

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK SICAKLIĞIN VE SOĞUTMA KOŞULLARININ
ATIK ANDEZİT TOZU ESASLI GEOPOLİMER
HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Mustafa SOLOĞLU**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek lisans Tezi**

**Ağustos 2023
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK SICAKLIĞIN VE SOĞUTMA KOŞULLARININ
ATIK ANDEZİT TOZU ESASLI GEOPOLİMER
HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Mustafa SOLOĞLU**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek lisans Tezi**

Ağustos 2023

Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN danışmanlığında Mustafa SOLOĞLU tarafından hazırlanan “Yüksek Sıcaklığın ve Soğutma Koşullarının Atık Andezit Tozu Esaslı Geopolimer Harçlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

29/08/2023

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Üye : Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Üye: : Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

ONAY

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetin Kurulu// 2023 tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /..... / 2023
Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİDİRİM SAYFASI

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

Mustafa SOLOĞLU



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, aynı zamanda akademik kariyerindeki yoğunluğuna rağmen tezim için her türlü fedakârlığı yapan değerli danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN'e, laboratuvar çalışmalarımızda bizden desteğini esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e, eğitim hayatım boyunca her türlü desteği sağlayan, gösterdikleri özveriden dolayı AİLEME teşekkür ederim.

Bu çalışma Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından TEZ22F8 numaralı proje ile desteklenmiştir. Maddi desteği için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

YÜKSEK SICAKLIĞIN VE SOĞUTMA KOŞULLARININ ATIK ANDEZİT TOZU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa SOLOĞLU

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2023

ÖZET

Bu tez çalışmasında, andezit taşı kesim atığı sodyum silikat ile aktive edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Karışımlarda sodyum silikat içeriği atık andezit tozu ağırlığının %6'sı, %8'i ve %10'u kadar Na₂O içerecek şekilde belirlenmiştir. Üretilen karışımlar 60 °C, 75 °C ve 90 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta ve 8 saat ile 24 saat olmak üzere 2 farklı sürede ısı küre tabii tutulmuştur. Harç karışımlarında ısıya dayanıklılığı nedeniyle bazalt kumu kullanılmıştır. Harç karışımlarından elde edilen numuneler üzerinde 1, 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Harçların dayanım değerlerine Na₂O içeriğinin, ısı küre sıcaklığı ve süresinin etkileri irdelenmiştir. 8 saat ısı küre ile üretilen harç numuneleri 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de 1 saat bekletilen numuneler havada yavaş, havada hızlı ve suda olmak üzere 3 farklı soğuma koşuluna maruz bırakılmıştır. Soğuyan harçlar üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve yüksek sıcaklık ile soğuma koşullarının harçların dayanım değerleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, seçilen harçlar üzerinde XRD ve SEM/EDX analizleri yapılarak harçların içyapılarında meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Harçların su ile hızlı bir şekilde soğutulması harçların dayanım değerlerini belirgin bir şekilde düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atık andezit tozu, geopolimer, yüksek sıcaklık, soğutma koşulları,

Tez Danışman: Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN
Sayfa Adedi: 72 sayfa

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ELEVATED TEMPERATURES AND COOLING CONDITIONS ON THE WASTE ANDESITE DUST-BASED GEOPOLYMER MORTARS

(M. Sc. Thesis)

Mustafa SOLOĞLU

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOLL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2023

SUMMARY

In this thesis, mortar mixtures were manufactured by activating andesite stone cutting waste with sodium silicate. The sodium silicate content in the mixtures was determined to contain 6%, 8% and 10% Na₂O by weight of waste andesite dust. The produced mixtures were subjected to thermal curing at 3 different temperatures, 60 °C, 75 °C and 90 °C, and in 2 different periods, 8 hours and 24 hours. Basalt sand is used in mortar mixes due to its heat resistance. Flexural and compressive strength tests of 1, 28 and 56 days were carried out on the specimens obtained from the mortar mixtures. The effects of Na₂O content, thermal curing temperature and time on the strength values of the mortars were investigated. Mortar samples produced with 8 hours of thermal curing were exposed separately to 400 °C, 600 °C and 800 °C. The specimens, which were kept for 1 hour at 400 °C, 600 °C and 800 °C, were exposed to 3 different cooling conditions: slow in air, fast in air and in water. Flexural and compressive strength tests were carried out on the cooled mortars and the effects of high temperature and cooling conditions on the strength values of the mortars were evaluated. In addition, the changes in the microstructures of the mortars were investigated by performing XRD and SEM/EDX analyses on the selected mortars. Rapid cooling of the mortars with water significantly decreased the strength values of the mortars.

Keywords: Waste andesite dust, geopolymer, high temperature, cooling conditions.

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Number of Pages: 72 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
SUMMARY	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	3
ANDEZİT	3
2.1. ANDEZİTİN TANIMI.....	3
2.2. ATIK ANDEZİT TOZU	3
2.3. ATIK ANDEZİT TOZUNUN İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KULLANIMI ÜZERİNE YPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	4
3. BÖLÜM	7
GEOPOLİMER.....	7
3.1. GEOPOLİMERİN TANIMI.....	7
3.2. GEOPOLİMER ÜRETİMİNDE KULLANILAN ALÜMİNA SİLİKAT İÇERİKLİ MALZEMELER	7
3.3. GEOPOLİMER ÜRETİNDE KULLANILAN ALKALİ AKTİVATÖRLER.....	7
3.4. GEOPOLİMER ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	8
4. BÖLÜM	12
MATERYAL VE METOT	12
4.1. MATERAL.....	12
4.1.1. Atık andezit tozu	12
4.1.2. Kum	14
4.1.3. Sodyum silikat	15
4.1.4. Su.....	15

4.2. METOT	16
4.2.1. Eğilme dayanımı deneyi	19
4.2.2. Basınç dayanımı deneyi.....	20
4.2.3. Yüksek sıcaklık deneyi	21
4.2.4. SEM/EDX analizleri.....	22
4.2.5. XRD analizleri.....	22
5. BÖLÜM	23
BULGULAR VE TARTIŞMA	23
5.1. EĞİLME DAYANIMI DENEY SONUÇLARI	23
5.1.1. Harçların eğilme dayanımlarına Na_2O İçeriğinin Etkisi.....	24
5.1.2. Harçların eğilme dayanımlarına ısı kütür süresinin etkisi	25
5.1.3. Harçların eğilme dayanımlarına ısı kütür sıcaklığının etkisi	27
5.1.4. Harçların eğilme dayanımlarına yüksek sıcaklığın ve soğutma koşullarının etkisi	29
5.2. BASINÇ DAYANIMI DENEY SONUÇLARI.....	32
5.2.1. Harçların basınç dayanımlarına Na_2O içeriğinin etkisi.....	32
5.2.2. Harçların basınç dayanımlarına ısı kütür süresinin etkisi.....	33
5.2.3. Harçların basınç dayanımlarına ısı kütür sıcaklığının etkisi.....	35
5.2.4. Harçların basınç dayanımlarına yüksek sıcaklığın ve soğutma koşullarının etkisi	37
5.3. SEM/EDX ANALİZ SONUÇLARI.....	39
5.4. XRD ANALİZ SONUÇLARI.....	62
6. BÖLÜM	66
SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	72

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Atık andezit tozunun kimyasal özellikleri	12
Tablo 4.2. Bazalt kumunun elek analizi.....	14
Tablo 4.3. Harç karışım oranları, gr.....	18
Tablo 5.1. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları	24
Tablo 5.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	30
Tablo 5.3. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	38
Tablo 5.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizi.....	55
Tablo 5.5. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	56
Tablo 5.6. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	57
Tablo 5.7. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	58
Tablo 5.8. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	59
Tablo 5.9. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	60
Tablo 5.10. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Uçucu kül esaslı geopolimer karışım örneği.....	9
Şekil 3.2. Çevre dostu geopolimer beton	11
Şekil 4.1. Atık andezit tozunun görünümü.....	13
Şekil 4.2. Atık andezit tozunun XRD analizi.....	13
Şekil 4.3. Atık andezit tozunun TGA/DTA analizi.....	14
Şekil 4.4. Bazalt kumunun görünümü.....	15
Şekil 4.5. Harç karışımlarında kullanılan malzemelerin birlikte görünümü	16
Şekil 4.6. Geopolimer harçların harç kalıbında taze haldeki görünümü.....	18
Şekil 4.7. Eğilme dayanımı deneyi	19
Şekil 4.8. Basınç dayanımı deneyi	20
Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık fırını.....	21
Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü	22
Şekil 5.1. 60 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları	26
Şekil 5.2. 75 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları	26
Şekil 5.3. 90 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları	27
Şekil 5.4. %6 Na ₂ O ile üretilen harçların eğilme dayanımları.....	28
Şekil 5.5. %8 Na ₂ O ile üretilen harçların eğilme dayanımları.....	28
Şekil 5.6. %10 Na ₂ O ile üretilen harçların eğilme dayanımları.....	29
Şekil 5.7. Yavaş soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	31
Şekil 5.8. Hızlı soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	31
Şekil 5.9. Suda soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları.	32
Şekil 5.10. 60 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları	34
Şekil 5.11. 75 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları	34
Şekil 5.12. 90 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları	35
Şekil 5.13. %6 Na ₂ O ile üretilen harçların basınç dayanımları.....	36
Şekil 5.14. %8 Na ₂ O ile üretilen harçların basınç dayanımları.....	36
Şekil 5.15. %10 Na ₂ O ile üretilen harçların basınç dayanımları.....	37

Şekil 5.16. Yavaş soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	38
Şekil 5.17. Hızlı soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	39
Şekil 5.18. Suda soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	39
Şekil 5.19. Geopolimer harçları yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (500X)	41
Şekil 5.20. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (2000X)	41
Şekil 5.21. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (5000X)	42
Şekil 5.22. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (10000X)	42
Şekil 5.23. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)	43
Şekil 5.24. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)	43
Şekil 5.25. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)	44
Şekil 5.26. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)	44
Şekil 5.27. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)	45
Şekil 5.28. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)	45
Şekil 5.29. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)	46
Şekil 5.30. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)	46
Şekil 5.31. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)	47
Şekil 5.32. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)	47
Şekil 5.33. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)	48

Şekil 5.34. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X).....	48
Şekil 5.35. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)	49
Şekil 5.36. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)	49
Şekil 5.37. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)	50
Şekil 5.38. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)	50
Şekil 5.39. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X).....	51
Şekil 5.40. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X).....	51
Şekil 5.41. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X).....	52
Şekil 5.42. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X).....	52
Şekil 5.43. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)	53
Şekil 5.44. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)	53
Şekil 5.45. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)	54
Şekil 5.46. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)	54
Şekil 5.47. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizinin alındığı alanın görünümü	55
Şekil 5.48. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizi.....	55
Şekil 5.49. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü.....	56
Şekil 5.50. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	56

Şekil 5.51. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü	57
Şekil 5.52. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	57
Şekil 5.53. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü.....	58
Şekil 5.54. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	58
Şekil 5.55. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü	59
Şekil 5.56. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	59
Şekil 5.57. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü.....	60
Şekil 5.58. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi	60
Şekil 5.59. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü	61
Şekil 5.60. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi.....	61
Şekil 5.61. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık öncesi XRD analizi (25°C).....	62
Şekil 5.62. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi	63
Şekil 5.63. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi	63
Şekil 5.64. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi	64
Şekil 5.65. 400 °C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi ...	64
Şekil 5.66. 600°C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi	65
Şekil 5.67. 800°C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi	65

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

%	Yüzde
μ	Mikron
b	Prizmanın Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
Bd	Basınç Dayanımı
cm²	Santimetre Kare
dk	Dakika
Ed	Eğilmede Dayanımı
EDX	X ışını Enerji Dağılım Spektrometresi
F	Prizmanın Ortasına Uygulanan Kuvvet
Fc	Kırılmadaki En Büyük Kuvvet
g	Gram
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
L	Destek Silindirlerin Eksenleri Arasındaki Uzaklık
M	Molar
m³	Metreküp
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
MW	Megavat
N	Newton
°C	Santigrat Derece
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
sn	Saniye
XRD	X-Işını Kırınım yöntemi
TAS	Toplam Alkalilere Karşı Silika
TGA	Termogravimetrik Analiz

BÖLÜM I

GİRİŞ

Portland çimentosu üretimi sürecinde önemli ölçüde enerji tüketildiği ve aynı zamanda atmosfere büyük miktarda CO₂ salındığı yaygın olarak bilinmektedir. Çimento endüstrisi, dünya CO₂ emisyonunun yaklaşık %6'sından sorumlu tutulmaktadır. Çünkü bir ton Portland çimentosu üretimi atmosfere yaklaşık bir ton CO₂ salmaktadır. Bununla birlikte, Portland çimentosu hala betonarme yapılardaki ana bağlayıcıdır. Bu durum araştırmacıları geleneksel beton yerine daha çevre dostu bağlayıcılar araştırmaya sevk etmiştir. Ayrıca, küresel ısınma sorunlarını azaltmak ve Portland çimentosunun betonda kullanımını daha çevreci kılmak için çeşitli çabalar devam etmektedir. Bunlardan biri, uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve metakaolin gibi puzolanik malzemelerinin Portland çimentosu yerine kısıtlı oranlarda betonda kullanılmasıdır. Bir diğer alternatif ise, silikat malzemeleri içeren endüstriyel yan ürünlerin alkaliler ile aktive edilip geopolimer adı verilen çimentosuz bağlayıcının elde edilmesidir [1,2].

Madencilik endüstrisinde ve diğer endüstriyel faaliyetlerde ortaya çıkan atıklar son yıllarda öne çıkan çevre sorunlarından biri olmuştur. Bu atıklar neden oldukları çevre sorunlarının yanında, işletmeler için depolama ve nakliye gibi ek maliyetleri de beraberinde getirebilmektedir. Özellikle madencilik sektöründe ortaya çıkan toz halindeki malzemeler de yığın halinde açıkta depolanmakta ve tozuma neden olarak insan ve çevre sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle, bu atıkları katma değerli ürünlere dönüştürmek için yeni teknolojiler geliştirmek çok önemlidir. Bu yeni teknolojilerden biri de alüminosilikat içerikli endüstriyel katı atıklardan alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar veya geopolimerler olarak adlandırılan bağlayıcılar elde etmektir. Bu alüminosilikat içerikli atıklar, kaolinit, killer, mika, kömür atığı, feldispat, spinel vb. gibi jeolojik kökenli (doğal mineraller) veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu, bakır cürufu, kırmızı çamur, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atık malzemelerdir. Bu malzemeler tek başına veya farklı malzemelerle ikili veya üçlü kombinasyon halinde geopolimer üretiminde kullanılır [3].

Doğal taş kesimi ũretim sũrecinde 6nemli oranda atık toz meydana gelmektedir. Tane boyutu 125 μ dan daha kũçük olabilen bu atık toz; hava, toprak ve su kirliliğine sebep olmaktadır. Ortaya çıkan tozun farklı alanlarda hammadde olarak kullanılması noktasında bazı araştırmalar yapılmaktadır [4]. Volkanik bir kayaç olan andezit; agrega ve mineral katkı olarak kullanılabilirliği genel olarak araştırma alanlarını oluşturmaktadır. Ancak bu kayacın kesim atığı tozlarının agrega ve mineral katkı olarak kısmen kullanımının yanı sıra tamamen atık toz bağlayıcı olarak kullanılan geopolimer sentezi de uygun bir araştırma alanıdır. Ancak, andezit esaslı geopolimerler ile ilgili literatũrde çok az çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, çevreye potansiyel zararları bulunan atık andezit tozunun çevresel etkilerini azaltmak, atık andezit tozunu ekonomiye geri kazandırmak, geleneksel çimentoya alternatif bir bağlayıcı elde etmek ve elde edilen bağlayıcının farklı soğutma koşullarında yũksek sıcaklık dayanıklılığını araştırmak amaçlanmıştır.

BÖLÜM II

ANDEZİT

2.1. Andezitin Tanımı

Andezit diyoritlerin yüzey taşlarıdır. Genellikle diyoritlerle aynı yapıya sahiptirler. Profirik dokulu olup afonitik bir hamura sahiptirler. Andezitler magmatik kayalar sınıfının volkanik grubuna girerler. Andezitin madeni unsurları andezin, hornblent, biyotit ve asitten ibarettir. Bünyesi mikrolitli olduğu gibi şekilsiz maddeleri de ihtiva etmektedir. Genellikle pembe, gri, açık veya koyu yeşil ile siyahımtırak renklerde bulunabildiği gibi, içerisindeki minerallerin yüzde oranlarına göre kıvılcık veya koyu kahverengi, kristalleri de mevcuttur [5].

Devlet Planlama Teşkilatı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu raporuna göre andezit, porfiritik dokuya sahip ara bileşimin magmatik yüzey kayasıdır. Genel anlamda bazalt ve riyolit arasındaki ara tiptir ve TAS diyagramında gösterildiği gibi %57 ve %63 silisyum dioksit (SiO_2) arasında değişmektedir. Kıtasal kabuğun ortalama bileşimi andezitiktir. Volkanik kökenli olan andezit kayaları renk, doku ve sertlik açısından uygun olan bazı türlerinden parke taşı, döşeme taşı, kaplama taşı ve yapılarda değişik amaçlı olarak çeşitli mimari tasarımlarda kullanılmaktadır. Su emmeyen, suda dağılmayan, ısıya ve dona dayanıklı, sıkı dokulu ve koyu kırmızı renkli olmasının yanı sıra kırıldığında ve disk kesicilerle kesildiğinde düzgün yüzey veren kayalardır [6,7].

2.2. Atık Andezit Tozu

Andezitin maden yataklarından çıkarılması, işlenmesi ve yüzey düzeltme işlemleri sırasında toz şeklinde atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların değerlendirilmesi ekonomik ve ekolojik açıdan değerlidir. Yapısındaki SiO_2 içeriği nedeniyle de çimento esaslı kompozitlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir [3]. Madencilik ve endüstriyel faaliyetlerde atıkların azaltılması, son yıllarda temel

çevre sorunlarından biri olmuştur. Bu nedenle, atıkları katma değerli ürünlere dönüştürmek için yeni teknolojiler geliştirmek oldukça önemlidir [4].

2.3. Atık Andezit Tozunun İnşaat Sektöründe Geri Kazanımı Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Uzun, çalışmasında andezit atıklarının asfalt betonunda agrega ve filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırmıştır. Karşılaştırma yapmak için granülometrisi (tane boyutu dağılımı) aynı olan kireç ve andezit taşı karışımli numuneler hazırlamıştır. Hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanarak optimum bitüm yüzdeleri belirlemiştir. Bulunan optimum bitüm yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Andezit agregalı numunelerin daha fazla bitüm ihtiyacı gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak özellikle andezit tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde, taşıma ve kurutma maliyetlerinin kireç taşının maliyetini geçmediği kesimlerde, asfalt betonu karışımlarda kireç taşı yerine andezit taşının filler malzemesi olarak kullanılabilceği kanaatine varılmıştır [8].

Davraz ve çalışma arkadaşları, C40, C55 ve C70 dayanım sınıflarında ürettikleri betonlarda mineral katkı maddesi olarak atık andezit tozunun etkinliğini araştırmışlar ve F tipi uçucu kül olan Seyitömer uçucu külünü Tunçbilek uçucu külüyle karşılaştırmışlardır. Çimento yerine ağırlıkça %10, %15 ve %20 ikame oranları ile karışımlar hazırlamışlardır. Andezit tozu ve uçucu küllerin işlenebilirlik açısından benzer etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Andezit tozu optimum ikame oranının dayanım sınıfı arttıkça arttığı rapor edilmiştir. Andezit tozunun beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilceği, bu sayede çimento tüketiminin azaltılabileceği ve andezit tozunun neden olduğu çevresel etkilerin azaltılabileceği rapor edilmiştir [9].

Soğancıoğlu ve çalışma arkadaşları, andezit atık suyunun pıhtılaşma-flokülasyon işleminden elde edilen andezit çamurunun çimento yerine betona katılmasının uygunluğunu ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çeşitli pıhtılaştırıcı/flokülantlar (şap, FeCl₃ ve sepiyolit) ile elde edilen çeşitli fiziko kimyasal çamurlarını çimento yerine ağırlıkça %0.5-1.5 oranında kullanmışlardır. Üretilen betonlarda çimento dozajı 250 kg/m³ olarak belirlenmiş ve andezit çamuru kurtulduktan sonra kullanılmıştır. En iyi kıvamı %1.25 ve %1.5 şap,

sepiyolit ve $FeCl_3$ çamurları içeren bir karışımda gözlemişlerdir. En yüksek basınç dayanımını ise çimento yerine %0.5 andezit çamuru tozu ikame edilen karışımdan elde etmişlerdir. Sonuç olarak önerilen katkı uygulaması, çok yüksek dayanımlı beton gerektiren yapılar için uygun olmadığını orta mukavemetli beton gerektiren bazı yük taşımayan yapılarda kullanılmak üzere, fizikokimyasal çamurun betondaki çimentonun %0.5'e kadar ile değiştirilebileceğini belirtmişlerdir [10]

Çelikten ve Canbaz yaptıkları çalışmalarında çimento ikamesi olarak ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık andezit ve mermer tozunu ayrı ayrı kullanılarak harç numuneleri üretmişler ve mekanik deneylere tabi tutmuşlardır. Andezit tozu kullanımının kontrol karışımlarına göre ultrases geçiş hızlarını, eğilme dayanımlarını ve basınç dayanımları sırasıyla; %6'ya, %20'ye ve %33'e varan oranlarda mermer tozu kullanılması durumunda ise sırayla %3,5 %11,9 ve %19.6'ya varan oranlarda artırdığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak atık andezit tozunun çimento yerine %20'ye varan oranlarda dayanım kaybı olmaksızın kullanılabilceği görmüşlerdir. Atık mermer tozunun da harçlarda çimento yerine %15'e varan oranlarda kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Sürdürülebilirlik, üretim ve ekonomik yönden andezit ve mermer atıklarının çimento ikamesi olarak kullanılabilceğini rapor etmişlerdir [7].

Hamidi ve çalışma arkadaşları eko-verimli çimento üretimi için yeni puzolan kaynaklarını araştırmışlardır. Andezitin puzolanik aktivitesini mekanik ve termal işlemler kullanılarak incelemişlerdir. Sertleşme sırasında andezit katkılı çimentonun puzolanik performansını incelemek için doğal veya işlenmiş andezit içeren macunlar ve harçlar hazırlamışlardır. Karışımlarını CEM I 52.5R ve CEM I 42.5N çimentolarına andeziti %10, %20, %30 ve %40 oranında ikame ederek hazırlamışlardır. Sonuç olarak, doğal andezitin karışimli çimentoların geliştirilmesine olanak sağlayabileceğini rapor etmişlerdir. Andezitin 800 °C sıcaklıkta ısı işleme maruz bırakılmasının puzolanik aktivitesini olumlu etkilediğini belirtmişlerdir. Mekanik testler, %10 ikame oranının daha uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, andezitin puzolanik aktifliğinin kullanılan çimentoya göre önemli ölçüde değiştiğini belirtmişlerdir. Çimento tipine göre andezitin puzolanik özellik veya dolgu maddesi davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlara göre andezitin puzolan olarak kullanılacağı karışımlarda çimentonun seçimine çok dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir [11].

Çelikten, yaptığı araştırmada Afyon ili çevresinden temin ettiği atık andezit tozu ile ürettiği jeopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelenmiştir. Bu özellikleri araştırmak için, atık andezit tozunu NaOH'nin farklı molarite varyasyonları ile aktive ederek jeopolimer harçlar üretmiştir. Atık andezit tozu üretilen taze jeopolimer harçları üç farklı sürede (12, 24 ve 48 saat) 100 °C'de ısı küre tabi tutmuştur. Isıl kür süresinin atık andezit tozu esaslı jeopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini olumlu etkilediğini görmüştür. Araştırmacı, 9 M ve 12 M NaOH ile aktive edilen atık andezit tozu esaslı jeopolimer harçlarda en yüksek eğilme ve basınç dayanım değerlerini elde etmiştir. Atık andezit tozunun jeopolimer hammaddesi olarak geri dönüşüm potansiyeline sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır [12].

Soykan ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmada arduvaz ve andezit atıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada arduvaz ve andezit agregasını kalker agregası ile hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yer değiştirerek kullanmışlardır. Numunelere basınç dayanımı, yarma dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve schmidt yüzey sertliği deneyleri yapmışlar, sonuçta kontrol betona göre numune betonların mekanik özelliklerinin arttığını görmüşlerdir. Yaptıkları bütün deneyler için kalker agregası yerine ikame edilen arduvaz ve andezit agregalarının %50 ikamede en yüksek dayanıma ulaştığını, %75 ikamede dayanımların kontrol betona yaklaştığını, %100 ikamede ise kontrol betona göre dayanımların düştüğünü gözlemlemişlerdir. Çalışma sonunda veriler incelendiğinde, arduvaz ve andezit atıklarından üretilen agregaların beton agregası olarak kullanılabileceği, optimum ikame oranının %50 olduğunu belirtmişlerdir [13].

Andezitin inşaat sektöründe geri kazanımı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, andezitin genellikle puzolanik malzeme veya kum olarak kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca çalışmalarda kullanılan andezitin genellikle andezit kayacının öğütülmesi suretiyle elde edildiği belirlenmiştir. Taş kesim atölyelerinde ortaya çıkan atık andezit tozu ile ilgili ise literatürde çok az çalışma bulunmaktadır. Bu tez kapsamında atık andezit tozu esaslı jeopolimer harçların farklı soğutma koşullarındaki yüksek sıcaklık dayanıklılığı araştırılmıştır.

BÖLÜM III

GEOPOLİMER

3.1. Geopolimerin Tanımı

Geopolimer alümina silikat içerikli toz halindeki amorf malzemelerin oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda alkali aktivatörlerle çözünmesi suretiyle oluşan amorf fazlı bir bağlayıcıdır. Araştırmacılar geopolimer oluşum mekanizmasını 3 adımda açıklamışlardır. Bunlardan birincisi alümina silikat içerikli toz halindeki amorf malzemelerin alkali aktivatör solüsyonlarında çözünerek serbest silika ve alüminanın ortaya çıkmasıdır. İkincisi serbest silika ve alüminanın malzeme matrisinde hareketi ve yoğunlaşma reaksiyonu ile inorganik geopolimer jel meydana getirmesidir. Bu aşamada hidroliz olayı nedeniyle su bünyeyi büyük oranda terk eder. Son aşamada ise oluşan jel fazı sertleşerek ve sıkılaşılarak 3 boyutlu geopolimer yapıyı meydana getirir [14].

3.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alümina Silikat İçerikli Malzemeler

Geopolimer üretiminde en çok kullanılan alümina silikat içerikli malzemeler uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufudur. Bunların dışında taban külü, doğal zeolitler, kaolin, pirinç kabuğu külü, ferrokrom cürufu, cam tozu ve silis dumanı gibi çeşitli doğal ve endüstriyel atık esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin tek başlarına veya birlikte kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır [15].

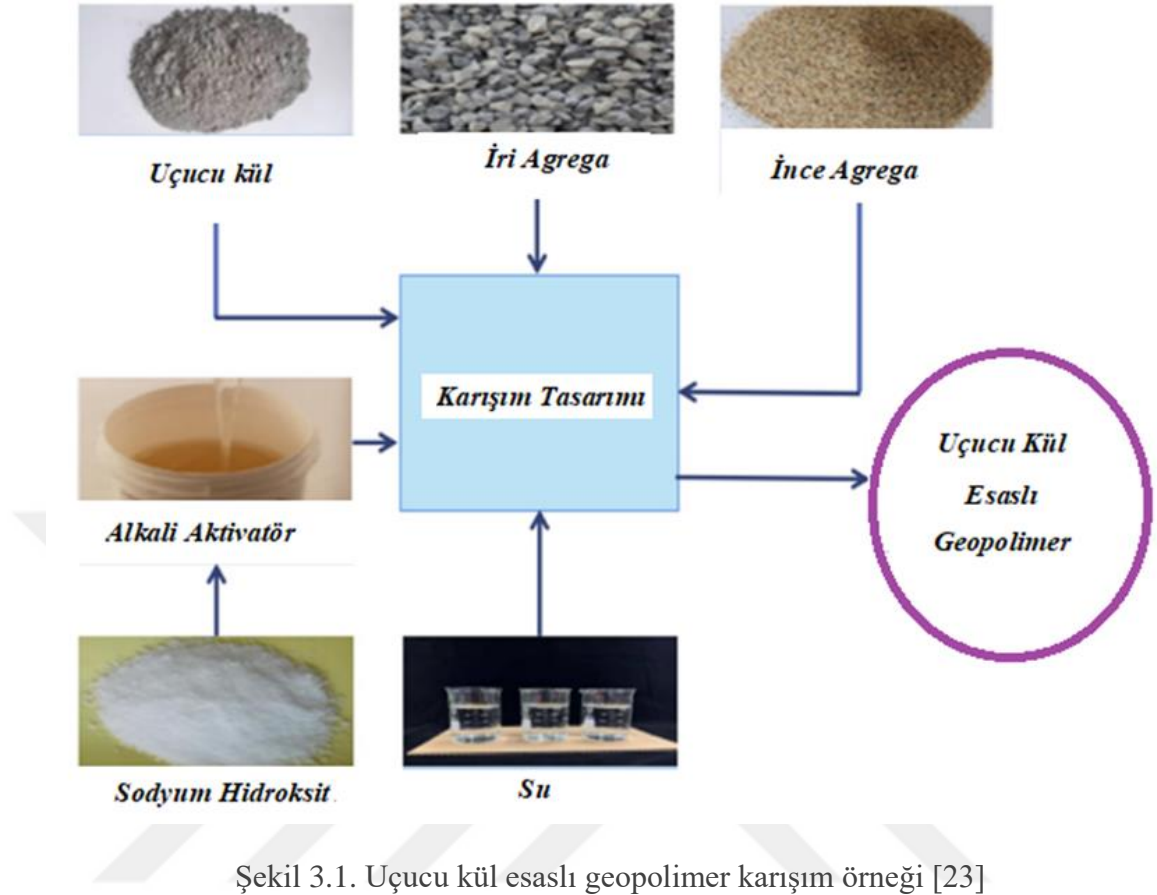
3.3. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alkali Aktivatörler

Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatörlerde sulu ortamda açığa çıkan alkali kationlar ortamın pH'ını yükselterek alümina silikat içerikli malzemelerden silika ve alüminanın çözünmesini ve geopolimerizasyon reaksiyonlarının oluşumunu sağlamaktadırlar. Bu aktivatörlerden en çok kullanılanları sodyum ve potasyum hidroksitler, sodyum ve potasyum silikatlar ile katı haldeki sodyum metasilikattır.

Geopolimer sentezinde kullanılan aktivatörün türü ve dozajı (molaritesi) geopolimerin reolojik, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini doğrudan etkilemektedir [16].

3.4. Geopolimer Üzerine Yapılmış Çalışmalar

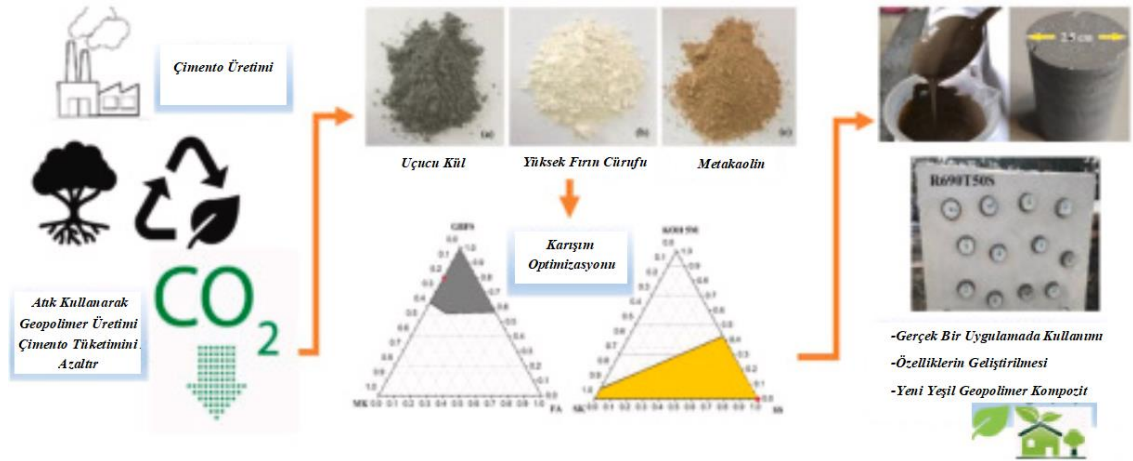
Uçucu küllü geopolimerler ile ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde, özellikle uçucu külün Si/Al oranının, kür koşullarının, alkali solüsyon türü ve dozajının uçucu küllü geopolimerlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen birincil parametreler olduğu görülmüştür. Mikroyapısı yoğun ve sıkı gözlenen uçucu küllü geopolimerlerin mekanik özellikleri ile klor, sülfat ve asit solüsyonlarına olan direncinin de daha iyi olduğu rapor edilmiştir [17]. Uçucu küllü geopolimerlerde kullanılan sodyum hidroksit konsantrasyonunun ve kür sıcaklığının artması ile daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği önceki çalışmalarda rapor edilmiştir [18,19]. Geopolimer betonların sülfatlara karşı çok iyi bir dirence sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, asit etkisi altında uçucu küllü geopolimer betonların Portland çimentosuyla üretilen geleneksel betona göre daha dayanıklı olduğu ifade edilmiştir [20,21]. Yapılan bir çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz uçucu küllü geopolimerlerin basınç dayanımlarında 800 °C üzerinde artış gözlenmiştir. Aynı çalışmada, metakaolin esaslı geopolimerlerde benzer artışa rastlanılmamıştır [22]. Uçucu kül ile üretilen bir geopolimer betonun üretimi için kullanılan malzemelerin görünümü Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Metakaolin esaslı geopolimerlerde sodyum silikat ile aktivasyonunda alkali hidroksitler ile aktivasyona göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Metakaolin esaslı geopolimerlerde optimum bir konsantrasyona kadar aktivatör dozajı artışının dayanım değerlerinde artışa yol açmıştır. Metakaolinin kimyasal içeriği değerlendirildiğinde $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3.5 ile 5.5 arasında olan hammadde (metakaolin) kullanıldığında daha yüksek dayanım elde edildiği rapor edilmiştir. Metakaolin için genel itibariyle en uygun ısı kütür sıcaklığının $60\text{ }^\circ\text{C}$ civarında olduğu birçok çalışmada ifade edilmiştir. Ayrıca yine bu çalışmalarda en uygun ısı kütür sıcaklığının geopolimer üretiminde kullanılan metakaolinin kimyasal içeriği ile inceliğine ve aktivatör türü ve dozajına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Geopolimer üretiminde daha yüksek yüzey alanına sahip metakaolin kullanılmasıyla prizinin çok hızlı gerçekleştiği, daha yüksek basınç dayanımı ve daha homojen bir mikroyapı elde edildiği belirlenmiştir. Genellikle metakaolin esaslı geopolimerlerin Portland çimentosuyla üretilen geleneksel bağlayıcılara göre daha iyi asit, deniz suyu ve sodyum sülfat dayanıklılığına sahip olduğu rapor edilmiştir. Metakaolin esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklık etkisi altında çok iyi dayanıklılığa

sahip olduğu, 800 °C'ye kadar dayanım kaybı olmadan ısıl etkiye direnebildiği belirlenmiştir [24].

Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, NaOH ile üretilen geopolimer betonların basınç dayanımlarının aktivatör kostantrasyonu arttıkça (14 molara kadar) arttığı belirlenmiştir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerde ise sodyum silikat:sodyum hidroksit oranının 1.75:1 den 3.25:1 e çıkmasının basınç dayanımında az da olsa artışa sebep olduğu bildirilmiştir. Özellikle karıştırma yönteminin bu bağlayıcıların taze haldeki özellikleri ve dayanım değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir. Uzun süreli karıştırma işleminin yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin dayanımlarını geliştirdiği belirlenmiştir. Isıl küre tabi tutulan yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin basınç dayanımları özellikle erken yaşlarda oda sıcaklığında kür edilenlere göre daha yüksek elde edilirken, ileriki yaşlarda ısıl küre tabi tutulan geopolimerlerin dayanımlarında zamanla azalma görülmüştür. Gerilme-birim deformasyon ilişkisi incelendiğinde yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin geleneksel Portland çimentolu bağlayıcılara göre daha gevrek olduğu belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerlerin geleneksel Portland çimentolu bağlayıcılara göre yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir [25]. Ayrıca, başta uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu olmak üzere çeşitli endüstriyel yan ürünlerin ve diğer hammaddelerin birlikte kullanılması ile elde edilen geopolimerler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda geopolimerlerin geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonlara kıyasla daha çevre dostu olma özelliği vurgulanmıştır. Bu çalışmaların birinde Şekil 3.2'deki gibi geopolimerin çevre dostu bir malzeme olduğu belirtilmiştir [26].



Şekil 3.2. Çevre dostu geopolimer beton [26]

Volkanik kayaçların hammadde olarak kullanıldığı deneysel çalışmalar incelendiğinde, özellikle granit esaslı geopolimerler ile ilgili birçok çalışma yapıldığı [27-29], bu çalışmalarda granit esaslı geopolimerlerin taze, sertleşmiş ve dayanıklılık özelliklerinin ortaya konulduğu görülmüştür. Ancak, özellikle pomza, perlit, bazalt ve andezitin geopolimer üretiminde kullanılabilirliği ve bu malzemeler ile üretilen geopolimerlerin özellikleri ile ilgili literatürdeki çalışma sayısının az olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada andezit taşı kesim atölyesinde ortaya çıkan atık andezit tozundan geopolimer harçlar üretilmiş, üretilen harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası farklı soğutma koşulları altında performansı araştırılmıştır.

BÖLÜM IV

MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında atık andezit tozu, bazalt kumu, musluk suyu ve alkali aktivatör olarak da sıvı sodyum silikat kullanılarak 18 farklı geopolimer harç karışımı oluşturulmuştur. Atık andezit tozu ağırlığının %6'sı, %8'i ve %10'u kadar Na₂O içerecek şekilde 3 farklı aktivatör içeriği ile üretilen harçlar 60 °C, 75 °C ve 90 °C'de 8 veya 24 saat olmak üzere toplamda 6 farklı ısıl kür etkisine tabi tutulmuştur. Harç üretiminde kullanılan materyaller ve uygulanan metotlar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

4.1. Materyal

4.1.1. Atık andezit tozu

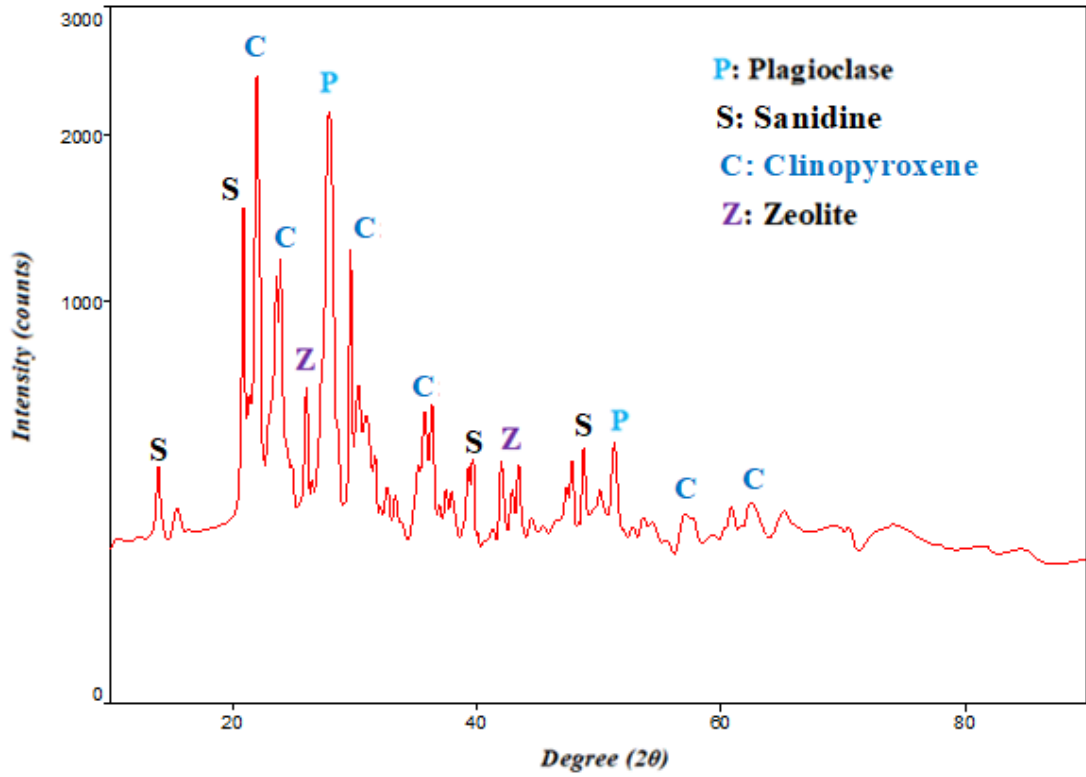
Bu çalışmada kullanılan atık andezit tozu Nevşehir ilinde bulunan yerel bir andezit taşı kesim atölyesinden çamur halinde temin edilmiştir. Andezit atığı kullanılmadan önce etüvde 24 saat boyunca 105 °C'de kurutulmuştur. Andezit taşı kesim atığının kimyasal kompozisyonu ve görünümü sırasıyla Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de sunulmuştur. Andezit tozunun SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri toplamı %74.35 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yaklaşık %9 oranında CaO içermektedir. Bu oksit miktarları atık andezit tozunun geopolimer üretimi için bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Andezit tozunun XRD ve TGA/DTA analizleri sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Andezit tozunda plajiyoklaz, sanidin, klinopiroksen ve zeolit kristalleri tespit edilmiştir. Atık andezit tozunun yüksek sıcaklık etkisinde 1000 °C'ye kadar önemli bir kütle kaybına uğramadığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. Atık andezit tozunun kimyasal özellikleri

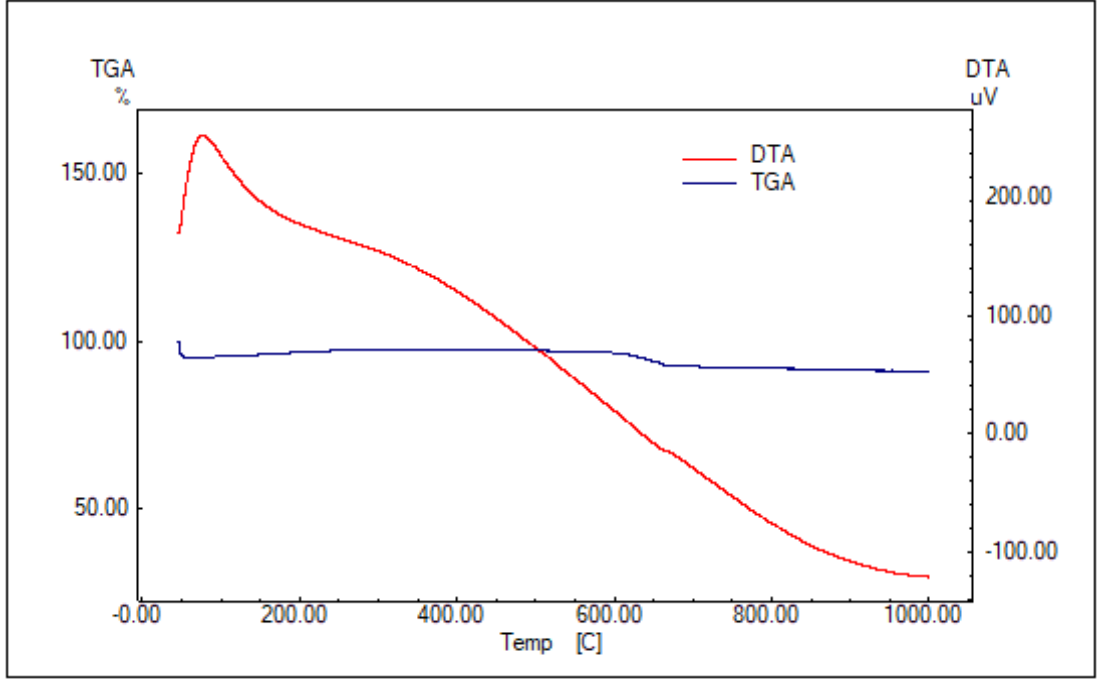
Oksit, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
58.64	15.71	2.39	1.78	4.31	8.92	6.56	1.69



Şekil 4.1. Atık andezit tozunun görünümü



Şekil 4.2. Atık andezit tozunun XRD analizi



Şekil 4.3. Atık andezit tozunun TGA/DTA analizi

4.1.2. Kum

Geopolimer harç karışımlarında 0-4 mm tane boyutu aralığında bazalt kumu kullanılmıştır. Bazalt kumunun su emme oranı ve doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı sırasıyla %1.44 ve 2.72'dir. Kuma ait elek analizi sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir. Ayrıca kumun görünümü Şekil 4.4'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Bazalt kumunun elek analizi

Elek Çapı, mm	Geçen, %
0.063	0.9
0.125	5.1
0.25	10.8
0.50	20.6
1.00	39.7
2.00	68.4
4.00	100



Şekil 4.4. Bazalt kumunun görünümü

4.1.3. Sodyum silikat

Çalışmada aktivatör olarak sıvı sodyum silikat kullanılmıştır. Sıvı sodyum silikatın ucuz olması ve kolay temin edilebilirliği önemli avantajıdır. Harç karışımlarında kullanılan sıvı sodyum silikat, Arkim Ltd. Şti.'den 50 kg'lık bidonlar halinde temin edilmiş olup, Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Kullanılan sıvı sodyum silikatın yaklaşık %61'i sudur.

4.1.4. Su

Harç karışımlarında, Üniversite şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 [30] standardında karışım suyu olarak içilebilen suların harç karışımlarında kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir.



Şekil 4.5. Harç karışımlarında kullanılan malzemelerin birlikte görünümü

4.2. Metot

Bu deneysel çalışmada atık andezit tozu sodyum silikat ile aktive edilerek 3 farklı ısıl kür sıcaklığına ve 2 farklı kür süresine tabi tutularak geopolimer harçlar üretilmiştir. Harç karışımlarına 3 gözlü 40x40x160 mm prizma kalıplar için kullanılan malzeme miktarları Tablo 4.3'te verilmiştir. Harç karışımlarında atık andezit tozu ağırlığının %6, %8 ve %10'u kadar Na_2O içerecek şekilde 3 farklı aktivatör içeriği tercih edilmiştir. Karışımlar 0.4 su/atık andezit tozu oranı ve 2.5 kum/atık andezit tozu ile üretilmiştir. Harç karışımlarında kullanılacak su ve sodyum silikat karışıma dökülmeden önce karıştırılmıştır. Karışım hazırlığına öncelikle hobart mikserine atık andezit tozu ile sodyum silikat-su karışımı dökülmüş ve 30 saniye karıştırılmıştır. İlk karıştırma işleminin ardından bazalt kumu yavaşça 30 saniye içerisinde karışıma eklenmiştir. Daha sonra da 3 dakika daha hobart mikserinde karıştırılarak karışım hazırlanmıştır. Daha sonra karışımlar 3 gözlü 40x40x160 mm prizma kalıplara 3 tabaka halinde dökülmüş ve vibrasyon masası ile 30 saniye sıkıştırılmıştır. Geopolimer harçların harç kalıbında taze haldeki görünümü Şekil 4.6'da sunulmuştur. Kalıplarına yerleştirilen karışımlar daha sonra 60 °C, 75 °C ve 90 °C'de 8 veya 24 saat olmak üzere toplamda 6 farklı ısıl kür etkisine tabi tutulmuştur. Isıl kür sürelerinin tamamlanmasının ardından elde edilen harç numuneleri kalıplarından çıkarılmış ve deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Harç karışımlarına sırasıyla Na_2O yüzdesine, ısıl kür sıcaklığına ve ısıl

kür süresine göre kodlama yapılmıştır. Örneğin, 8-60-24 kodlu karışım atık andezit tozu ağırlığının %8'i kadar Na₂O içeren aktivatör miktarı ile üretilmiş, 60 °C'de 24 saat ısıtılarak uygulanmış karışım olarak tanımlanmıştır.

Harçlar üzerinde ısıtılardan 1, 28 ve 56 gün sonra TS EN 196-1 [31] standardına göre eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 56 günlük geopolimer harçlardan elde edilen 27'şer adet numune 400 °C, 600 °C ve 800 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklığa ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Bu üç farklı sıcaklığa ayrı ayrı maruz bırakılan numuneler havada yavaş, havada hızlı ve suda olmak üzere 3 farklı soğutma koşuluna tabi tutulmuştur. Yavaş soğuma koşulunda numuneler, 1 saat hedef sıcaklığa (400 °C, 600 °C veya 800 °C) maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklık fırını kapatılıp fırın içerisinde fırın içi sıcaklık yaklaşık 50 °C'ye düşünceye kadar soğutulmuştur. Hızlı soğumada ise numuneler 1 saat hedef sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra fırın kapağı açılıp laboratuvar ortamına (yaklaşık 25 °C) çıkarılmış ve ani şekilde soğuması hedeflenmiştir. Suda soğumada ise numuneler 1 saat hedef sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra fırının kapağı açılıp laboratuvar ortamına çıkarılmış ve üzerlerine su dökülmüştür. Bu 3 farklı soğuma koşuluna maruz bırakılan numunelere yüksek sıcaklık deneyinden 24 saat sonra eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri ile yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış olan numunelerin değerleri kıyaslanmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklığın geopolimer harçların mikro yapılarında meydana getirdiği değişiklikler SEM/EDX ve XRD analizleri ile incelenmiştir.



Şekil 4.6. Geopolimer harçların harç kalıbında taze haldeki görünümü

Tablo 4.3.Harç karışım oranları, gr.

Seri Kodu	Karışım Kodu	Atık Andezit Tozu	Kum	Sodyum Silikat	Su	Kür Koşulu	
8S	6-60-8	500	1250	153	82	8 Saat 60 °C	
	8-60-8	500	1250	203	51		
	10-60-8	500	1250	253	21		
	8S	6-75-8	500	1250	153	82	8 Saat 75 °C
		8-75-8	500	1250	203	51	
		10-75-8	500	1250	253	21	
	8S	6-90-8	500	1250	153	82	8 Saat 90 °C
		8-90-8	500	1250	203	51	
		10-90-8	500	1250	253	21	
24S	6-60-24	500	1250	153	82	24 Saat 60 °C	
	8-60-24	500	1250	203	51		
	10-60-24	500	1250	253	21		
	24S	6-75-24	500	1250	153	82	24 Saat 75 °C
		8-75-24	500	1250	203	51	
		10-75-24	500	1250	253	21	
	24S	6-90-24	500	1250	153	82	24 Saat 90 °C
		8-90-24	500	1250	203	51	
		10-90-24	500	1250	253	21	

4.2.1. Eğilme dayanımı deneyi

Geopolimer harçların eğilme altındaki çekme dayanımını belirlemek için TS EN 196-1 [31] standardına uygun olarak eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri Şekil 4.7’de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme suretiyle yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 1, 28 ve 56 günlük geopolimer harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 56 günlük numuneler üzerinde yüksek sıcaklık (400 °C, 600 °C ve 800 °C) etkisinden sonra eğilme deneyi yapılmış olup yüksek sıcaklık etkisindeki dayanım değişimi irdelenmiştir. Eğilmede çekme dayanımı (Ed) değeri Bağıntı 4.1. kullanılarak N/mm^2 cinsinden elde edilmiştir. Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilme deneyi uygulanmıştır. Ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması eğilme dayanımı olarak alınmıştır.

$$Ed = 1,5 \times (P \times L) / a^3$$

(Bağıntı 4.1.)

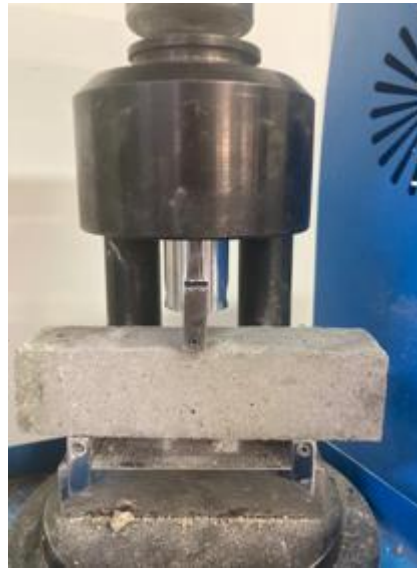
Burada;

Ed: Eğilme dayanımı, N/mm^2

a: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, 40 mm

P: Uygulanan kuvvet, N

L: Mesnet açıklığı, 100 mm



Şekil 4.7. Eğilme dayanımı deneyi

4.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme deneyi uygulanıp ortadan ikiye bölünmüş numunelerin düzgün kalıp yüzeylerine TS EN 196-1 [31] standardında belirtilen şekilde Şekil 4.8’de görüldüğü gibi basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonrası ortadan ikiye bölünmüş numuneler 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek standarda uygun yük uygulanarak kırılmıştır. Kırılma anındaki yük değeri yükün uygulandığı alana bölünerek basınç dayanım değeri Bağıntı 4.2 ile elde edilmiştir.

6 yarım numuneye uygulanan basınç dayanımı deneyi sonucu ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.

$$B_d = F/b^2$$

(Bağıntı 4.2.)

Burada;

B_d: Basınç dayanımı, N/mm²

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Uygulanan en büyük kuvvet, N



Şekil 4.8. Basınç dayanımı deneyi

4.2.3. Yüksek sıcaklık deneyi

56 günlük geopolimer harç numuneleri üzerinde yüksek sıcaklık deneyi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri 5 °C/dk ısınma ısısına sahip Şekil 4.9’de görülen yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan alınan üç adet harç numunesi yüksek sıcaklık fırını içine konulmuştur. Numuneler hedef sıcaklıklar olan 400 °C, 600 °C ve 800 °C’ye bir saat boyunca ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Bir saat sonunda yüksek sıcaklık fırını kapatılarak numuneler 3 farklı soğutma koşuluna maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü Şekil 4.10’de gösterilmiştir. Harç numunelerine eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulanarak referans numunelerle (yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan numuneler) aralarındaki farklar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü

4.2.4. SEM/EDX analizleri

8-60-8 kodlu geopolimer harçlar mekanik ve yüksek sıcaklık performansları nedeniyle SEM/EDX analizleri için seçilmiştir. Bu karışımlardan elde edilen numunelerden yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası küçük parça halinde örnekler alınmıştır. Örneklerden daha iyi görüntü alınabilmesi için örnekler altınla kaplanmıştır. Örnekler üzerinde SEM/EDX analizi LEO 440 model elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yüksek sıcaklığın geopolimer harçların mikroyapılarında meydana getirdiği değişimler irdelenmiştir.

4.2.5. XRD analizleri

Yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan (25 °C) ve 600 °C ile 800 °C sıcaklıklarına ayrı ayrı maruz bırakıldıktan sonra suda ve yavaşça havada soğutulan 8-60-8 kodlu (mekanik ve yüksek sıcaklık performansları nedeniyle) geopolimer harçlar üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM V

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında iki farklı seride toplamda 18 farklı geopolimer harç karışımı üretilmiştir. Üretilen harçların 1, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları Tablo 5.1’de sunulmuştur. 8S serisi harçların 1 günlük eğilme dayanımları 0.2 MPa ile 1.4 MPa arasında değişirken, 24S serisi harçların 1 günlük eğilme dayanımları 0.4 MPa ile 2.3 MPa arasında elde edilmiştir. 8S serisi harçlarda en yüksek 28 günlük eğilme dayanımı 6.1 MPa iken, 24S serisi harçlarda 5.8 MPa olmuştur. Isıl kürün daha uzun süre etkimesiyle 1 günde 24S serisi harçlarda nispeten daha yüksek eğilme dayanımı elde edilirken, 28 günlük dayanım değerleri incelendiğinde 8S serisi harçların dayanım gelişimlerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 8S serisi harçların eğilme dayanımları 28 günden 56 güne %1 ile %115 arasında değişen oranlarda artarken, 24 S serisi harçların eğilme dayanımları %2 ile %101 arasında artış göstermiştir. 8S serisi harçlarda en yüksek 28 günlük eğilme dayanımı 8-75-8 kodlu harçlarda elde edilirken, 24S serisi harçlarda 8-75-24 kodlu harçlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte 8S ve 24S serisi harçlarda en yüksek 56 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 8-60-8 ve 10-75-24 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Bu sonuçlar harçların eğilme dayanımlarına ısıl kür süresi dışında Na₂O konsantrasyonunun ve ısıl kür sıcaklığının da önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.1. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı, MPa			Basınç Dayanımı, MPa		
		1 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	1 Günlük	28 Günlük	56 Günlük
8S	6-60-8	0.4	4.9	6.6	2.6	19.5	24.4
	8-60-8	0.5	4.7	9.9	3.0	27.9	39.4
	10-60-8	0.5	3.2	6.8	2.9	16.9	37.8
	6-75-8	0.2	3.9	4.7	3.3	20.5	22.1
	8-75-8	0.5	6.1	8.3	3.4	32.3	35.3
	10-75-8	0.9	4.8	9.5	3.8	25.3	47.6
	6-90-8	0.8	3.6	3.7	3.2	13.6	14.6
	8-90-8	0.5	4.6	5.0	4.2	28.3	30.1
	10-90-8	1.4	5.6	5.9	6.1	33.0	35.9
24S	6-60-24	0.4	2.7	5.4	3.3	21.0	25.6
	8-60-24	0.5	4.5	6.4	3.5	23.9	40.6
	10-60-24	0.8	4.5	6.9	3.4	24.1	45.6
	6-75-24	0.5	2.7	2.7	4.5	19.0	20.1
	8-75-24	0.7	5.8	6.7	4.4	33.7	34.9
	10-75-24	1.2	4.9	8.4	7.7	35.2	49.7
	6-90-24	1.1	2.0	2.8	7.7	17.4	19.5
	8-90-24	1.3	5.0	6.0	11.2	34.0	35.5
	10-90-24	2.3	5.6	5.9	19.6	35.1	40.6

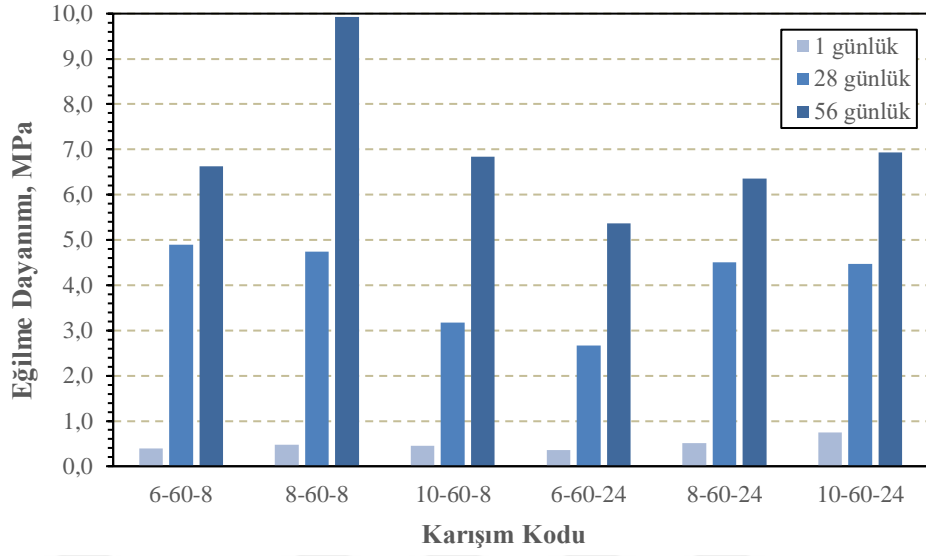
5.1.1. Harçların eğilme dayanımlarına Na₂O içeriğinin etkisi

60 °C, 75 °C ve 90°C’de kür edilen geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’te verilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde 8S serisi harçlarda en yüksek 1 ve 56 günlük eğilme dayanımlarının %8 Na₂O ile üretilen 8-60-8 kodlu harçlarda olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 8S serisi harçlarda en yüksek 28 günlük eğilme dayanımı ise 6-60-8 kodlu harçta elde edilmiştir. 60 °C’de 24 saat kür edilen 24S serisi harçlarda ise Na₂O içeriği arttıkça genellikle eğilme dayanımı değerleri de artmış, en yüksek 1, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları 10-60-24 kodlu harçta görülmüştür. Şekil 5.2 incelendiğinde 75 °C’de kür edilen 8S serisi harçlarda en yüksek 1 ve 56 günlük eğilme dayanımlarının %10 Na₂O ile üretilen 10-75-8 kodlu harçta olduğu görülmüştür. En yüksek 28 günlük eğilme dayanımı ise %8 Na₂O ile üretilen 8-75-8 kodlu harçta elde edilmiştir. 75 °C’de kür edilen 24S serisi harçlarda 8S harçlarla benzer

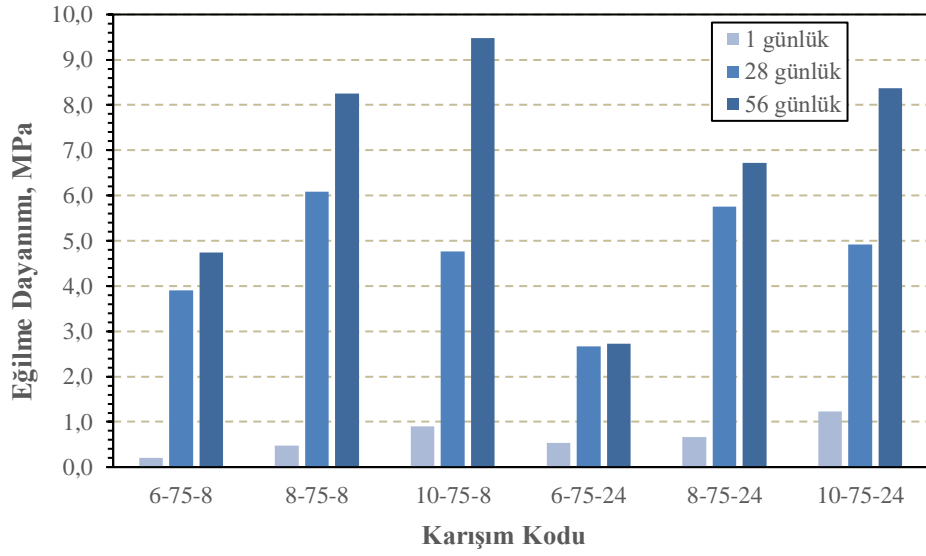
sonuçlar elde edilmiştir. 90°C’de kr edilen 8S serisi geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımları %10 Na₂O ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 24S serisi geopolimer harçlarda da genellikle %10 Na₂O ile üretilen harçlarda en yüksek eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre sodyum silikat ile aktive edilen geopolimer harçların eğilme dayanımlarında en uygun Na₂O içeriğinin kür sıcaklığı ve süresine göre değişkenlik gösterdiği söylenebilir.

5.1.2. Harçların eğilme dayanımlarına ısıl kr süresinin etkisi

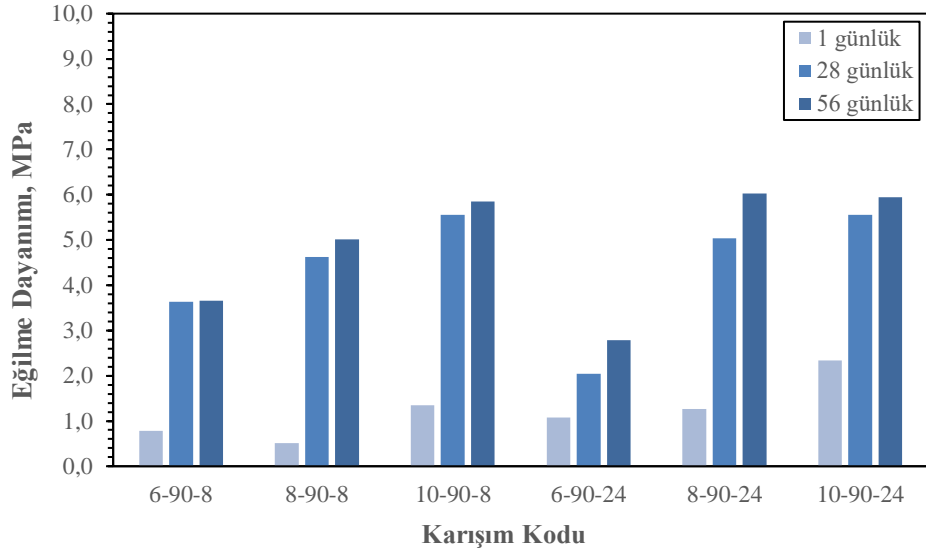
Bu alışma kapsamında üretilen geopolimer harçlarda sabit Na₂O içeriği ve ısıl kür sıcaklığı için ısıl kr süresinin etkisi Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’te irdelenmiştir. 60 °C’de kr edilen 8 saat ısıl küre tabi tutulan harçlarda 24 saat kürlenen harçlara göre genellikle daha yüksek 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı elde edilmiştir. Örneğin 6-60-8 kodlu harçların 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları 6-60-24 kodlu harçlara göre sırasıyla yaklaşık olarak %45 ve %24 oranlarında daha yüksektir. Şekil 5.2 incelendiğinde 75 °C’de kr edilen harçlar için de benzer sonuçlar grlmştir. Aynı aktivatör konsantrasyonu için 8 saat ısıl küre tabi tutulan harçların 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları genellikle yaklaşık eşit veya daha yüksek elde edilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde ise 90 °C’de kr edilen harçlarda Na₂O içeriğine göre ısıl kr süresi farklı etkiler ortaya çıkarılmıştır. %6 Na₂O içeriği için 8 saat ısıl krle daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilirken, %8 Na₂O içeriği için 24 saat ısıl kr edilen harçlarda daha yüksek eğilme dayanımı değerleri gözlenmiştir. %10 Na₂O içeriğinde ise benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde de 8 saat ısıl kr süresinin ekonomik ve teknik açıdan 24 saat ısıl kr süresine göre daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. 60 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları



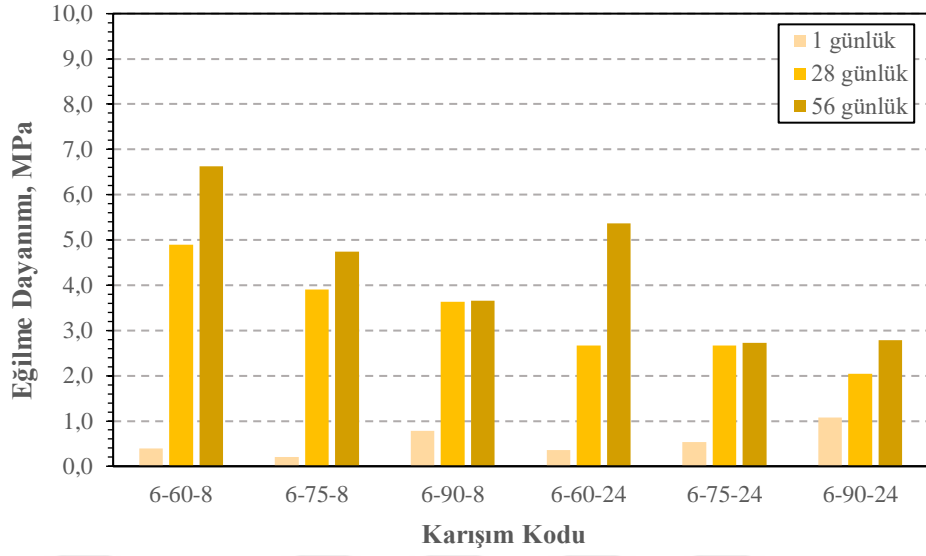
Şekil 5.2.75 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları



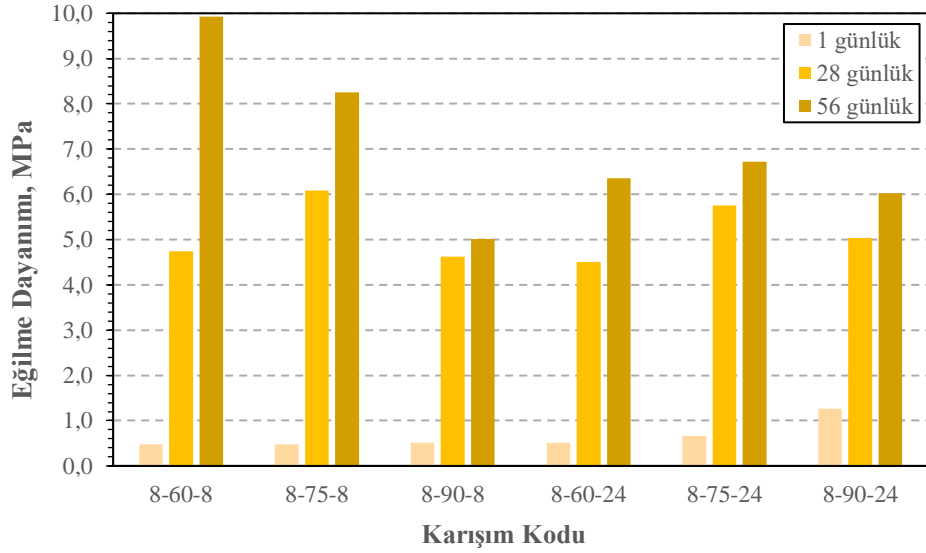
Şekil 5.3. 90 °C’de kür edilen harçların eğilme dayanımları

5.1.3. Harçların eğilme dayanımlarına ısı kür sıcaklığının etkisi

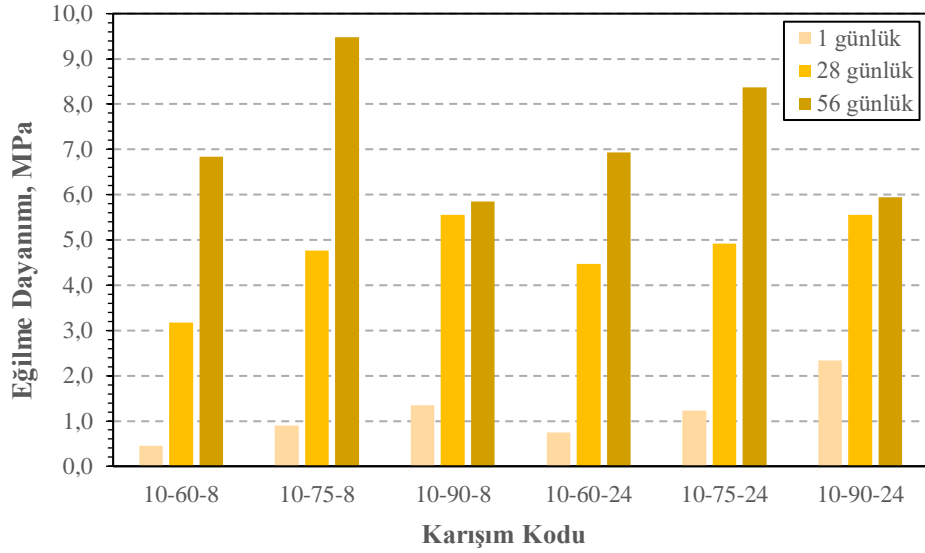
Aşağıda %6, %8 ve %10 Na₂O içeriği ile üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımları sırasıyla Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6’da verilmiştir. Şekil 5.4’te %6 Na₂O içeriği ile üretilen harçların eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde hem 8S hem de 24S serisi harçlarda ısı kür sıcaklığının artması ile harçların 1 günlük eğilme dayanımları artarken, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları genellikle azalmıştır. Bu sonuçlara göre %6 Na₂O içeriği ile üretilen harçlarda artan ısı kür sıcaklığının sadece ilk günlerdeki eğilme dayanımına katkısı olduğu söylenebilir. Şekil 5.5’te %8 Na₂O içeriği ile üretilen harçların eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde 8S serisi harçlarda 1 günlük dayanım değerlerine ısı kür sıcaklığının önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, 56 günlük dayanım değerleri ise %6 Na₂O içeriği ile üretilen harçlarda olduğu gibi ısı kür sıcaklığı artışı ile azalmıştır. En yüksek 28 günlük eğilme dayanımı ise 8-75-8 kodlu harçlarda görülmüştür. %8 Na₂O içeriği ile üretilen 24S serisi harçlarda da en yüksek 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı değerlerine 8-75-24 kodlu harçlarda ulaşılmıştır. 1 günlük eğilme dayanımlarında ise ısı kür sıcaklığı ile kademeli bir artış gözlenmiştir. Şekil 5.6’da %10 Na₂O içeriği ile üretilen harçların eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde en yüksek 1 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri 90 °C’de kür edilen harçlarda gözlenmiştir. En yüksek 56 günlük eğilme dayanımları ise 75 °C’de kür edilen harçlarda elde edilmiştir.



Şekil 5.4. %6 Na₂O ile üretilen harçların eğilme dayanımları



Şekil 5.5. %8 Na₂O ile üretilen harçların eğilme dayanımları



Şekil 5.6. %10 Na₂O ile üretilen harçların eğilme dayanımları

5.1.4. Harçların eğilme dayanımlarına yüksek sıcaklığın ve soğutma koşullarının etkisi

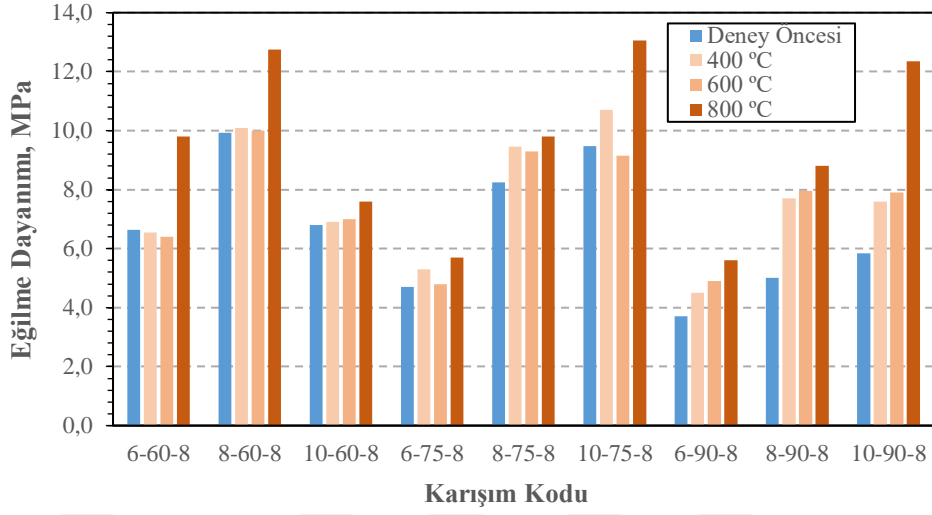
Harçların eğilme dayanımlarında yüksek sıcaklığın etkisiyle meydana gelen değişimler Tablo 5.2 ile Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da sunulmuştur. 400 °C sıcaklık etkisi sonrası yavaş soğumaya maruz bırakılan harçlarda sadece 6-60-8 kodlu harçlarda dayanım kaybı gözlenmiştir. Diğer harçlarda ise deney öncesine göre %1.7 ile %53.7 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. En yüksek dayanım artışı 8-90-8 kodlu harçlarda kaydedilmiştir. 400 °C sıcaklık etkisi sonrası hızlı soğutulan harçlarda %1.5 ile %65.8 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. En yüksek dayanım artışları 8-90-8 kodlu harçlarda %59.7, 10-90-8 kodlu harçlarda %65.8 olarak belirlenmiştir. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan harçlarda ise eğilme dayanımlarında deney öncesine göre %32.8 ile %76 arasında değişen oranda azalma gözlenmiştir. Sıcaklık 600 °C'ye çıktığında yavaş soğutulan 6-60-8 ve 10-75-8 kodlu harçlarda deney öncesine göre yaklaşık %3.5 dayanım kaybı görülmüştür. 600 °C etkisi sonrası yavaş soğutmaya maruz bırakılan diğer harçlarda ise deney öncesine göre %0.7 ile %58.7 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. 600 °C etkisi sonrası hızlı soğutulan 6-60-8 kodlu harçlarda deney öncesine göre %25.2, 10-60-8 kodlu harçlarda %3, 6-75-8 kodlu harçlarda %4.3, 8-75-8 kodlu harçlarda %15.2 ve 6-90-8 kodlu harçlarda %2.7 eğilme dayanımı kaybı gözlenmiştir. Diğer harçlarda ise deney öncesine göre %9.7 ile

%46.2 arasında değişen oranlarda artış görülmüştür. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan harçlarda ise %50 ile %79 arasında dayanım kayıpları kaydedilmiştir. Sıcaklık 800 °C'ye çıktığında ise yavaş soğutulan harçların dayanımları deney öncesine göre belirgin bir şekilde artmıştır. Hızlı soğutulan harçlarda da benzer durum gözlenmiş, numunelerin hızlı soğutulması dayanım artışını engellememiştir. Ancak, 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan numunelerin eğilme dayanımları deney öncesine göre %16 ile %74 arasında değişen oranlarda azalmıştır. Ani şekilde su ile soğutulan geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası havada soğutulan harçlarla eğilme davranışı açısından benzer davranış göstermediği görülmüştür.

Tablo 5.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları

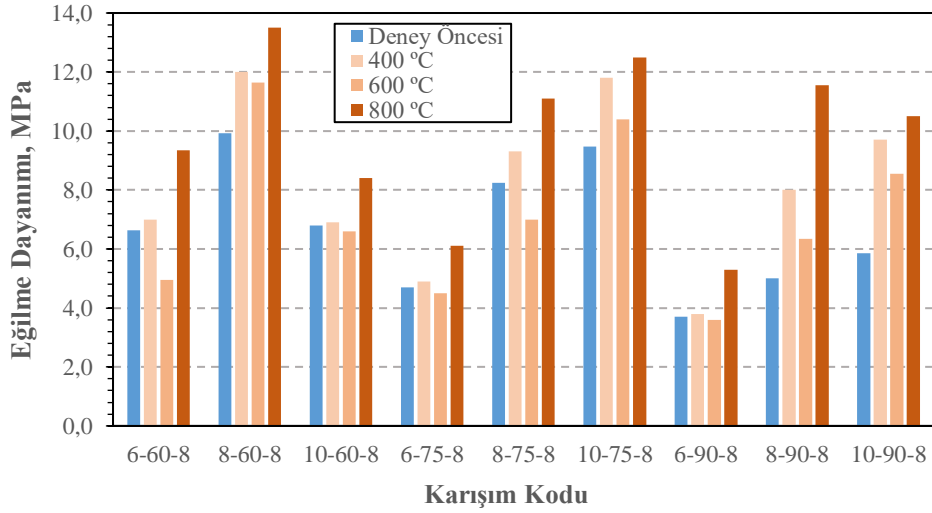
Karışım Kodu	Deney öncesi	400 °C			600 °C			800 °C		
		Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma	Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma	Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma
Eğilme Dayanımı, MPa										
6-60-8	6.6	6.6	7.0	1.6	6.4	5.0	1.4	9.8	9.4	3.4
8-60-8	9.9	10.1	12.0	5.4	10.0	11.7	3.5	12.8	13.5	2.6
10-60-8	6.8	6.9	6.9	4.2	7.0	6.6	3.4	7.6	8.4	2.3
6-75-8	4.7	5.3	4.9	1.4	4.8	4.5	1.3	5.7	6.1	1.6
8-75-8	8.3	9.5	9.3	2.3	9.3	7.0	2.2	9.8	11.1	2.5
10-75-8	9.5	10.7	11.8	3.4	9.2	10.4	3.0	13.1	12.5	3.3
6-90-8	3.7	4.5	3.8	1.5	4.9	3.6	1.8	5.6	5.3	2.3
8-90-8	5.0	7.7	8.0	2.2	8.0	6.4	2.7	8.8	11.6	3.3
10-90-8	5.9	7.6	9.7	2.8	7.9	8.6	3.0	12.4	10.5	4.9

YAVAŞ SOĞUMA

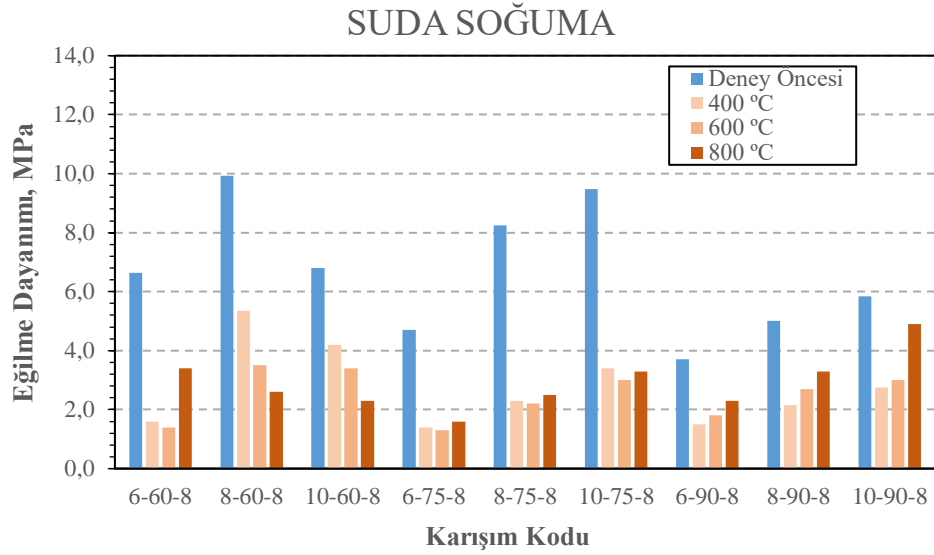


Şekil 5.7. Yavaş soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları

HIZLI SOĞUMA



Şekil 5.8. Hızlı soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları



Şekil 5.9. Suda soğumaya maruz harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları.

5.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Geopolimer harçların 1, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları Tablo 5.1’de sunulmuştur. 8S serisi harçların 1 günlük basınç dayanımları 2.6 MPa ile 6.1 MPa arasında değişirken, 24S serisi harçların 1 günlük basınç dayanımları 3.3 MPa ile 19.6 MPa arasında elde edilmiştir. 8S serisi harçlarda en yüksek 28 günlük basınç dayanımı 33 MPa iken, 24S serisi harçlarda 35.2 MPa olmuştur. 8S serisi harçlarda 56 günlük basınç dayanımları 14.6 MPa ile 47.6 MPa aralığında iken, 24S serisi harçlarda 19.5 MPa ile 49.7 MPa aralığında elde edilmiştir. 8S serisi harçlarda en yüksek 28 günlük basınç dayanımı 8-75-8 kodlu harçta elde edilirken, 24S serisi harçlarda 10-75-24 kodlu harçta elde edilmiştir. Bununla birlikte 8S serisi ve 24S serisi harçlarda en yüksek 56 günlük dayanımları sırasıyla 10-75-8 ve 10-75-24 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Aşağıda harçların basınç dayanımlarına Na₂O konsantrasyonunun, ısıtma sıcaklığının ve süresinin etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir.

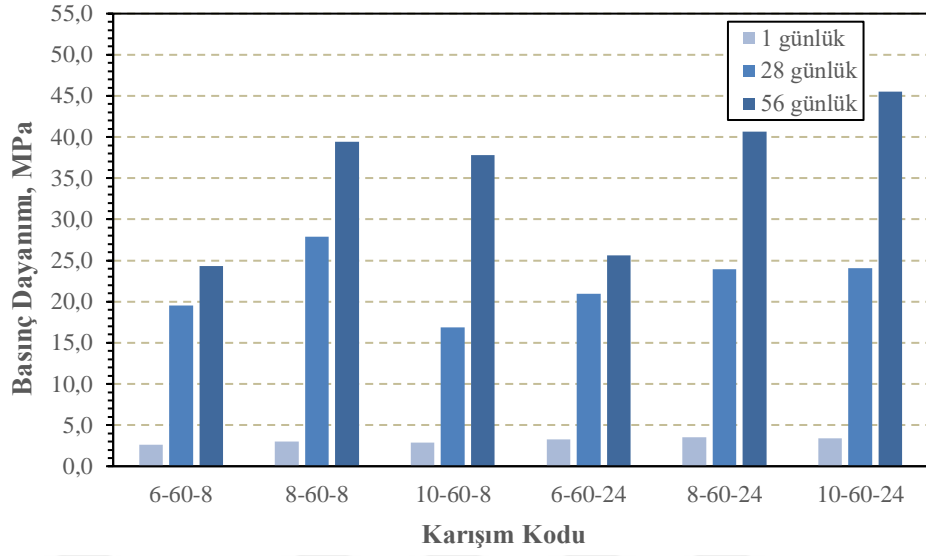
5.2.1. Harçların basınç dayanımlarına Na₂O içeriğinin etkisi

60 °C, 75 °C ve 90°C’de kür edilen geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde 8S serisi harçlarda en yüksek basınç dayanımlarının %8 Na₂O ile üretilen 8-60-8 kodlu harçta olduğu

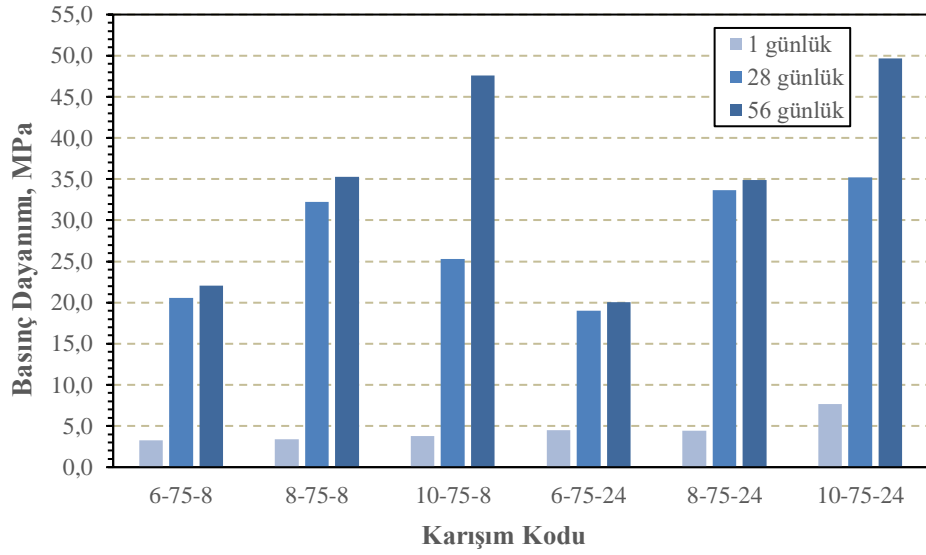
görülmüştür. 60 °C’de 24 saat kür edilen 24S serisi harçlarda ise Na₂O içeriği arttıkça genellikle basınç dayanımı değerleri de artmış, en yüksek 1, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları 10-60-24 kodlu harçta görülmüştür. Şekil 5.11 incelendiğinde 75 °C’de kür edilen 8S serisi harçlarda en yüksek basınç dayanımlarının 1 ve 56 günlük %10 Na₂O ile üretilen 10-75-8 kodlu harçta olduğu görülmüştür. En yüksek 28 günlük basınç dayanımı ise %8 Na₂O ile üretilen 8-75-8 kodlu harçta elde edilmiştir. 75 °C’de kür edilen 24S serisi harçlarda da Na₂O içeriği arttıkça genellikle basınç dayanımı değerleri de artmıştır. 90°C’de kür edilen 8S ve 24S serisi geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımları %10 Na₂O ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. Andezit esaslı geopolimer harçlarda Na₂O içeriğinin basınç dayanımlarına etkisi kür sıcaklığı ve süresine göre değişkenlik göstermiştir

5.2.2. Harçların basınç dayanımlarına ısı kür süresinin etkisi

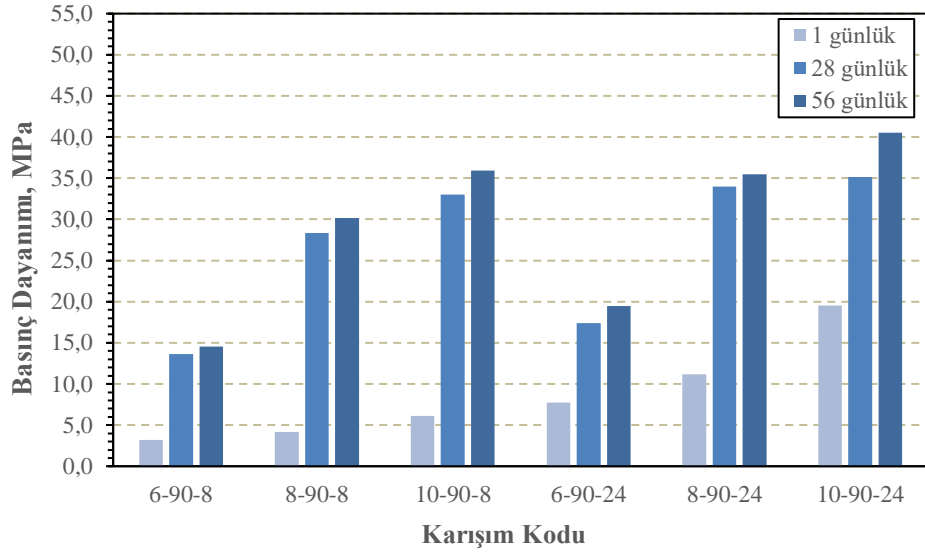
Bu çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlarda sabit Na₂O içeriği ve ısı kür sıcaklığı için ısı kür süresinin etkisi Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de irdelenmiştir. Genellikle ısı kür süresi arttıkça harçların basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir. Bu artış erken yaşlarda özellikle de 1 günlük basınç dayanımlarında daha belirgindir. Ancak, özellikle optimum kür sıcaklığı ve Na₂O içeriği ile üretilen harçlarda ısı kür süresinin artışı basınç dayanımlarını daha az etkilemiştir. Bir başka deyişle uygun Na₂O içeriği ve ısı kür süresi harçlara uygulanması gerekli olan ısı kür süresini kısaltmıştır. Örneğin; 8-75-8 kodlu harçların 28 ve 56 günlük basınç dayanımları 8-75-24 kodlu harçların basınç dayanımları ile neredeyse eşittir. 10-75-8 kodlu harçta da 56 günlük basınç dayanımları 10-75-24 kodlu harçtan %4 daha düşüktür.



Şekil 5.10. 60 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları



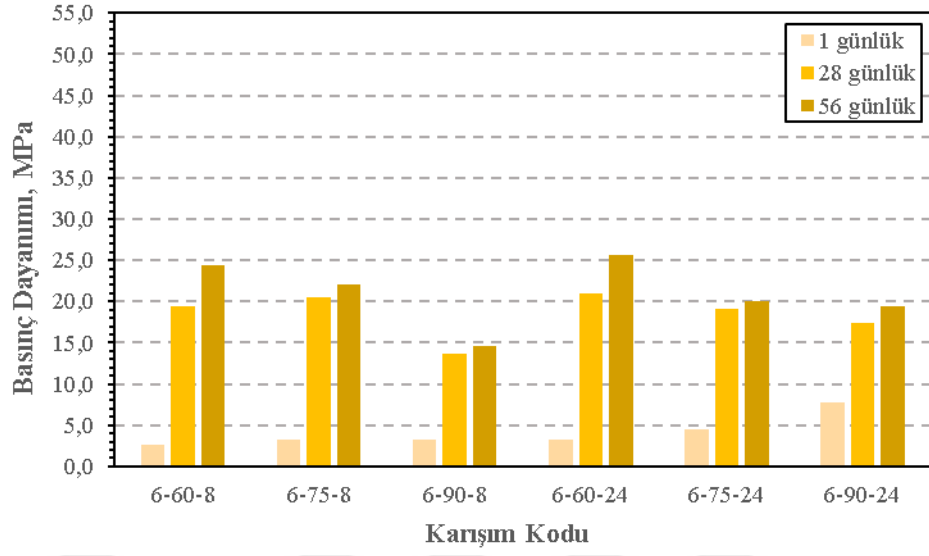
Şekil 5.11. 75 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları



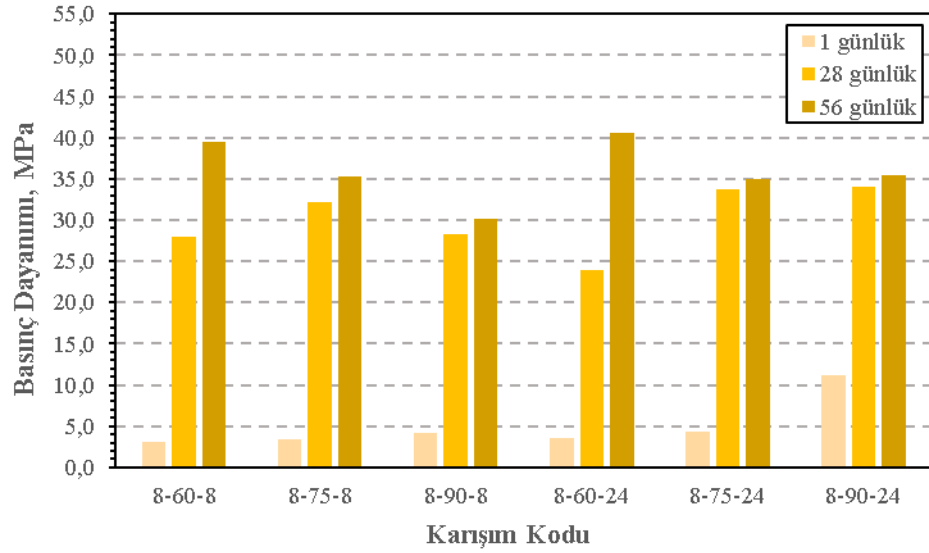
Şekil 5.12. 90 °C’de kür edilen harçların basınç dayanımları

5.2.3. Harçların basınç dayanımlarına ısıl kür sıcaklığının etkisi

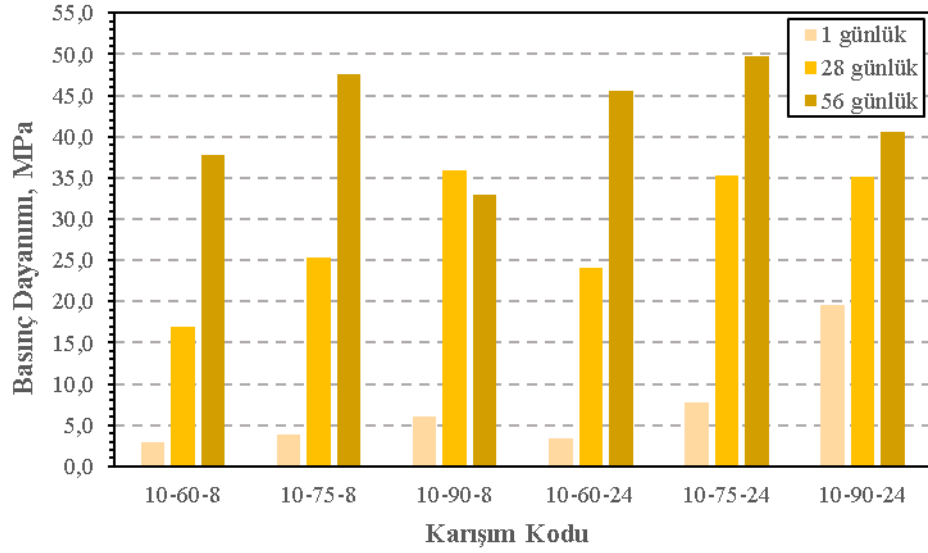
Aşağıda %6, %8 ve %10 Na₂O içeriği ile üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları sırasıyla Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15’de verilmiştir. Şekil 5.13’te %6 Na₂O içeriği ile üretilen harçların basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde hem 8S hem de 24S serisi harçlarda ısıl kür sıcaklığının artması ile harçların 1 günlük basınç dayanımları artarken, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları genellikle azalmıştır. Bu sonuçlara göre %6 Na₂O içeriği ile üretilen harçlarda artan ısıl kür sıcaklığının sadece ilk günlerdeki basınç dayanımına katkısı olduğu söylenebilir. Şekil 5.14’de %8 Na₂O içeriği ile üretilen harçların basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde harçların 1 günlük basınç dayanımlarının ısıl kür sıcaklığı artışı ile birlikte arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, 28 ve 56 günlük dayanım değerlerinde ise ısıl kür sıcaklığı artışı ile harçların basınç dayanımları genellikle azalmıştır. Özellikle 56 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, %8 Na₂O içeriği ile üretilen harçlara uygulanan ısıl kür süresinin 8 saatten 24 saate çıkarılmasının harçların basınç dayanımlarını kayda değer şekilde artırmadığı görülmüştür. Şekil 5.15’de %10 Na₂O içeriği ile üretilen harçların basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde en yüksek 1 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri 90 °C’de kür edilen harçlarda gözlenmiştir. En yüksek 56 günlük basınç dayanımları ise 75 °C’de kür edilen harçlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlar harçların eğilme dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermiştir.



Şekil 5.13. %6 Na₂O ile üretilen harçların basınç dayanımları



Şekil 5.14. %8 Na₂O ile üretilen harçların basınç dayanımları



Şekil 5.15. %10 Na₂O ile üretilen harçların basınç dayanımları

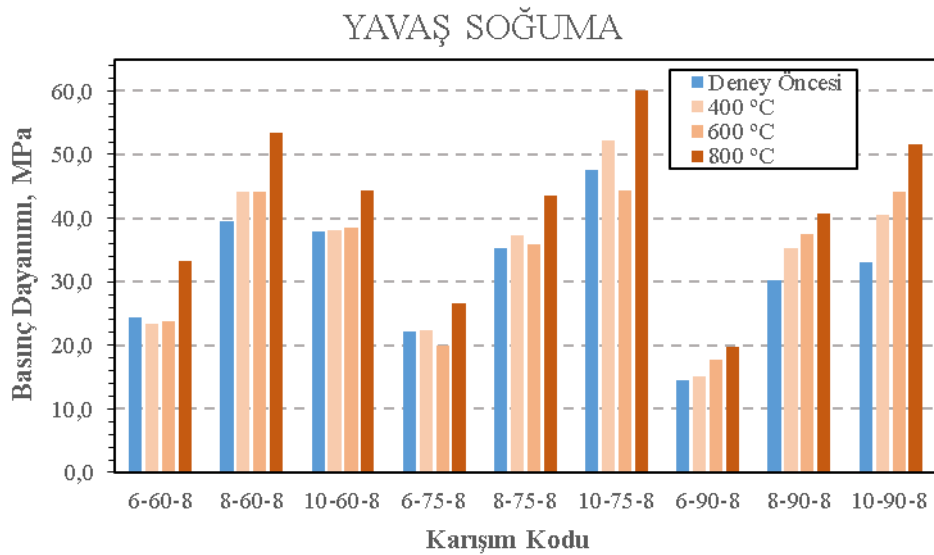
5.2.4. Harçların basınç dayanımlarına yüksek sıcaklığın ve soğutma koşullarının etkisi

Harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklığın etkisiyle meydana gelen değişimler Tablo 5.3 ile Şekil 5.16, 5.17 ve 5.18'de sunulmuştur. 400 °C sıcaklık etkisi sonrası yavaş soğumaya maruz bırakılan harçlarda sadece 6-60-8 kodlu harçlarda dayanım kaybı gözlenmiştir. Diğer harçlarda ise deney öncesine göre %1.5 ile %23.1 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. 400 °C sıcaklık etkisi sonrası hızlı soğutulan harçlarda %0.5 ile %31.8 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. En yüksek dayanım artışları 8-60-8 kodlu harçta %22.5, 10-90-8 kodlu harçta %31.8 olarak belirlenmiştir. 400 °C sıcaklık etkisi sonrası suda soğutulan harçlarda ise basınç dayanımlarında deney öncesine göre %31 ile %50.5 arasında değişen oranda azalma gözlenmiştir. Sıcaklık 600 °C'ye çıktığında yavaş soğutulan 6-60-8, 6-75-8 ve 10-75-8 kodlu harçlarda deney öncesine göre sırasıyla %2.3, %9.5 ve %6.8 oranlarında dayanım kaybı görülmüştür. 600 °C sıcaklık etkisi sonrası yavaş soğutmaya maruz bırakılan diğer harçlarda ise deney öncesine göre %1.5 ile %33.9 arasında değişen oranlarda dayanım artışı görülmüştür. 600 °C sıcaklık etkisi sonrası hızlı soğutulan 6-60-8 kodlu harçlarda deney öncesine göre %4.0, 8-75-8 kodlu harçlarda %5.3, 10-75-8 kodlu harçlarda %1.8 basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Diğer harçlarda ise deney öncesine göre %6.0 ile %26.7 arasında değişen oranlarda artış

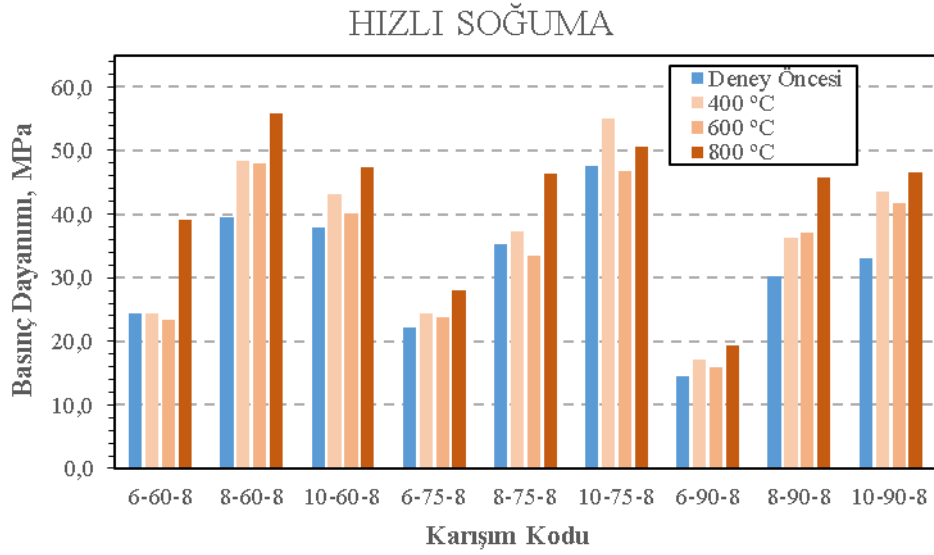
görülmüştür. 600 °C sıcaklık etkisi sonrası suda soğutulan harçlarda ise %4.6 ile %51.5 arasında dayanım kayıpları kaydedilmiştir. Sıcaklık 800 °C'ye çıktığında ise yavaş soğutulan harçların dayanımları deney öncesine göre belirgin bir şekilde artmıştır. Hızlı soğutulan harçlarda da benzer durum gözlenmiş, numunelerin hızlı soğutulması dayanım artışını engellememiştir. Ancak, 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan numunelerin basınç dayanımları deney öncesine göre diğer soğutma koşullarına maruz harçlara göre genellikle daha düşük elde edilmiştir. Bu harçlarda 6-75-8 ve 10-75-8 kodlu harçlar hariç deney öncesine göre daha yüksek basınç dayanımları kaydedilmiştir.

Tablo 5.3. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları

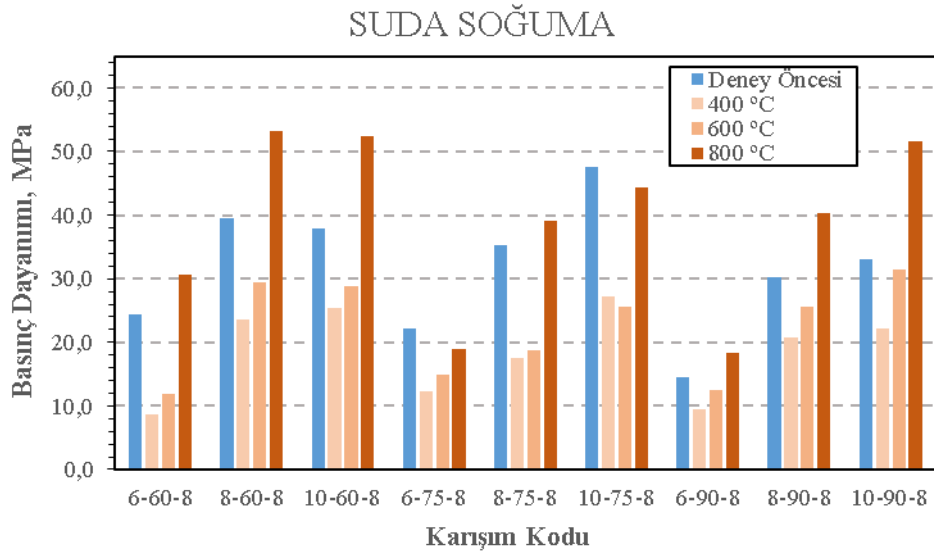
Karışım Kodu	Deney öncesi	400 °C			600 °C			800 °C		
		Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma	Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma	Yavaş Soğuma	Hızlı Soğuma	Suda Soğuma
Basınç Dayanımı, MPa										
6-60-8	24.4	23.4	24.5	8.6	23.8	23.4	11.8	33.2	39.0	30.6
8-60-8	39.4	44.1	48.3	23.7	44.1	47.9	29.4	53.4	55.9	53.2
10-60-8	37.8	38.0	43.2	25.3	38.4	40.1	28.8	44.3	47.3	52.4
6-75-8	22.1	22.4	24.4	12.3	20.0	23.8	15.0	26.7	28.1	18.9
8-75-8	35.3	37.3	37.3	17.5	35.8	33.4	18.8	43.4	46.4	39.1
10-75-8	47.6	52.3	55.1	27.2	44.3	46.7	25.6	60.1	50.5	44.4
6-90-8	14.6	15.1	17.1	9.5	17.7	15.9	12.4	19.8	19.4	18.4
8-90-8	30.1	35.2	36.3	20.8	37.5	37.1	25.7	40.8	45.8	40.4
10-90-8	33.0	40.6	43.5	22.1	44.2	41.8	31.5	51.7	46.5	51.7



Şekil 5.16. Yavaş soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları



Şekil 5.17. Hızlı soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları



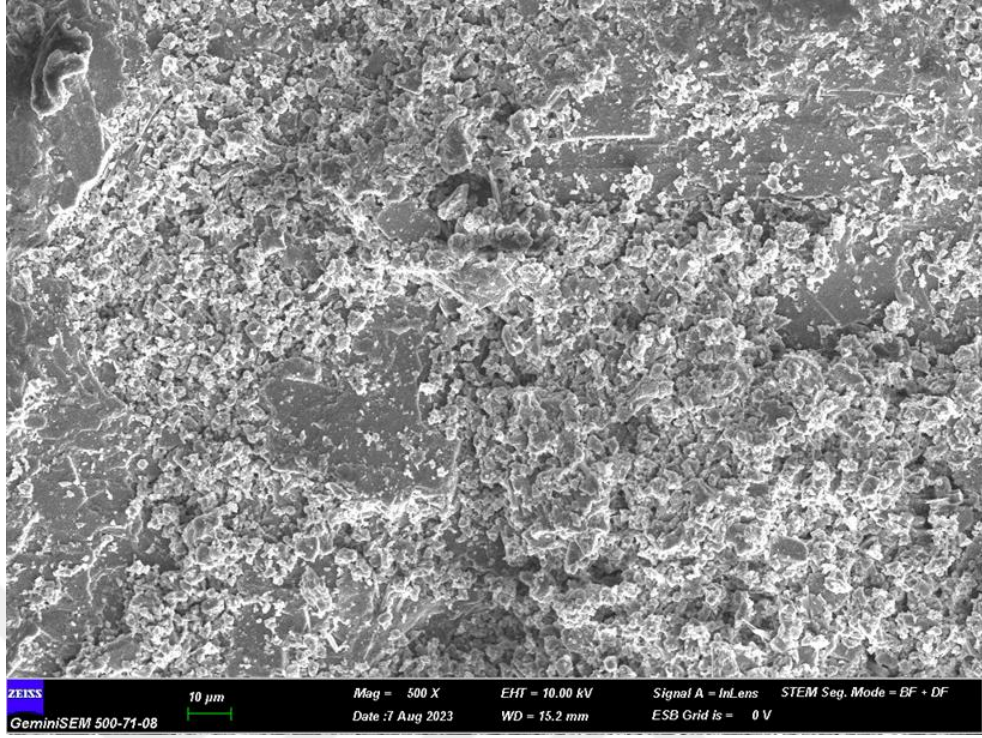
Şekil 5.18. Suda soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları

5.3. SEM/EDX Analiz Sonuçları

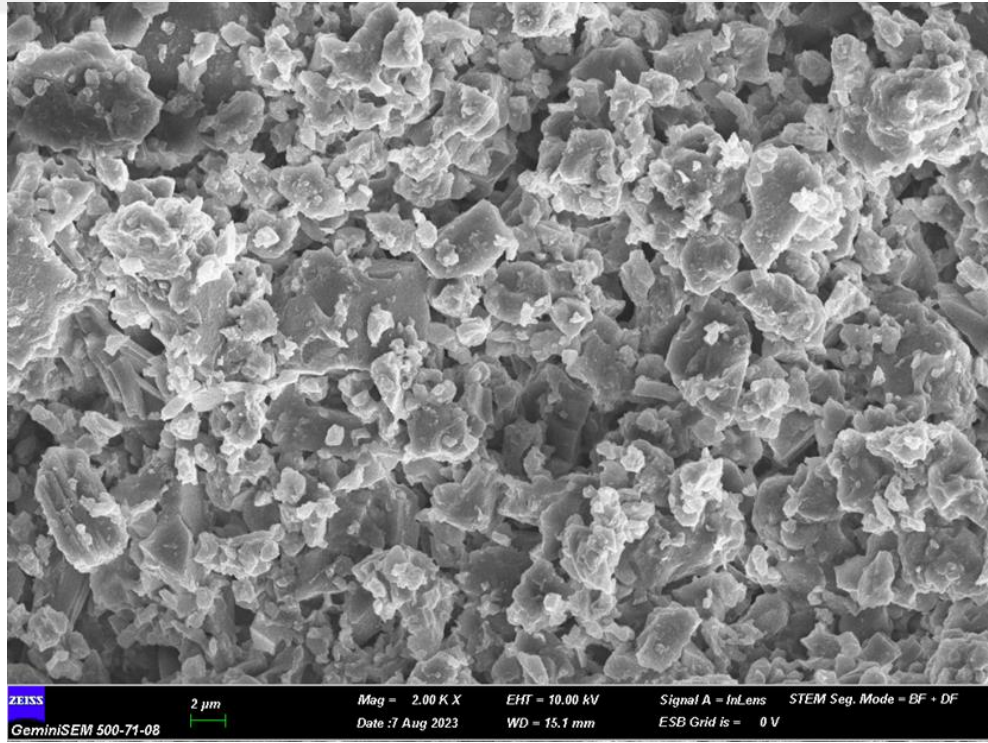
8-60-8 kodlu geopolimer harçlar üzerinde yapılan SEM analizlerinin sonuçları Şekil 5.19 ile Şekil 5.46 arasındaki şekillerde görülmektedir. Geopolimer harçların matrislerinin, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce sıkı ve nispeten homojen olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte reaksiyona girmemiş olduğu tahmin edilen atık andezit tozu parçacıklarına da rastlanmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış olan harç

örneklerinde XRD analizlerinde tespit edilen anortit ve plajiyoklaz kristalleri SEM görüntülerinde de görüntülenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçlarda ise yüksek sıcaklık öncesi görülen andezit tozu parçacıklarına rastlanılmamıştır. Bu durum harçlarda yüksek sıcaklığın etkisiyle meydana gelen dayanım artışının bir sebebi olarak gösterilebilir. Ayrıca, özellikle 600 °C ve 800 °C'ye maruz harçlarda zeolit ve/veya nefelin kristallerine benzer iğnemsî kristal oluşumları gözlenmiştir. Harçların suda soğutulmasının mekanik özelliklere ve harç mikro yapısına olan olumsuz etkisi SEM görüntülerinde de açıkça görülmektedir. Özellikle 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan harçlarda jeopolimer jel oluşumlarının çözüldüğü, yapının daha boşluklu bir hal aldığı ve atık andezit tozu parçacıklarının da açığa çıktığı gözlenmiştir.

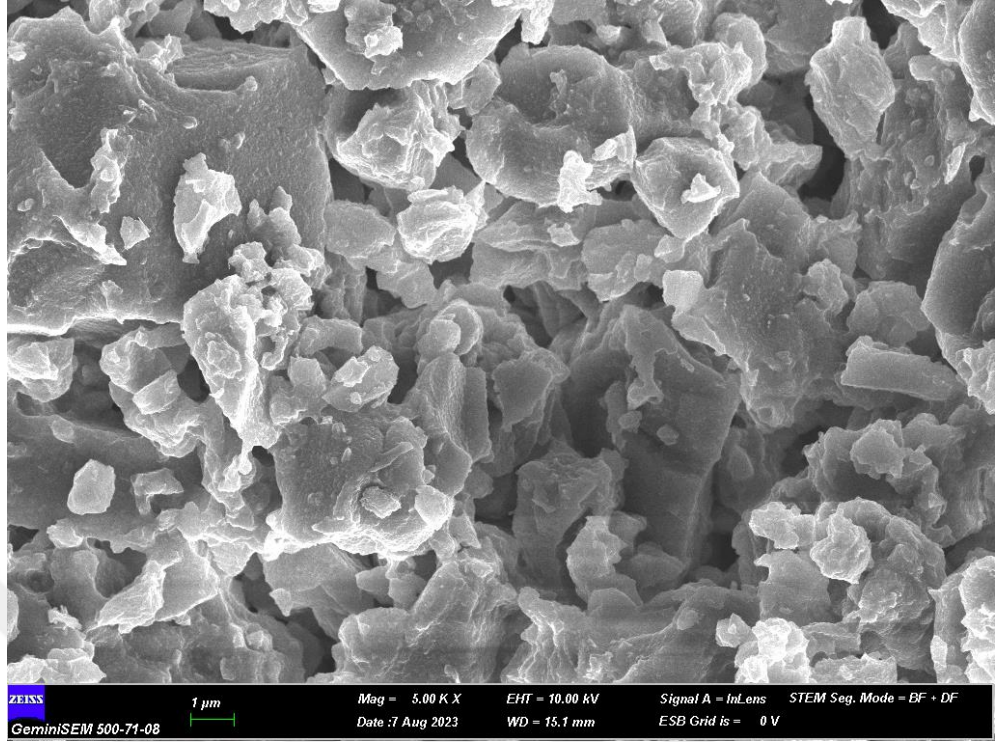
EDX analizleri Şekil 5.47, 5.49, 5.51, 5.53, 5.55, 5.57 ve 5.59'daki SEM analizlerinde işaretlenen alanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. EDX analizlerine ait grafikler ise Şekil 5.48, 5.50, 5.52, 5.54, 5.56, 5.58 ve 5.60'da sunulmuştur. Harçların EDX analizlerinden elde edilen ağırlıkça ve atomik element yüzdeleri de Tablo 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. EDX sonuçlarının sunulduğu tablolar ve şekiller incelendiğinde, harçlarda genellikle O, Al, Na, Si, K ve Ca elementlerinin bulunduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak harçlarda kullanılan hammaddelerin (atık andezit tozu, bazalt kumu ve alkali aktivatör) içeriği gösterilebilir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış olan harçların ağırlıkça Na/Si ve Al/Si oranları sırasıyla yaklaşık olarak 0.19 ve 0.2'dir. Harçların matrislerinin Na/Si oranları 400 °C'de de yaklaşık olarak aynı iken, 800 °C'ye maruz harçların matrislerinin Na/Si oranları 0.33 ve 0.27 olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek sıcaklık öncesi çözünmemiş halde bulunan aktivatör solüsyonunun yüksek sıcaklıkta harç matrisine difüzyonu gösterilebilir. Ayrıca, harçların Al/Si oranları da yüksek sıcaklık etkisiyle 0.2 seviyesinden 0.25 seviyesine kadar çıkmıştır. Bunun sebebi olarak da harçlarda hammadde olarak kullanılan atık andezit tozundan yüksek sıcaklıkta daha fazla Al elementi çözünmesi ve harç matrisine katılması gösterilebilir.



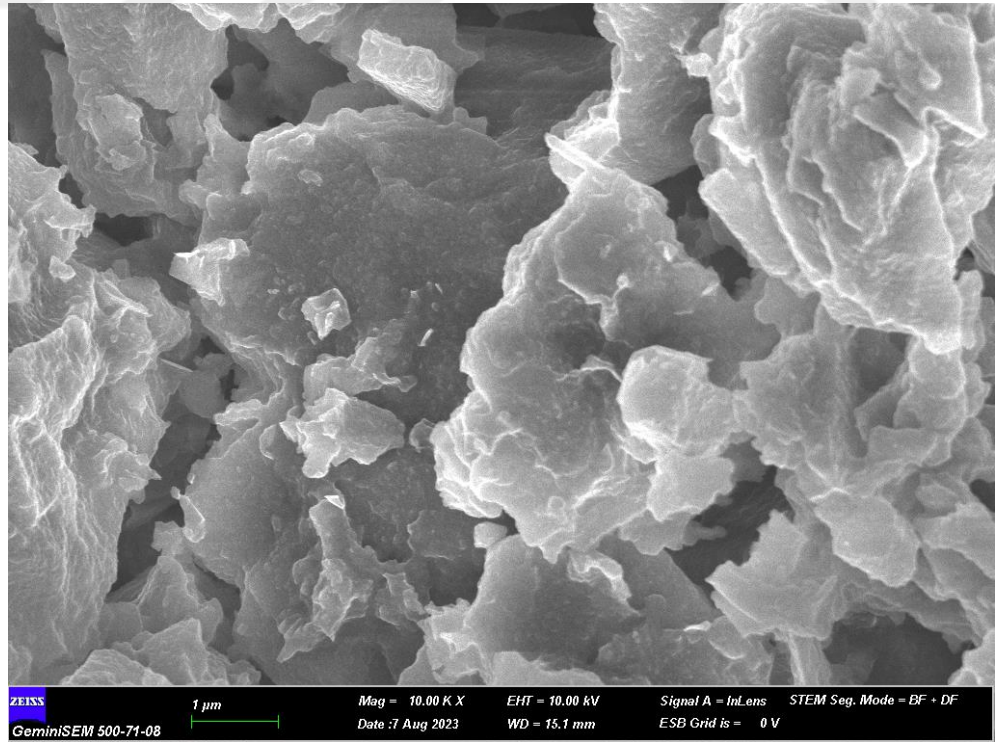
Şekil 5.19. Geopolimer harçları yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (500X)



Şekil 5.20. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (2000X)



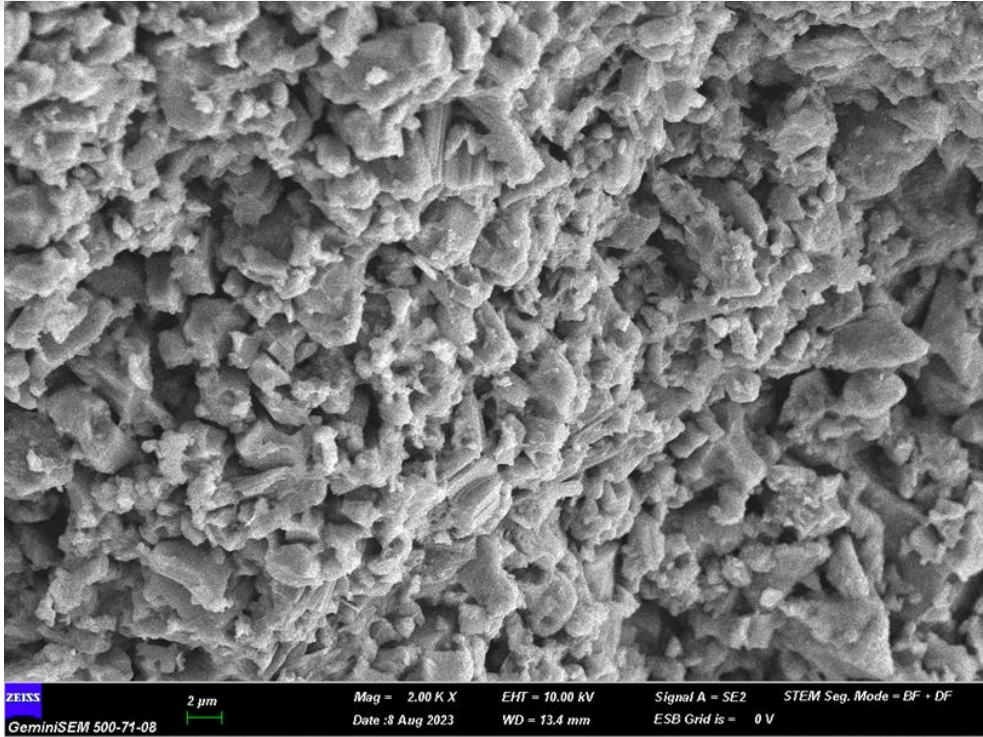
Şekil 5.21. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (5000X)



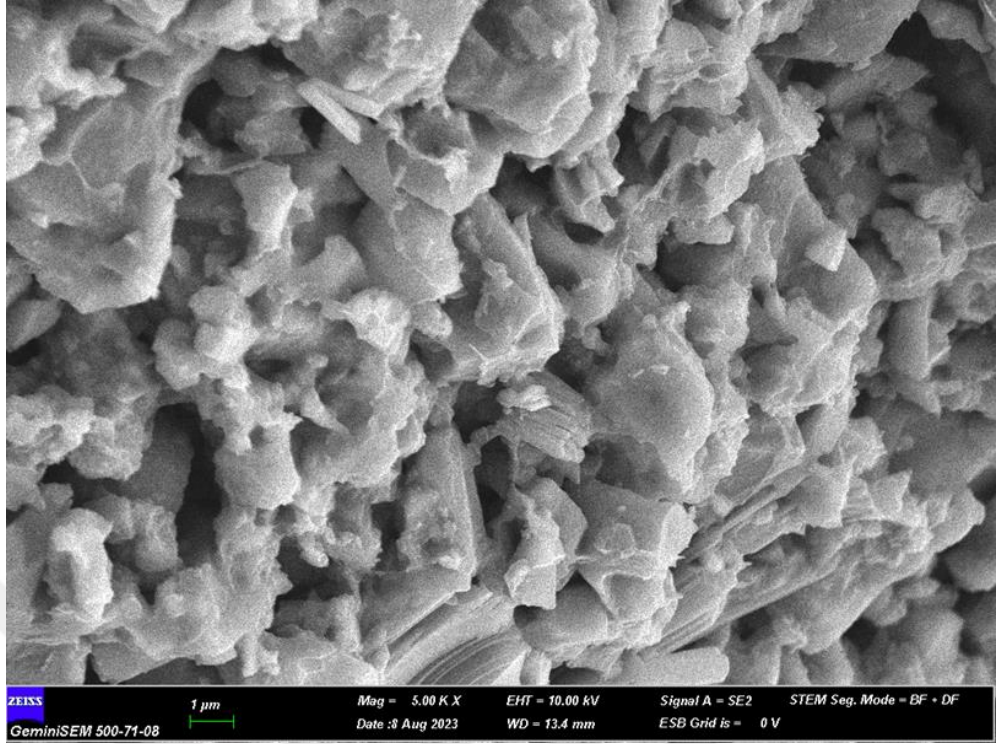
Şekil 5.22. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi SEM görüntüsü (10000X)



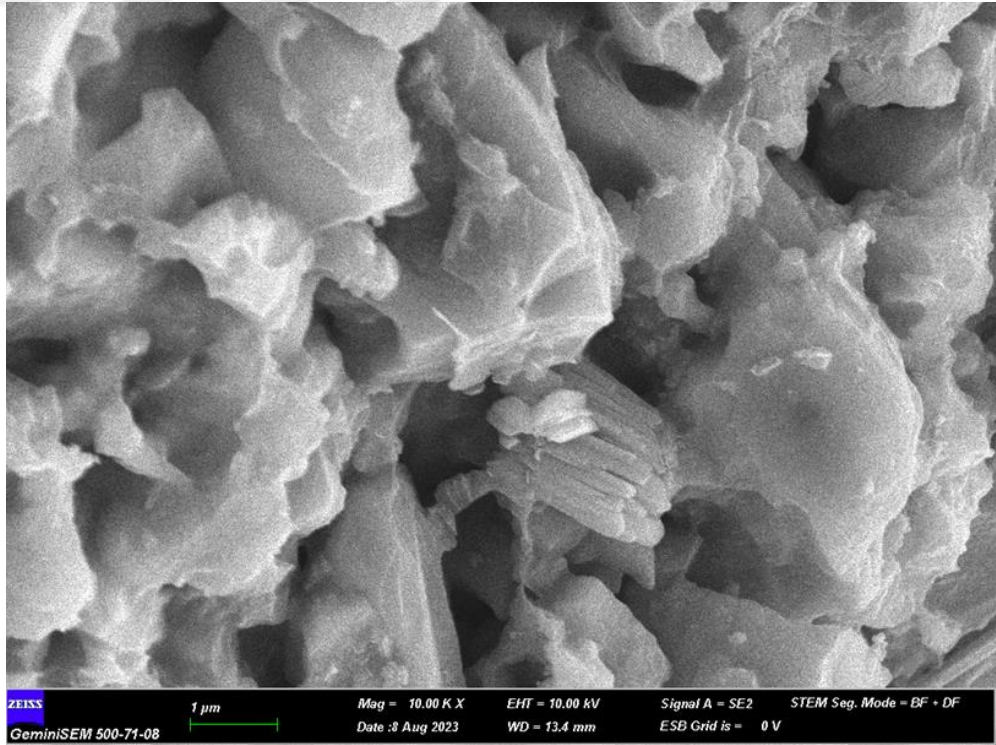
Şekil 5.23. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



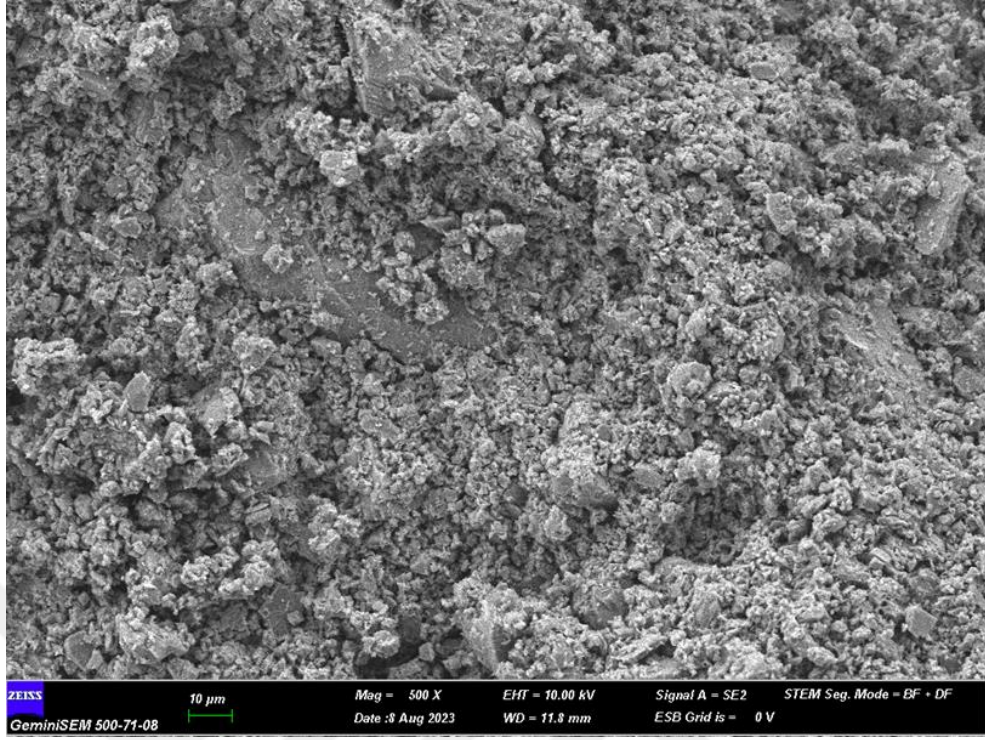
Şekil 5.24. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



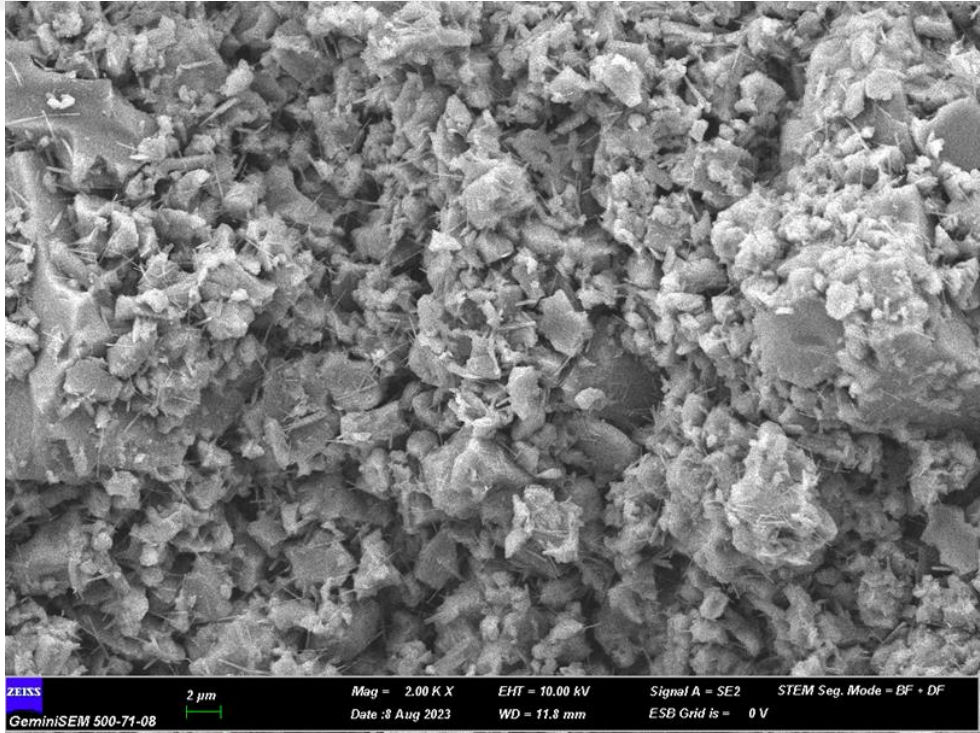
Şekil 5.25. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



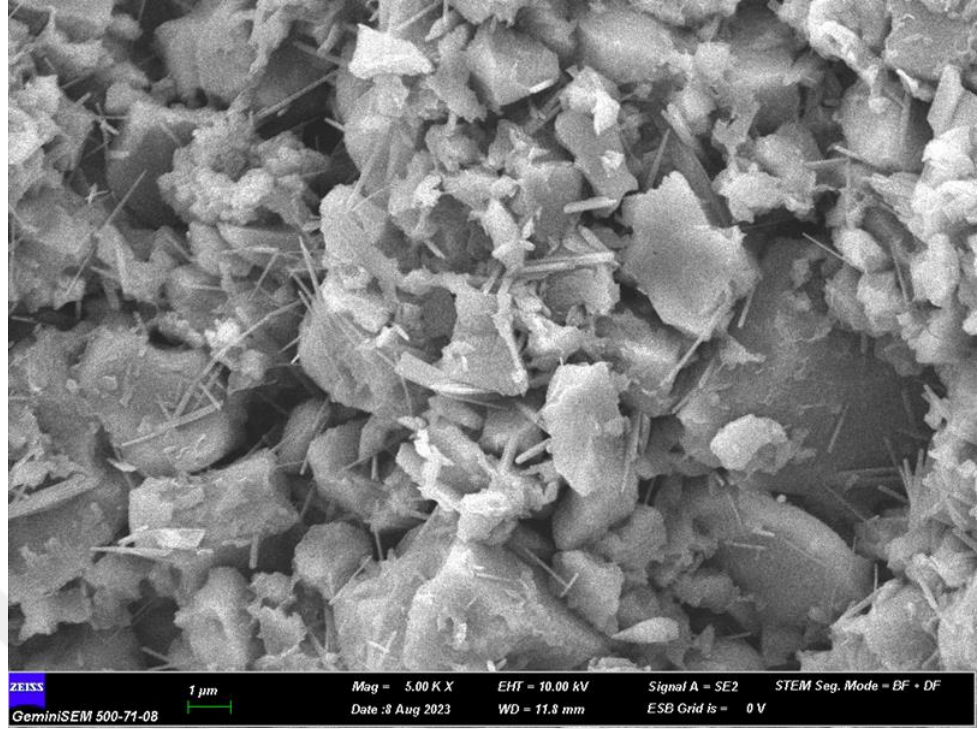
Şekil 5.26. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



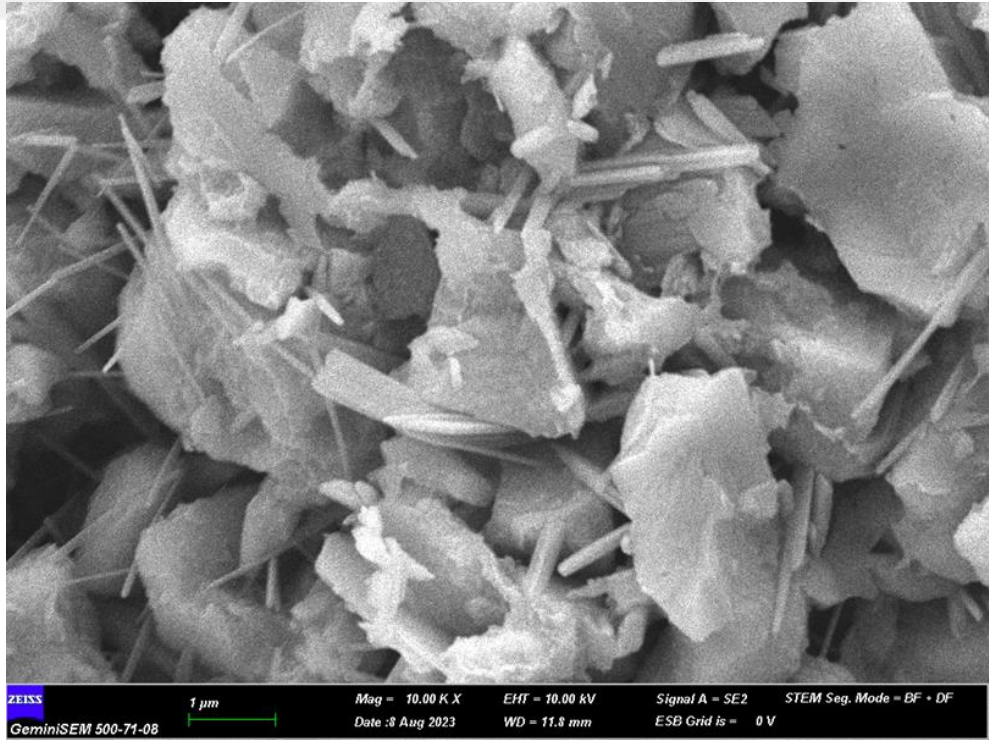
Şekil 5.27. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



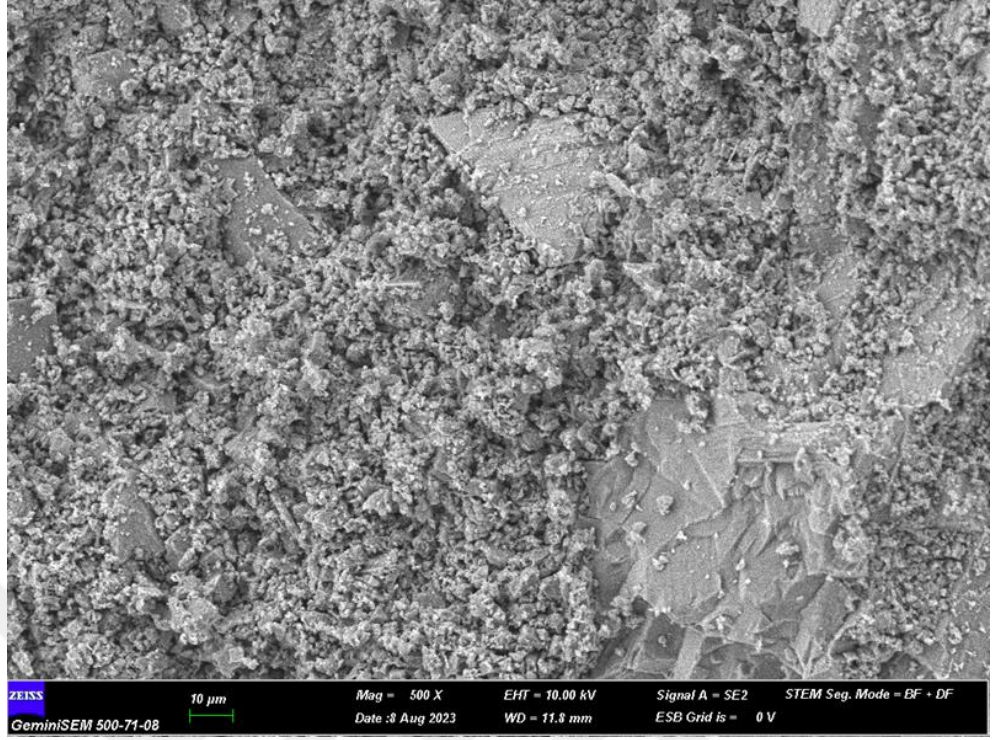
Şekil 5.28. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



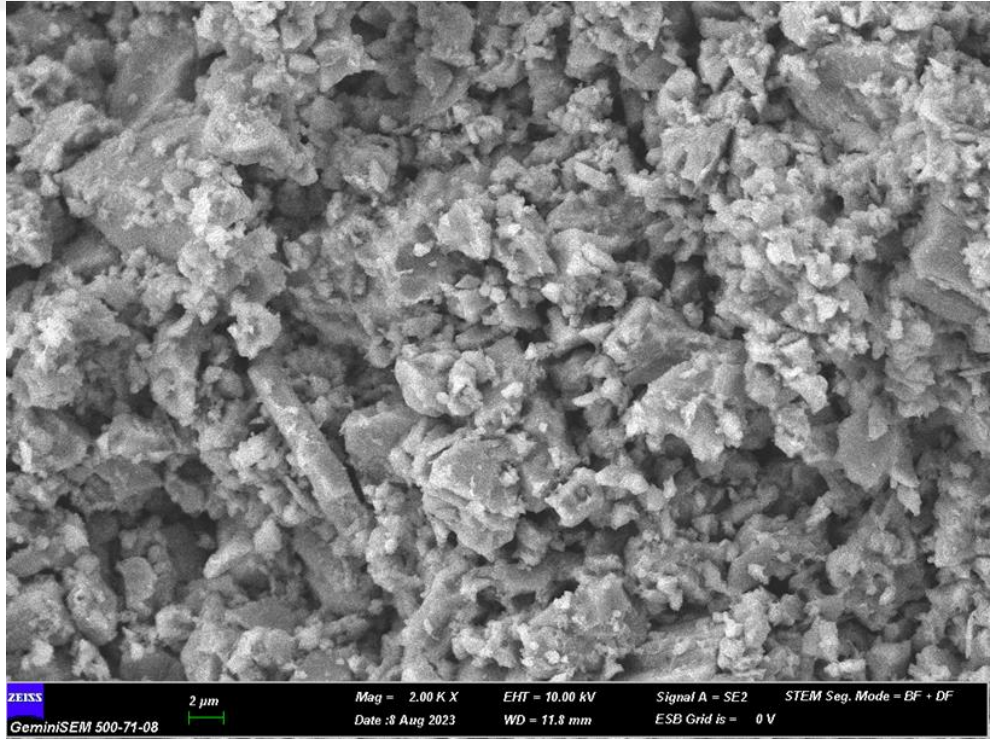
Şekil 5.29. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



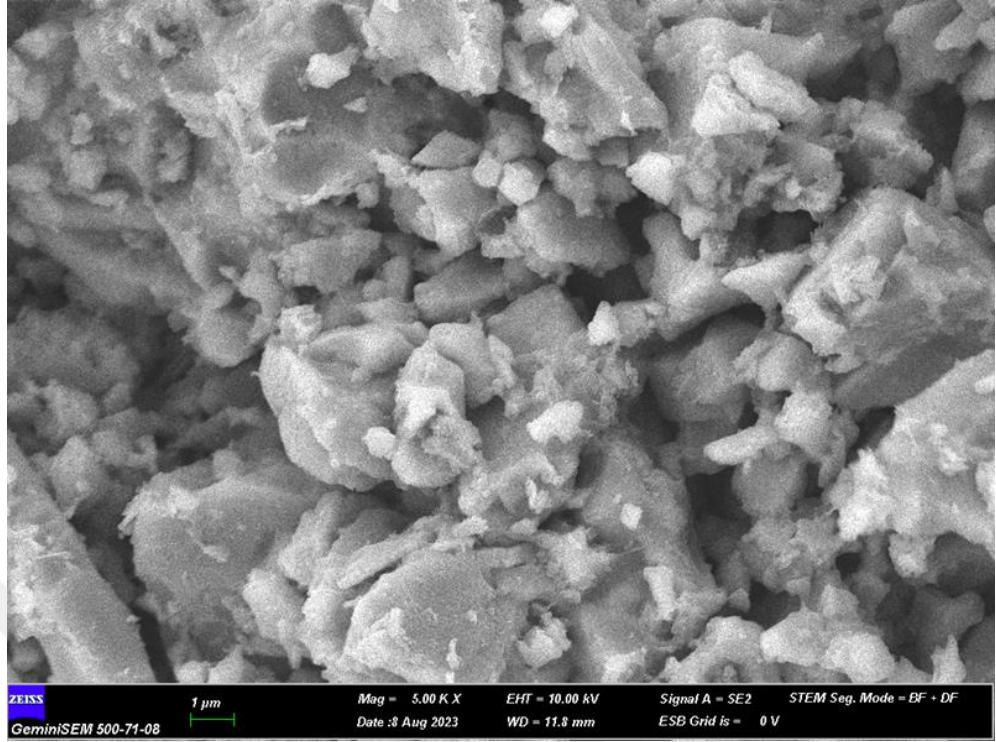
Şekil 5.30. 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



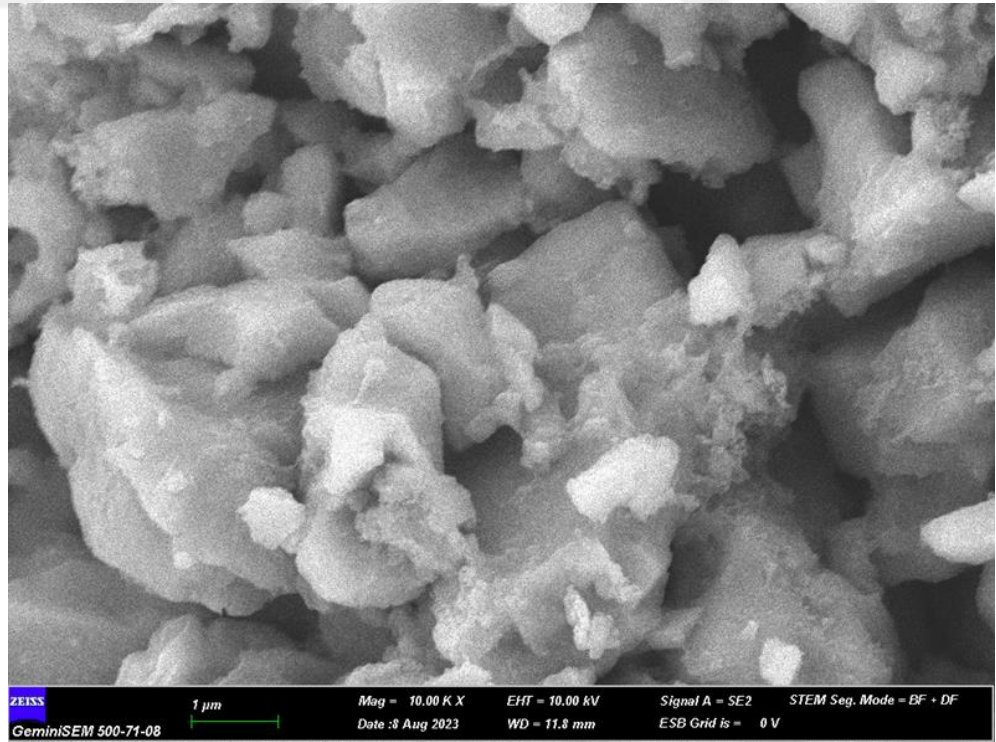
Şekil 5.31. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



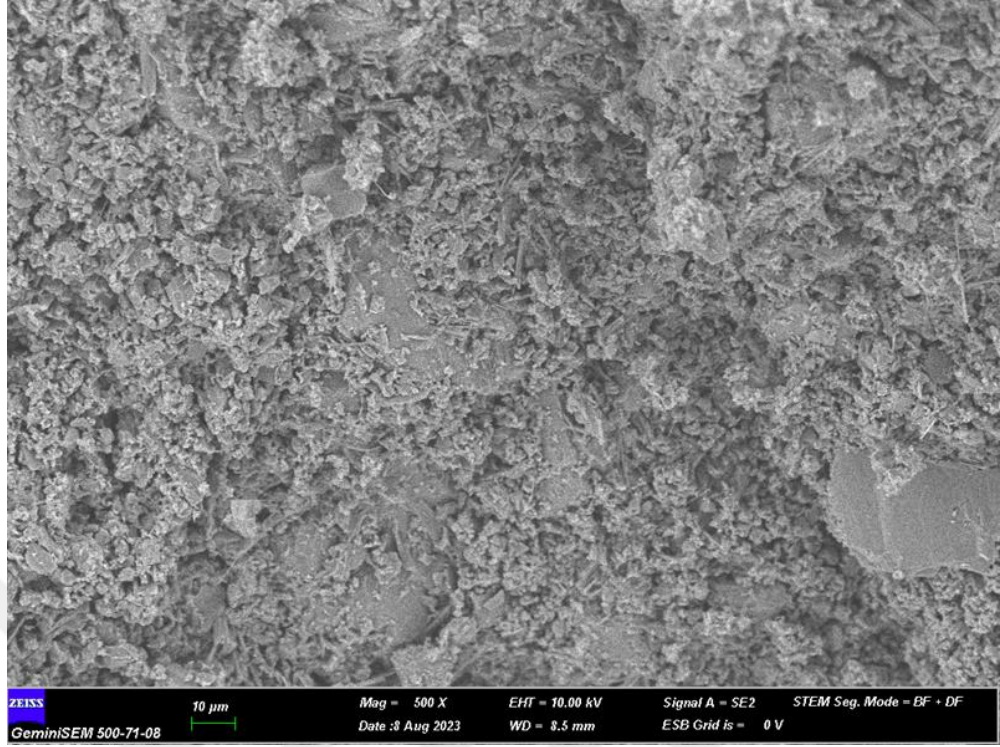
Şekil 5.32. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



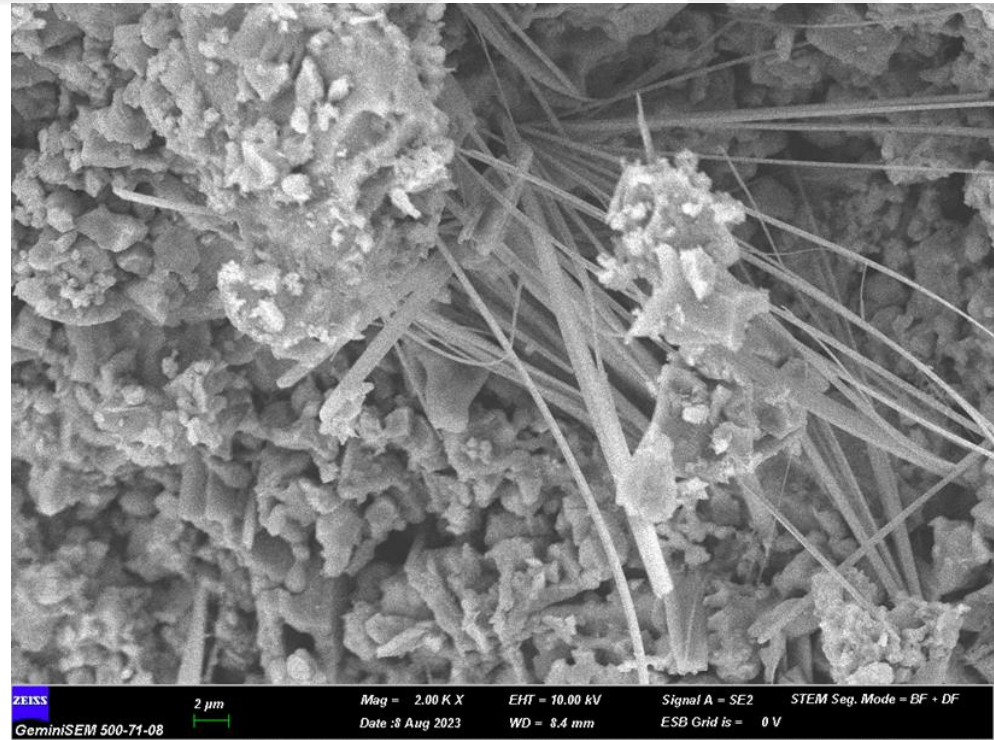
Şekil 5.33. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



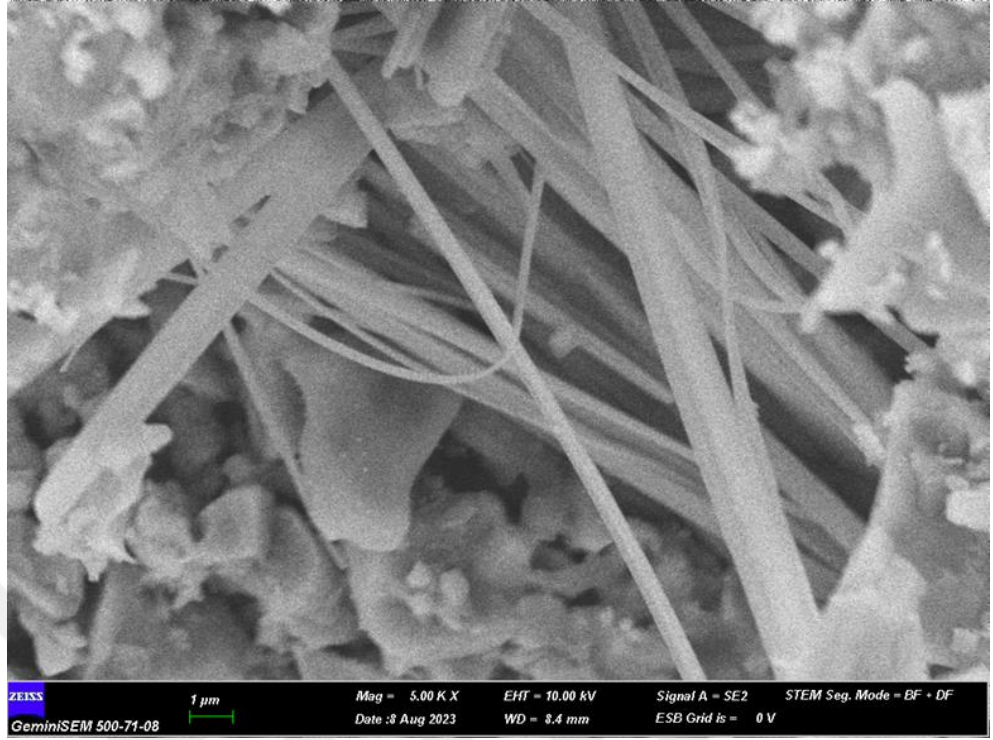
Şekil 5.34. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



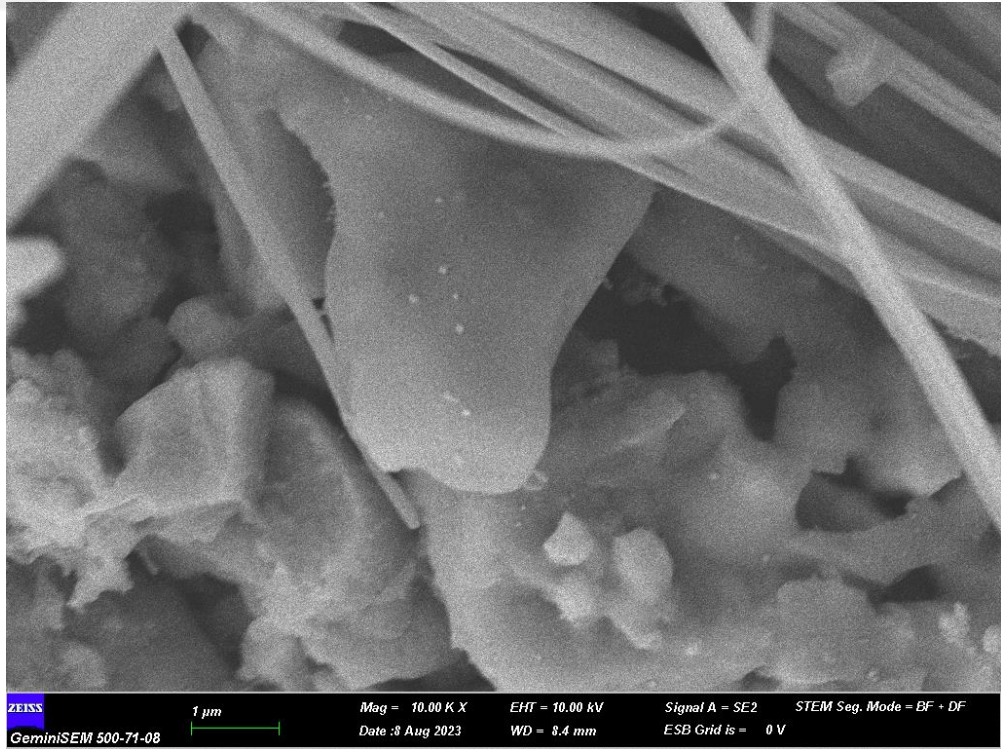
Şekil 5.35. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



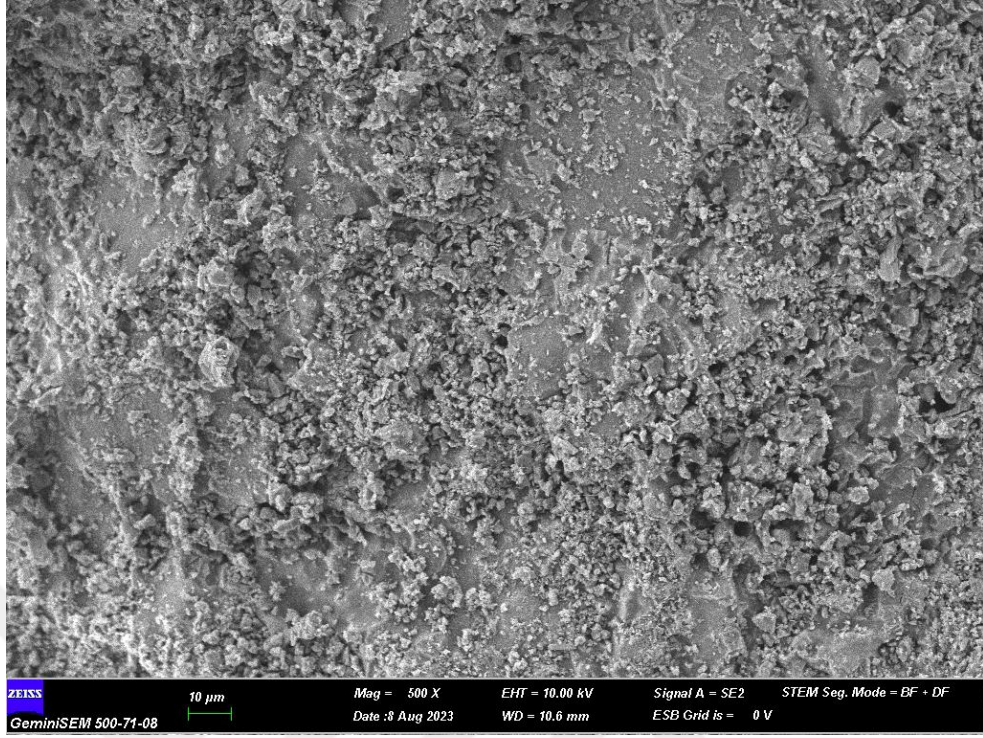
Şekil 5.36. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



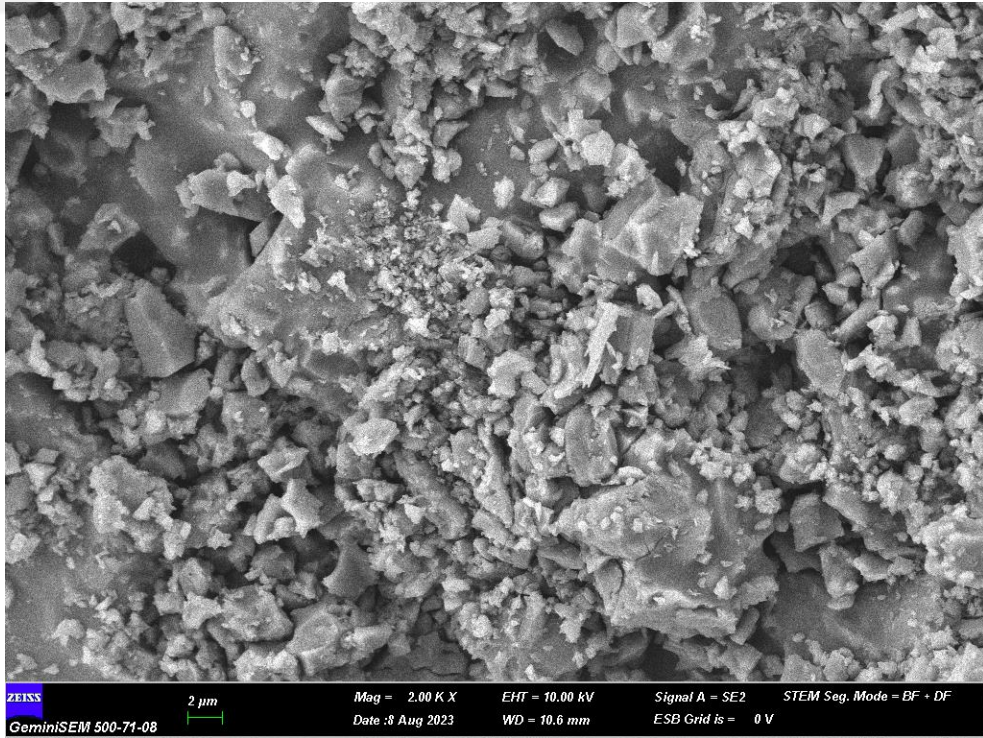
Şekil 5.37. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



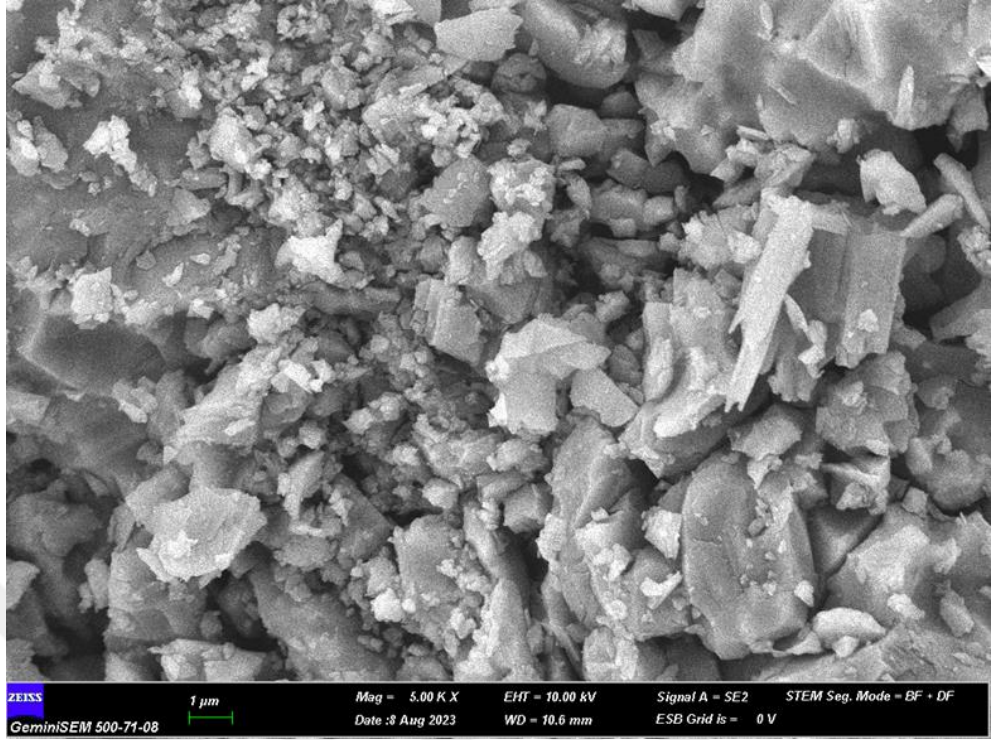
Şekil 5.38. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



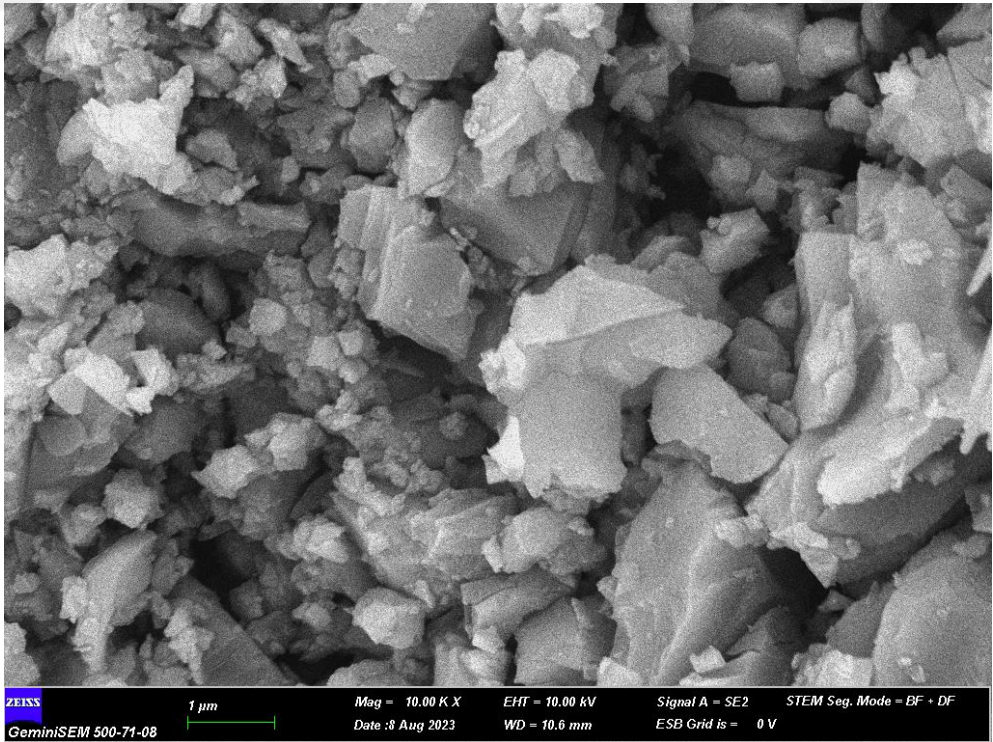
Şekil 5.39. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



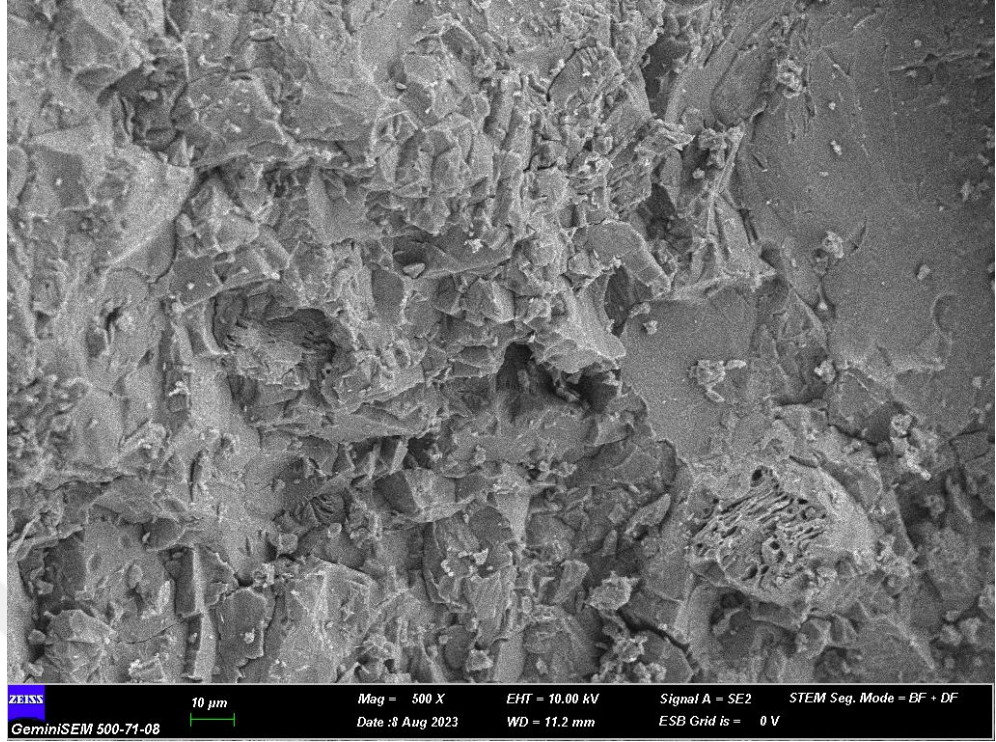
Şekil 5.40. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



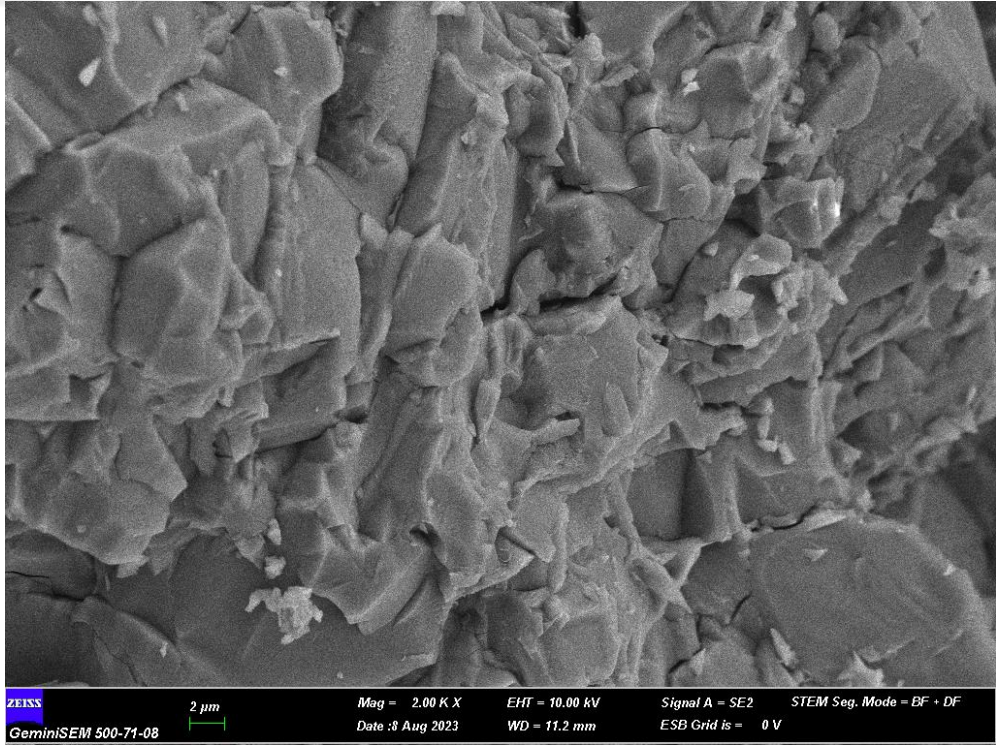
Şekil 5.41. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



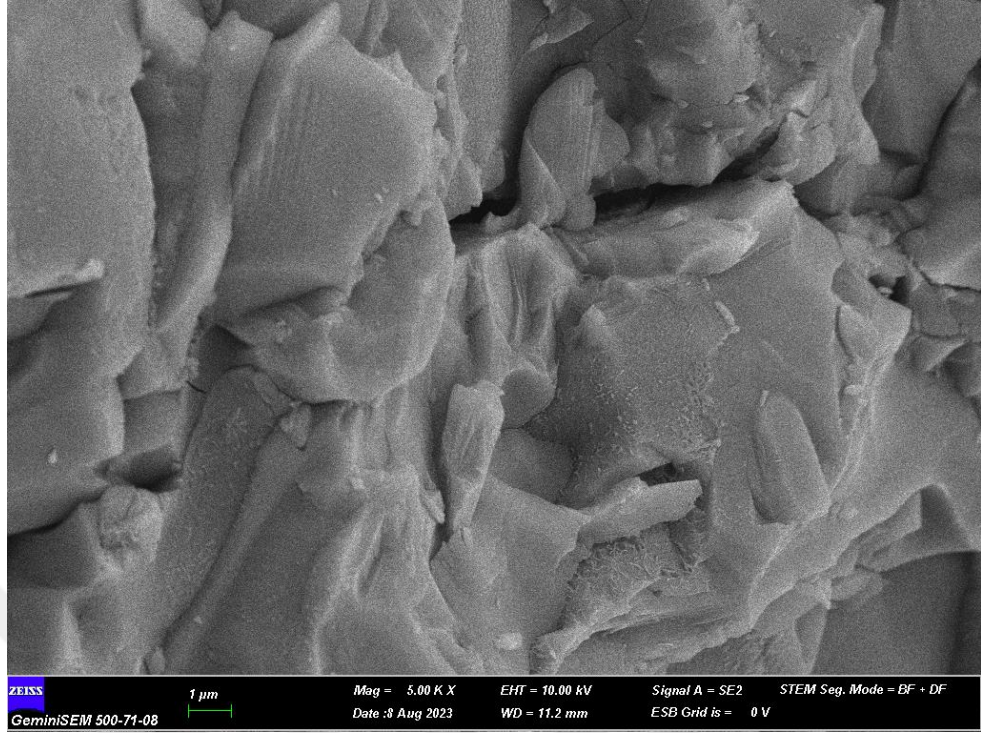
Şekil 5.42. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



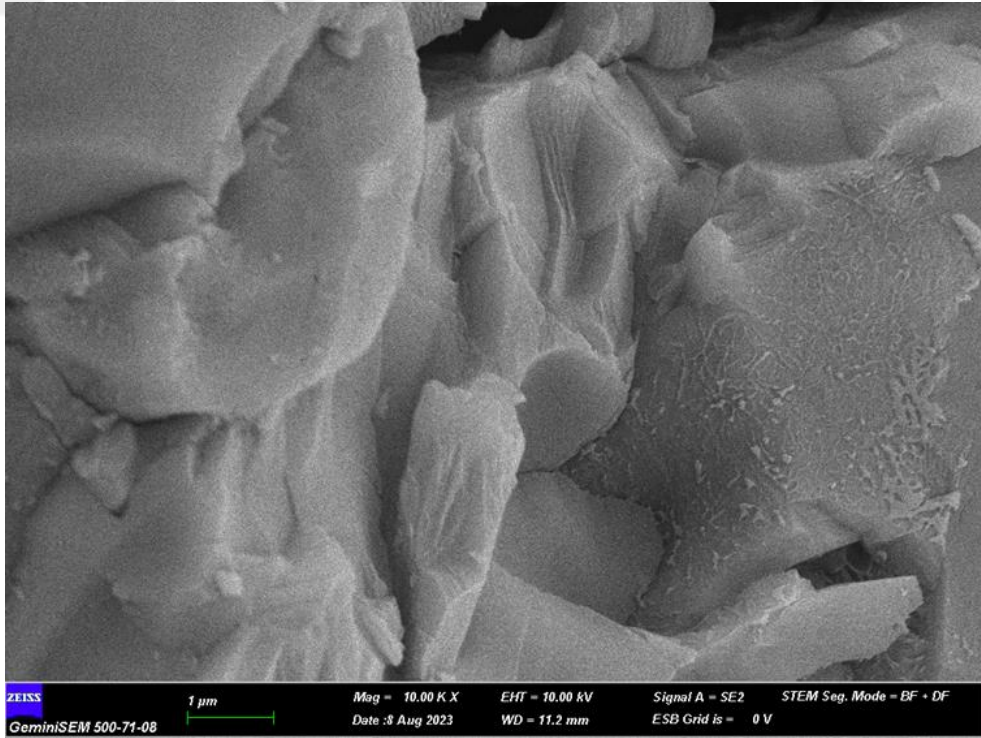
Şekil 5.43. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (500X)



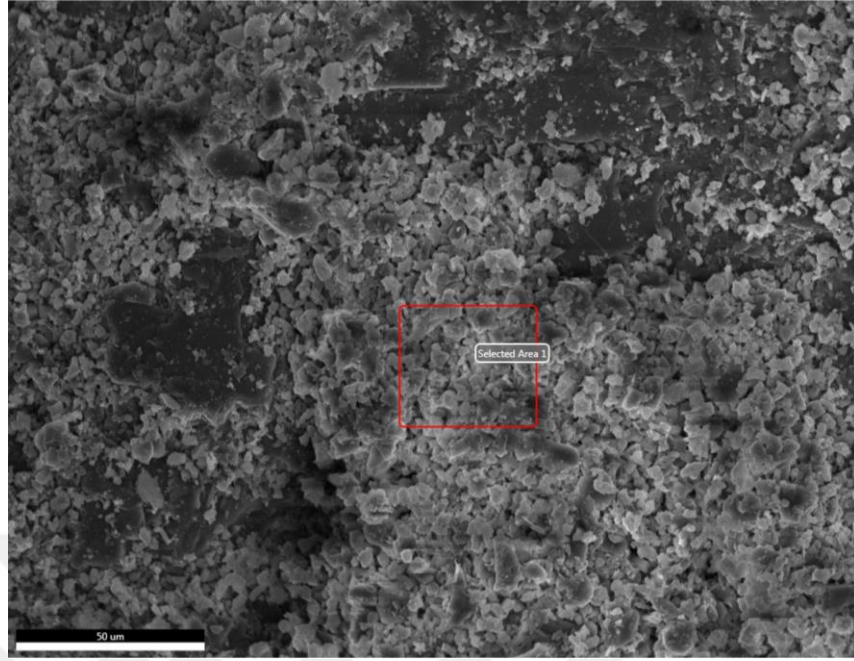
Şekil 5.44. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (2000X)



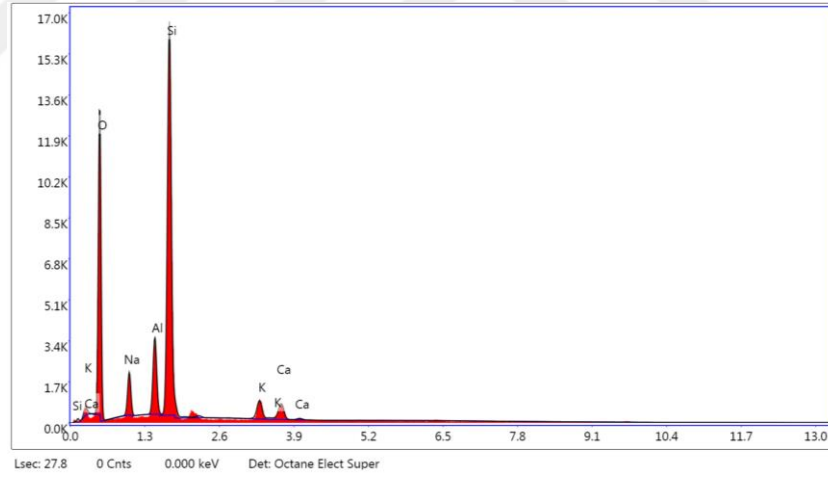
Şekil 5.45. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (5000X)



Şekil 5.46. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların SEM görüntüsü (10000X)



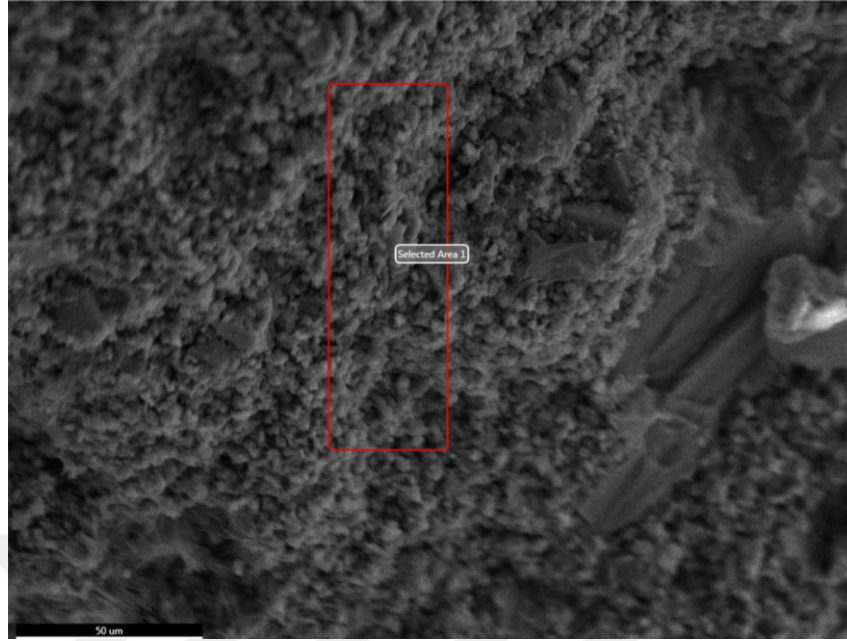
Şekil 5.47. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizinin alındığı alanın görünümü



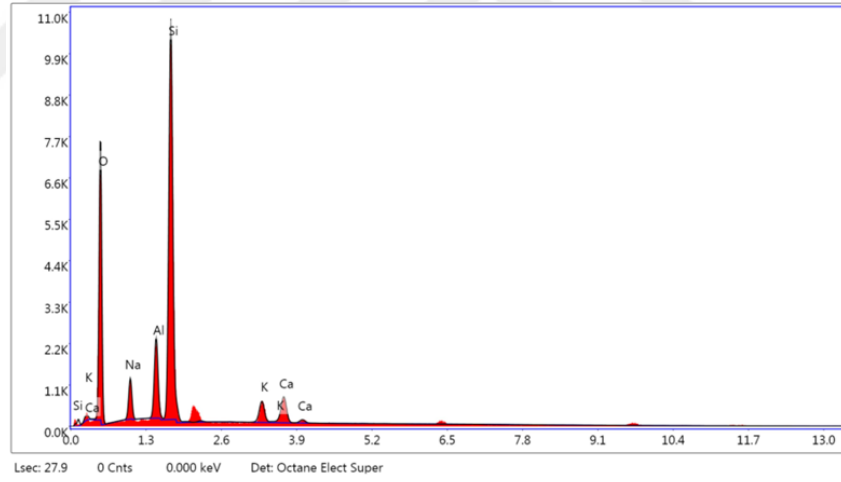
Şekil 5.48. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizi

Tablo 5.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesi EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	48.59	62.49
Na	6.07	5.44
Al	6.5	4.96
Si	32.59	23.87
K	3.06	1.61
Ca	3.18	1.63



Şekil 5.49. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



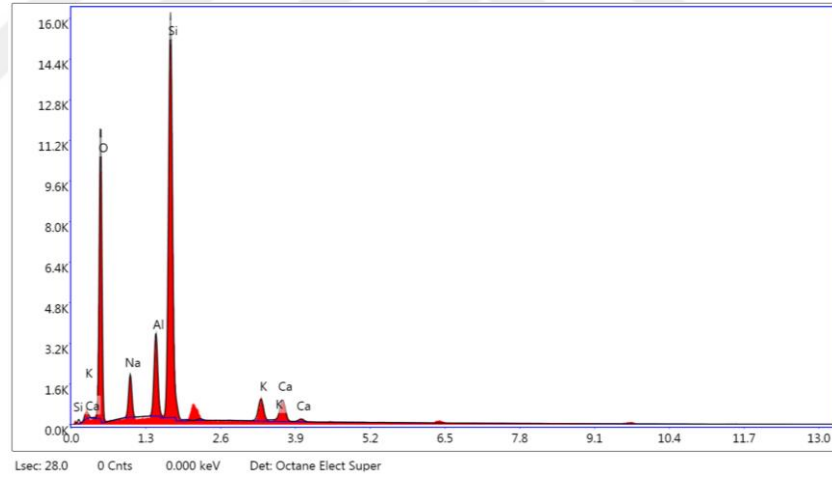
Şekil 5.50. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.5. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	47.24	61.49
Na	5.91	5.36
Al	6.72	5.18
Si	31.89	23.64
K	3.3	1.75
Ca	4.95	2.57



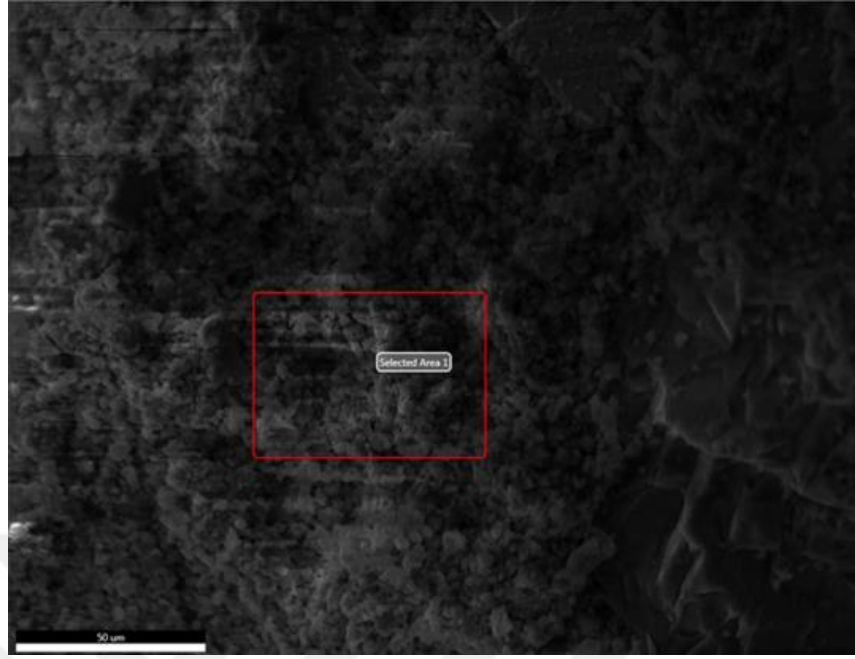
Şekil 5.51. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



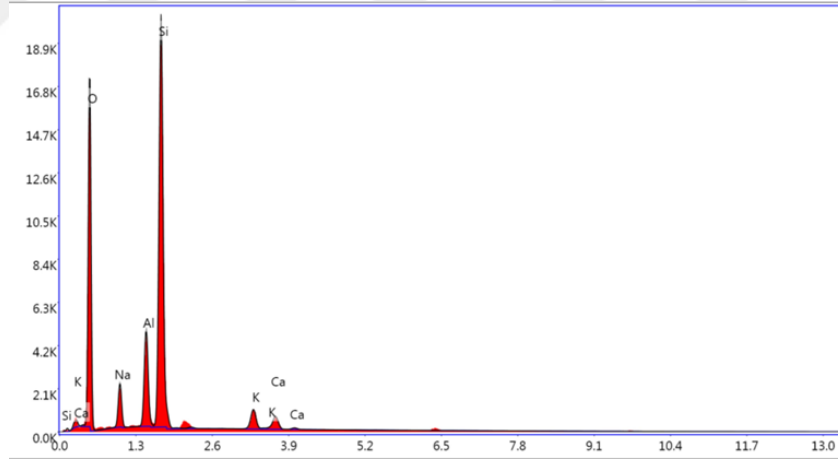
Şekil 5.52. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.6. 400 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	47.5	61.57
Na	6.44	5.81
Al	6.97	5.36
Si	31.71	23.41
K	3.39	1.8
Ca	3.98	2.06



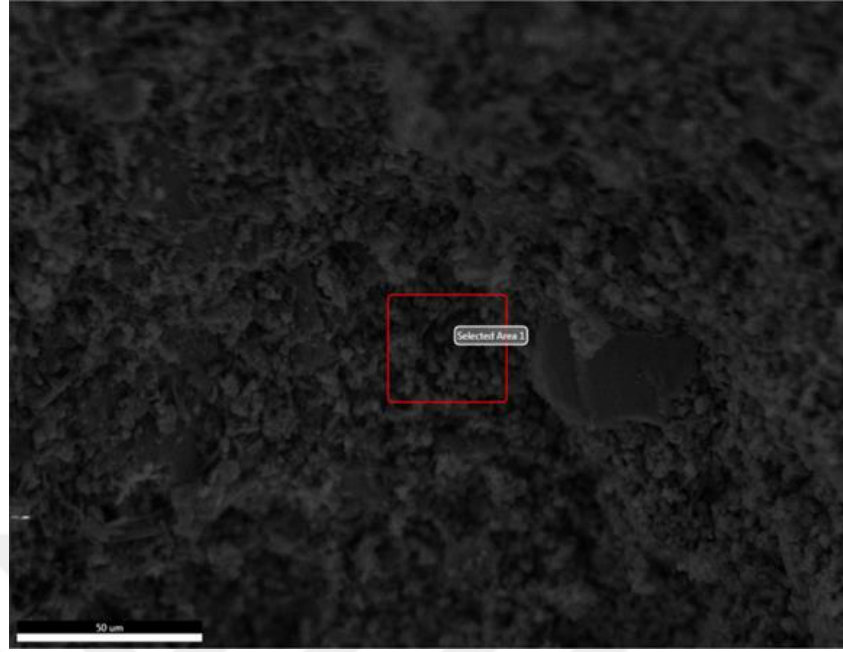
Şekil 5.53. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



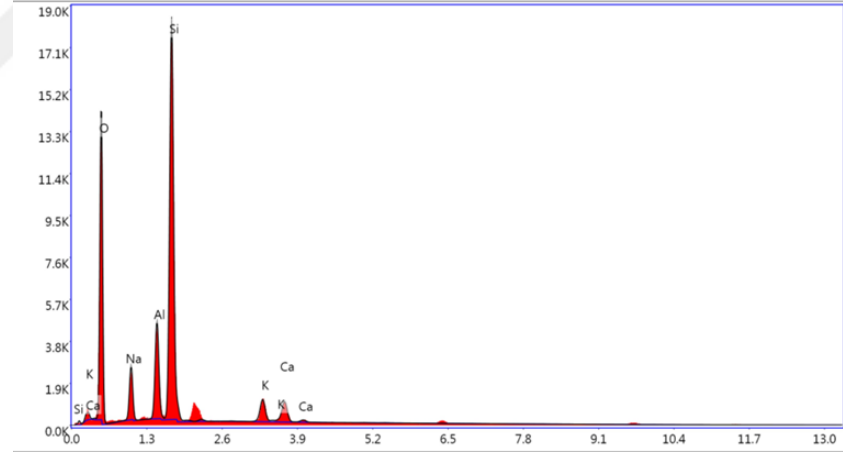
Şekil 5.54. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.7. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	50.15	63.78
Na	5.89	5.21
Al	7.5	5.66
Si	31.34	22.71
K	2.88	1.5
Ca	2.25	1.14



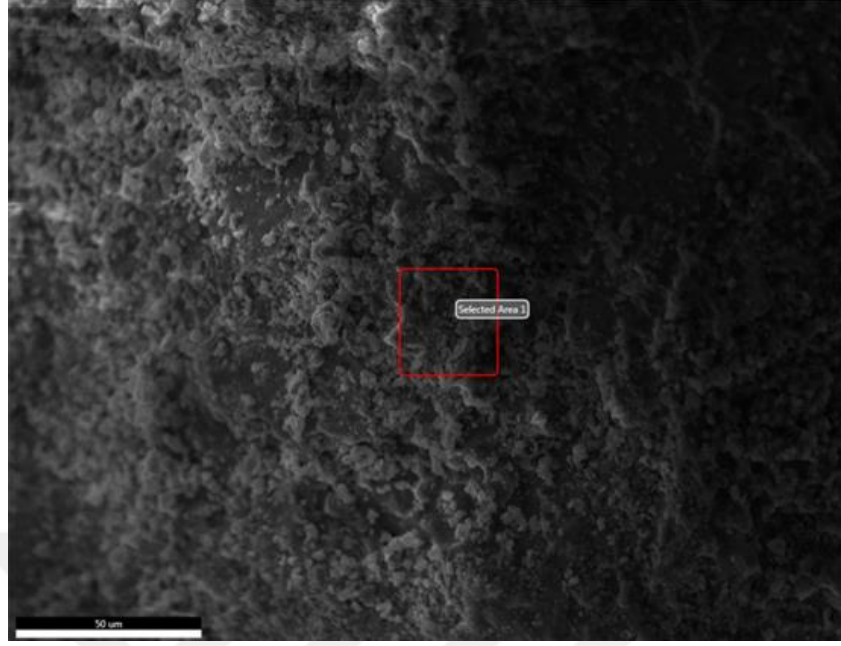
Şekil 5.55. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



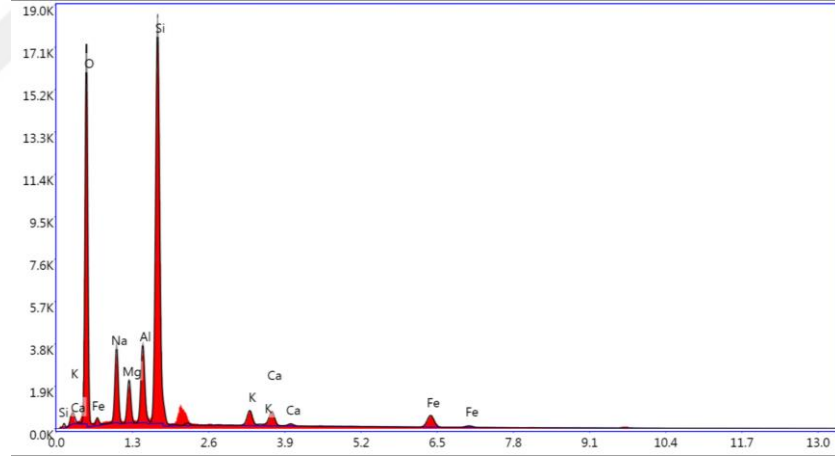
Şekil 5.56. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.8. 600 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	48.41	62.21
Na	7.36	6.59
Al	7.57	5.77
Si	30.12	22.05
K	3.11	1.64
Ca	3.43	1.76



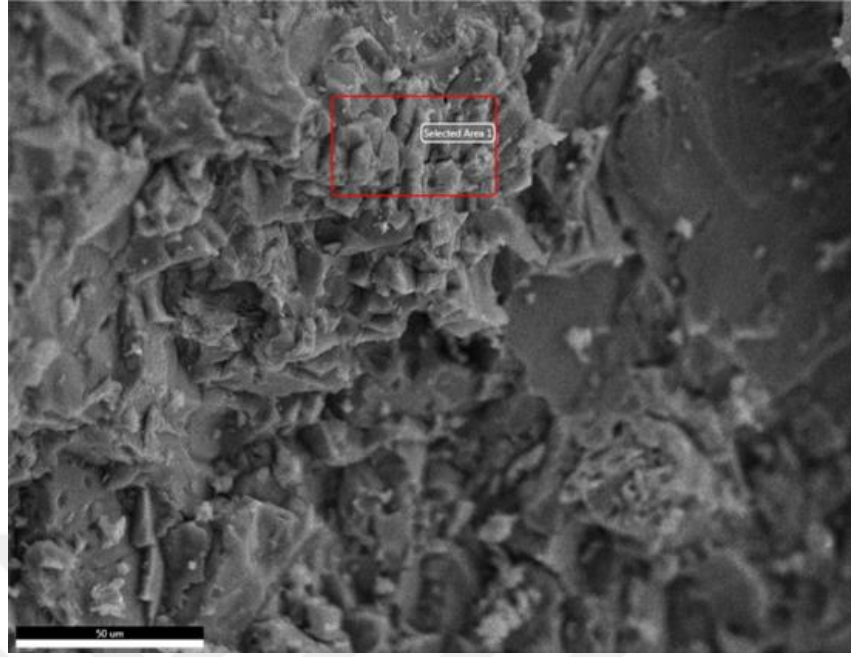
Şekil 5.57. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



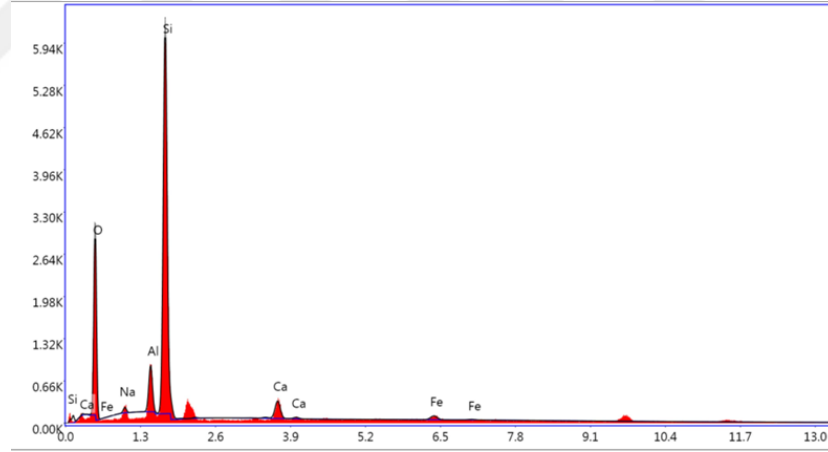
Şekil 5.58. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.9. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	44.84	58.84
Na	9.52	8.7
Al	5.95	4.63
Si	28.13	21.03
K	1.83	0.98
Ca	2.12	1.11



Şekil 5.59. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü



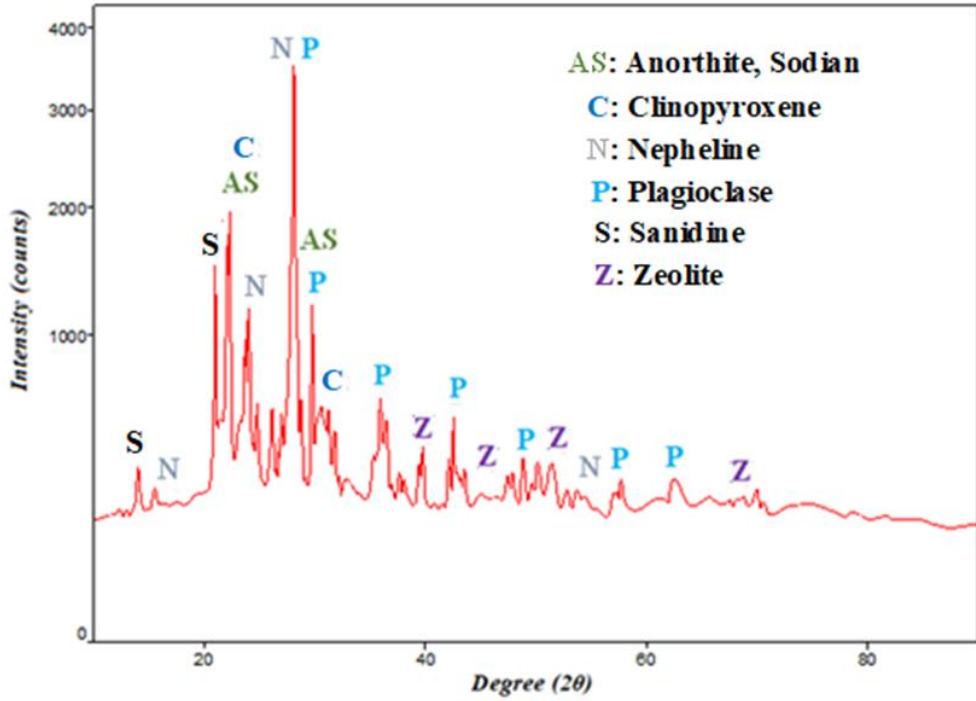
Şekil 5.60. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

Tablo 5.10. 800 °C etkisi sonrası yavaşça havada soğutulan geopolimer harçların EDX analizi

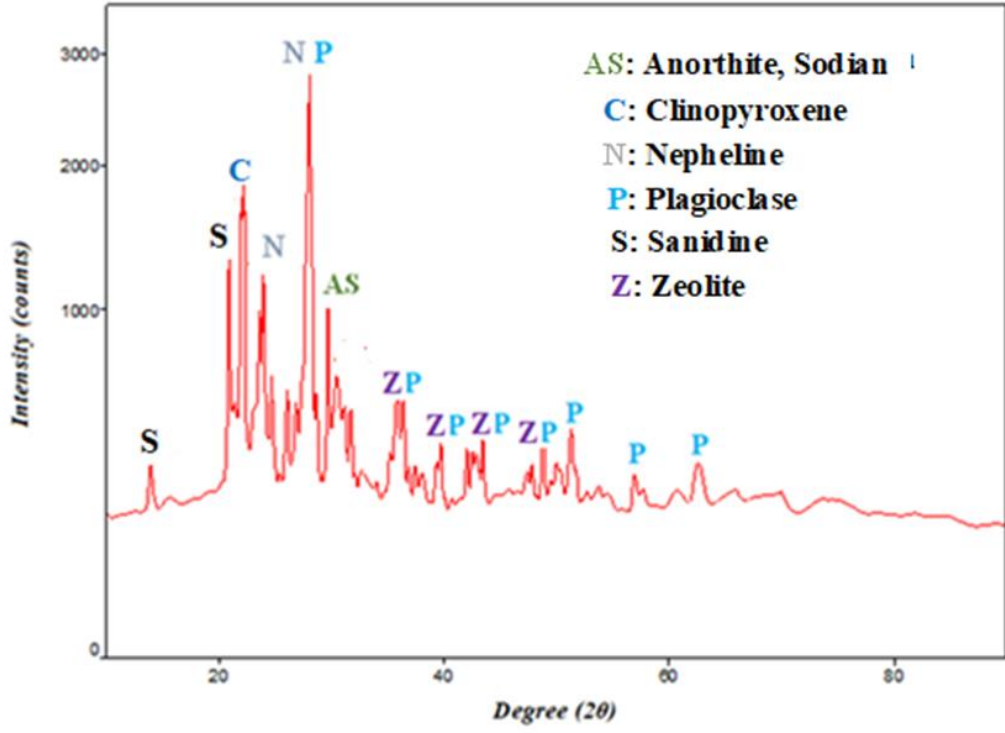
Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	47.18	62.60
Na	8.48	7.84
Al	7.12	5.60
Si	30.48	23.04
K	4.50	2.38
Ca	2.14	0.81

5.4. XRD Analiz Sonuçları

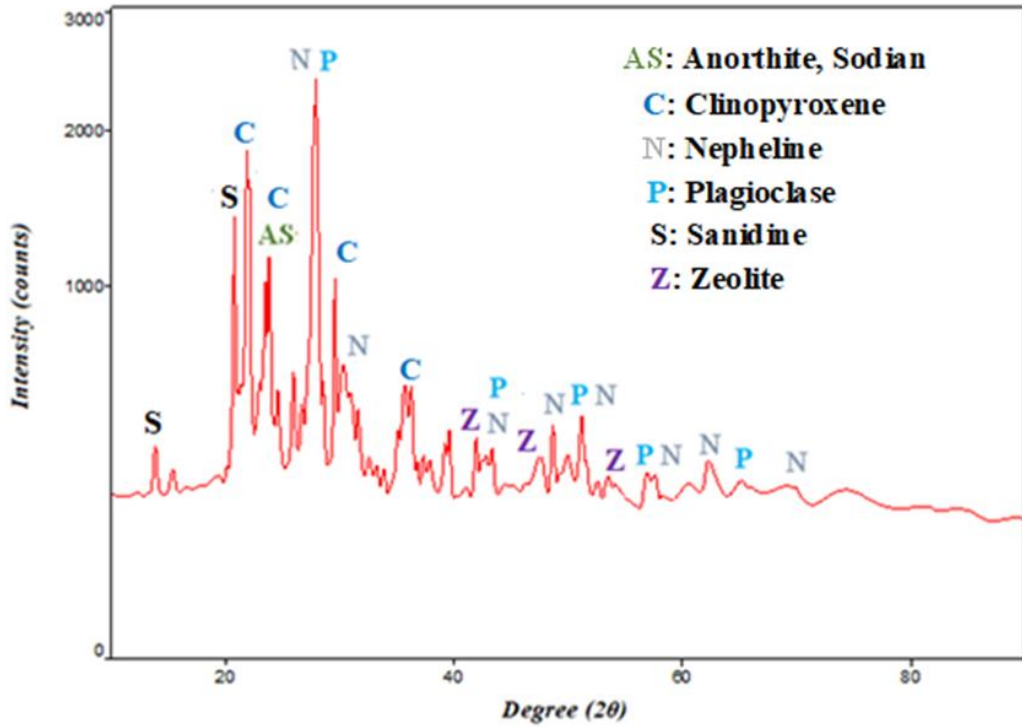
8-60-8 kodlu geopolimer harçların XRD analiz sonuçları Şekil 5.61 ile Şekil 5.67 arasındaki şekillerde sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi öncesi geopolimer harçlarda kullanılan bazalt kumu ve atık andezit tozundan kaynaklı, anortit, klinopiroksen, nefelin, plajiyoklaz, sanidin ve zeolit fazları tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında harçlarda plajiyoklaz fazlarının yoğunlukta olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçlarda özellikle 25θ ile 30θ arasında görülen plajiyoklaz fazlarının yoğunlukları azalmıştır. Ancak 40θ ile 80θ arasında görülen zeolit fazlarının yoğunlukları özellikle 800 °C’de belirgin bir şekilde artmış, bu aralıkta yeni nefelin ve zeolit pikleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlar harçlarda 800 °C’de görülen dayanım artışının sebebi olarak gösterilebilir.



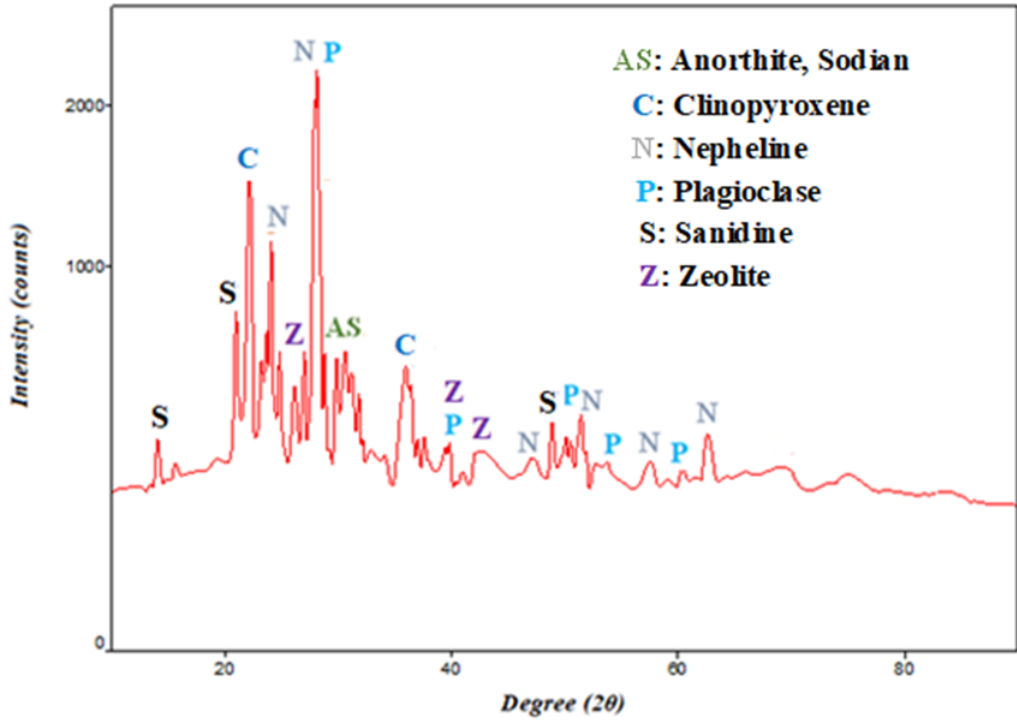
Şekil 5.61. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık öncesi XRD analizi (25°C)



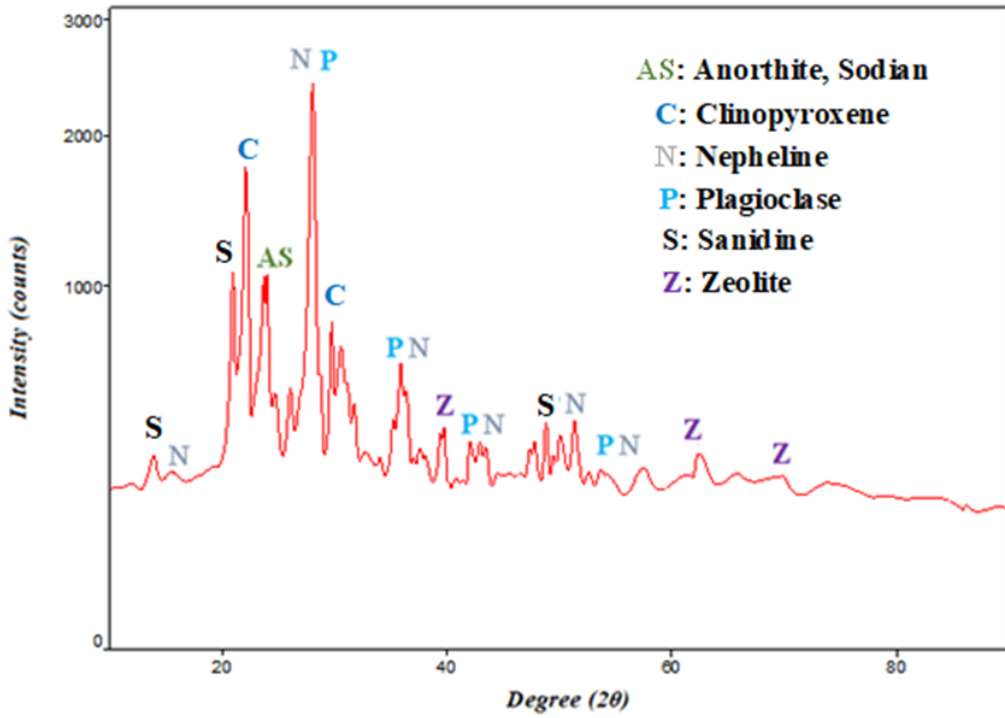
Şekil 5.62. 400 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi



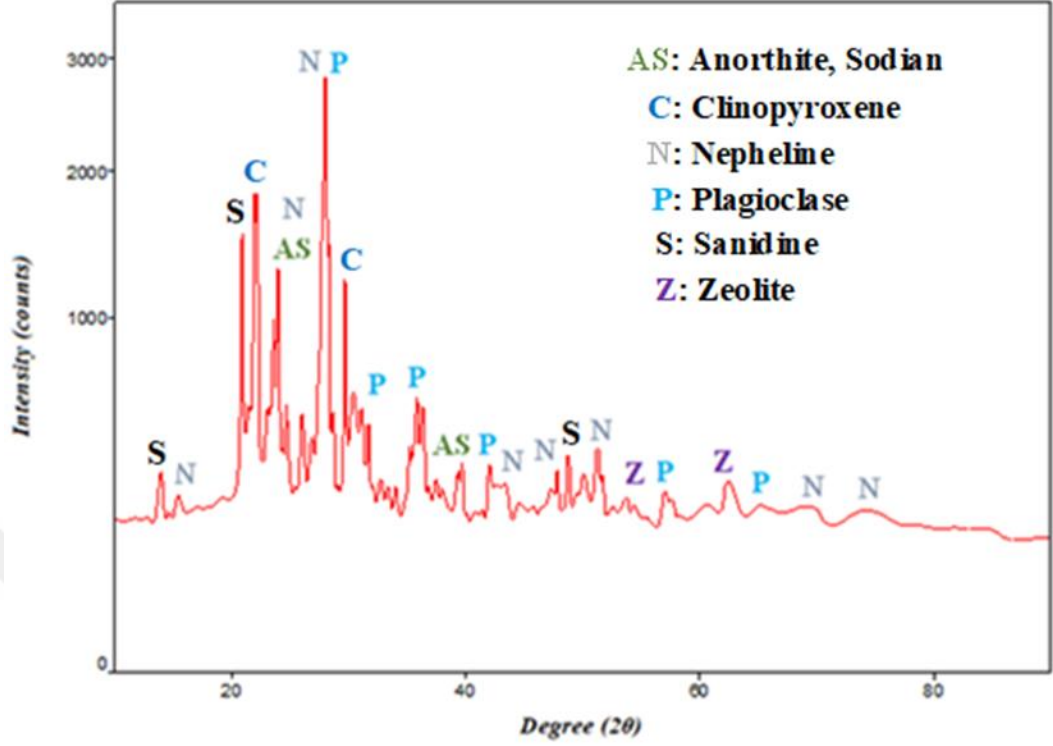
Şekil 5.63. 600 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi



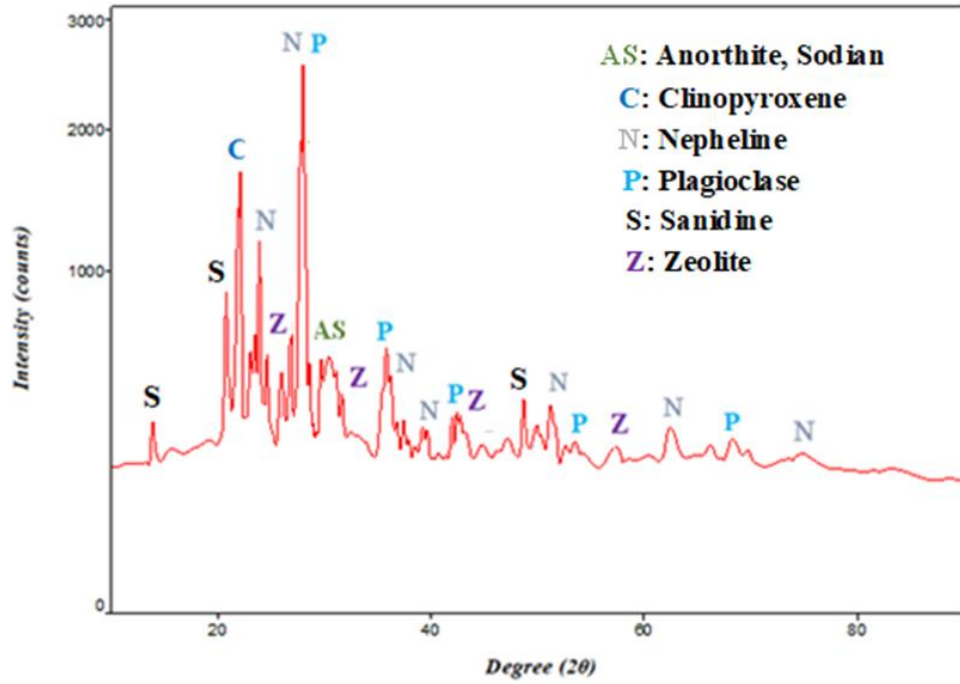
Şekil 5.64. 800 °C etkisi sonrası suda soğutulan geopolimer harçların XRD analizi



Şekil 5.65. 400 °C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi



Şekil 5.66. 600°C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi



Şekil 5.67. 800°C etkisi sonrası yavaş soğutulan geopolimer harçların XRD analizi

BÖLÜM VI

SONUÇLAR

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

- Geopolimer harçların 1 günlük eğilme ve basınç dayanımları ısıtılma süresinin 8 saatten 24 saate çıkması ile genellikle artarken, 8 saat ısıtılma maruz harçların küre yaşına göre dayanım artışı 24 saat ısıtılma ile üretilen harçlara göre genellikle daha fazla olmuştur.
- Harçlarda en yüksek eğilme ve basınç dayanımları genel itibarıyla %8 ve %10 Na₂O ile üretilen harçlarda elde edilirken, küre sıcaklığına ve süresine göre de en uygun Na₂O oranının değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmıştır.
- En yüksek 56 günlük eğilme dayanımları %6 Na₂O içeriği için 6-60-8 kodlu harçlarda, %8 Na₂O içeriği için 8-60-8 kodlu harçlarda ve %10 Na₂O içeriği için 10-75-8 kodlu harçlarda elde edilmiştir.
- En yüksek 56 günlük basınç dayanımları 10-75-8 ve 10-75-24 kodlu harçlarda sırasıyla 57.6 MPa ve 49.7 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek 28 günlük basınç dayanımları ise 10-90-8 ve 10-75-24 kodlu harçlarda sırasıyla 35.9 MPa ve 35.2 MPa olarak elde edilmiştir.
- Harçların eğilme ve basınç dayanımı gelişimleri için 8 saat ısıtılma süresinin 24 saat ısıtılma süresine göre, harçlara verilen birim enerjiye karşılık elde edilen dayanım açısından daha verimli olduğu belirlenmiştir.
- Yavaş, hızlı ve suda olmak üzere 3 farklı soğutma koşuluna maruz bırakılan geopolimer harçlarda suda soğutulan harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesine göre daha fazla eğilme ve basınç dayanımı kaybına uğradığı görülmüştür.

- Harçların eğilme dayanımları 800 °C etkisi sonrası 600 °C'deki değerlerine göre daha yüksek elde edilmiştir.
- 8-60-8 kodlu geopolimer harçların tüm soğutma koşullarında yüksek sıcaklığa maruz bırakılan diğer harçlara göre genellikle daha dayanıklı olduğu görülmüştür.
- 8-60-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizlerinde nefelin, anortit, albit, anortoklaz ve plajiyoklaz fazları tespit edilmiştir. Bu fazlara yüksek sıcaklık etkisi ile zeolit fazları da eklenmiştir. Bununla birlikte, 800 °C'de nefelin fazlarının yoğunlukları artmış ve yeni faz oluşumları tespit edilmiştir.
- SEM analizlerinde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmamış harçların homojen ve az boşluklu bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra suda soğutulan harçların iç yapılarında ise belirgin boşluklar tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçlarda ise zeolit ve nefelin benzeri iğnemsî yapılar tespit edilmiştir.
- Harçların EDX analizlerinde yüksek sıcaklığın etkisiyle Na/Si ve Al/Si oranlarında değişimler tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Sreenivasulu, C., Ramakrishnaiah, A., Jawahar, J. G., “Mechanical properties of geopolymer concrete using granite slurry as sand replacement”, *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, 8(2), 83, 2015.
2. Neupane, K., “Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymer binder concrete”, *Clean. Mater.*, 6, 100138, 2022.
3. Muraleedharan, M., Nadir, Y., “Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review”, *Ceram. Int.*, 47(10), 13257-13279, 2021.
4. Çelikten, S., Atabey, İ. İ., “Su içeriği ve ısıtılma süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 328-332, 2021.
5. Civan M. A., “Niğde yöresi andezitlerinin bordür taşı olarak kullanılabilirliği ve beton bordür taşlarıyla dayanım yönünden karşılaştırılması”, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde, 2006.
6. DPT, “Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, Ankara, 2001.
7. Çelikten, S., Canbaz, M., “Atık Andezit ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 43-48, 2021.
8. Uzun, İ., “Andezitin Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2011

9. Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T., “Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 165, 494-503, 2018.
10. Sogancioglu, M., Yel, E., Yilmaz-Keskin, U.S., “Utilization of andesite processing wastewater treatment sludge as admixture in concrete mix”, *Constr. Build. Mater.*, 46, 150-155, 2013.
11. Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., Clastres, P., “Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement”, *Constr. Build. Mater.*, 47, 1268-1277, 2013.
12. Çelikten, S., “Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars”, *Adv. Powder Technol.*, 32 (1), 1-9, 2021.
13. Soykan, O., “Arduvaz ve Andezitin Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), 69-74, Isparta, 2015.
14. Cong, P., Cheng, Y., “Advances in geopolymer materials: A comprehensive review”, *J. Traffic Transp. Eng.*, 8(3), 283-314, 2021.
15. Farooq, F., Jin, X., Javed, M. F., Akbar, A., Shah, M. I., Aslam, F., Alyousef, R. “Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review”, *Constr. Build. Mater.*, 306, 124762, 2021.
16. Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., “Geopolymer additive manufacturing: A review”, *Addit. Manuf.*, 55, 102782, 2022.
17. Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... Wang, H., “Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications”, *J. Clean. Prod.*, 125, 253-267, 2016.

18. Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., Rangan, B. V., "Fly ash-based geopolymer concrete", *Aust. J. Struct. Eng.*, 6(1), 77-86. (2005).
19. Panyas, D., Giannopoulou, I. P., Perraki, T. "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers", *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng.*, 301(1-3), 246-254, 2007.
20. Wallah, S. E., Hardjito, D., Sumajouw, D. M., Rangan, B. V. (2005, January). Sulfate and acid resistance of fly ash-based geopolymer concrete. In Australian Structural Engineering Conference 2005 (pp. 733-742). Sydney, NSW: Engineers Australia.
21. Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B., "Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack", *Cem. Concr. Res.*, 33(10), 1607-1611, 2003.
22. Kong, D. L., Sanjayan, J. G., Sagoe-Crentsil, K., "Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures", *J. Mater. Sci.*, 43, 824-831, 2008.
23. Han, Q., Zhang, P., Wu, J., Jing, Y., Zhang, D., Zhang, T., "Comprehensive review of the properties of fly ash-based geopolymer with additive of nano-SiO₂", *Nanotechnol. Rev.*, 11(1), 1478-1498, 2022.
24. Rashad, A. M., "Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer—An overview", *Constr. Build. Mater.*, 41, 751-765, 2013.
25. Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., Khalaf, M. A., "A review on alkali-activated slag concrete", *Ain Shams Eng. J.*, 12(2), 1475-1499, 2021.
26. Kretzer, M. B., Effting, C., Schwaab, S., Schackow, A., "Hybrid geopolymer-cement coating mortar optimized based on metakaolin, fly ash, and granulated blast furnace slag", *Clean. Eng. Technol.*, 4, 100153, 2021.

27. Muraleedharan, M., Nadir, Y., “Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review”, *Ceram. Int.*, 47(10), 13257-13279, 2021.
28. Tchadjié, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H. K., Kenne, B. D., Elimbi, A., Njopwouo, D., “Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis”, *Ceram. Int.*, 42(2), 3046-3055, 2016.
29. Saxena, R., Gupta, T., Sharma, R. K., Panwar, N. L., “Influence of granite waste on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete”, *Environ. Dev. Sustain.* 23, 17810-17834, 2021.
30. TS EN 1008, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü 2003, Ankara, Türkiye.
31. TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü 2016, Ankara, Türkiye.