

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

ENDÜSTRİYEL SERAMİK ATIKLARININ
GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan
Ayşe ESER

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

AĞUSTOS 2024
NEVŞEHİR

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

ENDÜSTRİYEL SERAMİK ATIKLARININ
GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan
Ayşe ESER

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

AĞUSTOS 2024

Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK danışmanlığında Ayşe ESER tarafından hazırlanan "**Endüstriyel Seramik Atıklarının Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../20..

JÜRİ

Başkan: Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK

Üye: Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Betül YILDIZ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

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.

Ayşe ESER



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK'e ve tüm bölüm hocalarıma,

Maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren değerli AİLEME,

Tez çalışmalarım için laboratuvar ve ekipman desteği sağlayan Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY ve Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN hocalarıma,

Çalışmada kullanılan hammaddelerin temin edildiği firmalar; uçucu kül için Araz Metal Madencilğe (İskenderun), seramik karo atık keki için Seranit Seramik (Bilecik), pişmiş çömlek ürünleri kırığı için Anadolu Çömlekçilik (Avanos/Nevşehir), seramik sağlık gereci fabrikasının vitrifiye atığı için Turkuaz Seramik (Kayseri), tez çalışmalarım için malzeme, burs ve analiz desteği sağlayarak TÜBİTAK 222M299 numaralı proje ile çalışmalarımı yürütmeme destek veren TÜBİTAK birimine teşekkür ederim.

ENDÜSTRİYEL SERAMİK ATIKLARININ GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayşe ESER

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2024

ÖZET

Seramik endüstrisi ülkemizin ekonomisinde büyük bir rol oynamaktadır ve bu sektörde hammadde arama ve çıkarma işlemleri zayıf olduğu için uzun vadede dezavantajlara yol açabileceği bir dönemden geçmektedir. Seramik üretiminde dünyada söz sahibi olan ülkemiz genelinde yıllık yaklaşık 320 bin ton seramik atığı oluşmaktadır. Bu atıkların çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu çalışma, seramik atıklarının geri dönüşümü ve yeniden değerlendirilmesi konusunda bir çözüm sunmaktadır. Seramik atıklarının çimentosuz harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Bu yaklaşım, seramik atıklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını ve çevresel etkilerinin azaltılmasını hedeflemektedir. Çalışma, farklı seramik atıklarının (filter-pres kek atığı, vitrifiye atıkları ve çömlek atıkları) çimentosuz harçlarda nasıl kullanılabileceğini ve bu kullanımın fiziksel ve mikroyapısal özelliklere olan etkilerini incelemektedir. Bu çalışmada hazırlanan geopolimer harçlarında seramik atıkları farklı kütle oranlarında (100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100) çalışılmış ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Geopolimerler 90°C'de 6 ve 24 saatlik iki farklı termal kütleme periyoduyla üretilmiştir. Harçların 400, 600 ve 800°C'ye maruz bırakılmadan önce ve sonra eğilme ve basınç dayanım değerleri ayrı ayrı kaydedilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonra seçilen harçlar üzerinde kristal faz (XRD), mikroyapı analizi (SEM/EDX) yapıldı. 24 saatlik termal kütleme ile üretilen geopolimerlerin başlangıç mukavemet değerleri daha yüksek çıkmıştır fakat 6 saatlik termal kütleme değerlerine yakın tespit edilmiştir bu durum zaman ve enerji tüketimi açısından avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmada, çimentosuz harçlarda kullanılan uçucu kül yerine seramik atıklarının kullanılmasının maliyeti düşüreceği ve seramik fabrikalarının atık sorununa çözüm sunacağı vurgulanmaktadır. Ayrıca, sanayi-üniversite işbirliğini teşvik ederek, akademik ve endüstriyel bakış açılarını birleştirmeyi hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler :*Filtre pres keki, Çömlek atığı, Seramik sağlık gereci atığı, Geopolimer, Mikroyapı*

Tez Danışmanı :**Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK**

Sayfa Adeti :**95**

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF INDUSTRIAL CERAMIC WASTES IN GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Ayşe ESER

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

August 2024

ABSTRACT

The ceramic industry plays a major role in our country's economy and is going through a period where raw material search and extraction processes are weak in this sector and this may lead to disadvantages in the long term. Our country, which has a say in ceramic production in the world, generates approximately 320 thousand tons of ceramic waste annually. These wastes have negative effects on the environment. This study offers a solution for recycling and re-evaluating ceramic waste. The usability of ceramic wastes in cement-free mortar production is investigated. This approach aims to use ceramic wastes sustainably and reduce their environmental impacts. The study examines how different ceramic wastes (filter-press cake waste, vitrified waste and pottery waste) can be used in cement-free mortars and the effects of this use on physical and microstructural properties. In this study, ceramic wastes were studied in different mass ratios (100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100) in the prepared geopolymer mortars and sodium hydroxide and sodium silicate were used as activators. Geopolymers were produced with two different thermal curing periods of 6 and 24 hours at 90°C. The flexural and compressive strength values of the mortars were recorded separately before and after exposure to 400, 600 and 800°C. In addition, crystal phase (XRD) and microstructure analysis (SEM/EDX) were performed on the selected mortars before and after exposure to high temperature. The initial strength values of the geopolymers produced with 24-hour thermal curing were higher, but the 6-hour thermal curing values were determined to be close, which will provide advantages in terms of time and energy consumption. In this study, it is emphasized that using ceramic waste instead of fly ash used in cement-free mortars will reduce costs and provide a solution to the waste problem of ceramic factories. It also aims to combine academic and industrial perspectives by encouraging industry-university cooperation.

Keywords :*Filter press cake, Pottery waste, Ceramic sanitary ware waste, Geopolymer, Microstructure*

Thesis Supervisor :**Assoc. Prof. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK**

Page Number :**95**

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvi
1.BÖLÜM	
GİRİŞ.....	1
2. BÖLÜM	
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Seramikler.....	6
2.2. Geopolimer Nedir?.....	7
2.3. Geopolimer Üretimi.....	9
2.4. Geopolimer Türleri.....	11
2.5. Geopolimerlerin Uygulama Alanları.....	12
2.6. Uçucu Kül.....	12
2.7. Literatür Taraması.....	13
3. BÖLÜM	
MATERYAL VE METOT.....	20
3.1. Malzemeler.....	20
3.1.1. Seramik Atıklar.....	20
3.1.2. Aktivatörler.....	23
3.1.3. Dere Kumu.....	24
3.1.4. Su.....	24
3.2. Ön Deneme Çalışmaları.....	24
3.3. Deneysel Çalışmalar.....	24
4. BÖLÜM	
DENEYSEL YÖNTEMLER.....	34

4.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	34
4.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi	35
4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi	35
4.4. Basınç Dayanımı Deneyi.....	36
4.5. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi	37
4.6. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi.....	38
4.7. Faz ve Mikroyapı İncelemeleri	39
5. BÖLÜM	
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
5.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları.....	40
5.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	41
5.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	43
5.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	50
5.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları.....	56
5.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi Sonuçları	68
5.7. Faz ve Mikroyapı İncelemeleri	69
6. BÖLÜM	
SONUÇ VE ÖNERİ.....	83
KAYNAKÇA.....	88
ÖZGEÇMİŞ.....	95

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları.....	21
Tablo3.2.NaOH aktivatörü ile hazırlanan karışımlar ve karışımlardaki oranlar (g).....	25
Tablo 3.3. Sodyum silikat aktivatörü ile hazırlanan karışımlar ve karışımlardaki oranları (g).....	25
Tablo3.4.Karo kek atığı, vitrikiye ve çömlek atığı için elek analizi sonuçları.....	30
Tablo 3.5. NaOH ile yeniden çalışılmasına karar verilen karışım oranları.....	32
Tablo3.6.Sodyum silikat ile yeniden çalışılmasına karar verilen karışım oranları.....	32
Tablo5.1. NaOH'lı geopolimerler harçlarının işlebilirlik sonuçları.....	40
Tablo5.2. NaOH'lı 6 saatlik geopolimerlerde yoğunluk sonuçları.....	41
Tablo5.3.NaOH'lı 24 saatlik saatlik geopolimerlerde yoğunluk sonuçları.....	42
Tablo5.4.Sodyum silikat içeren 6 saatlik geopolimerlerde yoğunluk sonuçları.....	42
Tablo5.5.Sodyum silikat içeren 24 saatlik geopolimerlerde yoğunluk sonuçları.....	43
Tablo5.6. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı.....	44
Tablo5.7. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı.....	44

Tablo5.8. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı.....	48
Tablo5.9. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı.....	48
Tablo5.10. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı.....	50
Tablo5.11. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı.....	50
Tablo5.12. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı.....	54
Tablo5.13. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı.....	54
Tablo5.14. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı.....	56
Tablo5.15. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı.....	56
Tablo5.16. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı.....	59
Tablo5.17. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı.....	59
Tablo5.18. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	61
Tablo5.19. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	62

Tablo5.20. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	66
Tablo5.21. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	66
Tablo5.22.NaOH'lı geopolimerlerde su emme – boşluk oranları sonuçları.....	68
Tablo5.23.Sodyum silikat içeren geopolimerlerde su emme – boşluk oranları sonuçları.....	68



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Seramik Vazolar.....	7
Şekil 2.2. Geopolimer oluşumunun sistematik diyagramı	10
Şekil 3.1. a)Uçucu kül (U), b)Filter-pres karo atığı (K), c)Vitrifiye atığı (V), d)Pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç)	21
Şekil 3.2. Uçucu külün XRD grafiği (m:müllit, q:kuvars, h:hematit, c:CaO).....	22
Şekil 3.3. Çömlek atığının XRD grafiği (m:microkline, q:kuvars, d:diopside).....	22
Şekil 3.4. Karo atığının XRD grafiği (K:Kaolinite, i:illit, q:kuvars, a:albit)	22
Şekil 3.5. Vitrifiye atığının XRD grafiği (a:albite, q:kuvars, m:müllit)	23
Şekil 3.6. NaOH ve Sodyum silikat (Na_2SiO_3)	23
Şekil 3.7. Dere kumu (2 mm ve altı).....	24
Şekil 3.8. NaOH ile üretilen harçların eğilme dayanımları.....	26
Şekil 3.9. NaOH ile hazırlanan karışımların basınç dayanım sonuçları grafiği.....	27
Şekil3.10.Sodyum silikat ile hazırlanan karışımların eğilme dayanım sonuçları grafiği.....	28
Şekil3.11.Sodyum silikat ile hazırlanan karışımların basınç dayanım sonuçları grafiği	29
Şekil 3.12.Vitrifiye atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği.....	31
Şekil 3.13 Karo atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği.....	31
Şekil 3.14 Çömlek atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği.....	32
Şekil 3.15 Numune Hazırlama Aşamaları.....	33
Şekil 4.1 Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi	34

Şekil 4.2 Eğilme Dayanımı Deneyi.....	36
Şekil 4.3 Basınç Dayanımı Deneyi	37
Şekil 4.4. Su Emme ve Boşluk Ölçüm Deneyi	38
Şekil 4.5. Yüksek Sıcaklık Uygulanmış Geopolimerler	39
Şekil 5.1. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları.....	45
Şekil 5.2. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları...	46
Şekil5.3. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları.....	47
Şekil5.4. 24 saat kür sonrası Ç-V(NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları.....	47
Şekil 5.5. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların eğilme dayanım sonuçları	49
Şekil 5.6. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların eğilme dayanım sonuçları	49
Şekil 5.7. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları	51
Şekil 5.8. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları ...	52
Şekil 5.9. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları	53
Şekil 5.10. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları..	53
Şekil 5.11. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların basınç dayanım sonuçları	55
Şekil 5.12. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların basınç dayanım sonuçları.....	55
Şekil 5.13. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	57
Şekil 5.14. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	57

Şekil 5.15. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	58
Şekil 5.16. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	59
Şekil 5.17. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	60
Şekil 5.18. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları.....	61
Şekil 5.19. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	63
Şekil 5.20. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	63
Şekil 5.21. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	65
Şekil 5.22. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	65
Şekil 5.23. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	67
Şekil 5.24. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları.....	67
Şekil 5.25. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının faz analizi (p:potasyum alüminyum silikat, a: anortit, z:zeolit, d:diopsit, q:kuvars, g:gehlenit).....	69
Şekil 5.26. Sodyum silikatlı 100K harçlarının faz analizi (a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, k:kıyanit, m:müllit).....	69

Şekil 5.27. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının faz analizi (a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit).....	70
Şekil 5.28. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800.....	71
Şekil 5.29. Sodyum silikatlı 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800.....	71
Şekil 5.30. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının mikroyapı analizi a)50K-Ç, b)50K-Ç-400, c)50 K-Ç-800.....	72
Şekil 5.31. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800.....	73
Şekil 5.32. Sodyum silikatlı 100K harçlarının EDX analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800.....	73
Şekil 5.33. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının EDX analizi a)50K-Ç, b)50K-Ç-400, c)50 K-Ç-800.....	74
Şekil 5.34. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800 (z:zeolit, g:gehlenite, c: Kalsit a:anortit, q:kuvars)	75
Şekil 5.35. Sodyum hidroksitli 100V harçlarının mikroyapı analizi a)100V, b)100V-400, c)100V-800 (m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars)	75
Şekil 5.36. Sodyum hidroksitli 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800 (m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit)	76
Şekil 5.37. Sodyum hidroksitli 50 K-V harçlarının mikroyapı analizi a)50K-V, b)50 K-V-400, c)50K-V-800 (m:müllit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit)	76
Şekil 5.38. Sodyum hidroksitli 50 Ç-V harçlarının mikroyapı analizi a)50Ç-V, b)50 Ç-V-400, c)50Ç-V-800 (m:müllit, a:anortit, d:diopsit, z:zeolit,)	77

Şekil 5.39. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800	77
Şekil 5.40. Sodyum hidroksitli 100V harçlarının mikroyapı analizi a)100V, b)100V-400, c)100V-800	78
Şekil 5.41. Sodyum hidroksitli 50Ç-V harçlarının mikroyapı analizi a)50 Ç-V, b)50 Ç-V-400, c)50 Ç-V-800.....	78
Şekil 5.42. Sodyum hidroksitli 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800	79
Şekil 5.43. Sodyum hidroksitli 100K-V harçlarının mikroyapı analizi a)100K-V, b)100K-V-400, c)100K-V-800.....	79
Şekil 5.44. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800	80
Şekil 5.45. Sodyum hidroksitli 100V harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800	81
Şekil 5.46. Sodyum hidroksitli 100K harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800	81
Şekil 5.47. Sodyum hidroksitli 50 Ç-V harçlarının EDX analizi a)50Ç-V, b)50Ç-V-400, c)50Ç-V-800.....	82
Şekil 5.48 Sodyum hidroksitli 50 K-V harçlarının EDX analizi a)50Ç-V, b)50Ç-V-400, c)50Ç-V-800	82

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CO₂	: Karbon dioksit
SiO₂	: Silisyum oksit
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
H₃PO₄	: Fosforik asit
H₂SO₄	: Sülfürik asit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
Si	: Silisyum
Al	: Alüminyum
Ca	: Kalsiyum
Na	: Sodyum
P	: Fosfor
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
C-A-S-H	: Kalsiyum alümina silikat hidrat
OPC	: Geleneksel portland çimento

YFC	: Yüksek fırın cürufu
U	: Uçucu kül
K	: Filter-pres kek atığı (karo atığı)
Ç	: Çömlek atığı
V	: Vitrifiye (seramik sağlık gereci)
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde
m²	: Metrekare
mm	: Milimetre
g/cm³	: Gram/Santimetreküp
µm	: Mikron metre
M	: Molar
Mpa	: Mega paskal
pH	: Çözeltinin asidik veya bazik derecesinin tarifi
W/m°K	: Isıl iletkenlik katsayısı birimi
TS-EN	: Türk Standartları-Avrupa Formu
ASTM	: Amerikan Test ve Materyal Topluluğu

1.BÖLÜM

GİRİŞ

Atıklar, gelişmiş toplumlar için çözülmesi ihmal edilmez bir sorundur. Gelişen sanayi yöntemleri ve üretimiyle atıklar çeşitlenmekte ve miktarlarında artışlar meydana gelmektedir. Atıklar açığa çıktıkları yerlere göre adlandırılır örneğin evrensel, ticari, inşaat, endüstriyel, tıbbi, nükleer ve patlama riski olan atıklar gibi.

Günümüz yasaları gereği yeşil sürdürülebilirlik kapsamı içerisinde üretim sonrası açığa çıkan atıkların geri dönüşümüyle birlikte kendi alanlarında ya da başka bir alan için alternatif bir ham madde olarak kullanılabilirliği sağlanıp temin edilen firmalarda hem depolamada yaşanan sıkıntıların çözümü hem de başka alanlarda kullanılacak olan atık temin edilen firmaya ek bir gelir kaynağı olmaktadır [1].

Atıkların geri dönüşümü ile azalan doğal ham madde kaynaklarımızın korunması, atıkların çevreye verdiği kirliliğin azaltılması ve enerji maliyetlerin azaltılmasıyla endüstriyel atıkların geri dönüşümüne olan ilginin artmasıyla araştırmalarda büyük ölçüde yer almaktadır [2].

Seramik sektörü ülke ekonomisine katkısı bakımından büyük paya sahip sektörlerden biridir. Seramik endüstrisi, gün geçtikçe gelişmekte ve ülkemiz, dünyanın sayılı seramik üreten ülkeleri arasında yerini almaktadır. Seramik sektöründe lokomotif ürünler genellikle öncü ve en çok talep gören ürünlerdir. Türkiye’de seramik sektörünün lokomotif ürün grubu porselen seramikler, yer-duvar karoları, seramik kaplama malzemeleri, seramik sağlık gereçleri gibi dayanıklı ve estetik ürünler yer alabilir [3].

Türkiye seramik sektöründe, ham madde bakımından oldukça zengin ve avantajlı konumdadır, ancak ham maddeyi arama, çıkarma ve işleme gibi açıdan dezavantajlıdır. Bunun yanı sıra mevcuttaki havzalar ve ham madde kaynakları bilinçsiz kullanımı ve korunamadığı için bu durum uzun dönemde firmaların dezavantajı haline gelme riski taşımaktadır [4]. Günümüze bakıldığında, dünya nüfusunda meydana gelen artış ile doğru orantılı olarak tüketimin de arttığı görülmektedir.

Doğal kaynaklar ve yaşam sürdürülen ortama bilinçli ya da bilinçsiz şekilde verilen zararlar sonucu meydana gelen ve istenmeyen durumlar “çevre kirliliği” olarak adlandırılmaktadır. Farklı endüstri kollarından doğaya salınan atıklar çevre kirliliğine neden olabilmektedir. Ortaya çıkan atıkların miktarı göz önünde bulundurulduğunda, seramik sektörü de önemli bir yere sahiptir [5].

Ülkemizde 2023 yılında 500 milyon m² seramik kaplama ürünleri ve 2018 yılı itibariyle 20,5 milyon adet seramik sağlık gereci üretilmiştir. Ülkemizde her yıl sonunda neredeyse 2 milyon ton seramik atığı çıkarılmaktadır. Bu atıkların doğru şekilde yönetilmesi ve geri dönüşümü çevrenin korunumu açasından önemli rol oynamaktadır [6].

Seramik karo ve sağlık gereçleri, günlük yaşamımızda sıklıkla karşılaştığımız, işlevselliği ve estetiği bir araya getiren önemli seramik ürünlerdir. Ancak seramiğin tarihi ve kültürel kökenlerine inildiğinde, karşımıza daha eski ve köklü bir zanaat olan çömlekçilik çıkar. Çömlekçilik, insanlığın en eski sanat ve zanaat dallarından biridir ve medeniyetlerin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır.

Kapadokya, çömlekçilik açasından Türkiye'nin en önemli bölgelerinden biridir. Bu bölge, volkanik faaliyetlerin etkisiyle oluşmuş zengin toprakları ve benzersiz coğrafi özellikleri sayesinde yüzyıllardır çmlekçiliğin merkezi olmuştur. Çömlekçilik, burada sadece bir zanaat değil, aynı zamanda bir yaşam biçimidir. Bölgedeki çömlekçiler, nesilden nesile aktarılan teknikler ve ustalıkla, birbirinden güzel ve kullanışlı eserler üretmeye devam etmektedir [7].

Kapadokya, Türkiye'de yerli ve yabancı turistlerin en fazla ilgi gösterdiği ve turistlerin sıkça ziyaret ettiği 4. turizm yerleşim merkezi konumundadır. Kapadokya bölgesi, Türkiye'nin Nevşehir iline bağlı bölgedir. Peri bacaları, tarihi kiliseler, yer altı şehirleri ve doğal güzellikleriyle ünlüdür. Kapadokya'nın doğal ve kültürel varlıkları bölgede el sanatlarının gelişmesinde ve halkın ekonomik kazanç sağlayacağı bir alanın oluşmasında büyük rol oynamıştır. Çömlekçilik, Kapadokya bölgesinde uzun bir geçmişe sahip olan geleneksel bir el sanatıdır. Bölgede çömlek yapımı, toprak işçiliği ve

seramik üretimi oldukça önemlidir. Kapadokya'nın verimli toprakları, çömlek yapımı için ideal koşullar sağlar. Özellikle Avanos ilçesi çömlek üretimi için uygun toprak yapısına sahip olmasının yanında bölgenin çömlekçilik ve el sanatları merkezi haline gelmiştir. Avanos ilçesi birçok çömlek ve seramik atölyesine ev sahipliği yapmaktadır. Bu atölyelerin yanında faaliyet gösteren Anadolu Çömlekçilik fabrikası 1998 yılı itibariyle el yapımı çeşitli boyutlarda ve tiplerde pres baskı ürünleri çömlekler, vazoküpler, yemek pişirme kapları, testiler, dökümle şekillendirilen iç dış mekan seramikleri saksılar, ve bahçe süs eşyaları üretmektedir [8].

Firmada üretim sonrası oluşan ıskartaya ayrılan fabrika içerisinde geri dönüşümü ve kullanımı olmayan ürünler stok sahası olarak belirlenen bölgede birikimiyle yığın oluşturmakta, bu durum görüntü ve çevre kirliliğinin yanında atık olarak bekletilmesi nedeniyle firmada depolama sorunu oluşturmaktadır. Bu atıkların doğru şekilde yönetilmesi ve atıkların farklı alanda geri dönüşümü kaynaklarımızın ve çevrenin korunumu açısından önemli rol oynamaktadır [9].

İnşaat sektörü göz önüne alındığında geleneksel beton ve çimento üretimi sırasında meydana gelen CO₂ çıkışı büyük oranda sera gazı salınımına neden olur. Bu gaz beton üretiminde kullanılan çimentonun ham maddelerinden biri olan kalkerin kalsinasyonu sırasında açığa çıkar. CO₂ gazının emisyonun atmosfere ve çevreye verdiği olumsuzluklar düşünüldüğünde çevre dostu beton alternatifleri ve sürdürülebilir üretim yöntemleriyle, toksik atıkları yapıya katılarak ısı ve aşındırıcı çevre etkilerine karşı dirençli ürünlerin üretimi sonucu geopolimerler bu tür olumsuz etkilere karşı alternatif bir malzeme olmaktadır [10].

Geleneksel çimentoya karşı geopolimer harç bağlayıcılarının faydalarından en dikkat çeken geopolimer üretiminde CO₂ gazının çıkışının daha az miktarlarda olmasıdır. Bunu sağlayan ise geopolimer oluşumu esnasında yüksek sıcaklıkta kalsinasyon işleminin yer almamasıdır. İnşaat sektörüne ilgi ve özenin artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha iyi özellik ve performansla sahip olan geopolimerlere verilen değer de artmıştır [11].

Uçucu kül, geopolimer üretiminde yer alan önemli ham maddelerden birini oluşturmaktadır [12]. Linyit kömürü, yüksek oranda uçucu kül içerir. Uçucu kül, kömürün yanması sırasında havaya veya gazlara geçen kül ve katı madde parçacıklarını ifade eder. Termik santraller, genellikle kömür, linyit gibi fosil yakıtları kullanarak elektrik üretirler. Termik santrallerin atıkları arasında yer alan uçucu kül, bacalardan çıkan gazlarla birlikte atmosfere yayılmadan önce filtre torba ya da elektrostatik çökeltici filtreler aracılığıyla tutulması ve uçucu kül silolarında istiflenmesiyle meydana gelir [13].

Atık sınıfında yer alan uçucu kül, geopolimer beton için ana ham madde sınıfında yer almıştır. Geopolimerlerin üretiminde kullanılan ana ham maddesi olan uçucu külün araştırmalar sonucu geopolimerlere olan ilginin artması ve termik santraller konum olarak geniş açık alanlarda ve şehir dışında yer almasından, bunun yanında kapatılan santral sonrası miktarı azalması ile maliyeti artmıştır. Ayrıca uçucu külün bir çok uygulamada yer alması örneğin çevre dostu beton, agrega, gazbeton, çimento üretimi, toprak stabilizasyonu, tuğla üretimi, yol ve zemin taşıma kapasitesinin artırma gibi alanlarda yer almasıyla maliyetinde gerçekleşen artış ürün üretiminde de karşımıza çıkmaktadır ve üretici alternatif ham maddelere veya katı atık maddelerine yönelmiştir [14].

Avrupa'daki birçok ülke, kömürlü termik santralleri verdiği zarardan kaynaklı devre dışı bırakmıştır ve enerji üretimini rüzgâr ve güneşten yararlanarak üretilmesi yaygınlaşırken, Türkiye'de bu durum her ne kadar kömür ile enerji üretimi yapan termik santralleri açık tutma çabası olsa da, yenilenebilir enerji kaynaklarına teşvik ve yatırımların olması uçucu külün üretiminde büyük ölçüde kısıtlamaların beklediğini göstermektedir [15]. Bu önemli sebeple de üretimde uçucu kül yerine farklı seramik atıklarının kullanımı geopolimerde uçucu küle olan ilgiyi azaltacaktır.

Günlük üretimi fazla olan bu seramik atıklarının olduğu fabrikalardan temin edilen atıklar ile üretilecek olan geopolimer harcının ham maddesi olan uçucu kül yerine kullanılmasının fiziksel ve mikroyapısal özelliklerde herhangi bir olumsuzluğa yol açmadan, özelliklere olan etkilerinin değerlendirilmesi, seramik atıklarının ürüne

dönüştürülmesi ve geopolimer üretiminde alternatif bir ham madde kaynağı bulunmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, seramik fabrikalarının üretiminde her yıl fazla miktarda meydana gelen ve üretim sahalarında istiflenen seramik atıklarının (filter-pres kek atığı, vitrifiye ve çömlek atıkları) ham madde olarak kullanımının geopolimer ürün özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan uçucu kül yerine atık veya karışımlarının kullanılması geopolimer üretimi için alternatif bir ham madde girdisi önerilmiş olmakta, geliştirilecek olan yeni bileşimler ile daha uygun maliyet ve geliştirilmiş performans sunabilecek geopolimerler ile tüketicilerin ihtiyaçlarına cevap verilirken, ham madde kaynaklarının korunmasına da katkıda bulunulacaktır. Seramik sektörü atıklarının geopolimer harçlarda geri dönüşümünün sağlanması ve atıkların değerlendirilmesi farklı bir ürüne dönüştürülebilme potansiyeli seramik sektörü için önemlidir. Ülkemizde çömlek üretimi, porselen, yer-duvar karosu ve sağlık gereci gerçekleştiren çok sayıda firma bulunmakta ve bu firmalarda ortaya çıkan bu atıklar ciddi sorun teşkil etmektedir. Ortaya çıkan seramik atıklarının kimyasal bileşimi değişkenlik gösterse de her üç atık da %60'ın üzerinde SiO_2 ve %17'nin üzerinde Al_2O_3 içeriğine sahiptir. Bu çalışma ile SiO_2 ve Al_2O_3 'ce zengin atık kekin, vitrifiye atıklarının ve çömlek atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılacaktır. Böylece hem seramik ve inşaat sektörüne hem de ülke ekonomisine önemli katkı sağlanmış olacaktır.

2.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Seramikler

Seramikler, inorganik, metal ve metal alaşımı olmayan genellikle oksit, karbür veya nitrür malzeme olup şekillendirilip ardından yüksek sıcaklıkta sinterleme işlemiyle elde edilen, sert, kırılğan, ısıya ve korozyona dayanıklı bir malzemedir [16]. Seramik, kil, kuvars ve feldispat gibi doğal minerallerin sinterleme, pişirme veya yanmasıyla meydana gelen kırılğan, sert ve genellikle inorganik malzemeleri oluşturmak için kullanılan yüksek sıcaklıkta işlem görebilen bir malzeme grubudur. Seramikler ev-mutfak eşyaları (Şekil 2.1.) ve yer-duvar karoları yapımında yaygın olarak kullanılmakta ayrıca bina dış yapıda kaplamada dekoratif amaçlı olarak da kullanılmaktadır [17].

Seramik üretim sanayisinde üretimler sonucunda yaklaşık %5 oranında atık seramikler açığa çıkmakta ve bu miktar dünya genelinde tahmini olarak 550 milyon m² gibi değerlere ulaşmaktadır. Seramik malzemeler, çimento yerine kullanıldığında çevresel avantajlar sunabilmektedir. Seramikler, genellikle hammadde olarak doğal kaynaklardan üretilir ve düşük enerji tüketimiyle işlenebilir.

Ayrıca, sinterleme işlemi sonucu seramikler, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mukavemeti, sertliği, kimyasallara karşı inert bir yapıda olmasından kaynaklı kimyasallara karşı dirençli olması, düşük termal genleşme katsayısı, durabilite özelliği sayesinde zor hava ve iklim şartlarında aşınma direnci gibi özelliklere sahip olması inşaat, havacılık, medikal, otomotiv ve elektronik gibi endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir malzeme haline getirmiştir. Bina dış yapı kaplamaları, mutfak eşyaları, elektronik bileşenlerde ve hatta uzay aracı parçaları gibi kullanım alanları

mevcuttur. Seramik atıklar, çeşitli endüstrilerin yan ürünleri olarak ortaya çıkar. Bu atıklar genellikle seramik, cam ve elektronik üretimi gibi sektörlerde oluşur [18].



Şekil 2.1. Seramik vazolar

2.2. Geopolimer Nedir ?

Geopolimerler, geleneksel betonlardan farklı bir bileşime sahiptir. Geopolimerler alüminosilikat ve silikat içeriğine sahip ham maddelerden elde edilir. Geleneksel beton genellikle çimento, kum, çakıl, su karışımlarından oluşurken, geopolimerler uçucu kül, cüruf, metakaolin, zeolit gibi bağlayıcılar, kum ile aktive edilerek kullanılır.

Geopolimerler, metakaolin, zeolit, kil, kaolin, silis dumanı, taban külü, cüruf, uçucu kül gibi bağlayıcılarla sodyum hidroksit, potasyum hidroksit sodyum silikat, vb. alkali aktivatörlerin karışımı ile oluşan yeni nesil çevre dostu malzemelerdir. Geopolimerizasyon işlemi için gerekli esas malzeme, tek ya da bir kaç farklı malzemenin bir kombinasyonu olabilir [19]. Geopolimerlerde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit-sodyum silikat ve potasyum hidroksit-sodyum silikat yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [20-23].

Bir mühendislik malzemesi olan geopolimerler aşağıdaki avantajları sunmaktadır [24] :

- Hammadde Kaynaklarında Çeşitlilik: Alkali çözeltide çözülmüş silikatlar ya da alüminosilikatlar, geopolimer üretimi için bir kaynak şeklinde kullanılabilir ve tabiatta bolca bulunur. Geopolimerler, bazı endüstriyel atıkların geri dönüşümüyle

üretir. Örneğin, uçucu kül gibi yan ürünler kullanılarak çevreye zararlı atıkların bertaraf edilmesi sağlanabilir.

•Enerji Tasarrufu ve Çevreyi Koruma: Geopolimerler yüksek enerji tüketimi gerektirmez. Doğal alüminosilikatların düşük bağıl sıcaklıkta ($600^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$) ısıl işlemi, uygun bir geopolimer ham maddesi sağlamaktadır. Çevresel etki açısından, geopolimer üretimi için gereken düşük enerji tüketimi ve bu süreçte geleneksel betona kıyasla daha az karbon salınımı neden olur bu da sera gazı emisyonlarının azalmasına yardımcı olur.

•Kolay Hazırlama İşlemleri: Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemeleri güçlü alkali çözeltilerle düzenli olarak karıştırarak sentezlenir. Ardından geopolimerler oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta katılaştırılır. İstenilen mukavemet kısa sürede elde edilebilmektedir.

•İyi Hacim Stabilitesi: Geleneksel betonda çimento hidrasyonu nedeniyle meydana gelen çatlaklar hacim stabilitesi azalırken, geopolimer kimyasal reaksiyonla sertleşme meydana geldiğinden daha az çatlak oluşturur ve bu nedenle geleneksel betonla göre daha iyi hacim stabilitesine sahiptirler.

•Kısa Sürede Dayanım Kazanımı: Geopolimerler nihai basınç dayanımlarının neredeyse % 70'ini ilk 4 saatte kazanabilmektedirler.

•Az Su Kullanımı: Geopolimerlerin üretimi sırasında daha az su kullanılır. Bu da su kaynaklarının korunmasına ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasını sağlar.

•Mükemmel Dayanıklılık: Geopolimer malzemeler, kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluştuğu için yüksek basınç ve kimyasal etkilere karşı mukavemetini kaybetmeden uzun yıllar boyunca dayanabilmektedir.

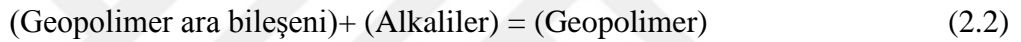
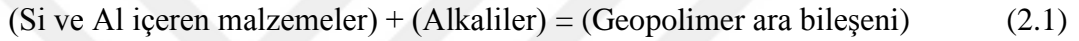
•Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklılık ve Düşük Isıl İletkenlik: Geopolimerler, önemli bir hasar olmaksızın 1200°C 'ye kadar sıcaklıklara dayanır bu da geopolimerlerin endüstriyel uygulamalarda yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlar. Diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldıklarında, ısıl iletkenlikleri daha düşüktür ve $0,24 \text{ W/m}^{\circ}\text{K} \sim 0,30 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ arasında değişim göstermektedir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda ısıyı iyi

bir şekilde yalıtmasına ve iletimini engellemesinden kaynaklı endüstriyel uygulamalarda sıcaklık kontrolünü sağlayan malzemelerde tercih edilmektedir.

2.3. Geopolimer Üretimi

Şekil 2.2.'de geopolimer oluşumunun sistematik diyagramı verilmiştir. Geopolimerler, bağlayıcı malzemeler ile alkali aktivatörün karıştırılmasıyla birlikte kimyasal reaksiyona girmesiyle belli bir kürleşme ve katılaşım sertleşme sürecinde oluşmuş kompozit bir malzemedir [25].

Geopolimer oluşumu şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:

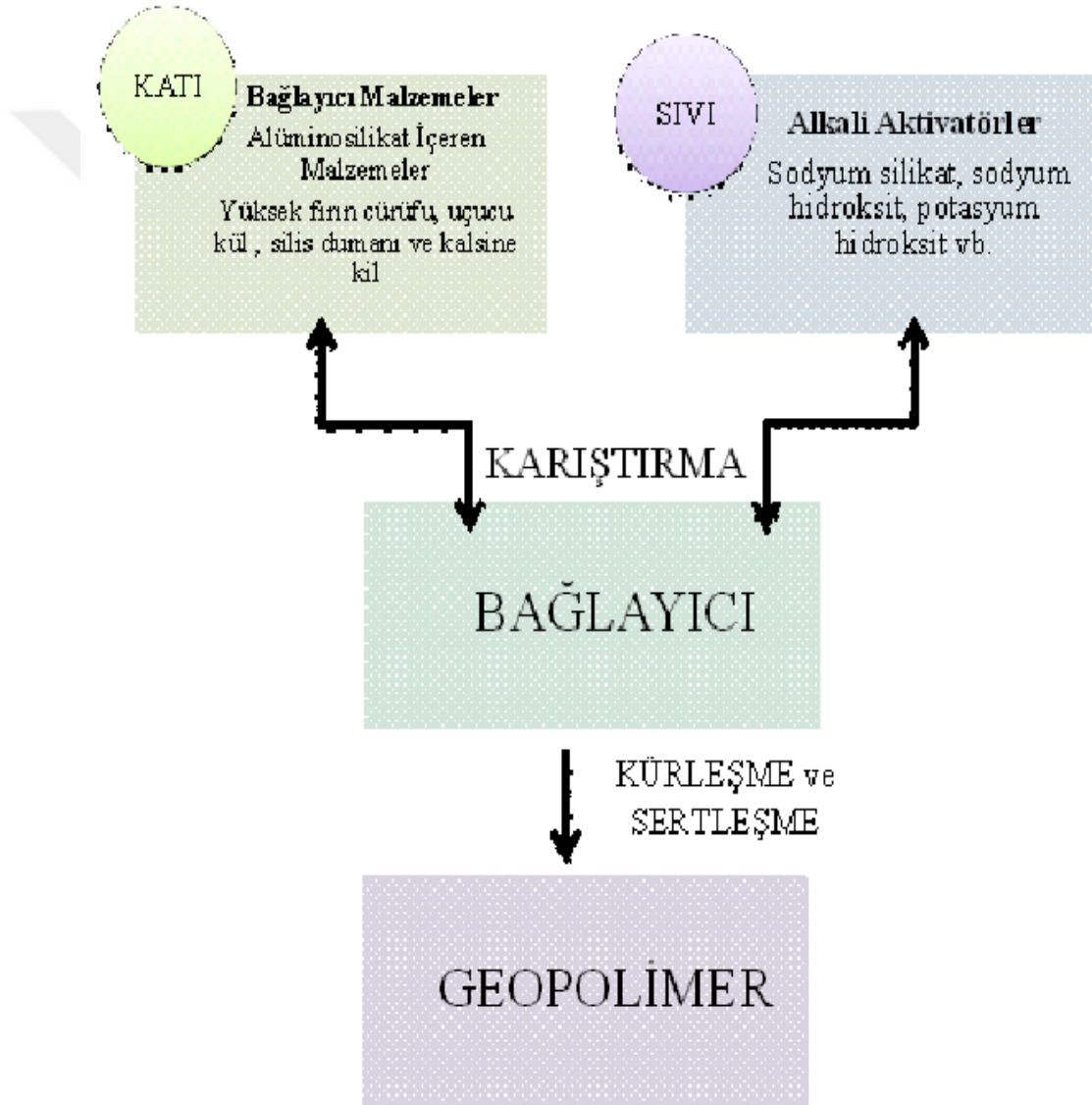


Üretim sonrası meydana gelen geopolimerler içerisinde su bulunmamaktadır. Karışımlar hazırlanırken az miktarlarda kullanılan su işlenebilirliği arttırmak için karışım içerisine ilave edilir. Kürleşme ve kurutma işlemleri geopolimer hazırlama aşamasında ilave edilen suyu uzaklaştırmasıyla süresiz nano boşluklu bir kompozit malzeme oluşur. Bu nano boşluklu yapı geopolimere hafiflik, kısa sürede dayanım kazanmasına, yüksek sıcaklık dayanımı ve ısı yalıtımı gibi avantajlar sağlar [26].

Geopolimer üretiminde kullanılan alüminosilikatlar uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), kalsine kil, silis dumanı veya metakaolin gibi toz bağlayıcılardır. Kimyasal aktivatörler ise genellikle sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, sodyum karbonat gibi alkali çözeltileridir [27].

Alüminosilikatlar maddeler ana oksitleri alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum oksit (SiO_2) olan, doğal veya ısıl işlem görmüş olan malzemelerdir. Tabiatta yer alan ve atık olarak açığa çıkan bir çok alüminosilikat kaynağı bulunmaktadır. Alüminosilikatlı malzemelerin bağlayıcı olarak geopolimerlerde kullanılabilir olması çevreye olan etkisinin yanında inşaat sektöründe malzeme çeşitliliği açısından önem kazandırır [28].

Geopolimerizasyon işlemi, alüminosilikat hammaddesi içeriğini oluşturan silisyum ve alüminyum atomlarının çözünüp, aktivatörlerle reaksiyona girerek sertleşmesi ve polimerleşmesi sürecidir. Bu kimyasal reaksiyon sonucu oluşan dayanıklı yapı geopolimer olarak isimlendirilir. Geopolimer harcın oluşması için alkali aktivatör çözeltileri kullanılır [29-30]. Geleneksel çimentoya alternatif bir malzeme olan bu yapı yüksek mukavemetli olmasının yanında düşük enerji tüketimi ve düşük karbon salınımı yapması ile çevre dostudur.



Şekil 2.2. Geopolimer oluşumunun sistematik diyagramı

2.4. Geopolimer Türleri

Dokuz çeşit geopolimer türü bulunmaktadır. Bunlar:

1-Sodyum silikat içeren geopolimer, polisiloksonat (Si: Al=1:0): Geopolimer karışımının işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların meydana gelmesini sağlayan aktivatör olarak sodyum silikatın kullanıldığı geopolimerlerdir [31].

2-Kaolinit - hidrosodalit içerikli geopolimer, polisialat (Si: Al=1:1): Aktivatörlerin ilavesiyle kaolinin çözülmesi ile başlayan reaksiyon yeni bağlar meydana getirerek sertleşen malzeme geopolimerizasyon aşamasında üç boyutlu yapı meydana gelir [32].

3-Metakaolinit esaslı geopolimer, poly (sialate-siloxo) (Si: Al=2:1): Kaolin minarelinin yüksek sıcaklıkta termal işleme tutarak elde edilen metakaoline sodyum hidroksit veya sodyum silikat gibi aktivatörlerle karışımı sonucu elde edilen geopolimer çeşididir [31].

4-Kalsiyum içeren geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3): Kalsiyum içerikli kireçtaşı, kalsiyum silikat gibi hammaddelerin uygun aktivatörlerle reaksiyonları sonucu oluşan geopolimer türüdür [31].

5-Kayaç içerikli geopolimer, poly (sialate-multisiloxo) (1<Si: Al<5): Andezit, bazalt, kireçtaşı gibi kayaç mineralleri uygun boyutlarda işlenir ve öğütülür. Elde edilen kayaç mineral tozlarının kullanılan aktivatörlerle reaksiyona girmesi sonucu elde edilen geopolimer çeşididir [31].

6- Silis dumanı ve silika içerikli geopolimer, sialateve siloxo bağlı poly (siloxonate) (Si: Al>5): Silika içeren malzemeler örneğin kuvars, cam, kum gibi malzemeler uygun sıcaklıkta ısıtılır veya yanması sonucunda silika dumanı oluşur, oluşan silika dumanı, belirli mineral çözeltisi veya NaOH ve KOH gibi alkali aktivatörlerle karıştırılarak reaksiyona girer ve sonucunda mineraller arası kimyasal bağlar oluşarak mineralojik bir yapı olan geopolimer oluşur [31].

7-Uçucu kül esaslı geopolimer: Termik (enerji) santrallerin bacalarında bulunan elektrostatik çökeltici filtre ve torbalarından elde edilen, mikron boyuttaki, içi boş, ince, hafif, gri renkli atık malzeme ile hazırlanan geopolimer çeşididir [33].

8-Fosfat içerikli geopolimer: Bu geopolimer türü Mısır döneminde de kullanıldığı düşünülmüştür incelemelerde CaCO₃ ve SiO₂ oluşan yapı içinde beyaz kaplamaya kırmızı renk oluşturan P (fosfat) molekülleri ile karşılaşmış yapısında geopolimerik sistem olduğu düşünülmüştür. Diğer geopolimer türleri içerisinde düşük pH'lı ortamda

iki veya üç değerlikli bir metal oksidin H_3PO_4 içinde asit-baz reaksiyonları vermesi ile oluşan geopolimerlerdir [31].

9-Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat mineral geopolimer yapısı kullanılarak asidik veya bazik ortam polimerizasyon işlemi ortamdaki asit mineraller üzerinde yoğuşmasıyla ya da organik polimerleri mineral geopolimerlere karıştırma ve emdirme işlemiyle organo-geopolimer bileşikler meydana gelir [31].

2.5. Geopolimerlerin Uygulama Alanları

Geopolimerler, geleneksel çimentoya göre düşük oranlarda CO_2 salınımına, düşük enerji tüketimine, yüksek sıcaklığa dayanım, üretim maliyetinin düşük olması, hafif yapı malzemeleri ve yüksek dayanım özelliğine sahip ürünlerdir. Bunun gibi avantajlara sahip olmasıyla geopolimerler mühendislik alanlarında inşaat, otomotiv, çevre ve su teknolojileri, atık yönetimi, havacılık, plastik, maden, metalürji ve kimyasal endüstrisinde kullanılmaktadır. Mısır'daki piramitlerin ve Roma'daki amfi tiyatrunun mikroyapıları incelendiğinde sertleşmiş geopolimerik yapılarla benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun gibi yapılardan çıkarım yapılarak geçmişte inşaat malzemesi olarak doğal hammaddelerden daha çok geopolimerik malzemelerden oluştuğu düşünülmektedir. Bu durumu açıklamak için pek çok araştırmacı, bu tarz eski inşaatların geopolimerizasyon temeline dayanıp dayanmadığını belirlemek için incelemeler yapmaya devam etmektedirler [28]. Geopolimer üzerine bir çok sayıda çalışmalar olmakla birlikte en kapsamlı çalışma Davidovits tarafından yapılmıştır. Davidovits, alkali çözelti ve uçucu küllerin birleşiminden oluşan bir malzemeyi geopolimer şeklinde ifade edilmiştir [34].

2.6. Uçucu Kül

Uçucu kül, geopolimerlerde kullanılan önemli ana malzemelerden birini oluşturmaktadır. Bu kül, termal enerji üretim sürecinde kömürün yanması ile oluşan yan üründür. Uçucu kül partikülleri küresel şekilde olup, tane boyutu 0,5–100 μm aralığındadır. Kömürün yanması sonucu açığa çıkan gazlar bacalardan atmosfere karışırken içerdikleri mikron boyutundaki partikül ve uçucu kül, termik santral

bacalarında yer alan filtre torbaları veya elektrostatik çöktürücü filtreler yardımıyla tutulur ve uçucu kül silolarında istiflenmesiyle elde edilen endüstriyel bir atıktır [35].

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kömürün inorganik mineral içeriğine göre farklılık gösterir. Genellikle iki ana türde sınıflandırılır, bunlar F tipi ve C tipi uçucu küldür. Kömürün yanması sonucu oluşan yüksek kalsiyum içeren C tipi çimento ve beton endüstrisinde kullanılırken, daha az kalsiyum içeren F tipi uçucu kül yüksek mukavemetli beton ve geopolimer malzemelerin üretiminde kullanılır. CaO miktarı %20'den fazla ise çimentolu malzeme, %10-20 oranları arasında ise çimentolu ve puzolanik malzeme grubunda yer alır [29,30].

2.7. Literatür Taraması

Gürer ve ark. insanların yaşam ve ulaşım gibi alanlarda hizmet sunan sektörlerden biri de inşaat sektörüdür. İnşaat sektörü için kullanımı en fazla olan malzemelere örnek vermek gerekirse beton, ahşap, alüminyum, asfalt ve demir şeklinde sıralayabiliriz [36].

Betonun bu kadar çok tercih edilmesinin sebeplerine bakarsak iyi mekanik özelliklere sahip olması ve maliyet bakımından hesaplı olmasıdır [37].

Dünya çapında yılda yaklaşık 10 milyar ton geleneksel beton üretilmektedir. Bu miktar, inşaat endüstrisinde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olması nedeniyle yüksektir. Bağlayıcı madde olarak betonda çimento kullanılır. Betonun dayanıklılığını ve sertliği çimentonun hidrasyon reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gibi bileşenlerden kaynaklıdır. Bu bileşikler agregalarla bir araya gelerek betonun sağlamlığını ve dayanıklılığını sağlar. Portland çimento dünyada en yaygın ve 200 yılı aşkın betonun önemli bir bileşeni olarak kullanılmaktadır. Çoğunlukla kireçtaşı ve kilin öğütülmesiyle kalsiyum silikat, kalsiyum alüminat ve kalsiyum ferrit bileşiklerinin hidrasyonu ile oluşmaktadır. 2011 yılı açıklanan verilerine göre en çok beton üretimi yaptığı tespit edilen ülkeler sırasıyla Çin, Hindistan ve ABD olarak gösterilmektedir [38].

Dünya'da yenilenemeyen hammadde kaynaklarının bilinçsiz kullanımı ile hızla tükenmesi ve 21. yüzyılda enerji tüketiminin artması gelecek nesil ve yaşam için önemli

bir problem teşkil etmektedir. Çimentooya olan ihtiyacın artması, çimento üretiminde kullanılan hammadde kaynaklarından biri olan kireçtaşının kullanımında da artışa sebep olmuştur [39]. Maden sektörü ve taş ocakçılığı kireçtaşını çıkarmak için faaliyete geçmesi nedeniyle, bilinçsiz ve kontrolsüz çalışmalar gelecekte yenilenemeyen doğal hammadde kaynaklarına zarar verecektir. Yenilenemeyen doğal ham madde kaynakları sınırlıdır ve çıkarıldıktan sonra yeniden oluşum gösteremez.

Doğal ham madde kaynakların sürekli ve bilinçsiz kullanımı küresel iklim değişikliği ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi kalıcı sorunlara yol açmaktadır [40]. Çimento üretiminin devam etmesiyle hem enerji tüketimi hem de sera gazının salınımıyla çevreye verdiği zararlarda devam edecektir. Bu noktada geopolimer üretimi, çevresel ve ekonomik avantajları ile çimento kullanımına sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Geopolimerler, endüstriyel atıklar ve yan ürünler gibi düşük karbon ayak izine sahip hammaddelerden üretilirler. Bu, üretim sürecinde daha az enerji harcanması ve CO₂ salınımının önemli ölçüde azaltılması anlamına gelir. Ayrıca, geopolimerler, yüksek dayanıklılık ve uzun ömür gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir, bu da bakım ve onarım maliyetlerini düşürür. Dolayısıyla, geopolimerlerin kullanımı, hem çevresel etkileri azaltır hem de uzun vadeli ekonomik avantajlar sağlar.

Uçucu külün betonda kullanımı 1914 yılında icat edilmiş fakat 1937 yılına kadar kullanılmamıştır [41]. Uçucu kül benzeri volkanik tüflerin puzolanik özellikleri, Romalılar tarafından su kemerleri inşa edilirken erken fark edildi. Mısır piramitlerinde yanmış tanelerin külü de aynı amaçla hammadde (silika, puzolan) olarak kullanılmıştır [28].

Uçucu kül kullanılan geopolimerlerin dayanım ve mikro yapı özellikleri üzerinde literatürde pek çok araştırma var olmaktadır [42]. Literatürde aktivatör çeşidinin ve miktarının, kürlenme süresi ve ortam koşullarının, farklı fiber ilavesinin ve diğer bazı puzolanik maddelerin ilavesinin geopolimer üzerinde katkıları çalışmada rapor edilmiştir [43,44]. F tipi uçucu kül ile üretilen geopolimerlerin yüksek sıcaklık etkisi üzerine hali hazırda araştırmalar yapılmaktadır [45].

Zhang ve çalışma arkadaşları, F tipi uçucu külü alkali aktivatör için sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile hazırlayıp ortam koşullarında 24 saat 80°C’de ısıtma koşullarında

hazırlanan geopolimerin yüksek sıcaklık performansını araştırmışlardır. Yüksek sıcaklık performanslarını incelemek için hazırlanan geopolimerler 5°C/dk ısıtma hızıyla 100°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C' ye kadar farklı numuneleri ısıtmışlardır. Belirlenen sıcaklıklar da 2 saat bekletilen geopolimerler üzerinde yüksek sıcaklık etkisini; görsel, boyut inceleme, ağırlık kaybı, çatlak boyutu, dayanım ve mikro yapıdaki değişim ve etkilerini inceleyerek sonuçları rapor etmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında geopolimerlerde yüksek sıcaklık sonrası en fazla kütle kaybı meydana gelmiştir. Kür koşulları fark etmeksizin F tipi uçucu kül ile hazırlanan geopolimerlerde 600°C'ye kadar basınç dayanımında herhangi bir kayıp oluşmadığını gözlemlemişlerdir. Isıl kütleme sonucu ile elde edilen geopolimerlerin yüksek sıcaklık performanslarının ortam küründe hazırlanan geopolimerlere göre daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir [46].

Hager ve ark., 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer numunelerinin dayanım özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. %100 uçucu kül ile hazırlanan karışım ile birlikte, uçucu kül yerine ağırlıkça %10, %30 ve %50 oranlarında cüruf ilavesi yapılarak dört ayrı geopolimer harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimerlerin yüksek sıcaklıkta gösterdiği dayanım ve değişiklikleri değerlendirmek için; taramalı elektron mikroskopu, ultrases geçiş hızı, cıva intrüzyon porozimetrisi, termal gerinim ölçümleri, diferansiyel termal analiz ve termogravimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Burgulara göre cüruf ilavesi ile hazırlanan uçucu küllü geopolimer harçların dayanımını iyi derecede iyileştirmesine rağmen (basınç mukavemeti 100 MPa'nın üzerinde), yüksek sıcaklık performansında aynı etkiyi göstermediğini belirtilmiştir. Ayrıca, 1000°C'de başlangıç dayanımının yaklaşık %90'ına sahip olan %100 uçucu kül ile hazırlanan yüksek geopolimer numunesinin yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek yapı elemanlarında kullanımı tavsiye etmişlerdir [47].

Fernandez-Jimenez ve ark. araştırmalarında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerini ve geopolimer numunelerinin bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılan sülfat dayanımı bakımından deneye tabi tutmuşlardır. Çalışmanın ilk aşamalarında dayanımda dalgalanmalar görülmüş bu dalgalanmalardan sonra, hem %4,4 Na₂SO₄ çözeltisine batırılmış numunelerde hem de havada kür şeklinde hazırlanan standart numunelerinde dayanım artışı gözlenmiştir ve bu gözlem sonucu aktivatör

değişiminin hazırlanan uçucu kül bağlayıcılı numunelerin sülfat direncinde önemli bir değişikliğe yok açmadığı gözlemlenmemiştir. Elektron mikroskobu altında incelenen alkali aktivatör ile aktive edilen uçucu küllü bağlayıcının, Na_2SO_4 çözeltisinde 365 gün bekledikten sonra malzemenin gözeneklerinde Na_2SO_4 tuzlarının kristallerini ortaya çıktığını belirlemişlerdir [48].

Albitar ve ark. çalışmalarına, alkali çözelti olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile bağlayıcı olarak uçucu kül ve cüruf kullanarak ürettiği geopolimer betonların dayanım özelliklerini değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucuna göre, geopolimer betonun dayanıklılık performansları belirlenmişler ve (Geleneksel Portland Çimentolu) OPC betonundan daha iyi sonuç göstermiştir. Sodyum sülfat içerisinde bekletilen betonlarda; OPC betonunda %15,4 bozulma olurken uçucu kül ile hazırlanan geopolimerde %13,4 ve cürufli ürünlerde ise %12,3 olmuştur. Sülfirik aside maruz bırakılan OPC betonlarındaki basınç dayanımı azalması %26,6 olurken uçucu kül ile hazırlanan geopolimerler %10,9 ve cüruf ile hazırlanan ürünlerde %7,3 olduğu tespit edilmiştir [49].

Yaprak ve ark. taban külü ve yüksek fırın cürufu kullanarak hidrasyon gelişimini araştırmışlardır. İncelemeler sonucunda hidrasyon gelişiminin uzun bekleme süresiyle geliştiği, kısa süreli kürün hidrasyon için yeterli olmadığı belirlenmiştir. Uzun süreli kür koşullarında %25 katkılı taban külü iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Atıkların değerlendirilmesi kapsamında da %50 taban külü, %50 yüksek fırın cürufunun kullanımını belirlemişlerdir [50].

Kaya ve ark. araştırmalarında bağlayıcı olan uçucu külün, alkali çözelti olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktivasyonu ile hazırlanan geopolimerlerin değişiklik gösteren bekleme sürelerinde dayanımları ile kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisini varyans analizi ile incelemişlerdir. Sonuçlara göre 20°C' de kürlenmiş geopolimerlerin 3 günlük basınç dayanımları ile 90°C 'de kürlenmiş numunelerin 3 günlük dayanımları arasında 48,96 MPa bir fark gözlenirken, 180 gün sonunda ölçümler sonucu 30,77 MPa olarak belirlenmiştir. Kürleme sıcaklığının artışı doğrultusunda hazırlanan geopolimerlerinde basınç dayanımında artış gözlenmiştir [51].

Kulkarni [52], Mucsi ve ark. [53] yaptıkları çalışmalarında kırmızı çamur ve uçucu kül bazlı geopolimerlerde fiziksel ve dayanım özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Kırmızı çamurun oranının en fazla %15 oranından kullanılabilceğini ve geopolimerlerin dayanım performansını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Bayer Ozturk ve ark. çömlek atıklarının geopolimer harçlarda değerlendirilmesini araştırmışlardır. Çalışmada uçucu külün ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında pişmiş çömlek kırığı atığı ilavesinin eklenmesiyle harç reçeteleri hazırlanmıştır. Sonuçlara göre hazırlanan harç reçetelerinden, uçucu kül yerine %40' a varan oranlarda çömlek atığı ilavesi ile geopolimerlerin mekanik özelliklerde referans numune göre dayanım değerlerinin iki katına çıktığı gözlenmiştir ve çömlek atığının alternatif bir hammadde olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir [54].

Bayer Ozturk ve Çam yaptıkları deneysel çalışmada sarı ve kırmızı taş kesme atıklarının uçucu kül bazlı geopolimerde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada kırmızı (RSW) ve sarı (YSW) taş kesme atıklarının ağırlıkça %10-40 oranlarında F tipi uçucu kül bazlı geopolimer harçlara ilavesi ile aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimerler numuneleri 90°C'de 24 saat süreyle termal kürleme işlemine tabi tutularak fiziksel ve mekanik özelliklerini incelenmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında, %40'a kadar ilavesi olan YSW, yüksek Si/Al oranları ve Ca içeriği ve taş kesme atıklarının oluşturduğu iğne benzeri kristallerin gözlenmesiyle mekanik mukavemeti 16,4 MPa'dan 26,0–30,7 MPa'ya kadar arttığı gözlenmiş olup fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirdiği taş kesim atıklarının geopolimer harçlarda kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır [55].

Eser ve ark. yaptıkları çalışmada pişmiş çömlek kırığı atığı ve vitrifiye atığının tekli kullanıldığı NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimerler harçlarda sırasıyla 25,0 MPa ve 30,0 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımları elde edilebilmiştir. Uçucu kül ile seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen geopolimer harçlarda uçucu külün tek başına kullanıldığı harçlara yakın dayanım değerleri elde edilebilmiştir. Atıkların etkili ve verimli kullanımını açısından seramik atıklarının uçucu küllü geopolimerlerde kullanım potansiyeli olduğu görülmüştür. Seramik atıklarının ikili karışım halinde kullanıldığı geopolimer harçlarda genellikle 30,0 MPa üzerinde 28

günlük basınç dayanımı elde edilmiş, NaOH ile aktive edilen 225 V-Ç karışımında da 28 günlük basınç dayanımı değeri 38.3 MPa olmuştur. Uçucu kül ve seramik atıklarının birlikte kullanıldığı üçlü karışımlarda da genellikle atıkların üçlü kullanıldığı 150 Ç-K-V kodlu harçlarda da her iki aktivatör içeriği ile de yaklaşık 30,0 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Harçların eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında genellikle bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının sodyum hidroksitle üretilenlere göre genellikle daha yüksek olduğu gözlenmiştir [56].

Daniyal ve Ahmad çalışmalarında seramik atıkların beton üretiminde kullanılabilmesi literatürde bazı araştırmalara konu olmuştur. Yapılan bir araştırmada iri agregaya yerine betonda çeşitli oranlarda seramik karo kullanılmış ve optimum seramik değeri %30 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda seramik karo atıkları, doğal iri agregaya ilavesi olarak kullanıldığında, seramik karo atığının yüksek su emmesi ve köşeli şekilleri nedeniyle betonun işlenebilirliğini ve akış kolaylığını azaltma eğilimindedir [57].

Kabir yaptığı araştırmada, doğal iri yapılu agregalar, seramik karo atığı agregalar kullanıldığı çalışmada doğal iri agregaya yerine seramik karo atıklarının kullanılması ve seramik agregaların köşeli yapısı ve üniform olmayan boyutlarından kaynaklı olarak betonun çökme değerinde %55 kayıp meydana getirdiği görülmektedir [58].

Raval ve ark. çalışmalarında Hindistan da yapılan bir araştırmada doğal agregaya ile seramik sağlık gereci atığı karıştırıldığında darbeye karşı dayanımının ve aşınmaya karşı direncinin azaldığını fakat daha az su emdiği için daha kullanışlı bir malzeme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çeşitli oranlarda seramik atığına az miktarda agreganın %10'nu Metakaolen ikame edilerek seramikle hazırlanmış olan çimentonun dayanımını ve diğer fiziksel özelliklerini iyileşme gözlendiği belirtilmiştir [59].

Rajamanickam ve S.P araştırmalarında seramik karo atıklarını, %0 ile %20 oranları ilave edilerek 7 ila 28 günlük kürlenme sonucunda, ince agregaya ilavesi olarak kullanmışlardır. Çalışmadan elde edilen verilere göre seramik karo atığının miktarı arttıkça daha sert bir beton matrisinin meydana gelmesiyle betonun işlenebilirliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca 28 günlük dayanım sonuçları 7 günlük sonuçlarına

kıyasla kontrol karışımında çok fazla fark etse de seramik ile hazırlanan karışımlarda seramik oranı arttıkça dayanımda ki artış azalmıştır [60].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde ve geopolimerlerde kullanılma avantajları olarak kırmızı çamur, kiremit/tuğla, taş kesim atıkları, pişmiş çömlek atığı, seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer bileşiminde kullanılabileceği, alternatif bir hammadde olarak kullanımının yanında özellikleri değiştirmeden kullanılabildiği görülmektedir. Ayrıca incelenen deneysel çalışmaların genel olarak son birkaç yıl içinde geopolimer harç-hammadde konusunda endüstriyel atıkların ilgi gördüğü ve yeni yapılacak çalışmaların bu yönde araştırma-geliştirmeye araştırmacıları sevk ettiği öngörülmektedir. Literatür incelendiğinde seramik atıklarının kullanıldığı çalışmalarda seramik karo atıkları, cam, tuğla-kiremit atıklarının farklı alkali aktivatörlerle (sodyum potasyum silikat, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit vb), farklı kür sıcaklıkları etkisiyle, çimento ikamesiyle birlikte geopolimerlerin hazırlanıp özelliklerinin incelendiği görülebilmektedir. Ancak, seramik karo fabrikalarının çöktürme havuzlarından filtre preslerle alınan atık kek, vitrifiye atıkları ve çömlek kırıklarının birlikte geopolimer harç hazırlamada kullanımlarını ele alan bir çalışma olmayıp, farklı seramik atıkları bazlı geopolimerin özellikleri ve bu harçların yüksek sıcaklıklarda mekanik ve mikroyapısal performanslarının analizinin araştırılmasına hala ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez çalışmamızda yer alan üç farklı seramik atığının geopolimer ürünler için standart özellikleri bozmadan, geopolimerlerde ana hammadde olarak kullanılan uçucu külün yerine kullanılabilecek alternatif bir hammadde tek ya da karışımı olarak kullanılmasını sağlayıp ürün maliyetini düşürmek ve atıkların geopolimer ürünlerde ana malzemelerden biri olan uçucu kül yerine kullanılması ile hazırlanan ürünlerin ağırlık, eğilme ve basınç dayanımları, su emme-boşluk oranı, mikroyapı üzerine etkilerinin incelenip değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma ve yapılan testlerin sonuçlardan yola çıkarak kullanılan seramik atıklarının alternatif bir hammadde kaynağı olarak kullanılabileceği hem geopolimer üretimine, hem de atıkların temin edildiği, pişmiş çömlek kırığı, seramik sağlık gereci ve seramik yer-duvar karo fabrikalarında oluşan depolama sorununa çözüm olup firmalara ve ülke ekonomisine fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

3.BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

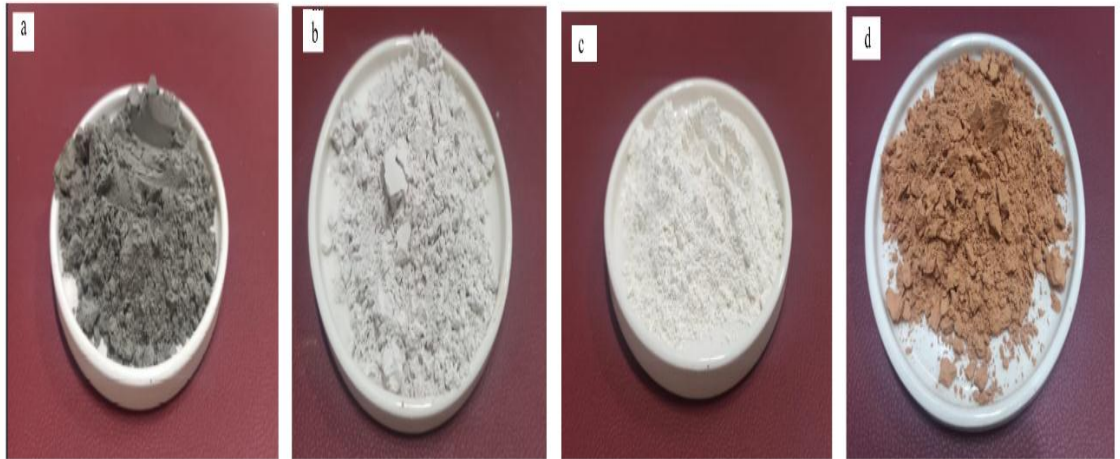
3.1. Malzemeler

3.1.1. Seramik Atıklar

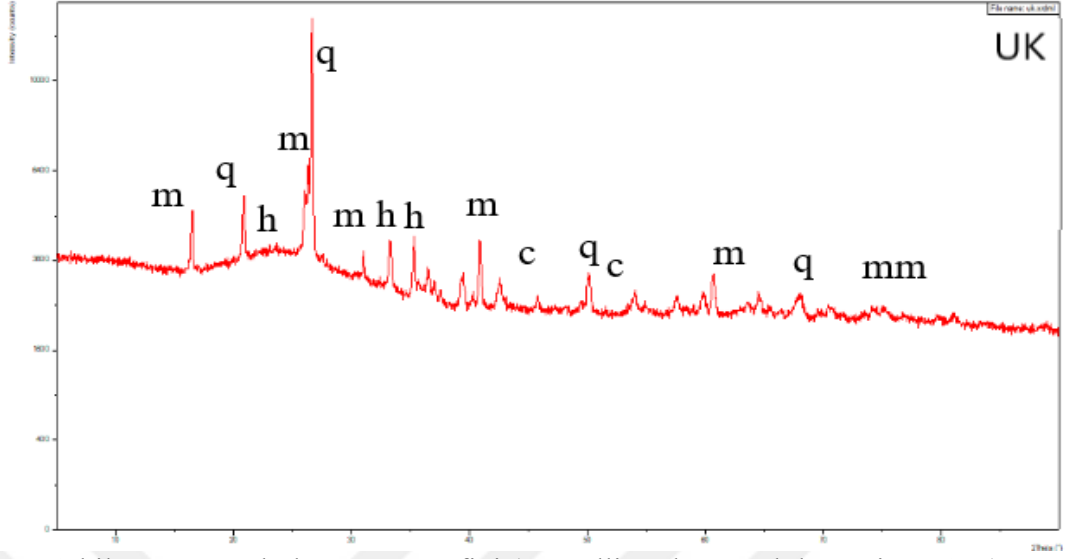
Geopolimer karışımlarında alkali ile aktive etmek amacıyla kullanılan hammaddeler; uçucu kül Araz Metal Madencilik'in yardımıyla Sugözü Termik Santralinden (İskenderun), seramik karo atık keki Seranit Seramik (Bilecik), pişmiş çömlek ürünlerinin kırığı Anadolu Çömlekçilik (Avanos/Nevşehir), seramik sağlık gereci fabrikasının vitrifiye atıkları Turkuaz Seramik (Kayseri), firmasından temin edilmiştir. Firmalardan temin edilen bazı atıklar BC Teknoloji (Nevşehir) firmasında halkalı değirmende 125 µm altına gelecek şekilde öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan hammaddelerin Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma Merkezi (TAUM)'nda gerçekleştirilen kimyasal analiz (XRF-PANalytical Axios Advanced model) sonuçları Tablo 3.1. 'de, toz görüntüleri ise Şekil 3.1.'de sunulmuştur. Uçucu külden elde edilen kristal fazlar müllit, kuvars, hematit ve CaO'tir. Uçucu kül ve çömlek atığının demir oksit, K₂O ve CaO içeriği diğer malzemelerden fazla, silika içeriği ise düşüktür. SiO₂/Al₂O₃ oranları da Tablo 1'de, sunulmuştur. Bu oran arttıkça Si-O-Si bağlanmasına bağlı olarak harçların özellikle eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmektedir. Hammaddelerin Erciyes Üniversitesi TAUM'da gerçekleştirilen kristal faz analizleri (XRD, Panalytical Empyrean model) sonuçları Şekil 3.2.-3.5.'de sunulmuştur.

Tablo 3.1.Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları (U, Ç, K ve V)

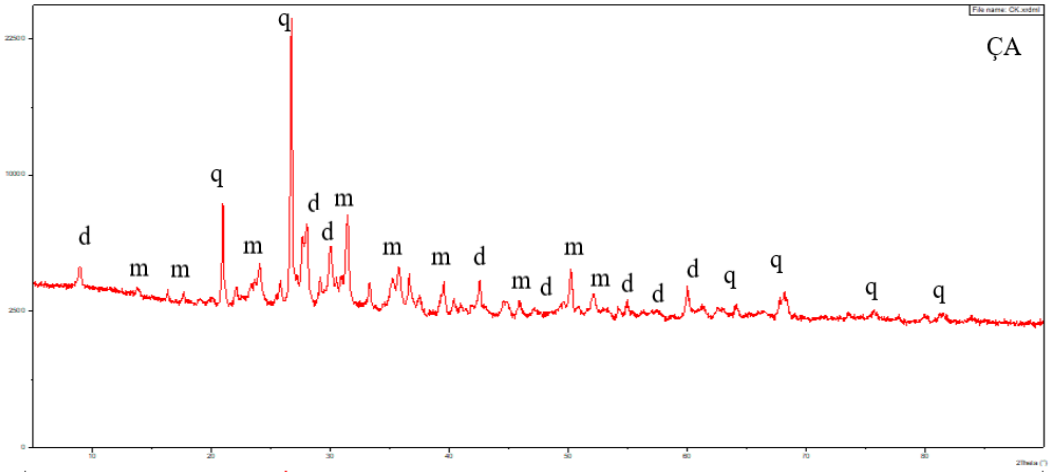
Kimyasal Kompozisyon (%)	U	Ç	K	V
SiO ₂	54,42	52,51	68,27	63,06
Al ₂ O ₃	26,12	16,37	17,65	30,86
CaO	2,44	14,06	1,04	0,92
K ₂ O	3,44	2,76	1,35	1,06
Na ₂ O	0,52	0,80	3,27	0,27
Fe ₂ O ₃	5,92	6,94	1,34	1,13
TiO ₂	1,09	0,61	0,44	0,70
MgO	1,99	2,83	0,67	0,38
P ₂ O ₅	0,16	0,11	0,10	0,07
BaO	0,08	0,01	0,29	0,03
Mn ₃ O ₄	0,07	0,19	-	-
SO ₃	0,20	0,33	0,09	0,05
V ₂ O ₅	0,04	0,03	0,02	0,01
ZnO	-	0,02	0,14	0,07
ZrO ₂	0,03	-	0,52	0,53
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,08	3,20	3,86	2,04
Kızdırma kaybı	3,45	2,29	4,80	0,87



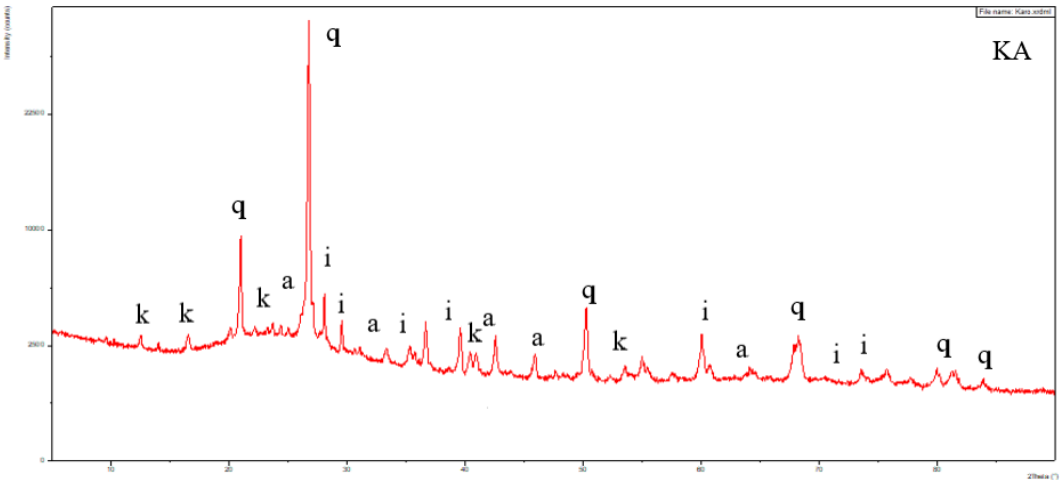
Şekil 3.1 a)Uçucu kül (U), b)Filter-pres karo atığı (K), c)Vitrifiye atığı (V), d)Pişmiş çömlük kırığı atığı (Ç)



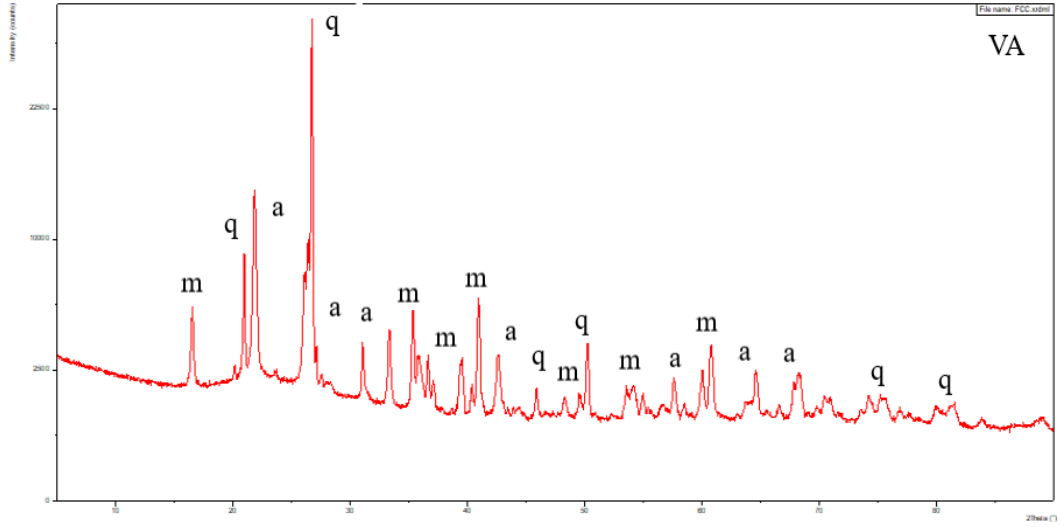
Şekil 3.2 Uçucu külün XRD grafiği (m:müllit, q:kuvars, h:hematit, c:CaO)



Şekil 3.3. Çömlek atığının XRD grafiği (m:microkline, q:kuvars, d:diopsit)



Şekil 3.4. Karo atığının XRD grafiği (K:Kaolinit, i:illit, q:kuvars, a:albit)



Şekil 3.5. Vitriye atığının XRD grafiği (a:albit, q:kuvars, m:müllit)

3.1.2. Aktivatörler

Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) aktivatör olarak kullanılmıştır. NaOH , nemden kolaylıkla etkilenen, rengi beyaz, katı pul yapıda, sulu çözeltide hidroksil iyonları oluşturarak çözünen ve ekzotermik reaksiyonuyla ısı veren bir aktivatördür. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) ise piyasada cam suyu olarak da adlandırılan suda çözünen bir aktivatördür ve Şekil 3.6.'da NaOH ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) verilmiştir.



Şekil 3.6. Sodyum hidroksit (NaOH) ve Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

3.1.3. Dere Kumu

Yapılan çalışmasında kullanılan kumu Nevşehir'in ilçelerinden olan Avanos'un derelerinden çıkartılan standart kum olarak geçen Şekil 3.7.'de görüntüsü verilen dere kumu kullanılmıştır.



Şekil 3.7.. Dere kumu (2 mm ve altı)

3.1.4. Su

Karışımların hazırlanmasında Nevşehir şebekesine ait içilebilir musluk suyu kullanılmıştır (TS EN 1008).

3.2. Ön Deneme Çalışmaları

Aktivatör olarak hangi karışımın harç özellikleri (dayanım) açısından daha iyi sonuç verebileceğini belirlemek için hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile Tablo 3.2.-3.3.'de verilen karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlarda sıvı/bağlayıcı oranı 0,40 olarak belirlenmiştir. Literatürde genel olarak aktivatörün kullanım miktarı optimum koşulların sağlandığı aralık 12 M olduğu için hazırlanan karışımlarda da aktivatörler 12 M olarak kullanılmıştır. Yapılan harç numunelerine 7 ve 28 gün sonrasında dayanım testi yapılmıştır.

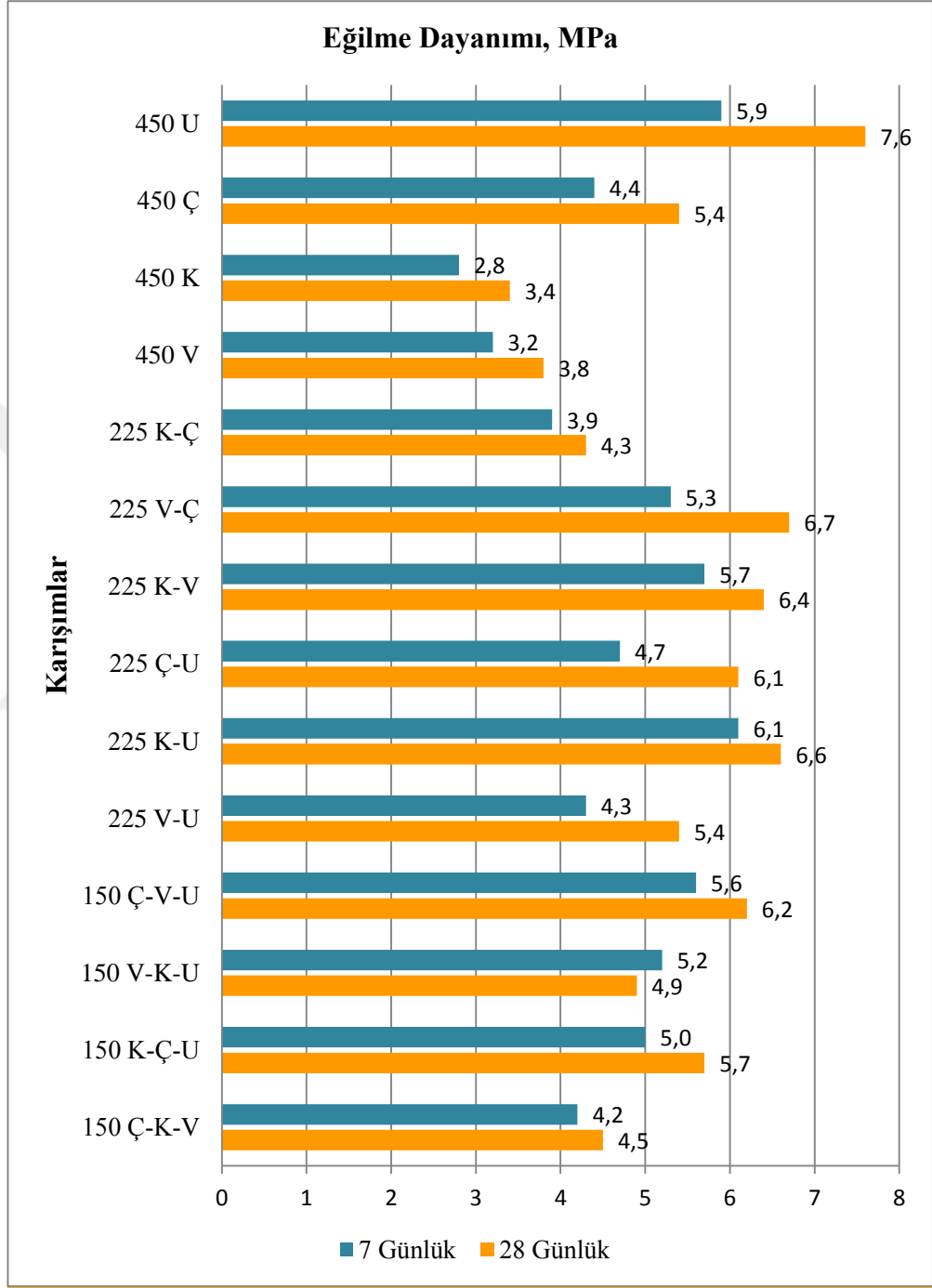
Tablo 3.2. NaOH aktivatörü ile hazırlanan karışımlar ve karışımlardaki oranlar(g)

Numune kodları	Ç	K	V	Kum	U	NaOH	Su
450UK(Kontrol)	-	-	-	1250	450	87	180
150 Ç-V-U	150	-	150	1250	150	87	180
150 V-K-U	-	150	150	1250	150	87	180
150 K-Ç-U	150	150	-	1250	150	87	180
225 K-Ç	225	225	-	1250	-	87	180
225 V-Ç	225	-	225	1250	-	87	180
225 K-V	-	225	225	1250	-	87	180
450 Ç	450	-	-	1250	-	87	180
450 K	-	450	-	1250	-	87	180
450 V	-	-	450	1250	-	87	180
225 Ç-U	225	-	-	1250	225	87	180
225 K-U	-	225	-	1250	225	87	180
225 V-U	-	-	225	1250	225	87	180
150 Ç-K-V	150	150	150	1250	225	87	180

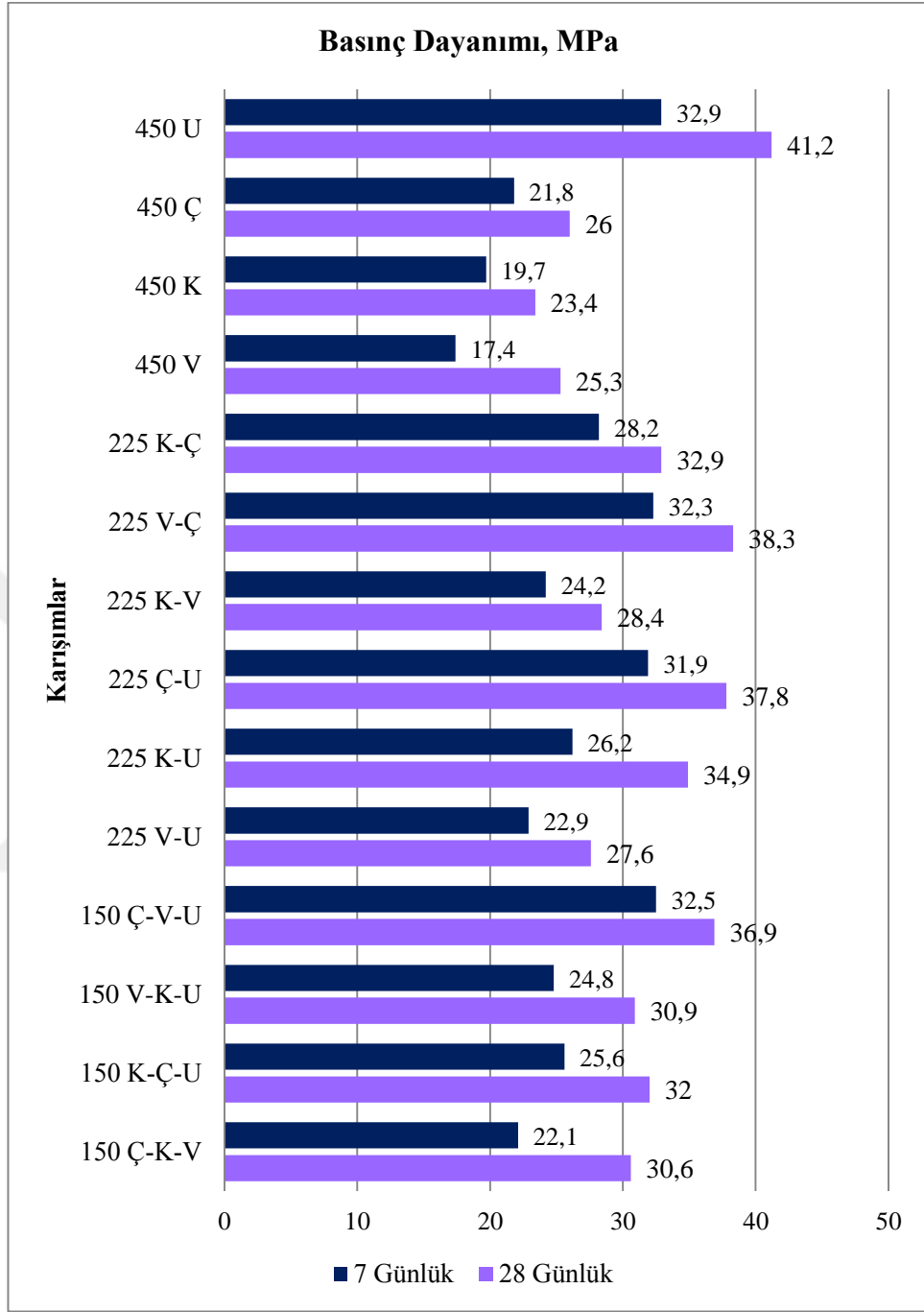
Tablo 3.3. Na₂SiO₃ aktivatörü ile hazırlanan karışımlar ve karışımlardaki oranları (g)

Numune kodları	Ç	K	V	KUM	U	Na ₂ SiO ₃	Su
450UK(Kontrol)	-	-	-	1250	450	273	13
150 Ç-V-U	150	-	150	1250	150	273	13
150 V-K-U	-	150	150	1250	150	273	13
150 K-Ç-U	150	150	-	1250	150	273	13
225 K-Ç	225	225	-	1250	-	273	13
225 V-Ç	225	-	225	1250	-	273	13
225 K-V	-	225	225	1250	-	273	13
450 Ç	450	-	-	1250	-	273	13
450 K	-	450	-	1250	-	273	13
450 V	-	-	450	1250	-	273	13
225 Ç-U	225	-	-	1250	225	273	13
225 K-U	-	225	-	1250	225	273	13
225 V-U	-	-	225	1250	225	273	13
150 Ç-K-V	150	150	150	1250	225	273	13

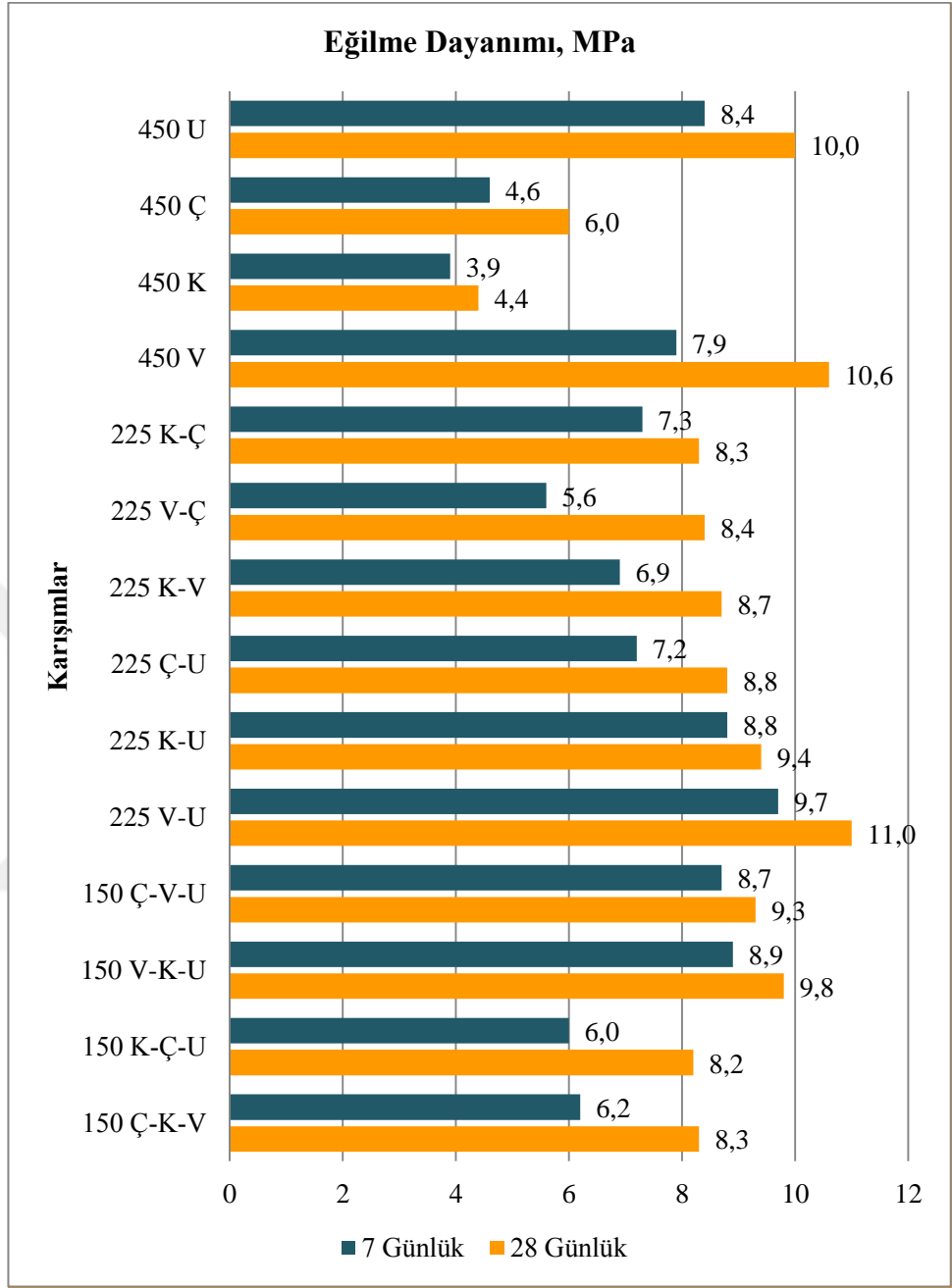
Hazırlanan harçların 28 gün sonra elde edilen eğilme ve basınç dayanımları Şekil 3.8.- 3.11.'de sunulmuştur.



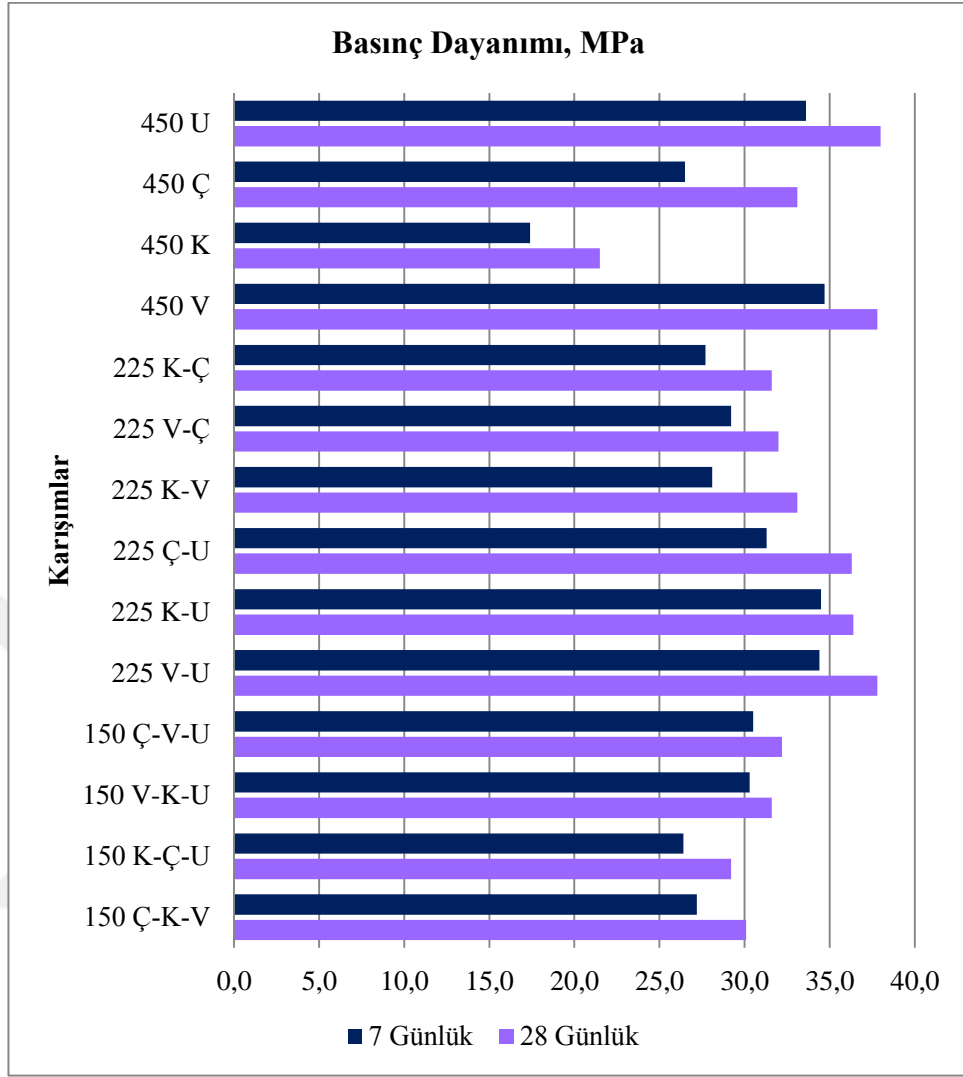
Şekil 3.8. NaOH ile üretilen harçların eğilme dayanımları



Şekil 3.9. NaOH ile hazırlanan karışımların basınç dayanım sonuçları grafiği



Şekil 3.10. Sodyum silikat ile hazırlanan karışımların eğilme dayanım sonuçları grafiği



Şekil 3.11. Sodyum silikat ile hazırlanan karışımların basınç dayanım sonuçları grafiği

Ön deneme aşamaları dahilinde pişmiş çömlek kırığı atığı ve vitrifiye atığının tekli kullanıldığı NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimerler harçlarda sırasıyla 25,0 MPa ve 30,0 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımları elde edilebilmiştir. Uçucu kül ile seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen geopolimer harçlarda uçucu külün tek başına kullanıldığı harçlara yakın dayanım değerleri elde edilebilmiştir. Atıkların etkili ve verimli kullanımı açısından seramik atıklarının uçucu küllü geopolimerlerde kullanım potansiyeli olduğu görülmüştür. Seramik atıklarının ikili karışım halinde kullanıldığı geopolimer harçlarda genellikle 30,0 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiş, NaOH ile aktive edilen 225 V-Ç karışımında da 28 günlük basınç dayanımı değeri 38.3 MPa olmuştur. Uçucu kül ve seramik atıklarının

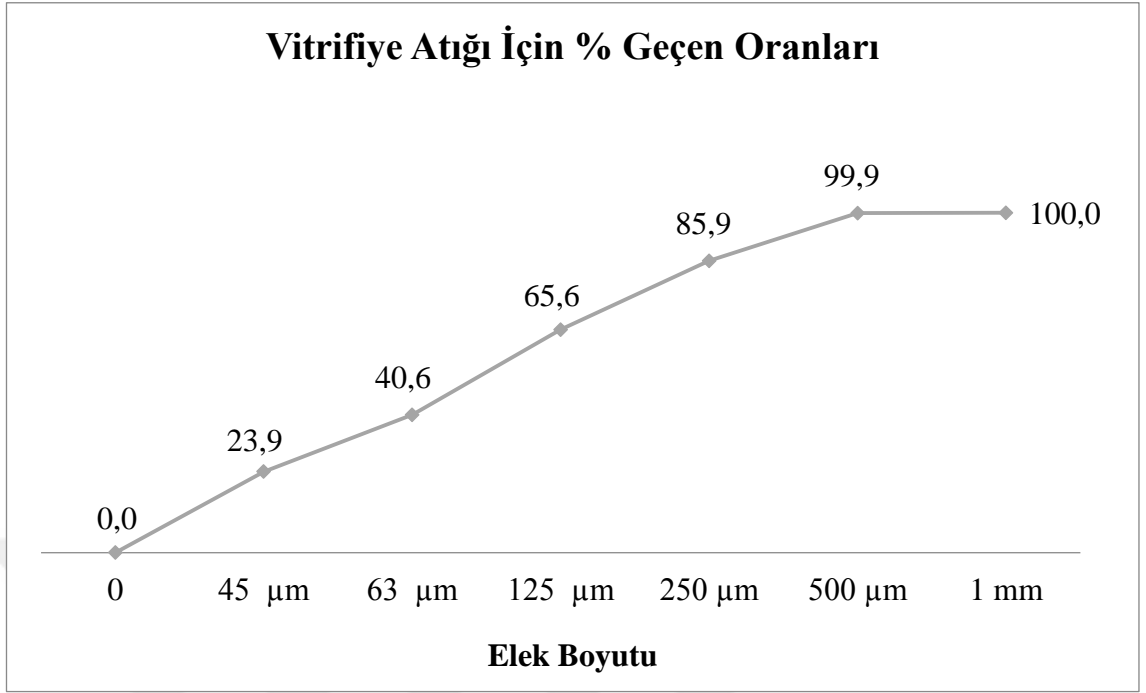
birlikte kullanıldığı üçlü karışımlarda da genellikle 30,0 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir. Uçucu kül içermeyen seramik atıkların üçlü kullanıldığı 150 Ç-K-V kodlu harçlarda da her iki aktivatör içeriği ile de yaklaşık 30,0 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Harçların eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında genellikle bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının sodyum hidroksitle üretilenlere göre genellikle daha yüksek olduğu gözlenmiştir [56].

3.3. Deneysel Çalışmalar

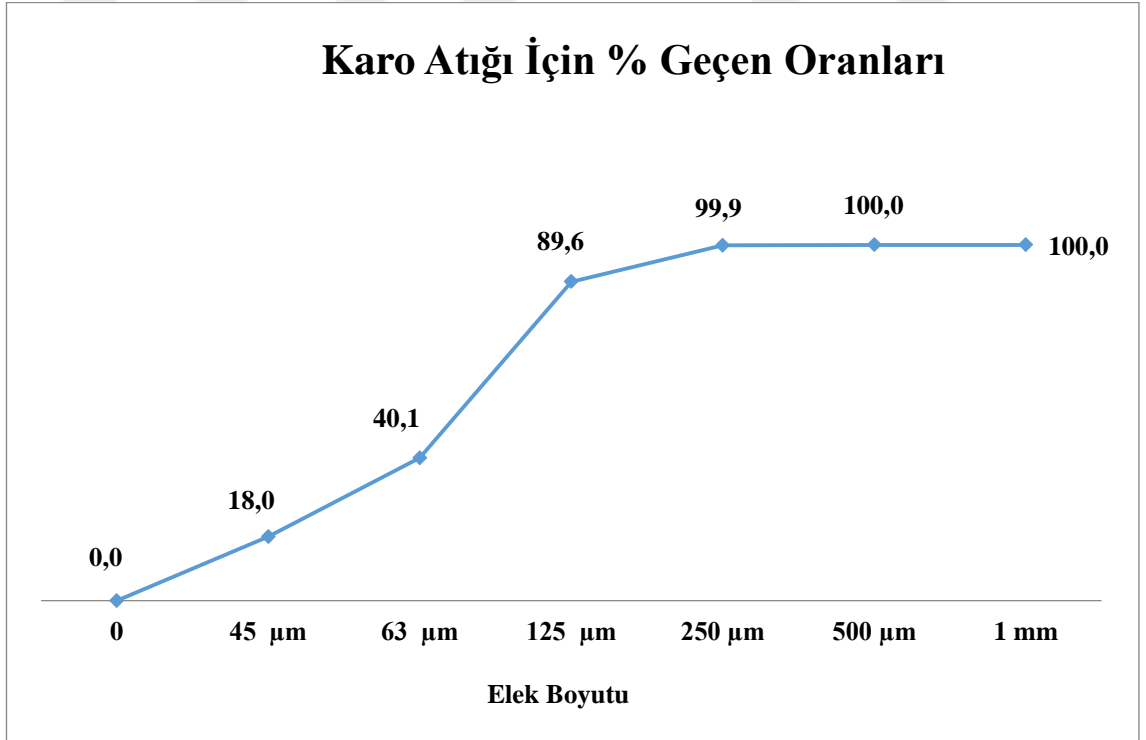
İlk deneme çalışmasından elde edilen basınç dayanımı sonuçlarında yola çıkarak geopolimer harçlarında uçucu kül yerine kullanılacak hammaddeler aktivatör tipine göre atık malzeme ve karışım oranları, kür süresi gibi faktörler belirlenmiştir. Yeni belirlenen reçete denemelerinde atıklara elek analizi yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 3.4.'de ve Şekil 3.12.-3.14.'de verilmiştir. Dayanım sonuçlarına göre hazırlanan numunelerde cam suyu ile hazırlanan harçlarda karo kek ve çömlek atığı ile hazırlanan numunelerde yüksek dayanım elde edilirken, NaOH ile hazırlanan harçlarda vitrifiye atığı-karo atığı ve vitrifiye atığı-çömlek atığı karışımlarında yüksek dayanım sonuçları alınmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar 450 gr UK (%100) karışımına yakın veya yüksek olması nedeniyle bir sonraki aşamada Tablo 5-6'de verilen harç karışımlarının hazırlanmasına karar verilerek uçucu kül bileşimden çıkarılmıştır. Sadece atıklarla geopolimer harçların üretilmesine ve farklı kür sürelerinin (6 saat-24 saat 90°C'de bekletme) uygulanmasına karar verilmiştir.

Tablo 3.4. Karo kek atığı, vitrifiye ve çömlek atığı için elek analizi sonuçları

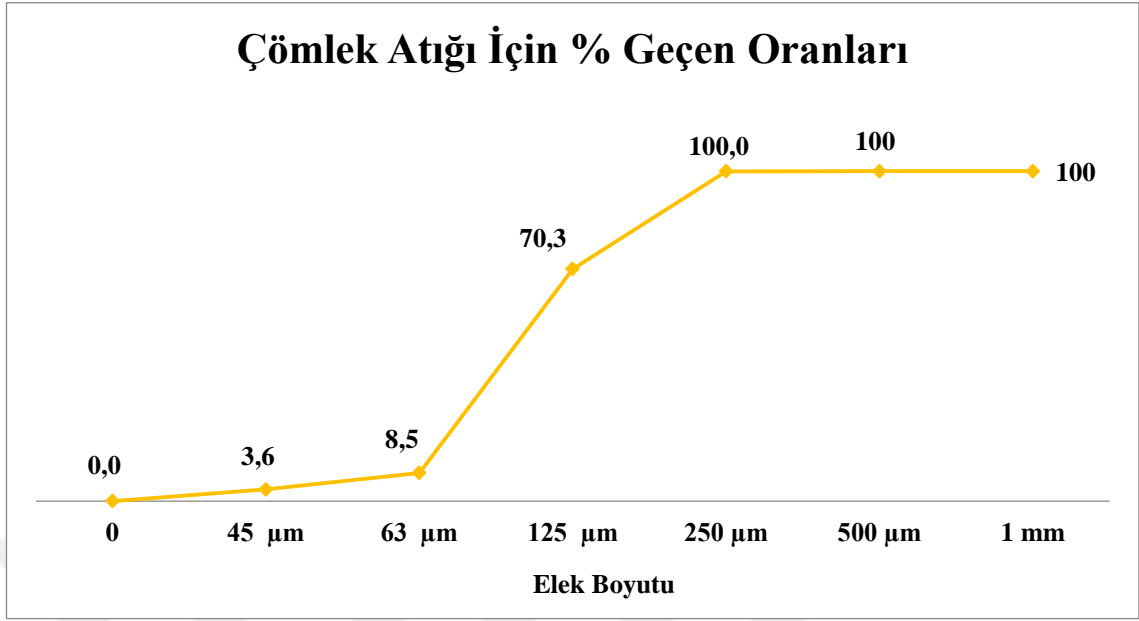
Elek boyutları	K	V	Ç
0	0,0	0,0	0,0
45 µm	18,0	23,9	3,6
63 µm	40,1	40,6	8,5
125 µm	89,6	65,6	70,3
250 µm	99,9	85,9	100,0
500 µm	100,0	99,9	100,0
1 mm	100,0	100,0	100,0



Şekil 3.12. Vitrifiye atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği



Şekil 3.13.. Karo atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği



Şekil 3.14. Çömlek atığı için % elekten geçen oranları sonuçları grafiği

Tablo 3.5. NaOH ile yeniden çalışılmasına karar verilen karışım oranları

Numune Kodları	Ç	K	V	Kum	NaOH	Su
100V	-	-	450	1250	87	180
75V-K	-	112,5	337,5	1250	87	180
50K-V	-	225	225	1250	87	180
100K	-	450	-	1250	87	180
100Ç	450	-	-	1250	87	180
75Ç-V	337,5	-	112,5	1250	87	180
50Ç-V	225	-	225	1250	87	180
75V-Ç	112,5	-	337,5	1250	87	180

Tablo 3.6. Sodyum silikat ile yeniden çalışılmasına karar verilen karışım oranları

Numune kodları	Ç	K	Kum	Na ₂ SiO ₃	Su
100Ç	450	-	1250	273	13
100K	-	450	1250	273	13
75K-Ç	112,5	337,5	1250	273	13
50K-Ç	225	225	1250	273	13
75Ç-K	337,5	112,5	1250	273	13

Geopolimer numunelerin hazırlanması aşamasında, sodyum hidroksit kullanılan karışımlarda bir cam kavanoza belirlenen miktarda sodyum hidroksit ve su konulmuştur. Kavanoz içinde sodyum hidroksit tamamen çözünene kadar kavanoz çalkalanarak erimesi sağlanmıştır. Bu aşamada meydana gelen ekzotermik reaksiyon ile ısı açığa çıktığı için cam kavanozun ısı oda sıcaklığına gelene kadar beklenip soğutulmuştur. Oda sıcaklığına gelen çözelti karıştırma kabına alınmıştır. Karıştırma kabı içerisine belirlenen miktarlarda tartılan atıklar karıştırma kabına konup 30 saniye karıştırdıktan sonra ikinci 30 saniye içerisinde kum eklenmiştir. Devamında yüksek hızda 30 saniye daha karıştırmaya devam edilmiştir. Karıştırıcı, durdurulup ilk 30 saniyede kabın çeperlerindeki harç bir mala yardımıyla ortaya toplanarak toplam 90 saniye beklenmiştir. Ardından 60 saniye daha yüksek hızda devam edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Sodyum silikatlı geopolimer harçları içinde belirlenen miktarda sodyum silikat, su ve atıklar karıştırma kabına eklenip numune hazırlama aşamalarına göre hazırlanmıştır. Harçlara kuruma öncesi işlenebilirlik ölçümleri TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Daha sonra karışımlar TS-EN 196-1'e uygun olarak 40×40×160 mm boyutlarında üç göze sahip harç kalıplarına iki aşamada dökülmüştür. Üç gözlü harç kalıplarına taze harç dökülüp yerleştirildikten sonra kalıplarıyla birlikte etüv içerisine konulmuş, 6 ve 24 saat boyunca 90°C sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Isıl küreden sonra kalıplarından çıkarılan harç numuneleri laboratuvar ortamında yaklaşık 23±2°C sıcaklıkta 7, 28 ve 90 gün bekletilmiştir. Numune hazırlama aşamalarının görselleri Şekil 3.15.de verilmiştir.



Şekil 3.15. Numune Hazırlama Aşamaları

4. BÖLÜM

DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1. Yayılma Tablası Deneyi

Belirlenen reçeteye göre yapılan taze harçların işlenebilirliğini ölçmek için TS EN 1015-3 Standartları doğrultusunda yayılma tablası kullanılır. Bu tabla 300 mm çaplı olup ortasında belirlenen yere ağzı açık yerleştirilen koni içerisinde taze harç ilk aşamada yarıya kadar konur devamında kalan boşluk taşma olmayacak şekilde doldurulur. Kalıp, taze harçtan düzgünce kaldırıp ayrıldıktan sonra saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülerek yayılma çapı kumpas ile ölçülür [61]. Deney düzeneği Şekil 4.1.'deki gibidir.



Şekil 4.1. Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi

4.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Seramik atığı ile hazırlanan referans geopolimer harç numunelerinin etüvde 6 ve 24 saat ısıtma kürlerini tamamladıktan sonra ortam sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Numunelerin görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doymuş kuru yüzey yoğunluk değerleri ASTM C 642'ye göre Bağıntı 4.1-4.4 ile belirlenmiştir [62].

$$\text{Görünür birim ağırlık} \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{\text{Numune boyutları}} \quad (4.1)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{Mk - Msu} \quad (4.2)$$

$$\text{Kuru yoğunluk} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{Md - Msu} \quad (4.3)$$

$$\text{Kuru yüzey doymuş yoğunluk} \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{Md}{Md - Msu} \quad (4.4)$$

Mk : Etüvden sonra alınan kuru ağırlık (g)

Md : Kuru yüzey doymuş ağırlık (g)

Msu : Su içindeki ağırlık (g)

4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

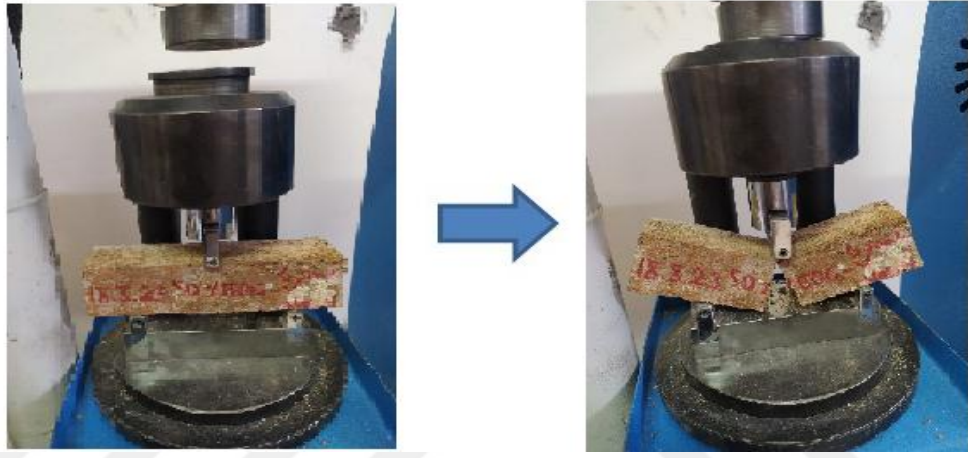
Hazırlanan geopolimer numuneleri TS EN 1015-11 standartlarına uygun şekilde eğilme dayanımı deneyi uygulanır. Mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılarak 3 numunenin ortalama sonucu eğilme dayanımı değeri Bağıntı 4.5'ye göre hesaplanır [62]. Eğilme dayanımı ölçümü Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

$$\text{Eğilme mukavemeti} \frac{N}{mm^2} = 1,5 * \frac{F * l}{b^3} \quad (4.5)$$

F : Prizmanın ortasına uygulanan kuvvet (N)

l : Destek silindirleri eksenleri arasındaki mesafe (100 mm)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (40 mm)



Şekil 4.2. Eğilme Dayanımı Testi

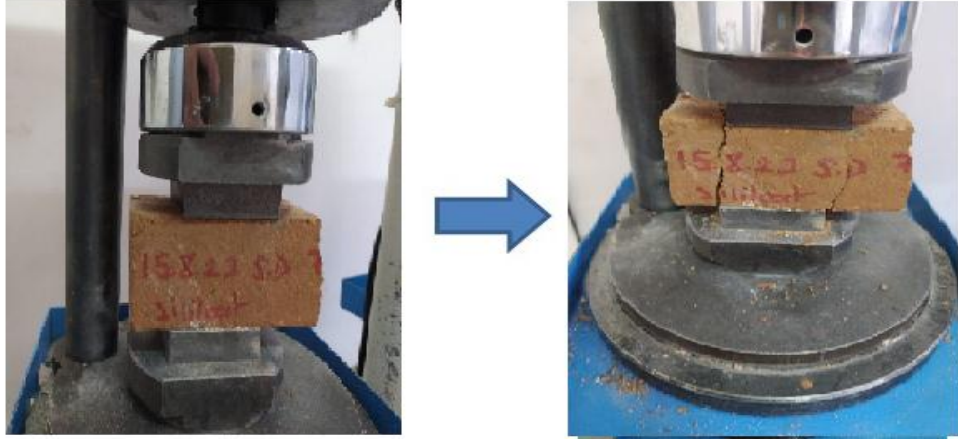
4.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi işlemiyle ikiye ayrılan geopolimer numunelerinin iyi çıkan kalıp yüzeyine basınç dayanımı deneyi, TS EN 1015-11 standartlarına uygun olacak şekilde test edilir. Test cihazı başlığı arasına yerleştirilen 500 N/s hızda yük uygulanmış numuneler için basınç dayanım hesabı Bağıntı 4.6 ile hesaplanır [62] ve Şekil 4.3.'de deney gösterilmiştir.

$$\text{Basınç dayanımı} \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F}{b^2} \quad (4.6)$$

b : Basınç plakasının kenar uzunluğu (40 mm)

F : Kırılmadaki en büyük kuvvet (N)



Şekil 4.3. Basınç Dayanımı Deneyi

4.5. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi

28 gün sonrasında hazırlanan geopolimer harç numunelerine ait su emme ve boşluk oranları deneyi, kür sonrasında 40×40×160 mm'lik prizma numunelere Arşimet terazisi Şekil 4.4. yardımıyla su içinde ağırlık ölçümü yapılarak Bağntı 4.7 ve 4.8 yardımı ile su emme ve boşluk oranı belirlenir.

$$\text{Boşluk oranı (\%)} = \frac{M_d - M_k}{M_d - M_{su}} * 100 \quad (4.7)$$

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{M_d - M_k}{M_k} * 100 \quad (4.8)$$

Mk: Etüvden sonraki kuru ağırlık (g)

Md: Kuru yüzey doygun ağırlık (g)

Msu: Su içindeki ağırlık (g)



Şekil 4.4. Su Emme ve Boşluk Ölçüm Deneyi

4.6. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi

Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton veya geopolimer malzeme farklı şekilde etkilenir. Yüksek sıcaklık, geopolimerin mekanik özelliklerini, fiziksel değişim, termal davranışını ve kimyasal dayanıklılığını değiştirebilir. Bu değişikliklere bağlı olarak çatlama, parça atma ve renk değiştirme gibi olaylar oluşmaktadır [63]. Bu özellikleri tespit edebilmek için yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dakika sıcaklık artışı ile 60 dakika 400, 600 ve 800°C’de ayrı ayrı yüksek sıcaklığa numuneler maruz bırakılarak ortam sıcaklığında eğilme ve basınç dayanım kayıpları test edilmektedir (Şekil 4.5.) [62].



Şekil 4.5. Yüksek Sıcaklık Uygulanmış Geopolimerler

4.7. Faz ve Mikroyapı İncelemeleri

Uçucu kül yerine kullanılan seramik atıkları olan seramik karo atık keki, pişmiş çömlek ürünlerinin kırığı, seramik sağlık gereci fabrikasının vitrifiye atıklarını kullanarak elde edilen geopolimer harç numunelerin içyapılardaki kristal oluşumu ve morfoloji değişimine herhangi bir etkide bulunduğunu araştırmak için taramalı elektron mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır. Numunelerden kırık yüzey parçaları alınarak SEM, XRD, EDX gibi mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

5. BÖLÜM

BURGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde uçucu kül yerine seramik atıkları farklı kütle oranlarında (100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100) ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılan geopolimer harç numunelerinde işlenebilirlik deneyi, 90°C'de 6 ve 24 saatlik iki farklı termal kürlenme periyoduyla bekletilen numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri, 400°C, 600°C ve 800°C'de yüksek sıcaklığa dayanım tayini deneyi ve mikroyapı analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

5.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Çalışmada seramik atıkları farklı kütle oranlarında (100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100) ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ve cam suyu (sodyum silikat) ile üretilen geopolimer taze harç numuneler üzerinde ölçümleri yapılan yayılma çapı deney sonuçları Tablo 5.1. ve Şekil 4.1.'de sunulmuştur.

Tablo 5.1. NaOH' lı geopolimer harçlarının işlenebilirlik sonuçları

NaOH ile hazırlanan harçlar		Sodyum silikat ile hazırlanan harçlar	
Numuneler	İşlenebilirlik (mm)	Numuneler	İşlenebilirlik(mm)
100 K	100	100 Ç	100
100 V	103	100 K	100
50 K- V	100	50 K-Ç	100
75 K - 25 V	100	75 K - 25 Ç	100
75 V - 25 K	100	75 Ç - 25 K	101
100 Ç	100	-	-
50 Ç - V	100	-	-
75 Ç - 25 V	101	-	-
75 V - 25 Ç	102	-	-

İşlenebilirlik değerleri incelendiğinde belirlenen bağlayıcı - su oranı, aktivatör oranında tüm harçların benzer davranış gösterdiği görülebilmektedir. Belirlenen seramik atıkları ile hazırlanan geopolimer taze harçların yayılma değerleri 100 – 103 mm arasında tespit edilmiştir. İşlenebilirlik için kıvam, akışkanlık ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin de optimum düzeyde olabilmesi gerekir.

5.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Tablo 5.2-5.5’de sunulan yoğunluk sonuçları incelendiğinde tüm harçların genel olarak benzer değişim sergilediği, genel olarak yoğunluk yükselmesinin 24 saatlik kür sonrasında harçlarda gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 5.2. NaOH’lı 6 saat kürlenmiş geopolimerlerde yoğunluk sonuçları

Sodyum hidroksitli numuneler	6 saatlik kür sonrası			
	Görünür Birim Ağırlık, g/cm ³	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
100 K	1,79	2,31	1,81	2,03
100 V	1,76	2,32	1,71	1,97
50 K- V	1,95	2,36	1,93	2,11
75 K - 25 V	1,98	2,34	1,95	2,12
75 V - 25 K	1,95	2,28	1,89	2,06
100 Ç	2,03	2,45	1,97	2,17
50 Ç – V	1,89	2,35	1,85	2,06
75 Ç - 25 V	1,94	2,36	1,90	2,10
75 V - 25 Ç	1,84	2,26	1,82	2,01

Tablo 5.3. NaOH'lı 24 saat kürlenmiş geopolimerlerde yoğunluk sonuçları

Sodyum hidroksitli numuneler	24 saatlik kür sonrası			
	Görünür Birim Ağırlık, g/cm ³	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
100 K	1,84	2,35	1,89	2,08
100 V	1,75	2,31	1,76	2,00
50 K- V	1,99	2,42	1,96	2,15
75 K - 25 V	2,01	2,45	1,99	2,18
75 V - 25 K	2,02	2,39	1,95	2,13
100 Ç	2,05	2,46	1,99	2,18
50 Ç - V	1,98	2,39	1,95	2,13
75 Ç - 25 V	1,96	2,41	1,95	2,14
75 V - 25 Ç	1,91	2,33	1,85	2,06

Tablo 5.4. Sodyum silikat içeren 6 saat kürlenmiş geopolimerlerde yoğunluk sonuçları

Sodyum silikatlı Numuneler	6 saatlik kür sonrası			
	Görünür Birim Ağırlık, g/cm ³	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
100 Ç	2,05	2,34	1,93	2,11
100 K	1,71	2,29	1,79	2,01
50 K-Ç	2,07	2,32	1,96	2,12
75 K - 25 Ç	2,02	2,33	1,95	2,11
75 Ç - 25 K	2,05	2,37	1,98	2,15

Tablo 5.5 Sodyum silikat içeren 24 saat kürlenmiş geopolimerlerde yoğunluk sonuçları

Sodyum silikatlı Numuneler	24 saatlik kür sonrası			
	Görünür Birim Ağırlık, g/cm ³	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
100 Ç	1,92	2,32	1,95	2,11
100 K	1,70	2,29	1,81	2,02
50 K-Ç	2,01	2,31	1,97	2,12
75 K - 25 Ç	2,00	2,33	1,96	2,12
75 Ç - 25 K	2,00	2,56	2,13	2,30

Sodyum hidroksitli geopolimer numunelerinde 6 saat kürlenmiş numunelerde görünür yoğunluk değerleri 2,31 ile 2,45 değerleri arasında 24 saat kürlenmiş geopolimerlerde 2,31 ile 2,46 değerleri arasında olup numuneler arası kürlenme süresi bakımından değerlendirdiğinde 24 saat kürlenmiş numunelerde yoğunluk yükselmesi meydana gelmiştir. Diğer numunelere göre 100 Ç numunesi hem 6 saat kürlenmede hem de 24 saat kürlenme sonrası görünür yoğunluk, doymuş kuru yoğunluğu ve kuru yoğunluğu biraz daha fazla çıkmıştır. Sodyum silikat ile hazırlanan geopolimerde 6 saat kür sonrası görünür yoğunluk değerleri 2,29 ile 2,37 arasında değişir iken 24 saat kür sonrası görünür yoğunluk değerleri 2,29 ile 2,56 arasında tespit edilmiş ve 24 saat kürlülerde yoğunluk artışının gerçekleştiği görülmektedir. Sodyum silikat ile hazırlanan 75 Ç-25 K karışımı diğer numunelere göre daha yüksek görünür yoğunluk, doymuş kuru yoğunluğu ve kuru yoğunluk değerlerine sahiptir.

5.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Çalışmanın bundan sonraki süreçte bu harçların hazırlandıktan sonra 90°C’de 24 saat ve aynı sıcaklıkta 6 saat bekletilmesi süreci ve kürlenme sonrası 7, 28 ve 90 günlük dayanım sonuçları alınmıştır. İyi netice alınan numunelerin yüksek sıcaklık (400-600-800°C) uygulaması sonrası dayanım (eğilme-basınç) sonuçları alınmıştır. Hidroksitli harçlar kendi içinde 2 gruba ayrılmıştır; (K-V) ve (Ç-V) harçları olarak, silikatlı

harçlarda tek grup olarak incelenmiştir. Tablo 5.6-5.9 ile Şekil 5.1.-5.6. 6 ve 24 saat kürlenmiş numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanım sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.6. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı

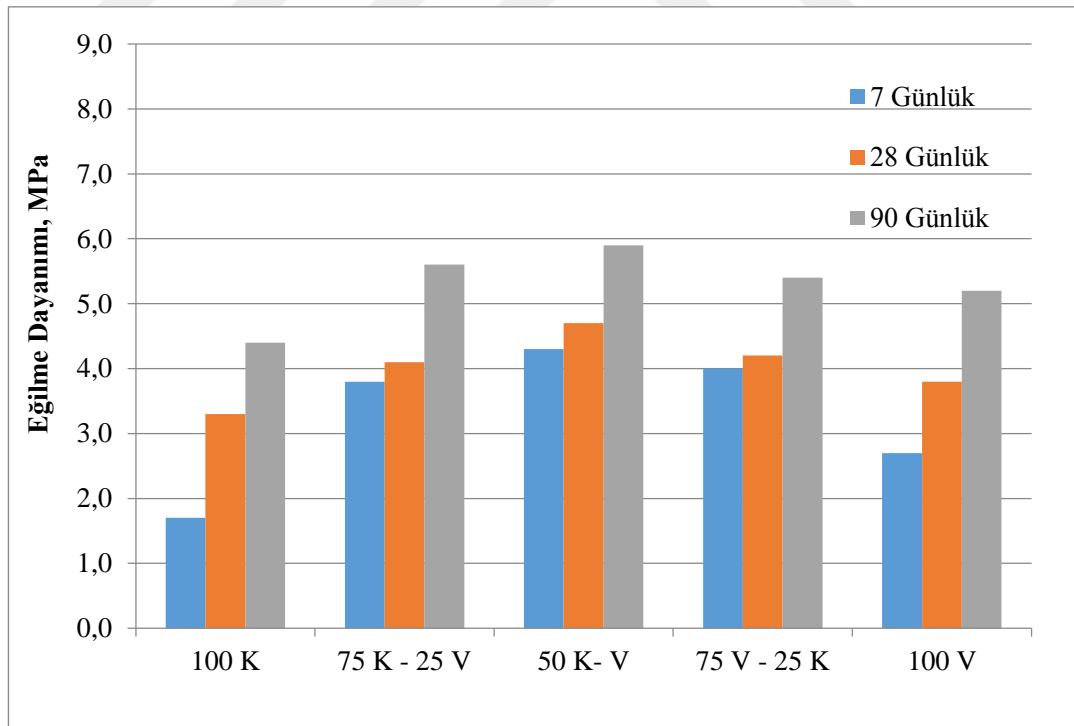
NaOH	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 K	1,7	3,3	4,4
100 V	2,7	3,8	5,2
50 K- V	4,3	4,7	5,9
75 K - 25 V	3,8	4,1	5,6
75 V - 25 K	4,0	4,2	5,4
100 Ç	2,0	3,4	5,3
50 Ç - V	3,0	4,4	6,3
75 Ç - 25 V	2,6	4,6	5,9
75 V - 25 Ç	2,8	4,0	4,9

Tablo 5.7. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı

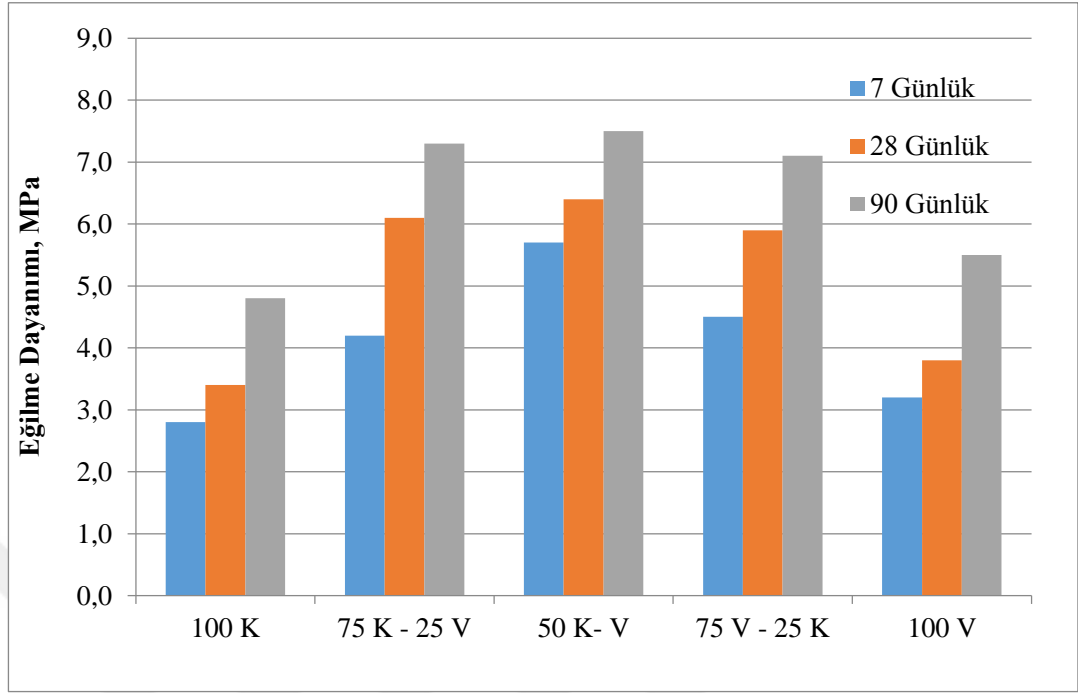
NaOH	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 K	2,8	3,4	4,8
100 V	3,2	3,8	5,5
50 K- V	5,7	6,4	7,5
75 K - 25 V	4,2	6,1	7,3
75 V - 25 K	4,5	5,9	7,1
100 Ç	4,4	5,4	6,2
50 Ç - V	5,3	6,7	7,1
75 Ç - 25 V	4,5	5,5	6,4
75 V - 25 Ç	3,9	5,1	5,8

Filtre-pres karo atığı (K) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.’de sunulmuştur. 6 saat ısıl kürle üretilen harçların 7 günlük eğilme dayanımları 1,7 MPa ile 4,3 MPa

arasında değişirken, 24 saat ısıl kr ile üretilen harçların dayanımları 2,8 MPa ile 5,7 MPa arasında elde edilmiştir. 24 saat ısıl kr ile üretilen harçların 7 günlük eğilme dayanımları 6 saat ısıl kürle üretilenlere göre %11 ile %64 arasında değişen oranlarda daha yüksektir. Bununla birlikte, bu iki serinin 90 günlük eğilme dayanımları arasındaki fark ise %6 ile %32 arasındadır. 6 saat ısıl kürle üretilen harçların eğilme dayanımları 7 günden 90 güne %33 ile %157 arasında artarken, 24 saat ısıl kr ile üretilen harçların eğilme dayanımları bu süreçte %31 ile %73 arasında artış göstermiştir. Her iki seride de en düşük 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları 100 K kodlu harçlarda görülürken, en yüksek dayanım değerleri 50 K- V harçlarda elde edilmiştir. 50 K- V harçların 90 günlük eğilme dayanımları 6 saat ısıl kr ile 5,9 MPa değerine ulaşıırken, 24 saat ısıl kr ile 7,5 MPa eğilme dayanımı elde edilebilmiştir. K ve V malzemelerinin tekli kullanıldığı 100 K ve 100 V karışımlarının eğilme dayanımlarının bu iki malzemenin beraber kullanıldığı karışımlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük olduğu görülmüştür.

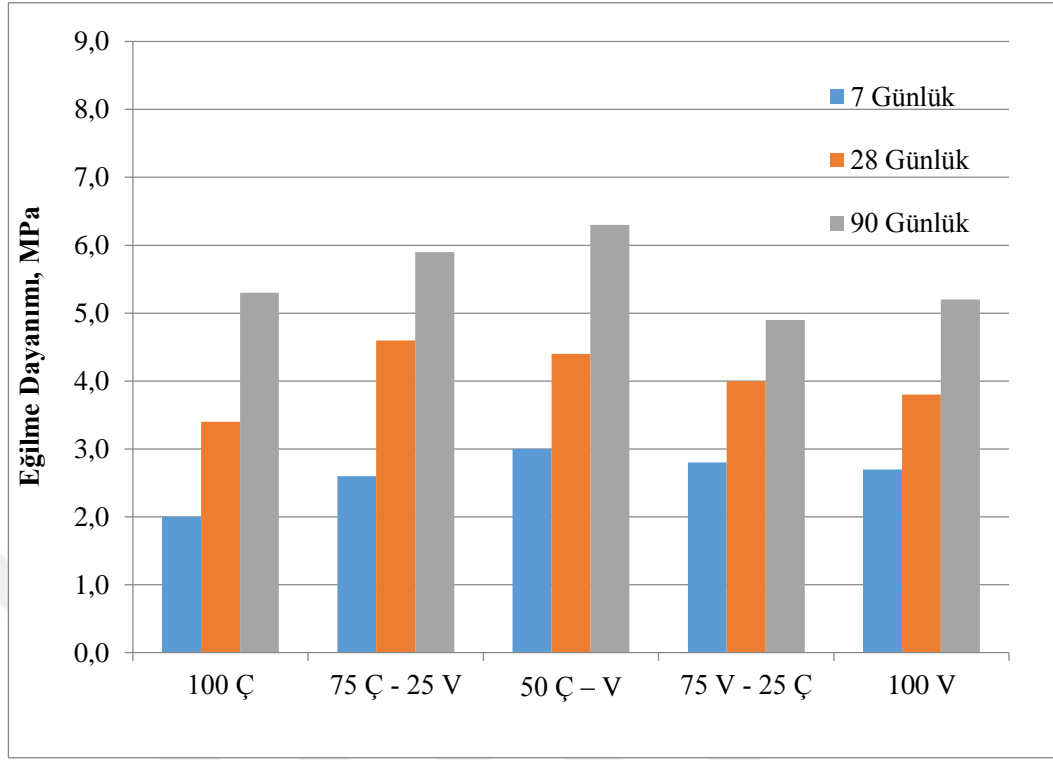


Şekil 5.1. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları

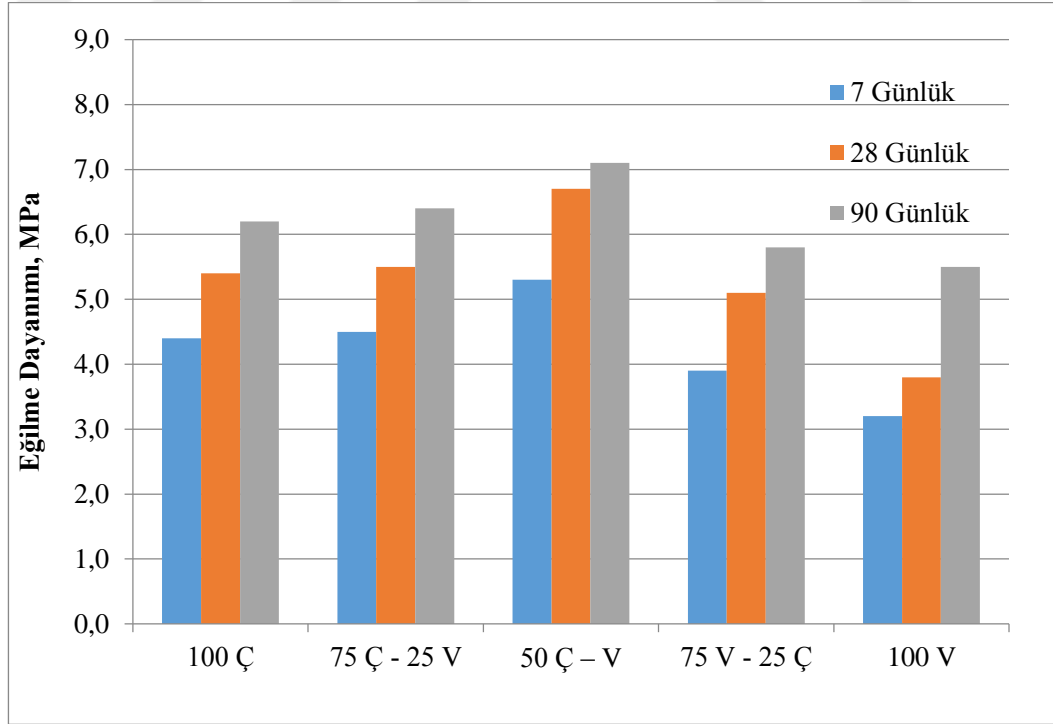


Şekil 5.2. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları

Pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.’de sunulmuştur. 6 saat ısıt kür ile üretilen harçların 7 günlük eğilme dayanımları 1,98 MPa ile 2,96 MPa arasında; 24 saat kür edilen harçların dayanımları da 3,2 MPa ile 5,3 MPa arasında elde edilmiştir. 6 saat ısıt kür ile üretilen harçların eğilme dayanımları 7 günden 28 güne %41 ile %80 arasında; 28 günden de 90 güne %22 ile %56 arasında artış göstermiştir. 24 saat ısıt kür edilen harçlarda ise 7 günden 28 güne %19 ile %30 arasında; 28 günden de 90 güne %7 ile %45 arasında dayanım artışı görülmüştür. 6 saat ısıt kür ile üretilen harçların 7 günlük dayanımları 24 saat ısıt kür ile üretilen harçlara göre %19 ile %122 arasında daha düşük iken; bekleme süresi ile daha fazla dayanım kazanımı görüldüğü için 90 günlük dayanım değerleri arasındaki fark %17 ile sınırlı kalmıştır. Her iki seride de en yüksek 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları 50 Ç – V harçlarda gözlenmiştir. Çömlek ve vitrifiye malzemelerinin birlikte kullanıldığı karışımların eğilme dayanımı değerleri 100 Ç ve 100 V karışımlarına göre daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 5.3. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları



Şekil 5.4. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının eğilme dayanım sonuçları

Tablo 5.8. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı

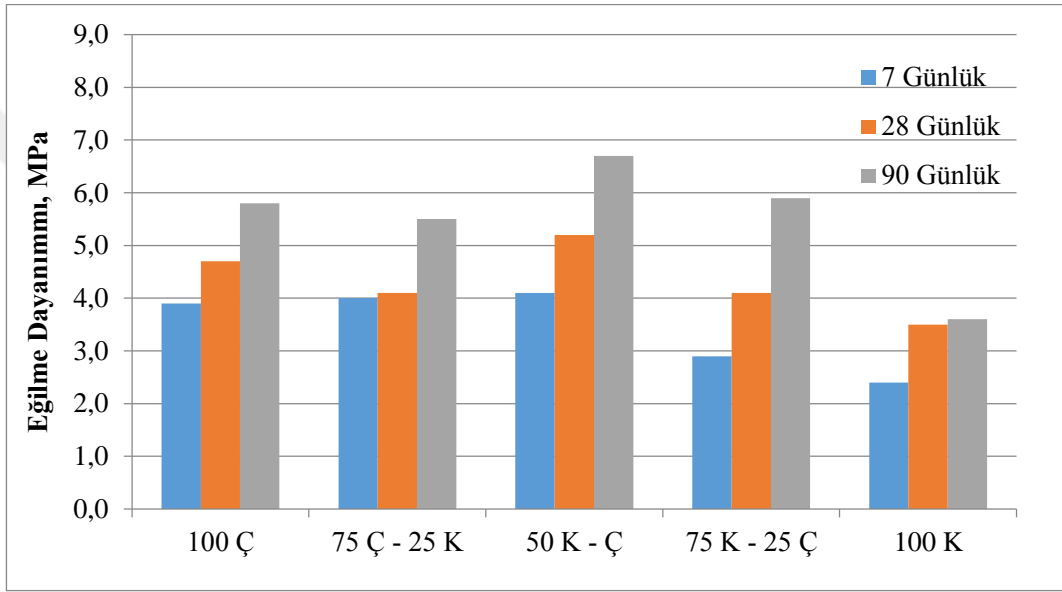
Na_2SiO_3	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 Ç	3,9	4,7	5,8
100 K	2,4	3,5	3,6
50 K-Ç	4,1	5,2	6,7
75 K - 25 Ç	2,9	4,1	5,9
75 Ç - 25 K	4,0	4,1	5,5

Tablo 5.9. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı

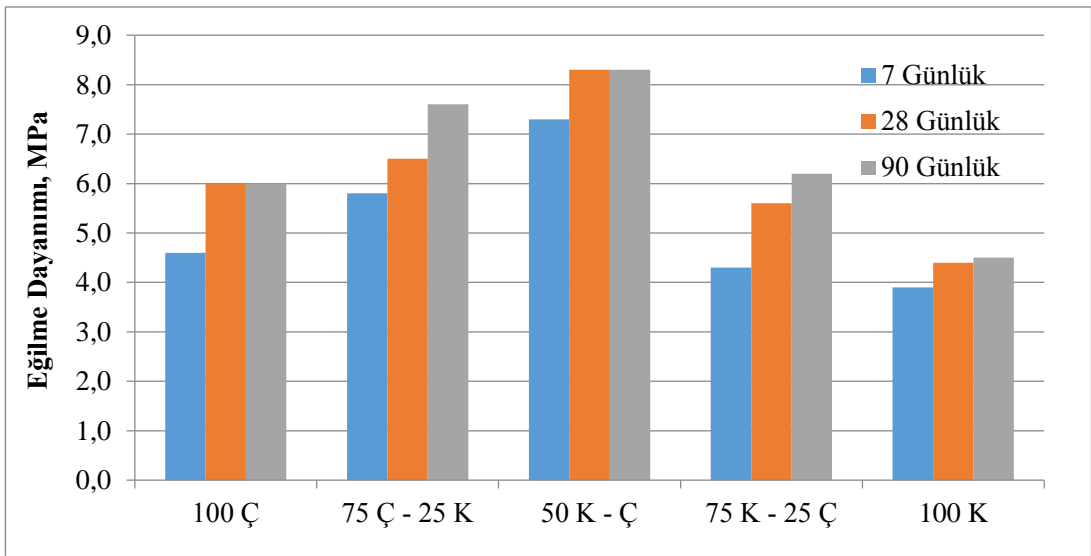
Na_2SiO_3	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 Ç	4,6	6,0	6,0
100 K	3,9	4,4	4,5
50 K-Ç	7,3	8,3	8,3
75 K - 25 Ç	4,3	5,6	6,2
75 Ç - 25 K	5,8	6,5	7,6

Silikatlı harçlardan incelenen numuneler sunulmuştur. Filtre-pres karo atığı (K) ve pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) atık malzemelerinin sodyum silikat ile 6 saat 90°C’de aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 5.5’de sunulmuştur. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları 3,9 MPa ile 4,1 MPa arasında elde edilmiştir. Harçların eğilme dayanımı değerleri bekleme süresi ile değişen oranlarda artmıştır. 90 günlük eğilme dayanımı değerleri 7 günlük dayanım değerlerine göre %37 ile %104 oranları arasında daha yüksek elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımları 50 K-Ç kodlu harçlarda elde edilirken, en düşük dayanım değerleri 100 K harçlarında gözlenmiştir. Aynı malzemelerin sodyum silikat ile 24 saat 90°C’de aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 5.6’de sunulmuştur. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları 3,9 MPa ile 7,3 MPa arasında elde edilmiştir. 90°C’de 6 saat kür edilen harçlarda olduğu gibi 24 saat kür edilen harçlarda da en yüksek eğilme dayanımı değerleri 50 K-Ç kodlu harçlarda, en düşük değerler ise 100 K harçlarında elde edilmiştir. Harçların dayanımları 7 günden 90 güne %13 ile %46 arasında artmıştır. Bekleme süresiyle harçlarda görülen dayanım

artışları 7 günden 28 güne daha belirgin iken, 28 günden 90 güne genellikle daha düşük oranlarda dayanım artışları görülmüştür. 6 saat ve 24 saat ısıtılan harçların eğilme dayanımları birlikte değerlendirildiğinde ise 24 saat ısıtılan harçların 7 günlük eğilme dayanımlarının 6 saat ısıtılanlara kıyasla %16 ile %79 arasında değişen oranlarda daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte, 28 ve 90 günlük dayanım değerleri kıyaslandığında, 6 saat ısıtılan harçların bekleme süresi ile dayanım gelişimi daha belirgin olduğundan dayanım değerleri birbirine yaklaşmıştır. İki farklı ısıtılan harç arasındaki fark %4 ile %36 arasında elde edilmiştir.



Şekil 5.5. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların eğilme dayanım sonuçları



Şekil 5.6. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların eğilme dayanım sonuçları

5.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Geopolimer harç numunelerine ilk olarak eğilme deneyi yapılmasıyla ikiye ayrılan parçalara 40x40 mm iki plakalarda basınç dayanım deneyi yapılarak çıkan sonuçların ortalama değeri basınç dayanım değeri olarak belirlenmiştir 6 ve 24 saat ısıtılma sonrası 7, 28, 90 günlük olmak üzere basınç dayanımları Tablo 5.10.-5.13.ve Şekil 5.7.-5.12. verilmiştir.

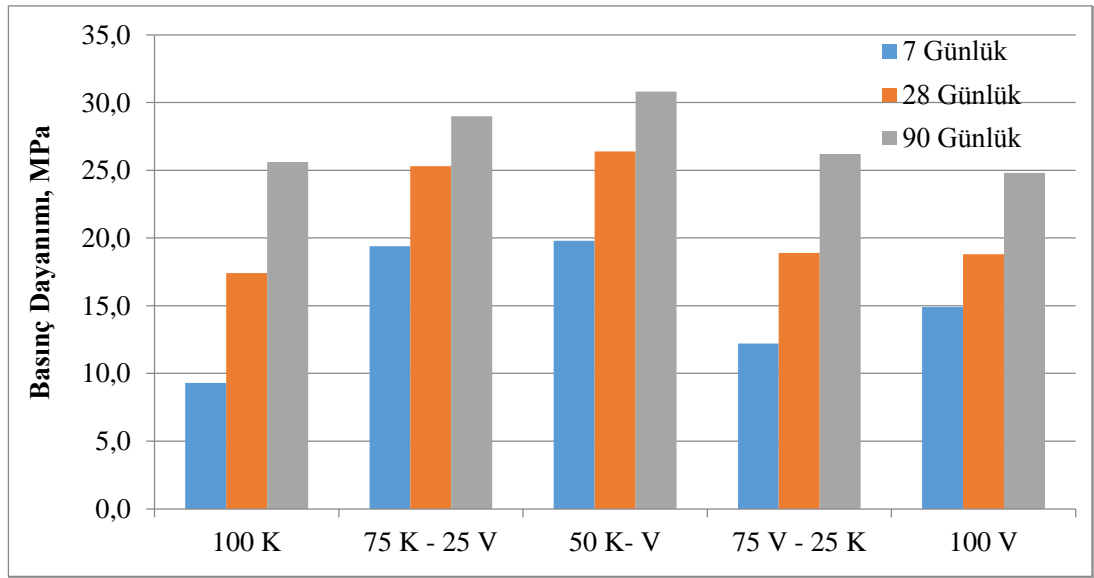
Tablo 5.10. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı

NaOH	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 K	9,3	17,4	25,6
100 V	14,9	18,8	24,8
50 K- V	19,8	26,4	30,8
75 K - 25 V	19,4	25,3	29,0
75 V - 25 K	12,2	18,9	26,2
100 Ç	14,2	15,9	19,4
50 Ç - V	18,9	23,5	31,2
75 Ç - 25 V	14,7	19,6	26,4
75 V - 25 Ç	15,3	18,2	25,0

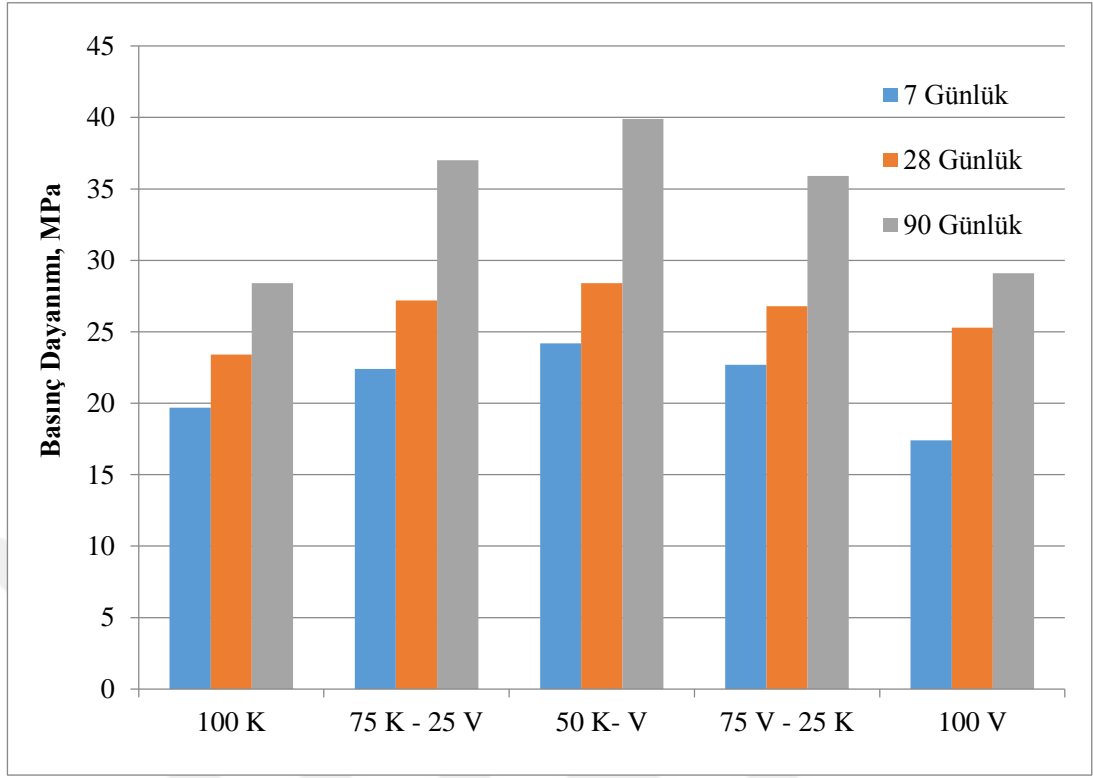
Tablo 5.11. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı

NaOH	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 K	19,7	23,4	28,4
100 V	17,4	25,3	29,1
50 K- V	24,2	28,4	39,9
75 K - 25 V	22,4	27,2	37,0
75 V - 25 K	22,7	26,8	35,9
100 Ç	21,8	26,0	33,9
50 Ç - V	32,3	41,3	43,9
75 Ç - 25 V	22,6	30,3	34,7
75 V - 25 Ç	18,7	24,1	29,4

Filtre-pres karo atığı (K) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.’de sunulmuştur. 6 saat ve 24 saat ısıtılma kuru ile üretilen harçların 7 günlük basınç dayanımları sırasıyla 9,3 MPa ile 19,8 MPa ve 17,4 ile 24,2 MPa arasında elde edilmiştir. 6 saat ısıtılma kuru ile üretilen harçların basınç dayanımları 7 günden 28 güne %26 ile %88 arasında; 28 günden de 90 güne %15 ile %48 oranları arasında artmıştır. 24 saat ısıtılma kuru ile üretilen harçların basınç dayanımları ise 7 günden 28 güne %17 ile %45 arasında; 28 günden de 90 güne %15 ile %39 oranları arasında artmıştır. Her iki seride de en yüksek basınç dayanımı değerleri 50 K- V harçlarda elde edilmiştir. 6 saat ısıtılma kuru ile üretilen 75 V - 25 K harçların 7 günlük dayanımları hariç, K ve V malzemelerinin ikili kullanıldığı harçların basınç dayanımları 100 K ve 100 V kodlu harçlara göre daha yüksek elde edilmiştir. 24 saat ısıtılma kuru ile üretilen harçların 7 günlük basınç dayanımları 6 saat ile üretilenlere göre %15 ile %112 arasında daha yüksek iken; 90 günlük dayanımları ise %11 ile %37 oranları arasında daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuçlar 7 gün gibi erken yaş dayanımı yüksek olması beklenen uygulamalar için 24 saat ısıtılma kuru süresinin daha uygun olduğu; yüksek erken dayanım gerektirmeyen uygulamalarda ise 6 saat ısıtılma kuru ile 90 günlük 50 K- V harçlarda 30,8 MPa dayanım elde edilmesi daha ekonomik ve verimli bir üretim yöntemi olarak dikkat çekmektedir.

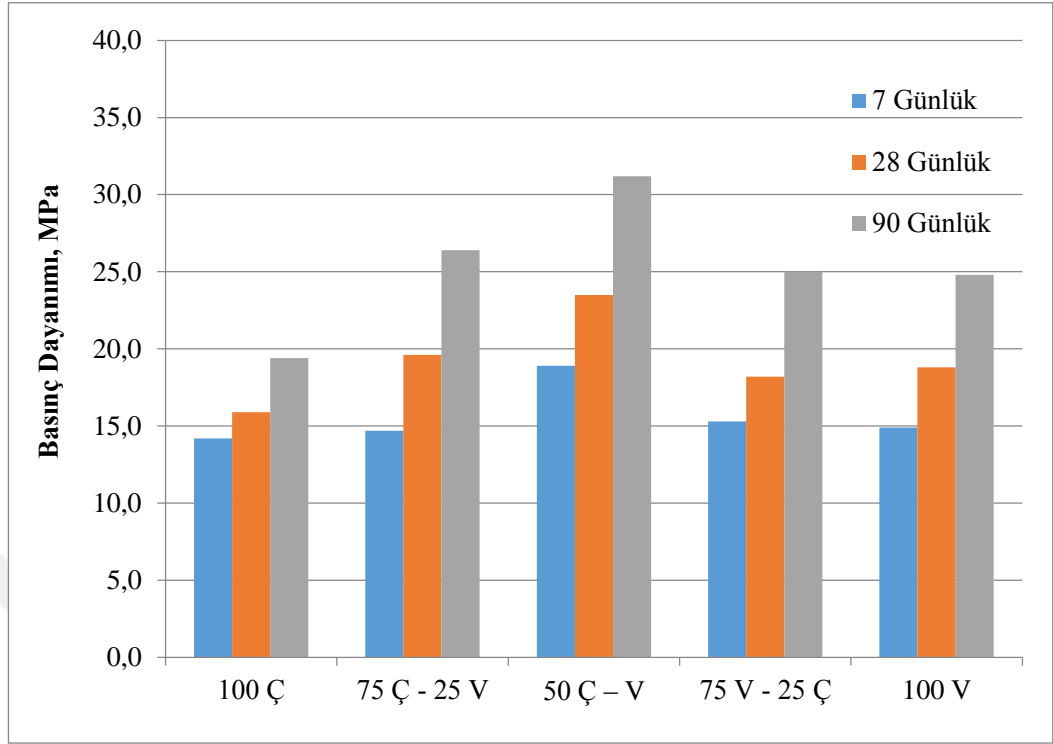


Şekil 5.7. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları

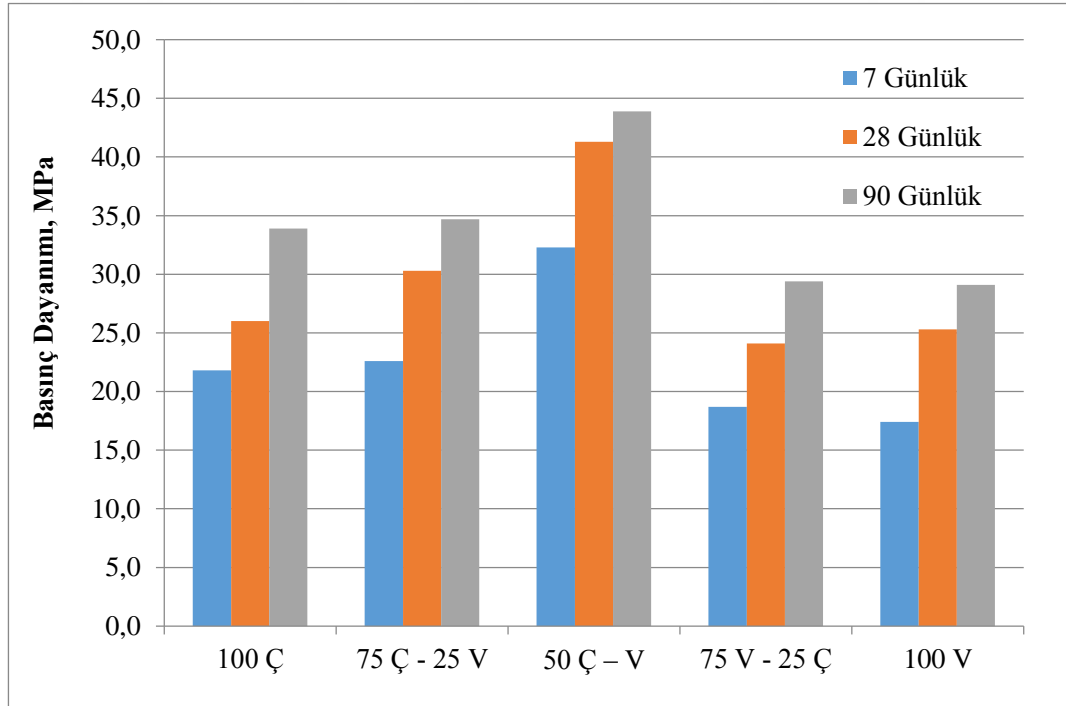


Şekil 5.8.. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları

Pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.’de sunulmuştur. 6 saat ısıllı kür ile üretilen harçların 7 günlük basınç dayanımları 14,2 MPa ile 18,9 MPa arasında iken, 24 saat ısıllı kür ile üretilen harçların dayanımları 17,4 MPa ile 32,3 MPa arasında elde edilmiştir. 6 saat ısıllı kür ile üretilen harçların dayanımları 7 günden 90 güne %36 ile %80 arasında artarken, 24 saat ısıllı kürle üretilen harçlarda aynı zaman diliminde %36 ile %67 arasında dayanım artışı kaydedilmiştir. Her iki seride de en yüksek 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri 50 Ç–V harçlarda elde edilmiştir. 50 Ç–V harçlarda 6 saat ve 24 saat ısıllı kür ile sırasıyla 31,2 MPa ve 43,9 MPa 90 günlük basınç dayanımı değerlerine ulaşılabilmiştir. Ayrıca, Ç ve V malzemelerinin birlikte kullanıldığı karışımlarda 100 Ç ve 100 V karışımlarına kıyasla genellikle daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.



Şekil 5.9. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları



Şekil 5.10. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının basınç dayanım sonuçları

Tablo 5.12. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı

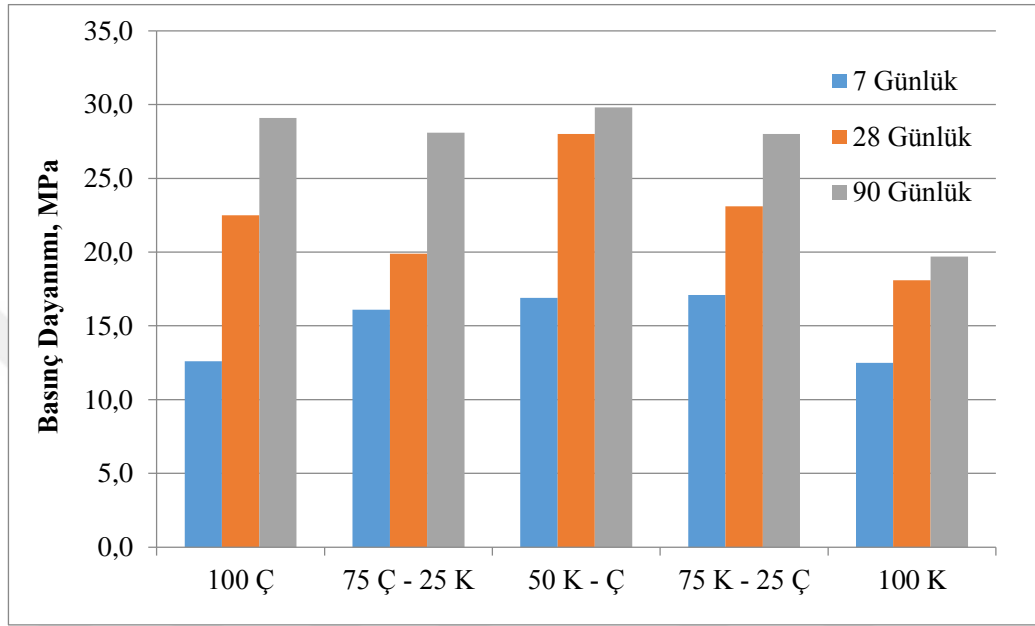
Na_2SiO_3	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 Ç	12,6	22,5	29,1
100 K	12,5	18,1	19,7
50 K-Ç	16,9	28,0	29,8
75 K - 25 Ç	17,1	23,1	28,0
75 Ç - 25 K	16,1	19,9	28,1

Tablo 5.13. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı

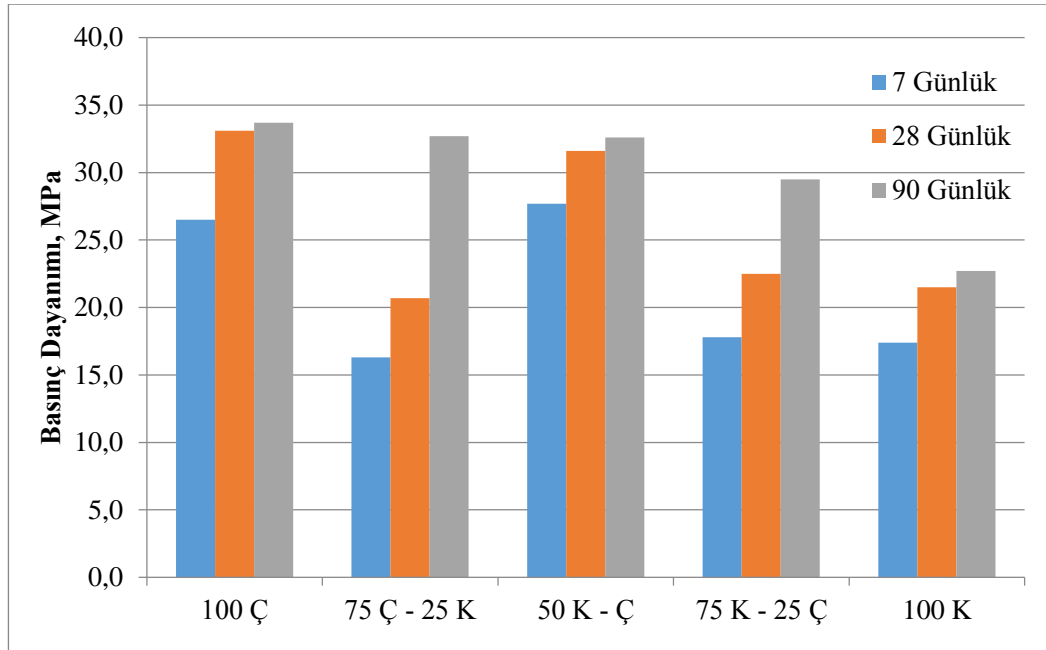
Na_2SiO_3	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük
100 Ç	26,5	33,1	33,7
100 K	17,4	21,5	22,7
50 K-Ç	27,7	31,6	32,6
75 K - 25 Ç	17,8	22,5	29,5
75 Ç - 25 K	16,3	20,7	32,7

Filtre-pres karo atığı (K) ve pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) atık malzemelerinin sodyum silikat ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 5.11. ve Şekil 5.12’de sunulmuştur. 6 saat ısıl kürle üretilen harçların 7 günlük basınç dayanımları 12,5 MPa ile 17,1 MPa arasında elde edilirken, 24 saat ısıl kür edilen harçların dayanımları 16,3 MPa ile 27,7 MPa arasında elde edilmiştir. 24 saat ısıl kür edilen harçların 7 günlük basınç dayanımları 6 saat ısıl kür edilenlere göre %16 ile %79 arasında daha yüksektir. Bununla birlikte eğilme dayanımlarında olduğu gibi basınç dayanımlarında da 6 saat ısıl kür edilen harçlarda bekleme süresiyle birlikte genellikle daha yüksek dayanım artışı gözlenmiştir. 6 saat kür edilen harçların basınç dayanım değerleri 7 günden 90 güne %57 ile %131 arasında artarken, 24 saat ısıl kür ile üretilen harçların dayanımları %17 ile %100 arasında artmıştır. Her iki seride de en düşük basınç dayanımları 100 K harçlarında görülürken, en yüksek basınç dayanım değerlerine 50 K-Ç kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Özellikle erken dayanım istenen durumlarda 24 saat ısıl kür süresinin daha

uygun olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 6 saat ve 24 saat ısıtma kürü ile üretilen harçların 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde %5 ile %15 oranları arasında düşük sayılabilecek farklılıklar gözlenmiştir. Erken dayanım beklenmeyen uygulamalarda da 8 saat ısıtma kür süresinin daha ekonomik olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 5.11. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların basınç dayanım sonuçları



Şekil 5.12. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı harçların basınç dayanım sonuçları

5.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları

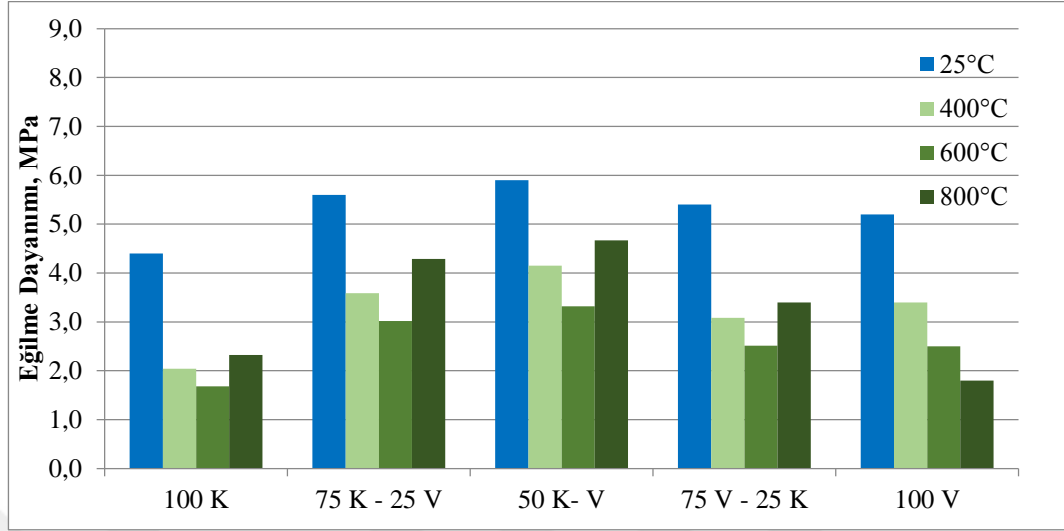
Üretilen geopolimer harçlarının yüksek sıcaklık etkisini araştırmak için üretilen numuneler 6 ve 24 saat 90°C’de ısıtılma tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiştir. 28 gün sonunda fırın sıcaklığı 5°C/dak sıcaklık artışı ile 400°C, 600°C, 800°C sıcaklıklarda 60 dakika pişirim sıcaklığına tabii tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık sonrası numunelere eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Tablo 5.14.-5.21. ve Şekil 5.13.-5.24.’ da sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5.14. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı

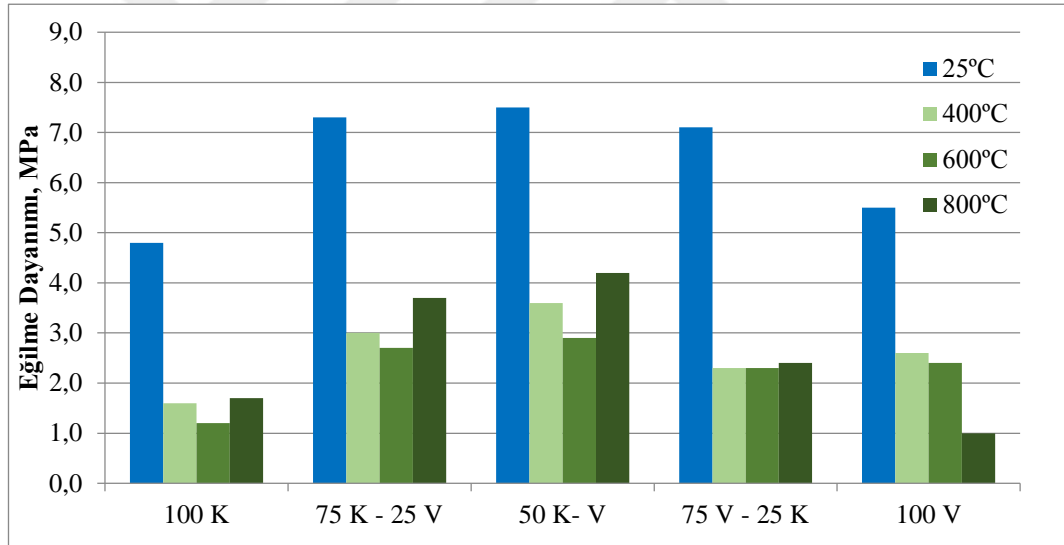
NaOH	25°C	400°C	600°C	800°C
100 K	4,4	2,0	1,7	2,3
100 V	5,2	3,4	2,5	1,8
50 K- V	5,9	4,2	3,3	4,7
75 K - 25 V	5,6	3,6	3,0	4,3
75 V - 25 K	5,4	3,1	2,5	3,4
100 Ç	5,3	4,2	3,1	3,5
50 Ç - V	6,3	4,4	3,6	3,9
75 Ç - 25 V	5,9	4,1	3,2	3,6
75 V - 25 Ç	4,9	3,8	2,9	3,0

Tablo 5.15. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı

NaOH	25°C	400°C	600°C	800°C
100 K	4,8	1,6	1,2	1,7
100 V	5,5	2,6	2,4	1,0
50 K- V	7,5	3,6	2,9	4,2
75 K - 25 V	7,3	3,0	2,7	3,7
75 V - 25 K	7,1	2,3	2,3	2,4
100 Ç	6,2	2,4	1,3	2,2
50 Ç - V	7,1	3,8	2,5	2,3
75 Ç - 25 V	6,4	2,6	1,4	2,1
75 V - 25 Ç	5,8	3,0	2,8	1,5



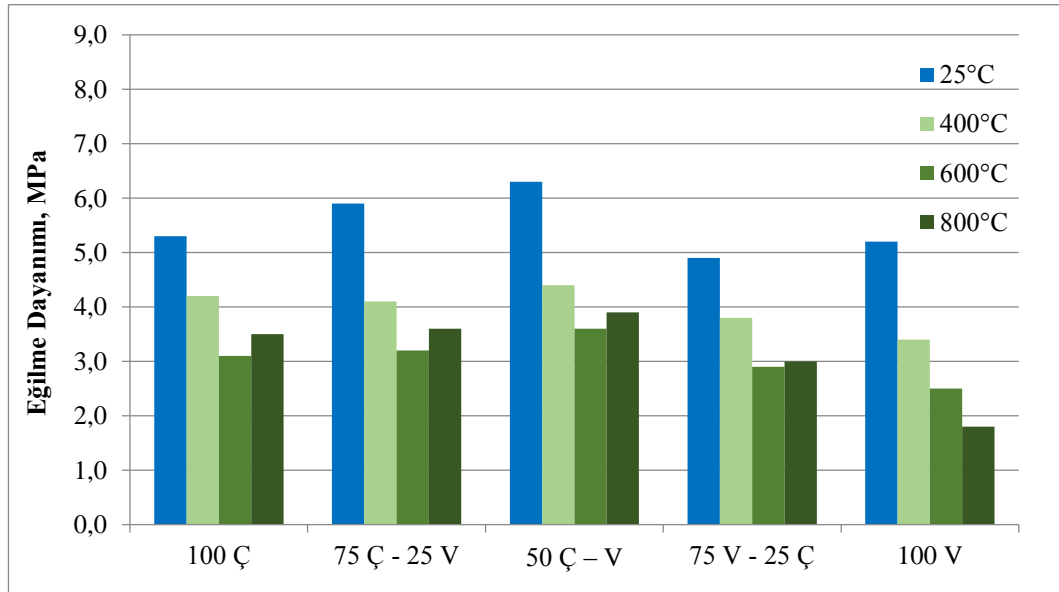
Şekil 5.13. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları



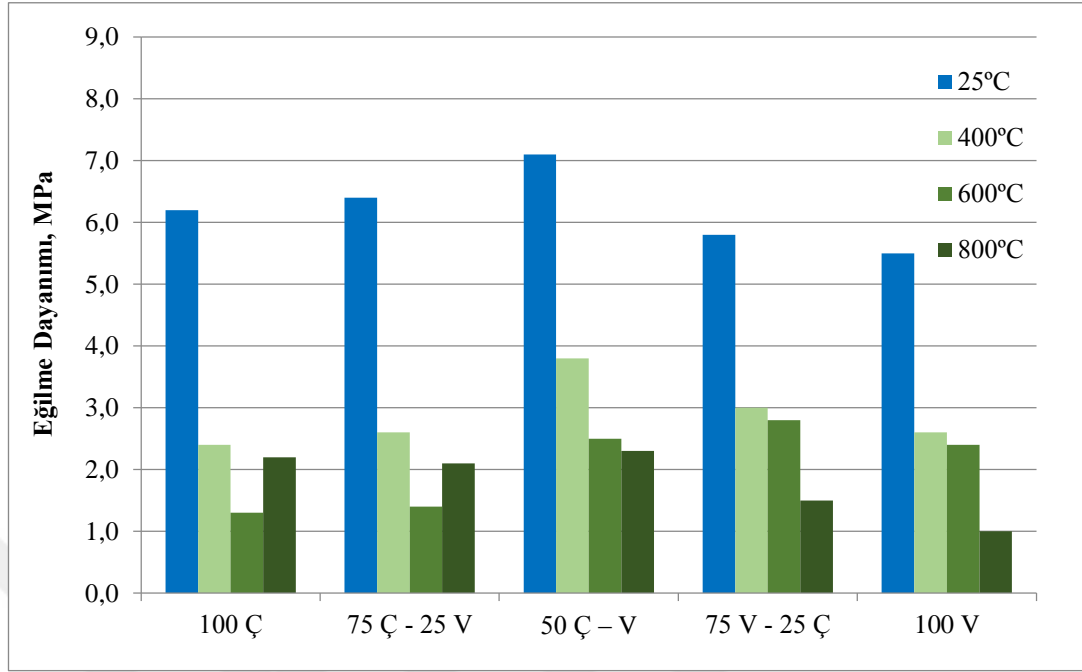
Şekil 5.14. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları

Pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların eğilme dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.’da sunulmuştur. 400°C etkisi sonrasında 6 saat ısıl kürle üretilen harçların eğilme dayanımlarında deney öncesine göre %20 ile %34 arasında azalma görülürken, 24 saat ısıl kürle üretilen harçlarda %47 ile %61 arasında eğilme

dayanımı kaybı kaydedilmiştir. Sıcaklık 600°C'ye çıktığında da dayanım kayıpları artmış; 6 saat ısı kürle üretilen harçlarda %42 ile %52 arasında, 24 saat ısı kürle üretilen harçlarda da %51 ile %80 arasında eğilme dayanımı kaybı görülmüştür. 400°C ve 600°C'de 24 saat ısı kürle üretilen harçlardaki daha fazla görülen dayanım kaybını bu harçlarda üretim sürecinde hızlı su kaybından kaynaklı rötre ve mikro çatlak oluşumu gösterilebilir. 800°C etkisi sonrasında ise özellikle Çömlek atığı malzemesi oranı yüksek olan harçlarda dayanım kayıplarında 600°C'deki kayıplara kıyasla azalma görülmüştür. 800°C etkisi sonrasında; 6 saat ısı kürle üretilen harçların eğilme dayanımları deney öncesine göre %33 ile %66 oranları arasında daha düşük iken, 24 saat ısı kürle üretilen harçların dayanımları %64 ile %82 oranları arasında azalmıştır. 800°C etkisi sonrasında; 6 saat ısı kürle üretilen harçlar 100 V harçları hariç 600°C'deki değerlere göre %3 ile %15 arasında dayanım artışı gözlenmiştir. Dayanım artış oranları harçlardaki ÇA içeriği ile birlikte artmıştır. 24 saat ısı kürle üretilen harçlarda ise 100 Ç ve 75 Ç-25 V harçlarında 600°C'deki değerlere göre sırasıyla %75 ve %44 oranlarında daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. 24 saat ısı kürle üretilen 75 V-25 Ç ve 100 V harçlarında 600°C'deki değerlere göre sırasıyla %45 ve %58 oranlarında daha düşük eğilme dayanımı gözlenmiştir. Her iki seride de yüksek sıcaklık etkisinde en yüksek eğilme dayanımları 50 Ç – V kodlu harçlarda elde edilmiştir.



Şekil 5.15. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları



Şekil 5.16. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları

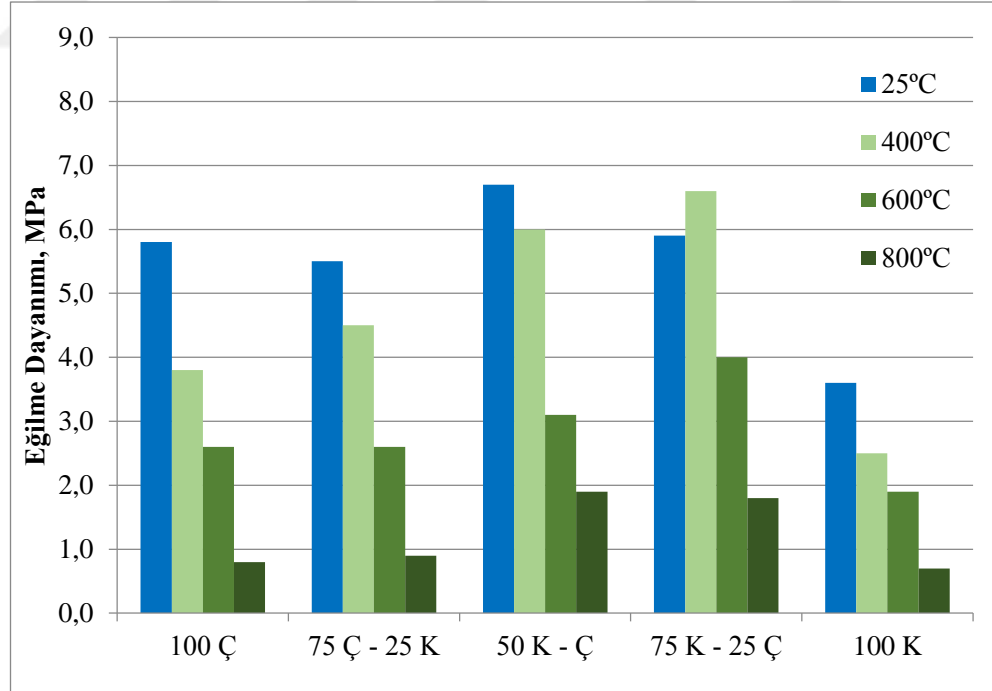
Tablo 5.16. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı

Na_2SiO_3	25°C	400°C	600°C	800°C
100 Ç	5,8	3,8	2,6	0,8
100 K	3,6	2,5	1,9	0,7
50 K-Ç	6,7	6	3,1	1,9
75 K - 25 Ç	5,9	6,6	4	1,8
75 Ç - 25 K	5,5	4,5	2,6	0,9

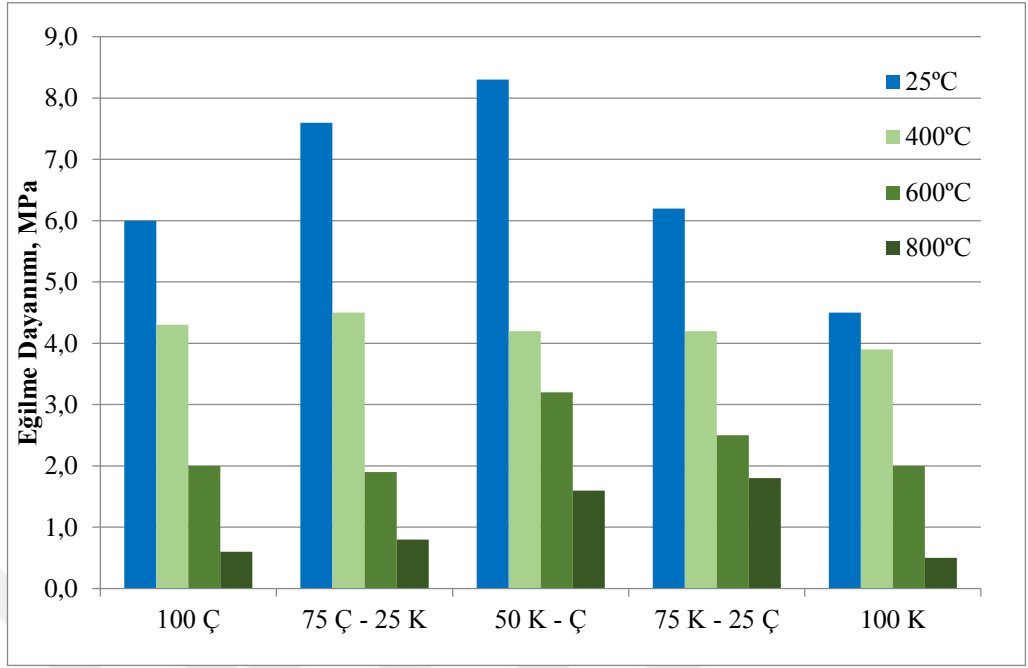
Tablo 5.17. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı

Na_2SiO_3	25°C	400°C	600°C	800°C
100 Ç	6	4,3	2	0,6
100 K	4,5	3,9	2	0,5
50 K-Ç	8,3	4,2	3,2	1,6
75 K - 25 Ç	6,2	4,2	2,5	1,8
75 Ç - 25 K	7,6	4,5	1,9	0,8

Filtre-pres karo atığı (K) ve pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) atık malzemelerinin sodyum silikat ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların eğilme dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.’de sunulmuştur. 400°C etkisi sonrasında 75 K-25 Ç kodlu harçlar hariç, 6 saat kür edilen harçlarda %9 ile %33 oranları arasında eğilme dayanımı kaybı görülmüştür. Bu kayıp 24 saat kür edilen harçlarda %14 ile %50 arasında olmuştur. 6 saat ısıtıl küretilen 75 K-25 Ç kodlu harçlarda ise yaklaşık %13 dayanım artışı meydana gelmiştir. 600°C etkisi sonrasında her iki seride de dayanım kayıpları daha da artmış 6 saat ısıtıl küretilen harçlarda %32 ile %55 arasında, 24 saat ısıtıl küretilenlerde de %55 ile %75 arasında dayanım kaybı görülmüştür. 800°C etkisi sonrasında ise 6 saat ısıtıl küretilen harçlarda %69 ile %86 arasında, 24 saat ısıtıl küretilenlerde de %71 ile %90 arasında dayanım kaybı görülmüştür. Her iki seride de en fazla dayanım kaybı 100 Ç harçlarında meydana gelirken, en az dayanım kaybı da 75 K-25 Ç harçlarında oluşmuştur.



Şekil 5.17. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları



Şekil 5.18. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım sonuçları

Tablo 5.18. 6 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

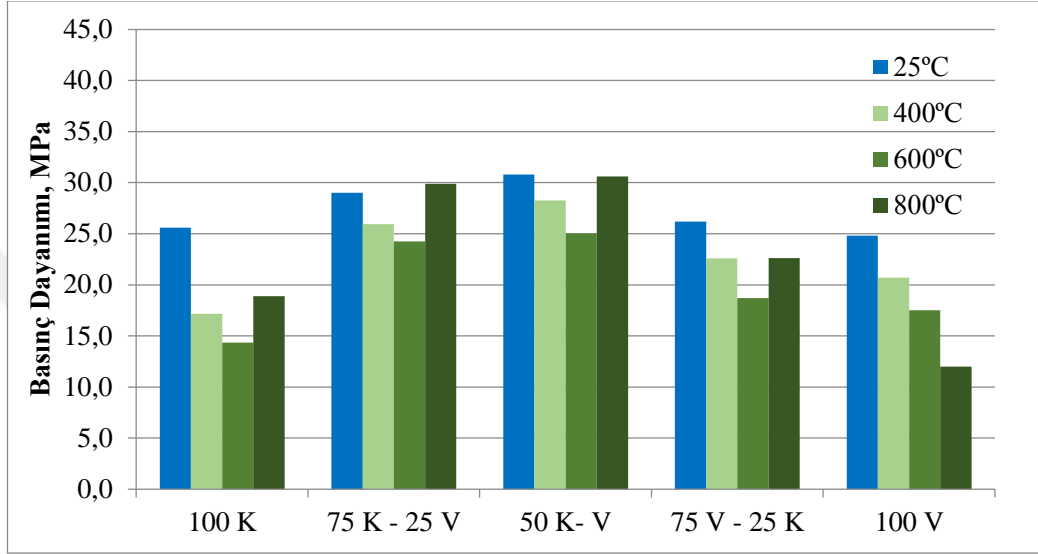
NaOH	25°C	400°C	600°C	800°C
100 K	25,6	17,2	14,3	18,9
100 V	24,8	20,7	17,5	12,0
50 K- V	30,8	28,3	25,0	30,6
75 K - 25 V	29,0	26,0	24,3	29,9
75 V - 25 K	26,2	22,6	18,7	22,6
100 Ç	19,4	19,3	15,2	27,0
50 Ç - V	31,2	28,1	23,6	24,9
75 Ç - 25 V	26,4	25,2	19,0	25,6
75 V - 25 Ç	25,0	22,4	17,7	18,0

Tablo 5.19. 24 saat kürlenmiş sodyum hidroksitli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

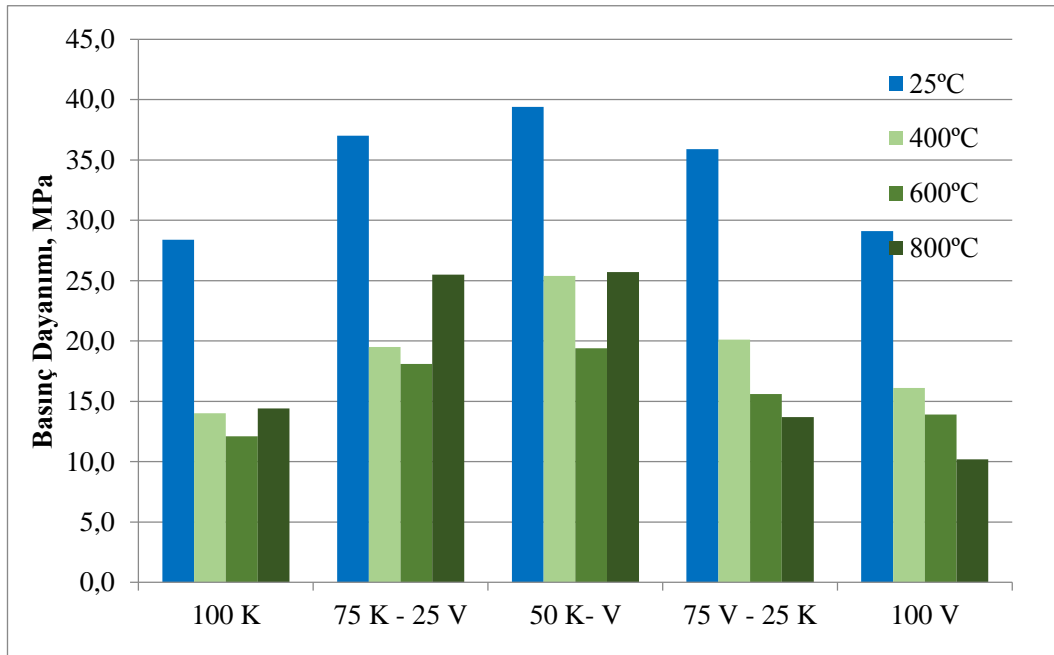
NaOH	25°C	400°C	600°C	800°C
100 K	28,4	14,0	12,1	14,4
100 V	29,1	16,1	13,9	10,2
50 K- V	39,4	25,4	19,4	25,7
75 K - 25 V	37,0	19,5	18,1	25,5
75 V - 25 K	35,9	20,1	15,6	13,7
100 Ç	33,9	18,5	15,4	28,1
50 Ç – V	43,9	29,7	22,0	25,1
75 Ç - 25 V	34,7	20,2	15,3	25,2
75 V - 25 Ç	29,4	18,9	14,1	11,7

Filtre-pres karo atığı (K) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.’de sunulmuştur. 400°C etkisi sonrasında 6 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda %8 ile %33 arasında; 24 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda ise %35 ile %51 arasında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. 24 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda daha fazla dayanım kaybı görülmesinin nedeni olarak üretim sürecinde daha fazla ısıl küre maruz kalmaları nedeniyle yüksek miktarda su kaybı ve bu kayıptan kaynaklı mikro çatlak varlığı gösterilebilir. 600°C etkisi sonrasında beklenildiği şekilde 400°C’de görülen dayanım kayıplarından daha yüksek dayanım kayıpları görülmüştür. 6 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda deney öncesine göre %16 ile %44 arasında; 24 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda ise %50 ile %57 arasında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Her iki seride de 400°C ve 600°C etkisi sonrasında en fazla dayanım kaybı 100 K harçlarında görülürken, en az kayıplar 50 K- V harçlarda gözlenmiştir. 800°C etkisi sonrasında ise 6 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda 100 V harçlar hariç geopolimer harçlarda 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre %20 ile %32 oranları arasında daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. 24 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda da 100 K, 75 K - 25 V ve 50 K- V harçlarında 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre sırasıyla %19, %41 ve %32 oranlarında daha yüksek dayanım değerleri görülmüştür. 100 V ve 75 V - 25 K harçlarda ise 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre sırasıyla %27 ve %12

oranlarında daha düşük dayanım değerleri kaydedilmiştir. Dayanım kayıplarının daha az olmasının dışında; 400°C, 600°C ve 800°C etkisi sonrasında, 6 saat ısıtılma ile üretilen harçların basınç dayanımları 24 saat ile üretilenlere göre daha yüksek elde edilmiştir. Tüm yüksek sıcaklık etkileri sonrasında, en yüksek basınç dayanımı değerleri 6 saat ısıtılma ile üretilen 50 K- V harçlarda görülmüştür.

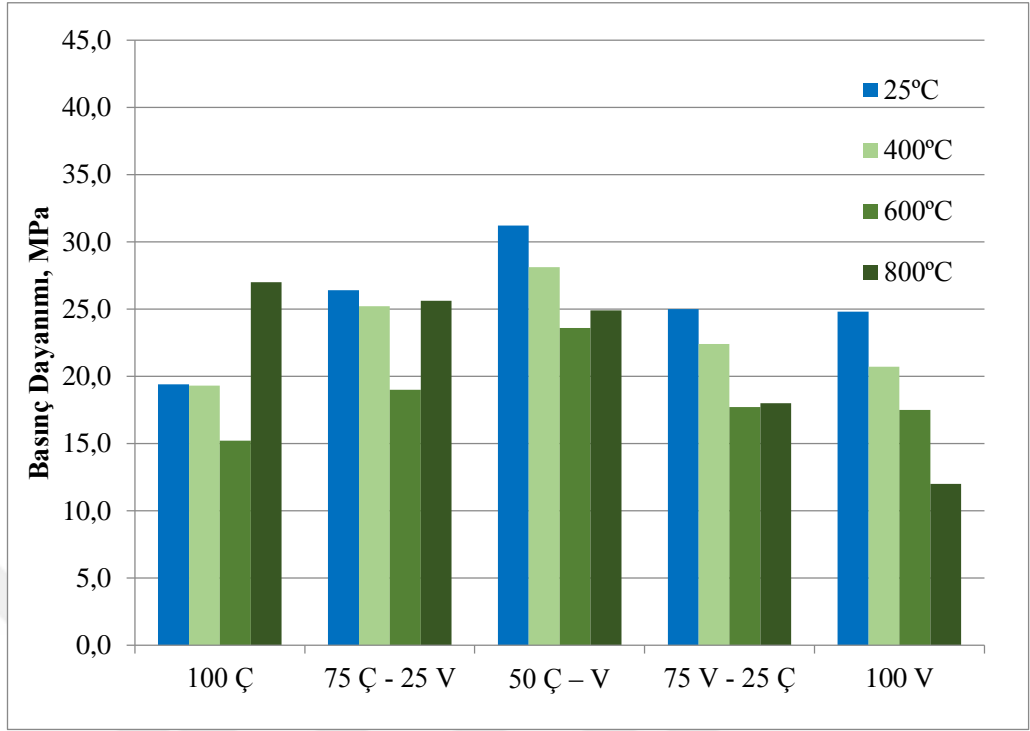


Şekil 5.19. 6 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları

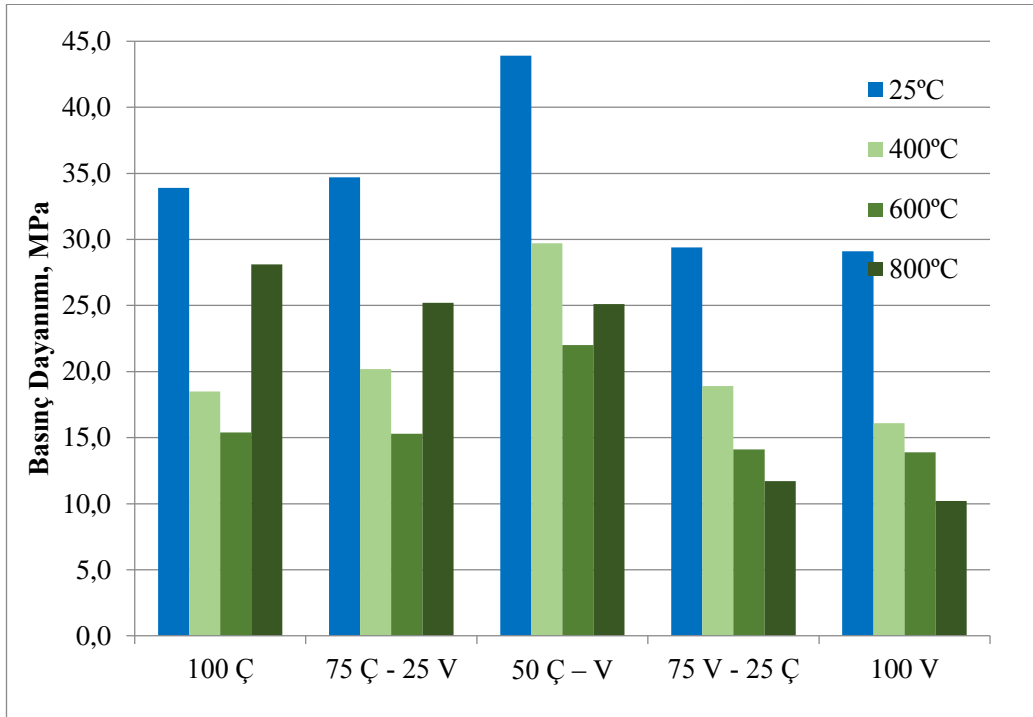


Şekil 5.20. 24 saat kür sonrası K-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları

Pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) ve vitrifiye atığı (V) atık malzemelerinin sodyum hidroksit (NaOH) ile 90°C’de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 5.21. ve Şekil 5.22.’de sunulmuştur. 400°C etkisi sonrasında 6 saat ısıtma ile üretilen harçlarda %1 ile %16 arasında; 24 saat ısıtma ile üretilen harçlarda ise %32 ile %46 arasında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. 24 saat ısıtma ile üretilen harçlarda daha fazla dayanım kaybı görülmesinin nedeni olarak üretim sürecinde daha fazla ısıtma küre maruz kalmaları nedeniyle yüksek miktarda su kaybı ve bu kayıptan kaynaklı mikro çatlak varlığı gösterilebilir. 600°C etkisi sonrasında beklenildiği şekilde 400°C’de görülen dayanım kayıplarından daha yüksek dayanım kayıpları görülmüştür. 6 saat ısıtma ile üretilen harçlarda deney öncesine göre %22 ile %30 arasında; 24 saat ısıtma ile üretilen harçlarda ise %50 ile %56 arasında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Her iki seride de 400°C ve 600°C etkisi sonrasında en fazla dayanım kaybı 100 V harçlarında görülmüştür. 800°C etkisi sonrasında ise 6 saat ısıtma ile üretilen harçlarda 100 V harçlar hariç geopolimer harçlarda 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre %2 ile %78 oranları arasında daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. 24 saat ısıtma ile üretilen harçlarda da 100 Ç, 75 Ç-25 V ve 50 Ç-V harçlarında 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre sırasıyla %83, %65 ve %14 oranlarında daha yüksek dayanım değerleri görülmüştür. 100 V ve 75 V-25 Ç harçlarda ise 600°C etkisi sonrasında belirlenen basınç dayanımı değerlerine göre sırasıyla %27 ve %17 oranlarında daha düşük dayanım değerleri kaydedilmiştir. Dayanım kayıplarının daha az olmasının dışında; 400°C, 600°C ve 800°C etkisi sonrasında, 6 saat ısıtma ile üretilen harçların basınç dayanımları 24 saat ile üretilenlere göre genellikle daha yüksek elde edilmiştir. Tüm yüksek sıcaklık etkileri sonrasında, en yüksek basınç dayanımı değerleri genellikle 50 Ç-V harçlarda görülmüştür.



Şekil 5.21. 6 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları



Şekil 5.22. 24 saat kür sonrası Ç-V (NaOH) karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları

Tablo 5.20. 6 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

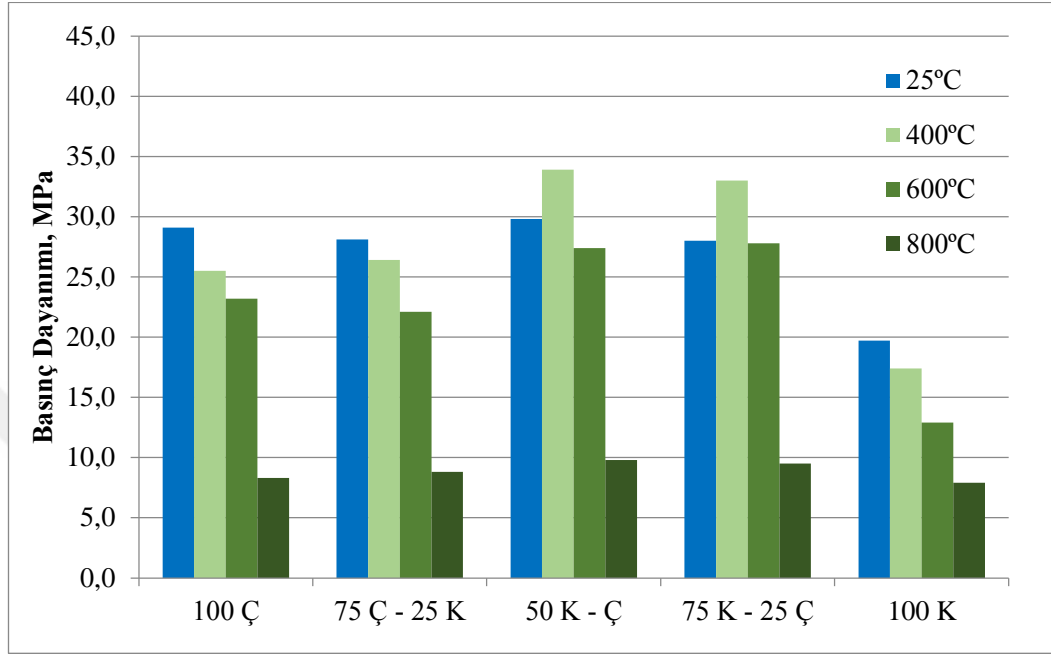
Na_2SiO_3	25°C	400°C	600°C	800°C
100 Ç	29,1	25,5	23,2	8,3
100 K	19,7	17,4	12,9	7,9
50 K-Ç	29,8	33,9	27,4	9,8
75 K - 25 Ç	28,0	33,0	27,8	9,5
75 Ç - 25 K	28,1	26,4	22,1	8,8

Tablo 5.21. 24 saat kürlenmiş sodyum silikatlı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

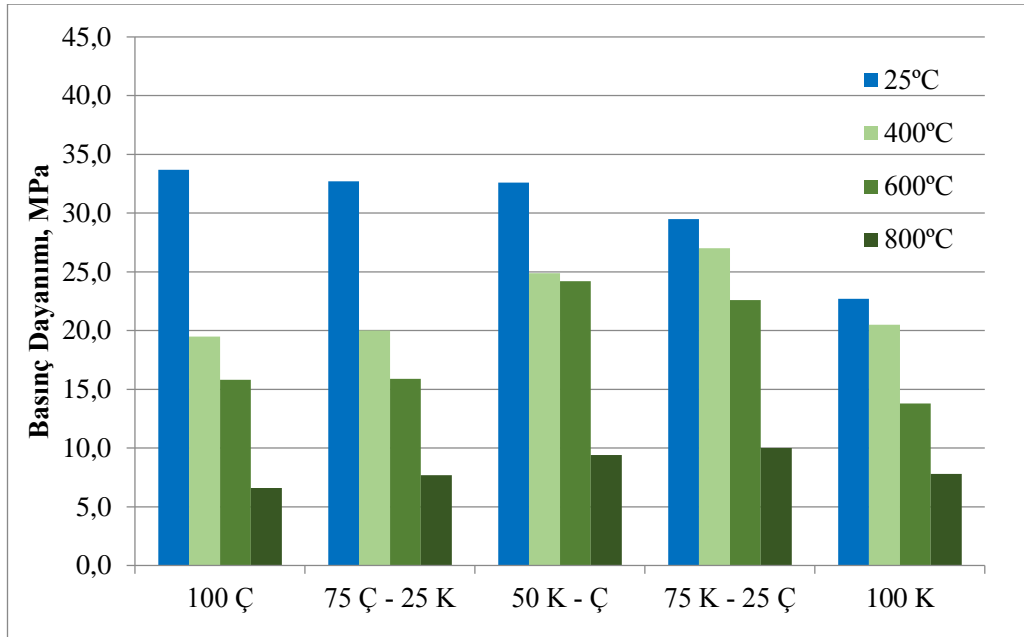
Na_2SiO_3	25°C	400°C	600°C	800°C
100 Ç	33,7	19,5	15,8	6,6
100 K	22,7	20,5	13,8	7,8
50 K-Ç	32,6	24,9	24,2	9,4
75 K - 25 Ç	29,5	27,0	22,6	10,0
75 Ç - 25 K	32,7	20,0	15,9	7,7

Filtre-pres karo atığı (K) ve pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç) atık malzemelerinin sodyum silikat ile 90°C'de 6 saat ve 24 saat aktive edilmesiyle elde edilen harçların basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'da sunulmuştur. 400°C etkisi sonrasında 6 saat ısıtılarak üretilen 50 K-Ç ve 75K-25Ç harçlarda sırasıyla yaklaşık olarak %14 ve %18 oranlarında basınç dayanımı artışı meydana gelmiştir. Bu serideki diğer harçlarda ise %6 ile %12 arasında dayanım kaybı gözlenmiştir. 24 saat ısıtılarak üretilen harçlarda ise %8 ile %42 arasında dayanım kaybı oluşmuştur. 600°C etkisi sonrasında 6 saat ısıtılarak üretilen harçlarda %1 ile %34 arasında dayanım kaybı görülürken, 24 saat ısıtılarak üretilen harçlarda %23 ile %54 arasında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. 800°C etkisi sonrasında ise her iki seride de dayanım kayıpları belirgin bir şekilde artmıştır. 6 saat ısıtılarak üretilen harçlarda %59 ile %72; 24 saat ısıtılarak üretilen harçlarda ise %65 ile %80 arasında dayanım kaybı görülmüştür. 6 saat ısıtılarak üretilen harçlar 24 saat ısıtılarak üretilenlere göre yüksek sıcaklığa belirgin bir şekilde daha dayanıklıdır. Ayrıca, en az

dayanım kayıpları her iki seride de 75K-25Ç harçlarda gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde en yüksek dayanım değerleri ise 50 K-Ç ve 75K-25Ç harçlarda elde edilmiştir.



Şekil 5.23. 6 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları



Şekil 5.24. 24 saat kür sonrası sodyum silikatlı karışımlarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları

5.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi Sonuçları

Tablo 5.22.'de sunulan NaOH'lı harçlarda %100V içeren harçların 6 saatlik ve 24 saatlik kürleri sonrasında su emme değerleri 15,4 ve 13,4 olarak ölçümlenmiştir. Boşluk oranları ise 26,4 ve 23,6'dır. Diğer harçlarda su emme ve boşluk oranı değerlerini genel olarak birbirine yakın çıkmıştır. Tablo 5.23.'de verilen sodyum silikatlı harçlarda en yüksek boşluk oranı, su emme oranına sahip olan harçlar %100 K atığı içeren harçlardır.

Tablo 5.22. NaOH'lı geopolimerlerde su emme – boşluk oranları sonuçları

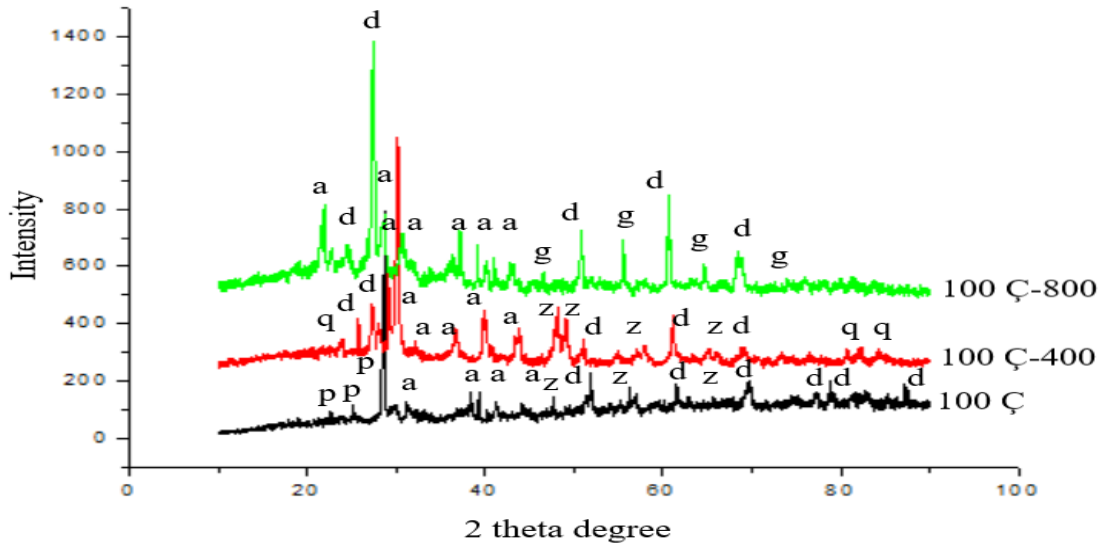
Sodyum hidroksitli numuneler	6 saatlik kür sonrası		24 saatlik kür sonrası	
	Boşluk Oranı(%)	Ağ. Su Emme (%)	Boşluk Oranı (%)	Ağ. Su Emme (%)
100 K	21,6	11,9	19,7	10,4
100 V	26,4	15,4	23,6	13,4
50 K- V	18,1	9,4	19,0	9,7
75 K - 25 V	16,7	8,6	18,6	9,3
75 V - 25 K	17,2	9,1	18,3	9,4
100 Ç	19,7	10,0	18,9	9,5
50 Ç – V	21,4	11,6	18,5	9,5
75 Ç - 25 V	19,4	10,2	19,1	9,8
75 V - 25 Ç	19,8	10,9	20,5	11,1

Tablo 5.23. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) içeren geopolimerlerde su emme – boşluk oranları sonuçları

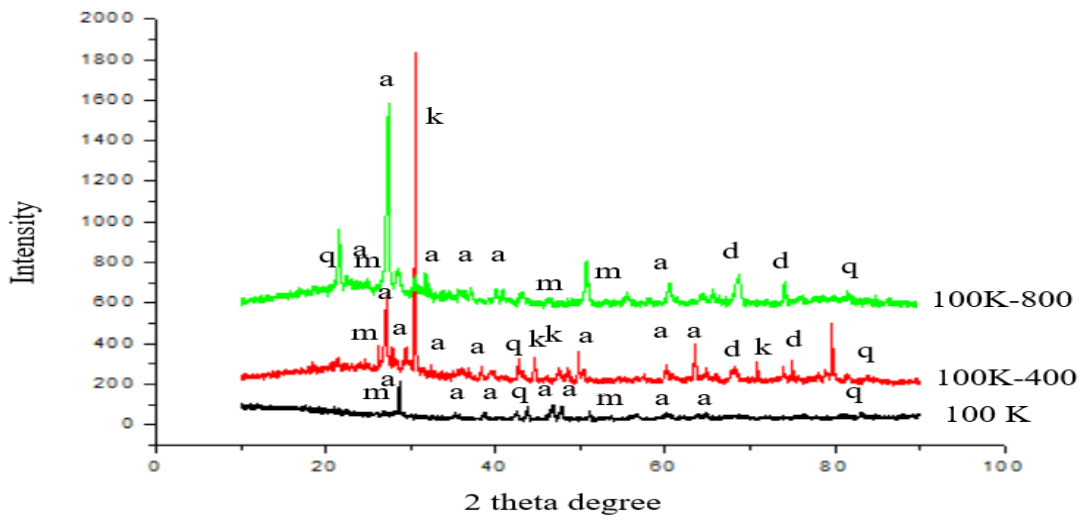
Sodyum silikatlı numuneler	6 saatlik kür sonrası		24 saatlik kür sonrası	
	Boşluk Oranı (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Boşluk Oranı (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)
100 Ç	17,3	9,0	16,0	8,2
100 K	21,6	12,1	21,0	11,6
50 K-Ç	15,4	7,8	14,9	7,6
75 K - 25 Ç	16,4	8,4	16,1	8,2
75 Ç - 25 K	16,5	8,3	16,8	7,9

5.7. Faz ve Mikroyapı İncelemeleri

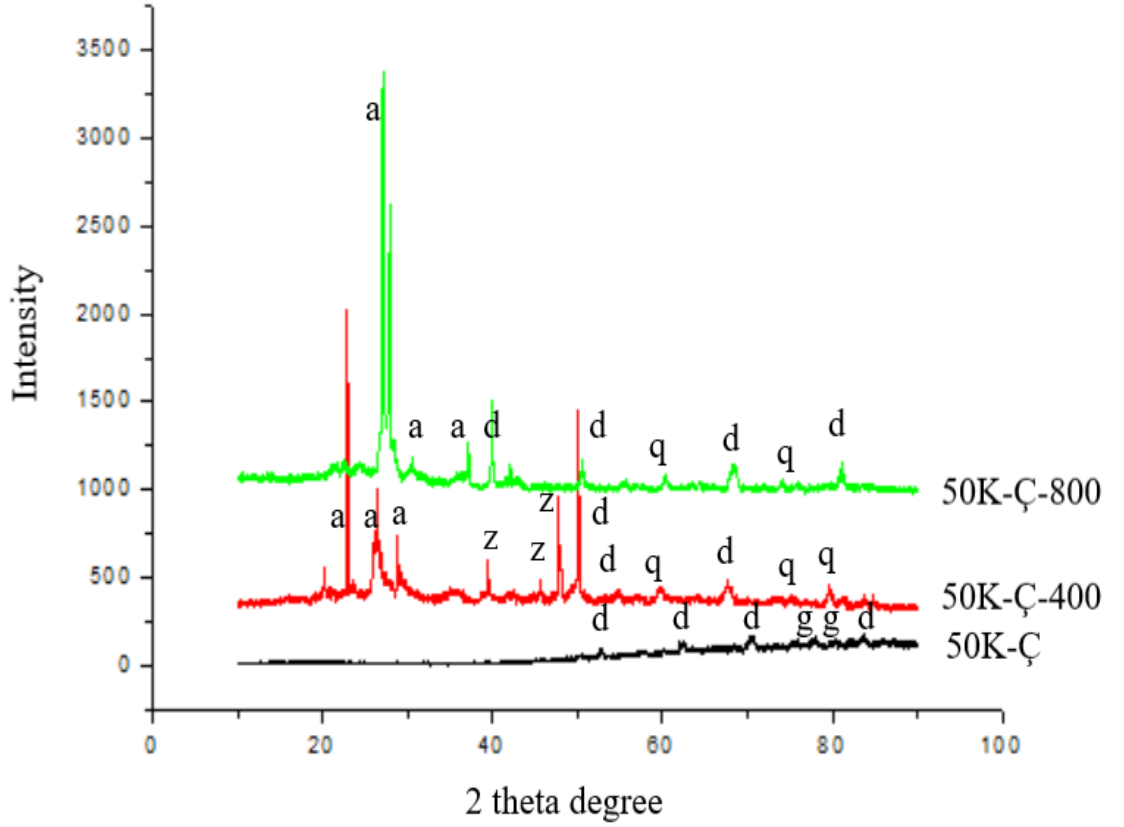
Dayanım, yoğunluk sonuçlarına bakıldığında genel artışın 24 saatlik kür sonrasında harçlarda yüksek olduğu görüldüğünden mikroyapı-faz analizleri için 24 saatlik kür tabii tutulan harçlar seçilmiştir. Seçilen numunelerden Faz ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Silikatlı harçların faz ve mikroyapıları Şekil 5.25.- 5.33.'de verilmiştir.



Şekil 5.25. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının faz analizi (p:potasyum alüminyum silikat, a: anortit, z:zeolit, d:diopsit, q:kuvars, g:gehlenit)

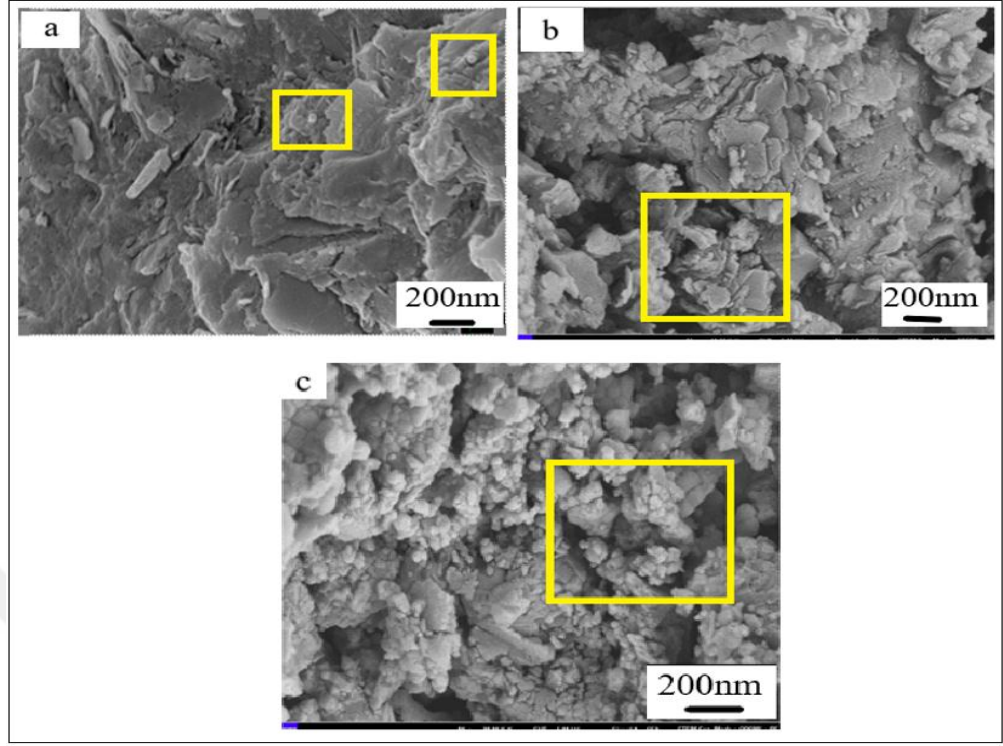


Şekil 5.26. Sodyum silikatlı 100K harçlarının faz analizi (a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, k:kıyanit, m:müllit)

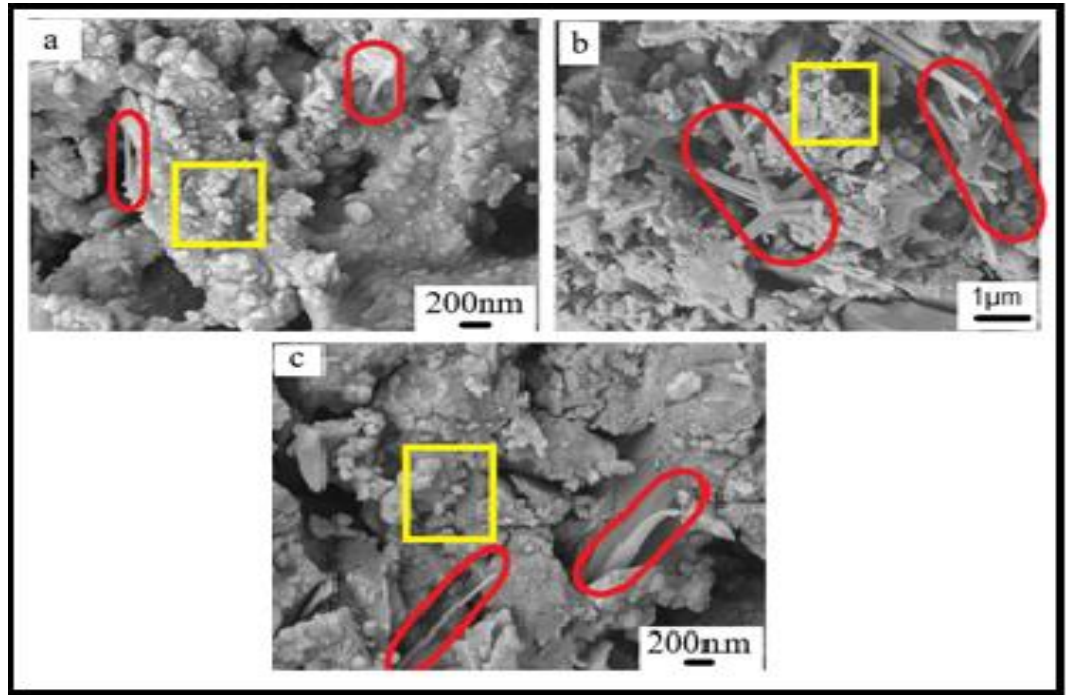


Şekil 5.27. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının faz analizi (a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit)

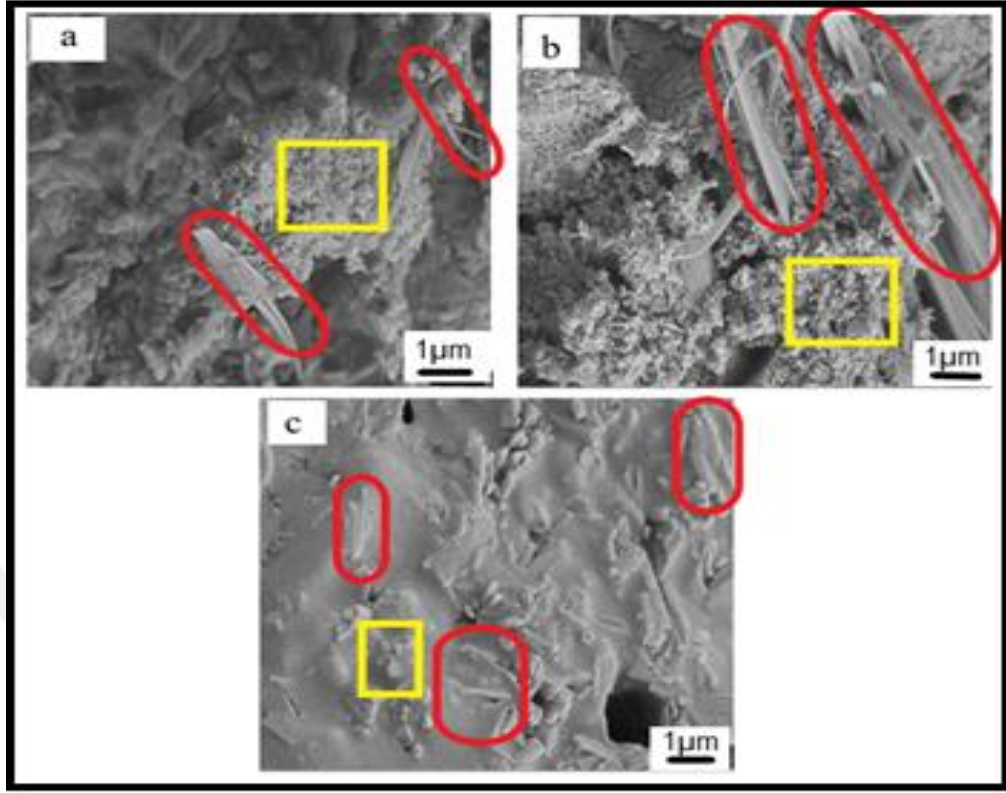
Silikatlı harçların faz analizi incelendiğinde %100 çömlek atığı içeren harçlarda p:potasyum alüminyum silikat, a: anortit, z:zeolit, d:diopsit, q:kuvars, g:gehlenit, %100 karo atığı içeren harçlarda a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, k:kıyanit, m:müllit fazları elde edilmiştir. Her iki atığın %50 dahil olduğu 50 K-Ç harcında ise a: anortit, d:diopsit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Mikroyapı analizleri incelendiğinde bu fazlardan en dikkat çeken ve sarı-kırmızı işaretlemelerle gösterilen anortit, müllit, zeolit kristalleridir.



Şekil 5.28. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800

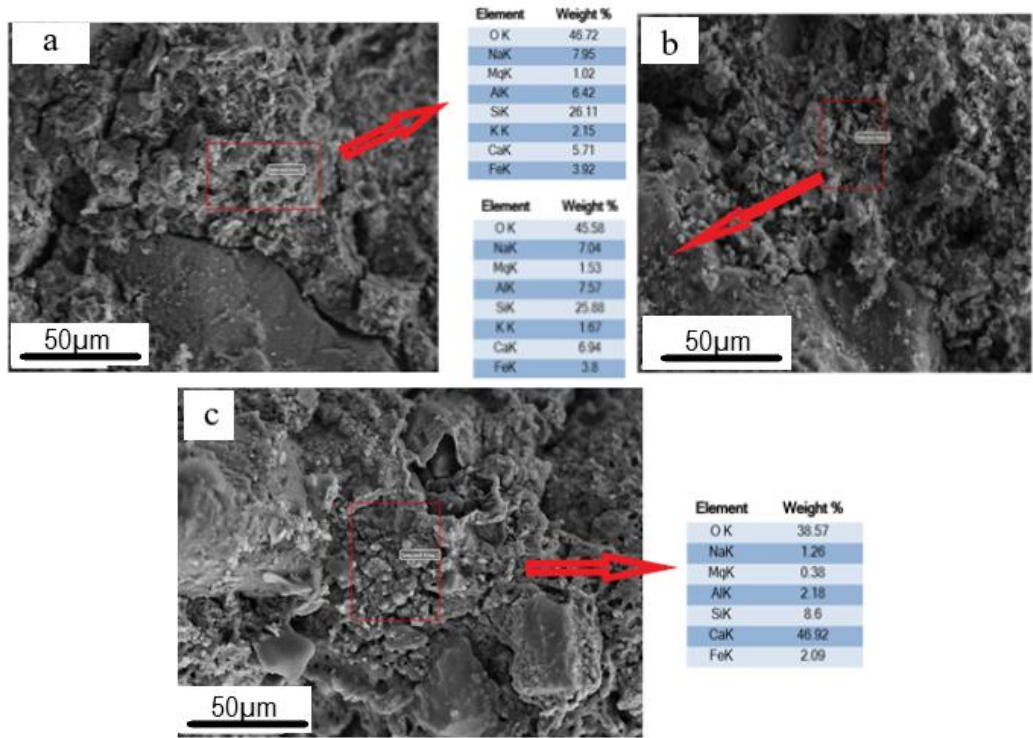


Şekil 5.29. Sodyum silikatlı 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800

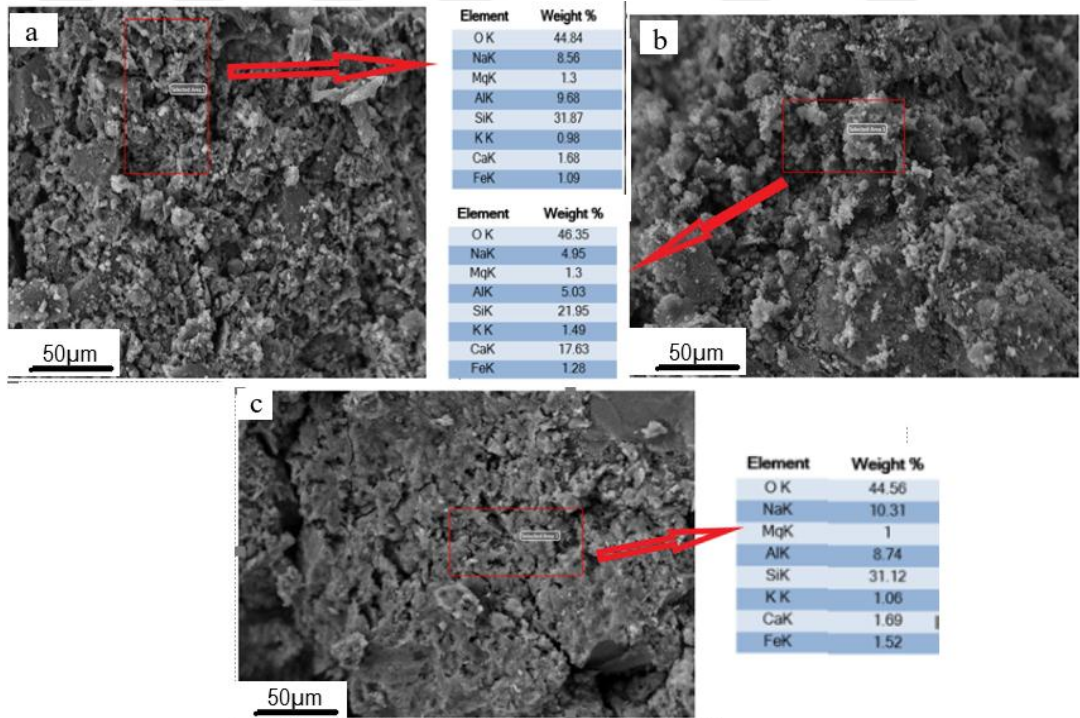


Şekil 5.30. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının mikroyapı analizi a)50K-Ç, b)50K-Ç-400, c)50 K-Ç-800

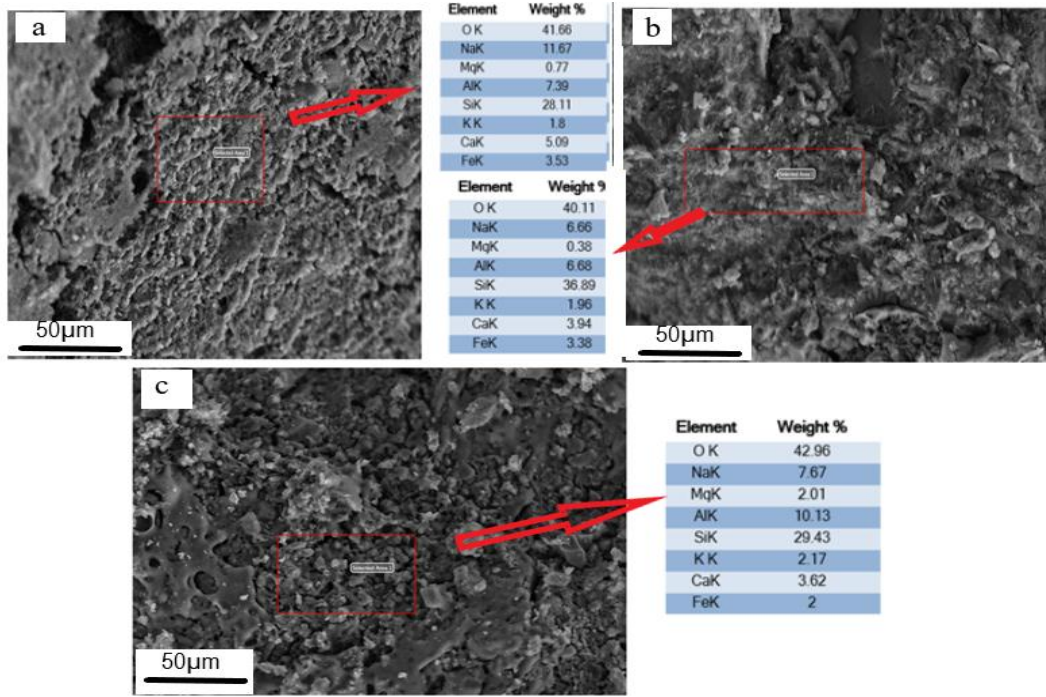
Silikatlı harçların EDX analiz sonuçları ise Şekil 53 - 55'de sunulmuştur. Hem harçların içeriğinde yer alan atıkların kimyasal analiz sonuçlarına göre hem de faz analizi ile belirlenen sonuçlara göre çömlük atığı içeren 100 Ç harcında Fe ve Ca içeriği yüksek iken, 100 Karo kek atığı içeren harçlarda Al, Si ve Na içeriğinin yüksek olduğu, her ikisini içeren 50 K-Ç harcında ise Al, Si, Fe, Ca oranlarının yüksek olduğu görülebilmektedir.



Şekil 5.31. Sodyum silikatlı 100Ç harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800

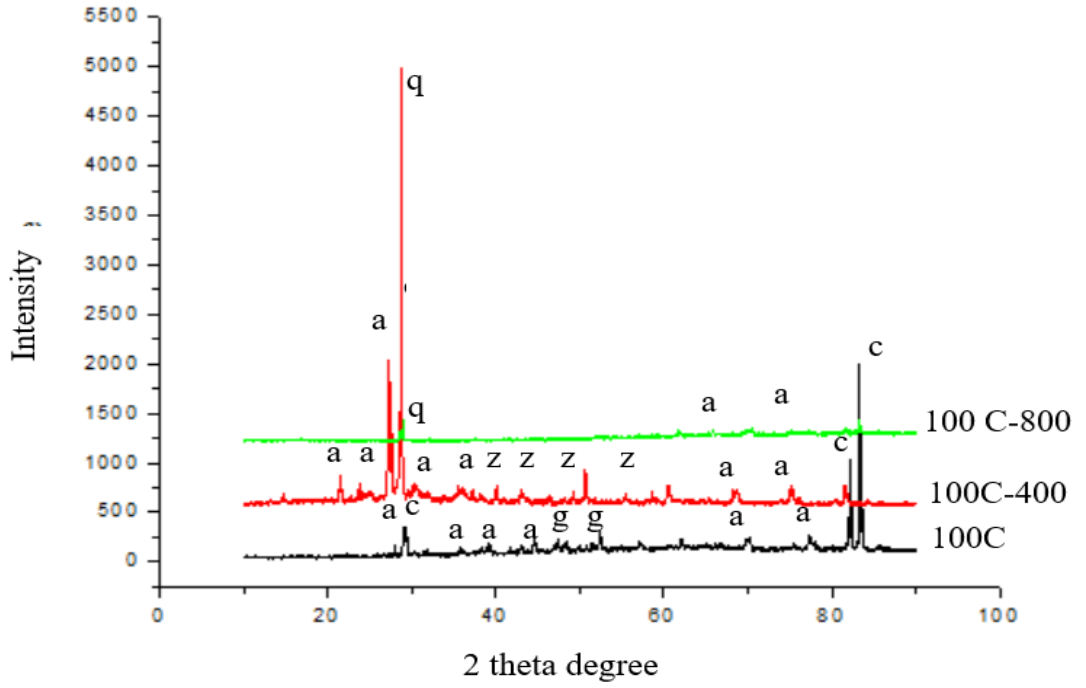


Şekil 5.32.. Sodyum silikatlı 100K harçlarının EDX analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800

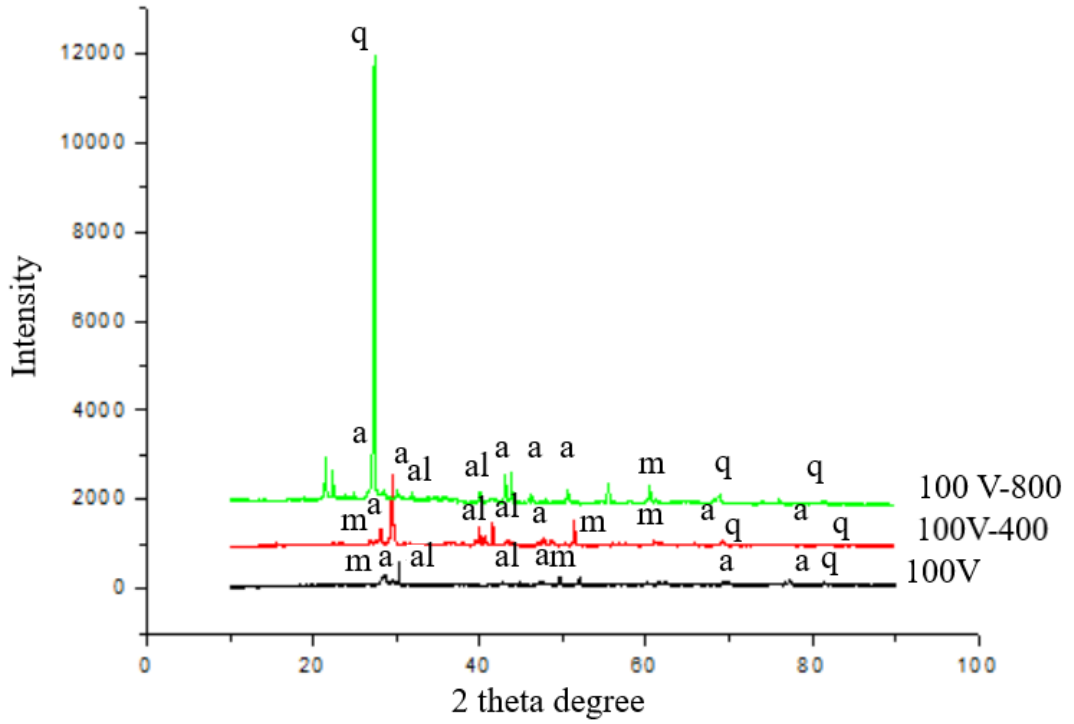


Şekil 5.33. Sodyum silikatlı 50K-Ç harçlarının EDX analizi a)50K-Ç, b)50K-Ç-400, c)50 K-Ç-800

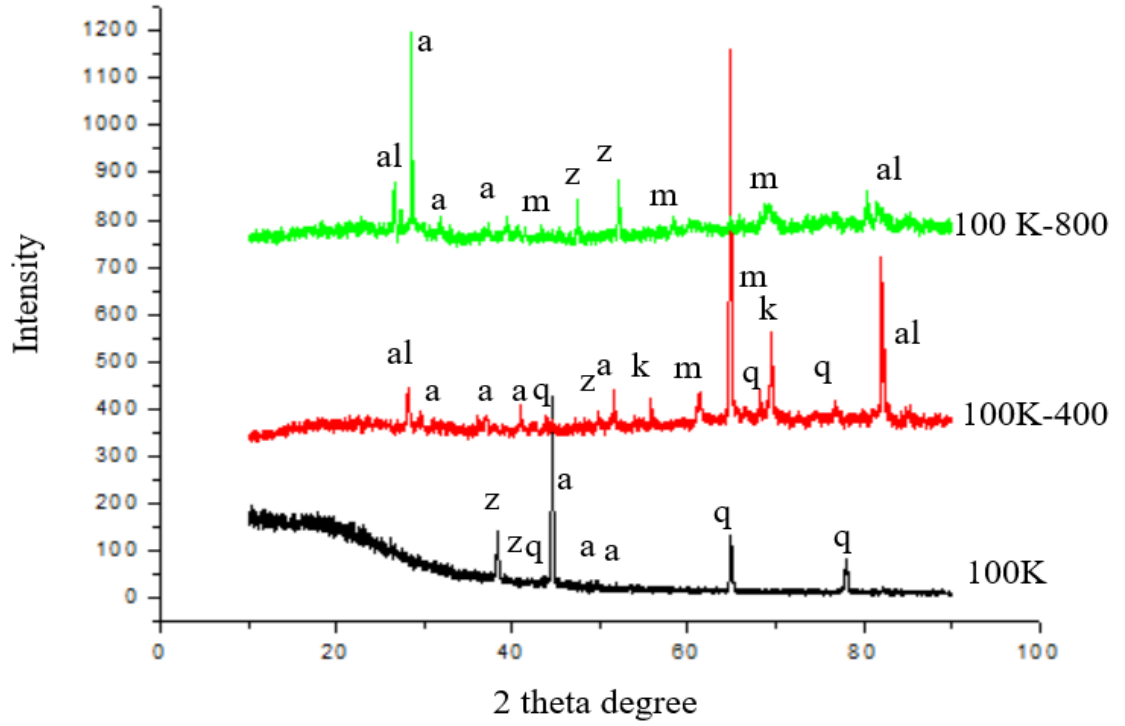
Sodyum hidroksitli harçların faz ve mikroyapı analizleri Şekil 5.34.-5.48.'de verilmiştir. Sodyum hidroksitli harçların faz analizi incelendiğinde %100 çömlük atığı içeren harçlarda z:zeolit, g:gehlenit, c: Kalsit a:anortit, q:kuvars, %100 vitrifiye atığı içeren harçlarda m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars, %100 karo kek atığı içeren harçlarda m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit fazları elde edilmiştir. Her iki atığın %50 dahil olduğu 50 K-V harcında ise m:müllit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit fazları ve %50 Ç-V harçlarında m:müllit, a:anortit, d:diopsit, z:zeolit fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Mikroyapı analizleri incelendiğinde bu fazlardan en dikkat çeken ve sarı-kırmızı işaretlemelerle gösterilen anortit, müllit, zeolit kristalleridir.



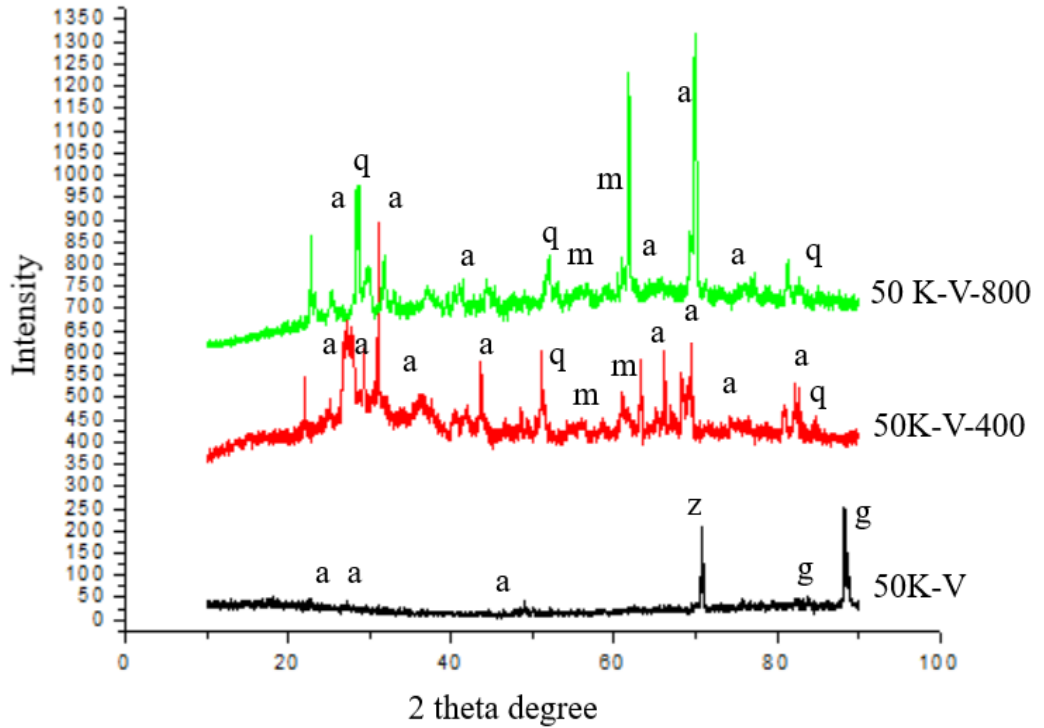
Şekil 5.34. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800 (z:zeolit, g:gehlenit, c: Kalsit a:anortit, q:kuvars)



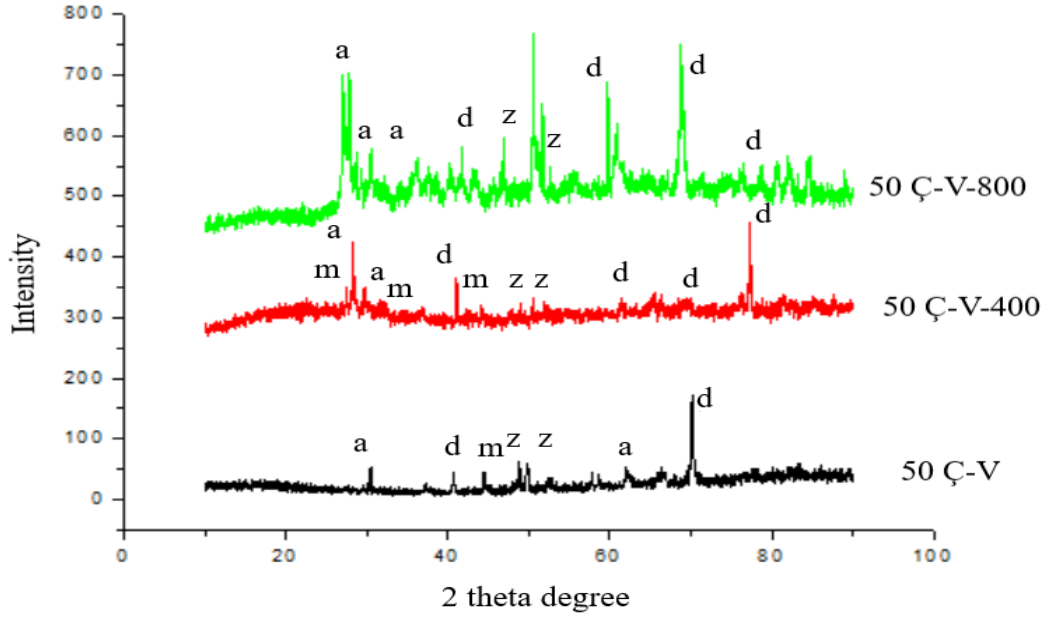
Şekil 5.35. Sodyum hidroksitli 100V harçlarının mikroyapı analizi a)100V, b)100V-400, c)100V-800 (m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars)



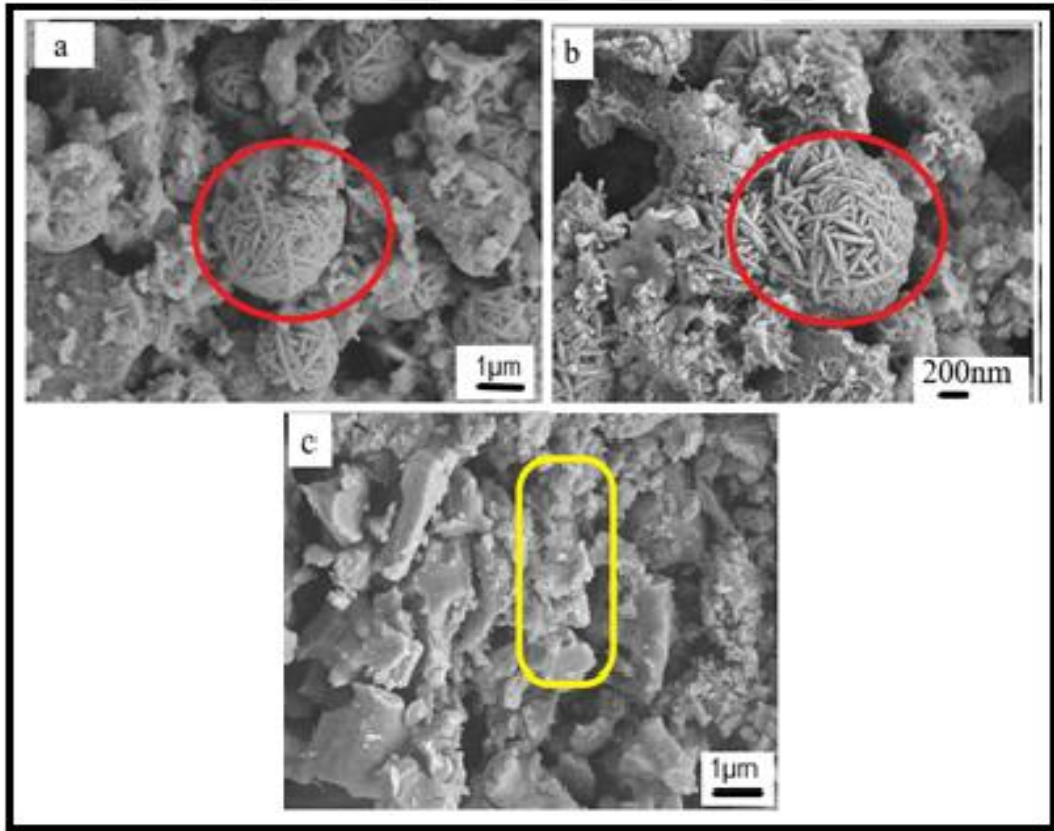
Şekil 5.36. Sodyum hidroksitli 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800 (m:müllit, al:albit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit)



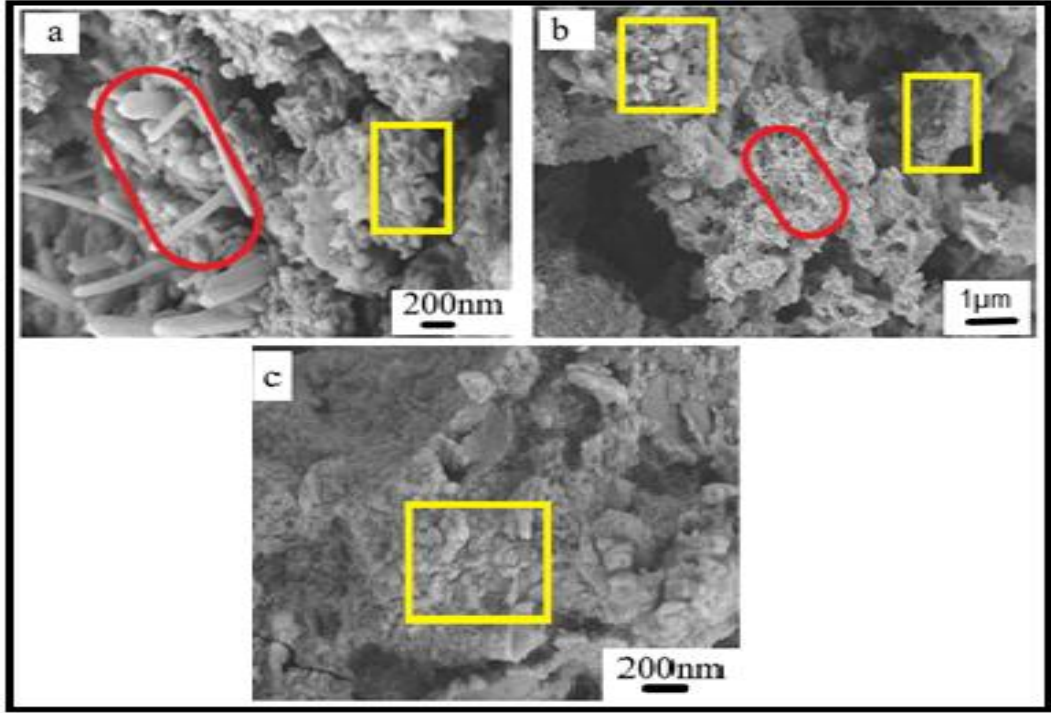
Şekil 5.37. Sodyum hidroksitli 50 K-V harçlarının mikroyapı analizi a)50K-V, b)50 K-V 400, c)50K-V-800 (m:müllit, a:anortit, q:kuvars, z:zeolit, g:gehlenit)



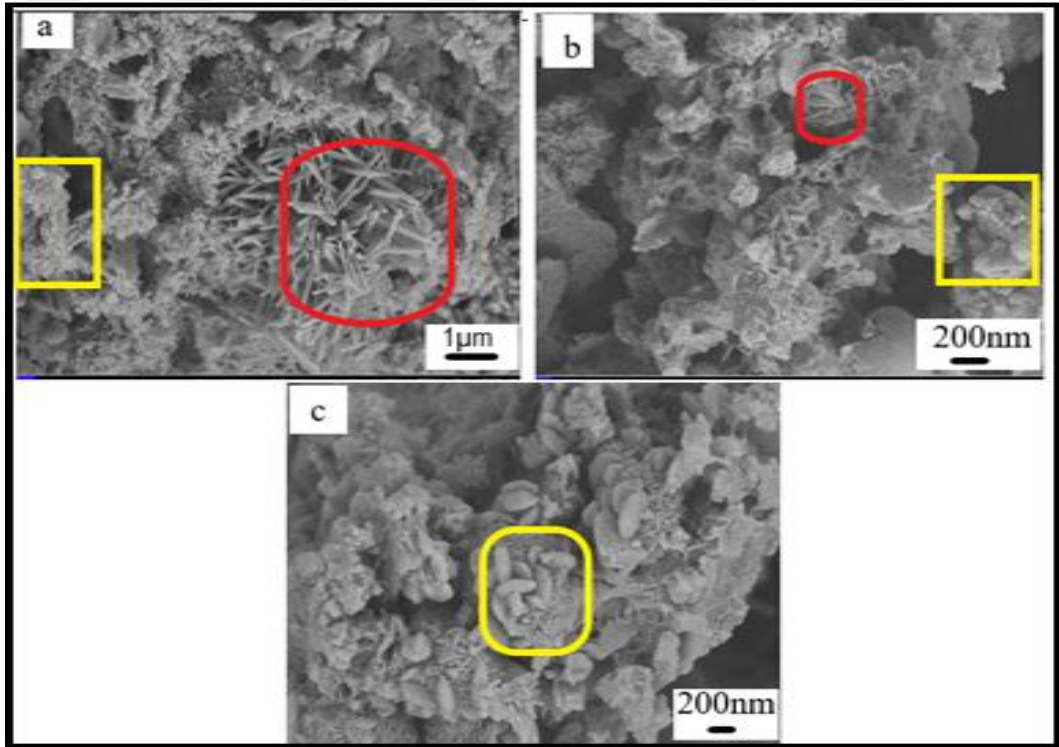
Şekil 5.38. Sodyum hidroksitli 50 Ç-V harçlarının mikroyapı analizi a)50Ç-V, b)50 Ç-V-400, c)50Ç-V-800 (m:müllit, a:anortit, d:diopsit, z:zeolit,)



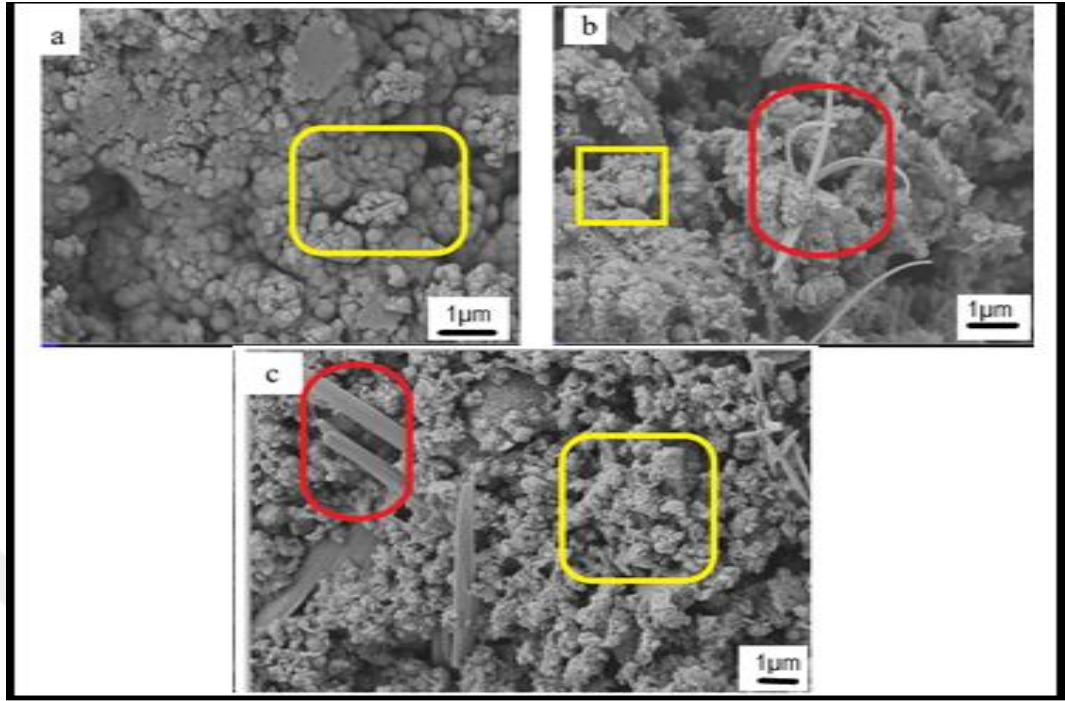
Şekil 5.39. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının mikroyapı analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800



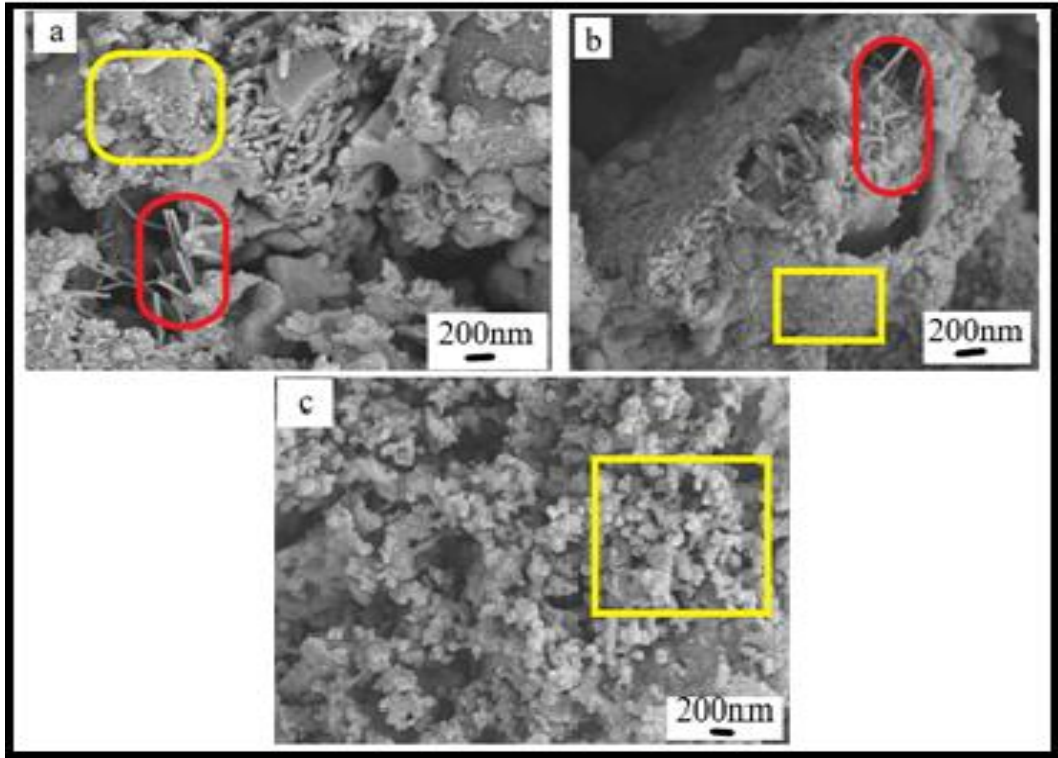
Şekil 5.40. Sodyum hidroksitli 100V harçlarının mikroyapı analizi a)100V, b)100V-400, c)100V-800



Şekil 5.41. Sodyum hidroksitli 50Ç-V harçlarının mikroyapı analizi a)50 Ç-V, b)50 Ç-V-400, c)50 Ç-V-800

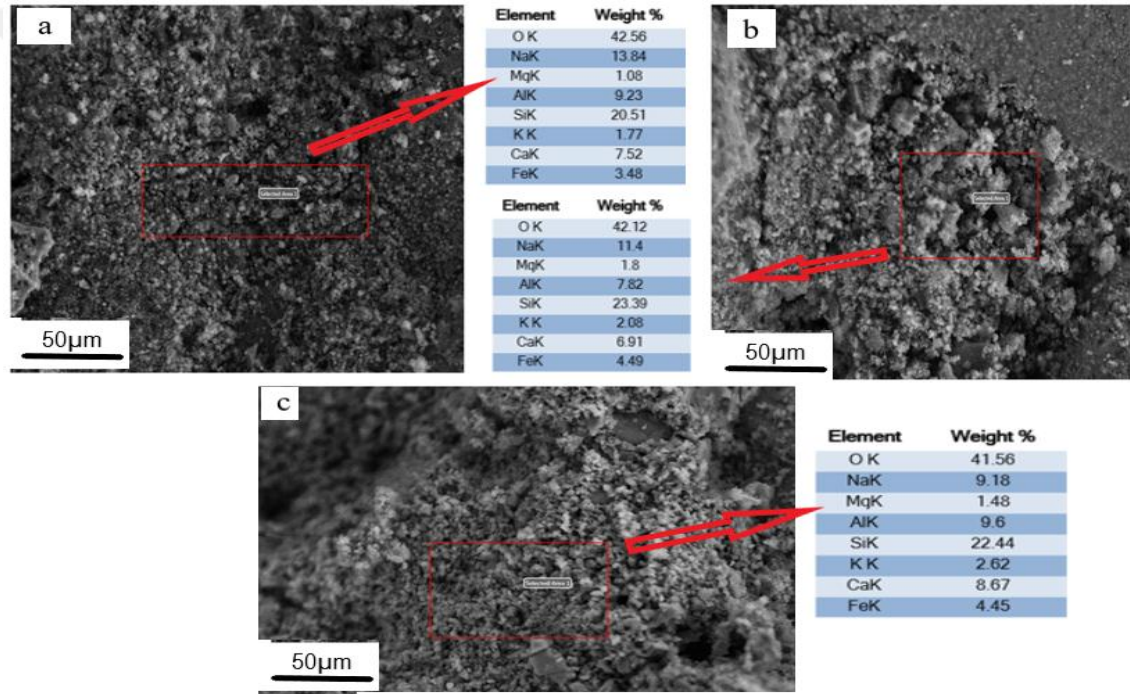


Şekil 5.42 Sodyum hidroksitli 100K harçlarının mikroyapı analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800

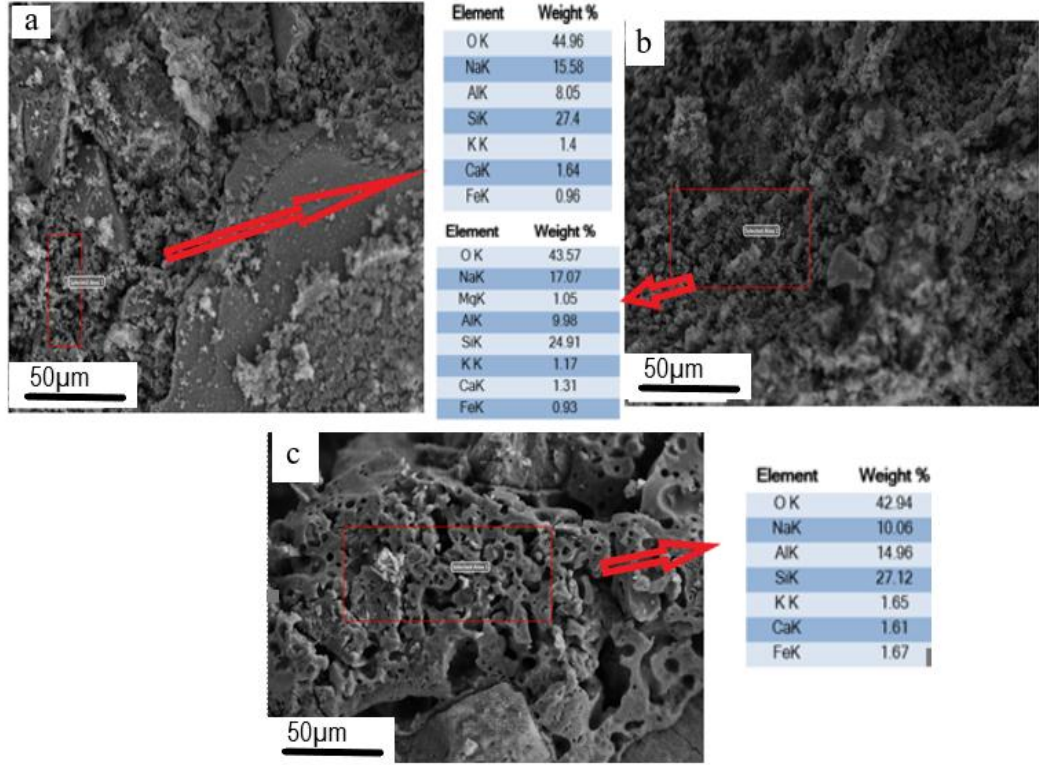


Şekil 5.43. Sodyum hidroksitli 50K-V harçlarının mikroyapı analizi a)100K-V, b)100K-V-400, c)100K-V-800

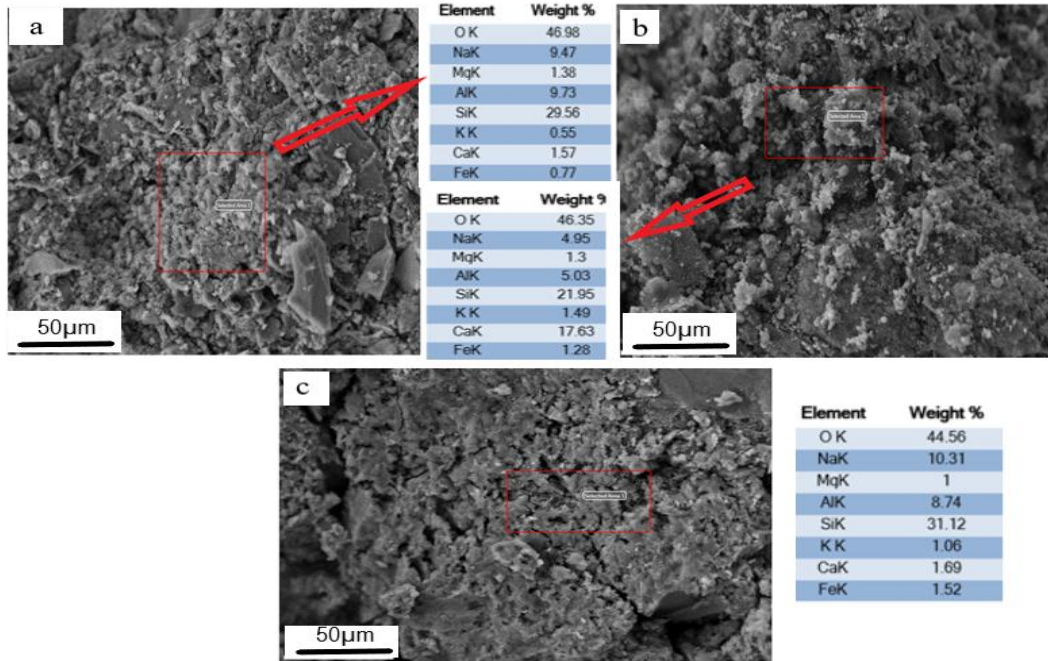
NaOH lı harçların EDS Sonuçları incelendiğinde, 100 Ç harçlarında diğer harçlara kıyasla Ca ve Fe oranının yüksek olduğu görülebilmektedir. 100 V harcında ise bu elementlerin biraz daha düşük Al, Si, ve Na elementleri yüzdelerinin arttığı tespit edilmiştir. 100 K harcında Al, Si, Na element yüzdeleri artmıştır. Her 3 grup harç serisinde de dikkati çeken anortit kristalleri bulunmaktadır. Hem çömlek hem de vitrifiye atığı içeren harçlarda bileşimi oluşturan atıkların kimyasal analizlerine bağlı olarak Al, Si, Ca, Fe miktarlarının tek başına kullanılan hallerine kıyasla ortalamaları arasında olduğu görülebilmektedir. Benzer durum 50 K-V harcı içinde geçerlidir.



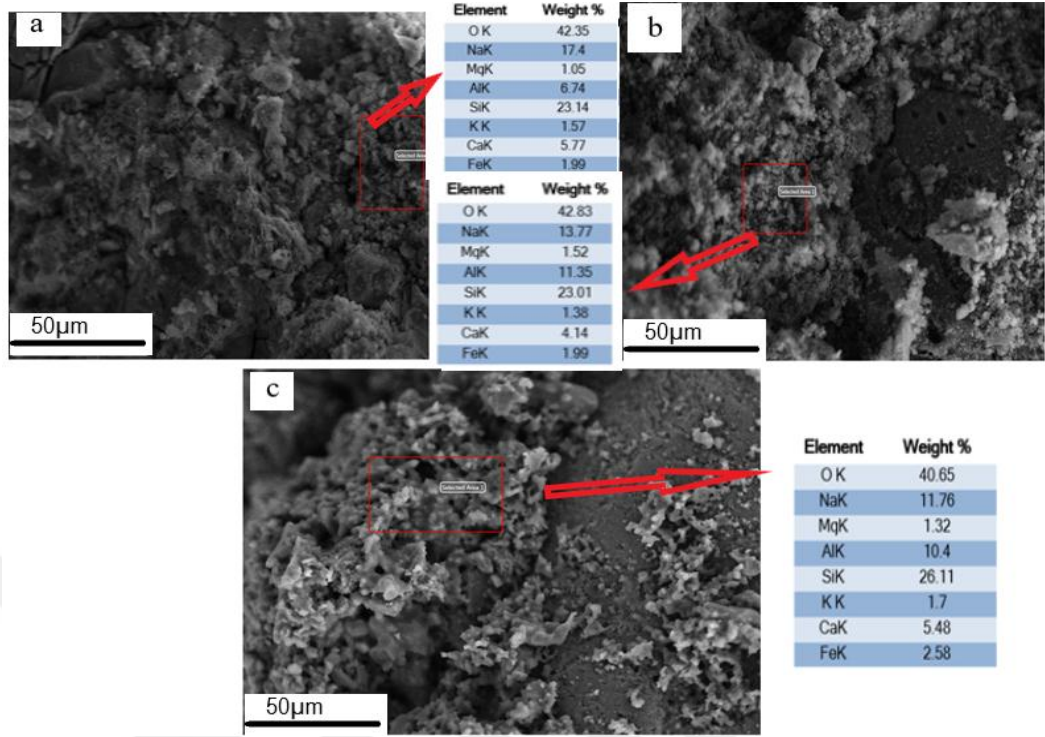
Şekil 5.44. Sodyum hidroksitli 100Ç harçlarının EDX analizi a)100Ç, b)100Ç-400, c)100Ç-800



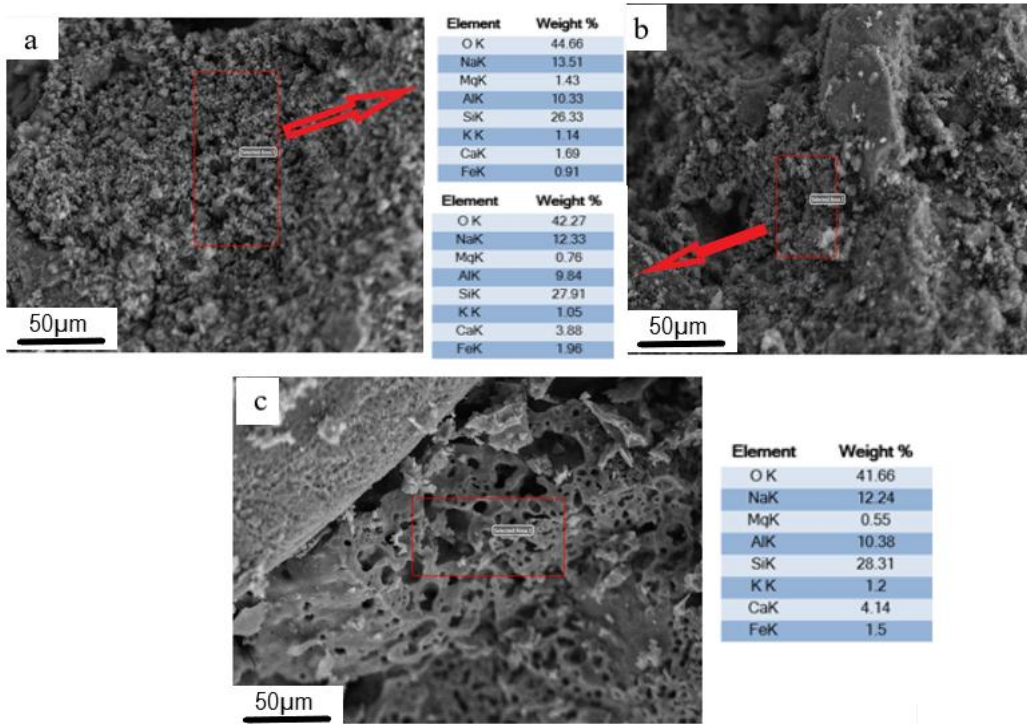
Şekil 5.45 Sodyum hidroksitli 100V harçlarının EDX analizi a)100V, b)100V-400, c)100V-800



Şekil 5.46. Sodyum hidroksitli 100K harçlarının EDX analizi a)100K, b)100K-400, c)100K-800



Şekil 5.47. Sodyum hidroksitli 50 Ç-V harçlarının EDX analizi a)50Ç-V, b)50Ç-V-400, c)50Ç-V-800



Şekil 5.48. Sodyum hidroksitli 50 K-V harçlarının EDX analizi a)50K-V, b)50 K-V-400, c)50 K-V-800

6.BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Geopolimer için hammadde kaynaklarını silikat ve alüminosilikatlardır. Bu tez çalışmasında kullanılan endüstriyel atıkların kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içerdiğinden alternatif bir hammadde kaynağı olduğunu göstermektedir.

Çömlek atığı diğer atıklara göre düşük SiO_2 ve Al_2O_3 içermesine rağmen yüksek oranda CaO içermekte bu da geopolimerlerde performansta iyileştirme ve dayanım kazandırmaktadır.

Karo ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı 6 saatlik kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-V'de sırasıyla 4,3 MPa, 4,7 MPa ve 5,9 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-V'de 5,7 MPa, 6,4 MPa ve 7,5 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürelemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Çömlek ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı 6 saatlik kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 Ç-V'de sırasıyla 3,0 MPa, 4,4 MPa ve 6,3 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 Ç-V'de 5,3 MPa, 6,7 MPa ve 7,1 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürelemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Çömlek ve karo atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı 6 saatlik kürlenmiş Na_2SiO_3 ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-Ç'de sırasıyla 4,1 MPa, 5,2 MPa ve 6,7 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-Ç'de 7,3 MPa, 8,3 MPa ve 8,3 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürelemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Karo ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı 6 saatlik kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-V'de sırasıyla 19,8 MPa, 26,4 MPa ve 30,8 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-V'de 24,2 MPa, 28,4 MPa ve 39,9 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Çömlek ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı 6 saatlik kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 Ç-V'de sırasıyla 18,9 MPa, 23,5 MPa ve 31,2 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 Ç-V'de 32,3 MPa, 41,3 MPa ve 43,9 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Çömlek ve karo atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı 6 saatlik kürlenmiş Na_2SiO_3 ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-Ç'de sırasıyla 16,9 MPa, 28,0 MPa ve 29,8 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 100 Ç sırasıyla 26,5 MPa, 33,1 MPa, 33,7 MPa ve 50 K-Ç'de 27,7 MPa, 31,6 MPa ve 32,6 MPa olarak elde edilmiştir. 24 saatlik kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Karo ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası eğilme dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-V'de sırasıyla 5,9 MPa, 4,2 MPa, 3,3 MPa ve 4,7 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-V'de 7,5 MPa, 3,6 MPa, 2,9 MPa ve 4,2 MPa olarak elde edilmiştir. 6 saat kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir çünkü yüksek sıcaklık işleminde ısı ile reaksiyon oluşumudur.

Çömlek ve vitrifiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası eğilme dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 Ç-V'de sırasıyla 6,3 MPa, 4,4 MPa, 3,6 MPa ve 3,9 MPa, 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 Ç-V'de 7,1 MPa, 3,8 MPa, 2,5 MPa ve 2,3 MPa olarak elde edilmiştir. 6 saat kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiş ve bunun nedeni olarak kısa süre kürlenmede reaksiyon tam anlamıyla bitmediği için verilen ısı ile yeniden reaksiyonların gerçekleşmesidir.

Çömlek ve karo atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası eğilme dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş Na₂SiO₃ ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-Ç'de sırasıyla 6,7 MPa, 6,0 MPa, 3,1 MPa, 1,9 MPa, 75 K-25 Ç numunesinde sırasıyla 5,9 MPa, 6,6 MPa, 4,0 MPa ve 1,8 MPa 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-Ç'de 8,3 MPa, 4,2 MPa, 3,2 MPa, 1,6 MPa ve 75 K-25 Ç numunesinde sırasıyla 6,2 MPa, 4,2 MPa, 2,5 MPa ve 1,8 MPa olarak elde edilmiştir. 6 saat kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir.

Karo ve vitrikiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-V'de sırasıyla 30,8 MPa, 28,3 MPa, 25,0 MPa, 30,6 MPa ve 75 K-25 V reçetesinde sırasıyla basınç dayanımları 29,0 MPa, 26,0 MPa, 24,3 MPa ve 29,9 MPa şeklinde ölçülmüştür. 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-V'de sırasıyla 39,4 MPa, 25,4 MPa, 19,4 MPa, 25,7 MPa ve 75 K-25 V reçetesinde sırasıyla basınç dayanımları 37,0 MPa, 19,5 MPa, 18,1 MPa ve 25,5 MPa olarak elde edilmiştir. 6 saatlik kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiştir çünkü yüksek sıcaklık işleminde ısı ile reaksiyon oluşumudur. Bunun yanında 50 K-V karışımında sıcaklığın etkisiyle de (800°C) C-A-S-H jel yapısının yoğun bir kıvam oluşumuyla dayanımlarda artışlar meydana gelmiştir.

Çömlek ve vitrikiye atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş NaOH ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 Ç-V'de sırasıyla 31,2 MPa, 28,1 MPa, 23,6 MPa, 24,9 MPa ve 100 Ç reçetesinde sırasıyla basınç dayanımları 19,4 MPa, 19,3 MPa, 15,2 MPa ve 27,0 MPa olarak ölçülmüştür. 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 Ç-V'de sırasıyla 43,9 MPa, 29,7 MPa, 22,0 MPa, 25,1 MPa ve 100 Ç reçetesinde sırasıyla basınç dayanımları 33,9 MPa, 18,5 MPa, 15,4 MPa ve 28,1 MPa MPa olarak elde edilmiştir. 6 saatlik kürlemede daha iyi sonuç alındığı gözlenmiş ve bunun nedeni olarak kısa süre kürlenmede reaksiyon tam anlamıyla bitmediği için verilen ısı ile yeniden reaksiyonların gerçekleşmesidir. Bunun yanı sıra 50 Ç-V numunesinde 800°C'de sıcaklığının etkiyle yapıdan müllit fazlarının uzaklaşması ve 100 Ç numunesinde kalsit, kuvars gibi fazların oluşumu dayanımda iyileşmeler meydana getirmiştir.

Çömlek ve karo atıkları ile hazırlanan geopolimerlerde yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı 25°C, 400°C 600°C ve 800°C'de 6 saat kürlenmiş Na₂SiO₃ ile geopolimerlerde en iyi sonuç 50 K-Ç'de sırasıyla 29,8 MPa, 33,9 MPa, 27,4 MPa, 9,8 MPa, 75 K-25 Ç numunesinde sırasıyla 28,0 MPa, 33,0 MPa, 27,8 MPa ve 9,5 MPa değerleri ölçülmüştür. 24 saat kürlenmiş numunelerde 50 K-Ç'de 32,6 MPa, 24,9 MPa, 24,2 MPa, 9,4 MPa ve 75 K-25 Ç numunesinde sırasıyla 29,5 MPa, 27,0 MPa, 22,6 MPa ve 10,0 MPa olarak elde edilmiştir. 6 saatlik kürlemede ve 400°C 'de iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma sonuçları, uçucu kül ve seramik atıklarının geopolimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede potansiyel taşıdığını göstermektedir. Elde edilen numunelerde, uçucu kül ve seramik atıkları ile hazırlanan harçlar yüksek dayanım göstermiştir. Bu durum, endüstriyel atıkların ekonomik bir değere dönüştürülerek çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, endüstriyel atıkların geri dönüşüm ve değerlendirme potansiyelini ortaya koyması açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Geopolimerlerin üretiminde endüstriyel atıkların kullanılması, kaynak tasarrufu, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması gibi avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, gelecekte benzer araştırmaların yapılmasına ve endüstriyel atıkların daha etkili bir şekilde değerlendirilmesini sağlayabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, endüstriyel seramik atıkların geri dönüşümü ve değerlendirilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Elde edilen bulgular, endüstriyel atıkların geopolimer üretiminde kullanılarak çevresel etkilerin azaltılmasına ve kaynak tasarrufuna katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Geopolimerlerin üretiminde uçucu kül ve seramik atıklarının kullanılması, sürdürülebilir bir çimento alternatifi sunma potansiyeli taşımaktadır. Bu malzemelerin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, atık miktarının azaltılmasına ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, bu yaklaşım enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltarak çevresel etkileri en aza indirmektedir.

Çalışmada elde edilen yüksek dayanım sonuçları, endüstriyel atıkların geopolimerlerde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ve mukavemetin artırılmasında olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu da, yapı sektöründe kullanılan malzemelerin performansını iyileştirerek daha dayanıklı ve uzun ömürlü yapıların inşa edilebileceği anlamına gelir.

İlerleyen süreçte kür koşulları ve optimum karışım oranlarının belirlenebilmesi, mikroyapı-bileşim ve mekanik özellikler arasındaki ilişkinin açıklanabilmesi de önemli bir etki oluşturacaktır.



KAYNAKÇA

1. Ahmaruzzaman, M., A Review on The Utilization of Fly Ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), s.327-363, 2010.
2. Çelik, Ö., “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Çamur Katkılarının Çimento Dayanımlarına Etkileri”, *Beton 2004 Hazır Beton Kongresi*, Haziran, İstanbul, Bildiriler Kitabı: s.657-663, 2004.
3. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/10/10_SeramikCalismaGurubu.pdf
4. <https://www.serfed.com/upload/ihracat>
5. Saygı, M., Seramik Atıkların Asfalt Endüstrisinde Kullanımı, *Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Uşak, 2019.
6. Kayacı, K., Yıldırım, Y., Genç C., Keskin, A., Çırpın, A., “Seramik Karo Fabrikalarının Kek ve Seramik Sağlık Gereçleri Pişmiş Kırık Atıklarının Porselen Karo Bünyelerde Kullanım Olanaklarının Araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı s.353-358, 2019.
7. web sitesi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kapadokya>
8. web sitesi: <http://www.avanospottery.com/tr/>
9. Adıyaman, Y.H., ETİBOR A.Ş. Hisarcık İşletmesi Atıklarının Porselen Karo Üretiminde Kullanılabilirliği”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir, 2006.
10. Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez S. ve Vazquez, E. ve Barra, M., “Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes”, *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3),s.175-183, 2008.

11. Atabey, İ.İ., F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi*, Kayseri, 2017.
12. Rashad, A.M., A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash, *Materials & Design*, 53, s1005-1025, 2014.
13. Papadakis, V. G., Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, s291-299, 2000.
14. Kaplan, G., Gültekin A.B., “Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi”, *International Sustainable Building Symposium*, 1-8, Ankara, 2010.
15. <https://www.dw.com/tr/avrupa-k%C3%B6m%C3%BCr%C3%BC-santralleri-kapat%C4%B1yor-t%C3%BCrkiye-yenilerini-kuruyor/a-56391106>.
16. Loh, W., Classification and Regression Trees, *Wiley Interdisciplinary Reviews* 1(1), s.14-23 2011.
17. Okumuş, H., The Fields of Usage of Ceramics In The Past And Today, *Journal of Awareness*, 2(3), s.1-14, 2017.
18. Ardahanlı, M., Atık Seramik, Çinko Cürufu ve Obsidiyen Kullanılarak Üretilen Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum, 2020.
19. Xu, H. ve Van Deventer, J.S., “Geopolymerisation of Multiple Minerals”, *Minerals Engineering*, 15(12), s.1131-1139, 2002.
20. Palomo, A., Grutzeck M.W. ve Blanco, M.T., “Alkali-Activated Fly Ashes, a Cement for the Future”, *Cement and Concrete Research*, 29(8), s.1323-1329, 1999.

21. Xu, H. ve Van Deventer J.S., “The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals”, *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), s.247-266, 2000.
22. Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer J.S. ve Lukey G.C., “The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-based Geopolymers”, *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), s.63-73, 2002.
23. Swanepoel, J.C. ve Strydom, C.A. “Utilisation Of Fly Ash In A Geopolymeric Material”, *Applied Geochemistry*, 17(8), s.1143-1148, 2002.
24. Li, Z., Ding, Z. ve Zhang, Y., Development of Sustainable Cementitious Materials, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology in, Beijing, China*, s.55-76, 2004.
25. Liew Y. M., Heah C.Y., Mohd Mustafa A.B., Kamarudin H., Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83 ,s.595–629, 2016.
26. Şinik, O., “Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon, 2019.
27. Maraş, M.M., “Elazığ ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer çimentolu Betonların sülfat direncinin araştırılması”, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*, Malatya, 2013.
28. Gümüş, A., “Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Afyon*, s. 1-2, 2016.
29. Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K. C., Van Grieken, R., Torfs, K., Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate(C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: *Comparison with historic pozzolanic mortars. Cement and Concrete Research*, 34(1), s1-6, 2004.

30. Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V., On the development of flyash-based geopolymer concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, 101(1), 2004.
31. Zeybek, O., “Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi”, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi*, Eskişehir, 2009.
32. Kantarcı F., “Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması”, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*, Malatya, 2013.
33. Sullivan A., Hill R.G. “Inexpensive glass polialkenoate Cement based on waste gasifier slag”, *Proceedings of the european union thematic progress workshop*, Morella, 2001.
34. Davidovits, J., “Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”, *Geopolymer'99 International Conference*, France, 1999.
35. Papadakis, V. G., Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbon ation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, s.291-299, 2000.
36. Gürer, C., Akbulut, H. & Kurklu, G., İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi. *5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 2004.
37. Porto, M.F., Fernandes, L.O., Understanding risks in socially vulnerable contexts: The case of waste burning in cement kilns in Brazil. *Safety Science*, 44(3), s.241-257, 2006
38. Engin, Y., Tarhan, M. & Kumbaracıbaşı, S. ,Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul, 2013.
39. Hashimoto, S., Fujita, T., Geng, Y. Nagasawa, E., Realizing CO2 emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), s.704-710, 2010.

40. Strazza, C., Del Borghi, A., Gallo, M., Del Borghi M., Resource productivity enhancement as means for promoting cleaner production: analysis of co-incineration in cement plants through a life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), s.1615-1621, 2011.
41. Scott, A. N, Thomas, M. D., Evaluation of fly ash from co-combustion of coal and petroleum coke for use in concrete., *ACI Materials Journal; Farmington Hills*, 104(1), s.62-69, 2007.
42. Meesala, C. R., Verma, N. K., Kumar, S., “Critical review on fly-ash based geopolymer concrete”, *Struct. Concr.*, 21(3), s.1013-1028, 2020.
43. Ojha, A., Aggarwal, P., “Fly ash based geopolymer concrete: a comprehensive review”, *Silicon*, 14, s.2453-2472, 2021.
44. John, S. K., Nadir, Y., Girija, K. “Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review”, *Constr. Build. Mater.*, 280, s.122443, 2021.
45. Klima, K. M., Schollbach, K., Brouwers, H. J. H., Yu, Q., “Thermal and fire resistance of Class F fly ash based geopolymers—A review”, *Constr. Build. Mater.*, 323, s.126529, 2022.
46. Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., Shi, X., “Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength”, *Constr. Build. Mater.* 262, s.120924, 2020.
47. Hager, I., Sitarz, M., Mróz, K., “Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application—Effect of slag addition”, *J. Clean. Prod.*, 316, s.128168, 2021.
48. Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., ve Palomo, A., Durability of alkali activated fly ash cementitious materials, *J. Mater. Sci.*, 42(9), s.3055–3065, 2007.

49. Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Experimental Study On Fly Ash And Lead Smelter Slag-Based Geopolymer Concrete Columns. *Construction and Building Materials*, 141, s.104–112, 2017.
50. Yaprak, H., Kaplan, G., “Farklı kür koşullarının Taban Külü Katkılı Jeopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Tübvav Bilim Dergisi*, 9(3), s.41-51, 2016.
51. Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., “Jeopolimer harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), s.248-256, 2018.
52. Kulkarni, S., “Experimental study on red mud, fly ash, GGBFS based geopolymer concrete”, *Int. J Engineer. Res. Tech.* 7(12), s.107-111, 2018.
53. Mucsi, G., Szabo, R., Racz, A., Kristaly, F., Kumar, S., “ Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymers”, *Mining Geology-Petrol.Engineer. Bull.*, s.27-36, 2019.
54. Bayer Öztürk, Z., Cırık, R., Atabey, İ.İ., Seramik çömlek atıklarının jeopolimer harçta kullanılmasıyla sürdürülebilir çevre yaklaşımı. *Uluslararası J. Çevre. Bilim. Teknoloji.* 20, s.7577–7588, 2023.
55. Bayer Öztürk, Z., Çam, T. Çevre dostu uçucu kül bazlı jeopolimer harçların taş kesme atığı ile performansı. *Anne. Kimya Fizik*, 307, s.128112, 2023.
56. Eser, A. Bayer Öztürk, Z., Atabey, İ.İ., ve Çelikten, S., “Uçucu kül ve farklı seramik sektörü atıklarının kullanımı ile üretilen jeopolimer harçların dayanım özellikleri”, *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, 13 (2), s.550–557, 2024.
57. Daniyal, M. and Ahmad, S., Application of Waste Ceramic Tile Aggregates in Concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(12), s.12808–12815, 2015.
58. Kabir, M., An Assessment of the Properties of Concrete Made with Ceramic Waste as Aggregate. *Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria*, 2016.

59. Raval, A. D., Patel, I. N., Pitroda, J., Stone Waste : Effective Replacement Of Cement For Establishing Sustainable Concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(6), s.2324–2329, 2013.
60. Rajamanickam, J.D., S.P., S., 2020, Experimental study on concrete using waste ceramic as partial replacement of aggregate, *Materials Today: Proceedings*, 45 (7), s.6603–6608, 2021
61. P.L, N., Owono, F.M., Kamseu, E., Boun, R.B.e., Kaze, C.R., Nemaleu, J.G.D., Djaoyang, U.B., Rachel, N.Y., “Thermal behaviour of metakaolin-bauxiteblends geopolymer: microstructure and mechanical properties”, *SN Appl.Sci.*, 2, s.1358, 2020.
62. Ay, C., “Atık cam tozu tabanlı geopolimer harçlarda kalsiyum alüminat çimentosu etkisinin araştırılması”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi*, Nevşehir, 2021.
63. Şinik, O., “Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon, 2019