaynaklı çatlak oluşumunu engeller hem de yüksek dayanım özellikleriyle betonun sağlamlığına önemli katkıda bulunur. Ayrıca betonun aşınmaya karşı veya çevreden gelebilecek dış etkilere karşı betonun direncini artırır. Farklı tipte agregalar, betona farklı özellikler kazandırabilir. Örneğin, hafif agregalar kullanılan betonlar daha hafif ve ısı yalıtımı daha iyi olurken, yüksek dayanımı istenen yapılarda daha sert agregalar tercih edilir. Betonun niteliklerini doğrudan etkileyen agrega, gradasyon, tane büyüklüğü, şekli, dokusu, su emme kapasitesi, birim ağırlığı, yoğunluğu, yabancı madde içeriği, aşınma ve donma direnci, dayanımı, ısısal özellikleri ve elastiklik modülü gibi çeşitli özelliklere sahip olmalıdır [36].

2.3.5. Su

Geopolimerlerin dayanımı, karışımdaki su oranından önemli ölçüde etkilenir. Su içeriği arttıkça, geopolimerlerin işlenebilirliği artarken, basınç dayanımı ve durabilite azalır. Bu durum, suyun geopolimer bağlayıcısının hidrasyonunu ve kürlenmesini bozmasından kaynaklanır. Yüksek su içeriği, geopolimer harcında daha fazla gözenek oluşumuna yol açar. Bu gözenekler, gerilmeler altında çatlama ve kopmaya neden olarak dayanımı ve durabiliteyi olumsuz etkiler. Dolayısıyla, geopolimer üretim sürecinde optimum su içeriğinin seçilmesi kritik önem taşır. Bu seçim, kullanılan hammaddelerin türüne, kürlenme işlemine ve istenilen performansa bağlı olarak değişir [40].

Yadollahi vd. [41], yaptıkları çalışmada ferrokrom cürufunu aktive edebilmek için, Na_2O yüzdesi, silika modülü ve su/bağlayıcı oranlarına göre dokuz farklı seride geopolimer karışımı hazırlamıştır. Molaritesi (Na_2O): %4, %7 ve %10 alınmış ve su/bağlayıcı oranı: 0,36, 0,40 ve 0,44 oranları kullanılmıştır. Sonuç olarak, sabit Na_2O %10 miktarında su/bağlayıcı oranı arttıkça mukavemetin önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir.

Çelikten ve Atabey [42], çalışmalarında bazalt taşı kesim atıkları ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlar. Bu amaçla 4 farklı su içeriği ile geopolimer harçlar üretilmiştir. Karışımlar 0,31, 0,35, 0,40 ve 0,45 olmak üzere 4 farklı su/ABT (atık bazalt tozu) oranı ile oluşturulmuştur. Harçların basınç dayanımları ve eğilme dayanımları su içeriğinin azalması ve ısı kürlenme süresinin artması ile birlikte belirgin bir şekilde artmış olduğu tespit edilmiştir.

2.4. Kür Süresi ve Sıcaklığın Geopolimer Betona Etkisi

Geopolimer karışımlarının kürlenme sürecinde uygulanan sıcaklık ve nem gibi değişkenler, bu malzemelerin mekanik özellikleri, dayanımı, gözeneklilik gibi birçok özelliğini doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalar, bu parametrelerin geopolimerlerin performansı üzerindeki etkilerinin oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Geopolimerlerin kürlenmesi için 20-100°C arasında farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde yapılan çalışmalar, kür parametrelerinin bu malzemelerin özelliklerini

önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, belirli bir sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığında betonun dayanımında artış olmadığı tespit edilmiştir [43].

Bing-hui vd. [44], metakaolin esaslı geopolimerler üzerine yapılan çalışmalarında 60-70°C üzerindeki kür işleminin uzun süreli dayanım üzerinde zararlı olduğunu tespit etmiştir ve daha yüksek sıcaklıkta uygulanan kür işlemlerinin hızlı prize neden olan reaktiviteye yol açtığını kanıtlamıştır.

Bazı uçucu kül ve volkanik kül bazlı geopolimer sistemlerinde eşik sıcaklığı, diğer sistemlere göre daha yüksek olup genellikle 100°C'yi aşmamakla birlikte, bu değer sistemin bileşimine bağlı olarak değişkenlik gösterir [37]. Uçucu kül bazlı geopolimer betonların oda sıcaklığında tam kürlenmesi uzun zaman aldığından, geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak için ısı kürü uygulaması yaygın olarak tercih edilir. Isı kürü, uçucu külün aktivasyonunu hızlandırarak yüksek dayanımlı geopolimer betonların daha kısa sürede üretilmesini sağlar. Bu amaçla, numuneler genellikle 50°C ve üzeri sıcaklıklarda en az bir gün süreyle kürlenir.

Geopolimer betonun basınç dayanımı ısı kür derecesi ve zamanındaki artış ile daha fazla olur. Ayrıca, uzun süreli kürlenme, alkali aktifleşmiş betonların basınç dayanımını artırırken, ısı kürü sonrasında da bu artışın devam ettiği, ancak daha yavaş bir seyir izlediği gözlenmiştir [45].

Önceki araştırmalar, kürlenme süresinin artmasının polimerizasyon sürecine katkıda bulunduğunu ve daha yüksek basınç dayanımına neden olduğunu göstermiştir [46]. Örnek verilecek olursa, Altındal [43], farklı kür koşullarının geopolimer beton numunelerin basınç dayanımına etkisini incelemiştir. Bu bağlamda, %100 cüruf, %75 cüruf ile %25 uçucu kül ve %50 cüruf ile %50 uçucu kül olacak şekilde 3 çeşit geopolimer harç karışımı hazırlamıştır. Daha sonra bu harçları Tablo.2.1'deki gibi 13 farklı yöntemle kürlenmiştir.

Sonuçlara göre, 28. günde elde edilen maksimum dayanım %100 cüruf ve %75 cüruf ile %25 uçucu kül numuneleri için 2 gün ısı kürü + 26 gün suda kür ortamı olurken, %50 cüruf ile %50 uçucu kül numuneleri için ise maksimum dayanım 26 gün suda + 2 gün ısı

kürü ortamında çıktığını gözlemlemiştir. 90. gün ise, maksimum basınç dayanımları %100 cüruf, %75 cüruf ile %25 uçucu kül ve %50 cüruf ile %50 uçucu kül numunelerinde (tüm numunelerde) 90 gün suda kür ortamında çıktığını gözlemlemiştir.

Tablo 2.1. Geopolimer betonların farklı kür yöntemleri

Tip	Sembol	Kür yöntemi
1	28A	28 gün laboratuvar
2	28W	28 gün suda
3	26A+2O	26 gün laboratuvar + son iki gün 70°C 48 saat fırın
4	26W+2O	26 gün suda + son iki gün 70°C 48 saat fırın
5	2O	70°C 48 saat fırın
6	2O+26A	70°C 48 saat fırın + 26 gün laboratuvar
7	2O+26W	70°C 48 saat fırın + 26 gün suda
8	2O+88A	70°C 48 saat fırın + 88 gün laboratuvar
9	2O+88W	70°C 48 saat fırın + 88 gün suda
10	88A+2O	88 gün laboratuvar + son iki gün 70°C fırın
11	88W+2O	88 gün suda + son iki gün 70°C fırın
12	90A	90 gün laboratuvar
13	90W	90 gün su

2.5. Geopolimer Betonun Özellikleri

2.5.1. Basınç Dayanımı

Geopolimer betonun basınç dayanımı, kullanılan malzemelerin özellikleri (alkali aktivatör, bağlayıcı), karışım oranları (aktivatör/bağlayıcı, su/bağlayıcı), kütleme koşulları ve bağlayıcı malzemenin fiziksel yapısı gibi birçok parametreye bağlı kompleks bir özelliktir. Özellikle bağlayıcı malzemenin inceliği ve yüksek özgül yüzey alanı, geopolimerleşme reaksiyonunu hızlandırarak daha yüksek dayanım değerlerine ulaşılmasını sağlar [47].

Can [48], çalışmasında hafif geopolimer betonları yüksek sıcaklık (150, 300, 450, 600, 750°C) etkisine maruz bırakmıştır ve yüksek sıcaklık dirençlerini araştırmıştır. Sonuçları normal geopolimer betonlar ile mukayese etmiştir. Yüksek sıcaklıkların hem normal hem

de hafif geopolimer betonlarda bağlayıcı matrisin güçlenmesine ve sonuç olarak basınç dayanımında artışa neden olduğunu tespit etmiştir. Ancak bu etkinin, hafif betonlarda daha belirgin bir şekilde olduğunu gözlemlemiştir [49].

Görür [50], çalışmasında farklı derişim oranlarındaki geopolimer betonun basınç dayanımını incelemiştir. Su/bağlayıcı oranı sabit 1/3 ve aktivatör olarak NaOH kullanmıştır. Aktivatör miktarı ise çözeltideki toplam sodyum oranı %4, %6, %8, %10, %12, %14, %16, %18 ve %20 olacak şekilde ayarlamıştır. En yüksek basınç dayanımı %14 derişime ait numunelerde olduğunu tespit etmiştir.

2.5.2. Yarmada Çekme Dayanımı

Geopolimer betonun mekanik özelliklerini belirlemede yarmada çekme ve eğilme dayanımları önemlidir. Yarmada çekme dayanımı, betonun yapısında çatlak oluşumu ve ilerlemesi, kesme mukavemeti ve donatı çeliğinin doğru yerleştirilmesi gibi durumların anlaşılmasını sağlar. Geopolimer betonun yüksek basınç dayanımına kıyasla çekme dayanımları daha düşük sonuçlanmaktadır [51].

Tuyan vd. [52], araştırmalarında F tipi uçucu kül bazlı ve C tipi uçucu kül bazlı, yüksek sıcaklıkta 70°C etüv ve 5 gün kürlenen numuneler (YS), ortam sıcaklığında 28 gün boyunca havada kürlenen numuneler (OS) olarak isimlendirilen geopolimer beton numunelere yarmada çekme deneyi yapmıştır. Yarmada çekme dayanımları sonuçlarında, en yüksek sonucu veren geopolimer betonların F tipi uçucu kül bazlı yüksek sıcaklıkta kürlenen numune 3 MPa ve C tipi uçucu kül bazlı ortam sıcaklığında kürlenen numune 2,4 MPa olduğunu tespit etmiştir. Yarmada çekme dayanımı yüksek olan bu karışımların basınç dayanımlarının da yüksek çıktığını rapor etmiştir. C tipi uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda yüksek sıcaklık kürlenmenin, mikro çatlak oluşumu ve agrega-bağlayıcı bölgesi zayıflaması nedeniyle yarmada çekme dayanımını düşürdüğünü gözlemlemiştir.

2.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM, nanometre ölçeğinde yapıların detaylı karakterizasyonu için en güçlü araçlardan biridir. Morfoloji ve kimyasal bileşim analizinde önemli rol oynar [53]. Bu teknik, numunenin yüzeyinin geniş bir alanını aynı anda odakta tutarak, yüksek alan derinliğine sahip mikrograflar üretebilir. Bu mikrograflar, numunenin kimyasal bileşimini ve kristal yapısını analiz etmek için EDX ile birlikte kullanılabilir [54].

SEM, numunenin yüzeyine 1-30 keV enerjili bir elektron demeti göndererek saçılan elektronları tespit eder ve bu sayede numunenin 3 boyutlu görüntüsünü oluşturur [55]. SEM görüntülerinin kalitesi, elektron probunun özellikleri ve numune ile etkileşim sonucu oluşan sinyallerin türü ve şiddeti ile doğrudan ilişkilidir. Elektronların numunedeki atomlarla çarpışması sonucu oluşan çeşitli sinyaller, numunenin morfolojik, kimyasal ve kristalografik yapısı hakkında detaylı bilgi sağlar. Dahası, SEM, yüzey kusurlarını tespit ve analiz edebilir, kimyasal bileşenlerin dağılımını gösterebilir ve kristallerin yapısını belirleyebilir. Numune üzerindeki elektronların kinetik enerjisi, onların etkileşim gücünü ve türünü belirler. Mikro ölçekteki numunelerin yapısal özellikleri ve işlevlerinin araştırılması için SEM tarafından sağlanan yüksek çözünürlük potansiyeli oldukça önemlidir [56].

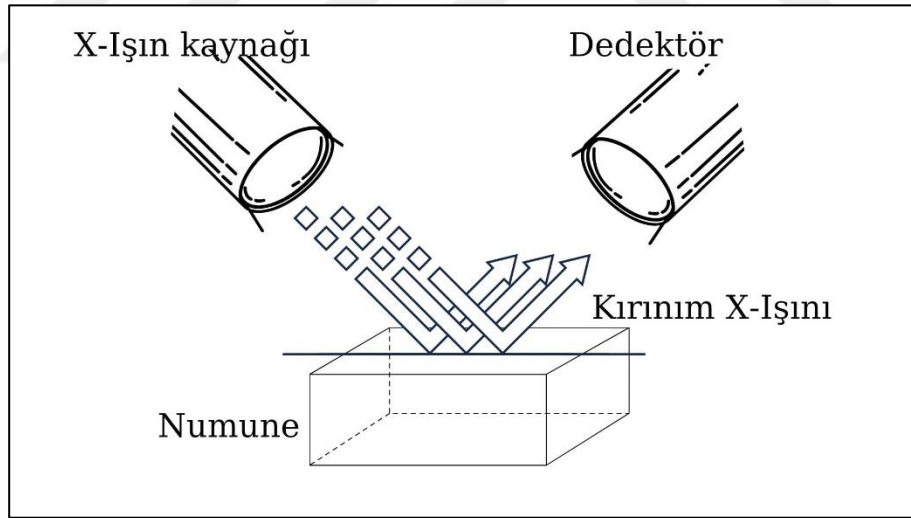
2.5.4. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDX) Analizi

EDX, elementlerin kimyasal kimliklerini ve oranlarını belirlemek için karakteristik X-ışınlarını kullanan bir analiz yöntemidir. Numunelerin kimyasal bileşimini incelemek için biyoloji, mühendislik, teknoloji ve adli tıp gibi birçok alanda kullanılır. Nanopartikülleri tespit etmek için de önemli bir araçtır [57]. EDX, SEM ile birlikte kullanılarak, numunenin yüzeyine yakın elementlerin kimyasal kimliklerini ve konsantrasyonlarını analiz edebilir ve bu elementlerin numune üzerindeki dağılımını haritalayabilir. Bu analiz, yayılan X-ışınlarının enerjisini ölçerek gerçekleştirilir [58].

2.5.5. X-Işını Kırınımı Difraksiyonu (XRD) Analizi

XRD, katı haldeki malzemelerin kristal yapılarını araştırmak için kullanılan bir deneysel tekniktir. Malzemelerin atomik ve moleküler yapılarını, kristal tanelerinin boyutlarını, farklı kristal fazlarını, kristal düzenini ve kristal kusurları inceleyerek bilgi verir [59]. Ayrıca XRD, polimer nano kompozitlerin yapısının belirlenmesinde, proses kinetiği çalışmalarında oldukça fazla tercih edilmektedir. Nano malzemelerin morfolojik değişimleri, XRD desenlerindeki piklerin şiddeti, şekli ve konumundaki varyasyonlar ile takip edilebilir [60].

Şekil 2.5'te XRD cihazının çalışma şekli ve X-ışını kırınımını gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi sırasıyla katot ışın tüpünde X-ışınları üretilir, monokromatikleştirme ile X-ışınları belirli bir dalga boyuna filtrelenir, numuneye yönlendirilmeden önce yoğunlaştırılır, X-ışınları numuneye gönderilir, saçılır ve bu saçılmadan numunenin yapısı hakkında bilgi edinilir [59].



Şekil 2.5. Genel XRD çalışma prensibi [59]

2.6. Geopolimer Kompozitler İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Uçucu kül ve silis dumanı ile üretilen geopolimerlerin dayanım, dayanıklılık ve mikroyapı özellikleri üzerinde literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [61]. Bu özellikler üzerine farklı oranlarda silis dumanı dozajının, kür koşullarının etkileri birçok

çalışmada rapor edilmiştir [62]. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkların F sınıfı uçucu külle üretilen geopolimerlerin mikroyapısı ve performansı üzerindeki etkileri hala incelenmektedir [63]. Uçucu kül esaslı geopolimer harçlarla yapılan çalışmaların bazıları aşağıda sunulmuştur;

Zhang vd. [64], F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer betonların farklı kürlenme koşullarında (oda sıcaklığı ve 80°C) yüksek sıcaklık performansını, farklı oranlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak incelemiştir. Araştırmacılar, ürettikleri beton numunelerini 5°C/dk ısıtma hızında 100°C ila 1000°C arasında farklı sıcaklıklara maruz bırakarak termal şok etkilerini incelemiştir. Numunelerde görsel inceleme, termogravimetrik analiz, çatlak ölçümleri, mekanik testler ve mikroyapısal analizler yaparak yüksek sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Oda sıcaklığında kürlenmiş betonlar yüksek sıcaklıklarda daha fazla kütle kaybı yaşadıklarını ve yüzeylerinde iç kısımlara göre daha fazla çatlak oluştuğunu tespit etmiştir. F sınıfı uçucu kül içeren betonlar ise 600°C'ye kadar olan sıcaklıklara karşı daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmiştir. Isıl kürlenme işlemi, geopolimer betonların yüksek sıcaklık performansını önemli ölçüde artırarak ortam küründe üretilen numunelere göre daha iyi olduğunu rapor etmiştir.

Dutta [65], uçucu kül geopolimerine silis dumanı katılmasının gözenekliliği ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmıştır. Geopolimer numuneleri, %2,5 ila %5 aralığında ilave silis dumanı ile karıştırılan uçucu külün, %8 Na₂O içeriğine sahip sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı ile aktive edilmesiyle hazırlanmıştır. Geopolimer örneklerinin karakterizasyonunu SEM/EDX ile analiz etmiştir. Geopolimer harçlara %5 silis dumanı ilavesi basınç dayanımı arttırdığını, silis dumanı ile birleştirilen numuneler için SEM mikrograflarının daha iyi mikroyapı gösterdiğini ve daha az gözeneklilik sergilediğini gözlemlemiştir. Elde edilen geopolimerin bazı özelliklerini iyileştirmek veya değiştirmek için ek bir malzeme olarak silis dumanı kullanılabileceğini rapor etmiştir.

Erdoğan [12], yaptığı çalışmada, geopolimer harçların yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonra mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmıştır. Harçlar, ince öğütülmüş ham perlit (RP) ve F sınıfı uçucu kül (FA) karışımları ile yapılmıştır. RP-FA

karışımları 10 M NaOH çözeltisi ile alkali aktive edilmiştir. Geopolimer harçların sentezi, 90, 4 ve 8 saat boyunca 24°C’de, farklı RP/FA kütle oranlarıyla gerçekleştirilmiştir (100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100). Sertleşmiş özelliklerle ilgili çeşitli deneyler 7, 28 ve 90 gün boyunca kürlendikten sonra yapılmıştır. Kürlenmeden sonra, geopolimer harçları ayrı ayrı 400°C, 600°C ve 800°C’lik yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Yüksek sıcaklığın geopolimer özellikleri üzerindeki etkisi, kütle kaybı, mukavemet kaybı ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mikroyapılardaki değişiklikler açısından belirlenmiştir. En iyi sonuçlar RP/FA kütle oranı 25/75 olan geopolimer harçlarda gözlemlenmiştir. Harçlarda 800°C’ye maruz bırakıldıktan sonra yeni kristal fazlar tespit edilmiştir. 3 adet numune seçilmiş olup, seçilen geopolimer numuneleri üzerinde yapılan SEM analizinin sonuçlarında geopolimer harçların matrisleri, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce (başlangıç) kompakt ve nispeten homojen olduğu ve bu kompakt mikroyapı 600°C’de korunmadığı tespit edilmiştir. 600°C’ye maruz bırakıldıktan sonra harç matrislerinde bozulma ve mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Ek olarak, başlangıçta bazı harçların SEM analizinde reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıkları görülmüştür. Bu parçacıklar 400°C, 600°C ve 800°C’de gözlemlenmiştir. Bu gözlemlerle, parçacıkların yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girebileceğini ve geopolimer jeller oluşturabileceği gösterilmiştir.

EDX analizleri SEM görüntüsü üzerinde belli alanlar işaretlenerek yapılmıştır. Bazı harçların Al/Si element oranları anlamlı derecede yüksek çıktığını ve ek olarak, tüm geopolimer harçlarının Al/Si element oranları, 800°C’de, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önceki başlangıç oranlarından daha yüksek çıktığını rapor etmiştir. Geopolimer harçlarda uçucu kül içeriğindeki artış Na/Al molar oranını düşürmüştür. 400°C’ye kadar olan sıcaklıklarda bu oran daha da azalmış, ancak daha yüksek sıcaklıklarda ise artış gözlemlenmiştir. XRD analizi ile ise harçlarda yüksek sıcaklık etkisinden önce görülmeyen Zeolit ve Nefelin kristal fazları, 800°C maruziyetten sonra ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. SEM/EDX ve XRD analizleri ile harçların 800°C’de mukavemetindeki artış, harçların kristal yapılarındaki değişim ve Al/Si oranındaki değişimin, 800°C’de yeni kristal fazların oluşumu ile açıklanabileceğini rapor etmiştir.

Ryu vd. [66], yaptığı çalışmada, tamamen uçucu kül ile üretilen harçlarda farklı alkali aktivatörlerin kullanılması durumunda harç içinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar

ve bu reaksiyonların harcın basınç dayanımı ve mikroyapısı üzerindeki etkileri incelemiştir. Harçların mikroyapısını SEM, EDX, XRD, FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) analizleri kullanılarak yorumlamıştır. Araştırma sonuçları, alkali aktivatörlerin molaritesindeki artışın, erken dönem basınç dayanımında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Yapılan SEM ve EDX analizleri, harç yapısını en çok etkileyen elementlerin alüminyum (Al) ve silikon (Si) olduğunu ortaya koymuştur. XRD analizleri, farklı alkali aktivatörlerin kullanılmasının numunenin yoğunluğu üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermiştir. Ancak FTIR spektroskopisi, uçucu kül ve sertleşmiş harçtaki Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının miktarında önemli farklılıklar olduğunu ortaya çıkarmıştır.

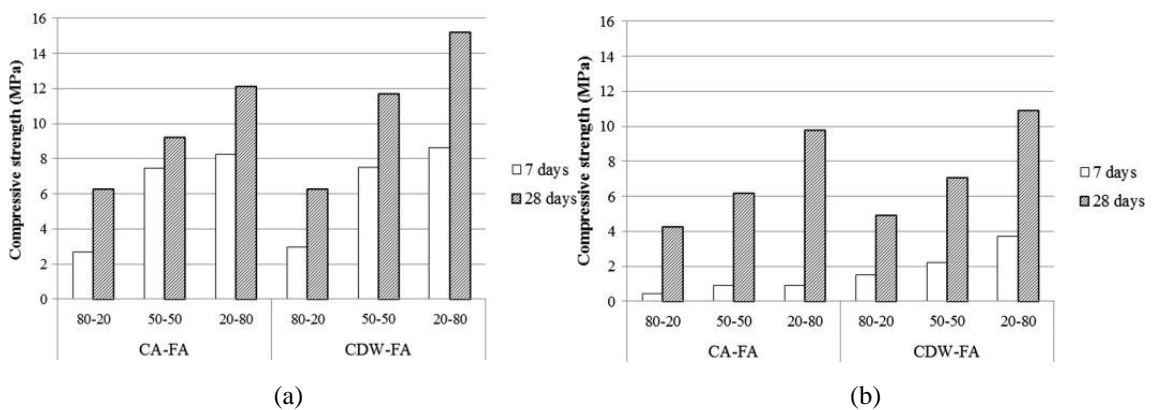
Ahmari vd. [67], geri dönüştürülmüş beton agregaları ile birlikte yeni beton üretmek için kullanılabilen F sınıfı uçucu kül (FA) ile karıştırılmış öğütülmüş atık beton (GWC) tozundan geopolimerik bağlayıcı üretimini incelemiştir. Üretilen geopolimerik bağlayıcının mikro/nano-yapı, morfoloji ve faz/yüzey element bileşimlerini ve bunlar üzerindeki kalsiyumun (Ca) etkisini araştırmak için SEM/EDX, XRD ve FTIR analizleri yapmıştır. SEM/EDX, XRD ve FTIR analizleri, GWC'deki Ca'nın geopolimer jel ile bir arada bulunan düşük Ca'lı yarı-kristal CSH jel oluşumunu ve yük dengeleyici katyon olarak Ca+'nın geopolimer ağına katılması ile mukavemeti arttırdığını doğrulamıştır. PSD (poly-sialate-disiloxo)'ye yakın olan GWC/FA geopolimer bağlayıcısının PSS (poly-sialate -siloxo)'ye yakın olan saf uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcısından daha güçlü olduğu görülmüştür. Sonuçlar, karıştırılmış öğütülmüş atık beton tozunun uçucu kül ile birlikte kullanılmasının, geopolimerik bağlayıcının serbest basınç dayanımını %50 karıştırılmış öğütülmüş atık beton tozu içeriğine kadar artırabileceğini, karıştırılmış öğütülmüş atık beton tozunun daha fazla artması ile geopolimerik bağlayıcının serbest basınç dayanımını azalttığını, dolayısıyla, karıştırılmış öğütülmüş atık beton tozunun uçucu kül ile uygun kombinasyonu ve gerekli mukavemete sahip geopolimerik bağlayıcı üretilebileceğini göstermiştir.

Eryılmaz vd. [68], geopolimer beton atıklarından elde edilen agregaların geopolimer betonda kullanılmasının dayanıma olan etkisini araştırmıştır. Geopolimer atıklarından elde edilen agregaların geopolimer beton üretiminde kullanımı, elde edilen betonun

basınç, eğilme ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinde düşüşe neden olmuştur. Geri dönüştürülmüş agrega oranının artmasıyla bu düşüş daha da belirginleşmiştir.

Mesgari vd. [69], çalışmalarında farklı içerikteki geri dönüştürülmüş geopolimer agreganın (%0, %20, %50 ve %100 iri doğal agrega ikamesi) ile üretilen geopolimer betonunun, geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geleneksel betonunun ve geri dönüştürülmüş geopolimer agrega ile üretilen Portland çimentosu betonunun basınç dayanımlarını incelemiştir. Araştırmacılar, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların %20 oranında ikame edilmesi ile üretilen geopolimer betonun basınç dayanımının kontrol numunesine kıyasla %14 azaldığını ve %100 ikame edilmesi ile basınç dayanımının %33 oranında azaldığını tespit etmiştir.

Arenalar vd. [70], çalışmalarında agrega olarak inşaat ve yıkım atıklarının kullanıldığı uçucu kül bazlı geopolimerik betonun temel fiziksel, mekanik ve akustik özellikleri analiz etmiştir. Çalışmada, kırılmış granit formundaki kaba agregayı (CA) ve inşaat ve yıkım atıklarını (CDW) uçucu kül ile %20, 50 ve 80 oranlarında yer değiştirerek iki farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar, 0,98 ve 0,29 olmak üzere iki farklı $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ mol oranı ile aktive edilerek geopolimer beton numuneleri oluşturulmuştur. Şekil 2.6'da $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,98 ve 0,29 olduğunda 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.6. a) $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,98 olduğunda basınç dayanımı ve b) $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,29 olduğunda basınç dayanımı

Kırılmış granit formundaki kaba agrega ve inşaat ve yıkım atıklı beton karışımlarının basınç dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında, kırılmış granit formundaki kaba agregalı

betonların daha yoğun beton olmalarına rağmen, inşaat ve yıkım atıklı beton ile hazırlananlardan daha az dayanıklı olduğu görülmüştür. Geleneksel iri agrega yüzeyinin pürüzsüz ve yuvarlak olması sebebiyle agrega ile bağlayıcı arasında az miktarda yapışma meydana gelmiştir. Pürüzlü yüzeye sahip inşaat ve yıkım atıkları agregalarına sahip betonlarda bağlayıcı ve agrega arasındaki yapışma sağlanmış ve çatlak olasılıkları azalmış bu sebeple basınç dayanımı artmıştır. Agrega yüzeyinin etkisinin yanı sıra, kimyasal bileşim, özellikle uçucu kül bazlı geopolimerin tepkimeye girmemiş silikatı ile reaksiyona girebilen ve CASH jeli (kalsiyum alüminat silikat hidratlı jel) oluşturabilen inşaat ve yıkım atıklı betondaki CaO içeriği dikkate alınması gerektiğini rapor etmiştir.

2.7. Otoklavlanmış Gazbeton

Otoklavlanmış gaz beton, silis, çimento, sönmemiş kireç, alçıtaşı ve su karışımına gözenek oluşturucu alüminyum ilave edilmesiyle elde edilen, otoklavlarda yüksek basınç (12 bar) ve sıcaklık (190°C) altında nihai formuna kavuşan, gözenekli yapısı sayesinde ısı yalıtımında üstün performans gösteren, basınç dayanımı yüksek, yangın ve depreme karşı dayanıklı, modern bir hafif beton türüdür [71]. Ayrıca düşük yoğunluğa (400–800 kg/m³) sahip bir yapı malzemesidir [72].

Otoklavlanmamış gazbeton ise, inşaat sektöründe sıklıkla kullanılan hafif ve gözenekli bir yapı malzemesidir. Adından da anlaşılacağı üzere, üretim sürecinde otoklav adı verilen yüksek basınç ve sıcaklık odalarında buhara maruz bırakılma işlemi uygulanmamıştır. Otoklavlanmamış gazbeton ve otoklavlanmış gazbeton arasındaki en büyük fark üretim sürecindeki otoklav uygulamasının olup olmamasıdır. Otoklavlanmamış gazbetonun su emme özelliği daha yüksek iken dayanım otoklavlanmış gazbetonda daha yüksektir. Otoklavlanmış gazbeton, daha çok taşıyıcı elemanlarda kullanılırken, otoklavlanmamış gazbeton daha çok iç duvar ve bölme duvar gibi yerlerde kullanılır.

Gazbeton üretimi esnasında içerisinde oluşturulan milyonlarca küçüklü büyüklü hava hücresi sayesinde diğer hafif beton ürünlerinden farklıdır. Gazbeton, gözenekli yapısı ile ısı yalıtımında üstün performans gösteren, hafifliği ile depremlere karşı dayanıklı ve ayrıca yanmaz özelliği ile de yangına karşı güvenli bir inşaat malzemesidir. Gazbetonun başarılı yalıtım özelliği sayesinde binaların ısıtma ve soğutma masrafları önemli ölçüde

azalmakta, bu da doğrudan yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir. Bu gibi avantajları sayesinde gazbeton kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [73]. Binaların çatı izolasyonu, zemini, hendek dolgusu ve duvar ünitelerinde uzun yıllardan beri yaygın olarak uygulanmaktadır [74].

Ancak, gazbetonun üretim ve nakliye aşamalarında kolayca zarar görebilmesi ve bu durumun tüm gazbeton üretiminin yaklaşık %3-5 oranında atık oluşumuna yol açması bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir [75].

Isı ve ses yalıtımı, yangın dayanımı ve hafiflik gibi üstün özellikleri sayesinde çağdaş yapı malzemeleri arasında önemli bir yere sahip olan gazbeton, özellikle kentsel dönüşüm projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye, 1965 yılından beri gazbeton üretimi yapan ve 2014 yılında 4,2 milyon m³ gibi yüksek bir tüketim hacmi ile Avrupa'da lider konumunda olan bir ülkedir [76]. 2020 yılında gazbeton tüketimi, bir önceki yıla göre %21 oranında artarak 2,22 milyon ton seviyesine ulaşırken, gazbeton üretimi ise %17 oranında artış göstererek 2,27 milyon ton olarak gerçekleşmiştir [77].

Üretim ve tüketim verileri incelendiğinde, 1965 yılından itibaren istikrarlı bir yükseliş trendi olduğu anlaşılmaktadır. Gazbetonun üretim ve tüketim hızındaki artış, gelecekte büyük miktarlarda gazbeton atığı oluşturabileceği endişesini doğurmaktadır. Bu bağlamda, gazbetonun yapısal ve işlevsel ömrünün sonunda nasıl değerlendirileceği ve döngüsel ekonomi prensiplerine uygun geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bununla beraber henüz, günümüz çağdaş yapı malzemeleri konumunda olan gazbetonun geri dönüşümü konusundaki araştırmalar ise dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de az sayıdadır. Gazbetonun çevresel etkilerini azaltmak için Almanya'da yapılan araştırmalar, döngüsel ekonomiye önemli katkılar sağlamaktadır [78].

Bugüne kadar, çimento veya betonlarda otoklavlanmış gazbetonun geri dönüşümüne ilişkin çok az çalışma rapor edilmiştir. Bu nedenle en büyük inşaat atıklarından biri olan otoklavlanmış gazbetonun geri dönüşümüne daha fazla araştırılması büyük önem taşımaktadır [79].

Mevcut araştırmalar ise, otoklavlanmış gazbeton atıklarının geri dönuştürölüp toz haline getirilerek imento yerine kısmen kullanıldığını, istenilen boyutta kırılıp geleneksel harç ve beton üretiminde ince ve iri agrega olarak değerlendirildiğini ve geopolimer harç ve betonda doğal agrega yerine çeşitli atık malzemelerin kullanıldığını göstermektedir.

Bu tez çalışması, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak otoklavlanmış gazbeton atıklarının geopolimer harç üretiminde doğal ince agrega yerine kısmen kullanılmasının etkilerini incelemiştir. Ayrıca bu çalışma literatürdeki eksikliği gidermeyi hedeflemektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

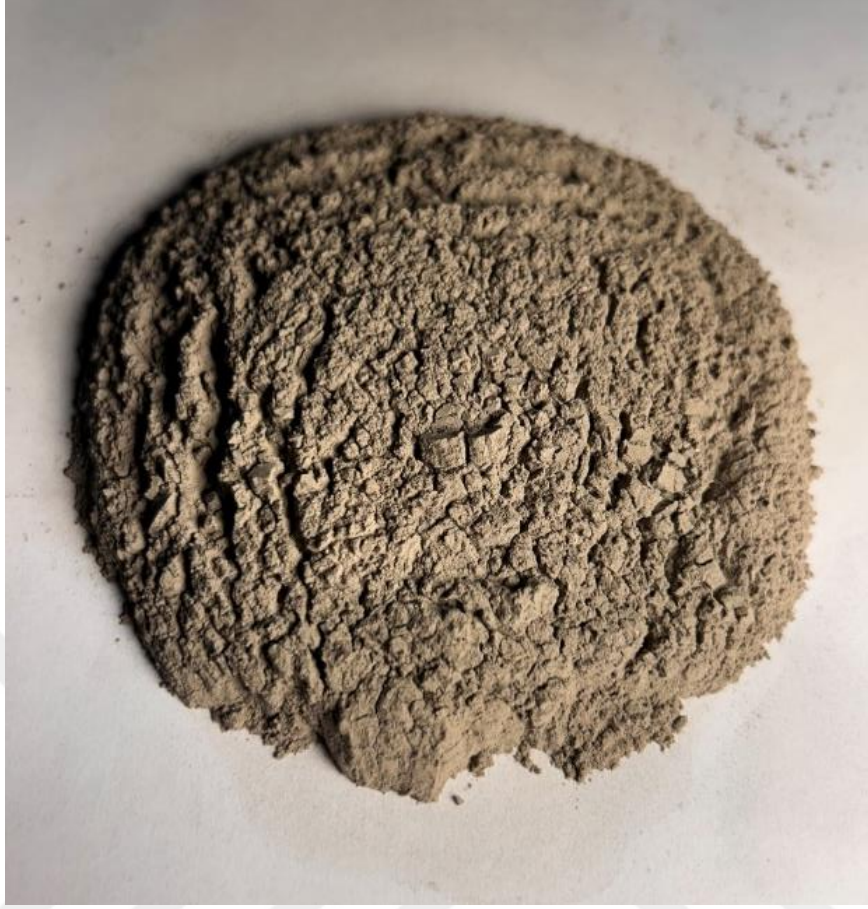
Sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla üretilen geopolimer harçta kullanılan malzemeler, uçucu kül, silis dumanı, geri dönüşüm gazbeton agregası, doğal kum, sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri ve süperakışkanlaştırıcıdır.

3.1.1. Uçucu Kül

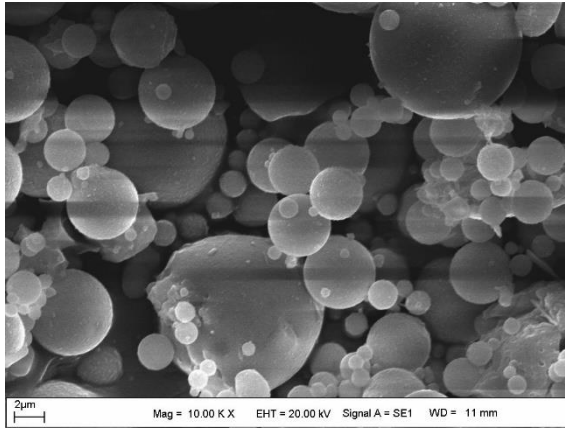
Yapılan çalışmada, Türkiye'nin Adana ilinde bulunan Yumurtalık termik santralinden elde edilen F-tipi uçucu kül, ana bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Uçucu külün özgül ağırlığı ise 2,29'dur. Malzemenin kimyasal bileşimleri XRF ile tespit edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.1'de sunulmuştur. Kullanılan uçucu külün fotoğraf görüntüsü Şekil 3.1'de, SEM ve XRD analiz sonuçları ise Şekil 3.2'de sunulmuştur. XRD analizinde, uçucu külün mikroyapısının amorf olmakla beraber içeriğinin temel olarak kuvars, anhidrit (CaSO_4), hematit, magnetit ve anortit mineral fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir [80].

Tablo 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi

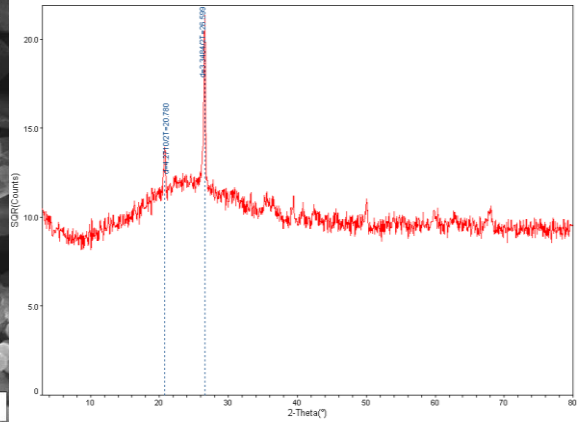
Kimyasal Analiz (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O- Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	TiO ₂
Uçucu Kül	2,05	58,5	23,9	7,98	1,80	2,73	-	1,02	1,00



Şekil 3.1. Uçucu külün fotoğraf görüntüsü



(a)



(b)

Şekil 3.2. Uçucu külün mikro analizleri: a) SEM görüntüsü ve b) XRD spektroskopisi

3.1.2. Silis Dumanı

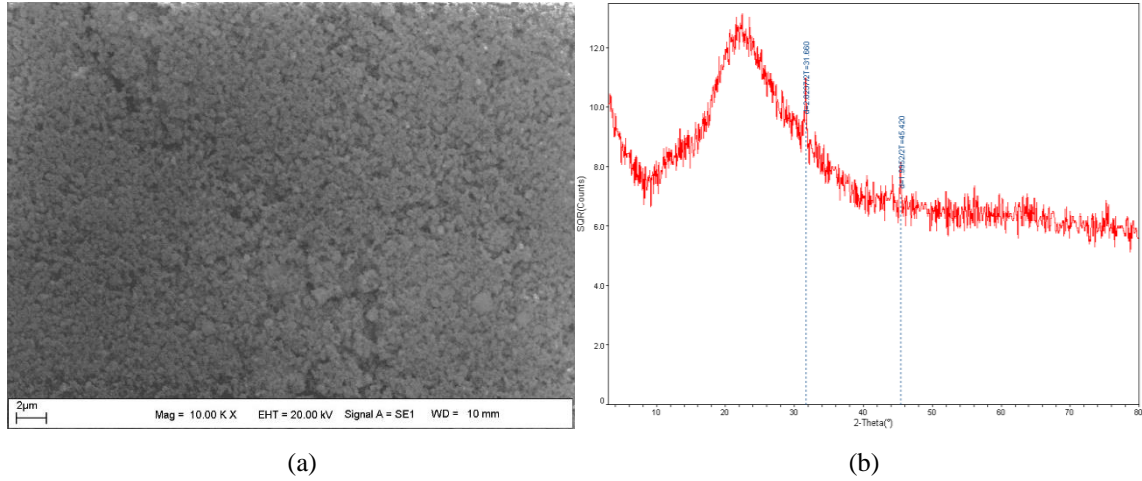
Bu çalışmada, ticari olarak mevcut olan silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanın özgül ağırlığı ise 2,20'dir. Malzemenin kimyasal bileşimleri XRF ile tespit edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.2'de sunulmuştur. Kullanılan silis dumanının fotoğraf görüntüsü Şekil 3.3'te, SEM ve XRD analiz sonuçları ise Şekil 3.4'te sunulmuştur. XRD analizinde, silis dumanın amorf olmasıyla birlikte küçük piklerde tridimit fazı tanımlanmıştır [81].

Tablo 3.2. Silis dumanının kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O-Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	TiO ₂
Silis dumanı	0,52	92,9	0,38	0,50	0,08	3,96	0,50	0,70	0,02



Şekil 3.3. Silis dumanının fotoğraf görüntüsü



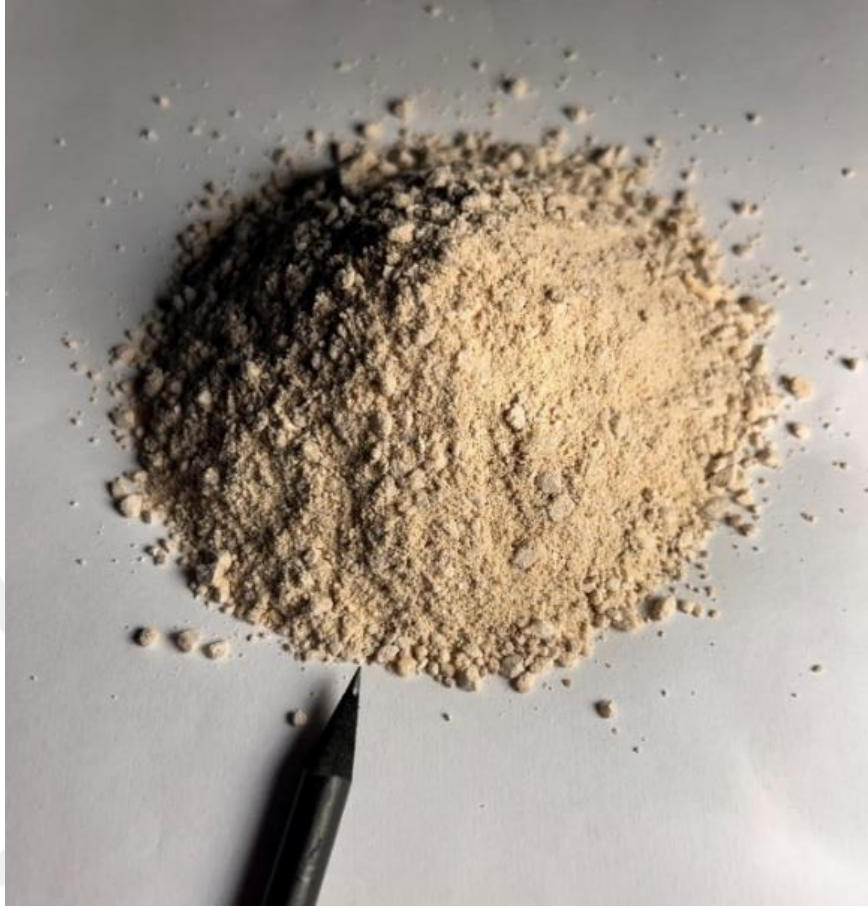
Şekil 3.4. Silis dumanının mikro analizleri: a) SEM görüntüsü ve b) XRD spektroskopisi

3.1.3. Doğal Kum

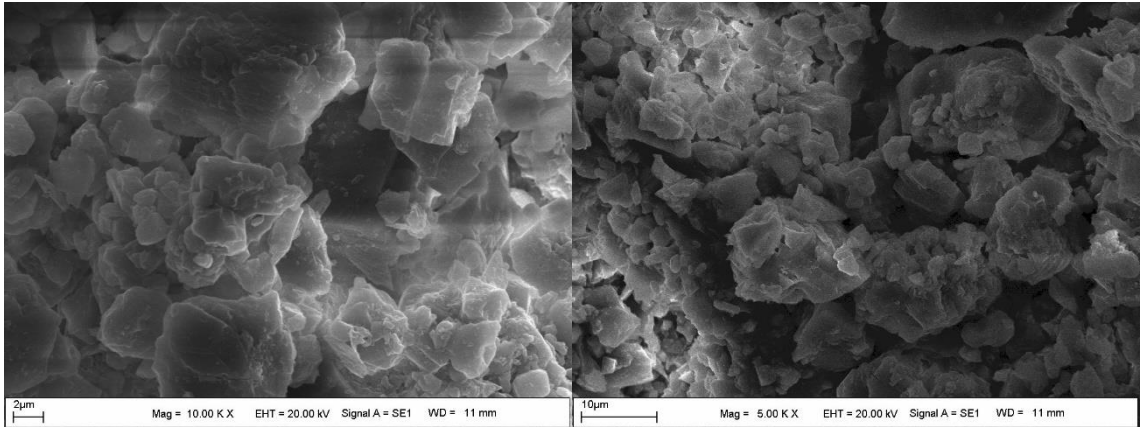
Bu çalışmada doğal kum olarak kırma kalker taşı kullanılmıştır. Doğal kumun özgül ağırlığı 2,59, su emme oranı %3,3, nem oranı %0,3 olarak tespit edilmiştir. Doğal kumun kimyasal bileşimleri XRF ile tespit edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.3'te sunulmuştur. Kullanılan doğal kumun fotoğraf görüntüsü Şekil 3.5'te, SEM ve XRD analiz sonuçları ise Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. XRD analizinde, doğal kumun grafikteki ana piklerin en yaygın mineral faz olan kuvars ve kalsitten oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, doğal kumun elek analizi TS EN 933-1 [82] standartlarına göre yapılmış olup sonucu Şekil.3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.3. Doğal kumun kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O-Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	TiO ₂
Doğal kum	91,1	5,02	-	0,52	2,96	0,17	-	-	0,07



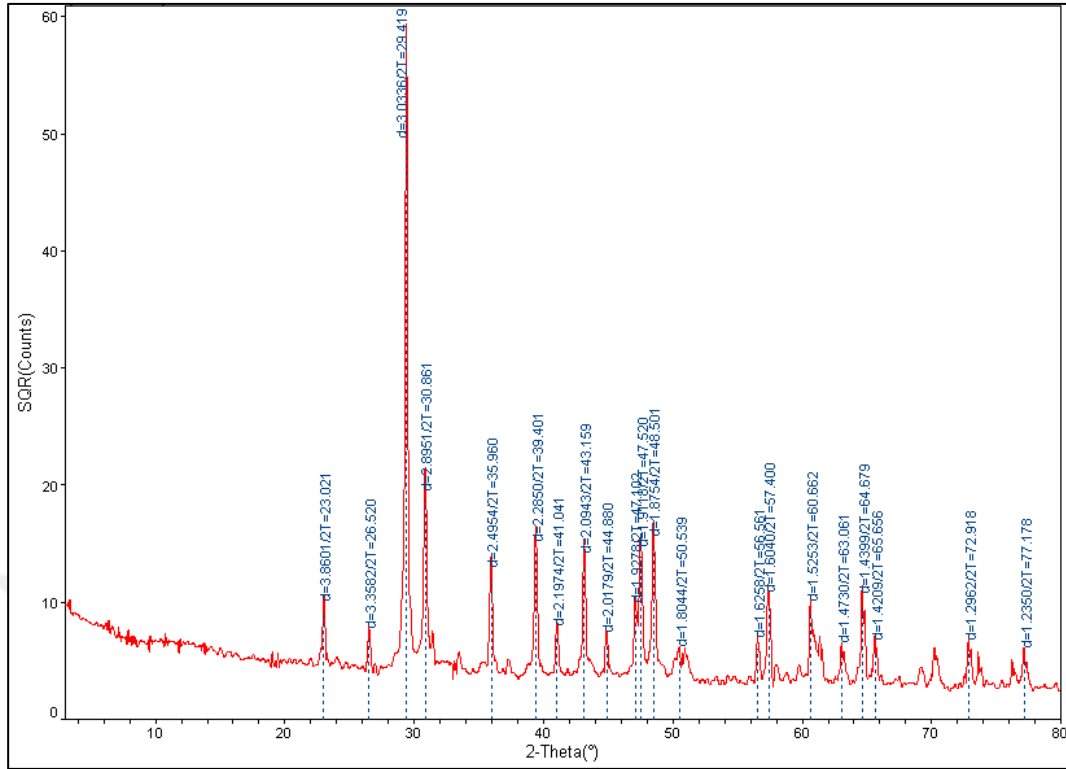
Şekil 3.5. Doğal kumun fotoğrafı



(a)

(b)

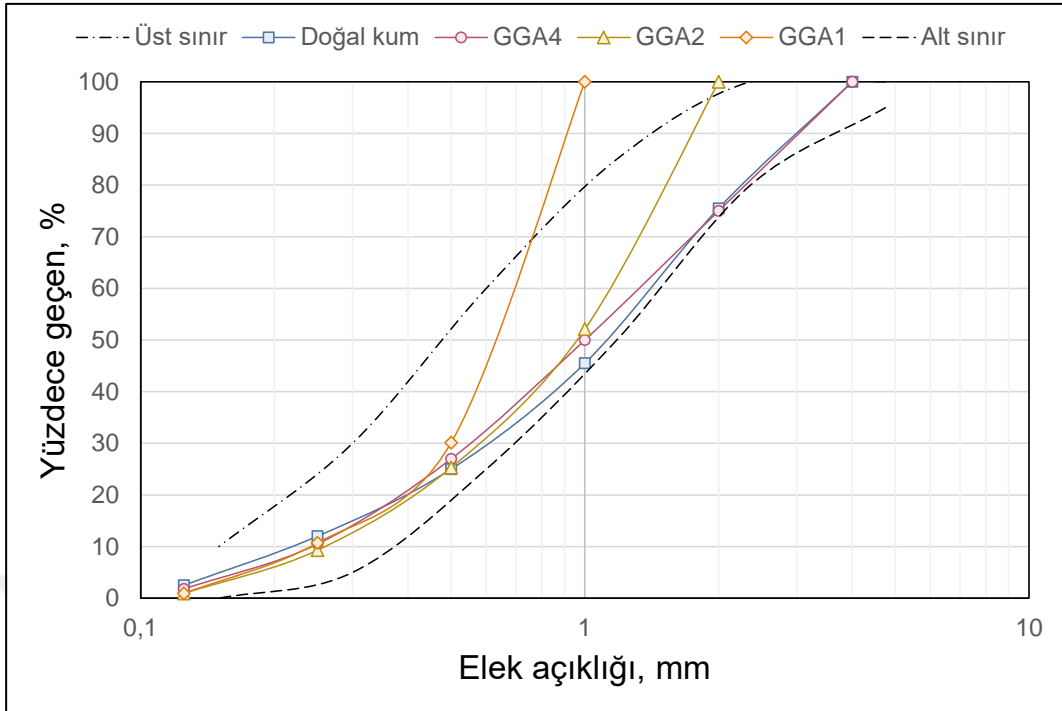
Şekil 3.6. Doğal kumun SEM görüntüleri: a)1000X SEM görüntüsü ve b) 5000X SEM görüntüsü



Şekil 3.7. Doğal kumun XRD spektroskopisi

3.1.4. Otoklavlanmış Gazbeton Atığı Agregası

Bu çalışmada, KÇS Kipaş Gazbeton üretim tesisinden temin edilen otoklavlanmış gazbeton bloğu atığı kullanılmıştır. Çeneli kırıcı kullanılarak istenilen boyuta getirilen otoklavlanmış gazbeton bloğu atığı agregaları eleme suretiyle üç farklı tane boyutu dağılımına (0,125-1 mm; 0,125-2 mm; 0,125-4 mm) getirilerek deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal analizi XRF ile tespit edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.4’te sunulmuştur. Gazbetonun fiziksel özellikleri Tablo 3.5’te sunulmuştur. Ayrıca, geri dönüşüm gazbeton agregasının (buradan sonra bu agregaya için 0,125-1 mm: GGA1, 0,125-2 mm: GGA2 ve 0,125-4 mm: GGA4 – Geri dönüşüm gazbeton agregası ifadesi ve kısaltması kullanılacaktır) elek analizi TS EN 933-1 [82] standartlarına göre yapılmış olup sonucu Şekil.3.8’de sunulmuştur. Kullanılan GGA1, GGA2 ve GGA4 fotoğraf görüntüleri Şekil 3.9’da, SEM ve XRD analizleri ise Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de sunulmuştur. XRD analizinde, GGA’nın grafikteki pikleri kuvars, kalsit ve tobermorit mineralleri olduğu görülmüştür. Ayrıca GGA içeriğinde bulunan çimentodan kaynaklı C-S-H fazlarının da olduğu görülmüştür [71].



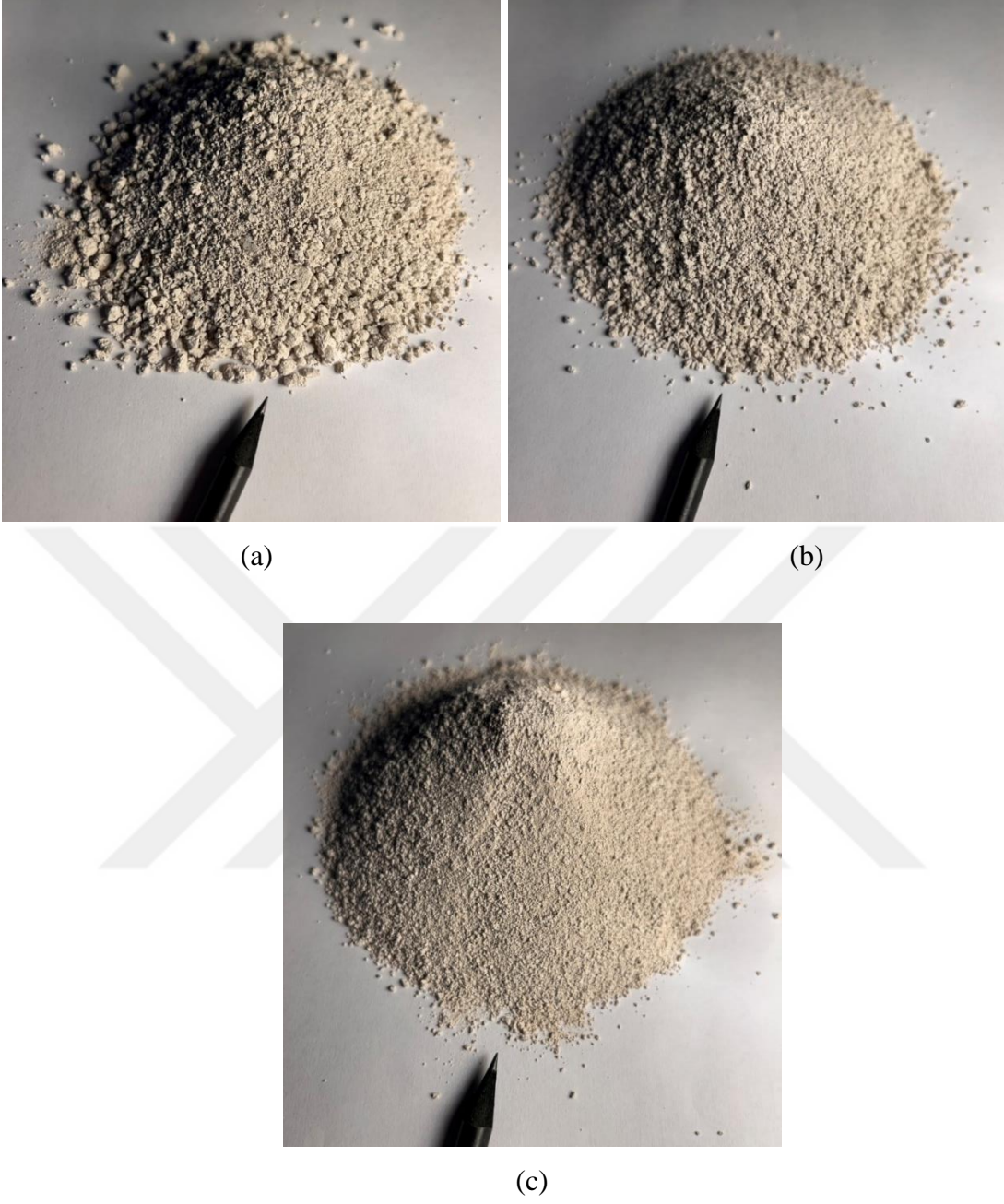
Şekil 3.8. Doğal kum, GGA4, GGA2 ve GGA1 agregalarının elek analizi sonuçları

Tablo 3.4. Geri dönüşüm gazbeton agregasının kimyasal bileşimi

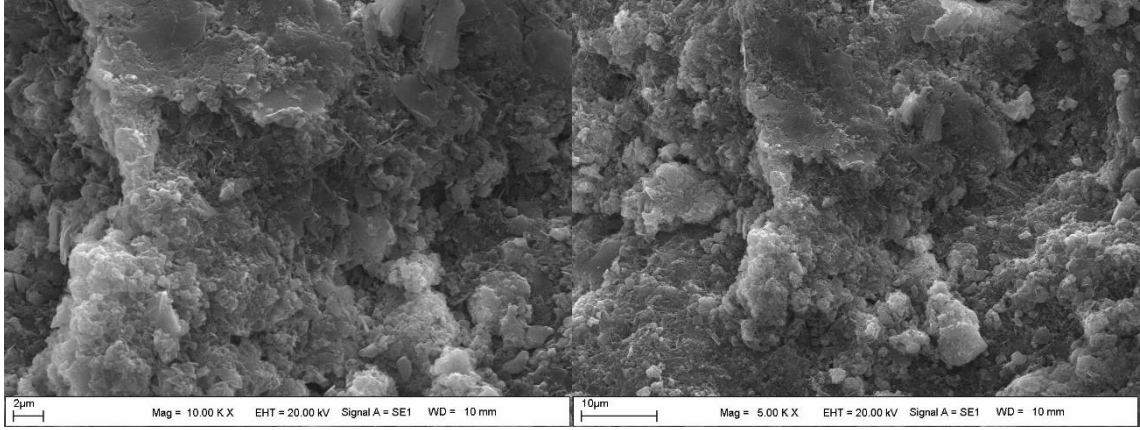
Kimyasal Analiz (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O- Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	TiO ₂
Geri dönüşüm gazbeton agregası	46,1	37,3	4,90	4,84	0,56	1,59	-	3,57	0,75

Tablo 3.5. Geri dönüşüm gazbeton agregasının fiziksel özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık	Nem oranı, %	Su emme oranı, %
Geri dönüşüm gazbeton agregası (0-4 mm)	1,53	0,9	4,2
Geri dönüşüm gazbeton agregası (0-2 mm)	1,62	1,5	6,1
Geri dönüşüm gazbeton agregası (0-1 mm)	1,69	2,2	8,2



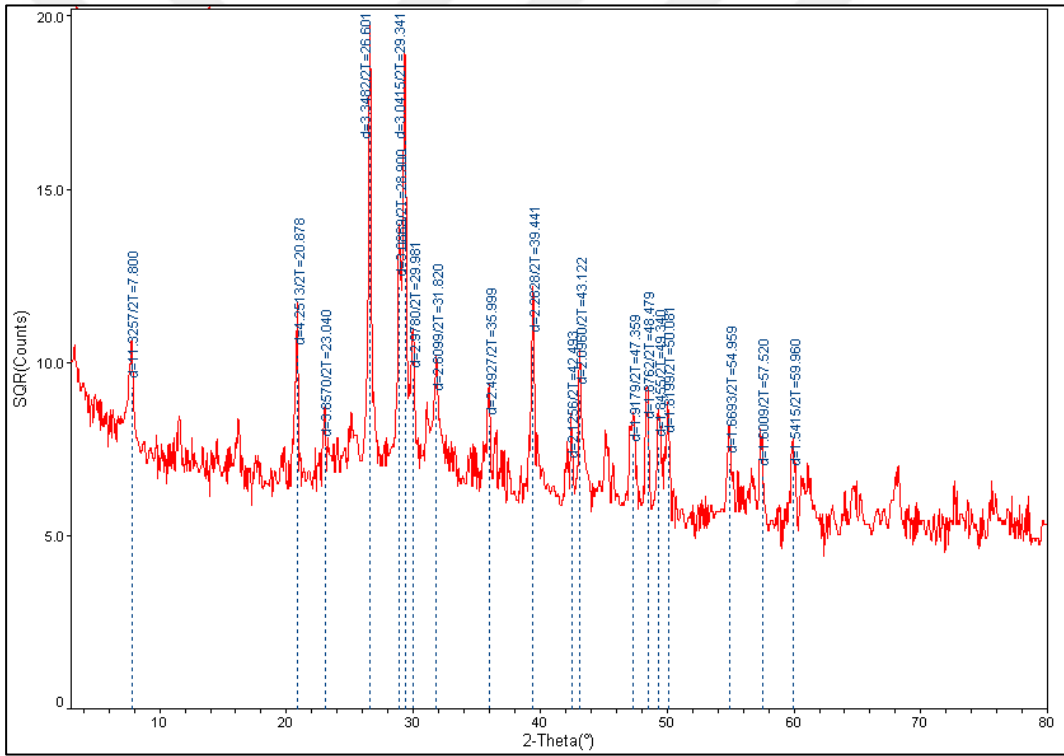
Şekil 3.9. GGA'nın fotoğraf görüntüleri: a) GGA4, b) GGA2 ve c) GGA1



(a)

(b)

Şekil 3.10. GGA'ların SEM görüntüleri: a) 10.000X SEM görüntüsü ve b) 5000X SEM görüntüsü



Şekil 3.11. GGA'nın XRD spektroskopisi

3.1.5. Alkali Aktivatörler

Bu çalışmada alkali çözeltisi olarak, sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) çözeltileri kullanılmıştır. Sodyum silikatın yoğunluğu 1,37 g/ml, sodyum hidroksitin özgül ağırlığı ise 1,25'tir. Sodyum hidroksitin kimyasal bileşenleri (kütlece yüzde) ve

sodyum silikatın kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo.3.6 ve Tablo 3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3.6. Sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal bileşenleri (kütlece yüzde)

Kimyasal bileşen, %			
NaOH (sodyum hidroksit)	Na ₂ CO ₃ (sodyum karbonat)	NaCl (sodyum klorür)	Fe (demir)
≥ 98,0	≤ 0,5	≤ 0,02	≤ 0,001

Tablo 3.7. Sodyum silikatın (Na₂SiO₃) kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

Kimyasal bileşen, %		Modül	Bome, °B
Na ₂ O (sodyum oksit)	SiO ₂ (silikat)		
9,03	27,08	2,93	38,68

3.1.6. Su

Çalışma kapsamında saf su sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

3.1.7. Süperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada polikarboksilik eter esaslı yeni nesil bir süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcının özgül ağırlığı 1,07’dir.

3.2. Karışım Oranları, Üretim ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, iki farklı prekürsör türü ve üç farklı GGA’nın tane boyutu dağılımı ve altı farklı GGA ikame seviyesi toplam 38 geopolimer harç karışımı (2’si kontrol karışımı, 36’sı geri dönüşüm gazbeton agregası içeren) tasarlanmıştır. Bu karışımlara ait detaylı karışım oranları Tablo 3.8’de sunulmuştur. Karışımların hazırlanmasında uçucu kül, silis dumanı, alkali aktivatör karışımı, doğal kum, GGA, su ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Geopolimer harçta iki farklı prekürsör tipi kullanılarak iki seri halinde karışım hazırlanmıştır. İlk seride sadece uçucu kül, ikinci seride ise uçucu külün %10’u

silis dumanı ikame edilmiştir. GGA, karışımlar içerisinde doğal kum ile hacimsel olarak %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu kapsamda, karışımların alkali aktivatör-prekürsör oranı 0,5 ve toplam prekürsör miktarı da 600 kg/m^3 seçilmiştir. Alkali aktivatör olarak da 1'e 1,5 oranında NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı hazırlanmıştır. Bunun için %98 oranında saflığa sahip pelet formda bulunan NaOH saf su ile karıştırılarak 12 M'lık çözelti elde edilmiştir. Sıvı formda olan Na_2SiO_3 'ün $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 3 iken %38,5 oranında katı malzeme ve %61,5 oranında sıvı malzemedan oluşmaktadır. Bu molaritede bir çözeltinin elde edilebilmesi için 1 litre saf su ile 480 g NaOH'ın karıştırılması gerekmektedir. Üretilen geopolimer harçların kıvamı ASTM C230-20 [83] göre yayılma tablası deneyi kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, süperakışkanlaştırıcı miktarı $100 \pm 10\%$ (180-220 mm yayılma çapı) yayılması sağlayacak şekilde belirlenmiş olup, karışımlardaki kum miktarı da 1 m^3 hacmi sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. Böylece silis dumanının uçucu kül ile yer değiştirilmesi ile özgül ağırlıklarından kaynaklı olası hacim farkı ince agrega ile doldurularak veya ince agregadan eksiltilecek 1 m^3 'lük hacim sağlanmıştır.

Deneysel çalışmada, kimyasal reaksiyon sebebiyle oluşan ısının yayılması ve homojen bir alkali karışımı elde etmek için alkali aktivatör karışımı bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra harç üretiminde kullanılmıştır. Geopolimer harçların üretiminde Lazorenko vd. ve İpek'in [84,85] önerdiği karıştırma yöntemleri takip edilmiştir. Bunun için öncelikle prekürsör ve alkali aktivatör çözeltisi mikser kabında 3 dakika karıştırılmıştır. Böylece geopolimer hamuru elde edilmiş ve akabinde mikser kabına süperakışkanlaştırıcı ilave edilerek mikser 2 dk daha karıştırılmaya bırakılmıştır. Prekürsör, alkali aktivatör ve süperakışkanlaştırıcının 5 dakikalık karıştırma periyodu tamamlandıktan sonra mikser kabına ince agrega (doğal kum ve/veya gazbeton atığı agregası) yavaş yavaş ilave edilmiş ve mikser 3 dakika daha döndürülmüştür. Sonuç olarak geopolimer macuna kum ilave edildikten 3 dakika sonra karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Toplam 8 dakikadan oluşan karıştırma işlemi bütün geopolimer harç karışımlarının üretiminde takip edilmiştir.

Tablo 3.8. Geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemelerin miktarları (kg/m³)

Karışım kodu	Prekürsör		Alkali çözelti		DK*	GGA, %	GGA*	SA*
	UK*	SD*	SS*	SH*				
SD-0/GGA-0	600	0	180	120	1293,5	0	0,0	12
SD-0/GGA4-10	600	0	180	120	1164,1	10	76,4	12
SD-0/GGA4-20	600	0	180	120	1034,8	20	152,8	12
SD-0/GGA4-30	600	0	180	120	900,3	30	227,9	15
SD-0/GGA4-40	600	0	180	120	767,4	40	302,2	18
SD-0/GGA4-50	600	0	180	120	635,8	50	375,6	21
SD-0/GGA4-60	600	0	180	120	505,8	60	448,2	24
SD-0/GGA2-10	600	0	180	120	1157,6	10	80,4	15
SD-0/GGA2-20	600	0	180	120	1023,2	20	160,0	18
SD-0/GGA2-30	600	0	180	120	895,3	30	240,0	18
SD-0/GGA2-40	600	0	180	120	763,0	40	318,2	21
SD-0/GGA2-50	600	0	180	120	632,2	50	395,4	24
SD-0/GGA2-60	600	0	180	120	502,9	60	471,8	27
SD-0/GGA1-10	600	0	180	120	1151,0	10	83,5	18
SD-0/GGA1-20	600	0	180	120	1017,3	20	166,0	21
SD-0/GGA1-30	600	0	180	120	890,2	30	248,9	21
SD-0/GGA1-40	600	0	180	120	758,7	40	330,0	24
SD-0/GGA1-50	600	0	180	120	628,6	50	410,2	27
SD-0/GGA1-60	600	0	180	120	500,0	60	489,3	30
SD-10/GGA-0	540	60	180	120	1290,7	0	0,0	12
SD-10/GGA4-10	540	60	180	120	1161,6	10	76,2	12
SD-10/GGA4-20	540	60	180	120	1032,6	20	152,5	12
SD-10/GGA4-30	540	60	180	120	898,4	30	227,4	15
SD-10/GGA4-40	540	60	180	120	765,7	40	301,5	18
SD-10/GGA4-50	540	60	180	120	634,5	50	374,8	21
SD-10/GGA4-60	540	60	180	120	507,6	60	449,8	21
SD-10/GGA2-10	540	60	180	120	1148,5	10	79,8	18
SD-10/GGA2-20	540	60	180	120	1015,1	20	158,7	21
SD-10/GGA2-30	540	60	180	120	888,2	30	238,1	21
SD-10/GGA2-40	540	60	180	120	757,0	40	315,7	24
SD-10/GGA2-50	540	60	180	120	630,8	50	394,6	24
SD-10/GGA2-60	540	60	180	120	501,8	60	470,8	27
SD-10/GGA1-10	540	60	180	120	1135,5	10	82,3	24
SD-10/GGA1-20	540	60	180	120	1009,3	20	164,6	24
SD-10/GGA1-30	540	60	180	120	883,1	30	247,0	24
SD-10/GGA1-40	540	60	180	120	752,6	40	327,4	27
SD-10/GGA1-50	540	60	180	120	627,2	50	409,2	27
SD-10/GGA1-60	540	60	180	120	498,8	60	488,3	30

*UK: uçucu kül, SD: silis dumanı, SS: sodyum silikat, SH: sodyum hidroksit, DK: doğal kum, GGA: geri dönüşüm gazbeton agregası, SA: süper akışkanlaştırıcı.

3.2.1. Numunelerin Hazırlanması

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra akış tablası testi uygulanmış ve geopolimer harçların taze birim ağırlıkları belirlenmiştir. Sonrasında yarmada çekme ve basınç dayanımları ile mikroyapıdaki değişimlerin belirlenmesi için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, kürlenme sıcaklığı ve ısıl işlem süresinin geopolimerizasyon reaksiyonlarını olumlu etkileyeceği düşüncesiyle, ilk 24 saat boyunca 60°C sıcaklıkta plastik poşetlere sarılarak ısıyla kürlenmiştir. Bu sayede numunelerdeki suyun buharlaşması önlenmiştir. Kürlenme sıcaklığı ve yeterli ısı seviyesi ile hem hızlı mukavemet gelişimi hem de daha yüksek nihai dayanım sağlanmaktadır. Yüksek kürlenme sıcaklığı ve yeterli ısı seviyesi, geopolimer harçlarda daha hızlı mukavemet kazanımı ve daha yüksek nihai dayanım sağlar. Literatürde, geopolimer harç üretimi için 40°C ile 90°C arasında bir sıcaklık aralığı önerilmektedir. Araştırmalar, 40°C'de 24 saat kürlenmiş harçların, 60°C'de 24 saat kürlenmiş harçlara kıyasla daha düşük mekanik performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. GGA'nın mekanik performansı olumsuz etkileyebileceği ve enerji tasarrufu sağlayacağı düşüncesiyle, çalışma kapsamında 60°C kürlenme sıcaklığı seçilmiştir. 24 saatlik ısıl kürlenme işleminden sonra numuneler kalıplardan çıkarılmış ve deney zamanına kadar 23°C±2 sıcaklığa sahip bir ortamda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.12. Deney numuneleri

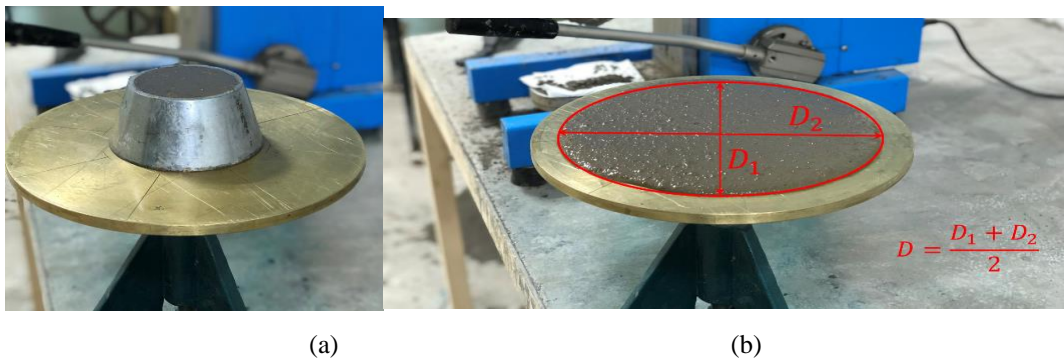
3.3. Yöntem

3.3.1. Deneysel Çalışmalar

Geopolimer harcın dayanımını belirleyen deneysel çalışmalar Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında, mikro analizler ise İnönü Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (İBTAM) Laboratuvarında yapılmıştır. Farklı boyutlarda (5x5x5 cm ve 7x7x7 cm) üretilen geopolimer küp numunelerinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla taze birim ağırlıkları ölçülmüş ve yayılma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geopolimer harç numunelerinin mekanik ve mikroyapısal karakterizasyonu, basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri ile birlikte taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımı X-ışını spektrometresi (EDX), haritalama (mapping) ve X-ışını kırınım yöntemi (XRD) analizleri yapılarak harçların mikroyapısı incelenmiştir.

3.3.1.1. Yayılma Tablası ve Taze Birim Ağırlık

Yayılma tablası tayini paslanmaz malzemeden yapılmış taban iç çapı 100 mm, tavan iç çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm olan konik huni kullanılarak ASTM C230-20 [83] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımın yayılma değeri, iki dik eksen üzerinde yapılan ölçümlerin istatistiksel olarak ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kullanılan yayılma tablası Şekil 3.13'te sunulmuştur. Hedeflenen kıvam elde edildikten sonra karışımların ASTM C138-17a [86] göre taze birim ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 3.13. (a) geopolimer harçların kıvamını ölçmek için kullanılacak huni ve sarsma tablası ve (b) geopolimer harcın yayılma çapının ölçümü

3.3.1.2. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri Şekil 3.14'te gösterilen 0,1 kN duyarlıklı, 3000 kN kapasiteli basınç aleti kullanılarak ASTM C109 [87]'a göre tüm numunelere uygulanmıştır. Kalıptan çıkarılan 5x5x5 cm küp numunelerin önce kumpas değerleri ölçülmüş daha sonra pürüzlü üst yüzeyleri makinenin kuvvet uyguladığı yüzeyine denk gelmeyecek şekilde makinaya yerleştirilmiş ve 0,25 MPa/s yük uygulanmıştır. Basınç dayanımında her bir seri için üçer adet üretilen numuneler 28. günde teste tabi tutulmuş ve ortalama basınç dayanımları baz alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.14. a) Press dayanım test presi ve b) numune boyutlarının ölçümü

3.3.1.3. Yarmada Çekme

Harçların yarmada çekme dayanımı deneyleri 0,1 kN duyarlıklı, 3000 kN kapasiteli basınç aleti kullanılarak 7x7x7 küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te gösterildiği gibi küp numunelerin üzerine sabitlenen demir çubuklarla bir düzlem boyunca ikiye bölünmesi sağlamıştır. Numunelerin pürüzlü üst yüzeyi makinenin kuvvet

uyguladığı yüzeyine denk gelmeyecek şekilde makinaya yerleştirilmiş ve 0,05 MPa/s yük uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımında her bir seri için üçer adet üretilen numuneler 28. günde teste tabi tutulmuş ve ortalama yarmada çekme dayanımları baz alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. Yarmada çekme deneyi yapılmış numune

3.3.1.4. SEM/EDX Analizleri ve Mapping

SEM ve EDX analizleri, üretilen geopolimer harç karışımlarının parçacık boyutları ve ana bileşenlerini belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Mapping ise, karışımların farklı bölgelerindeki element dağılımını görselleştirmek için kullanılmıştır. SEM/EDX çalışmaları SEM ünitesi olan LEO-EVO 40 SEM cihazı kullanılarak 200, 500, 1000, 2000 ve 10000 kez farklı büyütme ile görüntüler elde edilmiştir. EDX ünitesi Bruker-125 eV ile yapılmış olup cihazın görüntüsü Şekil 3.16'da sunulmuştur. Numuneler iletkenliğin sağlanması için kaplama ünitesi BAL-TEC SCD 050 cihazı kullanılarak altın ile kaplanmışlardır. SEM/EDX analizleri, uçucu kül, silis dumanı, gazbeton, doğal kum

ve 2 tür karışıma ait GGA1, GGA2 ve GGA4'ün %20, %40 ve %60 ikame seviyesindeki harçlar üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.16. SEM/EDX cihazı

3.3.1.5. X-ışını Difraksiyonu (XRD) Analizi

X-ışınları toz kırınım ölçümü analizi kullanılarak kristal tanelerinin sahip olduğu mineralojik bileşimin bulunması amacıyla uygulanmıştır. XRD analizi için Rigaku RadB-Dmax II ve Rigaku RINT- 2000 Bilgisayar cihazı kullanılmıştır. Analizler, uçucu kül, silis dumanı, gazbeton, doğal kum ve 2 tür karışıma ait GGA1, GGA2 ve GGA4'ü %60 ikame seviyesindeki harçlar üzerinde yapılmıştır. Cihazın görüntüsü Şekil 3.17'de sunulmuştur.



Şekil 3.17. XRD cihazı

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

Yayılma tablası deneyi karışımların taze halde iken istenildiği gibi şekil verilebilme durumunun belirlenmesi açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Üretilen taze karışımın bünyesinde bulunan malzeme oran ve özelliklerine bağlı olarak elde edilen değerler değişkenlik gösterebilmektedir. Üretilen karışımın kullanım alanına amacına göre hedeflenen sonuçlara ulaşılması gerekmektedir.

Yürütülen bu çalışmada GGA'nın farklı oranlarının geopolimer harca ikamesinin taze karışımların işlenebilme özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yayılma çapı (mm) değerleri Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Tüm karışımlar dikkate alındığında yayılma çapı değerlerinin SD-0 seri harçlar için 130 mm ile 200 mm arasında, SD-10 seri harçlar için 120 mm ile 190 mm arasında değiştiği görülmüştür. İşlenebilirliği olumsuz etkilemesi sebebiyle GGA'nın ikame seviyesinin artması ile birlikte tüm karışımlar için yayılma çapı değerlerinde düşüş görülmüştür.

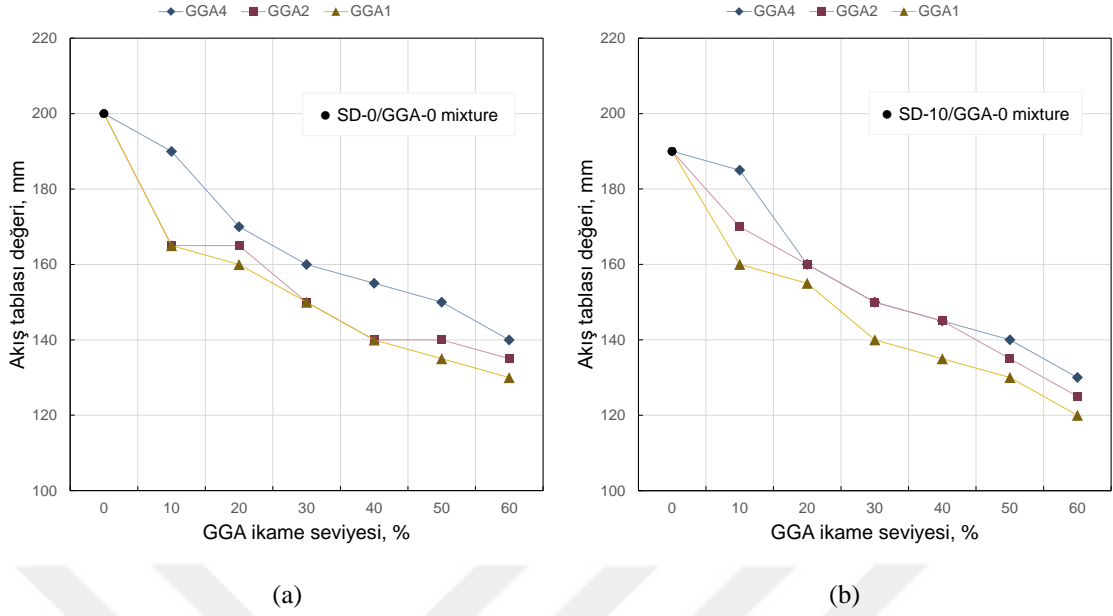
SD-0 seri harçlarda yayılma çapı en yüksek değeri kontrol karışımı ulaşırken en düşük yayılma çapı değerine SD-0/GGA1-60 kodlu karışım ulaşmıştır. SD-10 seri harçlarda ise yayılma çapı en yüksek değerine kontrol karışımı ulaşırken en düşük yayılma çapı değerine SD-10/GGA1-60 kodlu karışım ulaşmıştır.

GGA'nın ikame seviyesinin ve incelik oranının artması geopolimer harç karışımının akışkanlığını düşürmüştür. SD-0 seri harçlarda %60 oranında GGA4 kullanımı ile akış değerinde %30 düşüş görülürken, %60 oranında GGA1 kullanımında %35 oranında düşüş gerçekleşmiştir. Bunun sebebi GGA tanelerinin köşeli, girintili çıkıntılı olması ve yüksek su emme kapasitesine sahip olmasıdır.

Şekil 4.1 incelendiğinde silis dumanı içeren karışımlar, silis dumanı içermeyen karışımlarla kıyaslandığında daha düşük akış değerleri görülmüştür. Kontrol karışımlar incelendiğinde %10 silis dumanı ikameli harcın akış değerinde %5'lik bir düşüş gerçekleşmiştir. Silis dumanı kullanımının yayılma çapı değerleri üzerinde olumsuz etkisinin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise silis dumanının uçucu küle göre daha ince yapılı olmasıyla daha yüksek özgül yüzeye sahip olmasıdır. Bu yüksek yüzey alanı, karışım suyuyla daha fazla etkileşime girerek suyu bağlar ve karışımın kıvamını artırır. Bu durum da harcın karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi gibi işlemleri zorlaştırarak akışkanlığını azaltır.

Tablo 4.1. Geopolimer harçların ortalama yayılma çapı değerleri

Numuneler	Yayılma çapı (mm)	Numuneler	Yayılma çapı (mm)
SD-0/GGA-0	200	SD-10/GGA-0	190
SD-0/GGA4-10	190	SD-10/GGA4-10	185
SD-0/GGA4-20	170	SD-10/GGA4-20	160
SD-0/GGA4-30	160	SD-10/GGA4-30	150
SD-0/GGA4-40	155	SD-10/GGA4-40	145
SD-0/GGA4-50	150	SD-10/GGA4-50	140
SD-0/GGA4-60	140	SD-10/GGA4-60	130
SD-0/GGA2-10	165	SD-10/GGA2-10	170
SD-0/GGA2-20	165	SD-10/GGA2-20	160
SD-0/GGA2-30	150	SD-10/GGA2-30	150
SD-0/GGA2-40	140	SD-10/GGA2-40	145
SD-0/GGA2-50	140	SD-10/GGA2-50	135
SD-0/GGA2-60	135	SD-10/GGA2-60	125
SD-0/GGA1-10	165	SD-10/GGA1-10	160
SD-0/GGA1-20	160	SD-10/GGA1-20	155
SD-0/GGA1-30	150	SD-10/GGA1-30	140
SD-0/GGA1-40	140	SD-10/GGA1-40	135
SD-0/GGA1-50	135	SD-10/GGA1-50	130
SD-0/GGA1-60	130	SD-10/GGA1-60	120



Şekil 4.1. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların akış tablası değerlerindeki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar

4.2. Taze Birim Ağırlık Sonuçları

Üretilen geopolimer harçların ağırlıkları özellikle dinamik etkiler altında oldukça önem kazanmaktadır. Bu nedenle yapıya gelen yükü minimuma indirmek amacıyla yapı malzemeleri üretiminde mümkün oldukça düşük birim ağırlık değerlerinin hedeflenmesi gerekmektedir. Üretilen karışımların taze birim ağırlıkları Tablo 4.2 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde, silis dumanı içermeyen karışımlar 2240 kg/m^3 ile 1877 kg/m^3 arasında değişim gösterirken silis dumanı içeren karışımların 2265 kg/m^3 ile 1920 kg/m^3 aralığında olduğu görülmektedir. Tüm karışımlarda gazbetonun ikame seviyesinin artması ile taze birim ağırlıklar azalmıştır. Bu durum gazbetonun daha hafif bir yapı malzemesi olmasından kaynaklanmaktadır.

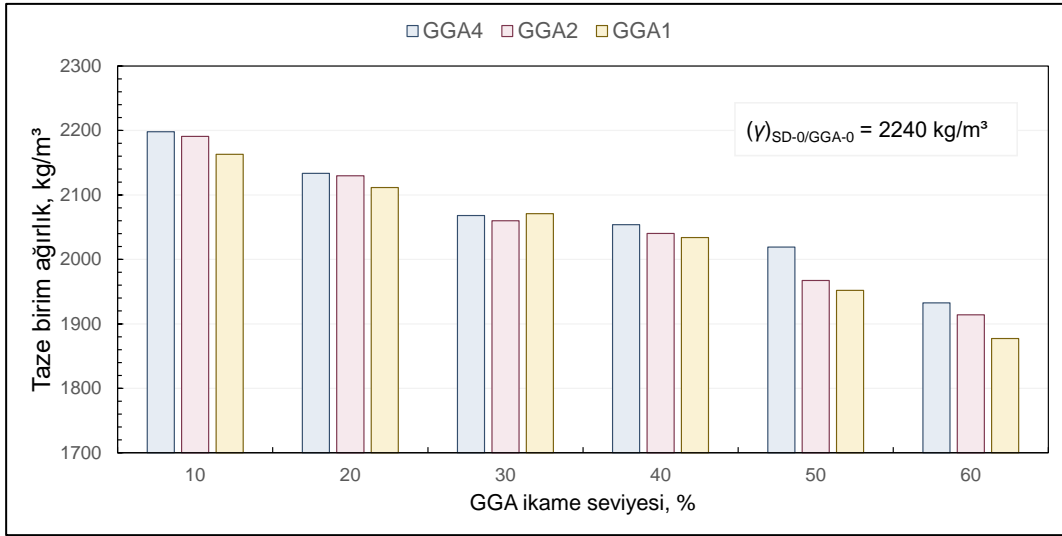
SD-0 seri karışımlarda en yüksek taze birim ağırlık değerine kontrol karışımı ulaşırken en düşük taze birim ağırlık değerine SD-0/GGA1-60 kodlu karışım ulaşmıştır. SD-10 seri karışımlarda ise en yüksek taze birim ağırlık değerine kontrol karışımı ulaşırken en düşük taze birim ağırlık değerine SD-10/GGA1-60 kodlu karışım ulaşmıştır.

SD-0 seri karışımlarda GGA4'ün %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın taze birim ağırlığında yaklaşık olarak %13,7 düşüş görülürken, GGA1'in %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın taze birim ağırlığında yaklaşık olarak %16,2 oranında düşüş gerçekleşmiştir. GGA'nın ikame seviyesinin ve inceliğinin artması karışımların taze birim ağırlıklarını azaltmıştır. Bunun sebebi gazbetonun daha hafif bir yapı malzemesi olmasıdır.

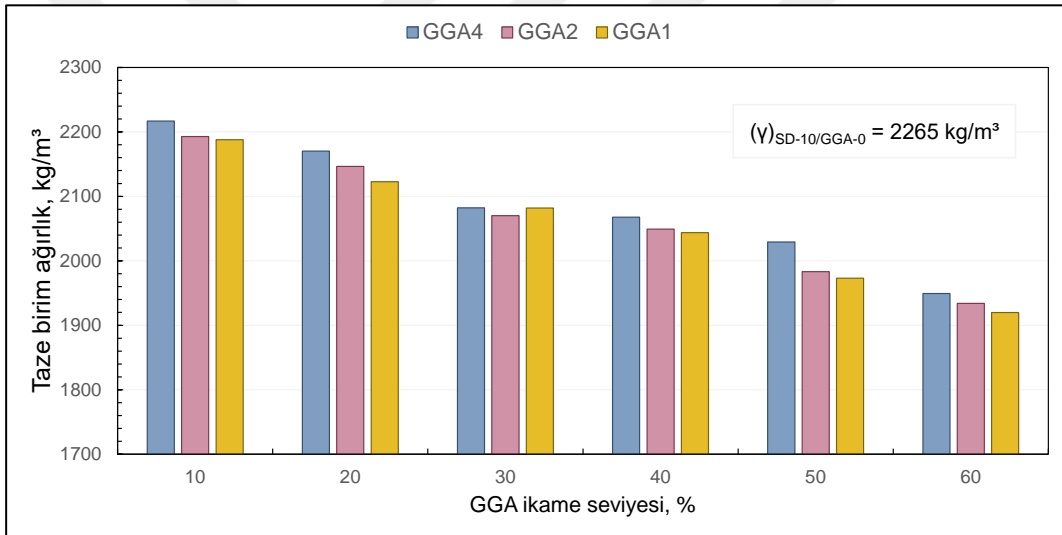
SD-0 seri karışımlar ile SD-10 seri karışımlar incelendiğinde %10 silis dumanı katkısının taze birim ağırlığında artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol karışımlar incelendiğinde %10 silis dumanı ikameli numunenin taze birim ağırlığında yaklaşık %1,11'lik bir artış gerçekleşmiştir. Bunun sebebi çok ince taneli olan silis dumanının geopolimerizasyon için daha çok suya ihtiyaç duyması ve ince taneli silis dumanı içeren harçların daha kompakt ve az boşluklu olması olabilir.

Tablo 4.2. Geopolimer harçların ortalama taze birim ağırlık değerleri

Numuneler	Taze birim ağırlık (kg/m ³)	Numuneler	Taze birim ağırlık (kg/m ³)
SD-0/GGA-0	2240	SD-10/GGA-0	2265
SD-0/GGA4-10	2198	SD-10/GGA4-10	2217
SD-0/GGA4-20	2134	SD-10/GGA4-20	2170
SD-0/GGA4-30	2068	SD-10/GGA4-30	2082
SD-0/GGA4-40	2054	SD-10/GGA4-40	2068
SD-0/GGA4-50	2019	SD-10/GGA4-50	2029
SD-0/GGA4-60	1933	SD-10/GGA4-60	1949
SD-0/GGA2-10	2191	SD-10/GGA2-10	2193
SD-0/GGA2-20	2130	SD-10/GGA2-20	2146
SD-0/GGA2-30	2060	SD-10/GGA2-30	2070
SD-0/GGA2-40	2040	SD-10/GGA2-40	2049
SD-0/GGA2-50	1967	SD-10/GGA2-50	1983
SD-0/GGA2-60	1914	SD-10/GGA2-60	1934
SD-0/GGA1-10	2163	SD-10/GGA1-10	2188
SD-0/GGA1-20	2111	SD-10/GGA1-20	2123
SD-0/GGA1-30	2071	SD-10/GGA1-30	2082
SD-0/GGA1-40	2034	SD-10/GGA1-40	2044
SD-0/GGA1-50	1952	SD-10/GGA1-50	1973
SD-0/GGA1-60	1877	SD-10/GGA1-60	1920



(a)



(b)

Şekil 4.2. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların taze birim ağırlıklarındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar

4.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Yapılan çalışmada tüm karışımların 28 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılarak dayanım sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 4.3'te ve grafikler standart sapma değerleri ile beraber Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Tüm karışımlar dikkate alındığında basınç dayanımı değerlerinin SD-0 seri karışımlar için 0,64 MPa ile 21,30 MPa arasında, SD-10 seri karışımlar için 0,95 MPa ile 21,91 MPa

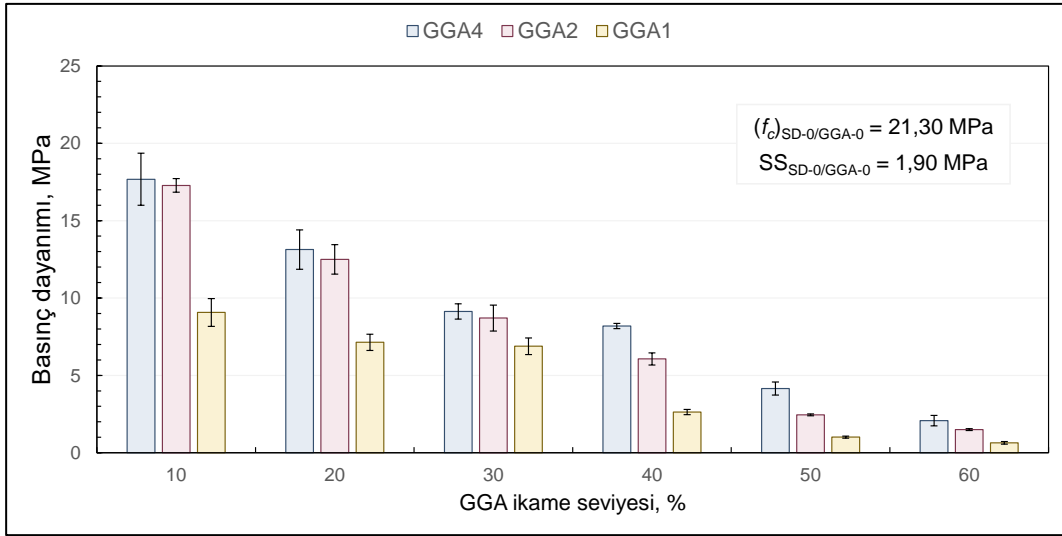
arasında değiştiği görülmüştür. Genel olarak sonuçlar, her iki karşım türünde de GGA'nın ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile azalma trendi göstermiştir. SD-0 seri karşımlarda 28 günlük en yüksek dayanıma kontrol karşımı ulaşırken en düşük dayanıma SD-0/GGA1-60 kodlu karşım ulaşmıştır. SD-10 seri karşımlarda ise 28 günlük en yüksek dayanıma kontrol karşımı ulaşırken en düşük dayanıma SD-100/GGA1-60 kodlu karşım ulaşmıştır.

SD-0 seri karşımda GGA4'n %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın basınç değerinde yaklaşık %90 düşüş görülürken, GGA1'in %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın basınç değerinde yaklaşık %97 düşüş gerçekleşmiştir. SD-10 seri karşımda GGA4'n %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın basınç değerinde %77 düşüş görülürken, GGA1'in %60 seviyesindeki ikamesi ile üretilen harcın basınç değerinde yaklaşık %95,6 düşüş gerçekleşmiştir. GGA'nın ikame oranın ve incelik oranının artması ile basınç dayanım değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Bunun sebebi GGA'nın doğal kumdan daha yumuşak olması, sivri köşelerinin daha fazla olması ve boşluklu yapısı sebebi ile enerji yığılmalarında ani kırılmalara neden olmasıdır.

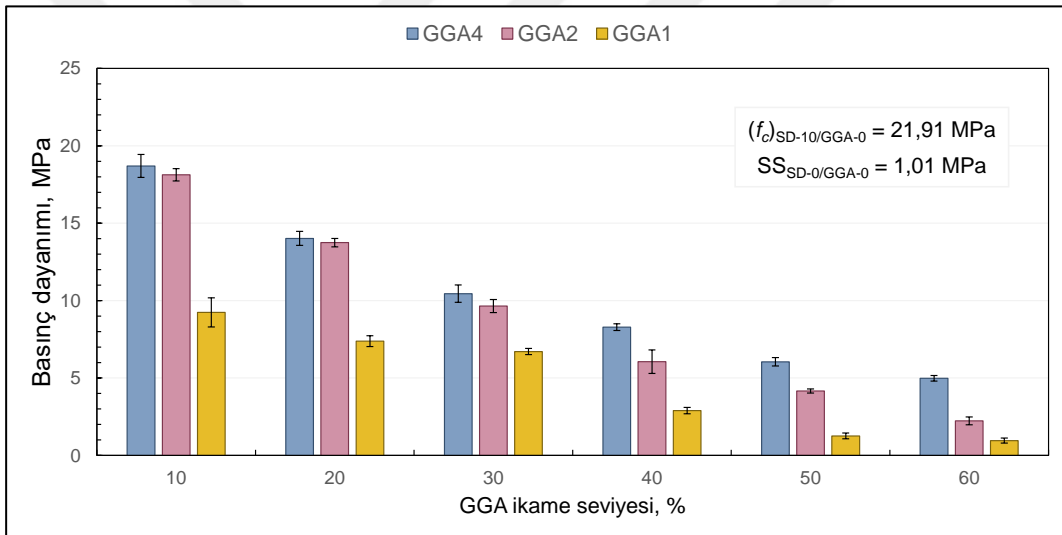
Silis dumanı içeren ve silis dumanı içermeyen kontrol karşımlar incelendiğinde %10 silis dumanı içeren karşımların basınç dayanımı değerinde yaklaşık olarak %2,86'lık bir artış gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ince olan silis dumanı parçacıklarının, kum parçacıkları arasındaki boşlukları doldurması ve gözenekliliğin iyileştirilmesine katkıda bulunmuş olmasıdır. Silis dumanı kullanımının basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisi daha önceki çalışmalarla da desteklenmektedir [88].

Tablo 4.3. Geopolimer harçların ortalama basınç dayanımı değerleri

Numuneler	Basınç Dayanımı (MPa)	Numuneler	Basınç Dayanımı (MPa)
SD-0/GGA-0	21,30	SD-10/GGA-0	21,91
SD-0/GGA4-10	17,68	SD-10/GGA4-10	18,70
SD-0/GGA4-20	13,13	SD-10/GGA4-20	14,02
SD-0/GGA4-30	9,13	SD-10/GGA4-30	10,45
SD-0/GGA4-40	8,19	SD-10/GGA4-40	8,29
SD-0/GGA4-50	4,15	SD-10/GGA4-50	6,05
SD-0/GGA4-60	2,08	SD-10/GGA4-60	4,98
SD-0/GGA2-10	17,28	SD-10/GGA2-10	18,13
SD-0/GGA2-20	12,50	SD-10/GGA2-20	13,75
SD-0/GGA2-30	8,71	SD-10/GGA2-30	9,65
SD-0/GGA2-40	6,06	SD-10/GGA2-40	6,05
SD-0/GGA2-50	2,45	SD-10/GGA2-50	4,16
SD-0/GGA2-60	1,50	SD-10/GGA2-60	2,23
SD-0/GGA1-10	9,07	SD-10/GGA1-10	9,24
SD-0/GGA1-20	7,14	SD-10/GGA1-20	7,38
SD-0/GGA1-30	6,89	SD-10/GGA1-30	6,71
SD-0/GGA1-40	2,63	SD-10/GGA1-40	2,89
SD-0/GGA1-50	1,01	SD-10/GGA1-50	1,26
SD-0/GGA1-60	0,64	SD-10/GGA1-60	0,95



(a)



(b)

Şekil 4.3. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların 28 günlük ortalama basınç dayanımındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar

4.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Tüm geopolimer harçlara 28 günlük yarmada çekme deneyleri yapılarak yarmada çekme dayanım sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen yarmada çekme değerleri Tablo 4.4 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.

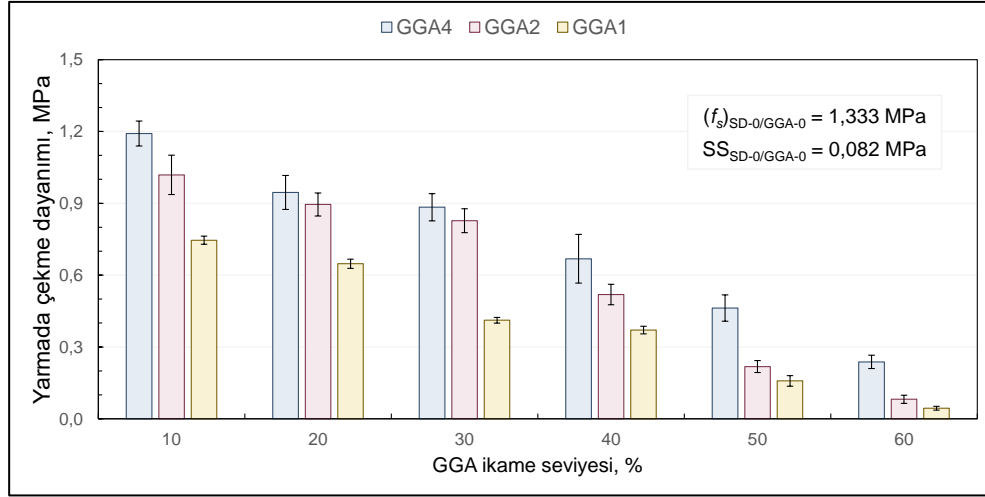
Tüm karışımlar dikkate alındığında yarmada çekme değerlerinin SD-0 seri karışımlar için 0,044 MPa ile 1,333 MPa arasında, SD-10 seri karışımlar için 0,197 MPa ile 1,482 MPa arasında değiştiği görülmüştür.

Genel olarak sonuçlar, her iki karışım türünde de GGA'nın ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile azalma trendi göstermiştir. Bunun sebebi basınç dayanımı sonuçlarında da açıklandığı gibi GGA'nın doğal kumdan daha yumuşak olması, sivri köşelerinin daha fazla olması ve boşluklu yapısı sebebi ile enerji yığılmalarında ani kırılmalara neden olmasıdır. Örnek verilecek olursa, SD-0/GGA4-10 kodlu karışımın yarmada çekme dayanımı 1,191 MPa iken SD-0/GGA4-60 kodlu karışımın yarmada çekme dayanımı 0,238 MPa'dır. GGA'nın %60 seviyesindeki ikame artışı yarmada çekme dayanımını yaklaşık %80 düşürmüştür. Aynı şekilde SD-0/GGA1-10 kodlu karışımın yarmada çekme dayanımı SD-0/GGA4-10 kodlu karışım ile kıyaslandığında yarmada çekme dayanımını yaklaşık %23,3 oranında azalmıştır.

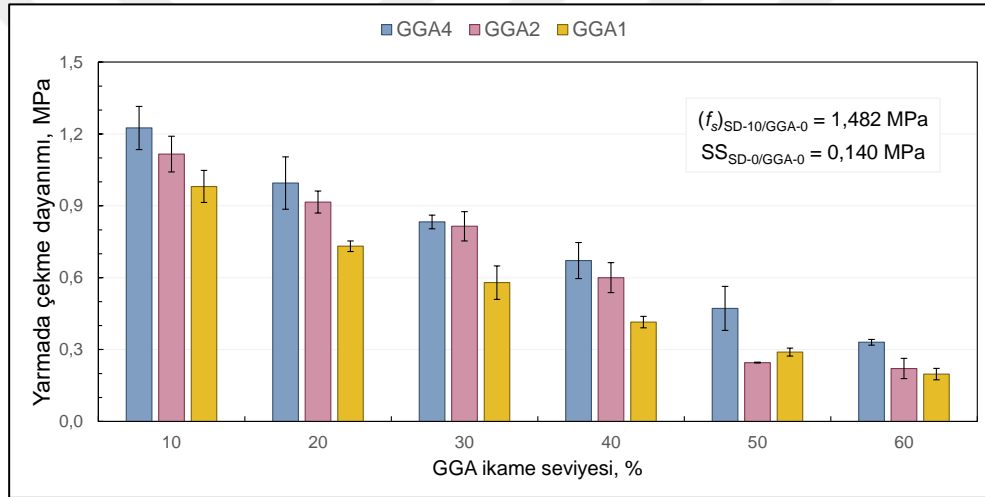
Kontrol karışımlar incelendiğinde %10 silis dumanı içeren karışımın yarmada çekme dayanımında yaklaşık olarak %11,2'lik bir artış gerçekleşmiştir. Böylece %10 silis dumanı ikamesinin yarmada çekme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Bunun sebebi ise silis dumanı ikamesinin gözenekliliğin iyileştirilmesine katkıda bulunmuş olmasıdır.

Tablo 4.4 . Geopolimer harçların ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri

Numuneler	Yarmada Çekme Dayanımı	Numuneler	Yarmada Çekme Dayanımı
SD-0/GGA-0	1,333	SD-10/GGA-0	1,482
SD-0/GGA4-10	1,191	SD-10/GGA4-10	1,225
SD-0/GGA4-20	0,945	SD-10/GGA4-20	0,995
SD-0/GGA4-30	0,883	SD-10/GGA4-30	0,833
SD-0/GGA4-40	0,668	SD-10/GGA4-40	0,672
SD-0/GGA4-50	0,463	SD-10/GGA4-50	0,472
SD-0/GGA4-60	0,238	SD-10/GGA4-60	0,331
SD-0/GGA2-10	1,019	SD-10/GGA2-10	1,116
SD-0/GGA2-20	0,895	SD-10/GGA2-20	0,916
SD-0/GGA2-30	0,828	SD-10/GGA2-30	0,815
SD-0/GGA2-40	0,519	SD-10/GGA2-40	0,600
SD-0/GGA2-50	0,218	SD-10/GGA2-50	0,246
SD-0/GGA2-60	0,082	SD-10/GGA2-60	0,221
SD-0/GGA1-10	0,746	SD-10/GGA1-10	0,981
SD-0/GGA1-20	0,648	SD-10/GGA1-20	0,731
SD-0/GGA1-30	0,412	SD-10/GGA1-30	0,579
SD-0/GGA1-40	0,371	SD-10/GGA1-40	0,414
SD-0/GGA1-50	0,158	SD-10/GGA1-50	0,290
SD-0/GGA1-60	0,044	SD-10/GGA1-60	0,197



(a)



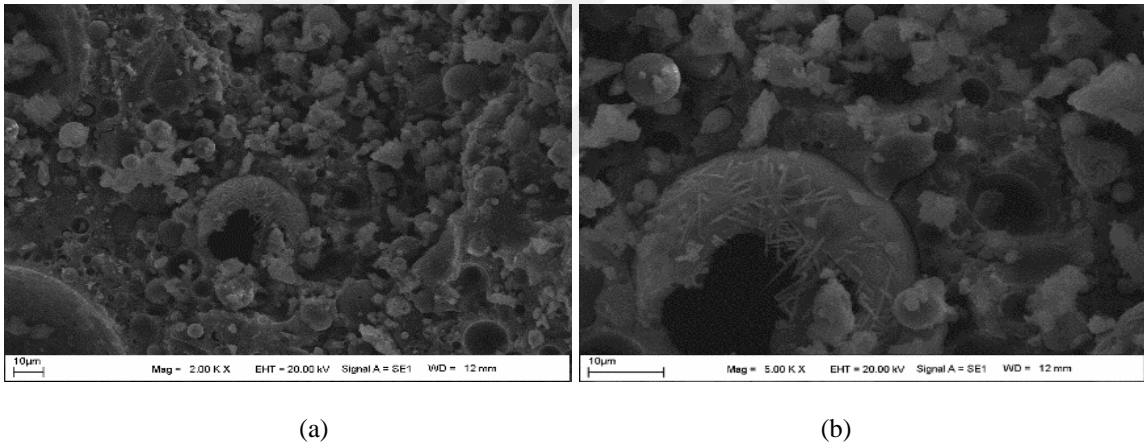
(b)

Şekil 4.4. GGA ikame seviyesine karşılık geopolimer harçların 28 günlük ortalama yarmada çekme dayanımındaki değişim: (a) SD içermeyen karışımlar ve (b) SD içeren karışımlar

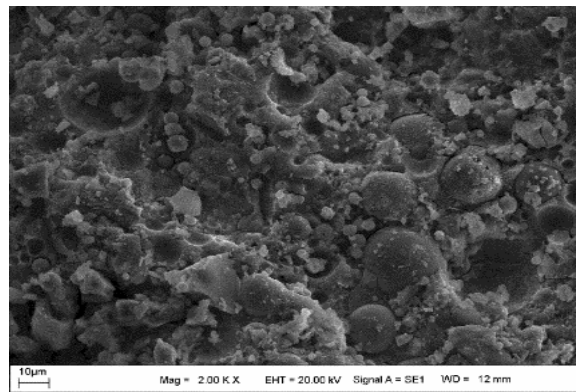
4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri Sonuçları

28 günlük geopolimer harç karışımlarının mikroyapısı ve geopolimer hamur yapısı ile agregalar arasındaki bağlanma derecesi hakkında bir fikir edinebilmek için GGA1, GGA2 ve GGA4'ün %20, %40 ve %60 seviyesinde ikame edilmesi ile üretilen harçlardan alınan parçalar SEM ile analiz edilmiştir. Numunelerin tüm mikrograflarında, silis dumunu eklenmiş olsun ya da olmasın, geopolimer jel içine gömülü kısmen reaksiyona girmemiş parçacıklara sahip bir mikroyapı görülmektedir. Mikrograflar çoğunlukla çeşitli boyutlarda gözeneklere sahip amorf bir faz ortaya koymaktadır. Kontrol karışımların

SEM görüntüleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur. 2000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri incelendiğinde silis dumanı içermeyen kontrol karışımında çok sayıda kabarcık olduğu gözlemlenmiştir. Kabarcıklar, geopolimer harçlardaki gözeneklerin varlığından kaynaklanır. Gözenekler, geopolimer bağlayıcı ile alkali aktivatör arasındaki kimyasal reaksiyon olan geopolimerizasyon sürecinin bir sonucu olarak açıklanabilir. Görüntülerdeki küresel moleküllerin ise reaksiyona girmeyen uçucu kül olduğu, 5000X büyütmedeki SEM görüntüsünde de etrenjit oluşumu görülmektedir. Silis dumanı içeren kontrol karışımın SEM görüntüsünde ise aynı şekilde reaksiyona girmeyen uçucu küllerin olduğu fakat silis dumanının ikamesi ile harçtaki mikro boşlukların daha az olması ile beraber daha fazla CASH jeli izlerinin de olduğu gözlemlenmiştir. Bağlayıcı jel, yoğun ve homojen bir yapıya sahiptir ve agregaya parçacıklarını sıkıca sarmaktadır. Bu durum ise silis dumanının katkısının doğal kum ile geopolimer hamuru arasındaki arayüzü iyileştirerek dayanımın artmasını sağlamıştır.

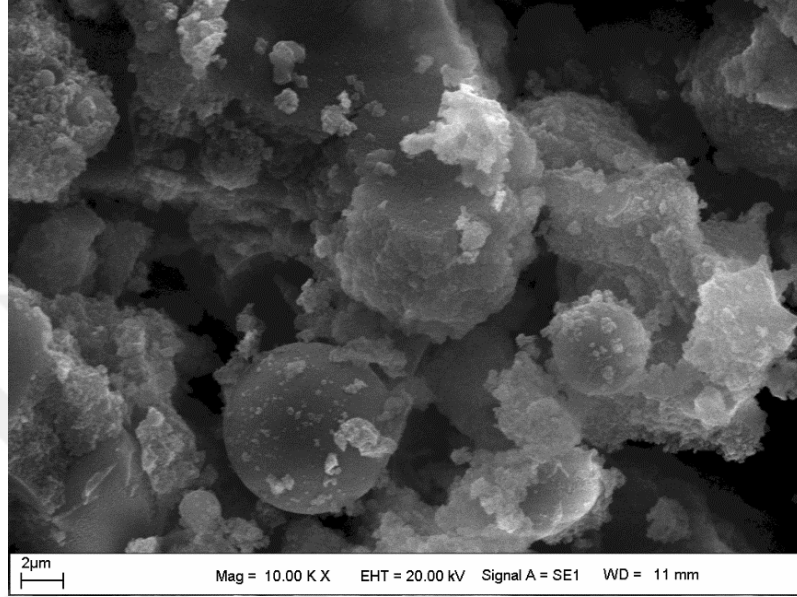


Şekil 4.5. SD-0/GGA-0 karışımına ait SEM görüntüleri; a) 2000X görüntüleme ve b) 5000X görüntüleme

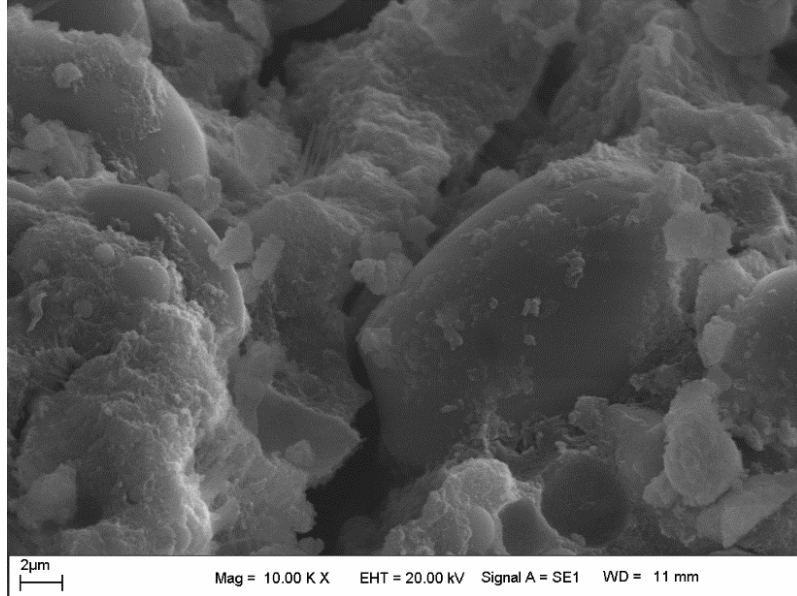


Şekil 4.6. SD-10/GGA-0 kodlu karışımına ait numunenin SEM görüntüsü (x2000 görüntüleme)

Farklı ikame seviyelerine sahip GGA4'lü karışımlardan silis dumanı içeren ve silis dumanı içermeyen harç serilerinin SEM görüntüleri karşılaştırılarak, GGA4 ve silis dumanı ikamesinin mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. SD-0/GGA4-20 ve SD-10/GGA4-20 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

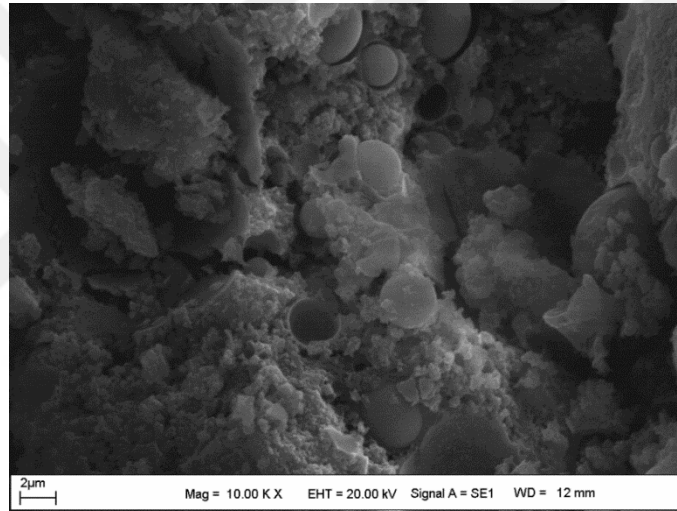


Şekil 4.7. SD-0/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

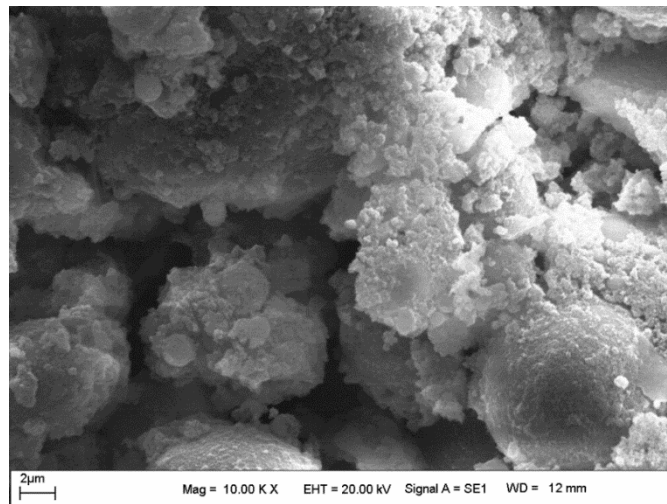


Şekil 4.8. SD-10/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

Geopolimer harcı oluşturan bileşenlerin SEM görüntüleri incelendiğinde SD-0/GGA4-20 ve SD-10/GGA4-20 kodlu karışımların görüntülerinde bu bileşenlerin izleri anlaşılmaktadır. 10000X kadar büyütülmüş şekillerdeki SEM görüntülerinde geopolimer matrisin SD-10/GGA4-20 karışımında iyi derecede homojen oluşu ve tepkimeye girmeyen uçucu kül miktarının az miktarda olduğu görülmüştür. Ayrıca jel oluşumları ile aderansın sağlandığı fakat buna karşılık SD-0/GGA4-20 kodlu karışımında aynı tip ve aynı orandaki GGA'nın katılımı olmasına rağmen jel oluşumunun daha az ve boşlukların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda silis dumanının geopolimer harcın mikroyapısını olumlu etkilediği görülmektedir. SD-0/GGA4-40 ve SD-10/GGA4-40 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sunulmuştur.

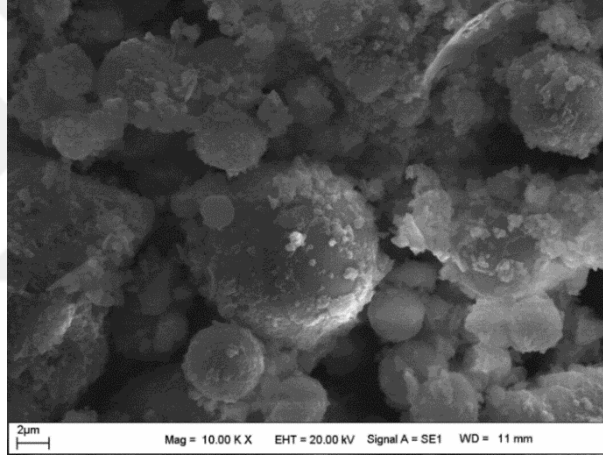


Şekil 4.9. SD-0/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

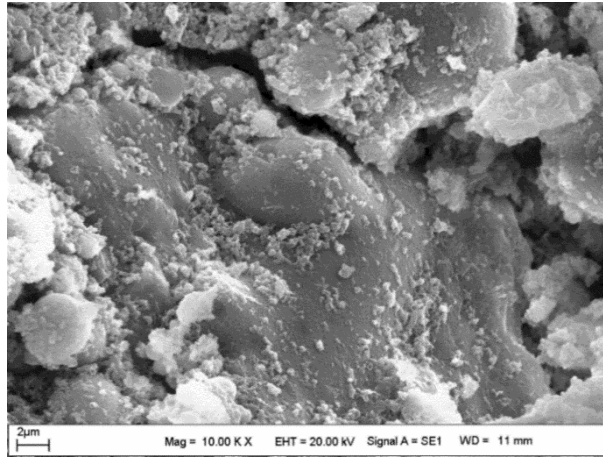


Şekil 4.10. SD-10/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SD-0/GGA4-40 kodlu karışımda SD-0/GGA4-20 kodlu karışıma göre gözeneklerin arttığı gözlemlenmiştir. Uçucu külün, büyük oranda içi boş küresel parçacıklar içerdiği bilinmektedir. Bu parçacıklar kısmen çözülürse, geopolimer matriste dağılmış gözenekler üretirler. Reaksiyona girmemiş veya kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül parçacıkları ve çözülmüş uçucu kül parçacıklarının geride bıraktığı boşluklara atfedilebilecek içi boş boşluklar görülmüştür [89]. SD-0/GGA4-40 kodlu karışımda bulunan bu boşlukların SD-10/GGA4-40 kodlu karışıma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. SD-10/GGA4-20 kodlu karışımda yoğunluklu olarak CASH jelleri görünmesine rağmen SD-0/GGA4-40 kodlu karışımda bu jellerin daha az olduğu gözlemlenmiştir. SD-0/GGA4-60 ve SD-10/GGA4-60 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sunulmuştur.

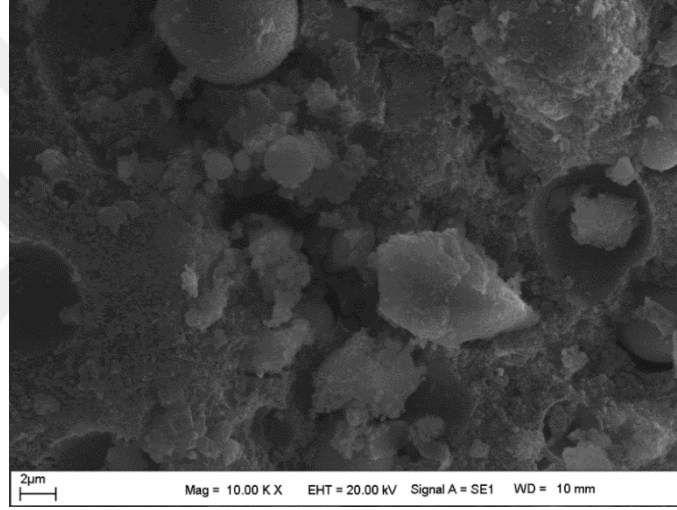


Şekil 4.11. SD-0/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

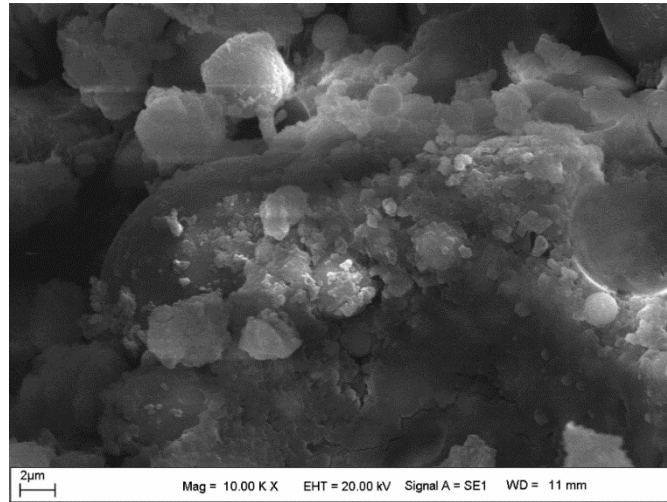


Şekil 4.12. SD-10/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SD-0/GGA4-60 kodlu karışımda çoğunlukla reaksiyona girmeyen uçucu küllerin olduğu ve geopolimer harcın agrega ile aderansının sağlanmadığı gözlemlenmiştir. SD-10/GGA4-60 kodlu karışımda ise mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Geopolimer harçtaki çatlakların ortaya çıkması, jel matrisindeki kılcal gerilimi artıran polikondensasyon işlemi sırasında jel kurutma büzülmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu kurutma büzülmesi, homojen olmayan iç basınca ve buharlaşan suya bağlanabilir [90]. Farklı ikame seviyelerinde GGA2 kodlu agrega ile üretilmiş silis dumanı içeren ve içermeyen geopolimer harç karışımlarının agrega ikame seviyesinin değişimine bağlı oluşan SEM görüntüleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

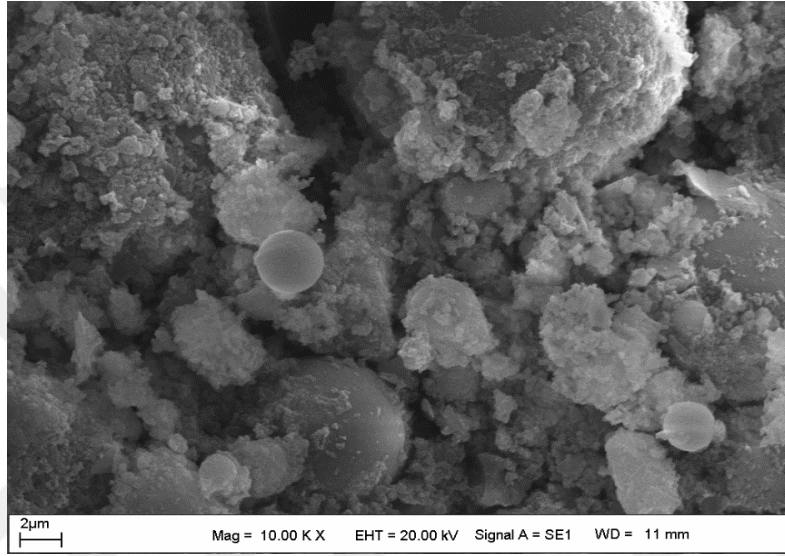


Şekil 4.13. SD-0/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

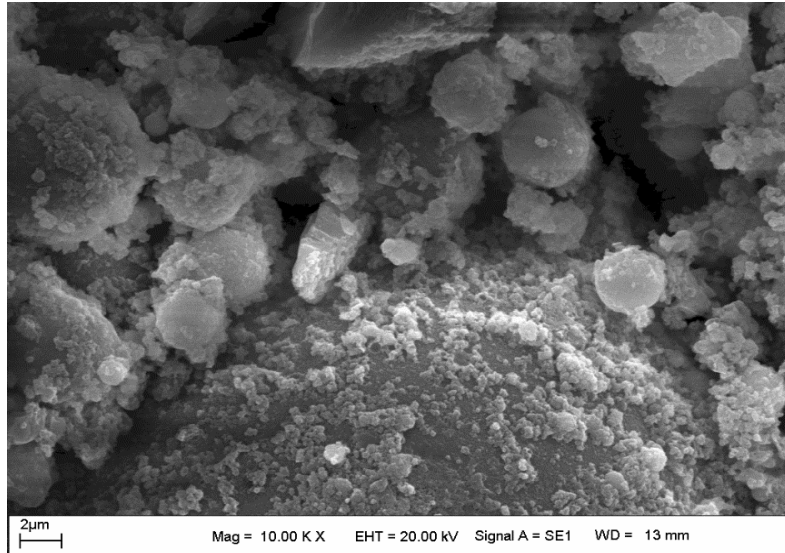


Şekil 4.14. SD-10/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SEM görüntüleri, SD-0/GGA2-20 kodlu karışımda aderans sağlanmamış agregalar ve yoğun gözenekler olduğunu gösterirken, SD-10/GGA2-20 kodlu karışımda agrega parçacıklarının çevresini saran geopolimer jellerle aderansın daha iyi sağlandığını göstermektedir. Bu gözlemler sonucunda silis dumanı ikamesinin daha sağlam bir bağ oluşturduğu anlaşılmaktadır. SD-0/GGA2-40 ve SD-10/GGA2-40 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sunulmuştur.

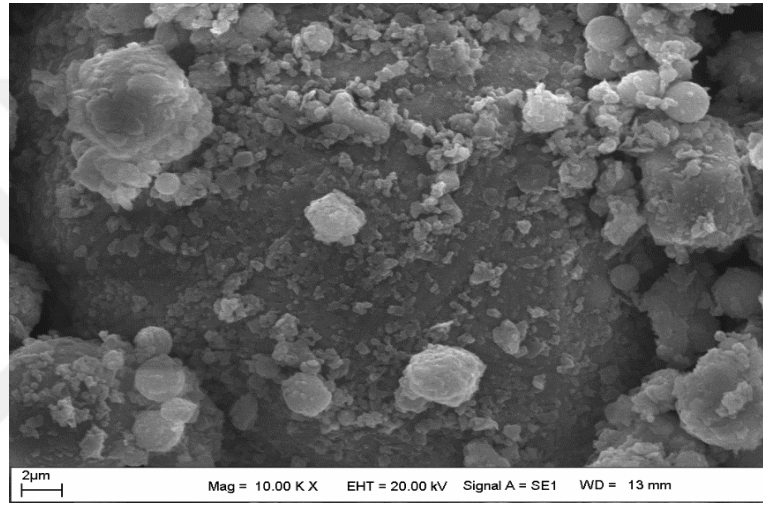


Şekil 4.15. SD-0/GGA2-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

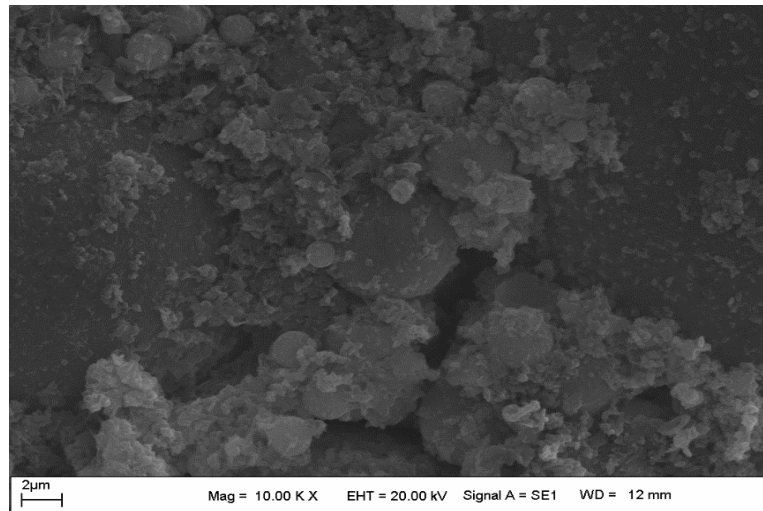


Şekil 4.16. SD-10/GGA2-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

GGA2'nin, GGA4'e kıyasla daha ince yapılı olması nedeniyle SEM görüntülerinde matris homojenliği sağlanamamıştır. Bu durum, reaktif olmayan mikro boyutlu gazbeton parçacıklarının geopolimer harç matrisinde eşit şekilde dağılmadığını göstermektedir. SD-10/GGA2-40 kodlu karışımda ise SD-0/GGA2-40 kodlu karışıma göre daha kompakt bir yapı gözlemlenmiştir. Her iki karışımda da camsı faz, boşluklar, çatlaklar ve camsı faza gömülü tamamen ve kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül parçacıkları görülmüştür. SD-0/GGA2-60 ve SD-10/GGA2-60 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de sunulmuştur.

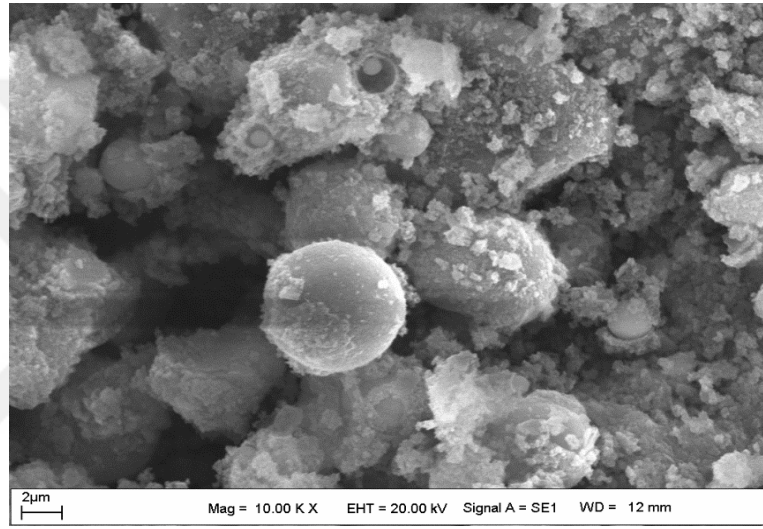


Şekil 4.17. SD-0/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

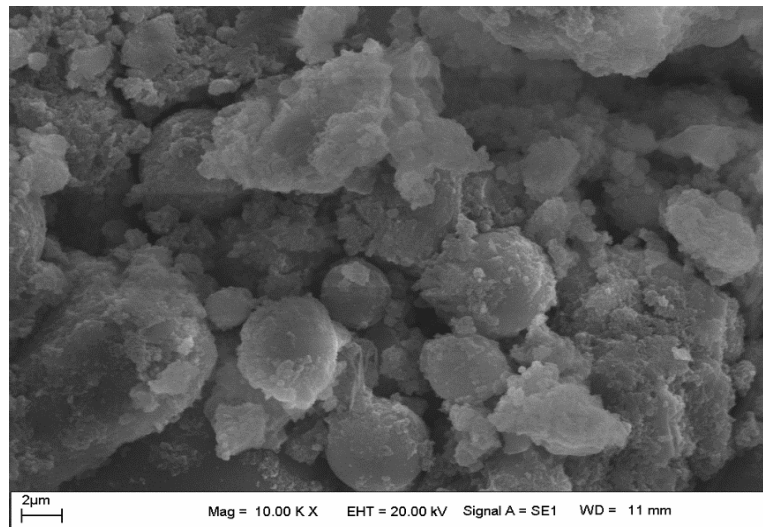


Şekil 4.18. SD-10/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SD-0/GGA2-60 kodlu karışımda geopolimer jel oluşumunu ve daha zayıf geçiş bölgesini etkileyen gazbeton parçacıkları olduğu, boşlukların daha fazla olduğu ayrıca moleküllerin aralarında tamamen kopmaların gerçekleştiği görülmüştür. Sonuç olarak karışımlar daha gözenekli hale gelmiş ve bu yüzden daha kusurlu ve çatlaklı bir yapı oluşmuştur. Bu kusurlar ve çatlaklar mekanik özelliklerde dikkate değer bir düşüşe neden olmuştur [91]. Basınç dayanım sonuçları da bu mikroyapıdaki kusurları açıklar niteliktedir. SD-0/GGA1-20 ve SD-10/GGA1-20 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sunulmuştur.

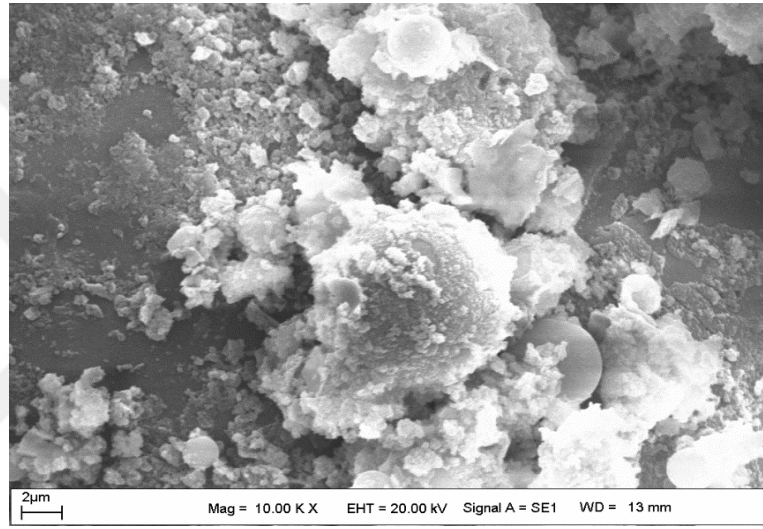


Şekil 4.19. SD-0/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

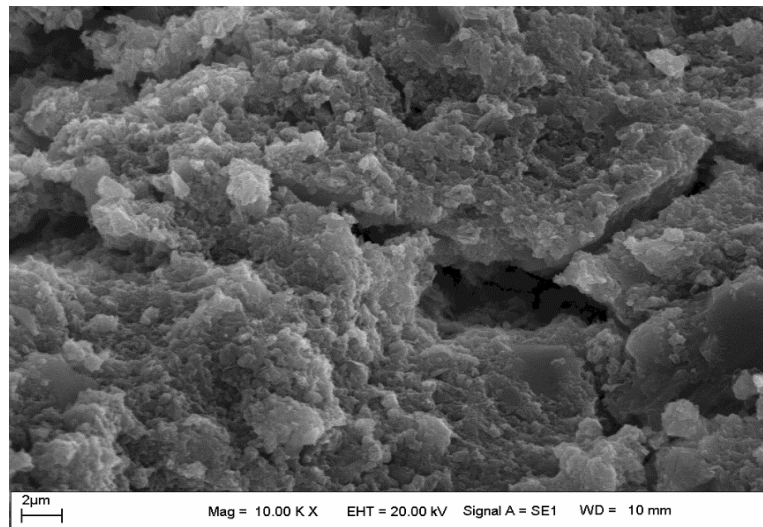


Şekil 4.20. SD-10/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SD-0/GGA1-20 kodlu karışımın SEM görüntüsünde reaksiyona girmemiş uçucu küller, boşluklar ve geopolimerizasyona katılmamış agregalar görülmüştür. SD-10/GGA1-20 kodlu karışımında SD-0/GGA1-20 kodlu karışıma göre kümelenmiş halde jel yapısı ile beraber daha yoğun ve boşluksuz bir matris yapısına sahip olduğu görülmüştür. Agregabağlayıcı jeli arayüzü, geopolimer harçlarda önemli bağlantı noktasıdır ve bu numunelerde bağlantı çok zayıf olduğun için dayanımı daha düşük bir yapı oluşmuştur. SD-0/GGA1-40 ve SD-10/GGA1-40 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de sunulmuştur.

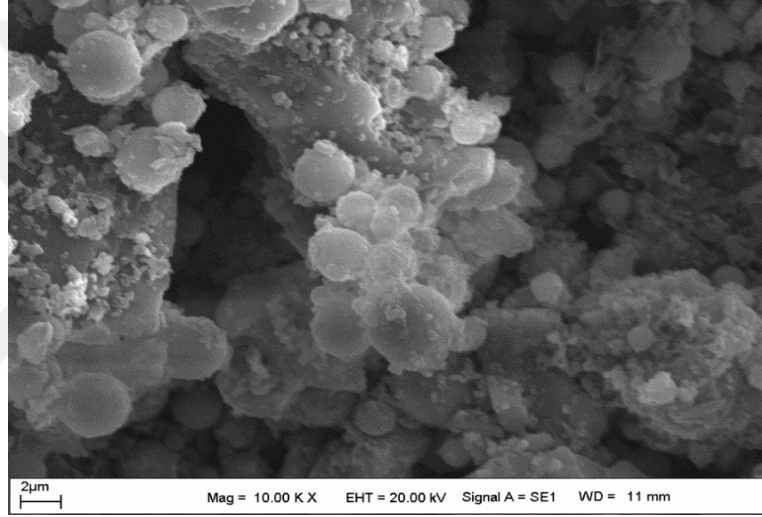


Şekil 4.21. SD-0/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

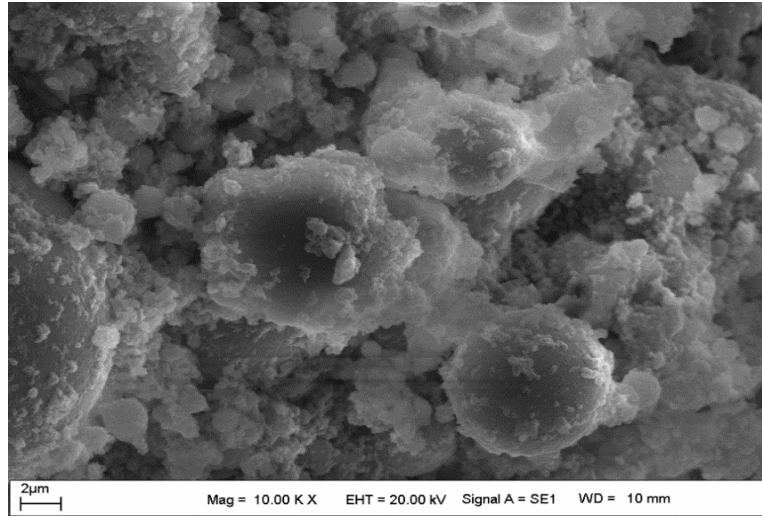


Şekil 4.22. SD-10/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

SD-0/GGA1-40 kodlu karışımda GGA1'in %40 oranında doğal kum ile yer değiştirmesinin, GGA2 ve GGA4'e nispeten daha az kompakt ve daha gözenekli bir morfolojiye sahip olması gazbeton agregasının incelik modülünün artmasının olumsuz etkisidir. SD-10/GGA1-40 kodlu karışımda silis dumanı içermeyen SD-0/GGA1-40 kodlu karışıma göre daha az çatlak ve gözeneklerin olduğu ve SD-0/GGA1-40 kodlu karışımın çok zayıf geopolimer matris gösterdiği görülmüştür. Bu durum ise harcın daha kırılğan ve daha gevrek bir yapı almasına sebebiyet vermektedir. SD-0/GGA1-60 ve SD-10/GGA1-60 kodlu karışımların SEM görüntüleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.23. SD-0/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

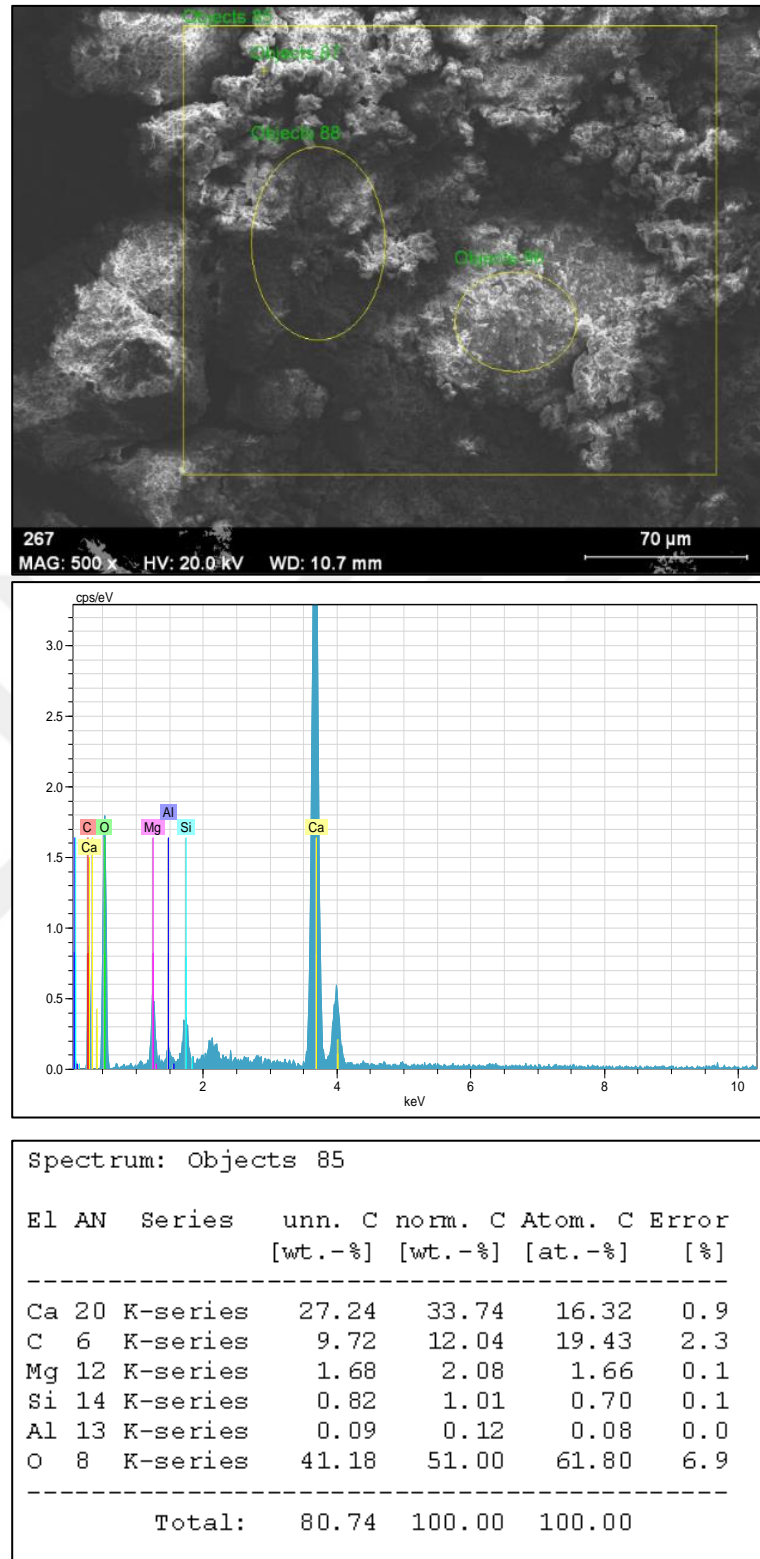


Şekil 4.24. SD-10/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin SEM görüntüsü (x10000)

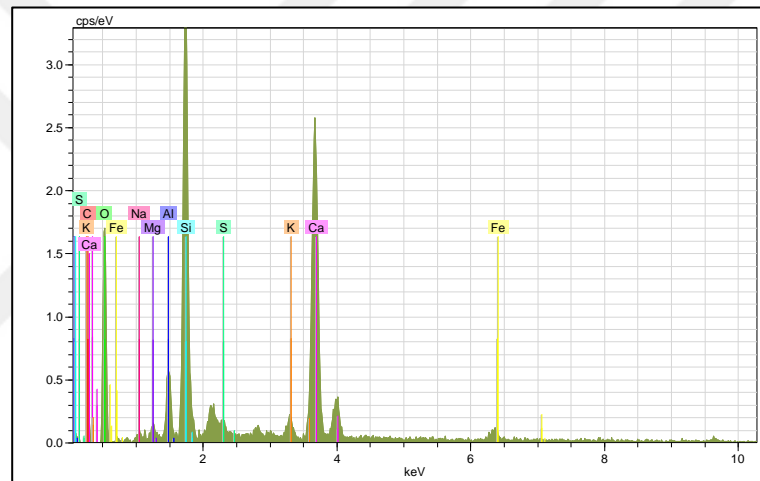
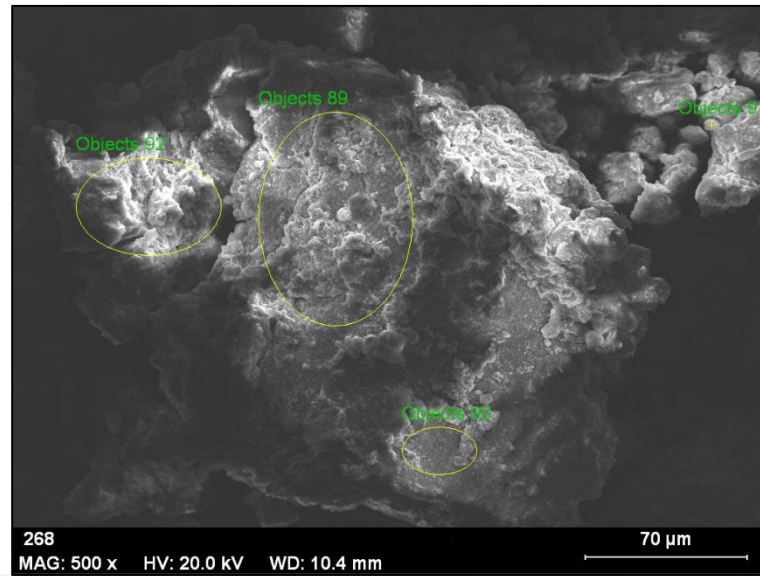
SD-0/GGA1-60 kodlu karışımda SD-0/GGA1-40 ve SD-10/GGA1-20 kodlu karışıma kıyasla boşluklar daha da artmış ve mikroyapıda daha çok çatlaklar gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi giderek azalan geopolimerizasyon sonucu SD-0/GGA1-60 kodlu karışımda çok düşük bir basınç dayanımı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde SD-10/GGA1-60 numunesinin yüzey morfolojisinde de geopolimerizasyonun çok az olduğu bir yapılanma gözlemlenmiştir.

4.6. Enerji Dağılımı X-Işını Spektrometresi (EDX) Analizleri Sonuçları

Geopolimer harç karışımlarının matrislerinde bulunan elementlerin dağılımının belirlenmesi amacıyla EDX analizi yapılmıştır. Hazırlanan karışımlardan her iki serideki kontrol (SD-0/GGA-0 ve SD-10/GGA-0 kodlu) ve GGA1, GGA2 ve GGA4 tipi geri dönüşüm gazbeton atığı agregalarının %20, %40 ve %60 oranında ikame edildiği karışımlar üzerinde EDX analizleri yapılmıştır. SEM analizi yapılan harç karışımlarına ait numunelerin üzerinde spesifik olarak yapılan EDX analiz sonuçlarından doğal kum, GGA ve kontrol karışımların sonuçları Şekil 4.25-4.28'de sunulmuştur. GGA1, GGA2 ve GGA4'ün %20, %40 ve %60 oranında ikame edildiği karışımların (SD-0/GGA1-20, SD-0/GGA1-40, SD-0/GGA1-60, SD-0/GGA2-20, SD-0/GGA2-40, SD-0/GGA2-60, SD-0/GGA4-20, SD-0/GGA4-40, SD-0/GGA4-60, SD-10/GGA1-20, SD-10/GGA1-40, SD-10/GGA1-60, SD-10/GGA2-20, SD-10/GGA2-40, SD-10/GGA2-60, SD-10/GGA4-20, SD-10/GGA4-40, SD-10/GGA4-60 kodlu karışımlar) EDX analiz sonuçları ise EK 1'de sunulmuştur.



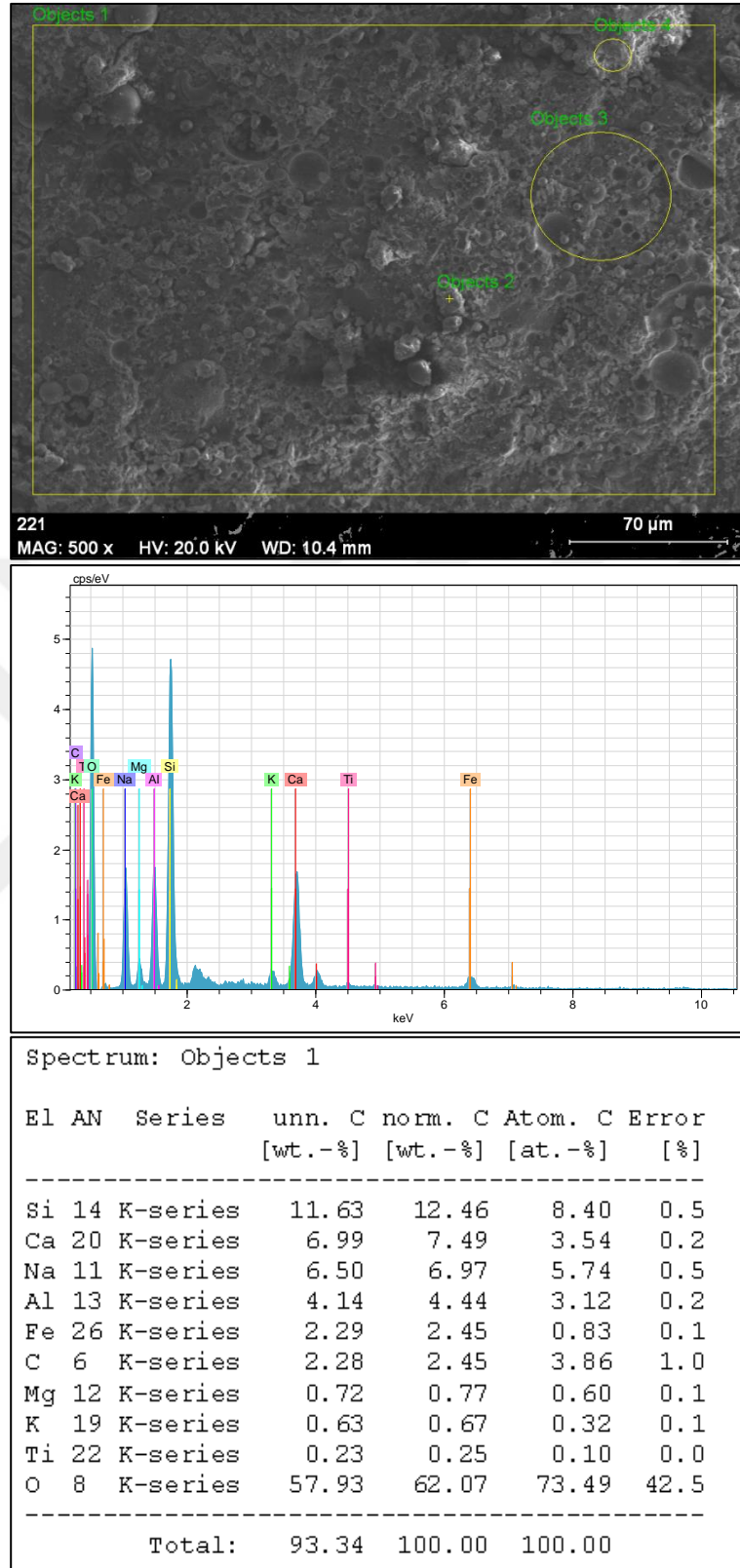
Şekil 4.25. Doğal kum numunesi obje 85 kesitinin EDX analizi



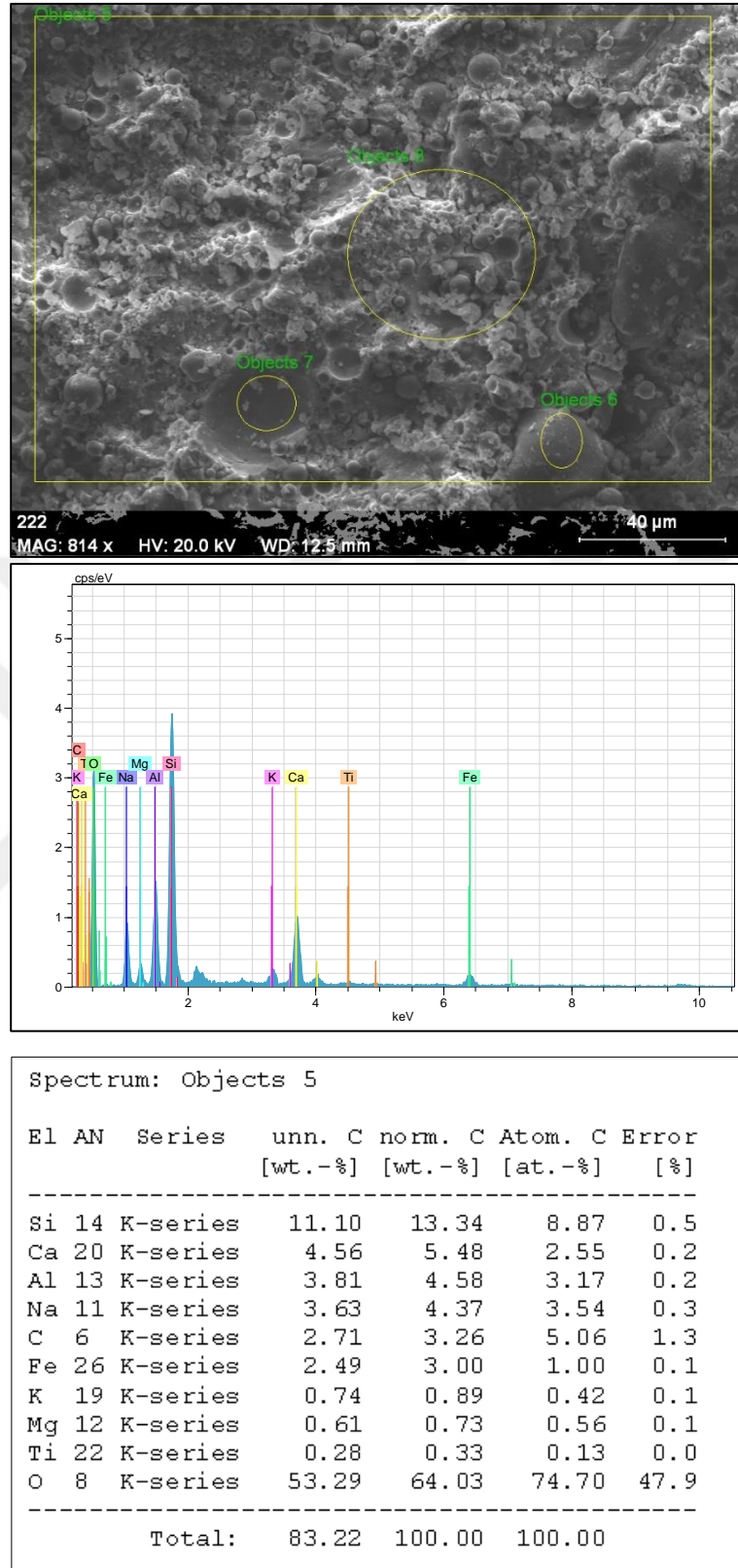
Spectrum: Objects 90

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ca	20	K-series	13.84	18.96	9.77	0.5
Si	14	K-series	11.60	15.90	11.69	0.5
K	19	K-series	2.21	3.03	1.60	0.1
C	6	K-series	1.96	2.69	4.63	1.2
Fe	26	K-series	1.91	2.62	0.97	0.1
Al	13	K-series	1.50	2.06	1.57	0.1
S	16	K-series	0.81	1.11	0.72	0.1
Mg	12	K-series	0.13	0.18	0.15	0.0
Na	11	K-series	0.12	0.16	0.15	0.0
O	8	K-series	38.88	53.29	68.76	6.7
Total:			72.97	100.00	100.00	

Şekil 4.26. GGA numunesi obje 90 kesitinin EDX analizi



Şekil 4.27. SD-0/GGA0 kodlu karışıma ait numunenin obje1 kesitinin EDX analizi

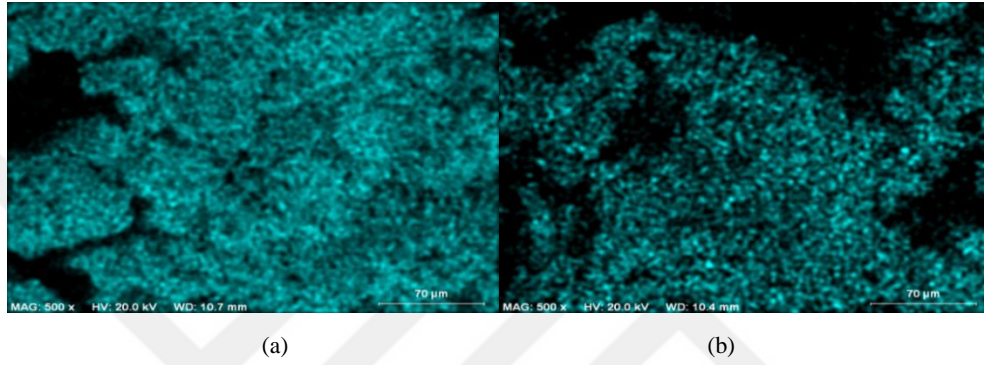


Şekil 4.28. SD-10/GGA0 kodlu karışıma ait numunenin obje 5 kesitinin EDX analizi

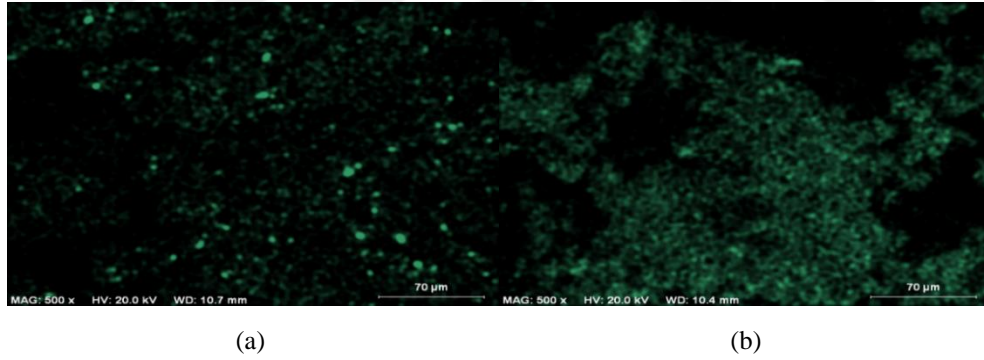
EDX analizi sonuçlarına göre, geopolimer jelin element analizinde O, Si, Ca, Na, Al, Fe, Mg, S, K, Ti elementleri görülmüştür. Mikroyapıda SEM analizi ile belirlenen geopolimer harç üzerindeki jel yapısının büyük oranda O, Si, Ca, Na, Al elementlerinden oluştuğu görülmüştür. Bununla beraber az miktarda Mg ve Fe elementlerine de rastlanmıştır. EDX analizinde görülen O, Si, Ca, Na, Al elementleri geopolimer harçların tamamında oluşan Al-O-Si ve Si-O-Si bağlarına, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin varlığına işaretler [92,93]. Numune matrislerindeki temel ürünler Si ve Al elementleridir. Bununla beraber, karışım türleri kendi aralarında EDX analizinde numunelerin Si/Al oranında yakın değerler verdiği ve bu oranda önemli bir değişim görülmediği söylenebilir. Doğal kumun yapısında Şekil 4.25'ten de görüleceği üzere Si elementi çok az olmasına rağmen Ca elementi daha fazladır. Buna karşılık Şekil. 4.26'da görülüşü gibi geri dönüşüm gazbeton agregasında ise Si miktarı nispeten daha fazla bulunurken Ca miktarı daha azdır. Bu sebeple tüm karışımlarda GGA'nın ikame seviyesinin artması ile Ca element miktarı azalmış ve Ca/Si oranında azalma olmuştur. Bu durum C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumunda azalmalar meydana getirmiş ki bu da harcın daha dayanıksız bir yapı haline gelmesine neden olmuştur. Her ne kadar GGA'da doğal kuma göre daha fazla Si elementi bulursa da Ca elementinin azalması ile reaksiyon oluşumu da azalmıştır. Silis dumanı içeren karışımlarda ise Si miktarında ilk karışım türüne göre artış gerçekleşmiştir. Bu durumda, SD-0 ile SD-10 seri karışım türü karşılaştırıldığında ikame oranı aynı olan GGA'lı numuneler arasında Ca oranı aynı kalırken SiO₂ oranı artmasıyla daha fazla C-S-H ve C-A-S-H jelleri oluşmasına sebep olduğu için harç daha sağlam bir hal almıştır. Analiz sonuçları basınç değerlerinin sonuçlarının uyumlu olduğunu desteklemiştir. Ayrıca uçucu külün SD-10 karışım türünde azalması ile Al miktarı azalır. Böylece ikinci karışım türünde C-A-S-H jelinin azalıp daha çok C-S-H jelinin oluşması beklenir. Fakat, bu sonuçlarda bazı elementler genel artış veya azalmalara uymayabilir bu durum ise EDX analizinin spesifik seçilen yerlerden element tayini yapması ile açıklanabilir. Örnek verilecek olursa GGA'nın ikame oranının artması ile Ca miktarının düştüğünü bilmekteyiz fakat bazı karışımlarda seçilen noktada sadece Ca içerikli bir doğal kum bulunması o karışımda Ca miktarını daha fazla gösterecektir. Önemli olan bu analizde sonuçları genel olarak takip edip yorumlayabilmektir. Ayrıca, EDX analizi ile sadece element tayini yapıldığı için GGA'nın ikame oranının ve karışım türlerinin değişimi ile ilgili sonuçlar sunarken GGA'nın incelik oranının artması ile ilgili sonuçlar sunamaz.

4.7. Mapping (Haritalama) Analizleri Sonuçları

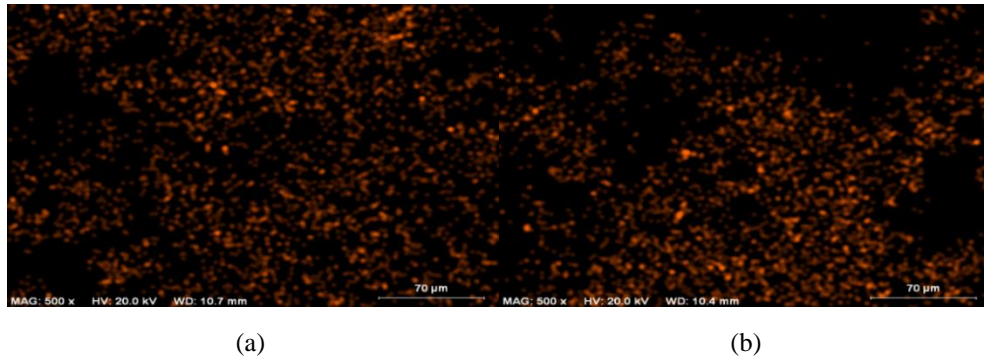
EDX analizinde yorumlanan, geopolimer harçlarda daha çok bulunan ve özellikle jel oluşumu için gerekli olan Ca, Si, Al elementlerinin numuneye göre nasıl değişim gösterdiğinin daha iyi anlaşılması ve elementlerin dağılımının görselleştirilmesi için Mapping analizler yapılmıştır. Doğal kum ve GGA element miktarları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.29 ile Şekil 4.31 arasında sunulmuştur.



Şekil 4.29. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA

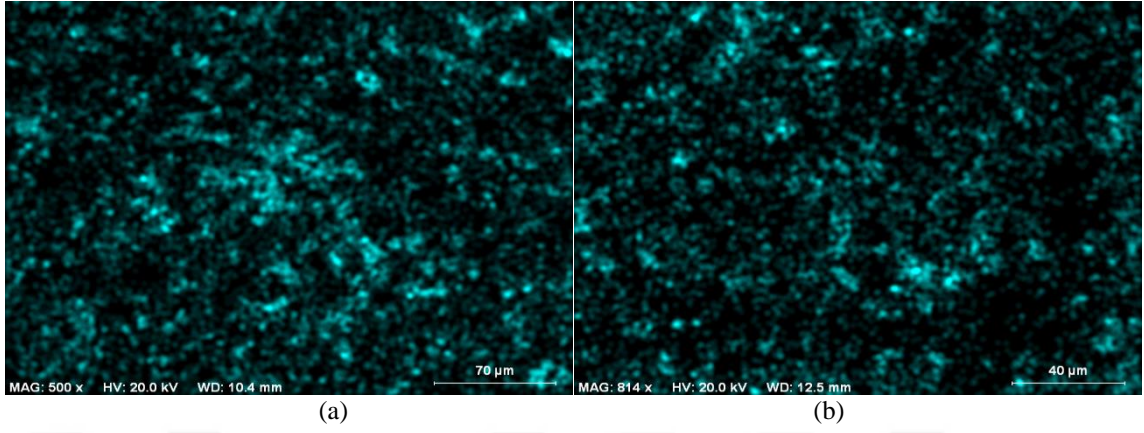


Şekil 4. 30. Mapping Si elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA

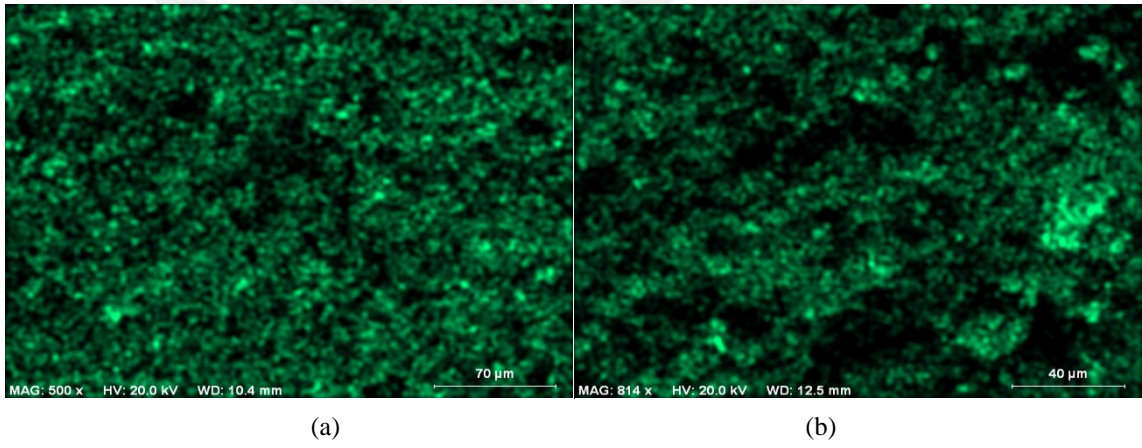


Şekil 4.31. Mapping Al elementi görüntüsü; a) Doğal kum ve b) GGA

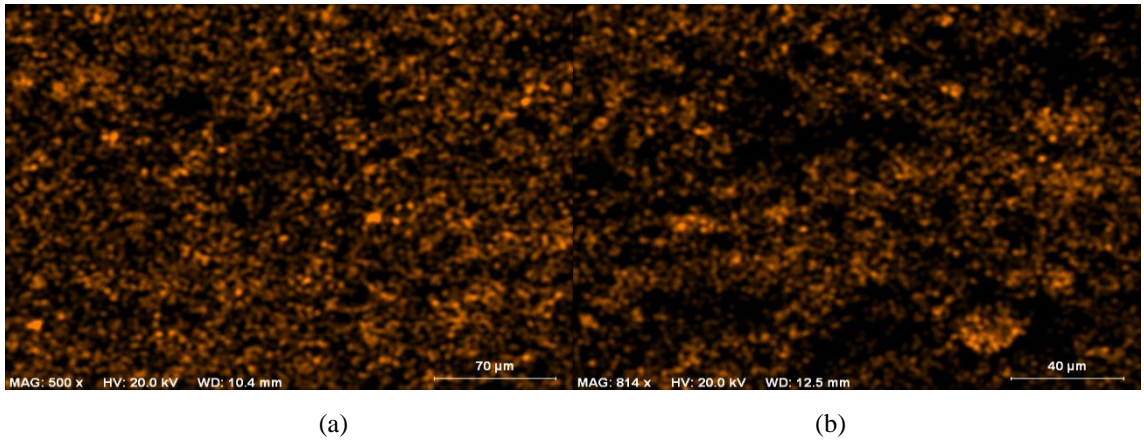
Kontrol karışımların element analizleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.32 ile Şekil 4.34 arasında sunulmuştur.



Şekil 4.32. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0



Şekil 4.33. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0

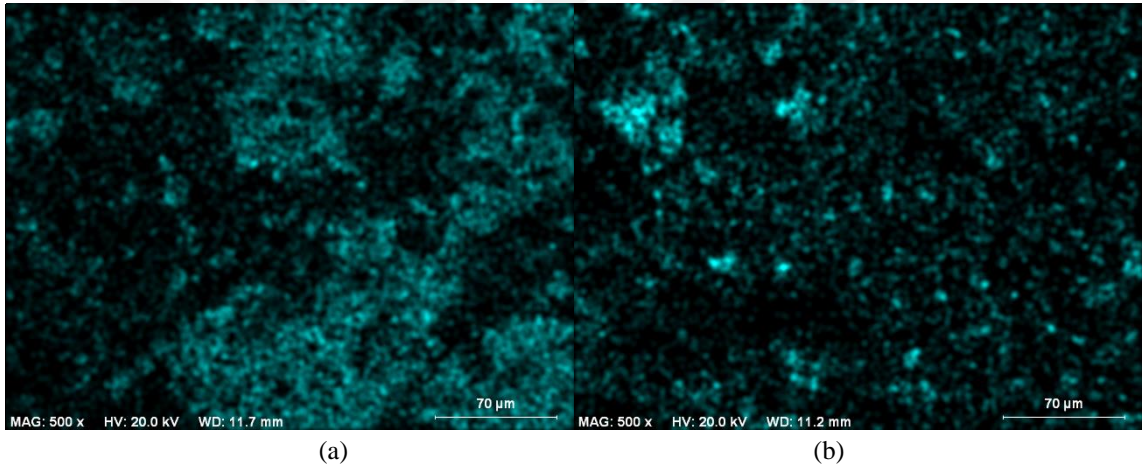


Şekil 4.34. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA0 ve b) SD-10/GGA0

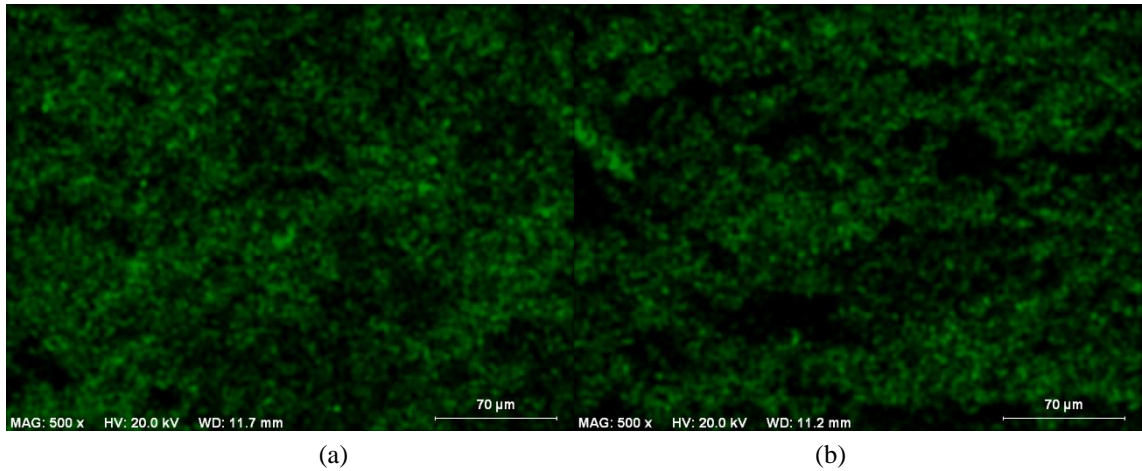
Doğal kum ve GGA numunelerinin mappingleri incelendiğinde Ca miktarının gazbetonda doğal kuma göre daha az olduğu Si elementinin daha fazla olduğu Al elementinin ise her iki numunede de çok az olduğu görülmüştür.

Kontrol karışımlar kıyaslandığında Ca ve Si elementlerinde önemli değişimler olmazken Al elementinde silis dumanı içeren kontrol karışımında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise ikinci karışım türünde uçucu külün silis dumanı ikamesi ile azalmasıdır.

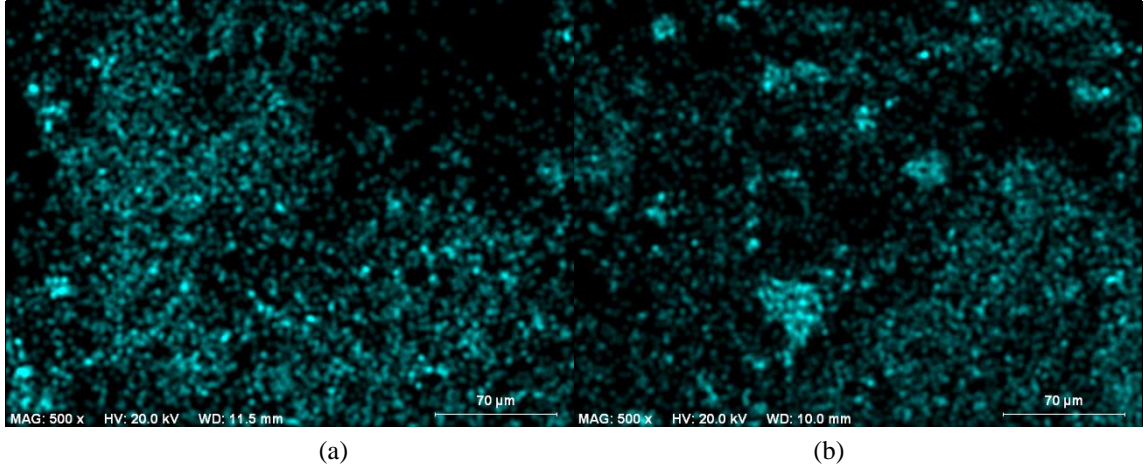
GGA1'in %20 ve %60 ikame seviyesindeki silis dumanı içeren ve silis dumanı içermeyen karışımlarında bulunan Ca ve Si element değişimleri Şekil 4.35 ve 4.38 arasında sunulmuştur.



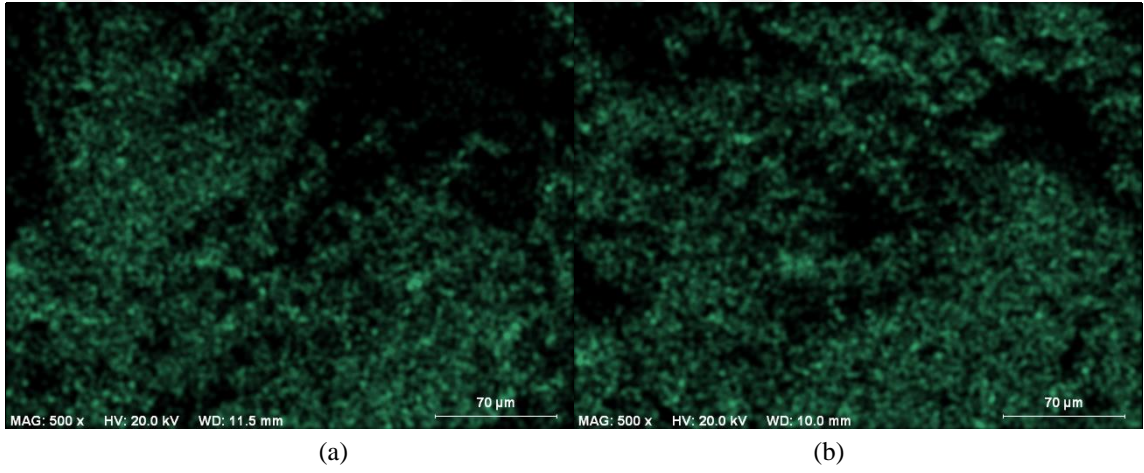
Şekil 4.35. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 ve b) SD-0/GGA1-60



Şekil 4.36. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 ve b) SD-0/GGA1-60



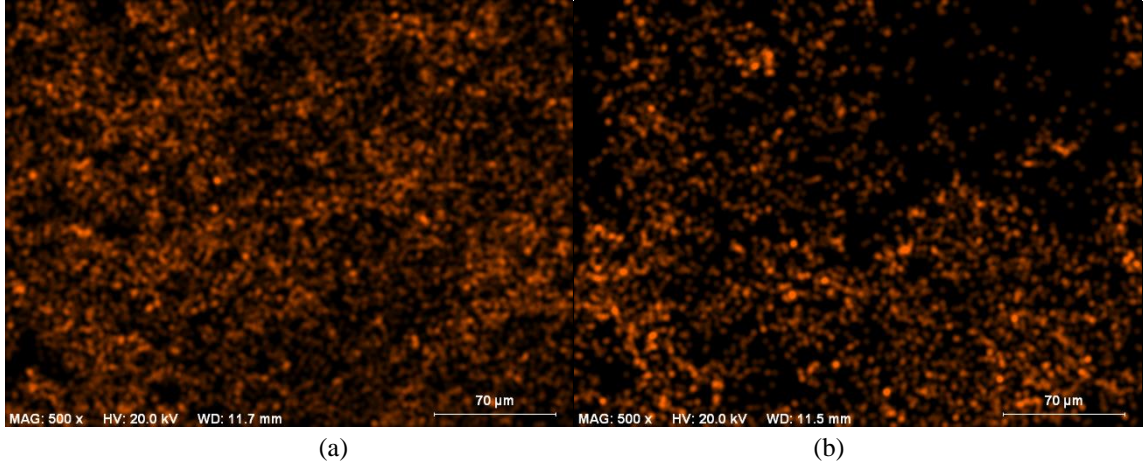
Şekil 4.37. Mapping Ca elementi görüntüsü; a) SD-10/GGA1-20 ve b) SD-10/GGA1-60



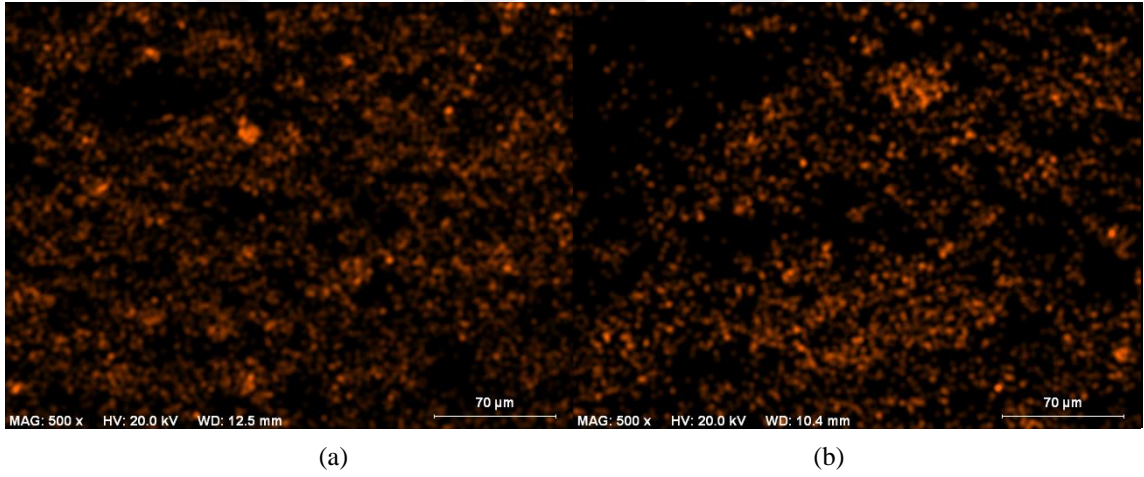
Şekil 4.38. Mapping Si elementi görüntüsü; a) SD-10/GGA1-20 ve b) SD-10/GGA1-60

Şekil 4.35 ve Şekil 4.37’de görüldüğü gibi GGA’nın ikame seviyesinin artması ile beklendiği gibi Ca elementinde azalma görülmüştür. Si elementi ise Şekil 4.36 ve Şekil 4.38’de görüldüğü gibi GGA’nın ikame seviyesinin artması ile silis dumanı içeren karışımlarda arttığı gözlenirken silis dumanı içermeyen karışımda bu fark gözlenememiştir. Bunun sebebi ise analiz yapılırken seçilen noktada bulunan element yoğunluğunun değişmesidir.

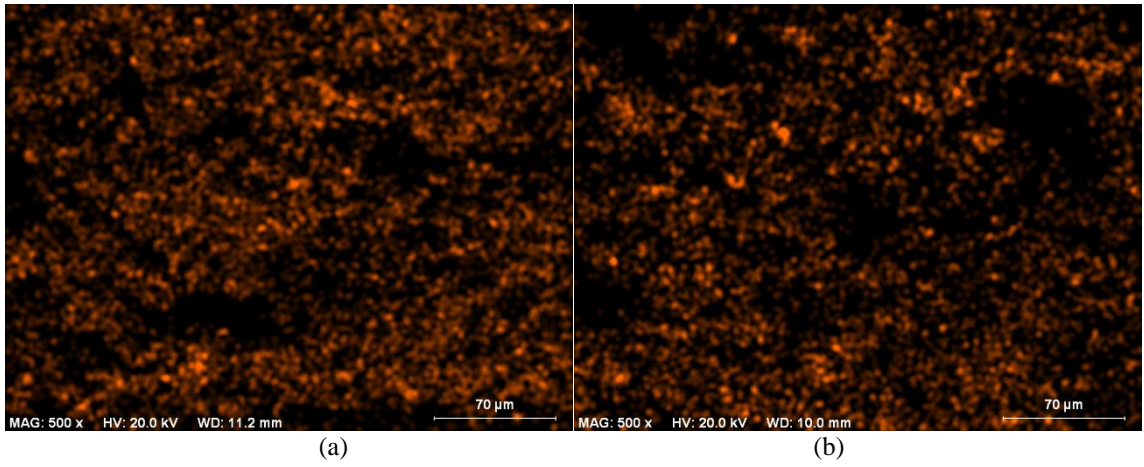
Al elementinin GGA’nın farklı ikame seviyesindeki silis dumanı içeren ve içermeyen karışımlara göre değişimini görüntüleyen mapping analizleri Şekil 4.39 ile Şekil 4.41 arasında sunulmuştur.



Şekil 4.39. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-20 b) SD-10/GGA1-20



Şekil 4.40. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-40 b) SD-10/GGA1-40

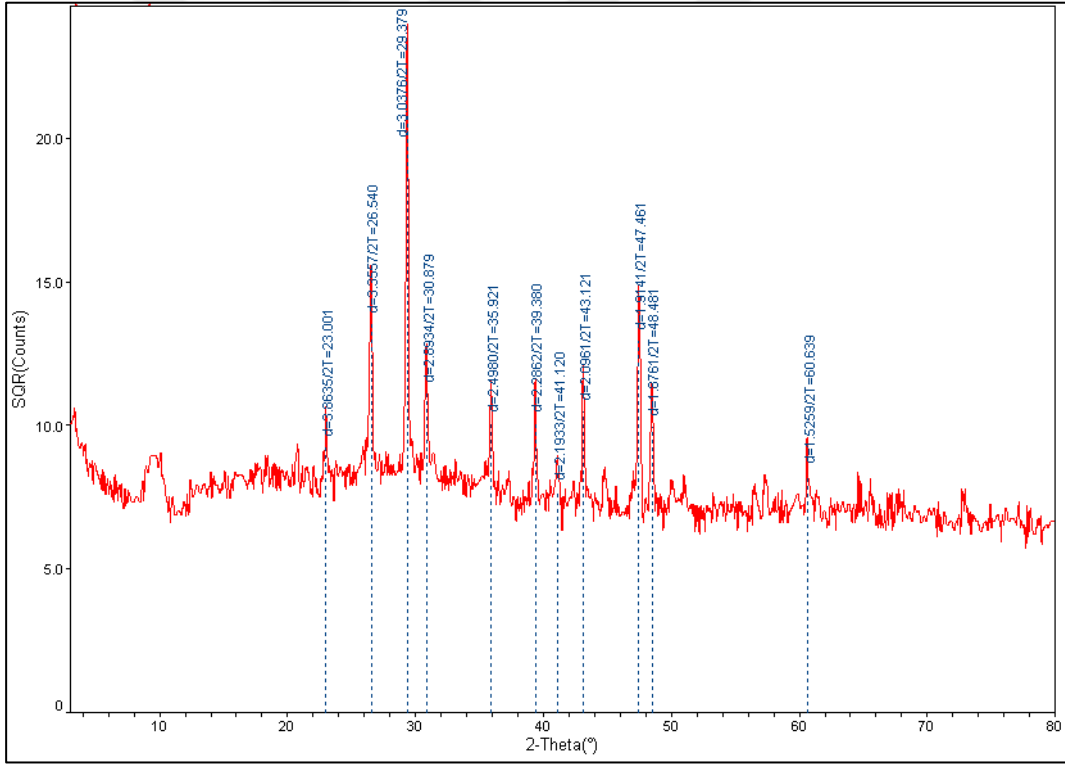


Şekil 4.41. Mapping Al elementi görüntüsü; a) SD-0/GGA1-60 b) SD-10/GGA1-60

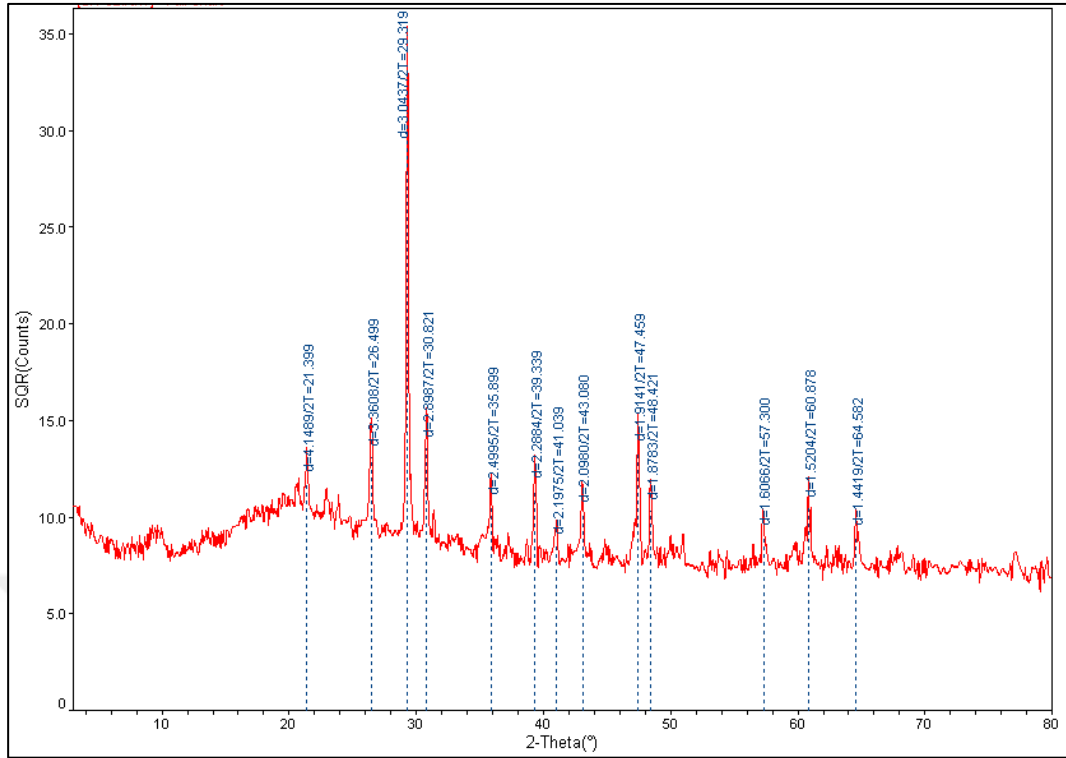
S-0/GGA1 ve S-10/GGA1 seri geopolimer harçların farklı ikame seviyesindeki karışımlarının mapping analizleri Al elementlerinin silis dumanı ikamesiyle azaldığını göstermektedir. Bunun sebebi silis dumanının ikamesi ile uçucu külün azalmasıdır.

4.8. X-ışınları Difraksiyonu (XRD) Analizleri Sonuçları

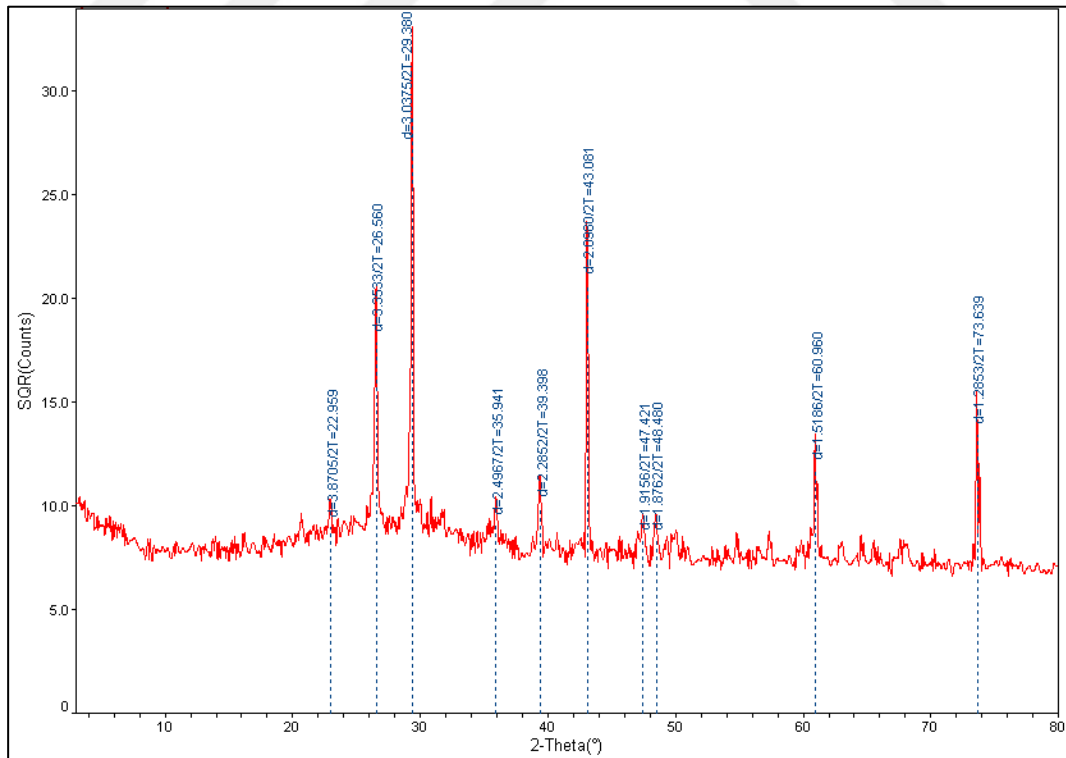
Geopolimer harç numunelerin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesinde XRD analizi kullanılmıştır. Bu analiz ile numunelerdeki amorf ve kristal yapılar hakkında bilgi edinilmiştir. Hazırlanan karışımlardan 3 tip geri dönüşüm gazbeton agregası olan GGA1, GGA2, GGA4'ün %60 oranında ikame edildiği harç karışımlarına ait numuneler üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.42 ile 4.49 arasında sunulmuştur.



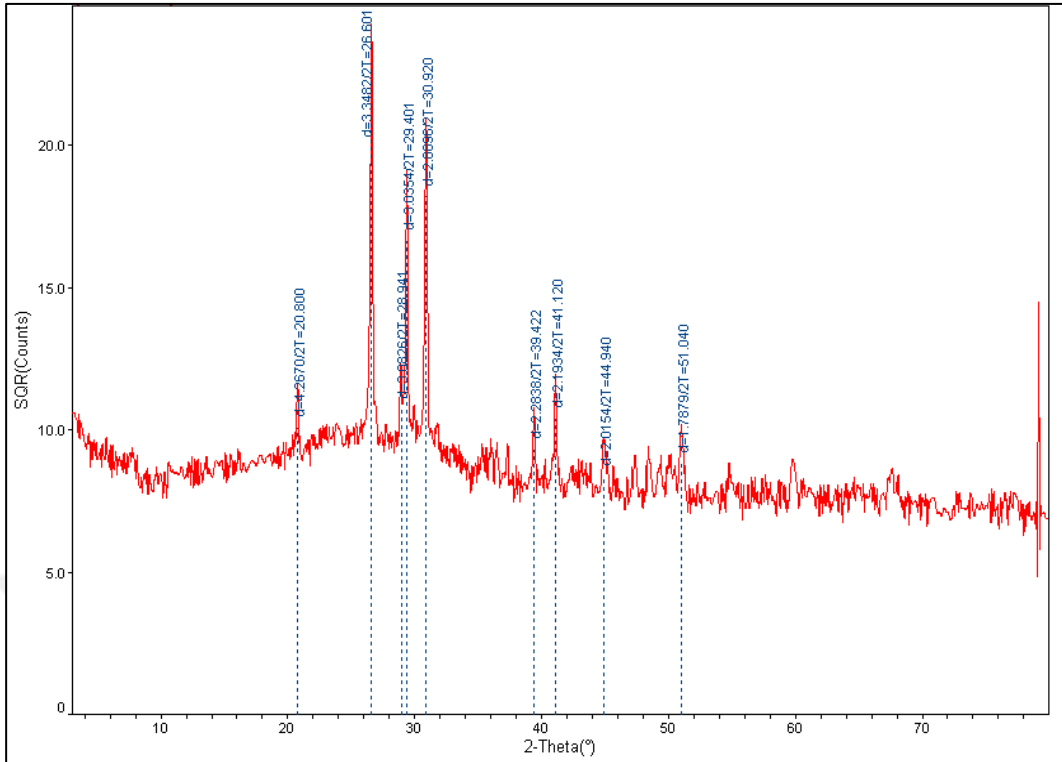
Şekil 4.42. SD-0/GGA-0 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



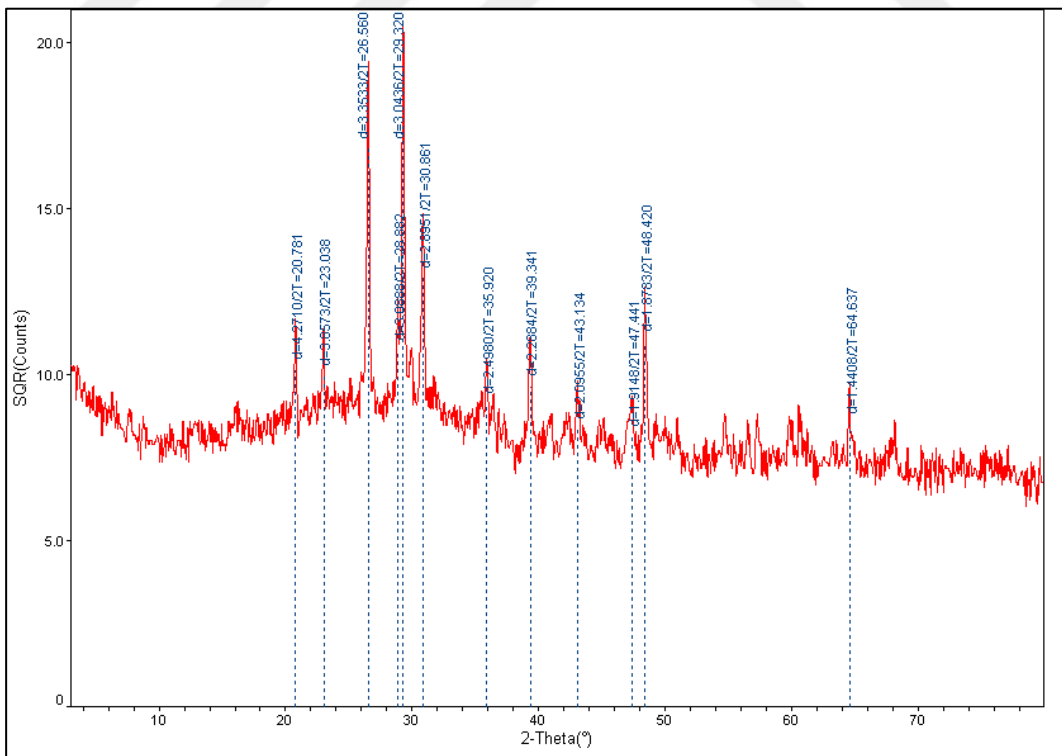
Şekil 4.43. SD-10/GGA-0 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



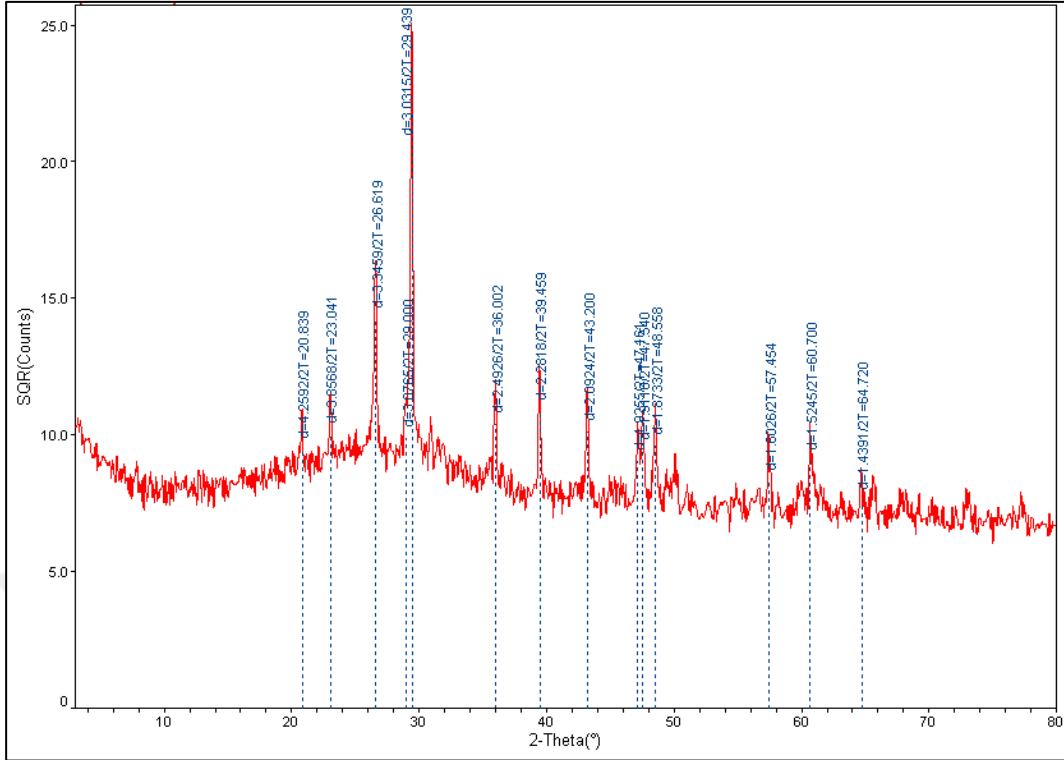
Şekil 4.44. SD-0/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



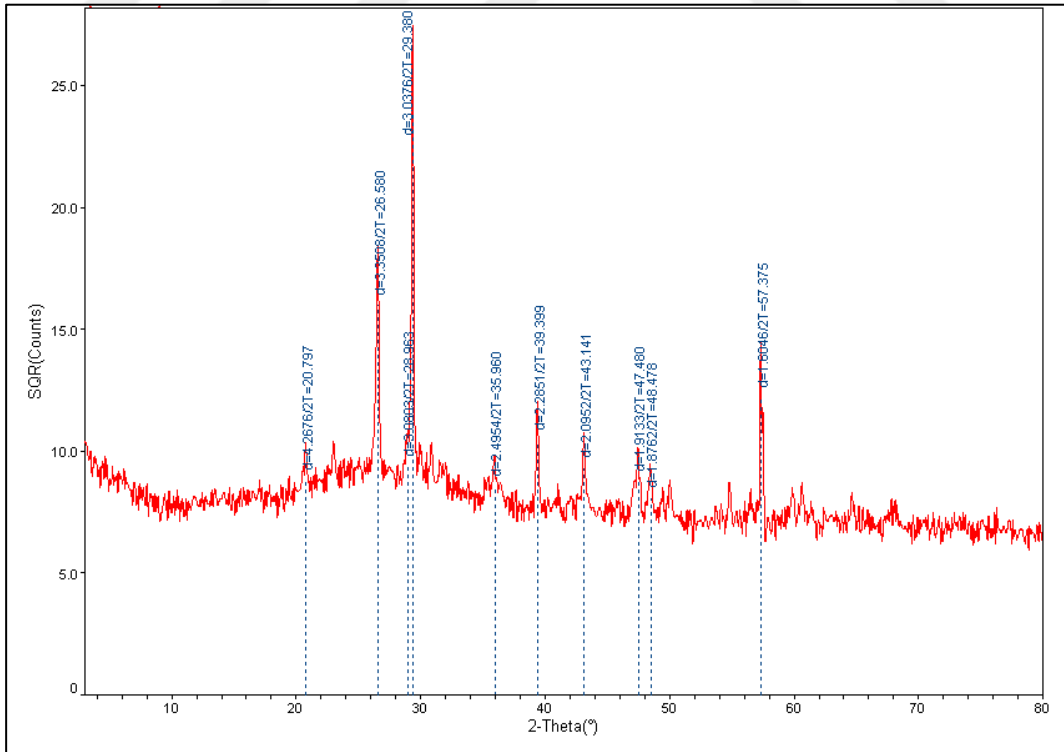
Şekil 4.45. SD-10/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



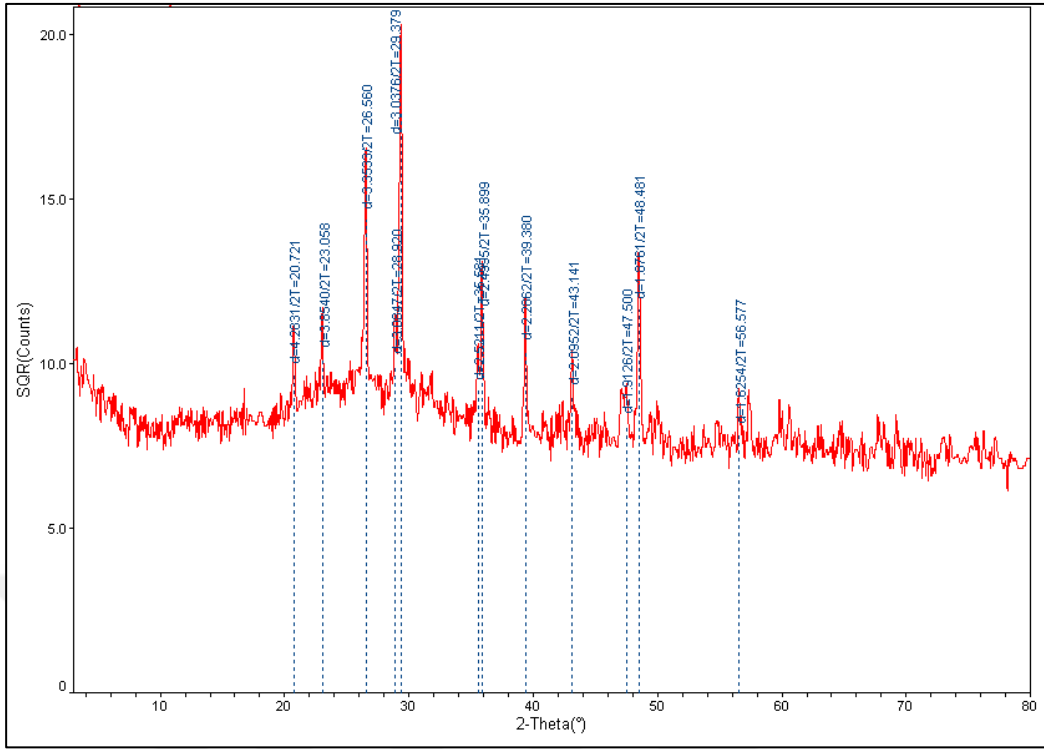
Şekil 4.46. SD-0/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



Şekil 4.47. SD-10/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



Şekil 4.48. SD-0/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi



Şekil 4.49. SD-10/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin XRD spektroskopisi

Grafiklerde görülen XRD paterni, geopolimer harcın oluşumunu ve kristal fazlarını göstermektedir. Yoğun ve belirgin pikler, yüksek kristallik derecesine işaret eder. Geopolimerizasyonun ana kristalleri kuvars, mullit, hematit, magnetit ve anorthit olarak tespit edilmiştir [94]. Sonuçlardaki kristal yapılar kullanılan yüksek uçucu kül miktarının değişimine bağlı olarak SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerini içermektedir. Amorf yapıda olan bu oksitler genel olarak puzolanik aktiviteye neden olurlar. Uçucu küldeki alüminyum ve silisyum oksitleri, kalsiyum hidroksit ile birleşerek suda daha az çözünen ve puzolanik aktiviteye sahip yeni bileşikler (CSH ve CAH) oluştururlar [95]. Tepe yoğunluklarındaki değişim ise, fazların kristalleşmesini ifade eder.

Geopolimer harç numunelerinin piklerinde kuvars varlığı gözlemlenmiş ve tüm numunelerde 26° - 30° arasında 2θ 'daki tipik amorf geopolimer jel fazına karşılık gelen geniş bant tespit edilmiştir. Tespit edilen sonuçların önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür [95]. Karışımların XRD kırınım grafiği tepe eğilimleri, hamur bileşenleri nedeniyle benzerdir. Bununla beraber, yapılan geopolimerizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen tepe noktalarının yoğunluğu, kullanılan hammaddelere göre değişiklik göstermektedir.

Karışımlarda uçucu külün varlığından kaynaklanan ana piklerin (kuvars, mullit ve hematit) yoğunluk değerleri, geopolimerizasyon reaksiyonunun artmasına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Kontrol geopolimer harç karışımlarında kuvars mineral pikleri, uçucu kül ve doğal kumların kristalin silika bileşeninden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, farklı karışımlarda reaksiyon ürünlerinin dağılım zirvelerinin konumu ve boyutunun benzer olması, silis dumanı içeren geopolimer harçta polimerizasyon ve reaksiyon veriminin nispeten aynı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, uçucu kül yerine kısmi bir ikame olarak silis dumanının kullanılması, faz bileşimini niteliksel olarak değiştirmemiştir [96]. Sadece silis dumanının ikamesi ile kristal fazların yoğunluklarında küçük artışlar görülmüş ve amorf aralık küçük oranlarda kaymıştır. Uçucu kül ve %10 silis dumanlı karışımın olumlu etkileri, kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli, kalsiyum alüminosilikat hidrat (CASH) jeli ve sodyum alüminosilikat hidrat (NASH) jeli oluşumuna bağlanabilir.

Sonuç olarak; GGA'nın inceliğinin azalması, geopolimer hamurların kristallik fazlarını azaltarak ve amorf yapıyı arttırarak daha yüksek miktarda reaksiyon ürünü oluşumuna olanak sağlamıştır. Bu da basınç dayanımında iyileşme ile sonuçlanır. Bunun en muhtemel nedeni ise C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin oluşumu olduğunu göstermektedir [1]. Bu duruma örnek verilecek olursa, Şekil 4.48'te bulunan diyagramda SD-0/GGA1-60 kodlu karışımın kristal sayısı daha fazla iken Şekil 4.46'da bulunan diyagramda SD-0/GGA2-60 kodlu karışımın kristal faz sayısının nispeten azaldığı ve Şekil 4.44'de bulunan diyagramda SD-0/GGA4-60 kodlu karışımın kristal faz sayısının en düşük değerde olduğu olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde Şekil.49'de bulunan diyagramda SD-10/GGA1-60 kodlu karışımın kristal sayısı daha fazla iken Şekil 4.47'de bulunan diyagramda SD-10/GGA2-60 kodlu karışımın kristal faz sayısının nispeten azaldığı ve Şekil 4.45'de bulunan diyagramda SD-10/GGA4-60 kodlu karışımın kristal faz sayısının en düşük değerde olduğu olduğu gözlemlenmiştir.

Silis dumanının ikamesi ile geopolimer harçta kristal fazların yoğunluğu artmış fakat faz sayısında önemli bir değişiklik olmamıştır. Örnek olarak, Şekil 4.46'daki diyagrama göre SD-0/GGA2-60 kodlu karışımında, Şekil 4.47'deki diyagrama göre SD-10/GGA2-60 kodlu karışımında kristal fazların yoğunluğunun arttığı fakat sayısında önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular ve tartışmalara dayalı olarak, sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Geopolimer harçların yayılma çapları karışımlardaki GGA'nın ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile birlikte azalmıştır. Ayrıca S-0 ve S-10 seri karışımlar kıyaslandığında S-10 seri karışımların yayılma çaplarında azalma görülmüştür. Bunun sebebi gazbeton agrega tanelerinin daha boşluklu olması ile su emme kapasitesinin artması, gazbetonun inceliğinin artması da çok ince taneli olan silis dumanı gibi yüksek özgül yüzey alanı ile suyun daha çok kendisine bağlayarak akış değerlerini düşürmesidir.

- Geopolimer harçlardaki taze birim ağırlık GGA'nın ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile birlikte azalmıştır. Silis dumanının ikamesi ile ise taze birim ağırlık artmıştır. Bunun sebebi, gazbetonun özgül ağırlığının doğal kuma göre daha az olması ve daha hafif bir yapı malzemesi olmasıdır. Silis dumanın ise daha ince bir yapıda olması ile geopolimerizasyon için gerekli olan su miktarının artmasıdır.

- 28 günlük geopolimer harç karışımlarında basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı GGA'nın ikame seviyesinin artması ve incelik oranının artması ile birlikte azalmıştır. Silis dumanı ikameli geopolimer harçlarda ise nispeten daha iyi dayanım sonuçları ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi, gazbetonun daha boşluklu ve hafif bir yapı malzemesi olması, silis dumanı ikameli karışımda nispeten daha iyi dayanımların elde edilmesi ise silis dumanının ince tanelerinin agrega-geopolimer arasındaki ara yüzünü arttırarak harcın mikroyapısını iyileştirmesidir.

- SEM görüntülerinde, GGA'nın ikame seviyesi arttıkça geopolimer harçlardaki jel yapısı daha da azalmış, yapıdaki mikro çatlaklar ve boşluklar artmış ve harcın aderansı azalmıştır. GGA'nın inceliğinin artması ile üretilen geopolimer harçların SEM görüntülerinde de gözeneklerin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, karışımların silis dumanı

katkısı ile daha kompakt ve pürüzsüz bir yüzeyden oluştuğu görülmüştür. SEM görüntülerinde GGA'nın %60 seviyesindeki ikamesi ile agrega ve geopolimer bağlayıcı arasında neredeyse hiç bağ oluşmadığı görülmüştür. Bu nedenle, matris ile yeterli bağ oluşmadığı için gazbetonun geopolimerde çoğunlukla aktif olmadığı sonucuna varılmıştır. Gazbeton parçalarının geopolimer jel ile zayıf yapışması nedeniyle, sadece boşluk dolgu maddesi olarak işlev görmüştür, ancak harç matrisi homojenliğini önemli ölçüde etkilememiştir. SD-0/GGA0 ve SD-10/GGA0 kontrol karışımların SEM görüntüsü, GGA içeren diğer karışımların SEM görüntüsüne kıyasla daha kompakt ve homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

- EDX ve mapping analizi ile genel olarak, spektrumlar beklenen bir element dağılımını göstermiştir. Spektrumdaki ana elementler, belirli bir geopolimerizasyon reaksiyonunu gösteren ve ilgili sonuçlarla iyi bir korelasyon sağlayan Si ve Al olmuştur. EDX analizi, uçucu kül yüzeyindeki camsı tabakanın alkali aktivatör tarafından kırıldığını ve reaksiyona girmeyen uçucu kül parçacıklarının bir kısmının hala var olduğunu göstermiştir. Ayrıca GGA'nın ikame seviyesinin artması ile Ca elementinde azalma olması ile beraber Si elementinde artış gerçekleşmiştir. Böylece GGA'nın ikamesi ile CASH ve CSH jelleri azalmıştır. Aynı oranlardaki gazbetona karşılık silis dumanı ikamesi ise Si elementini arttırdığı için CSH jelleri artmıştır. Mapping analizi ile de Ca, Si ve Al elementlerinin harcın içindeki dağılımı görülmüştür.

- XRD analizi ile kontrol geopolimer harçların amorf silikat fazlarını içeren sağlam bir kristal yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu fazlar, geopolimer bağın mekanik ve dayanıklılık özelliklerine katkıda bulunmuştur. Fakat GGA'nın incelik oranının artması ile geopolimer harçta kristal fazlar artmıştır. Kristal fazların artışı da harcın matris kompaktlığı ile geopolimerizasyon bağını azaltmıştır. Silis dumanının ikamesi ile kristal fazların yoğunluğu artmasına rağmen kristal sayısı azalmış ve daha amorf yapılar oluşmuştur.

Bu alanda çalışma yapacak başka araştırmacılar için çalışma kapsamında geliştirilen otoklavlanmış gazbeton atığı agregası içeren geopolimer harçların hem üretilebilirliği hem de uygulanabilirliği adına yüksek sıcaklık etkisi ve FTIR analizi yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Shaikh FUA. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2016; 5 (2): 277-87
- [2] Das S, Saha P, Jena SP, Panda P. Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission–A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 60: 62-71
- [3] Almutairi AL, Tayeh BA, Adesina A, Isleem HF, Zeyad AM. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 15: e00733
- [4] Çelikten S, Sarıdemir M, Deneme İÖ. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*. 2019; 217: 50-61
- [5] Al Bakri MM, Mohammed H, Kamarudin H, Niza IK, Zarina Y. Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. *Journal of engineering and technology research*. 2011; 3 (1): 1-4
- [6] Bingöl Ş. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 2018.
- [7] Arslan AA. Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kür koşullarının etkisinin incelemesi: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
- [8] Qin L, Gao X. Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. *Waste management*. 2019; 89: 254-64
- [9] Gyurkó Z, Jankus B, Fenyvesi O, Nemes R. Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete. *Journal of cleaner production*. 2019; 230: 430-44
- [10] Zou D, Que Z, Cui W, Wang X, Guo Y, Zhang S. Feasibility of recycling autoclaved aerated concrete waste for partial sand replacement in mortar. *Journal of Building Engineering*. 2022; 52: 104481

- [11] Boyacı Ö. Farklı kaolenlerin metakaolen ve spinel yapılarda geopolimer davranışı: Fen Bilimleri Enstitüsü; 2018.
- [12] Erdoğan G, Çelikten S. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan perlit ve uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik ve mikroyapı özelliklerinin araştırılması: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi; 2022.
- [13] Topçu İB, Toprak MU. Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2009; 22 (2): 153-64
- [14] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis and calorimetry. 1991; 37 (8): 1633-56
- [15] Neupane K. Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolimer binder concrete. Cleaner Materials. 2022; 6: 100138
- [16] Mahmoodi O, Siad H, Lachemi M, Dadsetan S, Sahmaran M. Development of normal and very high strength geopolimer binders based on concrete waste at ambient environment. Journal of Cleaner Production. 2021; 279: 123436
- [17] Vickers L, Pan Z, Tao Z, Van Riessen A. In situ elevated temperature testing of fly ash based geopolimer composites. Materials. 2016; 9 (6): 445
- [18] Çelik A. Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri: Sakarya Üniversitesi; 2019.
- [19] Davidovits J. Geopolimer chemistry and applications: Geopolimer Institute; 2008.
- [20] Zeybek O. Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi: Anadolu University; 2009.
- [21] Davidovits J. Geopolimer chemistry and applications: Geopolimer Institute; 2008.
- [22] Kuranlı ÖF. Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2020.
- [23] Yıldız S. Endüstriyel Yan Ürünlerle Üretilmiş Geopolimer Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2023.

- [24] Rossow M. Fly ash facts for highway engineers. New York NY continuing education and development. 2003.
- [25] Elmas S. Termik Santral Külü ve Fritin Seramik Bünyede Birlikte Kullanımının Bazı Fiziksel Özelliklere ve Mikro yapıya Etkisi. 5. Uluslararası Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Kongresi Eskişehir. 2022.
- [26] Demir İ. Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. International Journal of Engineering Research and Development. 2009; 1 (2): 1-7
- [27] Hamalı Y. Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri. 2007.
- [28] Topcu IB, Sarıdemir M. Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic. Computational Materials Science. 2008; 41 (3): 305-11
- [29] Arıöz E. Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, Ph Ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi: Anadolu University; 2015.
- [30] Yılmaz Y. Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi: Namık Kemal Üniversitesi; 2014.
- [31] Yılmaz Y. Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi: Namık Kemal Üniversitesi; 2014.
- [32] Chung D. Improving cement-based materials by using silica fume. Journal of materials science. 2002; 37: 673-82
- [33] King D, editor The effect of silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74, cementitious materials. 37th Conference on our world in concrete and structures, Singapore; 2012.
- [34] Pedro D, De Brito J, Evangelista L. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. Construction and Building Materials. 2017; 147: 803-14
- [35] Siddique R, Khan MI. Supplementary cementing materials: Springer Science & Business Media; 2011.
- [36] Erdoğan T. Concrete. Metu Pres, Ankara; 2003.

- [37] Ergün BS. Farklı lif ve mineral katkı içeren geopolimer kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2023.
- [38] Kaya M. Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi: Sakarya Üniversitesi; 2016.
- [39] Yalçın H, Gürü M. Çimento ve beton: Palme Yayıncılık; 2006.
- [40] Hillerborg A. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete. *Materials and structures*. 1985; 18: 291-6
- [41] Yadollahi MM, Varolgüneş S, İşsever F. Na₂O, silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*. 2017; 6 (2): 26-31
- [42] Çelikten S, Atabey İİ. Su içeriği ve ısı kütür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2021; 10 (1): 328-32
- [43] Altındal İ. Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kütür koşulları altında basınç dayanımının değişimi: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2020.
- [44] Mo B-h, Zhu H, Cui X-m, He Y, Gong S-y. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*. 2014; 99: 144-8
- [45] Khaleel Rashid R. Uçucu küllü geopolimer betonlarda gecikmiş ısı kütürünün dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi: İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü; 2021.
- [46] Rangan BV, Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw D, editors. *Studies on fly ash-based geopolymer concrete*. Proceedings of the world congress geopolymer, Saint Quentin, France; 2005.
- [47] He J, Jie Y, Zhang J, Yu Y, Zhang G. Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*. 2013; 37: 108-18
- [48] Can İ. Hafif Geopolimer Betonların Yüksek Sıcaklık Direncinin Araştırılması: Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2023.

- [49] Xu L-Y, Qian L-P, Huang B-T, Dai J-G. Development of artificial one-part geopolymer lightweight aggregates by crushing technique. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 315: 128200
- [50] Görür EB. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi*. 2015.
- [51] Yıldız S. Endüstriyel Yan Ürünlerle Üretilmiş Geopolimer Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*; 2023.
- [52] Tuyan M, Boyacı Oc, Çakır Öa, Ramyar K. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik Ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması.
- [53] Sadik O, Du N, Kariuki V, Okello V, Bushlyar V. Current and emerging technologies for the characterization of nanomaterials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2014; 2 (7): 1707-16
- [54] Raval N, Maheshwari R, Kalyane D, Youngren-Ortiz SR, Chougule MB, Tekade RK. Importance of physicochemical characterization of nanoparticles in pharmaceutical product development. *Basic fundamentals of drug delivery: Elsevier*; 2019. p. 369-400.
- [55] Dudkiewicz A, Tiede K, Loeschner K, Jensen LHS, Jensen E, Wierzbicki R, et al. Characterization of nanomaterials in food by electron microscopy. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2011; 30 (1): 28-43
- [56] Mayeen A, Shaji LK, Nair AK, Kalarikkal N. Morphological characterization of nanomaterials. *Characterization of nanomaterials: Elsevier*; 2018. p. 335-64
- [57] Newbury DE, Ritchie NW. Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative? *Scanning*. 2013; 35 (3): 141-68
- [58] Yesilkir-Baydar S, Oztel ON, Cakir-Koc R, Candayan A. Evaluation techniques. *Nanobiomaterials Science, Development and Evaluation: Elsevier*; 2017. p. 211-32
- [59] Bunaciu AA, UdrişTioiu EG, Aboul-Enein HY. X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*. 2015; 45 (4): 289-99
- [60] Turhan Y. Kil/polivinil türevleri nanokompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu. 2010.

- [61] Javed U, Shaikh FUA, Sarker PK. Microstructural investigation of lithium slag geopolymer pastes containing silica fume and fly ash as additive chemical modifiers. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 134: 104736
- [62] Sivasakthi M, Jeyalakshmi R, Rajamane N, Jose R. Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018; 499: 117-30
- [63] Klima K, Schollbach K, Brouwers H, Yu Q. Thermal and fire resistance of Class F fly ash based geopolymers—A review. *Construction and Building Materials*. 2022; 323: 126529
- [64] Zhang H, Li L, Yuan C, Wang Q, Sarker PK, Shi X. Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2020; 262: 120924
- [65] Dutta D, Thokchom S, Ghosh P, Ghosh S. Effect of silica fume additions on porosity of fly ash geopolymers. *J Eng Appl Sci*. 2010; 5 (10): 74-9
- [66] Ryu GS, Lee YB, Koh KT, Chung YS. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*. 2013; 47: 409-18
- [67] Ahmari S, Ren X, Toufigh V, Zhang L. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2012; 35: 718-29
- [68] Eryılmaz K, Polat R, Turhan D, Karagöl F. Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2023; 13 (1): 419-31
- [69] Mesgari S, Akbarnezhad A, Xiao J. Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2020; 236: 117571
- [70] Arenas C, Luna-Galiano Y, Leiva C, Vilches L, Arroyo F, Villegas R, Fernández-Pereira C. Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. *Construction and Building Materials*. 2017; 134: 433-42
- [71] Kızılkaya N, Sarıcı De. Alüminyum Tozu Ve Su Oranının Gaz Betonun Fizikomekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi Investigation Of The Effect Of

Aluminium Powder And Water Ratio On Physicomechanical Properties Of Autoclaved Aerated Concrete.

[72] Bergmans J, Nielsen P, Snellings R, Broos K. Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation. *Construction and Building Materials*. 2016; 111: 9-14

[73] Karaaslan YK. Gazbeton yapı malzemesinin ısısal özelliklerinin mevcut standartlara göre deneysel olarak incelenmesi: Fen Bilimleri Enstitüsü; 2009.

[74] Liu Y, Leong BS, Hu Z-T, Yang E-H. Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*. 2017; 148: 140-7

[75] Suwan T, Wattanachai P. Properties and internal curing of concrete containing recycled autoclaved aerated lightweight concrete as aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017; 2017 (1): 2394641

[76] TGÜB. Türkiye Gazbeton Üreticileri Birliği Kurumsal Bilgi Broşürü. Erişim adresi:[http://tgub.org.tr/SF/608/TG%C3%9CB%20Kurumsal%20Bro%C5%9F%C3%BCr%20\(TR\).pdf](http://tgub.org.tr/SF/608/TG%C3%9CB%20Kurumsal%20Bro%C5%9F%C3%BCr%20(TR).pdf) . 2015.

[77] İMSAD. Türkiye İMSAD Yapı Sektörü Raporu 2020. Erişim Adresi: https://www.imsad.org/Uploads/Files/Turkiye_IMSAD_Yapi_Sektoru_Raporu_2020.pdf. 2021.

[78] İpekçi CA and Köse NN. Döngüsel Ekonomi Bağlamında Gazbetonun Sürdürülebilirliği. *Kent Akademisi*. 2021; 14 (4), 1007-1021

[79] Liu L, Ha J, Hashida T, Teramura S. Development of a CO2 solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste. *Journal of materials science letters*. 2001; 20: 1791-4

[80] Ünal O, Demir İ, Güçlüer K, Aker A, Başpınar S. Uçucu kül ve silis dumanının gazbeton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Beton 2011 Hazır Beton Kongresi Bildiriler Kitabı*. 2011: 439-48

[81] Gülmez N. Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi. 2018.

[82] Türk Standardları Enstitüsü. TS EN 933-1:2012(EN): Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü. 2012.

- [83] ASTM C230/230M-20. "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA. 2020.
- [84] Lazorenko G, Kasprzhitskii A, Fini EH. Polyethylene terephthalate (PET) waste plastic as natural aggregate replacement in geopolymer mortar production. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 375: 134083
- [85] İpek S. Macro and micro characteristics of eco-friendly fly ash-based geopolymer composites made of different types of recycled sand. *Journal of Building Engineering*. 2022; 52: 104431
- [86] ASTM C138/C138M-17a. "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA. 2018.
- [87] ASTM C109/C109M-20b. "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)", ASTM International. 2020.
- [88] Toregaliyev B. Geopolimer harçlarda öğütülmüş bazik pomza ve siliz dumanının bağlayıcı olarak kullanılmasının incelenmesi. 2022.
- [89] Huseien GF, Sam ARM, Mirza J, Tahir MM, Asaad MA, Ismail M, Shah KW. Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*. 2018; 187: 307-17
- [90] Kankia MU, Baloo L, Mohammed BS, Hassan SB, Haruna S, Danlami N, et al. Effects of petroleum sludge ash in fly ash-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*. 2021; 272: 121939
- [91] Song H, Wei L, Ji Y, Cao L, Cheng F. Heavy metal fixing and heat resistance abilities of coal fly ash-waste glass based geopolymers by hydrothermal hot pressing. *Advanced Powder Technology*. 2018; 29(6): 1487-92
- [92] Tho-In T, Sata V, Boonserm K, Chindaprasirt P. Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of cleaner production*. 2018; 172: 2892-8
- [93] Manikandan P, Vasugi V. Potential utilization of waste glass powder as a precursor material in synthesizing ecofriendly ternary blended geopolymer matrix. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 355: 131860

[94] Ekmen Ş. Uçucu Kül Esaslı Hafif Geopolimer Harçların Taze ve Sertleşmiş Özelliklerinin İncelenmesi, Modellenmesi ve Optimizasyonu. 2021.

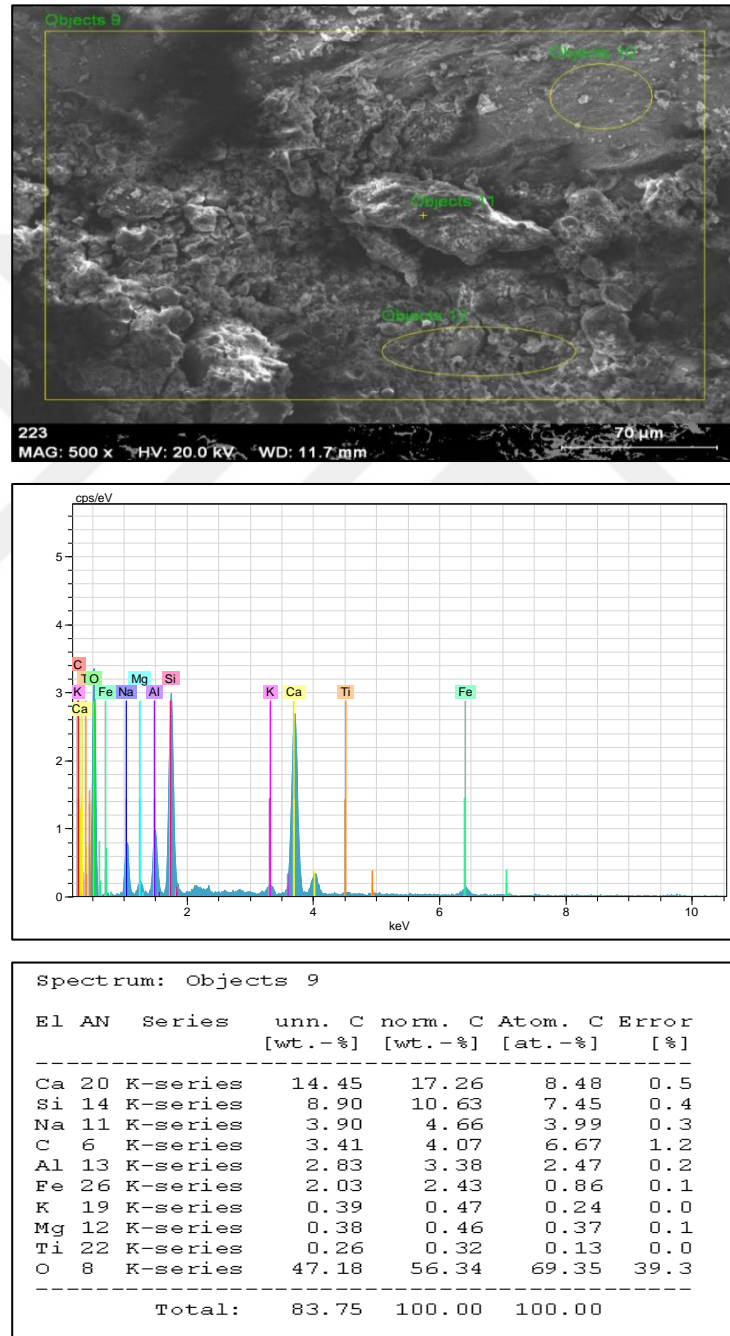
[95] Aygörmez Y. Kolemanit atığı ve silis dumanı katkıli metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Yıldız Technical Graduate School of Natural and Applied Sciences [Turkish]. 2018.

[96] Gill P, Rathanasalam VS, Jangra P, Pham TM, Ashish DK. Mechanical and microstructural properties of fly ash-based engineered geopolymer mortar incorporating waste marble powder. Energy, Ecology and Environment. 2024; 9 (2): 159-74.

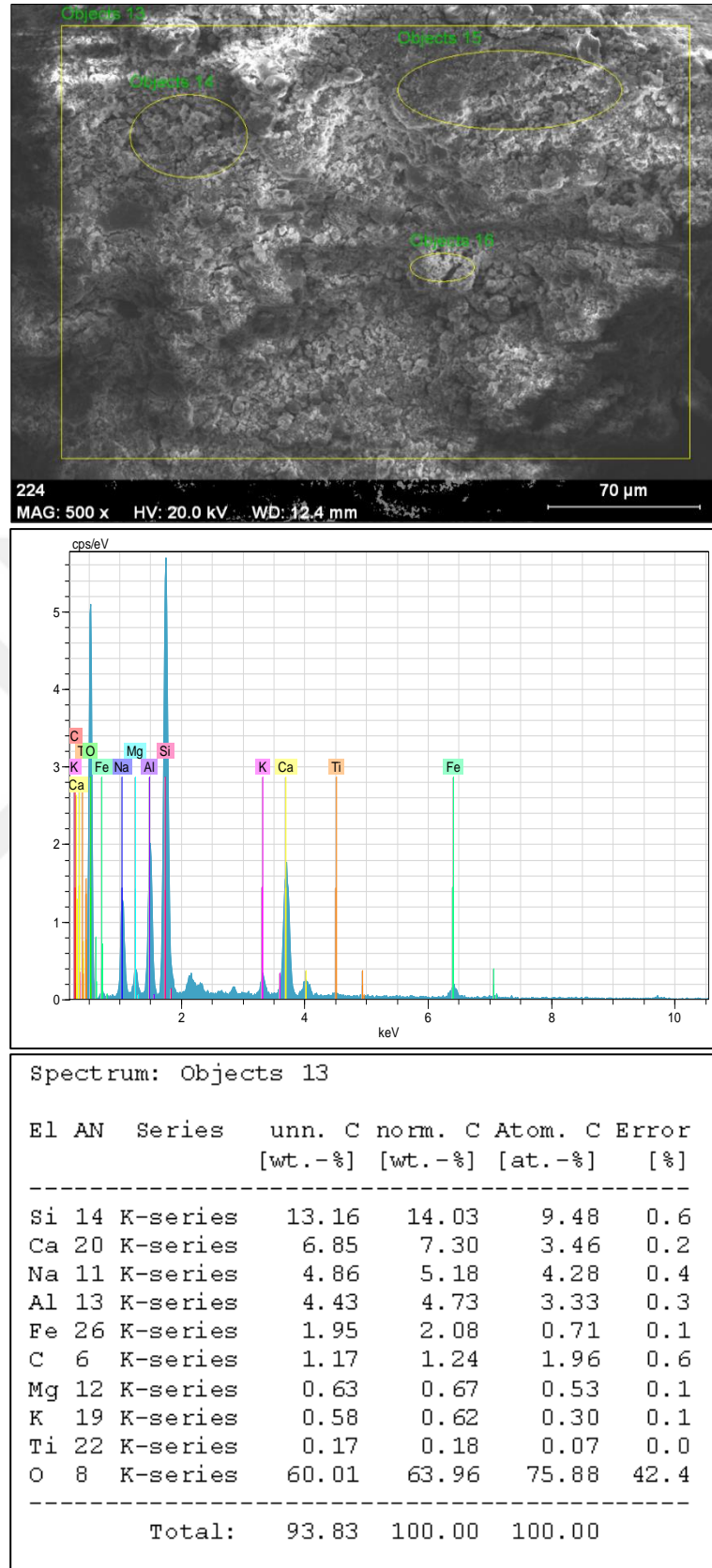


EKLER

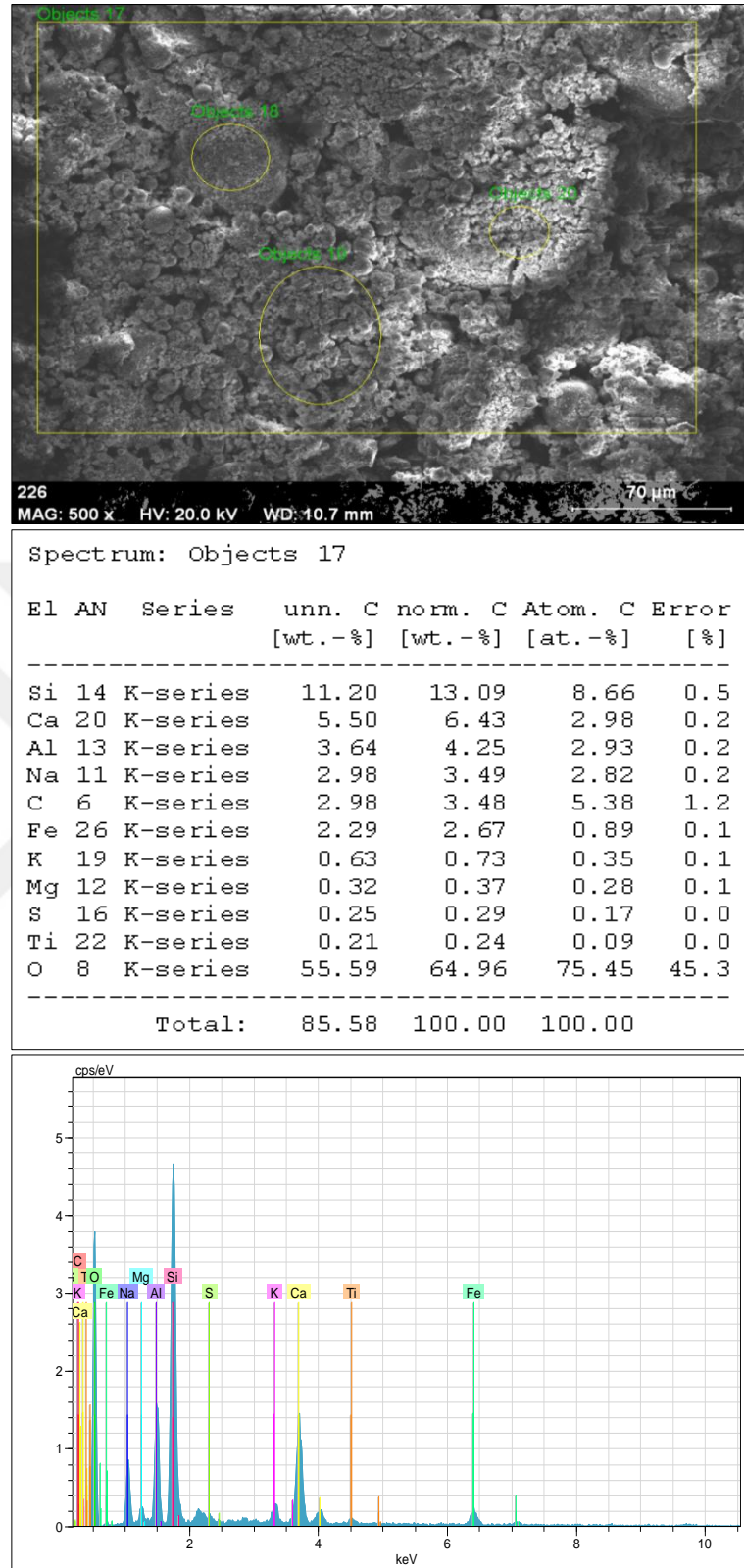
Ek 1: EDX analiz sonuçları



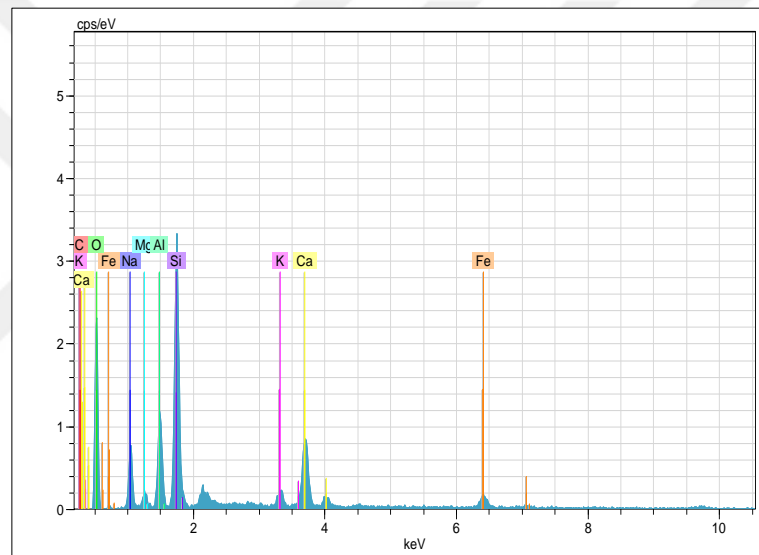
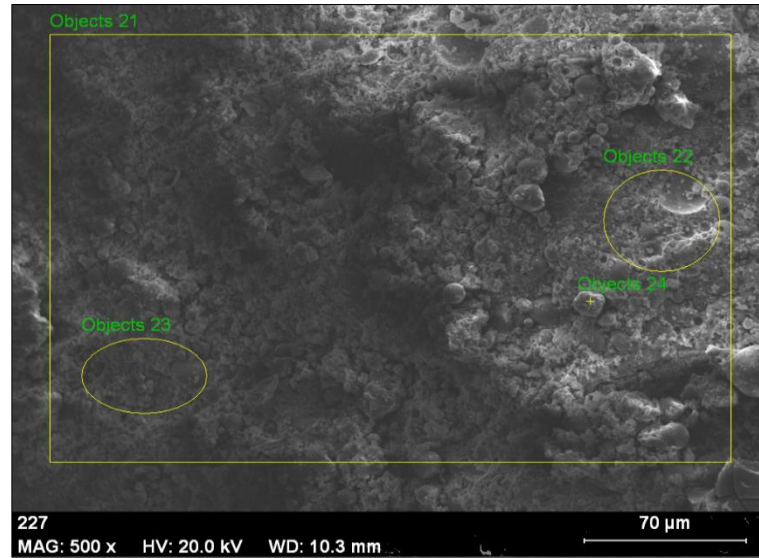
Şekil 1.1. SD-0/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 9 kesitinin EDX analizi



Şekil 2.2. SD-0/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin obje 13 kesitinin EDX analizi



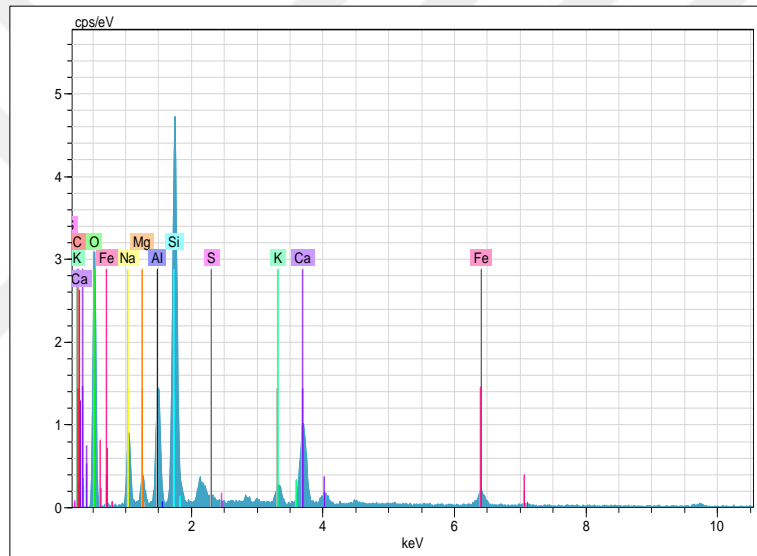
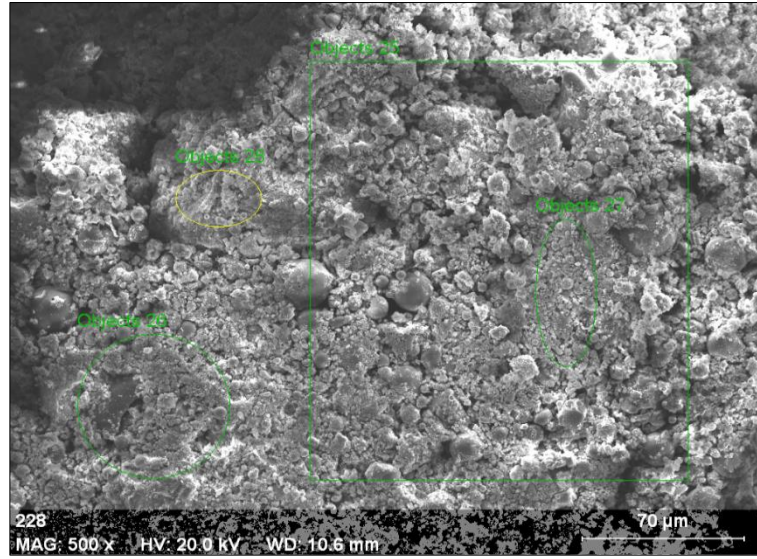
Şekil 1.3. SD-0/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin obje 17 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 21

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	9.03	11.77	7.80	0.4
Ca	20	K-series	4.14	5.39	2.50	0.2
Na	11	K-series	3.25	4.23	3.42	0.3
Al	13	K-series	3.24	4.23	2.91	0.2
Fe	26	K-series	2.61	3.40	1.13	0.1
C	6	K-series	0.85	1.11	1.72	0.8
K	19	K-series	0.61	0.79	0.38	0.1
Mg	12	K-series	0.37	0.48	0.37	0.1
O	8	K-series	52.64	68.60	79.76	8.1
Total:			76.75	100.00	100.00	

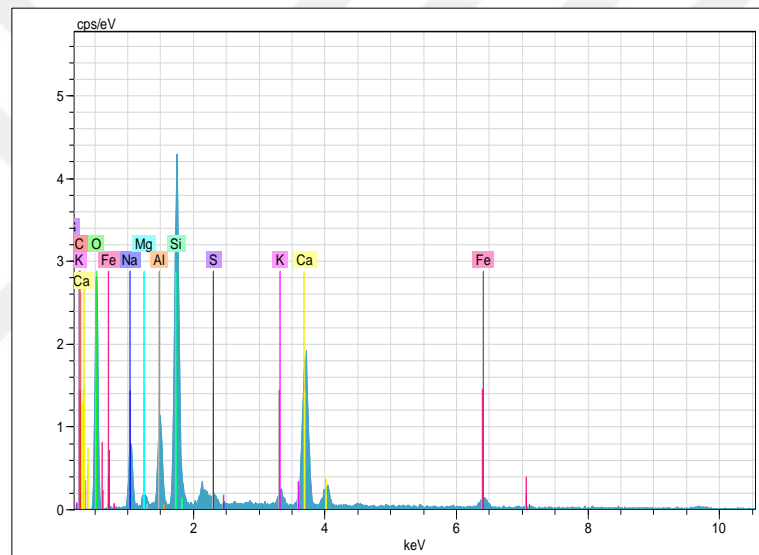
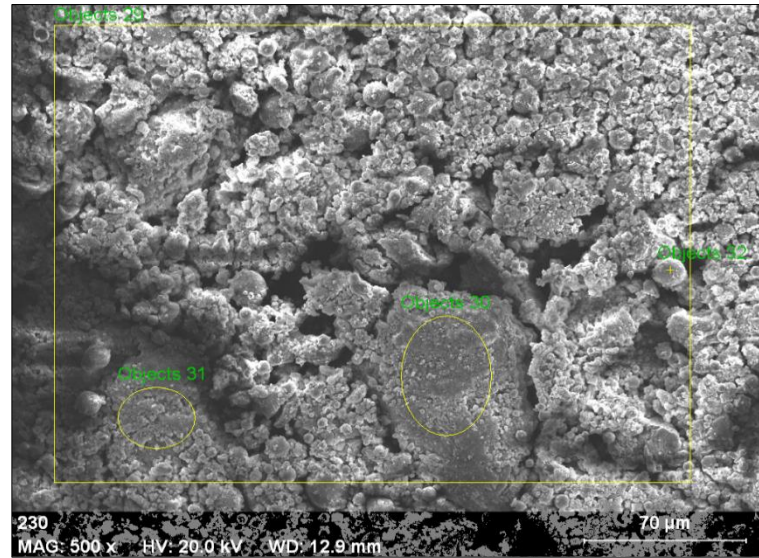
Şekil 1.4. SD-0/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 21 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 25

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	10.10	12.80	8.35	0.5
Ca	20	K-series	3.84	4.87	2.23	0.2
C	6	K-series	3.70	4.68	7.14	1.5
Al	13	K-series	3.14	3.98	2.70	0.2
Na	11	K-series	3.02	3.82	3.04	0.2
Fe	26	K-series	2.23	2.83	0.93	0.1
Mg	12	K-series	0.63	0.80	0.60	0.1
K	19	K-series	0.52	0.66	0.31	0.1
S	16	K-series	0.45	0.57	0.33	0.1
O	8	K-series	51.30	64.99	74.38	7.5
Total:			78.93	100.00	100.00	

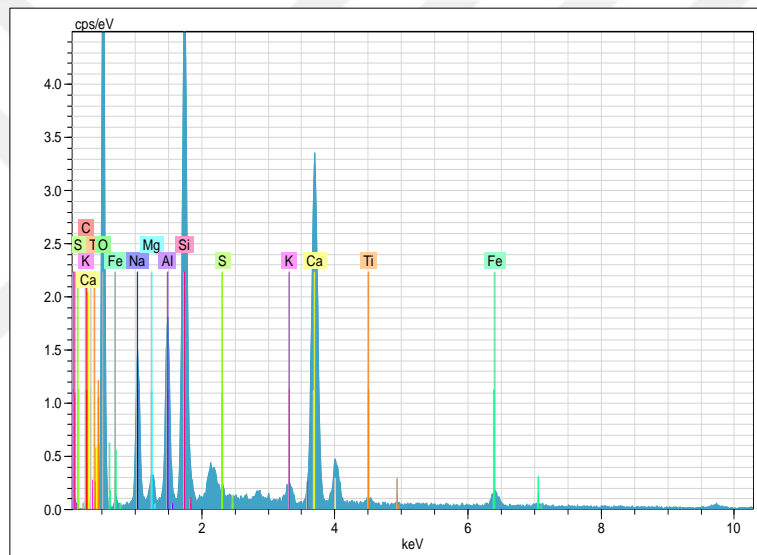
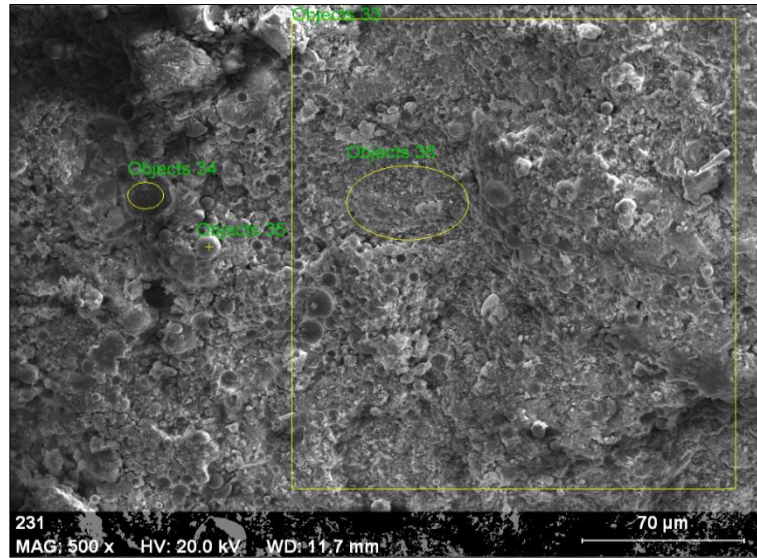
Şekil 1.5. SD-0/GGA2-40 kodlu karışma ait numunenin obje 25 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 29

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	9.56	11.98	7.99	0.4
Ca	20	K-series	7.69	9.63	4.50	0.3
Na	11	K-series	2.94	3.68	3.00	0.2
Al	13	K-series	2.45	3.06	2.13	0.2
C	6	K-series	1.96	2.45	3.82	1.1
Fe	26	K-series	1.62	2.02	0.68	0.1
S	16	K-series	0.47	0.59	0.34	0.1
K	19	K-series	0.44	0.56	0.27	0.1
Mg	12	K-series	0.15	0.19	0.15	0.0
O	8	K-series	52.56	65.83	77.11	7.8
Total:			79.83	100.00	100.00	

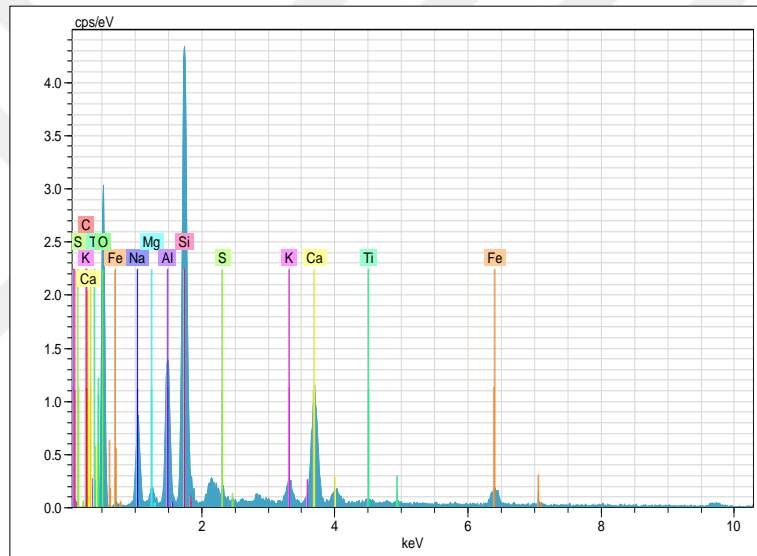
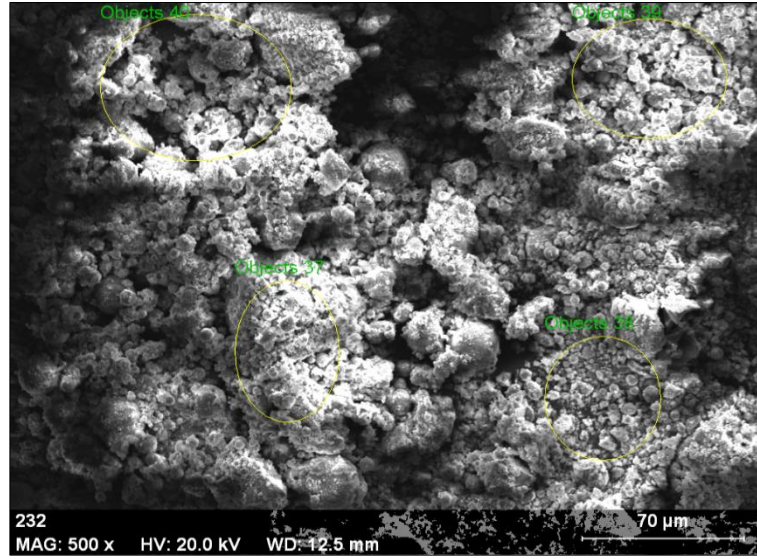
Şekil 1.6. SD-0/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin obje 29 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 33

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ca	20	K-series	12.88	14.73	7.32	0.4
Si	14	K-series	11.12	12.73	9.02	0.5
Na	11	K-series	5.24	6.00	5.20	0.4
Al	13	K-series	3.82	4.37	3.23	0.2
C	6	K-series	2.57	2.94	4.88	0.9
Fe	26	K-series	1.80	2.06	0.73	0.1
S	16	K-series	0.90	1.03	0.64	0.1
Mg	12	K-series	0.52	0.59	0.48	0.1
K	19	K-series	0.45	0.52	0.26	0.0
Ti	22	K-series	0.26	0.30	0.12	0.0
O	8	K-series	47.83	54.73	68.11	33.3
Total:			87.38	100.00	100.00	

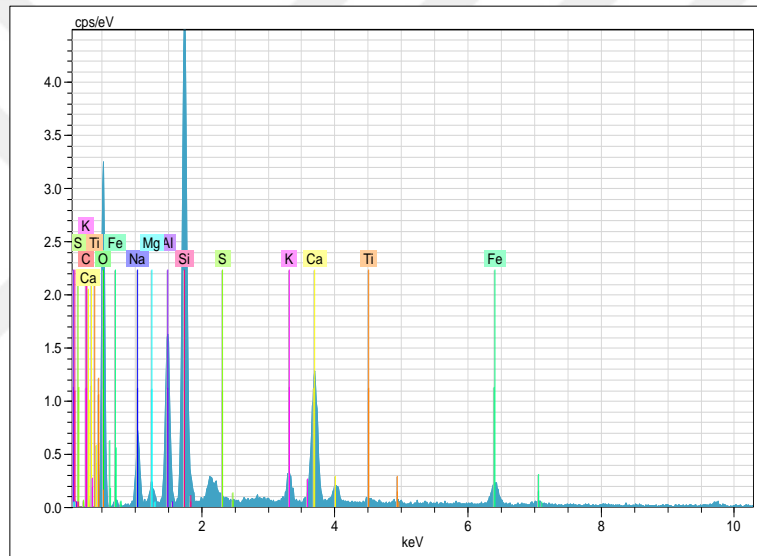
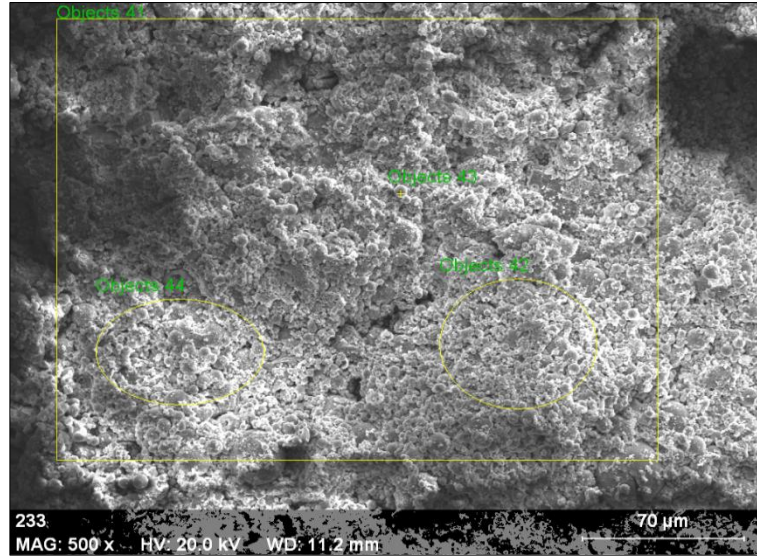
Şekil 1.7. SD-0/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 33 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 37

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	10.78	13.46	8.95	0.5
Ca	20	K-series	4.57	5.70	2.66	0.2
Al	13	K-series	3.29	4.11	2.84	0.2
Na	11	K-series	3.12	3.90	3.16	0.3
Fe	26	K-series	2.17	2.71	0.91	0.1
C	6	K-series	1.54	1.92	2.98	0.9
K	19	K-series	0.56	0.70	0.33	0.1
S	16	K-series	0.41	0.52	0.30	0.1
Ti	22	K-series	0.22	0.28	0.11	0.0
Mg	12	K-series	0.14	0.17	0.13	0.0
O	8	K-series	53.25	66.53	77.63	47.8
Total:			80.04	100.00	100.00	

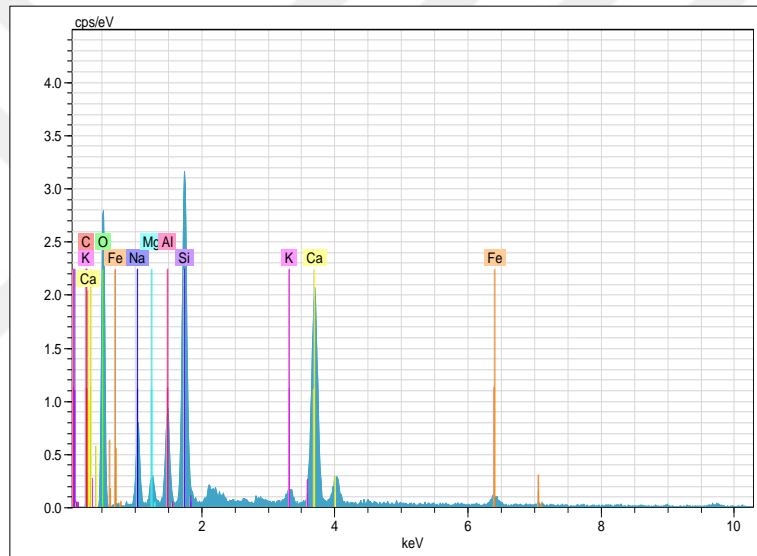
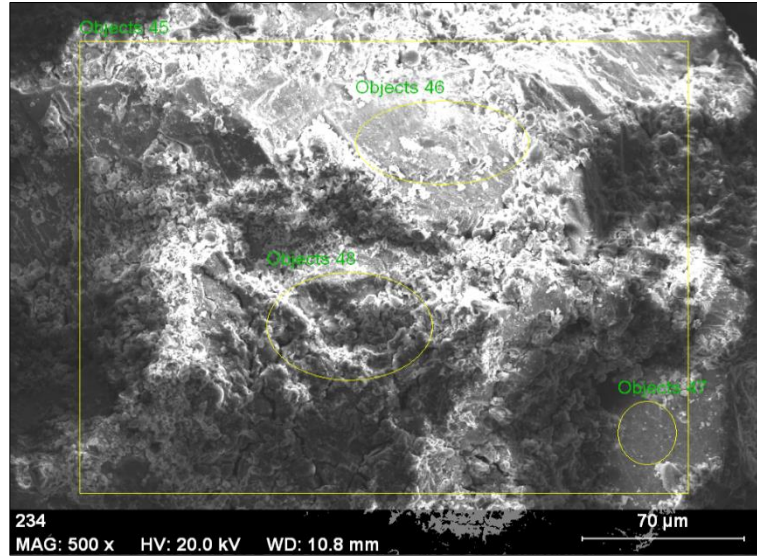
Şekil 1.8. SD-0/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin obje 37 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 41

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	9.99	12.44	8.12	0.5
Ca	20	K-series	4.60	5.73	2.62	0.2
C	6	K-series	4.51	5.61	8.57	1.7
Al	13	K-series	3.42	4.26	2.89	0.2
Fe	26	K-series	2.63	3.28	1.07	0.1
Na	11	K-series	2.14	2.66	2.12	0.2
K	19	K-series	0.62	0.77	0.36	0.1
S	16	K-series	0.33	0.42	0.24	0.0
Ti	22	K-series	0.21	0.26	0.10	0.0
Mg	12	K-series	0.17	0.21	0.16	0.0
O	8	K-series	51.69	64.37	73.75	45.2
Total:			80.31	100.00	100.00	

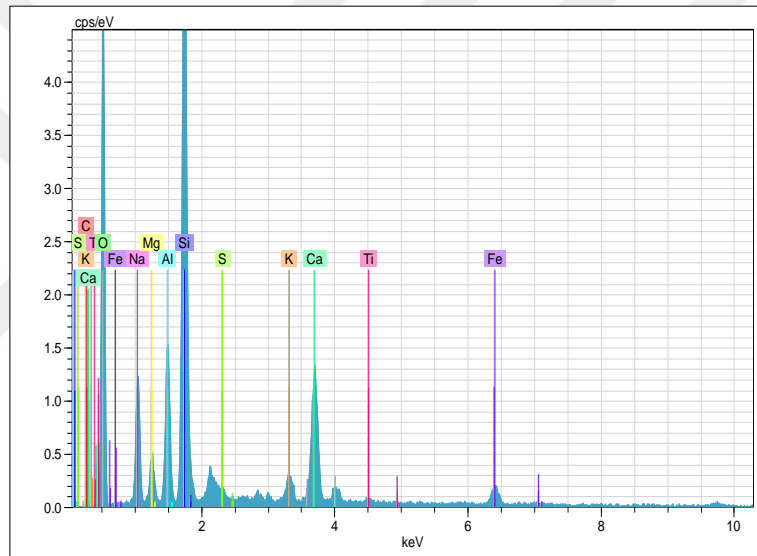
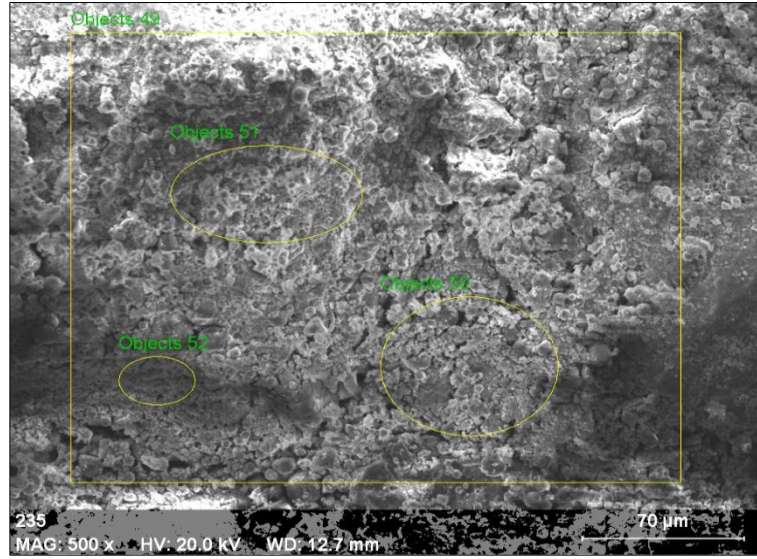
Şekil 1.9. SD-0/GGA1-60 kodlu karışma ait numunenin obje 41 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 45

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ca	20	K-series	10.98	14.23	6.88	0.4
Si	14	K-series	9.35	12.12	8.37	0.4
Na	11	K-series	3.39	4.39	3.70	0.3
C	6	K-series	2.63	3.41	5.51	1.1
Al	13	K-series	2.40	3.11	2.23	0.2
Fe	26	K-series	1.71	2.21	0.77	0.1
Mg	12	K-series	0.71	0.92	0.74	0.1
K	19	K-series	0.42	0.55	0.27	0.1
O	8	K-series	45.54	59.04	71.53	6.7
Total:			77.14	100.00	100.00	

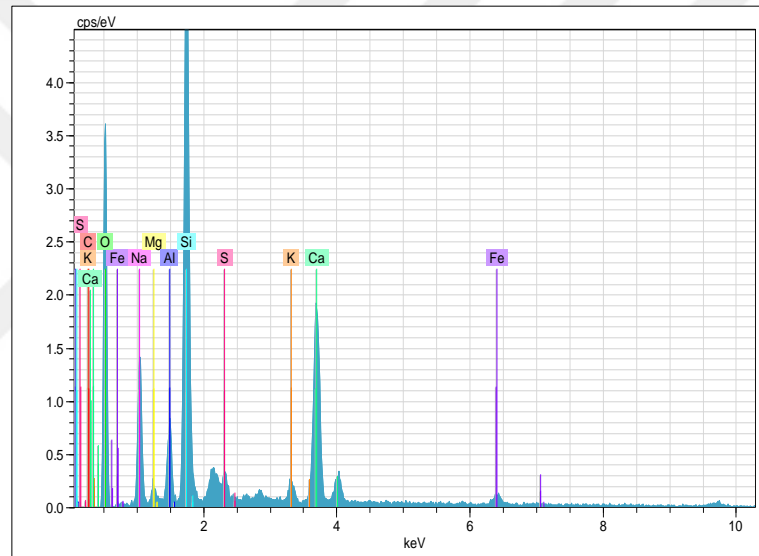
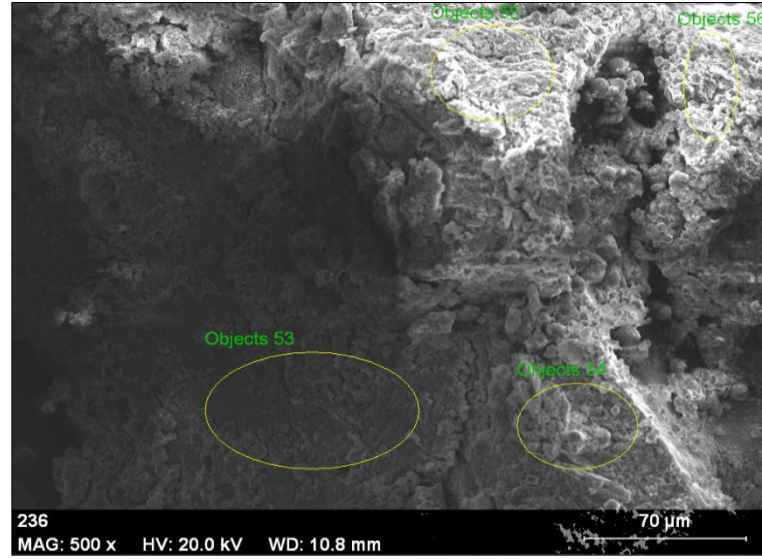
Şekil 1.10. SD-10/GGA4-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 45 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 49

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	13.16	14.78	9.87	0.6
Ca	20	K-series	4.89	5.49	2.57	0.2
Na	11	K-series	4.35	4.88	3.98	0.3
Al	13	K-series	3.15	3.54	2.46	0.2
C	6	K-series	2.27	2.55	3.98	1.0
Fe	26	K-series	2.11	2.37	0.80	0.1
Mg	12	K-series	0.95	1.06	0.82	0.1
K	19	K-series	0.71	0.80	0.38	0.1
S	16	K-series	0.60	0.67	0.39	0.1
Ti	22	K-series	0.14	0.15	0.06	0.0
O	8	K-series	56.76	63.72	74.70	42.3
Total:			89.08	100.00	100.00	

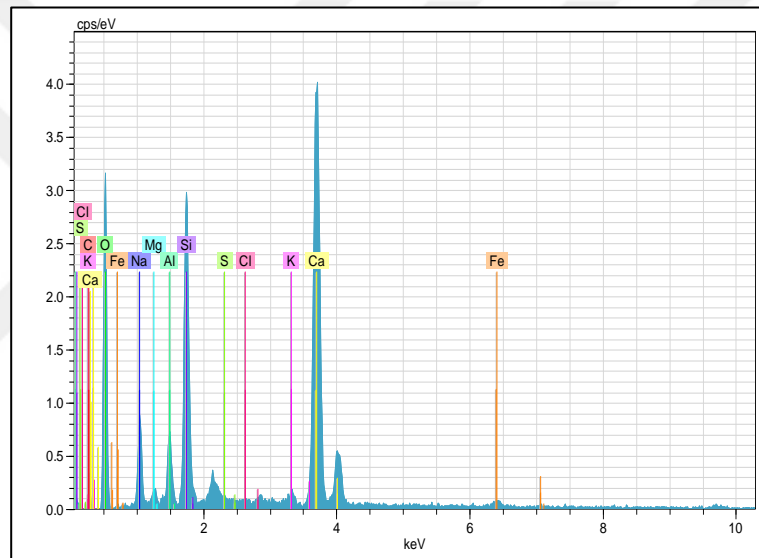
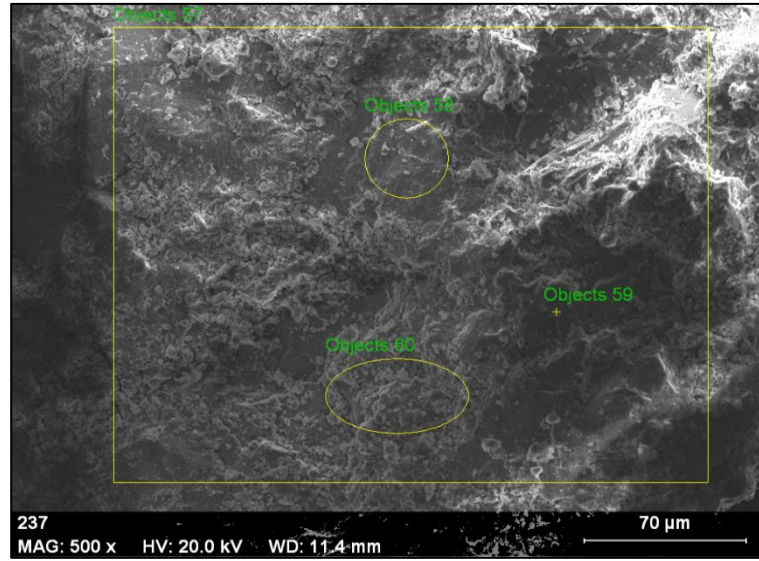
Şekil 1.11. SD-10/GGA4-40 kodlu karışıma ait numunenin obje 49 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 53

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	12.53	14.69	10.03	0.6
Ca	20	K-series	7.81	9.16	4.38	0.3
Na	11	K-series	5.22	6.12	5.10	0.4
Al	13	K-series	1.46	1.71	1.22	0.1
Fe	26	K-series	1.38	1.62	0.55	0.1
S	16	K-series	1.12	1.32	0.79	0.1
K	19	K-series	0.49	0.57	0.28	0.1
C	6	K-series	0.23	0.27	0.43	0.3
Mg	12	K-series	0.17	0.20	0.16	0.0
O	8	K-series	54.89	64.34	77.07	7.9
Total:			85.31	100.00	100.00	

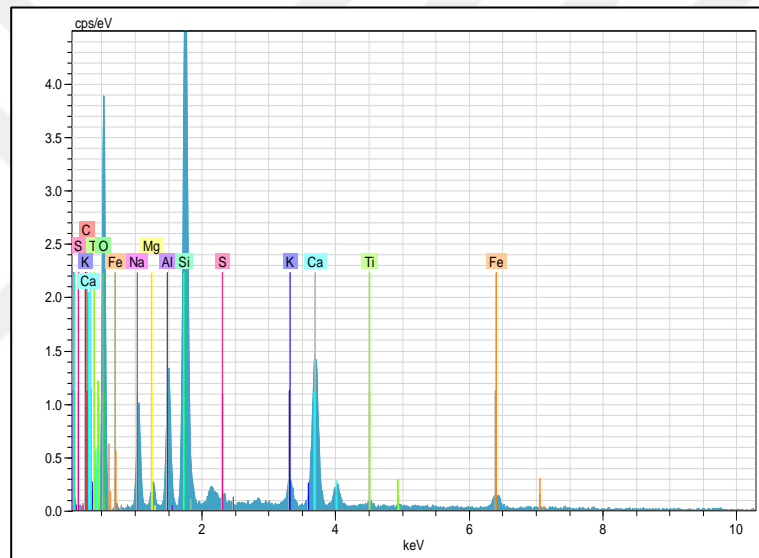
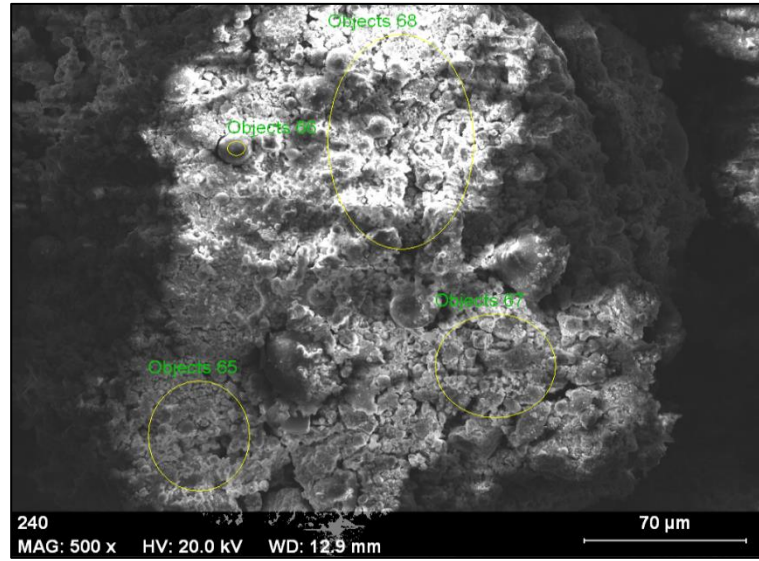
Şekil 1.12. SD-10/GGA4-60 kodlu karışıma ait numunenin obje 53 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 57

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ca	20	K-series	19.77	24.31	12.29	0.6
Si	14	K-series	7.54	9.26	6.68	0.4
Na	11	K-series	3.52	4.33	3.82	0.3
C	6	K-series	2.65	3.26	5.50	1.3
Al	13	K-series	1.49	1.84	1.38	0.1
Fe	26	K-series	1.06	1.30	0.47	0.1
S	16	K-series	0.38	0.47	0.30	0.0
K	19	K-series	0.23	0.28	0.15	0.0
Mg	12	K-series	0.20	0.24	0.20	0.0
Cl	17	K-series	0.06	0.07	0.04	0.0
O	8	K-series	44.44	54.63	69.17	6.5
Total:			81.35	100.00	100.00	

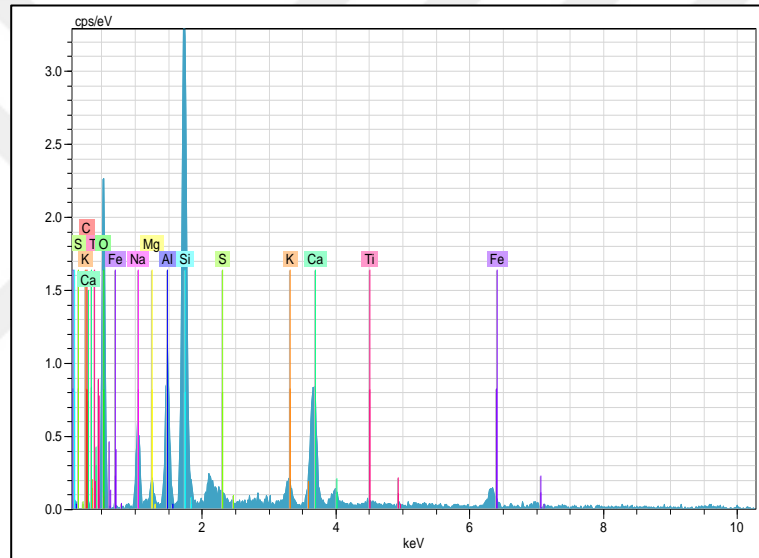
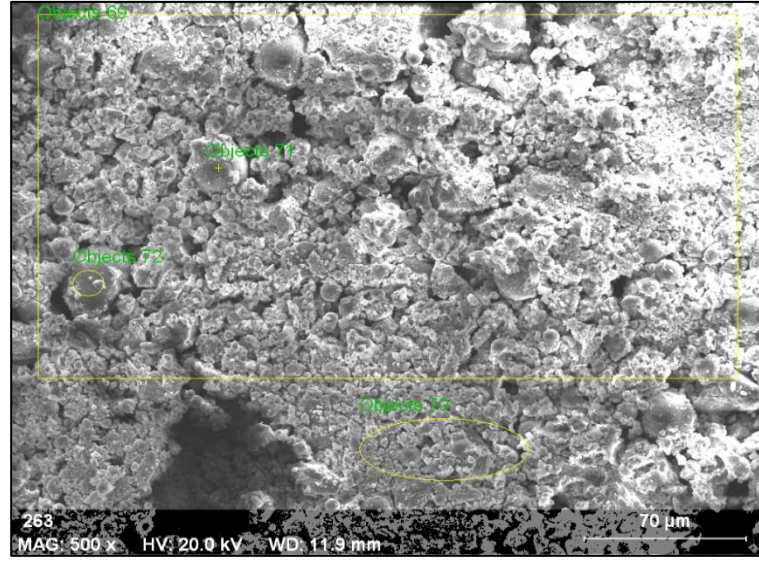
Şekil 1.13. SD-10/GGA2-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 57 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 65

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	11.91	13.99	9.31	0.5
Ca	20	K-series	5.83	6.85	3.20	0.2
Na	11	K-series	3.58	4.21	3.42	0.3
Al	13	K-series	2.76	3.24	2.25	0.2
Fe	26	K-series	1.71	2.01	0.67	0.1
C	6	K-series	1.59	1.87	2.91	0.9
K	19	K-series	0.59	0.69	0.33	0.1
Mg	12	K-series	0.35	0.41	0.32	0.1
S	16	K-series	0.29	0.34	0.20	0.0
Ti	22	K-series	0.17	0.20	0.08	0.0
O	8	K-series	56.35	66.17	77.31	46.2
Total:			85.15	100.00	100.00	

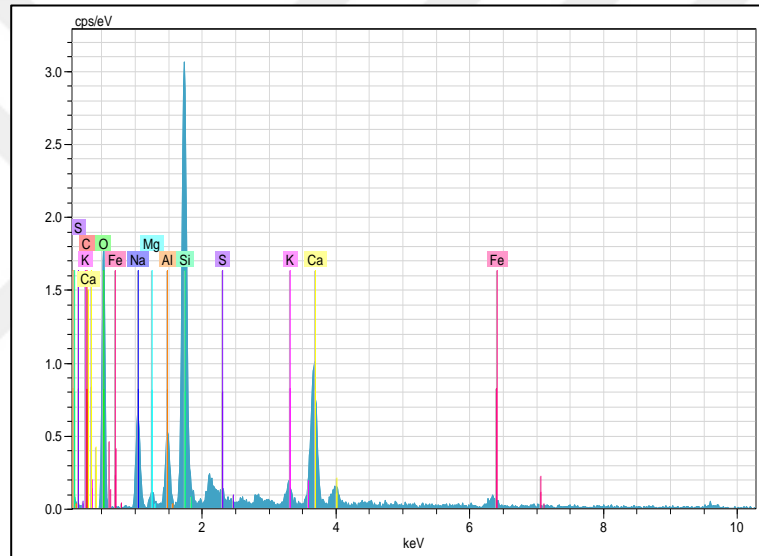
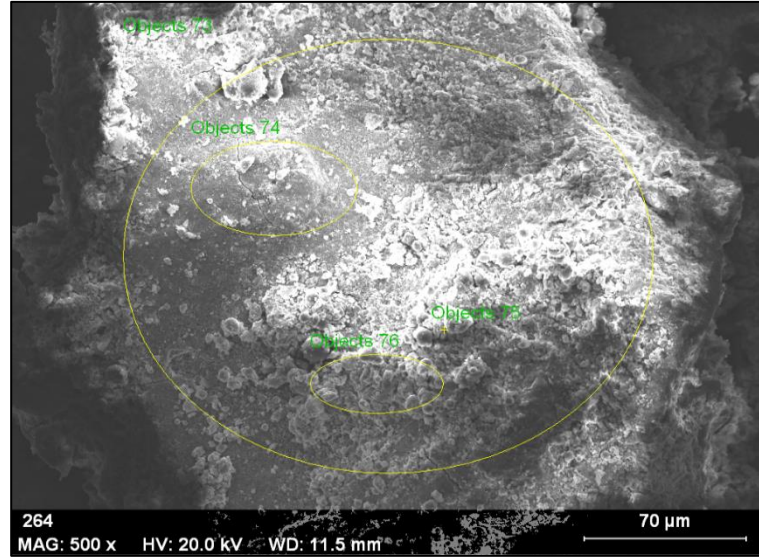
Şekil 1.14. SD-10/GGA2-40 kodlu karışıma ait numunenin obje 65 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 69

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	10.08	12.98	8.53	0.5
Ca	20	K-series	3.31	4.27	1.97	0.1
Al	13	K-series	2.63	3.39	2.32	0.2
Na	11	K-series	2.52	3.24	2.60	0.2
Fe	26	K-series	2.27	2.93	0.97	0.1
C	6	K-series	1.91	2.46	3.78	1.3
K	19	K-series	1.37	1.76	0.83	0.1
S	16	K-series	0.32	0.41	0.24	0.0
Mg	12	K-series	0.23	0.30	0.22	0.1
Ti	22	K-series	0.20	0.25	0.10	0.0
O	8	K-series	52.80	68.01	78.45	60.8
Total:			77.64	100.00	100.00	

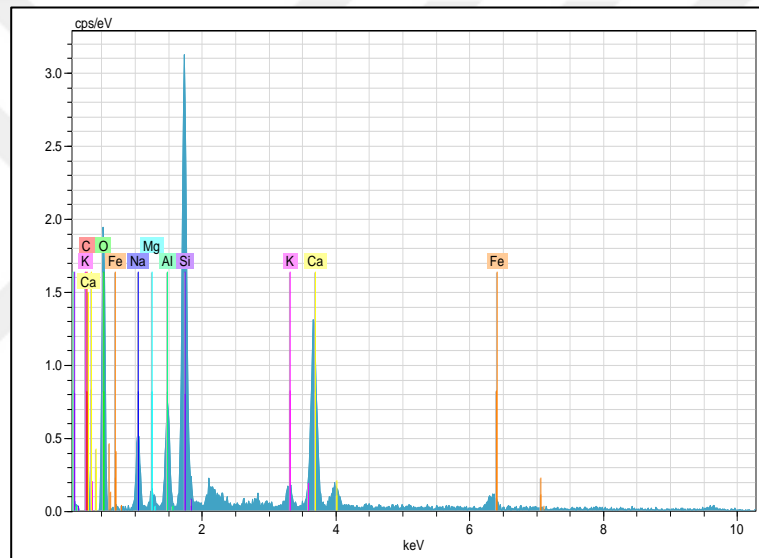
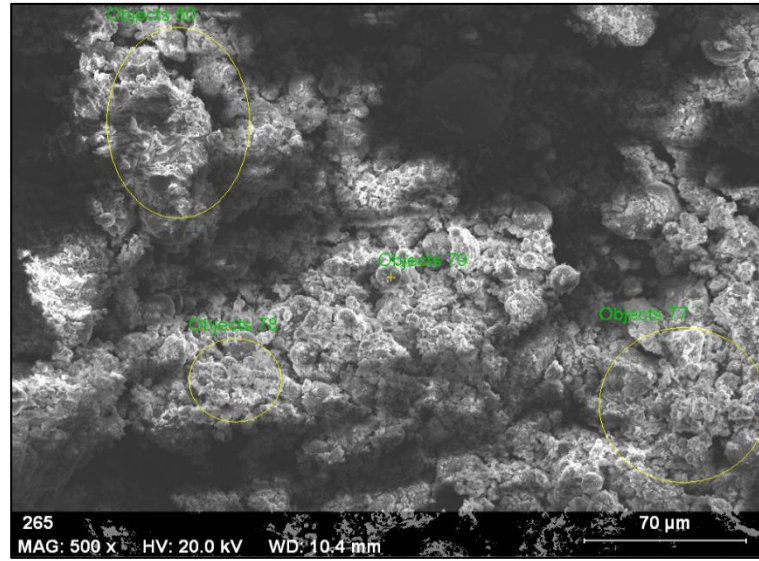
Şekil 1.15. SD-10/GGA2-60 kodlu karışıma ait numunenin obje 69 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 73

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	9.03	9.03	5.67	0.4
Ca	20	K-series	4.21	4.21	1.85	0.2
Na	11	K-series	3.43	3.43	2.63	0.3
Al	13	K-series	1.31	1.31	0.86	0.1
Fe	26	K-series	1.19	1.19	0.38	0.1
K	19	K-series	1.08	1.08	0.49	0.1
C	6	K-series	0.93	0.93	1.36	2.1
S	16	K-series	0.28	0.28	0.16	0.0
Mg	12	K-series	0.08	0.08	0.06	0.0
O	8	K-series	78.46	78.46	86.54	27.4
Total:			100.00	100.00	100.00	

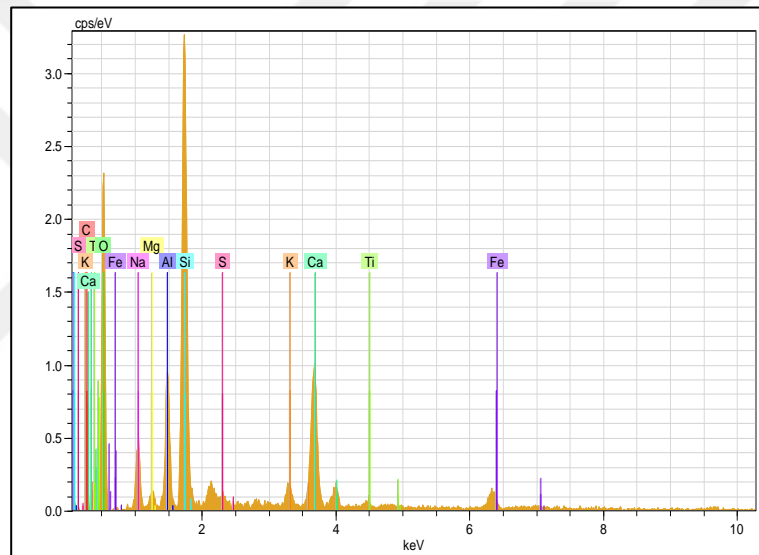
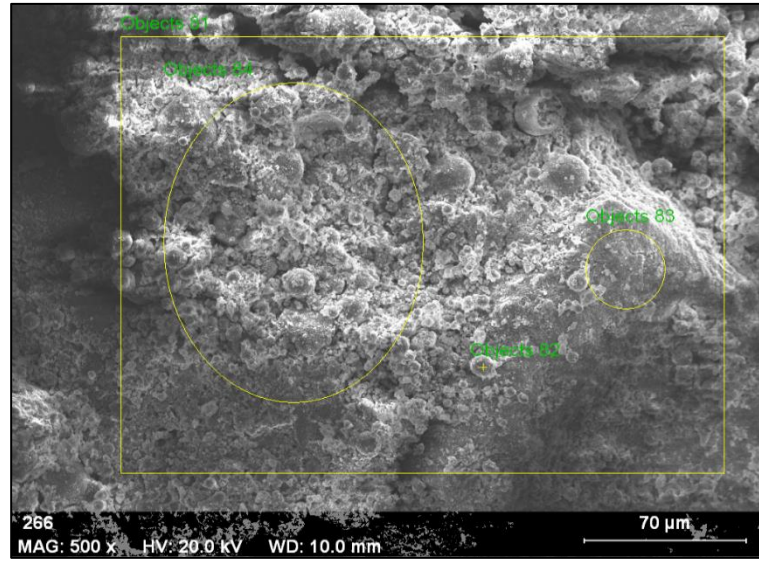
Şekil 1.16. SD-10/GGA1-20 kodlu karışıma ait numunenin obje 73 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 77

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	10.05	12.23	7.89	0.5
C	6	K-series	8.74	10.63	16.05	3.1
Ca	20	K-series	6.61	8.04	3.64	0.3
Na	11	K-series	2.74	3.34	2.63	0.2
Fe	26	K-series	2.34	2.85	0.92	0.1
Al	13	K-series	2.10	2.56	1.72	0.2
K	19	K-series	1.42	1.73	0.80	0.1
Mg	12	K-series	0.21	0.25	0.19	0.1
O	8	K-series	47.97	58.37	66.15	8.0
Total:			82.18	100.00	100.00	

Şekil 1.17. SD-10/GGA1-40 kodlu karışıma ait numunenin obje 77 kesitinin EDX analizi



Spectrum: Objects 84

El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Si	14	K-series	9.70	12.37	8.12	0.5
Ca	20	K-series	4.46	5.68	2.61	0.2
Al	13	K-series	2.51	3.20	2.18	0.2
Na	11	K-series	2.31	2.95	2.37	0.2
Fe	26	K-series	2.05	2.61	0.86	0.1
C	6	K-series	1.72	2.19	3.36	1.2
K	19	K-series	1.00	1.28	0.60	0.1
Ti	22	K-series	0.21	0.27	0.10	0.0
S	16	K-series	0.17	0.21	0.12	0.0
Mg	12	K-series	0.15	0.19	0.14	0.0
O	8	K-series	54.15	69.06	79.54	62.2
Total:			78.41	100.00	100.00	

Şekil 1.18. SD-10/GGA1-60 kodlu karışıma ait numunenin obje 84 kesitinin EDX analizi