



**YÜKSEK SICAKLIKTAN SONRA ASİT, SÜLFAT VE
TUZ ETKİSİNE MARUZ KALAN GEOPOLİMER
BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nisa YAZICI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır).

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIKTAN SONRA ASİT, SÜLFAT VE TUZ ETKİSİNE MARUZ
KALAN GEOPOLİMER BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of the Properties of Geopolymer Concrete Exposed to Acid, Sulphate and Salt
Effect After High Temperature)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nisa YAZICI

Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Erzurum
Ağustos, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Nisa YAZICI tarafından hazırlanan “Yüksek sıcaklıktan sonra asit, sülfat ve tuz etkisine maruz kalan geopolimer betonların özelliklerinin araştırılması” başlıklı çalışması .../.../2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Rıza POLAT
Atatürk Üniversitesi

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

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FAB-2021-9153

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL danışmanlığında sunulan “Yüksek sıcaklıktan sonra asit, sülfat ve tuz etkisine maruz kalan geopolimer betonların özelliklerinin araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Metot	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuç ve Öneriler	6	20
Tezin Geneli	9	25

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

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Nisa YAZICI	Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL
Tarih	Tarih
İmza:	İmza:

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

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

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

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, maddi manevi her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL'e teşekkür ederim.

Çalışmanın ortaya çıkmasında katkılarından dolayı değerli hocam Sayın Doç. Dr. Rıza POLAT'a teşekkür ederim.

Çalışmanın her aşamasında destek ve yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Derya TURHAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bütün imkanları sağlayan Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından FAB-2021-9153 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu projenin gerçekleşmesine büyük katkı sunan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi her zaman bana güvendiğini ve arkamda olduğunu hissettiğim kıymetli babam Celaletdin YAZICI, annem Nevin YAZICI ve kardeşlerim Şeyma YAZICI, Melda YAZICI, Feyza YAZICI'ya teşekkür ederim.

Nisa YAZICI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK SICAKLIKTAN SONRA ASİT, SÜLFAT VE TUZ ETKİSİNE MARUZ KALAN GEOPOLİMER BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nisa YAZICI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma KARAGÖL

Amaç: Bu çalışmanın amacı yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda ardışık uygulanan durabilite etkilerinin mekanik ve içyapı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır.

Yöntem: Alüminosilikat kaynağı olarak UK ve YFC kullanılarak geopolimer betonlar üretilmiştir. UK'nın ağırlıkça %100, %80, %70, %60, %50 oranlarında kullanıldığı 5 karışım grubu oluşturulmuştur. Çalışmada çözelti/bağlayıcı oranı, ısıtma kür sıcaklığı ve süresi sırasıyla 0.43, 90°C ve 72 saat olarak seçilmiştir. Kullanılan aktivatörler ise 10 M NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileridir. Ardışık durabilite etkilerinin araştırılması için numuneler önce farklı yüksek sıcaklıklara daha sonra ise asit, sülfat ve tuz etkisine maruz bırakılmıştır. Geopolimer betonlara basınç dayanımı, kılcal su emme, ağırlık değişimi ve UPV testleri uygulanmıştır. Ayrıca farklı durabilite etkilerinden sonra en yüksek dayanım sonuçlarına sahip karışımlara SEM, XRD ve FT-IR analizleri uygulanmıştır.

Bulgular: UK'nın ağırlıkça %100, %80, %70, %60 ve %50 oranlarında kullanılmasıyla üretilen geopolimer betonların 28 günlük dayanımları sırasıyla 46,91, 53,34, 53,87, 54,52 ve 63,12 MPa olarak bulunmuştur. Yüksek sıcaklık+HCl sonrasında tüm gruplarda basınç dayanımında azalma gözlemlenirken yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında tüm grupların basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. SEM analizinde dayanım düşüşü olan gruplarda çatlak ve boşluklar görülürken FT-IR ve XRD analizlerinde oluşan bağ yapılarında değişimler ve farklı mineral fazlar gözlemlenmiştir.

Sonuç: Ardışık durabilite etkisinden sonra üretilen geopolimer betonların mekanik özelliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak ardışık durabilite etkilerinden sonra YFC oranının artmasıyla karışımların basınç dayanım kayıpları azalmış ve daha yoğun bir içyapı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer Beton, Yüksek Sıcaklık, Asit Etkisi, Sülfat Etkisi, Tuz Etkisi, Basınç Dayanımı, UPV, SEM, XRD, FT-IR

Ağustos 2022, 151 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE EXPOSED TO ACID, SULPHATE AND SALT EFFECT AFTER HIGH TEMPERATURE

Nisa YAZICI

Supervisor: Asst. Prof. Fatma KARAGÖL

Purpose: The purpose of this study is to investigate the effect of successive durability on mechanical and internal structural properties of geopolymer concretes produced using blast furnace slag (YFC) and fly ash (UK).

Method: Geopolymer concretes were produced by using the UK and YFC as aluminosilicate sources. 5 mixture groups in which the UK was used at the rate of 100%, 80%, 70%, 60% and 50% by weight were created. In the study, the solution/binder ratio, thermal curing temperature, and application time were chosen as 0.43, 90°C and 72 hours, respectively. The activators used are 10 M NaOH and Na₂SiO₃ solutions. To investigate the effects of successive durability, the samples were first exposed to different high temperatures and then to the acid, sulfate, and salt effects. Compressive strength, capillary water absorption, weight change, and UPV tests were applied to geopolymer concretes. In addition, after different durability effects, SEM, XRD, and FT-IR analyzes were applied to the mixtures with the highest strength results.

Findings: The 28-day compressive strengths of geopolymer concretes produced by using UK at the rate of 100%, 80%, 70%, 60% and 50% by weight were found to be 46,91, 53,34, 53,87, 54,52, 63,12 MPa, respectively. While a decrease was observed in the compressive strength of all groups after high temperature+HCl, an increase was observed in the compressive strength of all groups after high temperature+Na₂SO₄ and high temperature+NaCl. In the SEM analysis, cracks and voids were observed in the groups with a decrease in strength, while changes in the bond structures and different mineral phases were observed in the FT-IR and XRD analyses.

Conclusion: After the successive durability effect, it was observed that the mechanical properties of geopolymer concretes decreased. However, after the successive durability effects, the compressive strength losses of the mixtures decreased with the increase of the YFC ratio and a denser internal structure was observed.

Keywords: Geopolymer Concrete, High Temperature, Acid Effect, Sulfate Effect, Salt Effect, Compressive Strength, UPV, SEM, XRD, FT-IR

August 2022, 151 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	3
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Geopolimerler	3
Geopolimerin tarihçesi ve tanımı	3
Geopolimerin Kimyası	5
Geopolimer betona aktivatör etkisi	7
Geopolimer betonda kütleme	8
Karıştırma Yöntemleri	10
İki parçalı karıştırma yöntemi	10
Tek parçalı karıştırma yöntemi	12
Yüksek Sıcaklık Etkisi	13
Asit Etkisi.....	15
Sülfat Etkisi	18
Tuz Etkisi	20
İç Yapı Analizleri.....	22
SEM	22
XRD	25
FT-IR.....	27
MATERYAL ve YÖNTEM	29
Materyal	29
Uçucu kül (UK).....	29
Yüksek fırın cürufu (YFC).....	29
Alkali aktivatörler	30

Çözelti suyu.....	31
Akışkanlaştırıcı katkı	31
Agrega	32
Kalıp yağı.....	32
Hidroklorik asit	33
Sodyum Sülfat.....	33
Sodyum Klorür.....	34
Deneylerde Kullanılan Araç ve Gereçler	35
Elekler	35
Laboratuvar mikseri	36
Yayılma tablası.....	36
Çelik kalıplar.....	37
Etüv	37
Yüksek sıcaklık fırını	38
Basınç dayanım test cihazı.....	39
UPV (Ultrasonik Ses Hızı) test cihazı.....	39
Yöntem.....	40
Agrega deney yöntemleri	40
Karışımların gruplandırılması ve oranların belirlenmesi yöntemi	41
Numunelerin üretilmesi.....	42
Numunelerin kür edilmesi.....	43
Geopolimer Beton Numunelere Uygulanan Deneyler	44
Taze beton kıvam deneyi	44
Kılcal su emme.....	45
Birim hacim ağırlık deneyi	46
Basınç dayanımı	46
UPV (Ultrasonik Ses Hızı).....	47
Yüksek sıcaklık deneyi	47
Asit etkisi deneyi.....	48
Sülfat etkisi deneyi.....	48
Tuz etkisi deneyi	49
İç Yapı Analizleri.....	50
X- Işını difraktometrisi (XRD) analizi	50
Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	50
Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR).....	50

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
Taze Beton Kıvam Deneyi Sonuçları.....	51
Basınç Dayanımı	51
28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları	51
Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları	53
Yüksek sıcaklık + HCl etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları	56
Yüksek sıcaklık + Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	61
Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	65
Kılcal Su Emme	69
28 ve 90 günlük kılcal su emme sonuçları	69
Yüksek sıcaklık sonrası kılcal su emme sonuçları	69
Yüksek sıcaklık + HCl etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları	71
Yüksek sıcaklık + Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları	72
Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları	73
Ağırlık Değişimi	74
Yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık değişimleri.....	74
Yüksek sıcaklık+HCl etkisi sonrası ağırlık değişimleri	75
Yüksek sıcaklık+ Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası ağırlık değişimleri.....	75
Yüksek sıcaklık+ NaCl etkisi sonrası ağırlık değişimleri.....	76
UPV	77
28 ve 90 günlük UPV sonuçları	77
Yüksek sıcaklık sonrası UPV sonuçları	78
Yüksek sıcaklık+HCl etkisi sonrası UPV sonuçları	78
Yüksek sıcaklık + Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası UPV sonuçlar.....	79
Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası UPV sonuçları	80
İç Yapı Analizleri.....	80
SEM analizi.....	81
XRD analizi.....	97
Yüksek sıcaklık sonrası XRD analizi sonuçları	97
FT-IR analizi	105
SONUÇLAR.....	117
KAYNAKÇA	119
ÖZGEÇMİŞ.....	135

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	29
Tablo 2. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri	30
Tablo 3. Sodyum Hidroksit Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	30
Tablo 4. Sodyum Silikat Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	31
Tablo 5. Akışkanlaştırıcı Katkı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	31
Tablo 6. HCl Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	33
Tablo 7. Na ₂ SO ₄ Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	34
Tablo 8. NaCl Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	35
Tablo 9. Agregaların Su Emme Oranı ve Özgül Ağırlık Değerleri	40
Tablo 10. Agregata Elek Analizi Sonucu	40
Tablo 11. Karışım Kodları	41
Tablo 12. Karışım Oranları	42
Tablo 13. Taze Beton Kıvam Deneyi Sonuçları	51
Tablo 14. 28 ve 90 Günlük Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi	69
Tablo 15. Yüksek Sıcaklık Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişim	70
Tablo 16. Yüksek Sıcaklık + HCl Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi.....	71
Tablo 17. Yüksek Sıcaklık+Na ₂ SO ₄ Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi	72
Tablo 18. Yüksek Sıcaklık + NaCl Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi.....	73
Tablo 19. Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri.....	74
Tablo 20. Yüksek Sıcaklık+HCl Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri.....	75
Tablo 21. Yüksek Sıcaklık+Na ₂ SO ₄ Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri.....	76
Tablo 22. Yüksek Sıcaklık+NaCl Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri	76
Tablo 23. 28 ve 90 Günlük UPV Değerleri	77
Tablo 24. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonrası UPV Değerleri	78
Tablo 25. Yüksek Sıcaklık + HCl Etkisi Sonrası UPV Değerleri	79
Tablo 26. Yüksek Sıcaklık + Na ₂ SO ₄ Etkisi Sonrası UPV Değerleri.....	79
Tablo 27. Yüksek Sıcaklık + NaCl Etkisi Sonrası UPV Değerleri	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Antik Roma'da geopolimer beton üretimi	3
Şekil 2. Polisialatların kimyasal yapı türleri	5
Şekil 3. Geopolimerizasyon süreci	6
Şekil 4. Geopolimerizasyon işlemi: (a)Çözünme ve yeniden düzenleme, (b) yoğunlaşma ve jel oluşumu, (c) polimerizasyon	6
Şekil 5. (a) Kür süresinin, (b) Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi	9
Şekil 6. Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS) esaslı geopolimer betonun ortam ve fırın kürü altında basınç dayanımı değişimi	10
Şekil 7. İki parçalı karışım yöntemiyle geopolimer beton üretimi.....	11
Şekil 8. Tek parçalı geopolimer numunelerinin hazırlanma süreci.....	12
Şekil 9. OPC, FA/GBFS ve FA/OPC betonlarının yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı	15
Şekil 10. Uçucu Kül esaslı geopolimer betonun SEM analizi	24
Şekil 11. NaOH ile aktive edilen geopolimer betonun XRD analizi.....	26
Şekil 12. NaOH+Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen geopolimer betonun XRD analizi	26
Şekil 13. Geopolimer ve normal betonun FT-IR spektrumları	28
Şekil 14. Uçucu kül	29
Şekil 15. Yüksek fırın cürufu	30
Şekil 16. (a) NaOH, (b) NaOH çözeltisi, (c) Na ₂ SiO ₃	30
Şekil 17. Akışkanlaştırıcı katkı	31
Şekil 18. (a) 0-4 mm agrega, (b) 4-8 mm agrega	32
Şekil 19. (a) Gres yağı, (b) Yağlanmış kalıplar.....	32
Şekil 20. Çalışmada kullanılan HCl	33
Şekil 21. Çalışmada kullanılan Na ₂ SO ₄	34
Şekil 22. Çalışmada kullanılan NaCl	35
Şekil 23. Elek takımı	36
Şekil 24. Laboratuvar mikseri	36
Şekil 25. Yayılma tablası	37
Şekil 26. Çelik kalıplar.....	37
Şekil 27. Etüv	38
Şekil 28. Yüksek sıcaklık fırını	38

Şekil 29. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık–zaman grafiği	39
Şekil 30. Basınç dayanım test cihazı	39
Şekil 31. UPV test cihazı.....	40
Şekil 32. Agrega granülometri eğrisi	41
Şekil 33. Geopolimer beton karışımının üretilmesi.....	43
Şekil 34. Geopolimer beton numuneler.....	43
Şekil 35. Numunelerin poşetlenmesi ve ısı kürü	44
Şekil 36. Geopolimer beton numuneler.....	44
Şekil 37. Taze beton kıvam deneyi	45
Şekil 38. Kılcal su emme deneyi	45
Şekil 39. Basınç dayanım deneyi	46
Şekil 40. Yüksek sıcaklık deneyi	47
Şekil 41. HCl etkisi deneyi.....	48
Şekil 42. Na ₂ SO ₄ etkisi deneyi.....	49
Şekil 43. NaCl etkisi deneyi	49
Şekil 44. 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları	52
Şekil 45. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı sonuçları	54
Şekil 46. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası numunelerin fiziksel görünümü.....	55
Şekil 47. Geopolimer betonun kırım sonrasında 28 günlük (a) ve 800 °C sonrası (b) fiziksel görünümü.....	56
Şekil 48. 200 °C- 400 °C + HCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	57
Şekil 49. 600 °C- 800 °C + HCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	58
Şekil 50. 200°C+ HCl ve 400°C+ HCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü	59
Şekil 51. 600°C+ HCl ve 800°C+ HCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü	60
Şekil 52. 200°C+HCl (a), 400°C+HCl (b), 600°C+HCl (c) ve 800°C+HCl (d)'ye maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri.....	61
Şekil 53. 200°C- 400°C + Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	61
Şekil 54. 600°C- 800°C + Na ₂ SO ₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	62
Şekil 55. 200°C+ Na ₂ SO ₄ ve 400°C+ Na ₂ SO ₄ sonrası numunelerin fiziksel görünümü.....	63
Şekil 56. 600°C+Na ₂ SO ₄ ve 800°C+ Na ₂ SO ₄ sonrası numunelerin fiziksel görünümü	64
Şekil 57. 200°C+Na ₂ SO ₄ (a), 400°C+Na ₂ SO ₄ (b), 600°C+Na ₂ SO ₄ (c) ve 800°C+ Na ₂ SO ₄ (d)'e maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri.....	65
Şekil 58. 200 °C- 400 °C + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	65
Şekil 59. 600 °C- 800 °C + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları	66
Şekil 60. 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü.....	67

Şekil 61. 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü.....	68
Şekil 62. 200°C+NaCl (a), 400°C+NaCl (b), 600°C+NaCl (c) ve 800°C+NaCl (d)'e maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri.....	69
Şekil 63. 400°C (a), 600°C (b) ve 800°C (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri.....	70
Şekil 64. 200°C+ HCl (a), 400°C+ HCl (b) ve 600°C+ HCl (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri	71
Şekil 65. 200°C+Na ₂ SO ₄ (a), 400°C+Na ₂ SO ₄ (b) ve 600°C+Na ₂ SO ₄ (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri.....	72
Şekil 66. 200°C+NaCl (a), 400°C+NaCl (b) ve 600°C+NaCl (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüler	74
Şekil 67. F-100 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri.....	82
Şekil 68. F-100 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüler.....	83
Şekil 69. FS-70 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri	84
Şekil 70. FS-70 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri	85
Şekil 71. FS-50 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri	87
Şekil 72. FS-50 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri	88
Şekil 73. F-100 200°C+HCl ve 400°C+HCl sonrası SEM görüntüleri	90
Şekil 74. F-100 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrası SEM görüntüleri	91
Şekil 75. FS-70 200°C+ Na ₂ SO ₄ ve 400°C+ Na ₂ SO ₄ sonrası SEM görüntüleri.....	93
Şekil 76. FS-70 600°C+ Na ₂ SO ₄ ve 800°C+ Na ₂ SO ₄ sonrası SEM görüntüleri.....	94
Şekil 77. FS-50 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrası SEM görüntüleri	96
Şekil 78. FS-50 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrası SEM görüntüler.....	97
Şekil 79. F-100 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları.....	99
Şekil 80. FS-70 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları	100
Şekil 81. FS-50 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları	101
Şekil 82. FS-100 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında XRD analiz sonuçları	102
Şekil 83. FS-70 200°C+ Na ₂ SO ₄ , 400°C+Na ₂ SO ₄ , 600°C+Na ₂ SO ₄ ve 800°C+Na ₂ SO ₄ sonrasında XRD analiz sonuçları	103
Şekil 84. FS-50 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında XRD analiz sonuçları	105
Şekil 85. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası F-100 numunesi FT-IR spektrumu	106

Şekil 86. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası FS-70 numunesi FT-IR spektrumu	108
Şekil 87. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası FS-50 numunesi FT-IR spektrumu	110
Şekil 88. (a) 200°C+HCl, (b) 400°C+HCl, (c) 600°C+HCl ve (d) 800°C+HCl sonrası F-100 numunesi FT-IR spektrumu	112
Şekil 89. (a) 200°C+Na ₂ SO ₄ , (b) 400°C+Na ₂ SO ₄ , (c) 600°C+Na ₂ SO ₄ ve (d) 800°C+Na ₂ SO ₄ sonrası FS-70 numunesi FT-IR spektrumu	114
Şekil 90. (a) 200°C+NaCl, (b) 400°C+NaCl, (c) 600°C+NaCl ve (d) 800°C+NaCl sonrası FS-50 numunesi FT-IR spektrumu	116



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

BA	: Birim Hacim Ağırlık
Ç/B	: Çözelti/Bağlayıcı Oranı
dk	: Dakika
F-100	: %100 UK
FS-50	: %50 UK+%50 YFC
FS-60	: %60 UK+%40 YFC
FS-70	: %70 UK+%30 YFC
FS-80	: %80 UK+%20 YFC
FT-IR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
HCl	: Hidroklorik Asit
M	: Molarite
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
NaCl	: Sodyum Klorür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
OPC	: Normal Portland Çimentosu
SAK	: Süper Akışkanlaştırıcı Katkı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UK	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrasonik Ses Hızı
XRD	: X- Işını Difraktometrisi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

GİRİŞ

Yapı sektörünün gelişmesi ve artan talep ve betonun sahip olduğu üstün mekanik özellikler, düşük maliyet, çok yönlülük, bakım ve onarım kolaylığı gibi avantajları nedeniyle önemi de artmıştır (Behera *et al.* 2014; Hongen *et al.* 2017). Ancak beton üretiminde kullanılan ve ana bileşen olan normal Portland çimentosunun (OPC) üretimi yüksek miktardaki karbondioksit (CO₂), toz salınımları ve enerji tüketimi gibi birçok negatif etkiye sahiptir (Behfarnia and Shahbaz 2018). Bu gibi negatif etkilerin neticesinde doğal kaynakların tükenmesi, küresel ısınma gibi birçok tehdit oluşmuş ve bu kapsamda özellikle dünyadaki kaynak materyallerin yaklaşık %40'ını kullanan yapı malzemeleri sektöründe sürdürülebilir ürünlerin kullanımı giderek önem kazanmıştır.

Bu farkındalığın oluşması ile daha sürdürülebilir bir beton üretimi için beton içerisindeki çimento miktarı veya çimento içerisindeki klinker oranını azaltmak amacıyla en çok kullanılan malzeme puzolanik özellikteki endüstriyel yan ürünlerdir. Bu kapsamda araştırılan ancak son yıllarda ön plana çıkan geopolimer bağlayıcıların önemi giderek artmaktadır.

Geopolimer bağlayıcılar YFC, UK, silis dumanı, volkanik kül, perlit, pomza veya metakaolin gibi doğal ya da atık malzemelerin alkali aktivatörler kullanılarak aktifleştirilmesi ile oluşur. Geopolimerler endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi sonucunda oluştukları için çevre dostu malzemelerdir. Üretimleri sırasında OPC üretimindeki gibi yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmadığı için enerji tasarrufu sağlanması ve CO₂ salınımını %80 oranında azaltması sebebiyle araştırmalara konu olmaktadır.

Yüksek puzolanik aktiviteye sahip UK ve YFC, alkali ile aktifleştirilmiş geopolimerleri üretmek için kullanılan en yaygın endüstriyel yan ürünlerdir (Yip *et al.* 2005; Luo *et al.* 2012; Xie and Özbakkaloğlu 2015).

UK, termik santrallerde taşkömürü veya linyit kömürünün yanması sonucu bacadan çıkan atık ürünlerin çeşitli yöntemlerle tutulmasıyla elde edilen, puzolan olarak kullanılabilen bir yan üründür. Puzolanik özellik göstermesinin sebebi silisli ve alüminli yapısıdır. UK gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu sonucu elde edilen harçlar, çimento harçlarına göre daha dayanıklıdır (Atiş vd 2015). UK esaslı geopolimer betonlar yapı uygulamaları için yeterli basınç dayanımına sahiptir. Ayrıca uçucu kül esaslı geopolimer betonların sülfat direnci de iyidir ve çok küçük büzülmelere uğrarlar (Rangan 2014).

YFC ise demir- çelik fabrikalarının fırınlarında meydana gelen amorf yapıya sahip SiO_2 ve Al_2O_3 içermesi sebebiyle puzolanik özellik gösterebilen bir atık malzemedir. Betonda kullanılan YFC, taze halde betonun işlenebilirliğini arttırmaktadır. YFC çimentoyla karşılaştırıldığında reaksiyonlara daha yavaş girdiği için betonun priz süresinin artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, sıcak havalarda beton dökümü sırasında avantaj sağlamaktadır. Soğuk hava etkisinde ise bu durum dezavantaja dönüşebilmektedir. Çünkü soğuk havada priz süresinin uzaması sebebiyle YFC kullanılarak yapılan betonlarda priz hızlandırıcı kullanılması gerekmektedir (Erdoğan 2003; Şahmaran vd 2009). Betonda YFC kullanımı dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. YFC'nin öğütülerek kullanılması, betonun porozitesini azaltır. Bu durumda rötre de azalacağı için betonun geçirimsizliği de azalmaktadır. Betonun geçirimsizliğinin azaltılması ile betona zararlı maddelerin girişi zorlaşacaktır bu durum da dayanıma olumlu yönde etki edecektir. (Arslan 2001). Betondaki etkileri bu şekilde olan YFC'nin geopolimer beton üretiminde de kullanımı oldukça yaygındır. YFC atık olarak elde edilmesi ve bu süreçte salınan CO_2 miktarının düşük olmasından dolayı son zamanlarda çimentoya alternatif bağlayıcı arayışında tercih edilen sürdürülebilir malzemelerden biridir (Kurtuluş 2019; Şeker 2019). Yapılan çalışmalarda geopolimer betonlarda da YFC'nin tek ya da başka bir puzolanik malzemeyle kullanımında yeterli dayanım sergilediği gözlemlenmiştir (Reddy et al. 2018; Guerrero et al. 2020).

Ayrıca yapay puzolanlardan olan YFC ve UK ile çimentosuz geopolimer beton üretimi ve bu betonların bozucu çevresel etkiler neticesinde mekanik ve durabilite özelliklerinde meydana gelen değişimler ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Ancak OPC'ye alternatif olan geopolimer bağlayıcılar ile üretilen betonların ardışık durabilite etkilerine dair kapsamlı ve farklı etkilerin birlikte değerlendirildiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu sebeple yapılacak olan bu çalışmada ardışık durabilite etkilerine maruz kalan YFC ve UK ile üretilen sertleşmiş geopolimer betonların dayanım, durabilite ve içyapı özelliklerindeki değişimin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda yapılacak deneysel çalışmalar neticesinde konuyla ilgili literatürdeki ilgili boşluğun doldurulması ve ileride oluşturulabilecek standartlara öncü olması hedeflenmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Geopolimerler

Geopolimerin tarihçesi ve tanımı

Geopolimer kelimesinden ilk defa Fransız bilim adamı Davidovits 1979 yıllarında bahsetmiştir (Davidovits 1989). Davidovits, seramiğe benzer özelliklere sahip çimentoya alternatif bir malzeme tanımlamak için geopolimer bağlayıcıyı geliştirmiştir (Maneand Jadhav 2012). 'Geopolimer' kelimesi, konsantre sulu silikat veya katı alümina silikat veya konsantre sulu alkali hidroksit ile katı alümina silikat arasındaki reaksiyon yoluyla oluşan sentetik alkali alümina silikatı ifade eder (Duxson *et al.* 2007). Davidovits geopolimer bağlayıcıları tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Geopolimerin kullanımının Antik Mısırda piramitlerin yapımına kadar gittiğini yaptığı çalışmalarda belirtmiştir. Piramitlerin yapımında kullanılan kalker taşlarının üretilmesi için boksit gibi alüminli bileşenler içeren Nil'in toprağının sodyum karbonatla Şekil 1'de görüldüğü gibi karıştırılmasıyla elde edilen betonla üretildiğini ifade etmiştir. Elde edilen bu betona geopolimer beton adını veren Davidovits günümüzde de kullanılabileceğine çalışmalarında değinmiştir. Davidovits geopolimer betonun mühendislik alanında kullanılmasına çalışmalarıyla yön vermiştir (Davidovits 1989). OPC'ye iyi bir alternatif olan geopolimer beton geçmişte tarihi anıtsal yapılarıyla, özellikle de kireçtaşının yenilikçi kullanımıyla bilinen eski Roma İmparatorluğu'ndan beri kullanılmıştır (Davidovits 2015).



Şekil 1. Antik Roma'da geopolimer beton üretimi

OPC ve çimento-kireçten sonra üçüncü nesil olarak kabul edilen geopolimer, OPC'nin zararlı çevresel etkilerine iyi bir alternatiftir (Singh *et al.* 2015). Dünya, 2050 yılına kadar başta CO₂ olmak üzere zararlı gaz emisyonlarını yaklaşık %50,80 oranında azaltmak için bazı adımlar atmaktadır (Bosoaga *et al.* 2009). OPC'ye göre daha yeşil daha sürdürülebilir ve çevreci bir alternatif olan geopolimer bağlayıcı büyük ilgi görmektedir (Nath and Sarker 2017).

Son yıllarda beklenen mekanik özellikler, maliyetin düşük olması, yangın direnci, bakım kolaylığı gibi avantajları sebebiyle inşaat malzemeleri içerisinde betona olan talep oldukça artmıştır (Behera *et al.* 2014; Hongen *et al.* 2017). Beton üretiminde en çok tercih edilen bağlayıcı çimentodur. Ancak çimento üretimi sırasında yüksek miktardaki CO₂ ve toz salınımları meydana gelmekle birlikte enerji tüketimi de oldukça fazladır. (Behfarnia and Shahbaz 2018). Bu gibi negatif etkilerin neticesinde doğal kaynakların tükenmesi ve küresel ısınma gibi birçok tehdit oluşmuş ve bu kapsamda özellikle dünyadaki kaynak materyallerin yaklaşık %40'ını kullanan yapı malzemeleri sektöründe sürdürülebilir ürünlerin kullanımı giderek önem kazanmıştır. Bu farkındalığın oluşması ile daha sürdürülebilir bir beton üretimi için beton içerisindeki çimento miktarı veya çimento içerisindeki klinker oranını azaltmak amacıyla en çok kullanılan materyaller puzolanik özellikteki endüstriyel yan ürünlerdir. Bu ürünlerin betonun nihai dayanımına katkısı oldukça yüksektir. Beton üretiminde Portland çimentosuna alternatif olan endüstriyel yan ürünler kullanılarak alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda araştırılan ancak son yıllarda ön plana çıkan geopolimer bağlayıcıların önemi giderek artmaktadır.

Geopolimerler ekonomikliği, sürdürülebilirliği ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun yerine %100 oranda endüstriyel yan ürünler kullanılarak üretilmesi sebebiyle araştırmacıların dikkatini çeken gözde ve yeni bir bağlayıcıdır (Juenger *et al.* 2011; Nath and Sarker 2014). Geopolimerleri atık ve doğal malzemelerin alkali aktivatörler ile aktive edilmesiyle oluşan alümina silikat tipi bağlayıcı malzemeler olarak tanımlayabiliriz. Geopolimerler doğal kayaç yapısıyla benzer özelliklere sahiptir (Akbulut vd 2021). Geopolimerlerin mekanik ve durabilite özellikleri yüksektir ve çevre dostu malzemeler olmaları nedeniyle çeşitli bilim adamlarının araştırmalarına konu olmuştur.

Bağlayıcı malzeme olarak normal portland çimentosu yerine endüstriyel yan ürünlerin ve jeolojik kökenli alüminosilikat malzemelerin kullanıldığı, çeşitli alkali aktivatörlerle aktive edilmesiyle bağlayıcı özellik kazandırılarak oluşturulan karışıma geopolimer beton denir (Davidovits 2008).

Geopolimerin Kimyası

Geopolimerler, alüminosilikat malzemelerin alkali aktivatör çözeltisinde çözünerek oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta geopolimerizasyonu sonucu amorf bir faz ve üç boyutlu polimerik zincir oluşturarak sentezlenir (Palomo *et al.* 1999; De Silva *et al.* 2007; Ren *et al.* 2017). Alüminosilikat minerallerinin, alkali koşullarda kimyasal reaksiyonu ile üç boyutlu bir polimerik zincir oluşturması geopolimerizasyon işlemidir (Duxson *et al.* 2007).

Geopolimerizasyon, alüminosilikat oksitlerin amorf veya yarı kristal olan üç boyutlu siliko-alüminat yapıları olan polimerik Si-O-Al bağları üretmek için Şekil 2’de kimyasal yapı türleri verilen, alkali poli-silikatlarla yaptığı kimyasal reaksiyonudur. Davidovits, çalışmasında geopolimerizasyonun yapı taşlarını açıklamak için Poli (Sialite) (-Si-O-Al-O-), Poli (Sialat-Silokso) (-Si-O-Al-O-Si-O-) ve Poli (Sialate-Disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) olarak üç ana model tanımlamıştır (Davidovits 1991).

Poly (sialate)

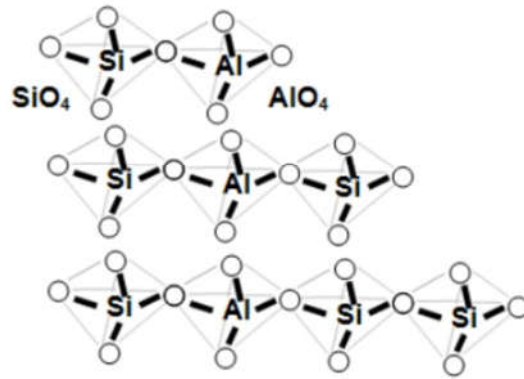
(-Si-O-Al-O-)

Poly (sialate-siloxo)

(-Si-O-Al-O-Si-O-)

Poly (sialate-disiloxo)

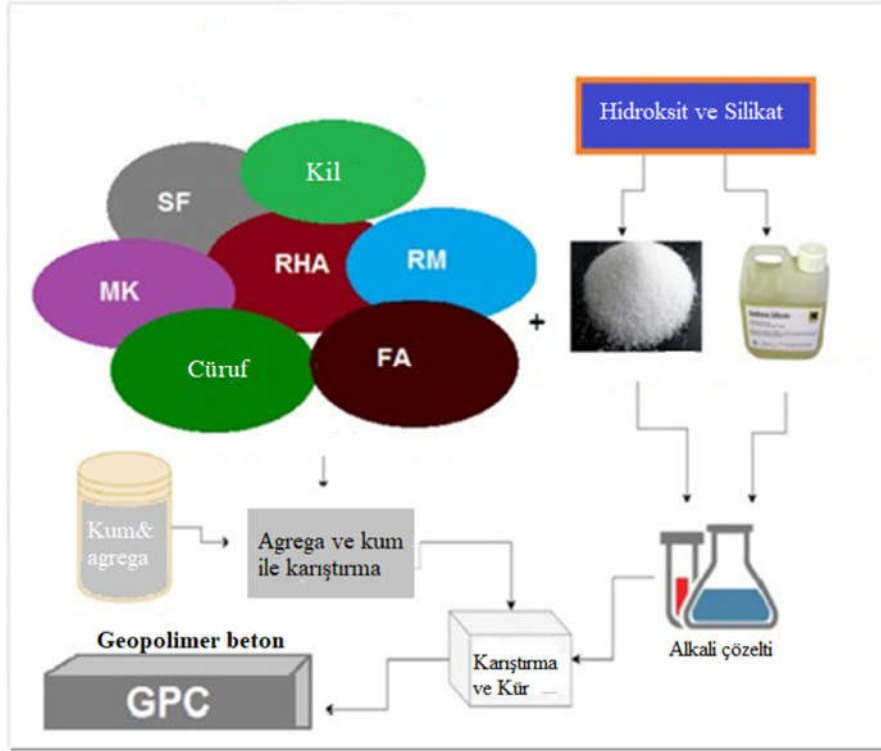
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



Şekil 2. Polisialatların kimyasal yapı türleri (Davidovits 1989, 1991)

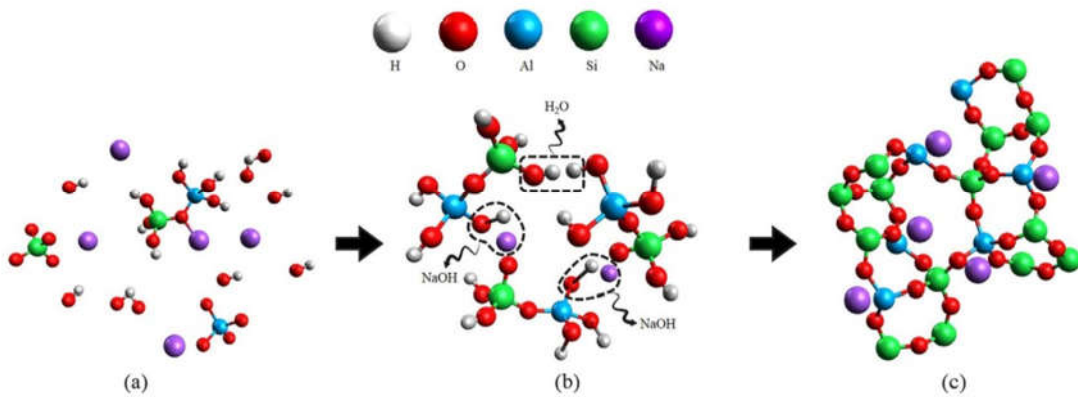
Literatürde araştırmacıların geopolimerizasyon esnasında oluşan reaksiyon mekanizmasıyla ilgili farklı fikirleri olmasına rağmen, birçoğu geopolimerizasyonun üç aşamadan oluştuğu fikrini desteklemektedir (Provis and Van Deventer 2007; De Silva *et al.* 2007; Prud’Homme *et al.* 2011; Ren *et al.* 2017).

Silikat ve alüminatın çözünmesini ve polimerizasyon reaksiyonunu içerisinde barındıran işleme geopolimerizasyon denir. Süreç Şekil 3’te gösterilmiştir. Geopolimerizasyon işlemi ekzotermik bir işlem olmakla beraber çözünme, yeniden yönlendirme ve katılma gibi bir seri aşamadan oluşur (Sing and Middendorf 2020).



Şekil 3. Geopolimerizasyon süreci

Geopolimerizasyon çözünme ve yeniden düzenleme, yoğunlaşma, polimerizasyon olarak üç aşamadan oluşur. Alüminosilikatın çözünmesi ve yeniden düzenlenmesi aşaması sonucunda birden fazla oligomer oluşur. Daha sonra oligomerlerin bağlanmasıyla Şekil 4’te görünen büyük polimerler oluşur. Oligomerlerin bağlanması sırasında uçlarındaki OH^- takımlarının buluşması sonucunda yapılarındaki bir oksijen atomunu (O) paylaşırlar ve suyu serbest bırakırlar (Xu and Van Deventer 1999).

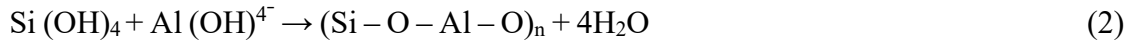
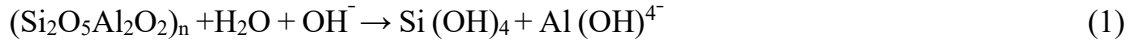


Şekil 4. Geopolimerizasyon işlemi: (a)Çözünme ve yeniden düzenleme, (b) yoğunlaşma ve jel oluşumu, (c) polimerizasyon

Birinci aşamada alüminosilikat malzemeler alkali çözelti içerisinde çözünerek silika ve alümina tetrahedrol oluşturur. İkinci aşamada malzemelerin transferi, katılaşması, geopolimer fazın oluşması için alümina ve silika hidroksilin yoğunlaşması gerçekleşirken hidroliz

reaksiyonu nedeniyle yapıdaki su dışarıya atılır. Son aşamada jel faz sertleşmeye devam ederken geopolimer üç boyutlu silikoalüminat ağı oluşturmak için yoğunlaşır (Zhang *et al.* 2012,2013; Prasanphan *et al.* 2019). İnorganik polimerlerden olan geopolimerlerin polimerizasyonu silika (Si)-alüminanın (Al) alkali koşullarda hızlı reaksiyonunu gerektirir. Reaksiyon sonucunda Si–O–Al–O bağının üç boyutlu polimerik zinciri oluşur (Ma *et al.* 2018).

Geopolimerizasyon işleminde meydana gelen reaksiyonlar denklem (1) ve (2)'de verilmiştir (Komnitsas 2011; Pawluczuk *et al.* 2021).



Normal çimentolardan farklı olarak geopolimerler, basınç dayanımı oluşturmak için silika, alümina ve yüksek alkali içeriğinin polikondenzasyonundan yararlanır (Davidovits 1991). Silika/alüminyum oranı geopolimer betonun mukavemeti ve mekanik performansını önemli ölçüde etkiler. Bu oran aslında alkali çözeltinin konsantrasyonu, bağlayıcı malzemenin kimyasal yapısı, kür sıcaklığı ve süresiyle bağlantılıdır (Fernández-Jiménez *et al.*, 2006). Geopolimerizasyon da hammaddelerin çözünmesi sıcaklıkla hızlandığı için kürleme sıcaklığı çok önemlidir. Geopolimerizasyonda yüksek sıcaklığın daha verimli olduğunu XRD modelindeki amorf faz pikinin sıcaklığın artmasıyla beraber daha hızlı açığa çıkmasından da anlayabiliriz (Zhang *et al.* 2018).Aktivatörler geopolimerizasyon için oldukça önemli olmakla beraber yüksek konsantrasyonlarının kullanımı düşük konsantrasyonlara nazaran alüminosilikat malzemelerde Si^{4+} ve Al^{3+} iyonlarının en yüksek çözünme hızına ulaşmasını sağlar (Zhang *et al.* 2012,2013; Prasanphan *et al.* 2019). Bağlayıcı olarak kullanılacak malzemenin kimyasal ve mineralojik yapısı, su içeriği, alkali çözeltinin konsantrasyonu ve kür sıcaklığı geopolimerizasyon süreci için ana faktörlerdir (Temuujin *et al.* 2009).Geopolimerizasyon sırasındaki alkali aktivasyon mekanizması belirsiz olsa da geopolimerizasyon sonucunda oluşan ürünler genelde karışımda kullanılan alkali aktivatörlerin kimyasal kombinasyonundan ve kaynak malzemelerden etkilenir (Duxson *et al.* 2007; Yip *et al.* 2008; Diaz *et al.* 2010).

Geopolimer betona aktivatör etkisi

Geopolimer beton üretiminde potasyum hidroksit, potasyum silikat, sodyum silikat, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır. Hidroksitin kullanıldığı karışımlarda reaksiyonlar, silikat ile hidroksitin birlikte kullanıldığı karışımların reaksiyonlarına göre daha yavaş meydana gelmektedir.

Bu yüzden deneyler sonrasında istenilen sonuç mukavemet ve dayanıklılık olduğunda, alkali aktivatör olarak en çok sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı tercih edilir. Sodyum silikatın hazırlanma sürecinde genellikle sodyum karbonat ve silika 1300-1400 °C arasındaki yüksek derecelerde kalsine edilir ve sonra suda çözülür (Van Jaarsveld *et al.* 2003; Cristelo *et al.* 2019; Altındal 2020).

Geopolimer betonda bağlayıcı malzemeden sonra önemli olan malzeme alkali aktivatör olduğu için geopolimerizasyon sürecinde aktivatörün çeşidi etkilidir. Çözeltideki silisli ve alüminli yapıların çökmesi ve kristalleşmesi aktivatörler sayesinde gerçekleşir (Khale and Chaudhary 2007).

Alüminosilikat malzemelerin (uçucu kül, cüruf vb.) aktifleştirilmesi için en etkili malzemeler alkali aktivatörlerdir. Hidroksitler, sülfatlar, karbonatlar ve silikatlar en çok kullanılan aktivatörlerdendir (Atiş vd 2015; Abdalqader *et al.* 2016; Askarian *et al.* 2019; Ma *et al.* 2020).

Sıvı haldeki alkali aktivatörlerden olan Na_2SiO_3 sıvı halde olduğu için karışıma direk eklenir. NaOH ise katı formdadır bu sebeple su ile reaksiyona girerek çözelti formuna getirilir. Bu reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olduğu için ısı açığa çıkarır. Bu sebeple çözelti soğutulup kullanılmalıdır (Kayacıklı 2020).

Komljenovic *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek dayanımı aktivatör olarak Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen numunelerden elde ettiğini belirtmiştir. Basınç dayanımı açısından Si/Al oranının da önemli olduğunu belirtmiştir.

Binici yaptığı çalışmada silis modülünün artmasının geopolimer betonun nihai dayanımını ve eğilme dayanımını arttırdığını belirtmiştir (Binici vd 2012).

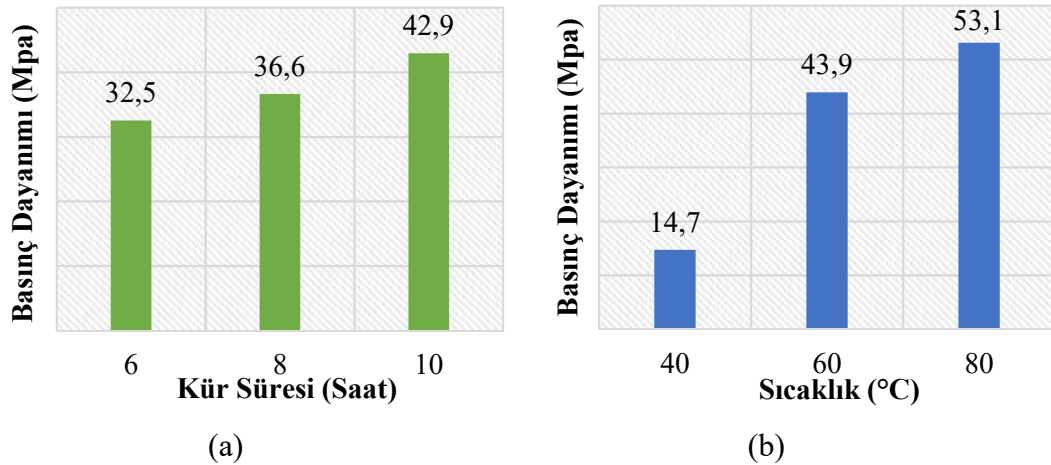
Geopolimer betonda kürleme

Geopolimer betonda kür işlemleri karışımın priz alması sırasında oluşacak olan numunelere uygulanan ısı, hava ve nem etkisini içerir. Kür işleminin geopolimer betonun özelliklerini etkilediği belirtilmiştir. Isı kürünün birçok çalışmada 20°C ile 100°C arasında ve 24 ile 72 saat arasında uygulanmasının geopolimerizasyonu olumlu etkilediği belirtilmiştir. Çalışma sonuçlarında, basınç dayanımının kür sıcaklığı ile arttığı görülmektedir. Fakat belli bir sıcaklıktan sonra uygulanan ısı kürünün etkisinin olmadığı da gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin yüksek sıcaklıklarda uygulanan kürün reaktiviteye yol açtığı olduğu da belirtilmiştir. Reaktivite hızlı prize sebep olur. Bu sınır sıcaklığı 100°C'yi aşmamaktadır (Altındal 2020).

Isı kürü alüminosilikat jelin geopolimerizasyonunu ve çözünmesini iyileştirdiği için ilk yaş dayanımlarının yüksek olmasını sağlar (Khater 2012).

Uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerinde oda sıcaklığında küremeye göre ısı kürü uygulanması durumunda basınç dayanım kazanma hızının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu sebeple uçucu kül kullanılarak üretilen numunelere ısı kürü uygulamak gerekir. Yüksek fırın cürufunda ise CaO içeriğinin fazla olması sebebiyle alkali aktivasyonu sonucu bağlayıcı özellik kazanması için 20°C sıcaklık yeterli olmaktadır. Kür sıcaklığının 60-100°C'ye çıkarılması durumunda ise birkaç saatte numuneler kalıplardan çıkarılacak duruma gelmektedir. Bu yüzden ısı kürü uygulanamayan durumlarda yüksek fırın cürufu ile uçucu kül birlikte kullanılır. Bu sayede üretilen geopolimer numuneler oda sıcaklığında dayanım kazanır (Binici vd 2012; Kayacaklı 2020).

Literatürdeki çalışmalarda uçucu kül kullanarak geopolimer beton üretilmiştir. Uçucu kül bazlı numunelerin ısı kürü ya da buhar kürü ile sertleştirilmesini tavsiye edilmiştir. Isı ile küreme yönteminin karışımında kimyasal reaksiyona olumlu etki ettiğini belirtilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda geopolimer betonda küreme ısı ve süresinin basınç dayanımını etkilediği tespit edilmiştir. Çalışmasında 60°C'de 24 saat kürlen numunelerde yeterli basınç dayanımını elde edilmiştir. Küreme sıcaklığının artırılması ve süresinin uzatılması konusunda da geopolimerizasyonu iyileştirdiği, basınç dayanımını da arttırdığını belirtilmiştir (Hardjito and Rangan 2004; Rao and Kumar 2020).



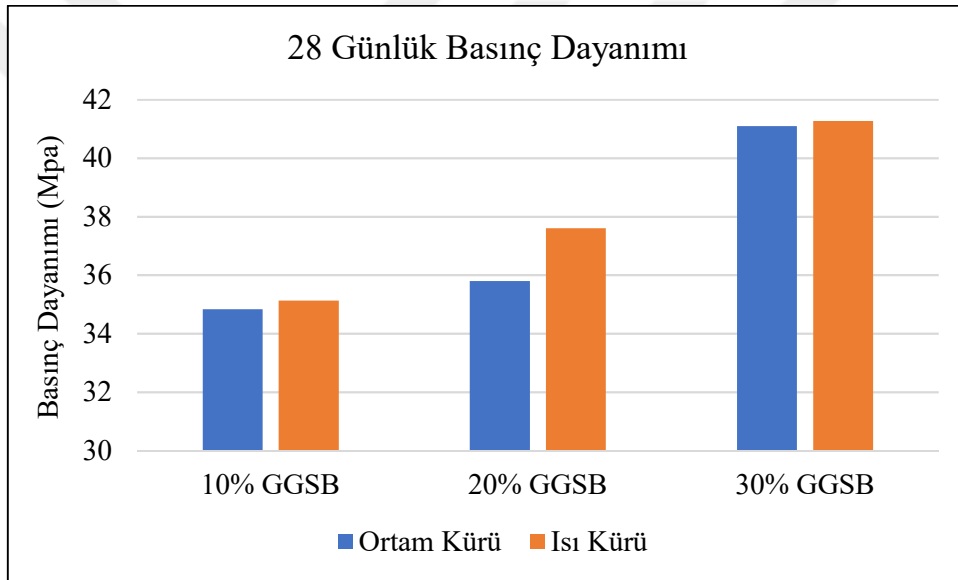
Şekil 5. (a) Kür süresinin, (b) Kür sıcaklığının basınç dayanımına etkisi (Kaplan *et al.* 2021)

Nath and Sarker (2014) yaptıkları çalışmada da ısı kürü uygulanan düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numunelerinin ilk yaş ve ileri yaşta yapılan deneylerde mekanik ve dayanıklılık açısından çok iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Van Deventer ve arkadaşları kür süresinin arttırılmasının geopolimerin dayanımını arttırdığını ve ısı ile kürlemenin erken yaş dayanımının gelişimini hızlandırdığını belirtmiştir (Van Deventer *et al.* 2010; Li *et al.* 2013).

Yüksek sıcaklıkta kürlenен geopolimer betonların ortam koşullarında kürlenene göre yüksek basınç dayanımı göstermesine rağmen ortam kürlemesinin uygulanması günlük kullanımda maliyet tasarrufu ve kolay uygulanabilme açısından daha uygun görülür (Fernández-Jiménez *et al.* 2008a; Metroke *et al.* 2010)

Poloju and Srinivasu (2021) yaptıkları çalışmada ısı ve ortam kürünün geopolimer betonun basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır (Şekil 6). Isı kürünün ortam kürüne göre daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ısı ile geopolimerizasyon reaksiyonunun daha erken gerçekleşmesi olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 1. Uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu (GGSB) esaslı geopolimer betonun ortam ve fırın kürü altında basınç dayanımı değişimi (Poloju and Srinivasu 2021)

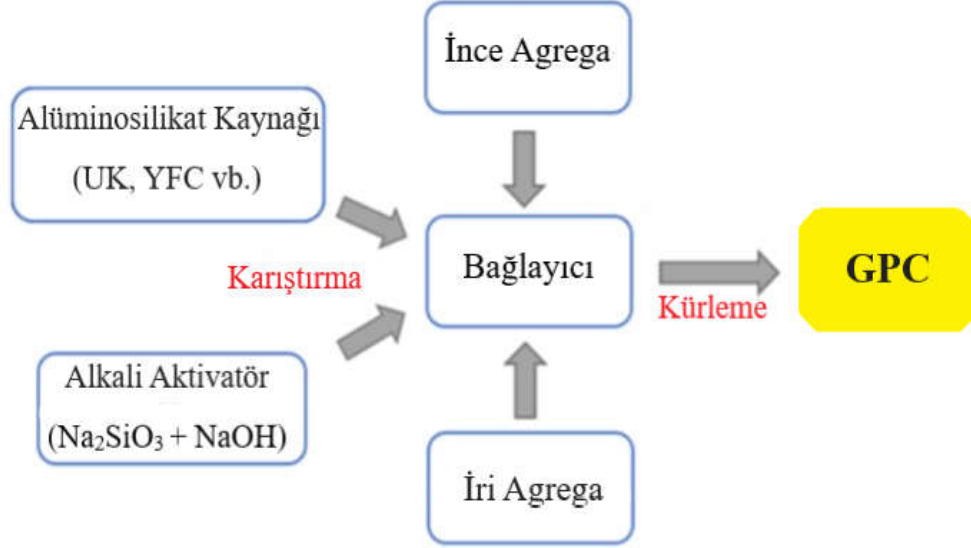
Karıştırma Yöntemleri

İki parçalı karıştırma yöntemi

Geopolimer betonun alümina-silika içeriği zengin kaynak malzeme (UK, YFC, Metakaolin vb.) ve alkali aktivatör çözeltileri (Na_2SiO_3 , NaOH vb.) olarak iki önemli bileşeni vardır (Hardjito *et al.* 2004; Chindaprasirt *et al.* 2007).

Alüminyum ve silikat bakımından zengin olan hammadde, bağlayıcı görevi gören alümina silikat jeli üretmek için alkali aktivatör çözeltisi ile reaksiyona girer (Allen *et al.* 2007; Ismail *et al.* 2014; Hamouda and Amiri 2014; Hassan *et al.* 2019).

İki parçalı karıştırma yöntemiyle üretilen geopolimerler tek parçalı karıştırma metoduyla üretilen geopolimerlere göre mesleki olarak sektörde kullanılmıştır. Avusturalya'daki Brisbane West Wellcamp Havaalanı tam ölçekli kullanıma örnek verilebilir (Glasby *et al.* 2015).



Şekil 7. İki parçalı karışım yöntemiyle geopolimer beton üretimi

İki parçalı geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatör çözeltileri, önceden suda çözünen katı aktivatör tarafından oluşturulur. Şekil 7’de görüldüğü gibi alüminosilikat kaynağı ve aktivatör çözeltiler öncelikle harmanlanarak sonrasında agrega eklenmektedir. Son on yılda, sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak geopolimer betonun kullanımının teşvik edilmesi için iki parçalı karıştırma metoduyla geopolimerler üretimi üzerinde kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Uçucu kül bazlı geopolimer betonun yüksek basınç dayanımına sahip olduğu, donatı ile aderansta iyi performans sergilediği ve yüksek sıcaklıklara karşı direncinin iyi olduğu sonucuna varılmıştır. (Sofi *et al.* 2007; Kong *et al.* 2007; Sarker 2011; Oliva and Nikraz 2012).

Geopolimer, geleneksel olarak katı öncüler ve sıvı bir alkali çözeltinin iki parçalı bir karışımıdır. Geopolimerin beton karışımında kullanılan NaOH pullarının suyla birleşiminde, çözeltinin sıcaklığını yükselten ekzotermik bir reaksiyon gerçekleşir. Ekzotermik reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ısı karışım sıcaklığını arttıracak için çözelti önceden hazırlanır ve karışıma eklenmeden ortam sıcaklığına kadar soğutulur (Zhang *et al.* 2016).

Geopolimer beton hazırlamada genellikle iki parçalı karıştırma metodu kullanılır (Luo *et al.* 2021). İki parçalı karıştırma metoduyla üretilen geopolimerlerde alkali aktivatörler (Na_2SiO_3 , NaOH, Na_2CO_3 , Na_2SO_4) çözelti halinde, alüminosilikat kaynağı malzeme toz halde karışıma eklenir (Duxson *et al.* 2007; Provis *et al.* 2009,2014; Provis 2009, 2014). Alüminosilikat kaynağı malzeme genellikle alümina ve silika öncüllerini elde etmek için alkali

çözeltisi ile karıştırılır. Alkali çözelti ile temas ettiğinde silikat türlerinin çözünmesi başlar (Comrie and Kriven 2004).

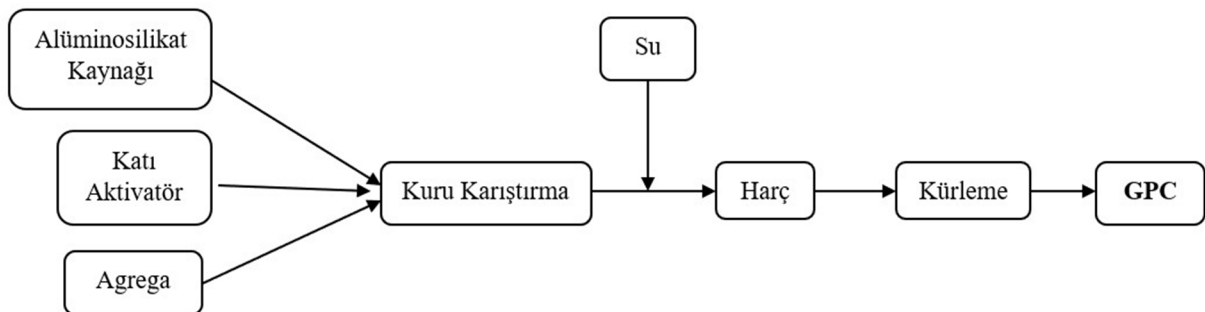
Alüminosilikat kaynaklı geopolimer betonlar son yıllarda çevreci olması ve maliyetin düşük olması açısından çok dikkat çekmektedir. Fakat büyük miktarda aşındırıcı ve viskoz alkali çözeltilerin nakliyesi, depolanması ve prefabrikasyonunun zor olması sebebiyle şimdiye kadar geopolimer betonun sektörde kullanılması küçük ölçekli uygulamalarda sınırlı kalmıştır. İnşaat sektöründe büyük ölçekte geopolimer beton kullanımı için normal betona benzeyen bir karıştırma yöntemi olan tek parçalı karıştırma metodu denenmiş veya ‘sadece su ilaveli’ bir geopolimer beton geliştirilmiştir. Tek parçalı karıştırma yönteminde alkin aktivatör ve alüminosilikat kaynağı malzeme önceden kuru olarak karıştırılır ve su daha sonra eklenir. Fakat katı alüminosilikat içeren malzeme ve katı alkali aktivatör tamamen çözülemez ve kısa bir sürede alüminosilikat ile reaksiyon gerçekleşir. Bu sebeple tek parçalı karışım metoduyla üretilen geopolimer betonların mekanik özellikleri iki parçalı karıştırma metoduyla üretilen geopolimer beton kadar iyi olmayabilir (Zhang *et al.* 2021).

Tek parçalı karıştırma yöntemi

Tek parçalı karıştırma yönteminde bağlayıcı, katı aktivatör ve agregalar karıştırılır ve ardından su eklenir. Şekil 8’de görüldüğü gibi tek parçalı karıştırma yöntemi bu bakımdan çimento esaslı bir beton üretirken kullanılan karıştırma yöntemine benzerlik gösterir (Alzaza *et al.* 2021).

Tek parçalı karıştırma yönteminde alkali aktivatör toz halde katılıp sonra su eklendiğinde suyun bir bölümü kuru karışım tarafından emilir. Bu sebeple çözelti halinde eklenen alkali aktivatöre göre kuru karışımındaki alkali aktivatörün çözünmesi daha zordur ve daha yavaş gerçekleşir. Bunun sonucunda bu yöntemle üretilen geopolimer betonlarda erken yaş mukavemeti ve işlenebilirliğin düşük olduğu gözlemlenir (Zhang *et al.* 2021).

İşlenebilirlik bakımında karşılaştırıldığında tek parçalı karıştırma yöntemin de işlenebilirlik %35 daha düşüktür (Nematullahi *et al.* 2015).



Şekil 8. Tek parçalı geopolimer numunelerinin hazırlanma süreci

Suyun eklenmesinden sonra özellikle sodyum silikat ve sodyum hidroksit gibi katı alkali aktivatörler ekzotermik bir reaksiyon gerçekleştirir ve geopolimerizasyon reaksiyonu da bu sırada gerçekleştiği için reaksiyonun sıcaklığının artmasına sebep olurlar bu da prizi hızlandırır ve işlenebilirliği düşürür. Bu durum gerçek hayatta kullanımını kısıtlanacaktır (Luukkonen *et al.* 2018; Almakhadmeh and Soliman 2021; Alzaza *et al.* 2021).

Su ile Katı alkali aktivatörlerin temasından dolayı oluşacak olan ısıyı ve sonuçta hızlı prizi engellemek için priz geciktirici katkı kullanılması önerilmektedir (Suwan *et al.* 2017).

Tek parçalı karışım yönteminin kullanımının avantajı sıfırın altındaki sıcaklıklarda döküm gerçekleştirirken düşük sıcaklığın prizi geciktirebilmesi sebebiyle karıştırma ve kürlemenin zorluğunu bir derece kolaylaştırabilmesidir (Gu *et al.* 2015; Wang *et al.* 2017).

Yüksek Sıcaklık Etkisi

Betonun durabilitesi ve dayanıklılığı değerlendirilirken betonun yüksek sıcaklıklardaki performansı dikkate alındığında normal portland çimentolu betonun mekanik özelliklerinin düştüğü ve bu durumun bağlayıcı ile agrega arasındaki ara yüzeyde aderansın düşmesine neden olduğu belirtilmiştir (Khoury 1992).

Bir beton yapı sürekli yangına maruz kaldığı zaman, betonda dökülmeler ve yapısal hasar meydana gelir. Portland çimentosunun bağlayıcı malzeme olarak kullanılması bu davranışta etkilidir. Geopolimer bağlayıcıların geopolimerizasyon reaksiyonu sonucunda C_3A ve $Ca(OH)_2$ bileşenleri oluşmadığı için geopolimer betonların durabilite özelliklerinin normal portland çimentosuyla üretilen betondan daha iyi olduğu gözlenir. Ayrıca geopolimer betonlar durabilite etkilerinden olan yüksek sıcaklık etkisine de dayanıklıdır. (Barbosa and MacKenzie 2003; Bakharev 2006; Krivenko and Kovalchuk 2007; Fernández-Jiménez *et al.* 2008b; Fernández-Jiménez *et al.* 2010; Xu *et al.* 2010; Rickard *et al.* 2012; Altındal 2020).

Uçucu kül bazlı geopolimer betonun yüksek sıcaklık etkisi sonrasında normal betona göre basınç dayanımı daha yüksektir. Behfarnia and Shahbaz (2018) tarafından yapılan çalışmada 800°C'lik yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan uçucu kül içeren geopolimer betonun basınç dayanımının normal betona göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Toprak yaptığı çalışmada geopolimer betonların 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı olduğunu belirtmiştir (Topçu ve Toprak 2009).

Rashad and Zeedan (2011) çalışmalarında sodyum silikat ile aktive edilen uçucu küllü harçların farklı sıcaklıklarda basınç dayanımı değişimini incelemişler ve 200°C ile 1000°C arasındaki yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak normal portland çimentosu kullanılarak üretilen beton ile karşılaştırmışlardır. 28 günlük numunelerin bir kısmını 2 saatte 200°C'den 1000°C'ye

çıkacak şekilde termal şoka maruz bırakmışlardır. Deneyler sonucunda sodyum silikat ile aktive edilen uçucu küllü harçların normal portland çimentosuna göre yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

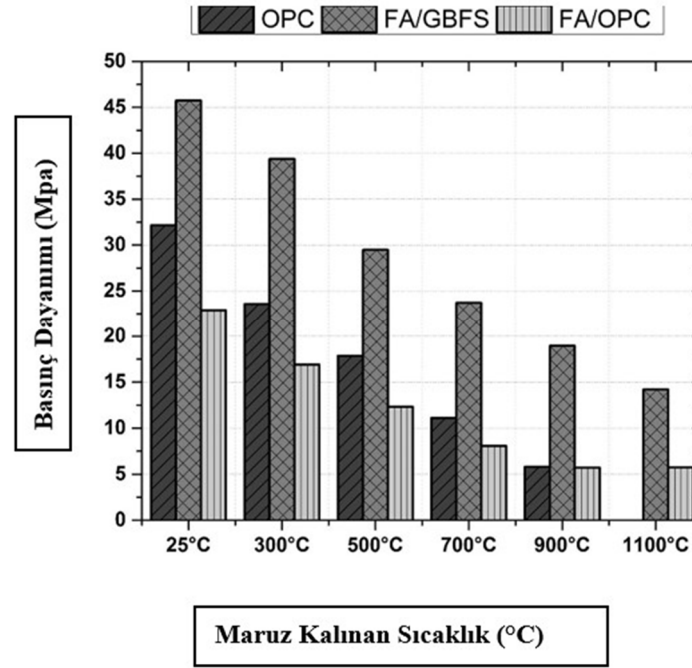
Li *et al.* (2004) yaptıkları çalışmada, geopolimerlerin 1200°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda önemli bir zarar görmeden dayanabildiğini ve düşük ısı iletkenliği gösterdiğini belirtmiştir.

Abdel-Ghani *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer numuneler üreterek numunelerin 500°C'deki davranışını incelemişler ve sonuçta basınç dayanımının büyük ölçüde korunduğunu gözlemlemişlerdir.

Saxena *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kalsine kil ile geopolimer numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Sonuçta uçucu kül ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık direncinin diğer geopolimerlere göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Rashad (2015) çalışmasında betonun 500°C ile 600°C sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonraki dayanım kaybının agreganın genleşmesi sırasında hamur fazının su kaybı sebebiyle büzülmesi sonucunda, agregalar ile bağlayıcı hamur arasında bulunan tabakadaki kusurlardan kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Zhang *et al.* (2019) tarafından yapılan çalışmada geopolimer betonun farklı yüksek sıcaklıklardaki dayanım değişimi incelenmiştir. Sonuç olarak 700°C'de geopolimer betonların normal betonlar gibi parçalanmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca geopolimer betonların 500°C'de içyapılarının önemli oranda değiştiği ve sinterleşmenin olduğu ifade edilmiştir



Şekil 9. OPC, FA/GBFS ve FA/OPC betonlarının yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı (Saavedra and de Gutiérrez 2017)

Yüksek sıcaklık etkisinde bağlayıcı fazdaki dehidrasyon sonucunda matris yapısında çatlak gibi fiziksel değişimlerin yanında gözenekli bir yapının oluşması ve numunelerde renk değişimleri de gözlemlenir. Ayrıca Şekil 9'da görüldüğü gibi dayanım değerleri sıcaklık artışıyla azalmıştır ve bu durum yüksek sıcaklık sonrası yapıda gözlemlenen mekanik etkilerdendir. (Saavedra and de Gutiérrez 2017).

Shaikh and Vimonsatit (2015) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanılarak oluşturulan geopolimer betonların renk değişikliğini, yüksek sıcaklık etkisiyle demir oksit içeren uçucu küldeki demirin oksidasyonu ile ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca renk değişiminin 1100°C'de siyahtan kırmızıya doğru gerçekleştiğini belirtmişlerdir. 500°C'den itibaren renk değişimiyle beraber çatlaklarında arttığı ve bu çatlakların agregalar ve matris fazı arasındaki sıcaklık farkı sebebiyle meydana geldiği belirtilmiştir.

Zhao and Sanjayan (2011) uçucu kül ile ürettikleri geopolimer numunelerini, 850°C sıcaklığa maruz bırakmış ve numunelerin parçalanmadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, normal Portland çimentosu ile aynı basınç dayanımı değerine sahip geopolimer beton numunelerin yüksek sıcaklık etkisine daha dirençli olduğunu bildirmişlerdir.

Asit Etkisi

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün birlikte kullanıldığı hibrit geopolimer betonların asit çözeltilerinde yüksek dayanım sergilediği görülmektedir. Ayrıca portland çimentolu normal betonla kıyaslandığında

da alkali ile aktive edilmiş karışımların daha yüksek dayanım gösterdiği belirlenmiştir. (Valencia-Saavedra *et al.* 2020; Ren *et al.* 2020).

Alkali ile aktive edilmiş betonlar arasında uçucu kül bazlı betonların, normal betonların hassas olduğu asit ortamlarında umut verici sonuçlarla dayanıklılık gösterdiği 1996'dan beri araştırılmaktadır (Başçarşıcı 2015).

Mallikarjuna and Kireety (2019) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve GGBS kullanarak ürettikleri üretilen harçları sülfürik ve nitrik asit çözeltilerine maruz bırakılmasını incelemişlerdir. %100 uçucu külün kullanıldığı harçların dayanımının GGBS içeren harçlara göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

Asit etkisi neticesinde genel olarak betonun fiziksel (görünümü, ağırlık değişimi gibi) ve mekanik (dayanım kaybı gibi) özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir (Fernández-Jiménez *et al.* 2007).

Geopolimer betonlar yoğun jel katmanlarına sahip oldukları için portland çimentosu içeren geleneksel betona göre daha düşük geçirgenliğe sahiptir. Literatür incelendiğinde dayanıklılık özellikleri bakımından, cüruf ve uçucu külün birlikte kullanıldığı geopolimer betonların düşük geçirgenliğe sahip olduğu ayrıca cüruf miktarının artmasıyla durabilite etkilerinin neticesinde meydana gelen bozulmaların azaldığı görülmektedir (Nath and Sarker 2014).

Geopolimer numunelerde asit etkisiyle meydana gelen dayanım kaybı alüminosilikat yapının asit etkisi sonrası kırılmasıyla oluşmaktadır. Asit ortamında geopolimer bağlayıcıların bozulması Si-O-Al bağlarının kırılması ile Si-OH ve Al-OH bağlarının sayısının artması ve geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artması sonucu meydana gelmektedir (Djobo *et al.* 2016).

Geopolimer beton asit derişimi %3'ten daha az olan çözeltilerde çok düşük kütle kaybına uğrar. %5 sülfürik asit çözeltilisine maruz kalan F sınıfı uçucu külden yapılan geopolimer en iyi performansı sergilemiştir ve %1,96 kadar ağırlık kaybına uğramıştır. %5 sülfürik aside batırılmış geopolimerin en iyi performansı göstermesinin sebebinin stabil çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısı olduğu düşünülmektedir (Song *et al.* 2005; Bakharev 2005).

Ariffin *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül ve palmye yağı külü kullanılarak üretilen geopolimer betonlar 18 ay süreyle %2 sülfürik aside maruz bırakılmış ve numunelerin basınç dayanımı ve kütle değişimi araştırılmıştır. Sonuçta portland çimentolu kontrol numunelerinin kütle kaybı %20 iken, uçucu küllü geopolimer betonların kütle kaybı %8

olarak bulunmuştur. Basınç dayanım kaybı geopolimer betonunda %35 olurken, kontrol betonunda oran %68 olarak tespit edilmiştir.

Koenig *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve GBFS ile üretilen geopolimer numunelerin organik asit karışımı karşısındaki direncini incelemiştir. Asit çözeltisi içerisinde %1,5 asetik asit, %3,0 laktik asit ve %0,5 propiyonik asit bulunmaktadır. 18 haftalık bir maruz kalma sürecinden sonra normal betona göre geopolimer betonun daha iyi asit direncine sahip olduğu saptanmıştır. Ayrıca bağlayıcının CaO oranının artmasının asit direncinin azalmasına sebep olduğu belirtilmiştir.

Goyal *et al.* (2009) gerçekleştirecek olan asit saldırısının asidin türüne ve sonuçta oluşacak kalsiyum tuzunun çözünürlüğüyle alakalı olduğunu belirtmiştir. Reaksiyon ürünlerinin reaksiyona giren malzemelere göre stabilitesinin daha düşük olabileceğini ifade etmişlerdir. Malzemelerin yapılarında bulunan boşlukların ilk maruz kalma süresinde işgal edilmesi ağırlığın artmasına sebep olabilir. Yapılan çalışmada uçucu kül ve GBFS kullanılarak üretilen geopolimer betonun ağırlık kaybının 90 gün sonunda %3 civarında, normal betonun ağırlık kaybının ise %9,45 civarında olduğu belirtilmiştir.

Normal betonların mekanik özellikleri ve dayanımı iyi düzeydedir. Fakat yapılan araştırmalara göre durabilite özelliklerine (asit etkisi, sülfat etkisi, yüksek sıcaklık ve çevre koşulları) karşı dayanımı düşüktür. Davidovits ve birçok araştırmacı sülfürik asite ve hidroklorik asite maruz bırakılan normal portland çimentolu betondaki ağırlık değişiminin %78 civarında geopolimer betonda ise %6 civarında olduğunu belirtmişlerdir (Davidovits *et al.* 1990).

Keklik yaptığı çalışmada farklı oranlarda uçucu kül, cüruf, silis dumanı kullanarak geopolimer beton numuneler üretmiştir. 28 gün laboratuvar küründen sonra 92 gün sülfürik asitte bekletilen numunelerdeki basınç mukavemetindeki azalma karşılaştırıldığında cüruf miktarının fazla olduğu numunelerde daha minimum seviyede azalma olduğu gözlemlenmiştir. Geopolimer beton numunelerde meydana gelen yüzey bozulmaların da en az olduğu numuneler yine cüruf miktarının fazla olduğu numunelerdir. En fazla bozulma ise uçucu kül miktarının fazla olduğu numunelerde gözlenmiştir. Bunun sebebinin geopolimerizasyona uğramamış olan uçucu kül parçacıklarından kaynaklandığını belirtmiştir. Bu bozulmanın zaman geçtikçe arttığı da gözlemlenmiştir. Ağırlık azalmaları karşılaştırıldığında da yine cüruf miktarının fazla olduğu numunelerde azalmanın az olduğu gözlemlenmiştir (Keklik 2020).

Bakharev *et al.* (2003) çalışmada yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer beton numuneler üretmiştir ve farklı sürelerde asite maruz bırakmıştır. Sonuçları incelediğinde süre artmasıyla betonlarda basınç dayanımında düşüş olduğunu gözlemlemiştir. Sülfürik asitin

uygulandığı geopolimer beton numunelerinde normal beton numunelerine göre yüzey değişiminin daha az olduğunu gözlemlemiştir. Diğer asitlerden hidroklorik ve nitrike maruz kalan numunelerde yüzey değişiminin daha minimum düzde olduğunu belirtmiştir.

Kurtoğlu et al. (2018) uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton, Portland çimentosu kullanarak normal beton üretmişlerdir. Beton numuneler sülfürik asit, magnezyum sülfat, deniz suyuna maruz bırakılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde fiziksel ve kimyasal olarak asidin diğer durabilite etkilerine göre normal betona ve geopolimer betona en çok zarar veren etki olduğu belirlenmiştir. Durabilite açısından en iyi performansı yüksek fırın cürufu geopolimer beton vermiştir en kötü performansı ise normal beton vermiştir.

Sülfat Etkisi

Sülfat saldırıları köprüler, iskeleler, beton borular, temeller vb. sülfat etkisine maruz kalan birçok mühendislik yapılarının genişmesine, çatlamasına ve bozulmasına yol açmaktadır. Sülfat iyonları yapıya topraktan, yeraltı suyundan ve deniz suyundan ulaşır ve sodyum, magnezyum, kalsiyum ve potasyum iyonları gibi diğer iyonlarla kombinasyon halinde bulunurlar (Al-Akhras 2006).

Betonun çatlaklarından su ile sızan kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat, sodyum sülfat gibi sülfatlar yeraltı sularında, killi ve cürufu doldurulmuş arazilerde fazlasıyla bulunmaktadır. Bunun yanında deniz sularında yüksek miktarda sülfat içerdiği belirtilmiştir. Sülfatın betona sızması sonucunda kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir ve betonda çatlamalar, yumuşamalar ve pul pul kopmalar gözlemlenir (Erdoğan 2003).

Sülfat saldırısı sonunda etrejit ve alçıtaşı oluşur. Bu ürünler yapılarda genişmeye, çatlak oluşumuna, bozulmalara ve parçalanmalara sebep olur. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan sonra, sülfat saldırılarından dolayı süzülen kalsiyum bileşiği, kalsiyum silika hidrate (C-S-H) jelinin bozulmasına neden olmaktadır (Al-Akhras 2006; Bulatović et al. 2017).

Betona iç ve dış etkilere kaynaklanan sülfat girişi sertleşmiş betonda hacim artışına sebep olur. Hacmin artması betonda çatlakların oluşmasına ve dolayısıyla oluşan çatlakların betonun geçirirliliğinin artmasına sebep olur. Bu da çevreden betona daha fazla zararlı madde girişini kolaylaştırır. Sonuçta betonun dayanımı ve ömrü azalır (Ustabaş 2008).

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda erken dayanımının yüksek olması, çevre dostu olması ve sülfata karşı dirençli olması sebebiyle geopolimerler araştırmalara konu olmaktadır. Kalsiyum silika hidrat esaslı değil de alümina esaslı olmaları, geopolimerlerin (uçucu kül, cüruf, silis dumanı vb.) asit ve sülfata karşı dirençli olabilmesinin sebebidir (Thokchom et al. 2009).

Bakharev *et al.* (2002) yaptıkları deneysel çalışmada yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer numuneler üretmişler ve numunelerin sülfat direncinin pozitif yönde sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer betonlarda sülfat etkisinden sonra basınç dayanımı sonuçları dikkate alındığında %23 oranında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bir araştırmada da sodyum sülfata maruz bırakılan geopolimer beton numunelerde yaklaşık bir yıl boyunca yüzeylerinde etkili bir bozulma ya da çatlama görülmemiş ve basınç dayanım değerleri ise hemen hemen değişmediği gözlemlemiştir. Sonuçta beton içerisinde bağlayıcı malzeme olarak portland imentosu yerine geopolimerlerin kullanılması betonun geçirimsizliğini ve dayanımını olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır (Kayacıklı 2020).

Geopolimerlerde alkali silika reaksiyonunun oluşmaması sodyum sülfat ve asitlere karşı daha yüksek dayanıklılık sergilemelerini sağlar. Çalışmada prefabrik üretiminde atık su borularının geopolimer ve normal betondan yapılması karşılaştırılmıştır. Aşınma deneylerinin sonucunda geopolimer betonun 900 yıl, normal betonun ise 50 yıl sülfat etkisine dayanabileceği belirtilmiştir. Araştırmada klor difüzyonu, karbonatlaşma, alkali oluşumu deneyleri de yapılmıştır ve sonuçta yine kalsiyum alümina hidratin geopolimerlerde olmayışı daha dayanıklı olmasını sağlamıştır (Arıöz vd 2009)

zcan (2018) yaptığı çalışmada farklı oranlarda ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton numuneler üretmiştir. Kr süresini tamamlayan numuneler %5 konsantrasyonlu magnezyum sülfat ve sodyum sülfata 12 hafta maruz bırakılmıştır. İki sülfat türü de geopolimer betonda dayanım düşüşüne sebep olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde sodyum sülfat çözeltisi magnezyum sülfat çözeltisine göre numuneleri dayanım anlamında daha olumsuz etkilemiştir. Ayrıca numune gruplarında yüksek fırın cürufunun artmasıyla basınç dayanımındaki azalmadaki artış olduğu çalışmada belirtilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi UPV testi sonuçlarına göre de sodyum sülfata maruz kalan numunelerde UPV değerlerinin azalma oranı daha yüksektir.

Trkme vd (2016) alışmalarında ferrokrom cürufu kullanarak geopolimer beton numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri farklı konsantrasyonlarda (%3, %5, %7), 24 saat sülfata maruz bırakıp betona etkisini incelemişlerdir. Sonuçta artan sülfat konsantrasyonu ile betonun basınç dayanımının azaldığı ve ağırlık artışı olduğu gözlemlemiştir.

Nnaemeka and Sing (2020) alışmalarında uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer beton numunelere farklı oranlarda kaolin ekleyerek numuneler üzerindeki mekanik ve

durabilite değişimlerini incelemişlerdir. 28 gün kürlenen numuneler 90 gün %5 sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sonuçta kaolin oranının artmasıyla sülfat direncinin arttığı ve dayanım kaybının azaldığı belirlenmiştir.

Gopalakrishnan and Chinnaraju (2019) alışmalarında yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer beton karışımlarına farklı oranlarda uçucu kül katarak numuneler üretmişlerdir. Üretilen numuneler 180 gün süre ile %5 konsantrasyonlu magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisinden önceki basınç dayanımlarında yüksek fırın cürufu oranının fazla olduğu karışım en yüksek basınç dayanımı sonucunu vermiştir. Sülfata etkisinden 180 gün sonra numunelerin basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanımını yine yüksek fırın cürufu oranının fazla olduğu karışım grubu vermiştir. En düşük basınç dayanımını ise uçucu kül oranının fazla olduğu karışım vermiştir. Sülfat etkisinden sonra ağırlık kayıpları incelendiğinde uçucu kül oranının artmasıyla ağırlık kaybının da arttığı gözlemlenmiştir.

Uğurlu (2020) yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton numuneleri üretmiştir. Üretilen numunelere 12 hafta boyunca sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Numunelerin 4,8 ve 12 haftalık sürelerle basınç dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçlarında sülfat çözeltilerinde bekletilme sürelerinin artmasıyla basınç dayanımlarının azaldığı, kılcal geçirimlilik katsayılarının ve su emme yüzdelerinin arttığı belirtilmiştir.

Tuz Etkisi

Nguyen and řkvára (2016), uçucu kül esaslı geopolimer beton üretmiş ve bu betonları pH değeri 1 ve 2 olan HCl çözeltilerine, pH değeri 12, 13 ve 14 olan NaOH çözeltilerine ve pH değeri 7 olan suya maruz bırakmışlardır. Sonuçta geopolimer harçların kimyasal kompozisyonu ve yapısı değişmiş ve numuneler yüksek pH ortamında kaldıkları zaman Si-O-Si bağının bozulması sebebiyle basınç dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Ancak yeni oluşan Al-O-Si bağları ile bu dayanım düşüşünün hızının zamanla yavaşladığı düşünülmektedir.

Beton yüzeyi %3 tuz çözeltisine maruz bırakıldığında, yüzeydeki pul pul dökülme suya maruz kaldığından daha yüksektir. Tuz zeltisi beton gözeneklerine dolarak donma noktasını düşürerek hidrolik basına yol açar (Setzer 1974; Kaufmann 2004).

Albitar *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül esaslı ve uçucu kül + ğtlmş kurşun izabe cürufu esaslı geopolimer beton numuneler üretmişlerdir. Üretilen numuneler 9 ay %5 NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sonuçta numunelerin basınç

dayanımlarındaki kayıplar yaklaşık olarak %5 iken ağırlık kayıpları ise sırasıyla %1,8 ve %1'dir.

Çözünmüş haldeki tuzlar beton boşluklarına girer ve bu tuz yoğunluğu %4-5 sınırına ulaştığında kristalleşme gözlenir. Bu kristalleşme genleşmeye sebep olabilir. Beton bünyesinde bulunana bu tuzların zararlı etkileri vardır. Tuzlar hidroskopik karakterli olduğu için betonun suya doyma derecesi artar. Boşluklarda meydana gelen ozmotik basınç tuzun eşit oranda dağılmaması sebebiyle artar. Beton bünyesinde kristaller oluşturur (Yalçın ve Gürü 2006).

Peiwei *et al.* (2001) çalışmalarında portland çimentolu beton numunelerine iki farklı oranlarda fosforik cüruf tozu eklemiş ve yüksek performanslı beton elde etmiştir. Elde ettiği numunelerin dayanım ve durabilitesini incelemiştir. Numunelere 14 gün su kürü uygulandıktan sonra %5 konsantrasyonlu sodyum klorür çözeltisinde 90 ve 180 gün maruz bırakılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre en yüksek basınç dayanımı sırasıyla %30, %50 ve %0 cüruf tozu kullanılan numunelerden elde edilmiştir.

Yıldırım (2007) yaptığı çalışmada bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılan hafif betonlara %20 oranında uçucu kül katmıştır. Numuneleri 7,28 ve 90 gün tuzlu suya maruz bırakmıştır. Deney sonuçlarına göre maruz kalma süresi arttıkça basınç ve çekme dayanımında azalma olmuştur.

Shoaei (2013) yaptığı çalışmada Numunelere çimentonun ağırlığının %10'u kadar silis dumanı ve %20'si kadar uçucu kül ekleyerek hafif beton numuneleri üretmiştir. Numuneleri konsantrasyonu %3,5 ve %5 olan magnezyum klorür ve sodyum klorür tuzlarına 90 gün maruz bırakmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ne fazla dayanım kaybının mineral katkının olmadığı karışım grubunda olduğu gözlemlenmiştir. Bütün karışım grupların da birim hacim ağırlıklarında artış olduğunu belirtmiştir.

Ren *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada metakaolin esaslı geopolimer karışımlarına farklı oranlarda tremolit, bazalt lifi ve volastonit ekleyerek geopolimer betonlar üretmişlerdir. Betonlar kür sürelerini tamamladıktan sonra 90 gün farklı konsantrasyonlarda (%5, %10, %15, %20) tuz çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarında dayanımın en yüksek olduğu karışım grubu %5 volastonit, %5 tremolit ve %2 kısa bazalt lifi kullanılan gruptur. Ayrıca tuz çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça dayanımda azalma olduğu da gözlemlenmiştir.

Özcan (2018) yaptığı çalışmada ferrokrom cürufu bazlı ve %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında yüksek fırın cürufu katarak geopolimer beton numuneleri üretmiştir. Ürettiği numuneleri %5 konsantrasyonlu NaCl ve %5 konsantrasyonlu MgCl₂ çözeltisine 12 hafta maruz bırakmıştır. Bu sürecin sonunda numunelere UPV, basınç dayanımı testleri yapılmıştır

ve numunelerin görsel değişimleri incelenmiştir. Basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında değerlerde yaklaşık %2,67 ile %4,67 arasında azalma gözlemlenmiştir. Aynı şekilde UPV değerlerinde de azalma olmuştur. Görsel değişim incelendiğinde ise asit ve sülfat çözeltilerine göre tuz çözeltisinde numunelerin yüzeyinde çatlak veya bozulma görülmemiştir.

Aygörmez (2018) yaptığı çalışmada ürettiği geopolimer betonları 12 ay süreyle %10 konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde bekletmiştir. Çözeltinin konsantrasyonunun değişmemesi için belli aralıklarla çözeltiyi yenilemiştir. 12 ayın sonunda yapılan deneyler %1 ile %4 arasında dayanıma kayıp olduğu sonucunu vermiştir. Portland çimentosuyla üretilen normal betonda ise 12 ay sonunda basınç dayanımında %15 civarında düşüş olduğunu ifade etmiştir.

Zhuang *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanarak geopolimer numuneler üretmişlerdir. Numuneler 12 ay boyunca NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Karşılaştırmak için bir de musluk suyuna maruz bırakılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında basınç dayanımında en fazla azalma %6 oranında NaCl çözeltisine maruz kalan numunelerde gözlenmiştir.

İç Yapı Analizleri

SEM

Yapılara uygulanan durabilite etkileri sonrasında iç yapılarında değişiklikler oluşur. Oluşan bu değişiklikler mikroyapıları incelenerek belirlenir ve yorumlanır. Mikroyapılar incelenirken XRD, SEM, FT-IR gibi yöntemler kullanılmaktadır (Kantarcı 2018).

SEM görüntüsü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, numune yüzeyini bu elektron demetine taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli etkileşimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip monitöre aktarılmaktadır. SEM analizinde sıvı malzemeler hariç her sektörden (uçucu kül, cüruf, geopolimer, beton, nano malzeme, tekstil) malzemelerin içyapıları incelenebilir. (Kantarcı 2013; Yegin 2020).

Sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak aktifleştirilen geopolimer betonların SEM analizi ile mikroyapıları incelendiğinde daha yoğun ve ağsı jel yapısının olduğu gözlemlenmiştir. Sodyum hidroksit miktarının artmasıyla geopolimerizasyon reaksiyonlarında artış meydana geldiği bu sebeple yoğun ve ağsı yapıya sahip olduğu belirtilmiştir. Mikroyapının yoğun olması sonucunda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitin beraber kullanılması durumunda geopolimer betonlarda mikro çatlaklar ve boşluklar gözlemlenmiştir. Boşlukların karıştırma işlemi sırasında oluşan hava kabarcıklarının

hapolması, çatlakların ise kür sırasında suyun buharlaşması sonucunda oluşan büzölme sebebiyle meydana geldiği ifade edilmiştir (Hwang and Huynh 2015; Girgin 2016; Zhou *et al.* 2016).

Kantarcı yaptığı çalışmada volkanik tüfü NaOH ve Na₂SiO₃ kullanarak aktive edip geopolimer beton numuneler üretmiştir. Yaptığı deneyler sonucunda numunelerin SEM görüntülerini incelediğinde iki aktivatör içinde jel yapısına sahip olduğunu gözlemlemiştir. İki aktivatörün birlikte kullanıldığı numunelerde ise çatlaklar belirgindir. Sonuçta bu çatlaklar basınç dayanımında etkili olmuştur (Kantarcı 2018).

Wardhone *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer beton numuneler üretmişler ve mikroyapılarında inceleme yapmışlardır. SEM analizi sonuçlarına göre matris boyunca yer yer çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu çatlakların sebebinin ısı kürü sırasındaki suyun buharlaşması neticesinde oluşan kuruma olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca analiz sonucunda ağsı görünümde olan amorf jeller de belirlenmiştir.

Thakur *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada, F sınıfı uçucu külü sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive ederek geopolimer beton üretmişlerdir. Geopolimer numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde karışımlarda alkali içeriği arttıkça geopolimer matrisinde reaksiyona girmemiş alümino silikat jel oluşumunda yer alan uçucu kül partiküllerinin şekil ve sayılarında azalma gözlenmiştir.

Bakharev (2005) çalışmasında uçucu kül esaslı geopolimer betonlar üretmiştir. Ürettiği geopolimer betonları %5 konsantrasyonlu H₂SO₄ çözeltisine 2 ay süresince maruz bırakmıştır. Bu sürenin sonucunda geopolimer betonlar gözenekli ve kırılgan hale geldiğini ifade etmiştir. SEM analizi sonuçlarında göre sülfürik asit çözeltisine bırakılan geopolimer betonların matrislerinde yeni kristallerin oluştuğu tespit edilmiştir.

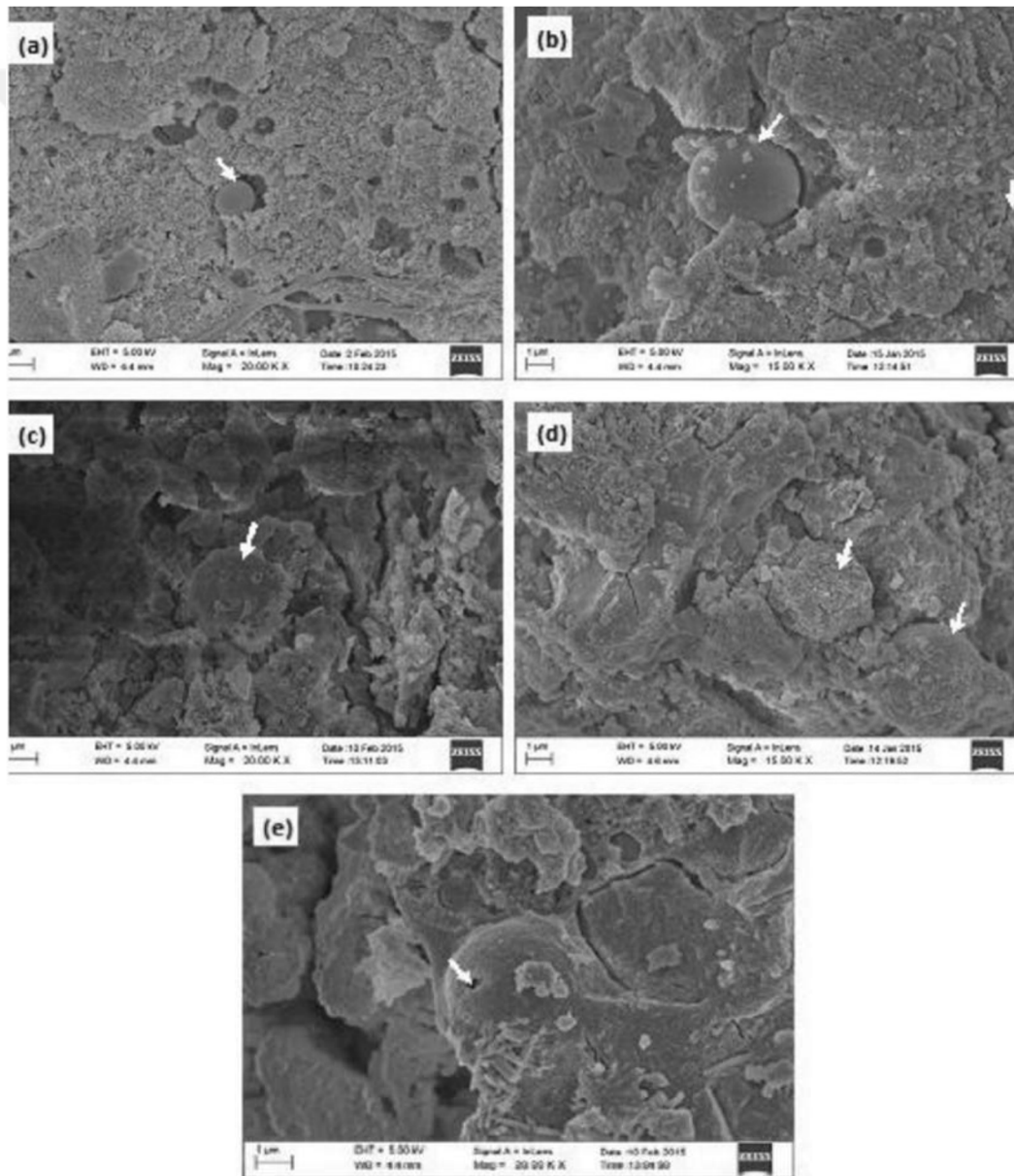
Deb *et al.* (2016) yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri %3 konsantrasyonlu H₂SO₄ çözeltisinde beklettikten sonra SEM analiziyle içyapı incelemeleri neticesinde H₂SO₄ çözeltisine maruz kaldıktan sonra numunelerdeki gözeneklerin hacminin arttığı belirlenmiştir.

Djobo *et al.* (2016) sülfürik asit saldırısı sonucunda geopolimerdeki Si-O-Al bağının bozulmaya uğraması nedeniyle 80°C'de kür edilen geopolimer harcın içyapısında mikro çatlaklar ve gözenekler oluştuğunu bildirmişlerdir.

Özcan (2018) yaptığı çalışmada ürettiği geopolimer betonları %5 konsantrasyonlu NaCl ve MgCl₂ çözeltilerinde 12 hafta bekletmiştir. Sonuçta SEM görüntülerini incelemiştir ve %5 NaCl çözeltisindeki geopolimer betonların içyapısında çatlak, boşluk vb. oluşumlar

gözlemlememiştir. Ayrıca %5 $MgCl_2$ çözeltisindeki numunelerin içyapısında çatlaklar bulunduğu ifade edilmiştir.

Pavithra *et al.* (2016) çalışmalarında çözelti/Bağlayıcı oranının geopolimer betonun içyapısına etkisini araştırmıştır ve sonuçta çözelti/bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı gözlemlemiştir. Bunun sebebinin oranın artmasıyla geopolimer betonun su miktarının artması olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 10a ve b'de görüldüğü gibi çözelti/bağlayıcı oranının 0,4 ve 0,5 olması durumunda reaksiyona girmeyen uçucu küller gözlemlenir. Boşluk yapıları da Şekil 10c ve e'de görüldüğü gibi seyrek olur. Uçucu külün yapısının ince olması yapıdaki mikro çatlakların azalmasını sağlar ve matris yapısının yoğun olmasına yardımcı olur.



Şekil 10. Uçucu Kül esaslı geopolimer betonun SEM analizi (Pavithra *et al.* 2016)

XRD

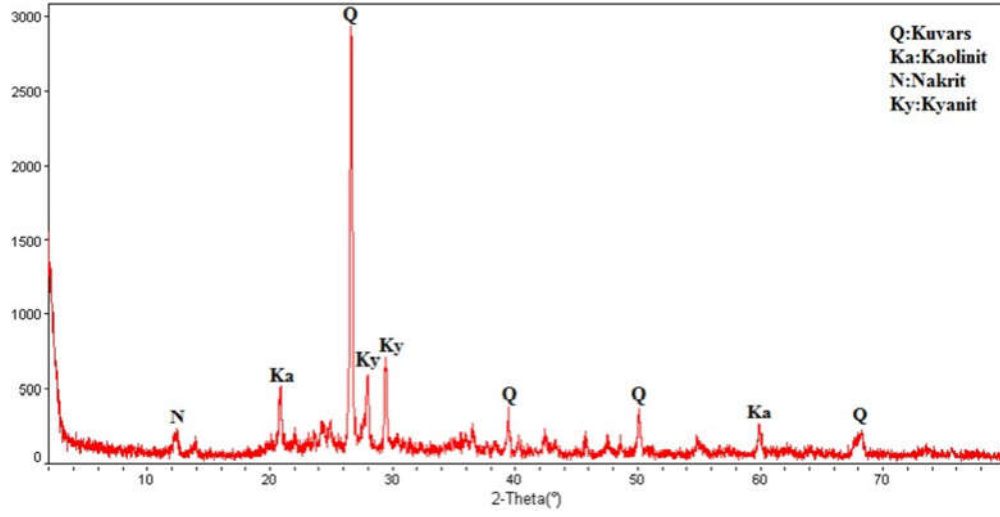
XRD numunelerde bulunan fazları, fazların miktarını, fazların tanecik boyutunu, fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerini ve atomların konumlarının kristal yapıya zarar verilmeden tespit edildiği analiz yöntemidir. Analiz için gerekli forma getirilen numune parçalarının üzerine bakır bir plakaya çarptırılan elektron demetinden yansıyan x ışınları gönderilir. Numune üzerine gönderilen X ışını demetinden yansıyan ışınlar detektör yardımıyla tespit edilerek yapıya özgü kırınım desenleri meydana getirilir. Bu kırınım desenleri incelenerek numunenin kimyasal özellikleri ve yapısı ile alakalı bilgiler elde edilir (Yegin 2020).

XRD yöntemi X ışınının malzemeye yönlendirilmesiyle gerçekleşen tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntemle malzemenin yapısı belirlenebilmektedir. Numunedeki atomların dağılması X ışınlarının numuneye girişteki kırılmasına göre belirlenir. Eğer yüzey atomları eşit aralıklıysa çıkan spektrumlar ayırıcı girişimlerin olduğu sivri tepeler içerir ve yapı Bragg kanunu kullanılarak belirlenir (McNulty 2009).

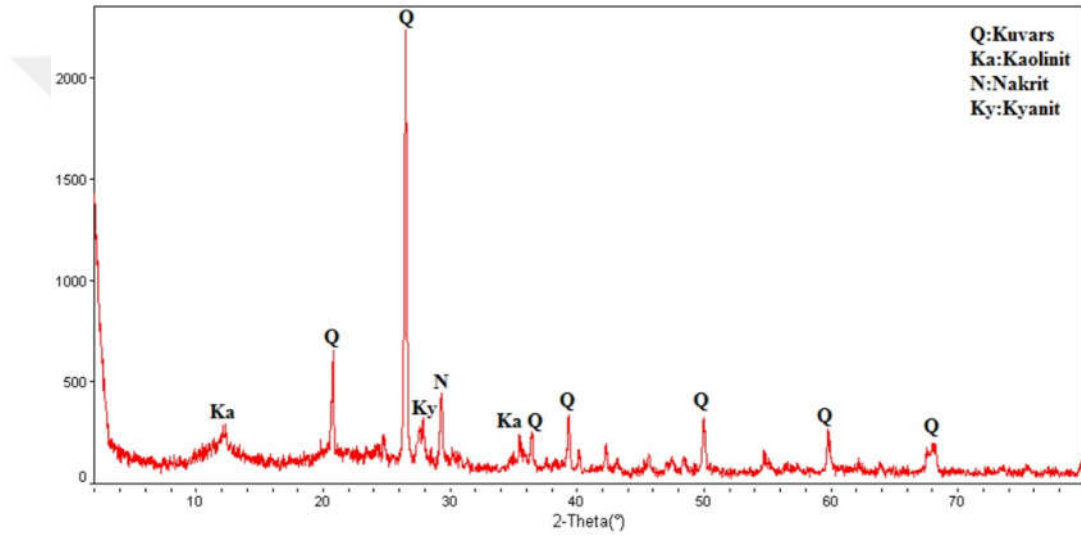
Thakur *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada, F sınıfı uçucu külü sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive ederek geopolimer beton üretmişlerdir. Geopolimer numunelerin XRD difraktogramları incelenmiş ve numunelerde kuvars, mulit, magnetit, hidrosadalit, herselit fazları gözlenmiştir.

Nath *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş Corex cürufunu uçucu kül esaslı geopolimerlere %0-50 aralığında değişen oranlarda eklemiştir. Öğütülmüş Corex cürufu ve uçucu kül ile üretilmiş geopolimer numunelerde; Mulit, Kuvars, CSH ve Xonotit fazları, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile üretilmiş numunelerde ise Mulite, Kuvars ve CSH fazları gözlenmiştir.

Kantarcı (2018) çalışmasında volkanik külü hem NaOH hem de NaOH+Na₂SiO₃ kullanarak ürettiği geopolimer beton numunelere 28 günün sonunda XRD analizi uygulamıştır. Sonuçta kullanılan alkali aktivatörün geopolimerizasyon reaksiyonlarından sonra meydana gelen mineral türünü değiştirmediği gözlemlenmiştir. Her iki kullanımda da Şekil 11 ve 12’de görüldüğü gibi kuvars, kaolinit, nakrit, kyanit gibi mineraller belirlenmiştir.



Şekil 11. NaOH ile aktive edilen geopolimer betonun XRD analizi (Kantarıcı 2018)



Şekil 12. NaOH+Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimer betonun XRD analizi (Kantarıcı 2018)

Askarian *et al.* (2019) çalışmalarında XRD analizinin sonuçlarının nitel olmasına rağmen bu sonuçların minerallerin konsantrasyonlarıyla oranlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple XRD analizinin grafiklerinde gözlemlenen pik noktaların yoğunlukları minerallerin göreceli değerlerini yansıtmaktadır.

Bouguermouh *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer betonları 28 gün boyunca hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakmışlardır ve sonuçta basınç dayanımını incelemişlerdir. Ayrıca numunelerde gözlemlenen ağırlık kayıpları da haftalık olarak ölçülmüştür. 28 günün sonunda numunelerin görünümünde önemli bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Asit etkisi sonrasında XRD analiz sonuçları incelendiğinde kristal bileşiklerde değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Fakat asit etkisiyle çözünme gerçekleştiği için karbonat parçacıklarının yok olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçta 28 günlük hidroklorik asit etkisinin geopolimerin matrisine bir etki yapmadığı bildirilmiştir.

Mehta *et al.* (2020) yaptıkları çalışmalarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer beton numuneler üretmiştir. Numunelere XRD analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda kuvars, albit ve nefelin ana fazları gözlemlenmiştir. Kuvars, SiO₄ tetrahedral yapısı ile sürekli bir çerçeve oluşturan silika ve oksijen atomlarına sahip bir mineral olarak ifade edilebilir. Nefelin ve albit ise farklı yapısal düzenlemelere sahip Na-Al-Si bağları ile ilişkilendirilir. Nefelin, altıgen bir kristal yapıdan (NaAlSiO₄) oluşurken albit, triklinik yapısal düzenleme ile (NaAlSi₃O₈) ilişkilidir. Ayrıca her iki faz da dış yüklere karşı yapının mukavemet kazanmasında büyük rol oynar.

FT-IR

Geopolimer betonların kimyasal yapılarında bulunan bileşikler belirtmek için FT-IR kullanılır. Kızıl ötesi spektroskopisi bileşikteki bağ yapıları hakkında bilgi veren bir yöntem olarak sıkça kullanılmaktadır. Kızıl ötesi spektroskopisi bileşiğin yapısındaki bağ yapılarına düşürülen ışınların, bağ yapılarını dönme ve titreşim davranışı sonucu soğurulması esasına dayanır. Bileşiği oluşturan bağların titreşimi sonucunda meydana gelen frekansları ifade eden soğurma pikleri ile gösterilmektedir (Dişçi 2021).

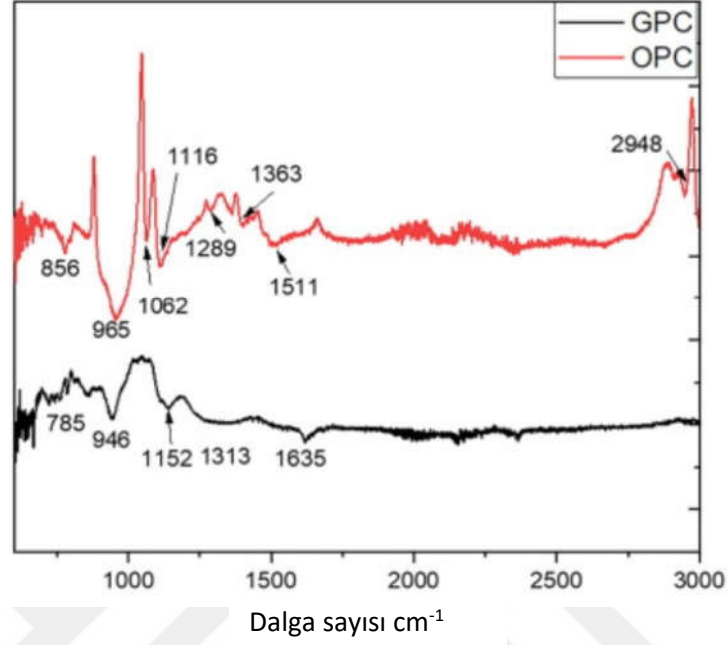
Hamidi *et al.* (2016) çalışmalarında NaOH derişiminin geopolimerlerin mekanik ve içyapı özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla uçucu külü aktive etmek için %4 ile %18 Na içerecek şekilde %2 artışla farklı oranlarda NaOH kullanmışlardır. Geopolimerlerin yapısını açıklamak için FTIR kullanarak düşük frekanslarda Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarını, yüksek frekanslarda su moleküllerinin varlığını tespit etmişlerdir.

Bayarzul *et al.* (2014) çalışmalarında alkalilerle aktifleştirilerek üretilen bütün numunelerde -OH ve H-O-H gruplarının deformasyon titreşimleri sebebiyle 1640 ve 3450 cm⁻¹ olarak geniş şeritler belirttiğini gözlemlemişlerdir.

Geopolimer numunelerin ağ yapılarını ve polimerizasyon derecelerini anlamada geopolimerlerin jel kısmı oluşurken tetrahedral bağların düzenlenmesinden sonra oluşan Si-O-T titreşimlerine ait 950-1100 cm⁻¹ aralığındaki temel titreşim bandı önemlidir (Samantasinghar and Sing 2018).

Pasupathy *et al.* (2021) yaptıkları çalışmada RT-IR testini betonda gerçekleşen reaksiyon aşamalarını ve durabilite etkileri neticesinde betonda gözlenen bozulmaların etkilerini belirlemeyi sağlayan bir yöntem olarak tanımlamışlardır. Çalışmada geopolimer beton ve normal beton üretilmiştir. 10 yıllık bir sülfat ve klor maruziyetinden sonra FT-IR testi numunelere uygulanmıştır. Sonuçlarda Şekil 13'te gösterildiği gibi geopolimer betonda 1152 cm⁻¹'de oluşan tepe noktası ve normal betonda 1289 ve 1116 cm⁻¹'deki tepe noktaları

numunelerin bekletildiği ortamdaki sülfat iyonlarının penetrasyonunu temsil eden S-O bağının gerilme titreşiminden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Normal betonda 1062 cm^{-1} 'de oluşan keskin tepenin de sülfat saldırısı sebebiyle C-S-H jelinin ayrışması ile ilgili olduğu ve etrenjit oluşumunu gösterdiği ifade edilmiştir.



Şekil 13. Geopolimer ve normal betonun FT-IR spektrumları (Pasupathy *et al.* 2021)

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Uçucu kül (UK)

Çanakkale ili, Biga ilçesindeki CENAL Elektrik Üretim A. Ş.den temin edilen UK kullanılmıştır (Şekil 14). Kullanılan UK'nin özgül ağırlığı $2,18 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve diğer özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 14. Uçucu kül

Tablo 1. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

Birleşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
UK	59,75	22,20	7,654	3,364	1,851	0,129	1,771	1,356	0,077

Yüksek fırın cürufu (YFC)

Bu çalışmada Karabük ilinde faaliyet gösteren Karçimsa A. Ş.den temin edilen YFC kullanılmıştır (Şekil 15). Kullanılan YFC'nin özgül ağırlığı $2,88 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve diğer özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.



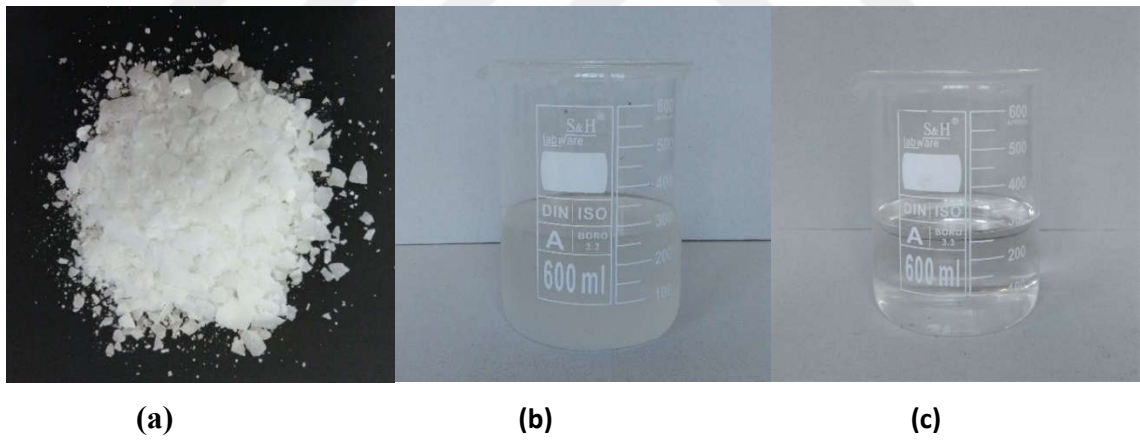
Şekil 15. Yüksek fırın cürufu

Tablo 2. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Birleşim (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
YFC	37,4	10,38	1,30	30,93	7,21	0,77	0,39	0,67	0,048

Alkali aktivatörler

Çalışmada aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır (Şekil 16). Her iki aktivatörün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3 ve 4’te sunulmuştur.



Şekil 16. (a) NaOH, (b) NaOH çözeltisi, (c) Na_2SiO_3

Tablo 3. Sodyum Hidroksit Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Sodyum Hidroksit
Kimyasal Formülü	NaOH
Molekül Kütlesi (g/mol)	40,00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Yoğunluk (g/cm ³)	2,13
Na ₂ O içeriği (%)	-
SiO ₂ içeriği (%)	-
H ₂ O içeriği (%)	-

Tablo 4. Sodyum Silikat Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Sodyum Silikat
Kimyasal Formülü	Na_2SiO_3
Molekül Kütlesi (g/mol)	122,06
Renk	Renksiz
Fiziksel Hali	Sıvı
pH	11-12,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,37-1,41
Na_2O içeriği (%)	11-12,5
SiO_2 içeriği (%)	21,5-24,5
H_2O içeriği (%)	63-67,5

Çözelti suyu

Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanmasında TS EN 1008 (172) standardına uygun Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi şebeke suyu kullanılmıştır.

Akışkanlaştırıcı katkı

Karışımlarda CHRYSO-KAT Katkı Malzemeleri San. ve Tic. A.Ş. den temin edilen naftalin esaslı DELTA UGS-2S süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır (Şekil 17) ve özellikleri Tablo 5’te verilmiştir.

**Şekil 17.** Akışkanlaştırıcı katkı**Tablo 5.** Akışkanlaştırıcı Katkı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	DELTA UGS-2S
Görünüm	Sıvı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	$1,180 \pm 0,03 \text{ gr/cm}^3$
pH	$5,00 \pm 1$
Klorür İçeriği	$<0,1$

Agrega

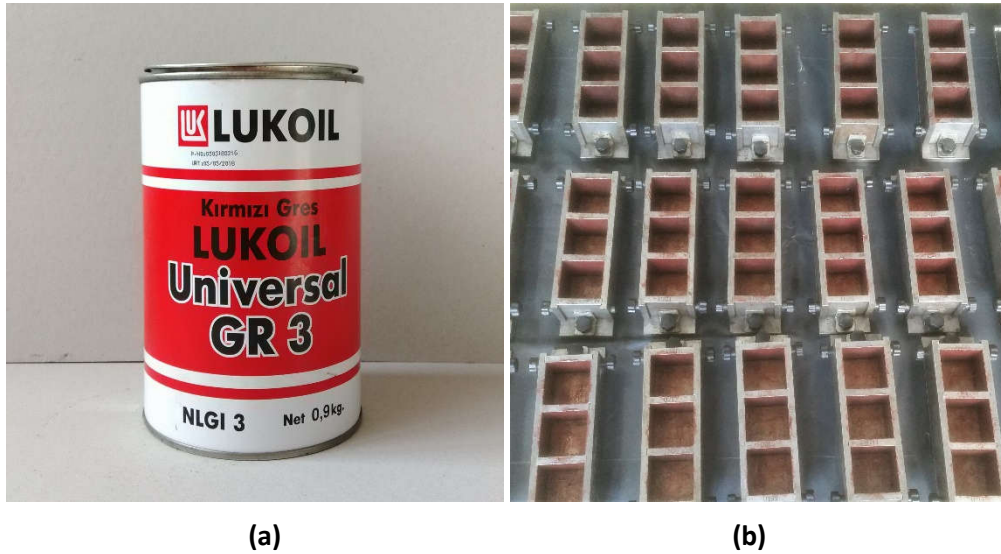
Karışımlarda BALSOY Grup İnşaat Turizm Yapı Elemanları İmalat ve Taahhüt San. Tic. Ltd.Şti.'den temin edilen dere agregası kullanılmıştır. Bu agregaların özelliklerini belirlemek için yüzey nemi, su emme, özgül ağırlık ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Karışımlarda maksimum tane çapı 8 mm olarak belirlenmiştir. Agregalar karışımda kullanılmak üzere 0-4 mm ince agregaya ve 4-8 mm iri agregaya aralığında iki sınıfa ayrılmıştır (Şekil 18).



Şekil 2. (a) 0-4 mm agregaya, (b) 4-8 mm agregaya

Kalıp yağı

Geopolimer betonların çelik kalıplardan kolay çıkabilmesini sağlamak için katı gres yağı kullanılmıştır. Gres yağı fırça yardımıyla çelik kalıplara uygulanmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. (a) Gres yağı, (b) Yağlanmış kalıplar

Hidroklorik asit

Numunelerin maruz bırakılacağı hidroklorik asit Merck İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Hidroklorik asit %37'lik çözelti halinde 2,5 litrelik cam şişelerdedir (Şekil 20). Ayrıca HCl fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.



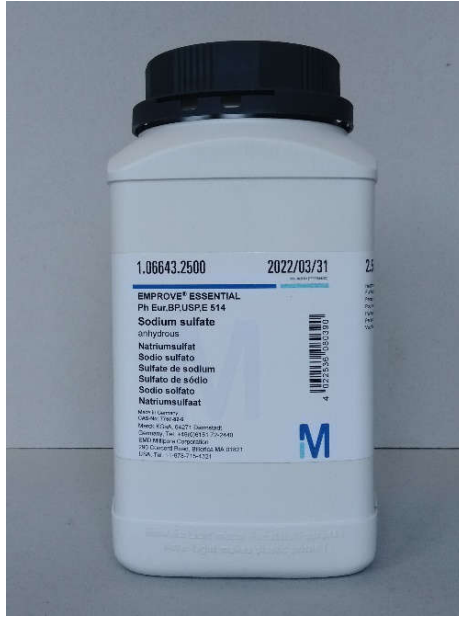
Şekil 20. Çalışmada kullanılan HCl

Tablo 6. HCl Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	HCl
Renk	Renksiz
Fiziksel Hali	Sıvı
Konsantrasyonu (%)	37
Yoğunluk (g/cm ³)	1,19
pH	<1
Buhar Basıncı (hPa)	190

Sodyum Sülfat

Sodyum sülfat Merck İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş.den 2,5 kilogramlık plastik kaplarda temin edilmiştir (Şekil 21). Ayrıca Na₂SO₄ fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.



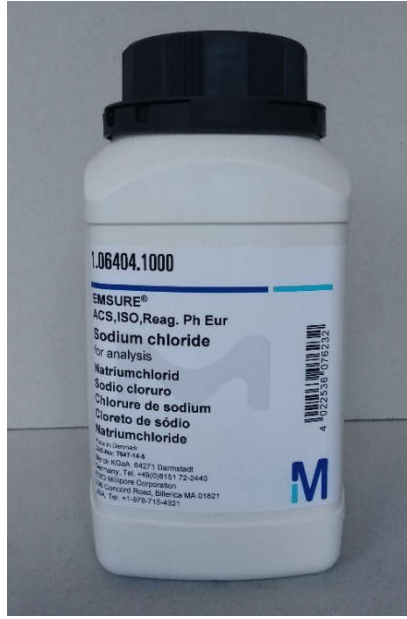
Şekil 21. Çalışmada kullanılan Na_2SO_4

Tablo 1. Na_2SO_4 Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Na_2SO_4
Renk	Beyaz
Fiziksel Hali	Kristal
Çözünürlük (g/l)	445,5
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70
Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	1400,1600
pH	5,2-8,0
Molekül Ağırlığı(g/mol)	142,04

Sodyum Klorür

Sodyum klorür Merck İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş.den 1 kilogramlık plastik kaplarda temin edilmiştir (Şekil 22). Ayrıca NaCl fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 8’de verilmiştir.



Şekil 22. Çalışmada kullanılan NaCl

Tablo 8. NaCl Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	NaCl
Renk	Beyaz
Fiziksel Hali	Kristal
Çözünürlük (g/l)	358
Yoğunluk (g/cm ³)	2,17
Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	1140
pH	4,5-7,0
Molekül Ağırlığı(g/mol)	58,44

Deneylerde Kullanılan Araç ve Gereçler

Elekler

Agregaların granülometri deneyinde sırasıyla 16-11,2-8-4-2-1-0,5-0,25-0,15-0,063 mm kare delikli elekler ve toplama kabı kullanılmıştır (Şekil 23).



Şekil 23. Elek takımı

Laboratuvar mikseri

Geopolimer beton karışımlarının TS EN 196–1 (2016) standardına uygun homojen biçimde karıştırılması için 10 dm³ kapasiteli, 3 kademeli çalışabilen, 251 dev/dk karıştırma hızında karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24. Laboratuvar mikseri

Yayılma tablası

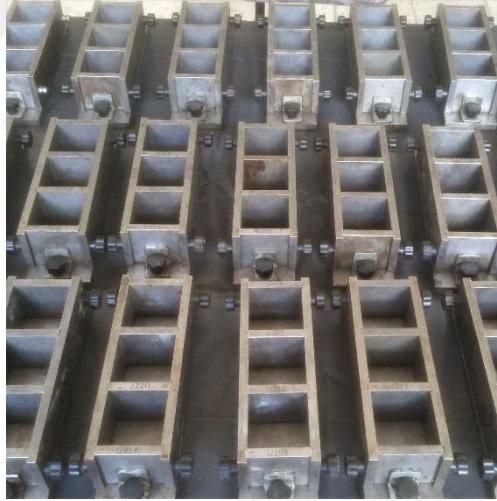
Çalışmada geopolimer betonun taze haldeki kıvamını belirlemek için yayılma tablası deney aleti kullanılmıştır (Şekil 25).



Şekil 25. Yayılma tablası

Çelik kalıplar

Numune üretiminde 50x50x50 mm boyutlarında üç gözlü çelik kalıplar kullanılmıştır (Şekil 26).



Şekil 26. Çelik kalıplar

Etüv

Agrega deneylerinde agregaların etüv kurusu hale getirilmesi ve geopolimer beton numunelerine ısı kürü uygulanması aşamalarında hava dolaşımli etüv kullanılmıştır (Şekil 27).



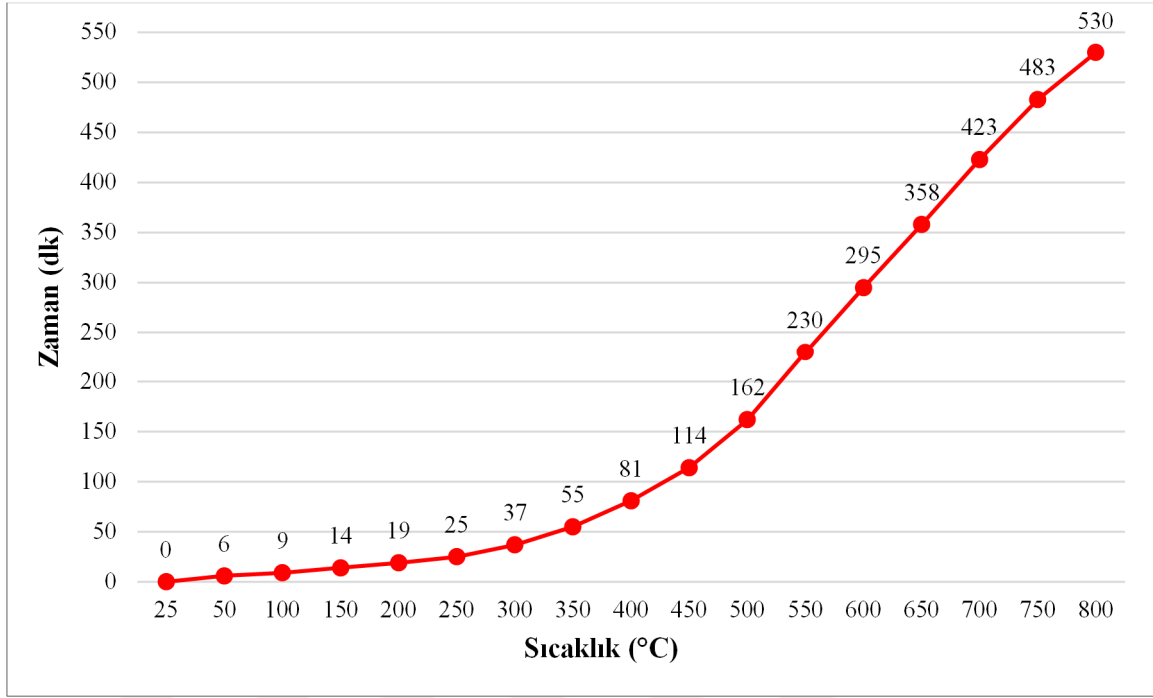
Şekil 27. Etüv

Yüksek sıcaklık fırını

Numunelere yüksek sıcaklık uygulanabilmesi için kapasitesi 1000 °C sıcaklığa kadar ulaşabilen fırın kullanılmıştır. Fırının süresi ve sıcaklığı dijital olarak isteğe bağlı ayarlanabilmektedir (Şekil 28). Ayrıca yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 29’da görülmektedir.



Şekil 28. Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 29. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık–zaman grafiği

Basınç dayanım test cihazı

Çalışmada numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla 3000 kN kapasiteli BESMAK marka tek eksenli basınç dayanım test cihazı kullanılmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. Basınç dayanım test cihazı

UPV (Ultrasonik Ses Hızı) test cihazı

Numunelerin ultrasonik darbe hızı Proceq marka cihaz ile ölçülmüştür (Şekil 31).



Şekil 31. UPV test cihazı

Yöntem

Agrega deney yöntemleri

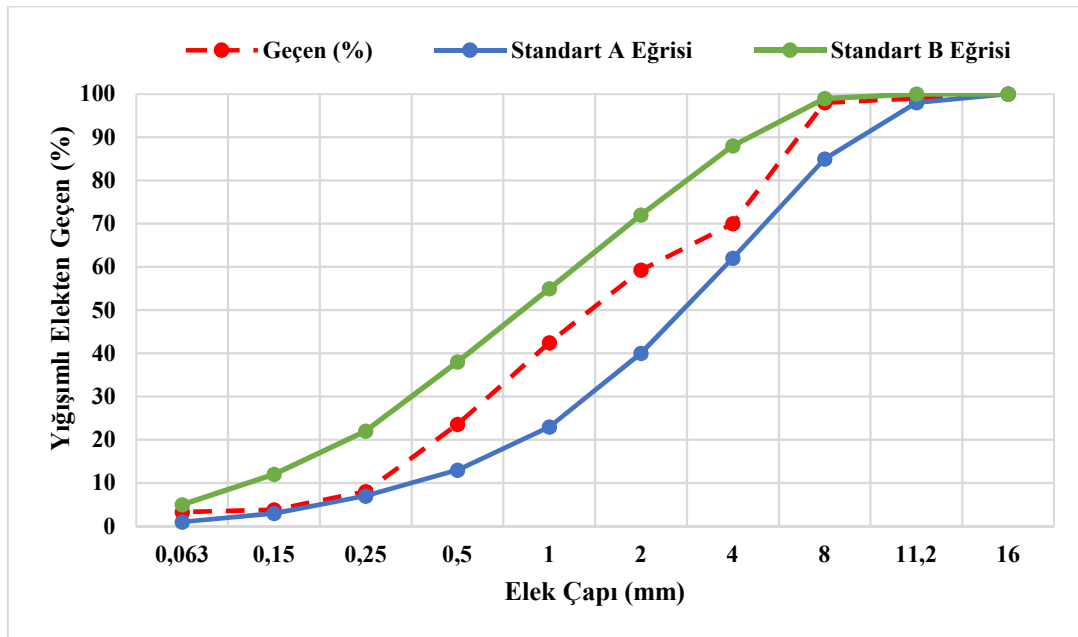
Bu çalışmada geopolimer beton üretimi için dere agregası tercih edilmiştir. Dere agregasının maksimum tane çapı 8 mm olarak belirlenmiştir. Agregalar üzerinde TS EN 1097-6 (2013) standardına göre kuru özgül ağırlık, su emme oranı, doymun kuru yüzey özgül ağırlık tayini, TS EN 933-1 (2015) standardına göre elek analizi deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 9’da belirtilmiştir. Karışımında kullanılacak olan agregaların oranı sonuçları Şekil 32’de verilen ince ve iri agregalara uygulanan elek analizi neticesinde 0-4 mm %75 ve 4-8 mm %25 olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 9. Agregaların Su Emme Oranı ve Özgül Ağırlık Değerleri

Özellik	0-4 mm	0-8 mm
Su emme oranı (%)	1,1	1,1
Kuru özgül ağırlık	2,55	2,59
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık	2,65	2,66

Tablo 10. Agregada Elek Analizi Sonucu

Elek Açıklığı(mm)	16	11,2	8	4	2	1	0,5	0,25	0,15	0,063
Elekten Geçen (%)	100	99	99	64,73	59,31	42,45	23,55	7,99	3,82	3,27



Şekil 32. Agrega granülometri eğrisi

Karışımların gruplandırılması ve oranların belirlenmesi yöntemi

Geopolimer beton üretimi için oluşturulacak karışım gruplarında bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tercih edilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı dozajı 500 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Üretilen karışımlarda esas bağlayıcı olarak ön denemeler sonucunda kıvam ve işlenebilirlik açısından daha verimli sonuç veren uçucu kül kullanılmıştır. İkincil bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun oranları yine ön denemeler sonucunda %20, %30, %40 ve %50 olacak şekilde karışım grupları oluşturulmuştur. İsimlendirmeler ise kullanılan bağlayıcılar ve ana bağlayıcının yüzde oranına göre belirlenmiştir. %100 UK kullanılan karışımlar F-100, %80 UK kullanılanlar FS-80, %70 UK kullanılanlar FS-70, %60 UK kullanılanlar FS-60 ve %50 UK kullanılanlar FS-50 olarak isimlendirilmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. Karışım Kodları

Karışım Kodu	UK (%)	YFC (%)
F-100	100	0
FS-80	80	20
FS-70	70	30
FS-60	60	40
FS-50	50	50

Çözelti/Bağlayıcı (Ç/B) oranı 0,55, 0,43 ve 0,40 olarak denenmiştir. Yapılan ön çalışmalarda işlenebilirlik ve basınç dayanımı açısından en iyi sonuçlar Ç/B oranının 0,43 olduğu karışımlardan elde edilmiştir. Bütün karışımlarda kullanılan NaOH'in molaritesi sabit olup 10 molar (M) olarak alınmıştır (Sharma *et al.* 2021). Ayrıca ön deneylerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

oranı 1 ve 2 olarak seçilmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2 olduğu karışımlarda hem basınç dayanımı hem de işlenebilirlik açısından daha iyi sonuçlar gözlenmiştir (Hardjito and Rangan 2005; Rangan 2014). Dolayısıyla $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı asıl karışımlarda 2 olarak seçilmiştir. Ön deneme karışımlarında akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilat esaslı ve naftalin esaslı iki farklı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu iki katkı karşılaştırıldığında naftalin esaslı akışkanlaştırıcı ile üretilen geopolimer betonlarda daha iyi bir kıvam elde edildiği için asıl karışımlarda da %2 oranında naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcı (SAK) kullanılmıştır. Geopolimer betonda ısı kürünün reaksiyonları hızlandırması ve dayanım kazanma hızını arttırması gerekçesiyle literatür ışığında 72 saatlik 90°C 'de ısı kürü uygulanmıştır (Altındal 2020). Bu bağlamda nihai karışım oranları Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Karışım Oranları (kg/m^3)

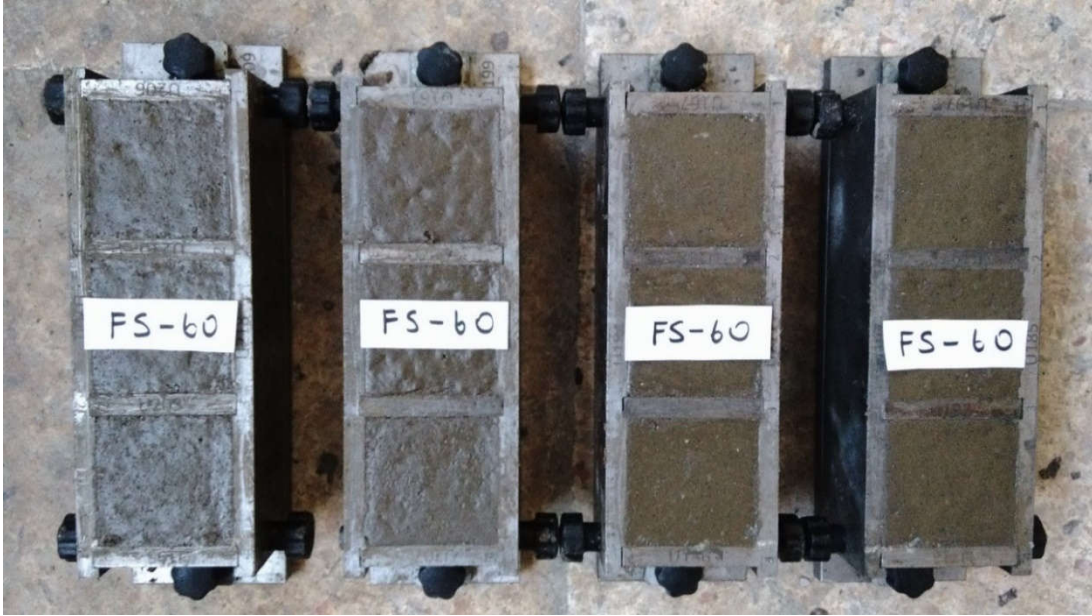
Karışım Grupları	Ç/B Oranı	Dozaj	UK	YFC	Na_2SiO_3	NaOH	0-4 mm	4-8 mm	SAK
F-100	0,43	500	500	-	143,33	71,67	1097	366	10
FS-80	0,43	500	400	100	143,33	71,67	1118	373	10
FS-70	0,43	500	350	150	143,33	71,67	1129	376	10
FS-60	0,43	500	300	200	143,33	71,67	1140	380	10
FS-50	0,43	500	250	250	143,33	71,67	1151	384	10

Numunelerin üretilmesi

Geopolimer beton numunelerinin üretiminde ilk olarak kullanılacak malzemeler hesaplanan oranlarda tartılarak hazırlanmıştır. Üretimde kullanılacak olan NaOH katı formda olduğu için 10 M çözelti formunda hazırlanıp karışıma eklenmiştir. NaOH ve suyun birleşimi ekzotermik bir reaksiyon olduğu için ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı karışımda priz hızlanmasına sebep olduğu için NaOH çözeltisi bir gün önceden hazırlanmıştır (Kayacıklı 2020). Karışımda Şekil 33'teki gibi öncelikle bağlayıcıyla NaOH 2 dk süreyle karıştırılmıştır. Sonra Na_2SiO_3 çözeltisi eklenmiş ve 2 dk daha karıştırılmıştır. Son olarak agregalar ve akışkanlaştırıcı eklenerek 2 dk daha karıştırılmıştır. Toplamda karıştırma süresi 6 dk'dır. Hazırlanan geopolimer beton karışımı $50 \times 50 \times 50$ mm çelik küp kalıplara 3 aşamada Şekil 34'te görüldüğü gibi 25 kez şişlenerek yerleştirilmiş ve sarsma tablasıyla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 33. Geopolimer beton karışımının üretilmesi



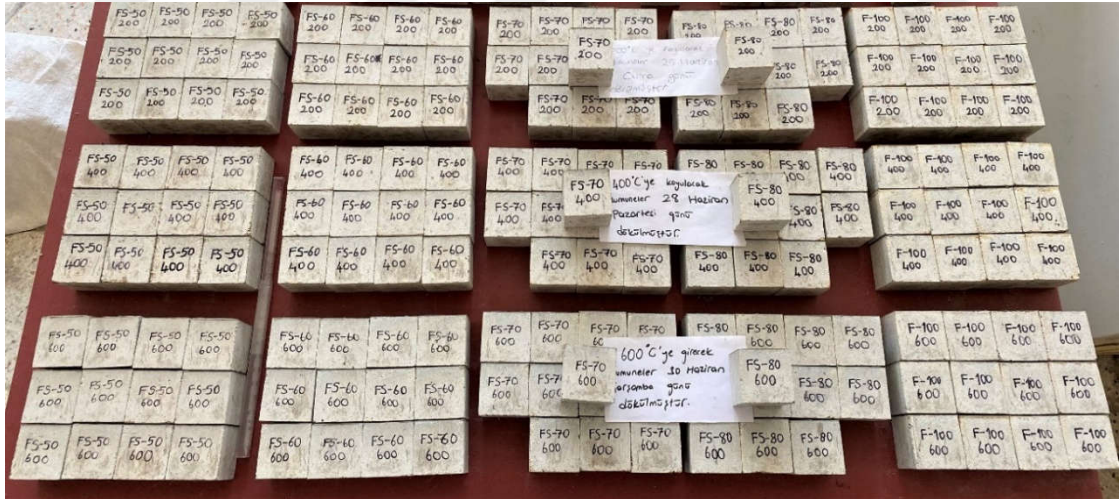
Şekil 34. Geopolimer beton numuneler

Numunelerin kür edilmesi

Geopolimer beton karışımları hazırlanıp kalıplara yerleştirildikten sonra numunelerin nem kaybının önlenmesi için numuneler kalıplarıyla yanmaz poşetlere yerleştirilerek Şekil 35'te görüldüğü gibi 90°C'lik ısı kürüne maruz bırakılmıştır. İlk 24 saat sonunda kalıplar sökülüş ve daha sonra numuneler tekrar poşetlenerek kalan 48 saatin tamamlanması için etüve yerleştirilmiştir. 72 saatin sonunda ısı küründen çıkarılan numuneler poşetlerden de çıkarılarak deney gününe kadar Şekil 36'daki gibi (28. ve 90. gün) laboratuvar ortamına bırakılmıştır.



Şekil 35. Numunelerin poşetlenmesi ve ısı kürü



Şekil 36. Geopolimer beton numuneler

Geopolimer Beton Numunelere Uygulanan Deneyler

Taze beton kıvam deneyi

TS EN 1015-3 standardına göre üretilen beton taze haldeyken yayılma tablası üzerindeki kalıba iki kademe halinde yerleştirilip her kademede taze betona 10 defa şişleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra kalıba yerleştirilen taze betonun üzeri düzelmiş ve kalıp yavaş yavaş yukarıya doğru çekilerek çıkartılmıştır. Deney sistemindeki kol 15 defa çevrilerek taze betonun

yayılması sağlanmıştır. Taze betonun kıvamı Şekil 37’de görüldüğü gibi yayılma çapı ölçülerek belirlenmiştir.



Şekil 37. Taze beton kıvam deneyi

Kılcal su emme

Deney TS EN 13057 (2004) standardına uygun olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Numuneler etüv kurusu hale getirilerek tartılmıştır. Şekil 38’de görüldüğü gibi su geçirmez izolasyon bandıyla bantlanan numuneler tabanını 2 mm geçecek şekilde suyla dolu tepsi içerisindeki ızgaraya yerleştirilmiştir. Numuneler tepsi içerisindeki suyla temas eder etmez kronometre çalıştırılmış ve kılcal su emme oranının tayini için 12 dk, 30 dk ,1 saat, 2 saat, 4 saat ve 24 saat aralıklarla olmak üzere 6 okuma yapılmıştır.



Şekil 38. Kılcal su emme deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi

Birim hacim ağırlık (Δ) tespiti için numuneler 24 saat boyunca etüvde 105°C'de bekletilip etüv kurusu ağırlıkları (M) tartılmıştır. Daha sonra numunelerin denklem 1'de verilen formüle göre birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

$$\Delta \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{M}{V}$$

Basınç dayanımı

50x50x50 mm boyutlarında üretilen geopolimer beton numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her gruptan yeterli sayıda numune 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ardışık durabilite etkisini tespit etmek için yüksek sıcaklık sonrasında numuneler %5'lik HCl, Na₂SO₄ ve NaCl etkisine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanım deneyleri TS EN 12390-3 (2019) ve ASTM C39/C39M standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Dayanım değeri olarak en az üç numunenin ortalaması alınmıştır. Numuneler BESMAK marka tek eksenli basınç dayanım test cihazına Şekil 39'da görüldüğü gibi yerleştirilmiş ve yükleme hızı 0,5 MPa/s olarak uygulanmıştır.



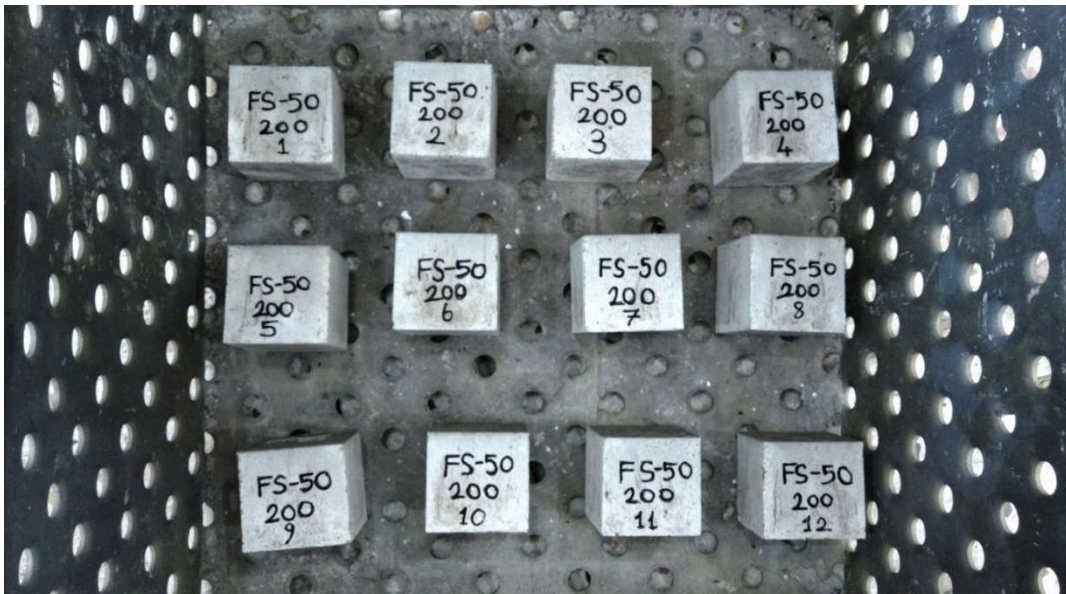
Şekil 39. Basınç dayanım deneyi

UPV (Ultrasonik Ses Hızı)

Üretilen geopolimer betonların boşluk oranları, homojenliği, elastisite modülü, mukavemet gibi özelliklerinin belirlenebilmesi için ultrasonik ses hızının ölçülmesi tercih edilen yöntemlerden biridir. UPV ölçümü Proceq marka deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney cihazı kullanılmadan önce mutlaka kalibrasyon parçasıyla cihazın kalibrasyonu yapılmıştır, numunenin boyutları ve yoğunluğu cihaza kaydedilmiştir. Numuneler ölçülmeden önce mutlaka yüzeylerinin kuru olduğundan emin olunmuştur. Numunelerin yüzeyine ölçüm yapılmadan önce jel ya da gres yağı sürülmektedir. Bu çalışmada gres yağı tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise ses dalgalarının daha rahat iletilmesini sağlamasıdır. TS EN 12504-4 (2021) standardına göre UPV ölçümü yapılırken numunenin yüzeyine gönderici uç tarafında ultrasonik ses dalgaları gönderilir ve bu dalgaların numunenin karşı yüzeyindeki alıcı uçlara ulaşmasına kadar geçen süre ve hızı ölçülür.

Yüksek sıcaklık deneyi

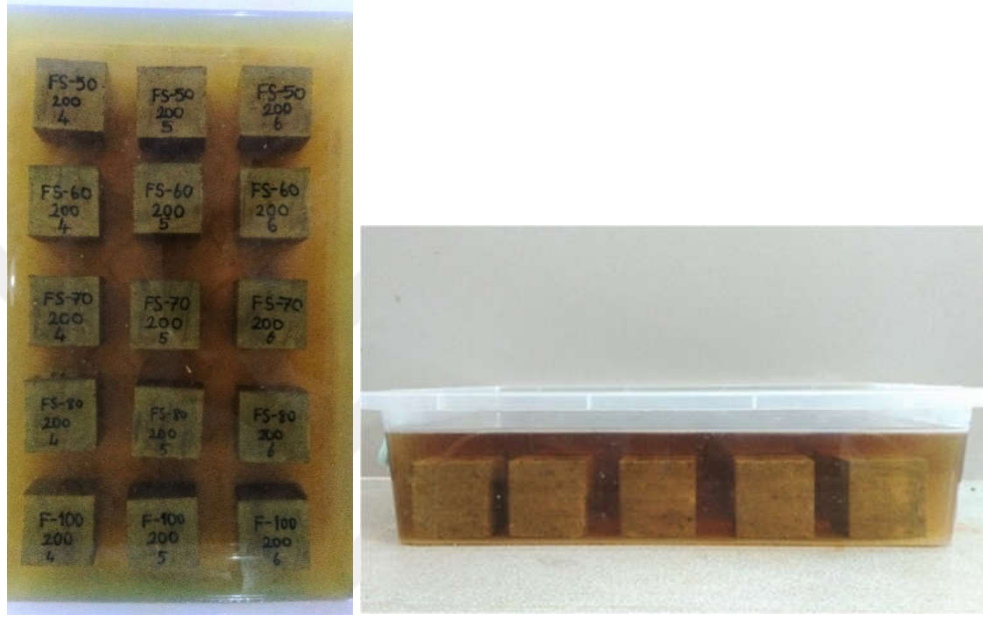
Üretilen geopolimer beton numuneler 28 günlük olduğunda numuneler ağırlık kaybının tespiti için tartılmış ve 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C’de yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınına Şekil 40’ta görüldüğü gibi yerleştirilen numuneler istenilen sıcaklığa ulaşmaya kadar ve istenilen sıcaklığa ulaştığında fırında tutulmuştur. Fırın 200 °C’ye 30 dakikada, 400 °C’ ye 1,5 saatte, 600 °C’ ye 5 saatte ve 800 °C’ye 8 saatte ulaşmıştır. Bütün sıcaklıklarda numuneler fırında 2 saat bekletilmiştir. Süre dolduktan sonra numunelerin termal şoka maruz kalmaması için fırının kapağı aralanmış ve numunelerin oda sıcaklığına kadar soğuması sağlanmıştır. Daha sonra numuneler fırından çıkarılıp ağırlık kaybı tespiti için tartılmıştır. UPV, kılcal su emme ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.



Şekil 40. Yüksek sıcaklık deneyi

Asit etkisi deneyi

Üretilen geopolimer beton numuneleri ardışık durabilite testi için yüksek sıcaklık sonrasında %5 derişimli HCl çözeltisine Şekil 41’de görüldüğü gibi 30 gün maruz bırakılmıştır. Hazırlanan çözelti derişim kaybı sebebiyle 15 günde bir yenilenmiştir. Bu tez kapsamında yenilenme bir defa gerçekleşmiştir. Asitten çıkan numuneler etüv kurusu hale getirilerek ağırlık kaybının tespiti için tartılmıştır. Daha sonra kılcal su emme, UPV ve basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 41. HCl etkisi deneyi

Sülfat etkisi deneyi

Üretilen geopolimer beton numuneleri yüksek sıcaklık sonrasında ardışık durabilite kapsamında %5 derişimli Na_2SO_4 çözeltisine Şekil 42’de görüldüğü gibi 30 gün maruz bırakılmıştır. Derişim kaybı sebebiyle 15 günde bir çözelti yenilenmiştir. Kullanılan Na_2SO_3 toz formda olduğu için musluk suyuyla karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. 30 gün sonunda çözeltiden çıkarılan numuneler ağırlık değişimi için etüv kurusu hale getirilip tartılmıştır. Kılcal su emme, UPV ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.



Şekil 42. Na_2SO_4 etkisi deneyi

Tuz etkisi deneyi

Üretilen geopolimer beton numuneleri ardışık durabilite kapsamında yüksek sıcaklıktan sonra %5 konsantrasyonlu NaCl çözeltisine Şekil 43'te görüldüğü gibi maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulan numuneler ağırlık kaybı tespiti için etüv kurusu hale getirilip tartılmıştır. Hazırlanan çözelti numunelerin yüzeyini geçecek şekilde kutulara doldurulmuştur. Daha sonra geopolimer beton numuneleri hazırlanan çözeltiye bırakılmıştır. NaCl toz formda olduğu için suyla karıştırılarak çözelti formuna getirilmiştir. Derişim kaybı sebebiyle çözelti 15 günde bir yenilenmiştir. 30 gün sonunda çözeltiden çıkarılan numuneler etüv kurusu hala getirilip ağırlık kaybı tespiti için tekrar tartılmış ve kılcal su emme, UPV basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.



Şekil 43. NaCl etkisi deneyi

İç Yapı Analizleri

X- Işını difraktometrisi (XRD) analizi

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda üretilen geopolimer beton numunelerinin iç yapılarındaki mineralojik analizleri X-ışını difraktometrisi (XRD) ile yapılmıştır. XRD bütün kristal fazların atomlarının dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını kendine özgü bir düzende kırması temeline dayanır. XRD analizi esnasında numune tahrip olmaz ve çok az miktarda numune de bile analiz yapmak mümkündür. Bakır levhaya yollanan elektron demetlerinden yansıyan X-ışını demetleri numunelerin üzerine gönderilir. Numunelerden yansıyan ışınlar detektörler vasıtasıyla belirlenir ve kristal yapıya özgü kırınım desenleri oluşturulur. Oluşturulan desenler numunelerin kimyasal özellikleri ve yapılarıyla ilgili bilgi vermektedir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Üretilen geopolimer beton numunelerin yüzeyini tarayarak görüntü elde edebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Numunelerin yüzeyinin taranması bir elektron demetiyle gerçekleşir. Bu elektronlar numune bulunan atomlarla etkileşime girerek farklı sinyaller meydana getirir. Görüntünün elde edilebilmesi için sinyaller dedektörler yardımıyla toplanarak bilgisayara aktarılır. Elde edilen SEM görüntüleri sayesinde numunelerin iç yapı değişimi, boyutu ve bileşim yapıları hakkında bilgi elde edilir.

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

Üretilen geopolimer beton numunelerdeki moleküllerin bağ yapıları hakkında bilgi sahibi olabilmek için fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) kullanılmıştır. FT-IR'ın esası moleküllerin içindeki bağların üzerine gönderilen kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Taze Beton Kıvam Deneyi Sonuçları

Tablo 13'te kıvam tayini deney sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre karışımdaki YFC oranının artmasıyla yayılma çapı azalmıştır. Nath and Sarker (2014) yaptıkları çalışmada benzer şekilde karışımdaki cüruf içeriği arttıkça çökme ve yayılma çapı değerleri azalmıştır.

Tablo 13. Taze Beton Kıvam Deneyi Sonuçları

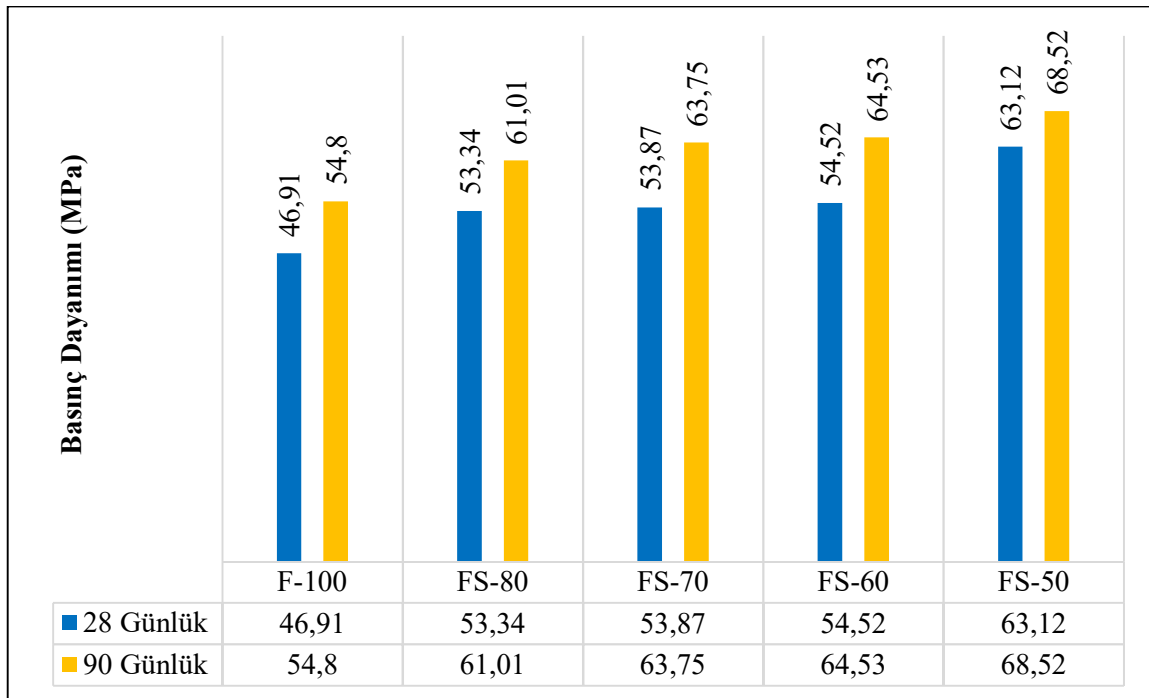
Karışım Grubu	Yayılma Çapı (cm)
F-100	20
FS-80	19
FS-70	17
FS-60	17
FS-50	16,5

Basınç Dayanımı

28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları

Basınç dayanımı özelliği betonun diğer özellikleriyle bağlantılı olduğu için kullanılan en yaygın özelliktir ve diğer mekanik özellikleriyle alakalı da bize bilgi verir. Bu çalışmada 48 saat 90°C ısı kürünü tamamlayan numuneler basınç dayanımı testine kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra 28 ve 90 günlük basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) ve ASTM C39/C39M standartlarına göre test edilmiştir sonuçlar Şekil 44'te verilmiştir.

Basınç dayanımı testi sonuçlarına göre F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımları sırasıyla 46,91 MPa, 53,34 MPa, 53,87 MPa, 54,52 MPa ve 63,12 MPa'dır. 90 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları ise sırasıyla 54,8 MPa, 61,01 MPa, 63,75 MPa, 64,53 MPa ve 68,52 MPa'dır. Şekil 44'te numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya göre numuneler dayanımlarının çoğunu 28 günün sonunda tamamlamıştır.



Şekil 44. 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları

Akbulut (2020) çalışmasında %85'inin tamamlandığını ifade etmektedir. Bu ifade Şekil 44'teki sonuçları desteklemektedir. 90 günün sonunda sırasıyla dayanımlar %17, %15, %18, %18 ve %9 oranlarında artmıştır. Geopolimer betonda ileri yaşlarda reaksiyona girecek bileşenlerin azalmasından kaynaklı dayanım artışının yavaşladığı gözlemlenmiştir (Rajarajeswari and Dhinakaran 2016; Karahan *et al.* 2017).

Basınç dayanımı sonuçlarına göre Şekil 44'te görüldüğü gibi karışımlarda YFC oranının artmasıyla 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının her ikisinde de artış gözlenmiştir. En düşük basınç dayanımı sonuçları F-100 grubunda, en yüksek basınç dayanımı sonuçları ise FS-50 grubunda gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin YFC'nin CaCO_3 miktarının olduğu düşünülmektedir (Haddad and Alshbuol 2016).

Literatürde yapılan çalışmalarda YFC içeriğinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı desteklenmiştir. %20 YFC içeren geopolimer betonun %10 YFC içerene göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu bildirilmiştir. YFC'nin karışıma eklenmesi sonucunda kalsine edilmiş malzeme miktarının artmasıyla matrisin yapısı iyileştirilmiş böylece oluşan bağlayıcının daha yoğun mikro yapıya ulaşması dayanımın artış sebebi olarak ifade etmiştir (Van Jaarsveld *et al.* 2002; Phoo-ngernkhama *et al.* 2013; Deb *et al.* 2014).

Nath and Sarker (2014) yaptıkları çalışmada uçucu kül içeren geopolimer betonlara %10, %20 ve %30 oranlarında yüksek fırın cürufu eklenerek numuneler üretmişlerdir. Bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımları cüruf ilavesiz kontrol betonuna göre %33, %74 ve %110 daha yüksektir.

Bellum *et al.* (2020) çalışmalarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeriğinin artmasıyla dayanımın artmasının sebebinin öğütülmüş yüksek fırın cürufundaki Ca elementlerinin reaksiyona girerek C-S-H ve C-A-S-H'ı meydana getirmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca bu durumun geopolimer betonun dayanımının gelişimini de arttırdığını belirtmişlerdir.

Basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında alkali aktivasyonla UK ve YFC kullanılarak üretilen geopolimer betonun, normal betona alternatif olabileceği ve inşaat sektöründe kullanılabilecek yeterli dayanıma sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım sonuçları

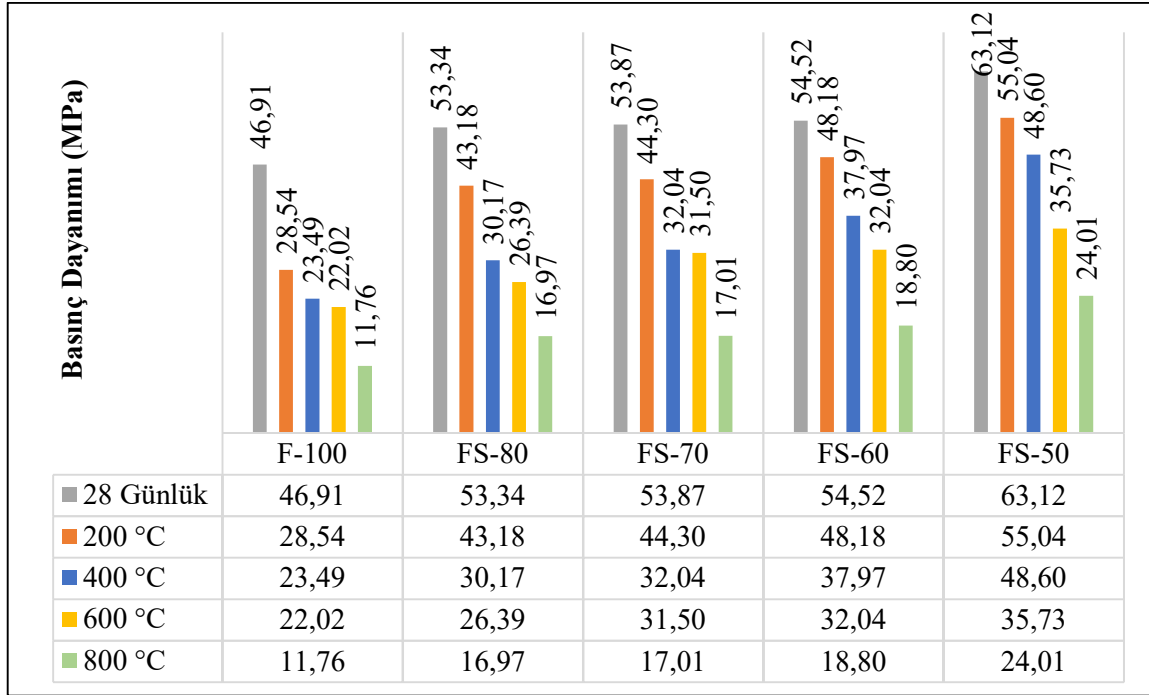
Betonlar hizmet ömürleri boyunca çeşitli sektörlerde ve yangınlar sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalırlar ve yüksek sıcaklıklar yapılarada büyük hasarlar meydana getirirler. Yangın sırasında sıcaklıkların 200°C-1200°C arasında yükseldiği belirtilmiştir. Bu sebeple yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu sıcaklıklara karşı literatürdeki çalışmalarda geopolimer betonun göstermiş olduğu stabilitenin normal betondan daha iyi olduğu ve normal betona alternatif olabileceği gözlemlenmiştir (Ataman 1991; Aygörmez 2018; Akbulut 2020).

Bu çalışmada geopolimer betonlar yüksek sıcaklık etkisi deneyi için 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara 2 saat boyunca maruz bırakılmıştır. Maruz kalma süresi tamamlandıktan sonra yüksek sıcaklık fırınının kapağı aralanmıştır ve numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Deney sonunda numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür.

Şekil 45'te numunelerin 28 günlük dayanımları ve 200°C, 400°C, 600°C, 800°C sıcaklıklardan sonraki basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma incelendiğinde bütün karışım gruplarında sıcaklık arttıkça basınç dayanımında düşüş olduğu gözlemlenmiştir (Kong *et al.* 2007). 200°C sıcaklıktan sonra Şekil 45'teki 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının dayanımları sırasıyla %39,16, %19, %17,76, %11,63, %12,8 oranlarında azalmıştır. 400°C sıcaklıktan sonra basınç dayanımları sırasıyla %49,93, %43,44, %40,52, %30,26, %23 oranlarında azalmıştır. 600°C sıcaklıktan sonra %74,38, %50,52, %41,53, %41,23, %43,39 oranlarında azalmıştır. 800°C sıcaklıktan sonra %74,93, %68,19, %68,40, %68,80, %61,96 oranlarında azalmıştır.

Karışım gruplarında genellikle en az dayanım kaybı FS-50 karışımında en fazla azalma ise F-100 karışımında gözlemlenmiştir. Yani karışımında cüruf miktarının artmasıyla dayanım kaybının azaldığı sonucuna varılır (Abdel-Ghani *et al.* 2018). Škvára *et al.* (2005) çalışmalarında uçucu külün yüksek sıcaklık direncinin zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle 500°C'den sonra bu çalışmadaki sonuçları destekler nitelikte dayanım düşüşün daha fazla

olduğunu ve sebebinin yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen erimelerden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.



Şekil 45. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Daniel *et al.* (2008) çalışmalarında uçucu kül bazlı geopolimer betonlar üretmişlerdir. Numuneleri 800°C 'ye maruz bıraktıktan sonra basınç dayanımı sonuçlarında %65'e kadar azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. 800°C'ye maruz kalan geopolimer betonlardaki basınç dayanımı düşüşüne matriste jel yapısının parçalanmasının neden olduğu ifade edilmiştir (Junaid 2015). Şekil 45'teki sonuçları destekler nitelikte Kuranlı *et al.* (2022) yaptıkları çalışmada geopolimer betonları 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakmıştır ve dayanımların 600°C ve 900°C sıcaklıklarından sonra ortalama %54 ve %93 oranlarında düştüğünü ifade etmişlerdir.

Genel olarak sıcaklık artışıyla basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda bu sonuç desteklenmiştir ve bu düşüşün sebebinin ara yüzdeki mikro çatlakların ve matris ile agregalar arasındaki ısı uyumsuzluğunun olduğu ifade edilmiştir. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregaların yüksek sıcaklık etkisiyle genleşmesi sonucunda basınç dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir (Topçu ve Toprak 2009; Singh *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2016; Kantarcı 2018). Geopolimer betonların yüksek sıcaklık karşısında dayanıklı bir yapı göstermesinin sebebinin alüminosilikat malzemelerdeki CaO oranının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Lyon *et al.* 1997).

Yüksek sıcaklık etkisinin agregalarla matris arasında meydana getirdiği büzülme ve genleşme geopolimer betonda mikro çatlaklar gibi yeni oluşumlar meydana getirir. Bu büzülme

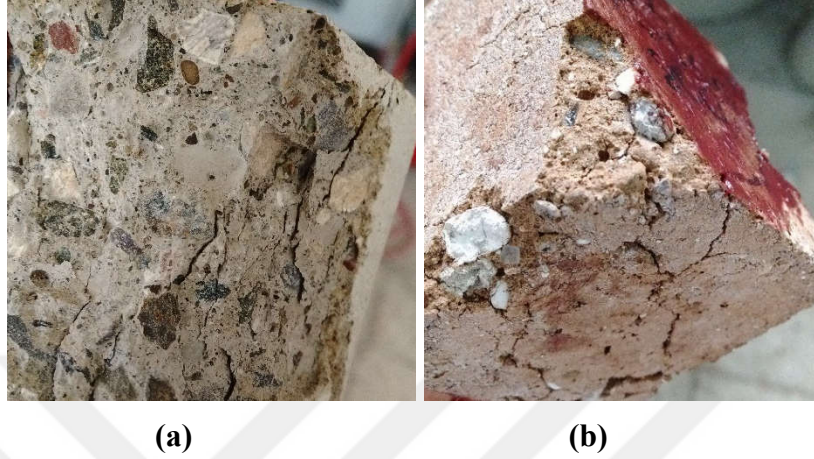
ve çatlakların sebebinin geopolimer betonda sıcaklık etkisiyle buharlaşan suyun olduğu bildirilmiştir. Ayrıca 1000°C'ye kadar geopolimer betonların normal betonlara göre kararlılığını koruduğu da ifade edilmiştir (Ren *et al.* 2016; Akbulut vd 2021; Turhan and Polat 2021). Normal betonla karşılaştırıldığında literatürde normal betonun 400°C'de bozulma gösterdiği ve belirgin mukavemet değişimlerinin olduğu, geopolimer betonun ise 800°C-1200°C'ye kadar kararlı yapısını koruduğu ve parçalanmadığı belirtilmiştir. Geopolimer betonun normal betona göre yüksek sıcaklık direncinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (McNulty 2009; Duan *et al.* 2015; Türkmen *et al.* 2016; Kantarcı 2018; Zhang *et al.* 2019).

Şekil 46'da F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında fiziksel değişimleri görülmektedir. Fiziksel görünümler incelendiğinde 200°C sonrasında tüm karışım gruplarında değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. 400°C'den sonra numunelerin yüzeyinde pembeye dönük bir renk değişimi gözlemlenmiştir. 600°C'den sonra ise renk değişimi griye dönmüştür ve kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 46. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası numunelerin fiziksel görünümü

Literatürde NaOH ve Na₂SiO₃'ün birlikte kullanıldığı karışımlarda benzer renk değişimleri gözlemlenmiştir (Topçu ve Toprak 2009). 800°C sonrasında ise renk artık iyice koyulaşmış ve çatlaklar belirginleşmiştir (Kong *et al.* 2007). Ayrıca basınç dayanımı testi için kırım yapıldıktan sonra numunenin içindeki agregaların fazlasıyla yandığı ve renklerinin beyaza döndüğü Şekil 47'de görülmektedir.



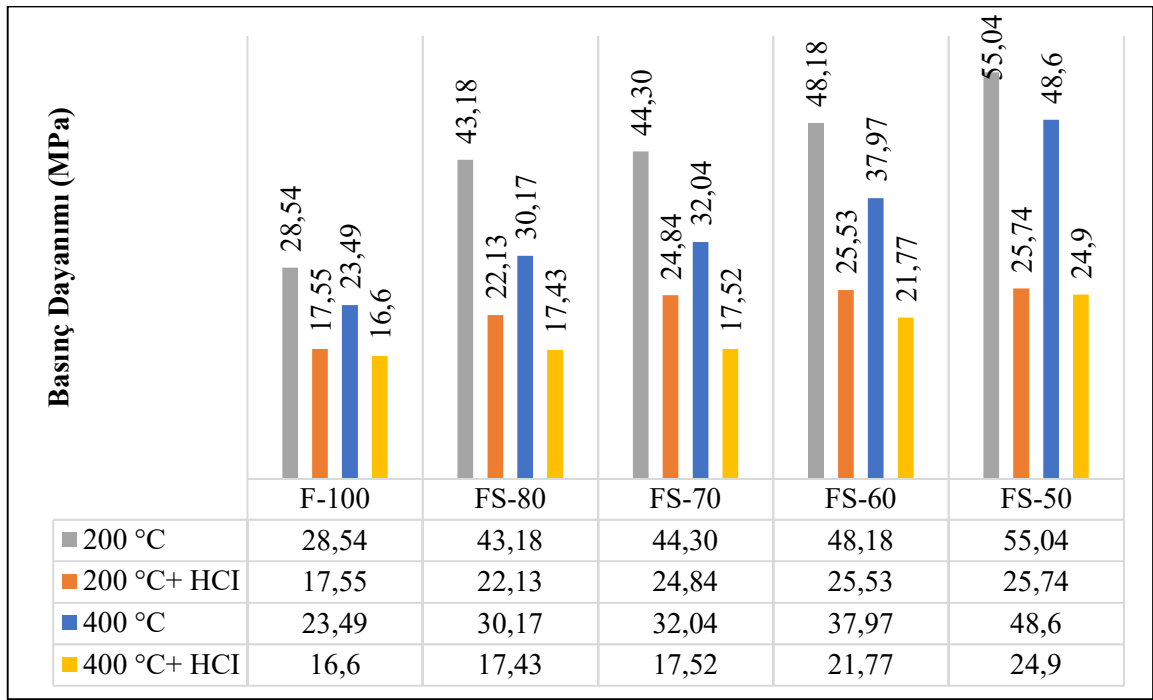
Şekil 47. Geopolimer betonun kırım sonrasında 28 günlük (a) ve 800 °C sonrası (b) fiziksel görünümü

Kantarıcı çalışmasında yüksek sıcaklık sonrasında gözlemlenen renk değişimlerine geopolimerde meydana gelen dehidrasyonun ve agregalarda oluşan yapısal değişimlerin sebep olduğunu bildirmiştir (Kantarıcı 2018). Başka bir çalışmada ise perlit esaslı ve UK ve YFC katkılı üretilen geopolimer betonların yüksek sıcaklıktan sonra bütünlüğünü koruduğu ve herhangi bir dökülme veya parçalanma gözlemlenmediği ifade edilmiştir (Turhan 2020).

Zhang *et al.* (2020) çalışmalarında geopolimer betonları 300°C ve 400°C sıcaklıklara maruz bırakmışlar ve sonuçta ince çatlaklar gözlemlemişlerdir. 500°C'den sonra çatlakların ve renk değişikliklerinin belirginleştiğini gözlemlemişlerdir. Literatürdeki çalışmalarda 700°C'de kılcal çatlaklar gözlemlendiği ayrıca 500°C ve 700°C aralığındaki sıcaklıklar sonrasında numunelerin griye dönüştüğü belirtilmiştir (Kızılkıranat and Yüzer 2008; Joseph and Mathew 2015; Türkme *et al.* 2016; Hosan *et al.* 2016; Akbulut 2020).

Yüksek sıcaklık + HCl etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları

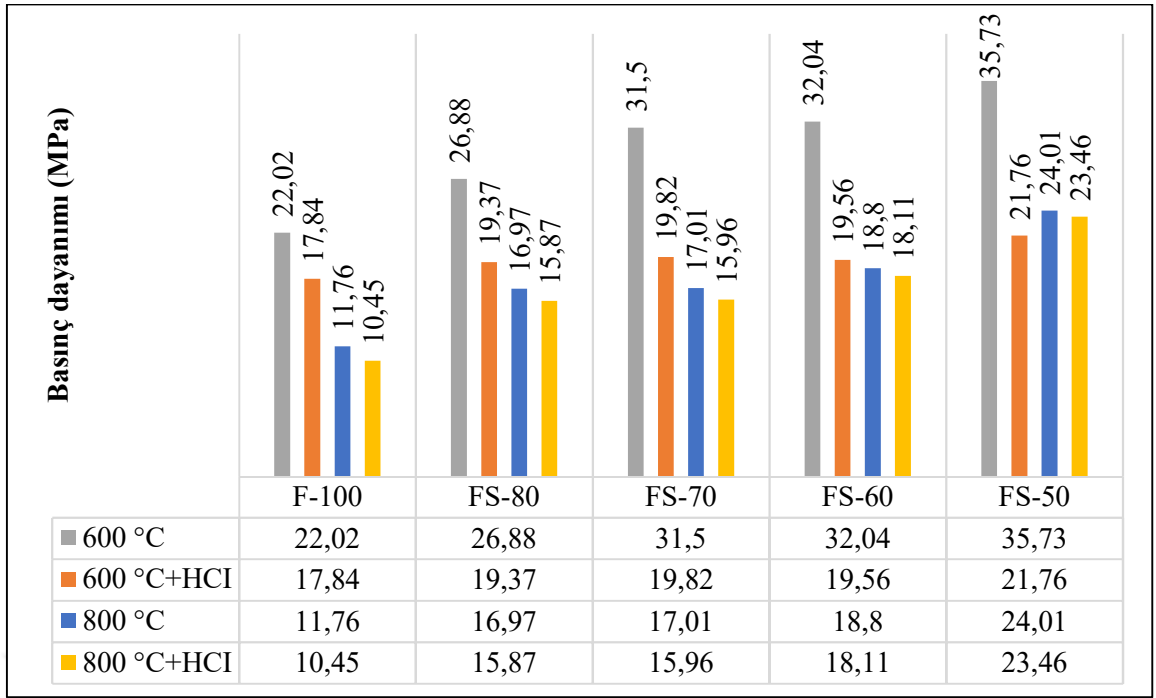
Çevremizde beton, asit etkisiyle bataklık ve kanalizasyon suları, arıtma tesisleri, bacalar, fabrikalardan sızan sular gibi yerlerde karşılaşır. Bu çalışmada da geopolimer betonlar 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve 30 gün boyunca %5 konsantrasyonlu HCl çözeltisinde bekletilmiştir. Çözelti, derişimi değişmemesi amacıyla 15 günde bir yenilenmiştir. 30 gün sonunda HCl asit çözeltisinden çıkarılan numuneler kuruduktan sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.



Şekil 48. 200 °C- 400 °C + HCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 48’de 200°C ve 400°C sonrası HCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 200°C ve 400°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 200°C+HCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %38,5, %48,75, %43,92, %47,01, %53,23 oranlarında azalmıştır. 400°C+HCl sonrasında ise sırasıyla basınç dayanımları %29,33, %42,23, %42,09, %42,67, %48,77 oranlarında azalmıştır. Şekil 48’de basınç dayanımlarındaki azalma oranlarına göre karışımlardaki YFC miktarının artmasıyla yüksek sıcaklık sonrasında HCl çözeltisi etkisi ile dayanımındaki azalma oranının da arttığı gözlemlenmiştir. En fazla dayanım azalması FS-50 karışım grubunda, en az azalma ise F-100 grubunda olmuştur.

Fernández-Jiménez *et al.* (2010) uçucu küllü geopolimer betonlar üretmiştir ve asit direncini normal betonla karşılaştırmıştır. Asit etkisi sonrası basınç dayanımı kaybının uçucu küllü geopolimer betonda daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde Aiken *et al.* (2018) de çalışmasında YFC’nin asit direncini UK’dan düşük olduğunu belirtmiştir. Bunun sebebinin içeriğindeki kalsiyum miktarının fazlalığı olduğunu ve kalsiyum miktarının fazla olmasının kireçlenmeye ve genleşme ile fazla alçı taşı oluşumuna sebep olduğunu ifade etmiştir. Benzer şekilde bu çalışmada yüksek sıcaklık+HCl etkisinden sonra diğer gruplara göre F-100 daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 49. 600 °C- 800 °C + HCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 49’da 600°C ve 800°C sonrası HCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 600°C ve 800°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 600°C+ HCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %18,98, %27,94, 37,08, %38,95, %39,1 oranlarında azalmıştır. 600°C+ HCl sonrasında yine 200°C+ HCl ve 400°C+ HCl sonrasındaki gibi YFC miktarının artmasıyla basınç dayanımındaki azalma oranının da arttığı görülmektedir. 800°C+ HCl sonrasında ise sırasıyla basınç dayanımları %11,13, %6,48, %6,17, %3,67, %5,44 oranlarında azalmıştır. Diğer sıcaklıkların aksine 800°C+ HCl sonrasında azalmalara göre cüruf miktarının artmasıyla basınç dayanımı azalma oranı da genellikle azalmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık sonrası HCl’ye maruz bırakılan numunelerde uygulanan sıcaklığın artmasıyla da bütün gruplarda basınç dayanımının azalma oranının azaldığı Şekil 48 ve 49 ‘da gözlemlenmektedir.

Genel olarak geopolimer betonların asit etkisiyle dayanımının azalmasının sebebinin alüminosilikat yapının bozulması ile Si-OH ve Al-OH bağ sayısının çoğalması ile depolimerizasyonun meydana gelmesi olduğu belirtilmiştir (Bakharev 2005; Djobo *et al.* 2016). Ayrıca normal betonda kalsiyum hidroksit miktarının daha fazla olması sebebiyle tuz oluşumu geopolimer betonlardan daha fazla gerçekleşir. Asit etkisi sonrasında oluşan tuzlar yapısında su barındırır sonuçta içeriğindeki bu su, çatlaklara ve yapıda bozulmaya sebep olur. Geopolimer betonlarda tuz oluşumunun daha az olması mekanik ve fiziksel özelliklerinin normal betona göre daha iyi olacağını gösterir (Topçu ve Canbaz 2008; Fernando and Said 2011; Ariffin *et al.* 2013).

Şekil 50’de F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının 200°C ve 400°C sonrası HCl etkisi neticesinde fiziksel değişimleri, Şekil 51’de ise 600°C ve 800°C sonrası asit etkisi neticesinde fiziksel değişimleri görülmektedir. Şekil 50’de 200°C ve 400°C sonrasında asit etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde kahverengiye doğru koyulaşma olduğu ve numunelerin yüzeyinde kılcal çatlakların ve gözeneklerin belirginleştiği, pürüzlülüğün olduğu gözlemlenmiştir (Kantarıcı 2018; Yavuz 2020; Shariati *et al.* 2021).



Şekil 50. 200°C+ HCl ve 400°C+ HCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü

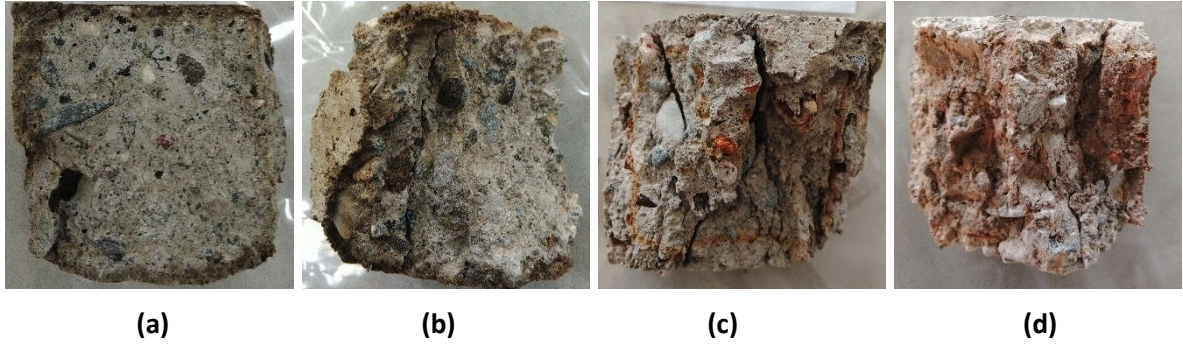
Şekil 51’de 600°C sonrasında asit etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde griye doğru bir koyulaşma, 800°C sonrasında asit etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde ise açık kahverengiye doğru bir renk değişimi gözlemlenmiştir. Çatlaklar,

pürüzlülük ve gözenekli yapının belirginleşmesi her iki sıcaklıkta da belirgindir. Numunelerde gözlemlenen renk değişiminin geopolimer jel yapısıyla asitin reaksiyonu sonucunda oluştuğu saptanmıştır (Djobo *et al.* 2016). Ayrıca numunelerde belirgin bir kütle kaybı olmadığı da gözlemlenmektedir



Şekil 51. 600°C+ HCl ve 800°C+ HCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü

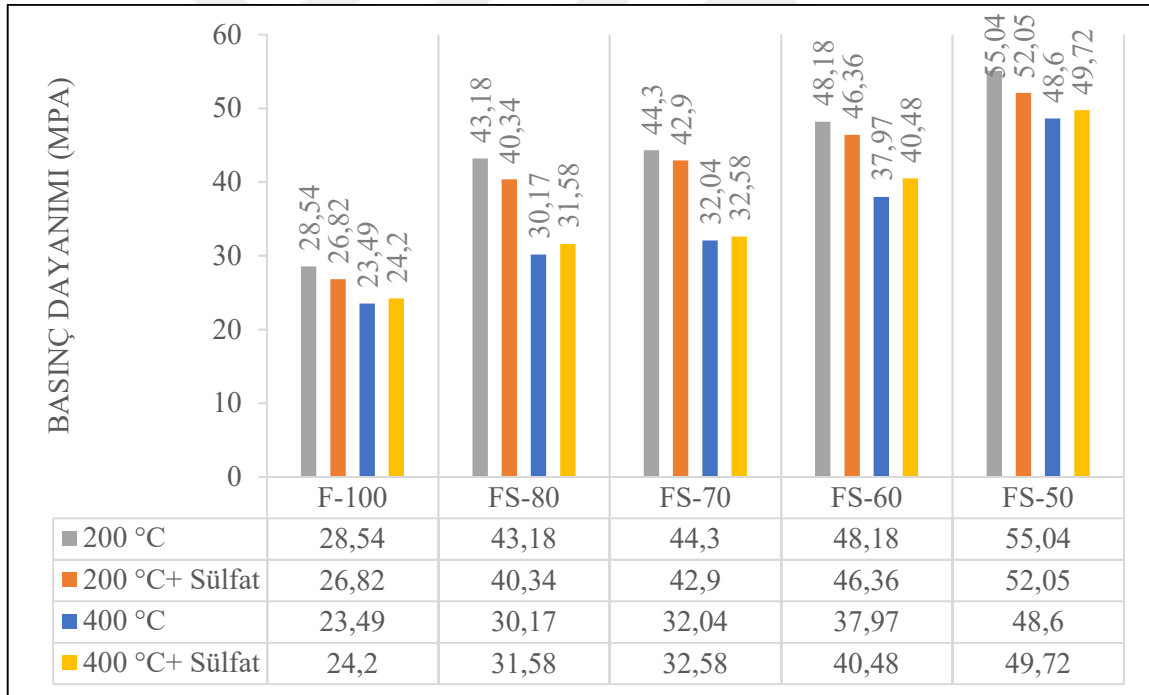
Şekil 52’de 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl’ye maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülere baktığımızda agregaların sıcaklık arttıkça renklerinin beyaza döndüğü, matris yapının parçalandığı ve asitten etkilenme derecesinin arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 52. 200°C+HCl (a), 400°C+HCl (b), 600°C+HCl (c) ve 800°C+HCl (d)'ye maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri

Yüksek sıcaklık + Na₂SO₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

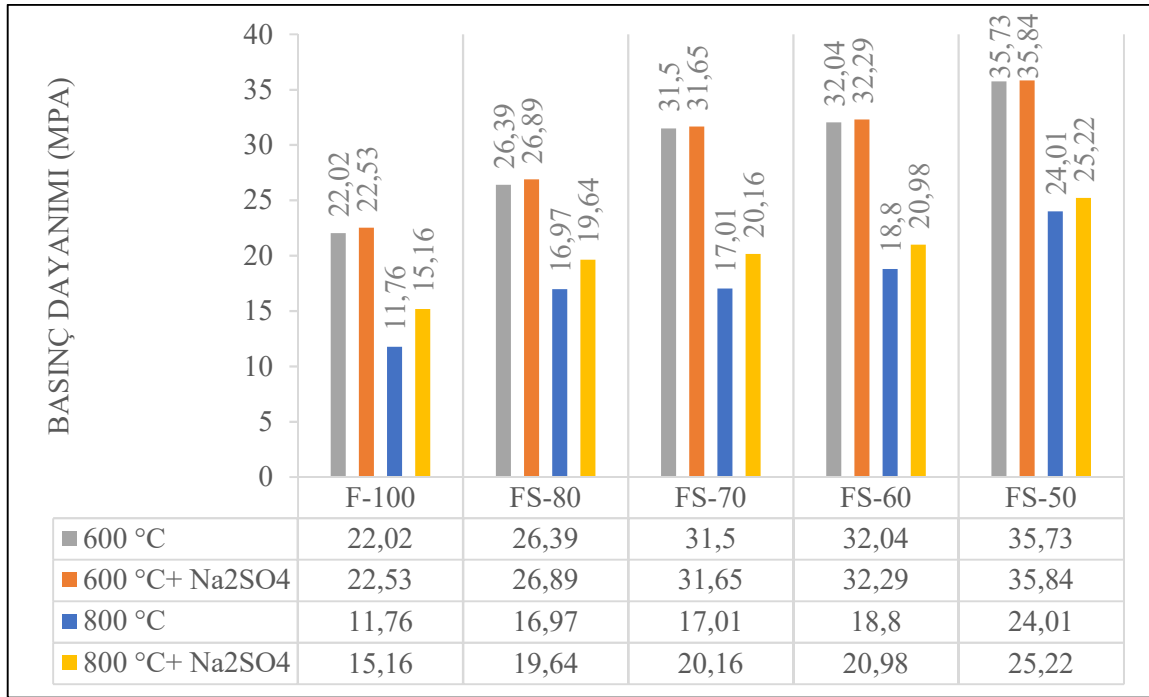
Geopolimer betonlar 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisinde 30 gün boyunca bekletilmiştir. Çözelti derişiminin değişmemesi amacıyla 15 günde bir çözelti yenilenmiştir. 30 gün sonunda Na₂SO₄ çözeltisinden çıkarılan numuneler kuruduktan sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.



Şekil 53. 200°C- 400°C + Na₂SO₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 53'te 200°C ve 400°C sonrası Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 200°C ve 400°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 200°C + Na₂SO₄ sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %6,03, %6,58, %3,16, %3,78, %5,43 oranlarında azalmıştır. Bu dayanım kaybının numunelerdeki çatlakların varlığından

kaynaklanabilmektedir (Thokchom *et al.* 2010). 400°C + sülfat sonrasında ise sırasıyla %3,02, %4,67, %8,31, %6,61, %2,30 oranlarında artmıştır.



Şekil 54. 600°C- 800°C + Na₂SO₄ etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 54'te 600°C ve 800°C sonrası Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 600°C ve 800°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 600°C + Na₂SO₄ sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %2,32, %1,89, %0,48, %0,78, %0,31 oranlarında artmıştır. 800°C + Na₂SO₄ sonrasında ise sırasıyla %28,91, %15,73, %18,52, %11,6, %1,65 oranlarında artmıştır.

Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilen karışımlarda sülfat etkisi sonrası dayanım artışı gözlemlenmektedir. Artışın sebebinin ise numunelerin çözeltide bekletildiği sürece sülfat iyonlarının numunenin yapısına nüfus ederek geopolimerizasyon reaksiyonuna katılması ile kristaller meydana getirmiş olduğu belirtilmektedir (Bakharev 2005; Chindaprasirt *et al.* 2014; Aygörmöz 2018). Sonuçlara göre karışım gruplarında YFC oranının artmasıyla basınç dayanımındaki düşüş azalmıştır (Yavuz 2020; Uğurlu 2021). En iyi basınç dayanımı sonuçlarını FS-50 grubu vermiştir.

Şekil 55'te F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının 200°C ve 400°C sonrası Na₂SO₄ etkisi neticesinde fiziksel değişimleri, Şekil 56'da ise 600°C ve 800°C sonrası Na₂SO₄ etkisi neticesinde fiziksel değişimleri görülmektedir. Şekil 55'te 200°C ve 400°C sonrasında Na₂SO₄ etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde açık kahverengiye doğru bir renk değişimi, yüzeyde matlaşma ve pürüzlülük gözlemlenmektedir. Ayrıca yüzeyde

tanecik şeklinde sodyum sülfat tuz kristalleri görülmektedir (Fernández-Jiménez *et al.* 2007). 30 gün boyunca Na_2SO_4 etkisine maruz kalan geopolimer betonlardan hiçbirinde boyut değişimi gözlemlenmemiştir.



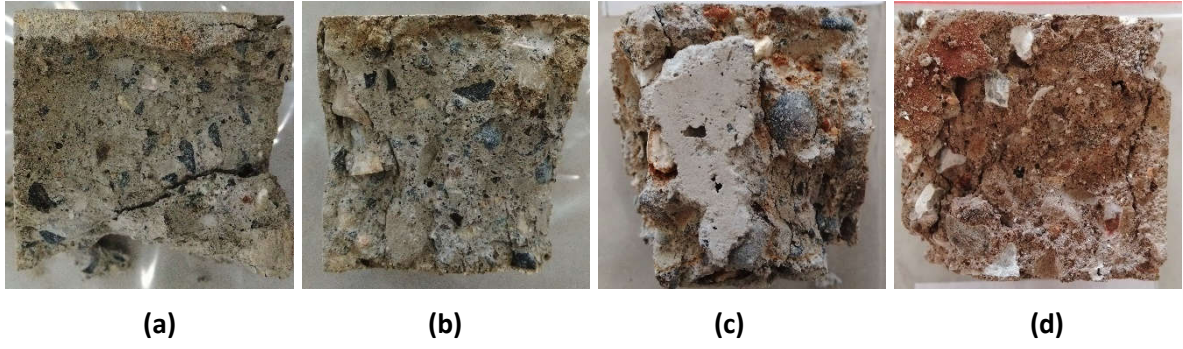
Şekil 55. 200°C+ Na_2SO_4 ve 400°C+ Na_2SO_4 sonrası numunelerin fiziksel görünümü

Şekil 56'da 600°C sonrasında Na_2SO_4 etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde koyu griye dönük renk değişimi, yüzeyde matlaşma ve pürüzlülük gözlemlenmiştir. 800°C sonrasında Na_2SO_4 etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde ise koyu pembeye dönük renk değişimi, yüzeyde pürüzlülük ve matlaşma gözlemlenmiştir. Ayrıca belirgin çatlaklar ve yüzeyde beyaz lekeler oluşmuştur (Yavuz 2020; Aygörmez 2020; Tammam 2021). Sonuçta en fazla fiziksel değişim 800°C sonrasında Na_2SO_4 etkisi sonrasında gözlemlenmiştir.



Şekil 56. 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrası numunelerin fiziksel görünümü

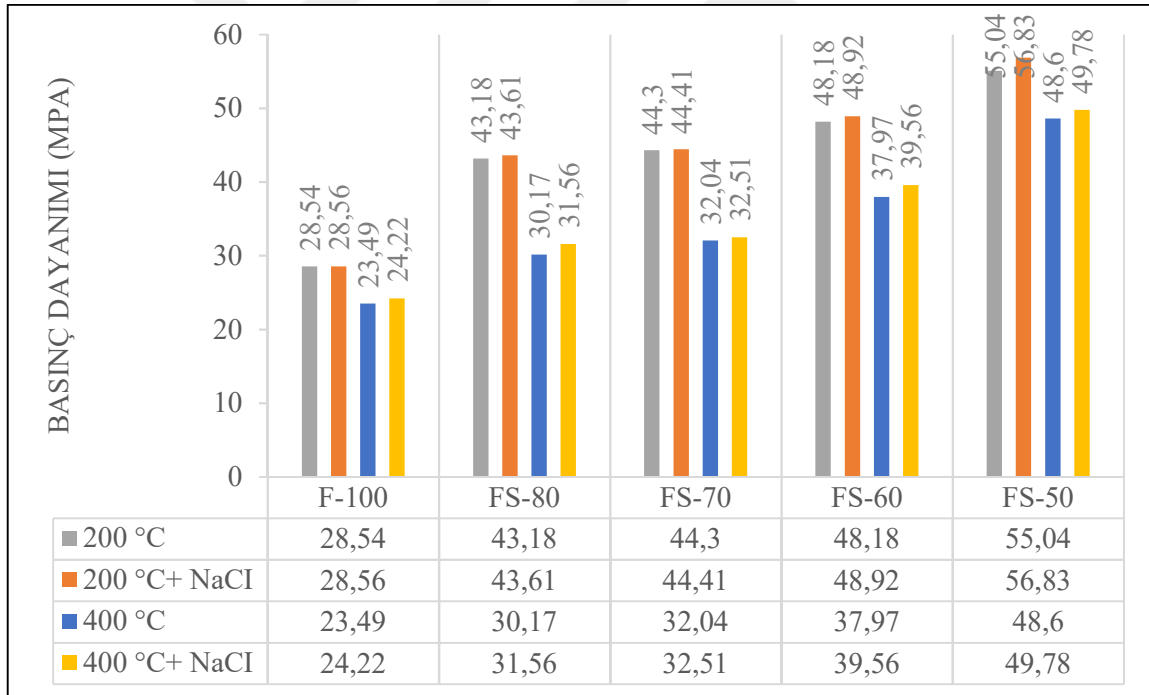
Şekil 57’de 200°C+ Na₂SO₄, 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄’ye maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülere baktığımızda özellikle 800°C+Na₂SO₄ etkisinden sonra agregaların beyazlaştığı ve matris yapının parçalandığı gözlemlenmektedir. 600°C+Na₂SO₄ etkisine kadar matris yapısında ve numunelerde fazla bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 57. 200°C+Na₂SO₄ (a), 400°C+Na₂SO₄ (b), 600°C+Na₂SO₄ (c) ve 800°C+Na₂SO₄ (d)'e maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri

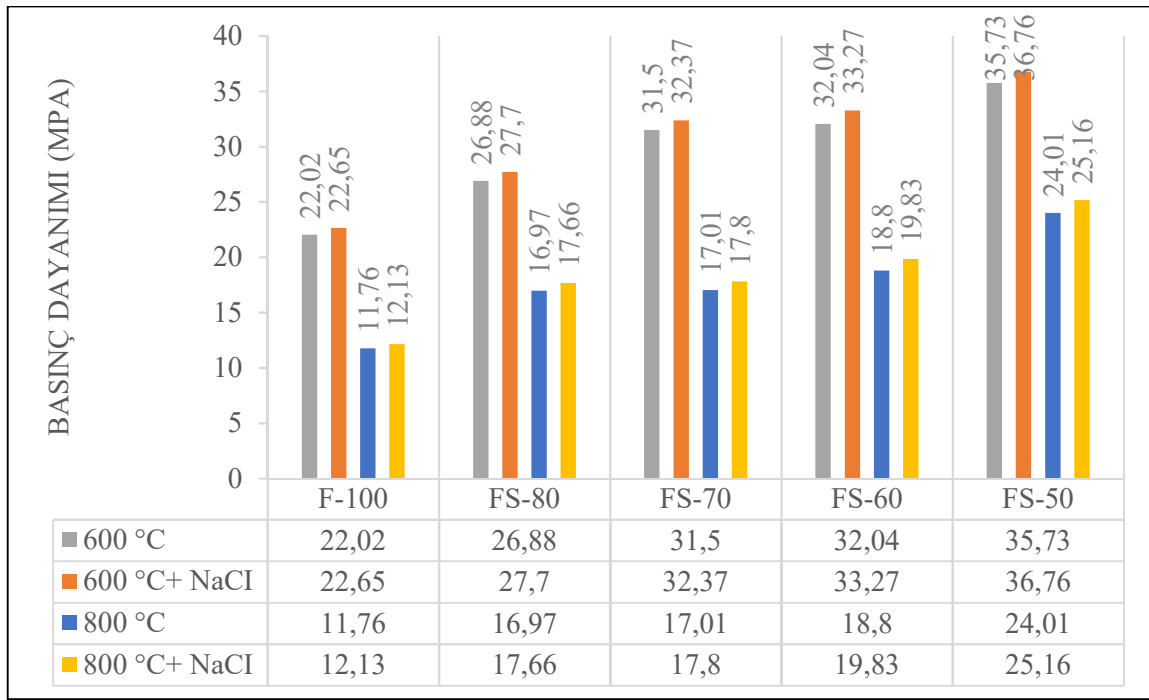
Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Geopolimer betonlar 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Daha sonra %5 konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde 30 gün boyunca bekletilmiştir. Çözelti derişimin değişmemesi amacıyla 15 günde bir yenilenmiştir. 30 gün sonunda NaCl çözeltisinden çıkarılan numuneler kuruduktan sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.



Şekil 58. 200 °C- 400 °C + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 58'de 200°C ve 400°C sonrası NaCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 200°C ve 400°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 200°C + NaCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %0,07, %0,1, %0,3, %1,54, %3,25 oranlarında artmıştır. 400°C + NaCl sonrasında ise sırasıyla %3,11, %4,61, %8,08, %4,19, %2,43 oranlarında artmıştır.



Şekil 59. 600 °C- 800 °C + NaCl etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçları

Şekil 59’da 400°C ve 600°C sonrası NaCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ile 600°C ve 800°C sonrasındaki basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı görülmektedir. Sonuçlara göre 600°C + NaCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının basınç dayanımları sırasıyla %2,86, %3,05, %2,76, %3,84, %2,88 oranlarında artmıştır. 800°C + NaCl sonrasında ise sırasıyla %3,15, %4,07, %4,64, %5,48, %1,41 oranlarında artmıştır. Mineral katkıların kullanılmasıyla üretilen geopolimer betonlarda tuz etkisi sonrasında dayanım artışı olabilmektedir (Ren *et al.* 2017; Aygörmez 2018; Yavuz 2020). En iyi basınç dayanımı sonuçlarını FS-50 karışım grubu vermiştir. Fakat genellikle cüruf miktarı arttıkça basınç dayanımında gözlemlenen artış oranı azalmıştır. Artış oranları %0,07 ile %4,64 arasında olduğu için aslında ikinci durabilite etkisinin dayanımı çok fazla etkilemediği sonucuna varabiliriz.

Şekil 60’ta F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarının 200°C ve 400°C sonrası NaCl etkisi neticesinde fiziksel değişimleri, Şekil 61’de ise 600°C ve 800°C sonrası NaCl etkisi neticesinde fiziksel değişimleri görülmektedir. Şekil 60’ta 200°C sonrasında tuz etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde kahverengiye doğru bir renk değişimi ayrıca yüzeyde pürüzlülük ve matlaşma olduğu da gözlemlenmiştir. 400°C sonrası tuz etkisine maruz bırakılan numunelerde ise yine yüzeyde pürüzlülük ve matlaşma görülmektedir. Numunelerin renginde ise koyulaşma söz konusudur. İki sıcaklıkta da kılcal çatlaklar fazla belirgin değildir fakat birkaç numunede boşluk oluşumu gözlemlenebilmektedir (Yavuz 2020).



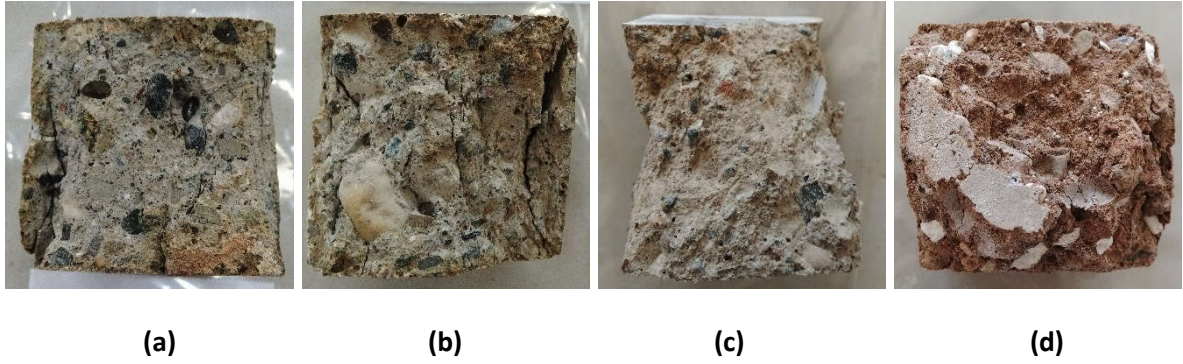
Şekil 60. 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü

Şekil 61’de 600°C ve 800°C sonrası NaCl etkisine maruz bırakılan numunelerin renklerinde beyazlama ve numunelerin yüzeyinde tuz parçacıklarının ve pürüzlülüğün olduğu gözlemlenmektedir. 800°C sonrası NaCl etkisine maruz kalan numunelerde ise ekstra çatlaklar ve parçalanmalar gözlemlenmektedir (Okoye *et al.* 2017).



Şekil 61. 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrası numunelerin fiziksel görünümü

Şekil 62’de 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl’ye maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülere baktığımızda özellikle 600°C+NaCl etkisinden sonra matris yapının beyazladığı gözlemlenmektedir. 800°C+NaCl etkisinden sonra ise yine agregalarda beyazlık matris yapısında parçalanma gözlemlenmiştir. 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl etkisinden sonra numunede fazla bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 3. 200°C+NaCl (a), 400°C+NaCl (b), 600°C+NaCl (c) ve 800°C+NaCl (d)'e maruz bırakılan numunelerin kırım sonrası görüntüleri

Kılcal Su Emme

28 ve 90 günlük kılcal su emme sonuçları

Kılcal su emme deneyi uygulanan numunelerin 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayıları Tablo 14'te gösterilmektedir. 28 ve 90 günlük numunelerin her ikisinde de en yüksek kılcal geçirimsizlik F-100 grubunda sırasıyla 0,45, 0,42, en düşük kılcal geçirimsizliğin ise FS-50 grubunda sırasıyla 0,73, 0,58 olarak ölçülmüştür. Sonuçlara göre YFC oranının artmasıyla genellikle kılcal su emme katsayısının azaldığı gözlemlenmektedir. YFC miktarının artmasıyla geopolimer betonlarda C-S-H miktarı artar ve geopolimer betonda gözeneklere dolar böylece gözenek oranı azalır sonuçta su emilimi de azalmış olur (Bellum *et al.* 2020). YFC oranının fazla olduğu numunelerde gözenekliliğinin daha az olması geopolimerizasyon reaksiyonunun daha iyi derecede gerçekleşmesi olarak yorumlanır (Part *et al.* 2015)

Tablo 14. 28 ve 90 Günlük Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi

Karışım Grubu	Kılcal Su Emme Katsayısı ($\text{g/m}^2 \times \text{h}^{0.5}$)	
	28 Günlük	90 Günlük
F-100	0,73	0,58
FS-80	0,45	0,47
FS-70	0,48	0,48
FS-60	0,47	0,45
FS-50	0,45	0,42

Yüksek sıcaklık sonrası kılcal su emme sonuçları

Geopolimer betonların 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasındaki kılcal su emme katsayıları Tablo 15'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarında sıcaklığın artmasıyla kılcal su emme katsayılarının da arttığı gözlemlenmiştir. En düşük kılcal su emme katsayı değerlerinin 400°C'ye kadar FS-50 grubundadır. Yani YFC oranının artmasıyla, 28 ve 90 günlük sonuçlarda olduğu gibi kılcal su

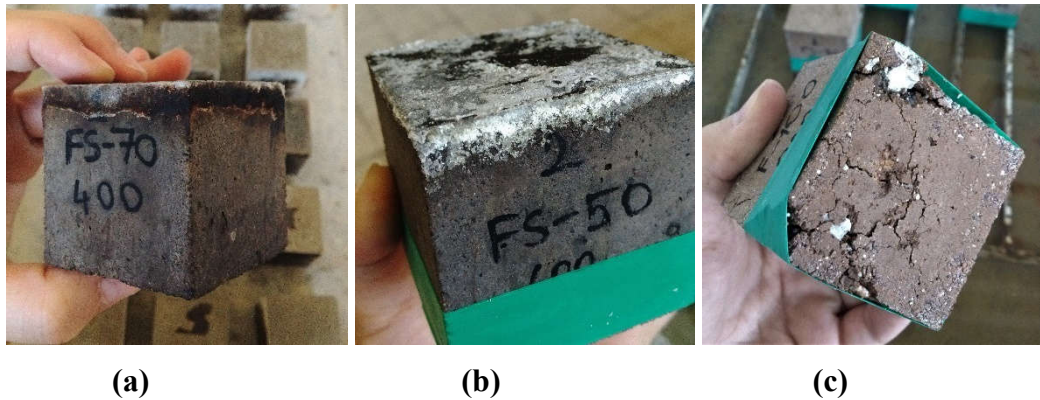
emme katsayı değerleri 200°C ve 400°C'den sonra azalmaktadır. Bunun YFC oranının artmasıyla matrisin daha kompakt ve yoğun yapıya sahip olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Xu *et al.* 2001).

600°C ve 800°C'den sonraki katsayı değerlerinin ise tüm gruplarda birbirine çok yakın olduğu ve diğer sıcaklıklara göre değerlerde belirgin bir artış olduğu belirlenmiştir (Kantarıcı 2018). 800°C'den sonra karışım gruplarında en yüksek kılcal su emme katsayısı değeri FS-50 grubunda en düşük katsayı değeri ise FS-80 grubunda gözlemlenmiştir. Sıcaklığın yükselmesiyle geopolimer betonlarda gözenekliliğin ve çatlakların artmasıyla su emme oranlarının arttığı bildirilmiştir (Duan *et al.* 2015; Saxena *et al.* 2017). Tüm sonuçlar incelendiğinde normal betona göre geopolimer betonun kılcal su emme katsayı değerlerinin daha düşük olduğu desteklenmiştir.

Tablo 15. Yüksek Sıcaklık Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişim

Karışım Grubu	Kılcal Su Emme Katsayısı ($\text{g/m}^2 \times \text{h}^{0.5}$)			
	200°C	400°C	600°C	800°C
F-100	0,95	1,5	1,78	1,98
FS-80	0,51	1,73	1,78	1,78
FS-70	0,48	1,8	1,82	1,83
FS-60	0,44	1,55	1,81	1,9
FS-50	0,42	0,82	1,77	2,06

200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında numunelere kılcal su emme deneyi uygulanmıştır ve görüntüleri Şekil 63'te verilmiştir. 200°C'ye maruz bırakılan numunelerde sadece emilen sudan kaynaklanan ıslaklık gözlemlenmiştir. 400°C ve 600°C'de sonra numunelerde Şekil 63a ve b'de görüldüğü gibi çiçeklenme gözlemlenmiştir. 800°C'den sonra ise Şekil 63c'de görüldüğü gibi numunenin suya temas eden kısmında ilk 5 dakikadaki su emiliminden kaynaklanan bir çatlama, parçalanma gözlemlenmiştir.



Şekil 63. 400°C (a), 600°C (b) ve 800°C (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri

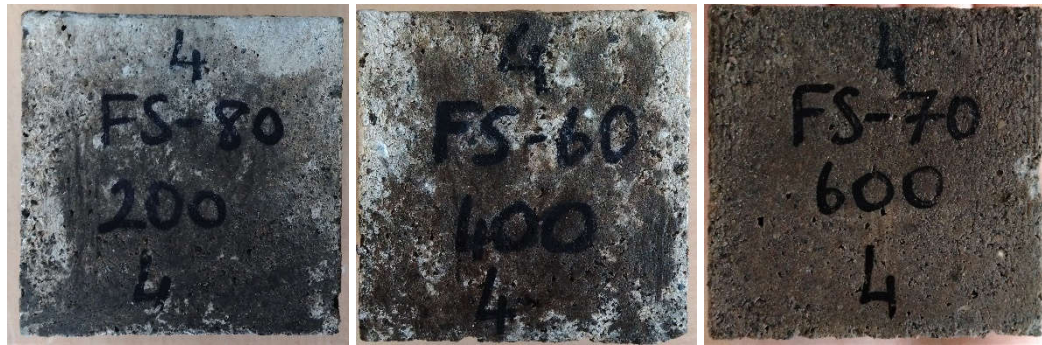
Yüksek sıcaklık + HCl etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları

Geopolimer betonların 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrası HCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme katsayıları Tablo 16’da gösterilmiştir. 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl maruz bırakılan numunelerde genellikle YFC oranının artmasıyla kılcal su emme katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir. 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasındaki bütün grupların kılcal su emme katsayıları birbirine çok yakındır.

Tablo 16. Yüksek Sıcaklık + HCl Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi

Karışım Grubu	Kılcal Su Emme Katsayısı (g/m ² x h ^{0,5})			
	200°C+HCl	400°C+HCl	600°C+HCl	800°C+HCl
F-100	1,83	1,52	2,14	2,03
FS-80	1,89	1,53	2,16	2,03
FS-70	1,96	2,12	2,2	2,11
FS-60	2	2,03	2,22	2,31
FS-50	2,05	2,02	2,26	2,4

En yüksek kılcal su emme katsayısı FS-50 grubunda en düşük katsayı değeri ise F-100 grubundan gözlemlenmiştir. Kılcal su emme katsayılarına göre yüksek sıcaklık sonrası asit etkisinde en iyi sonuçlar F-100 grubunda gözlemlenmiştir. Genel olarak ardışık durabilite testi için asit etkisine maruz bırakılan tüm grupların kılcal su emme katsayısında sadece yüksek sıcaklığa maruz kalan gruplara göre artış olduğu Tablo 15 ve 16’nın karşılaştırılmasıyla gözlemlenmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 64. 200°C+ HCl (a), 400°C+ HCl (b) ve 600°C+ HCl (c)’ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri

200°C+ HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+ HCl sonrasında numunelere kılcal su emme deneyi uygulanmıştır. Şekil 64’te görüldüğü gibi 200°C+ HCl, 400°C+HCl ve 600°C+HCl sonrasında numunelere uygulanan su emme deneyi sonucunda yüzeylerinde kahve rengi lekelerin olduğu gözlemlenmiştir. 600°C+HCl sonrasında ise numunelerin renginin

tamamen koyulaştığı gözlemlenmiştir. Yavuz (2020) çalışmasında YFC kullanılan geopolimer betonların asit sonrasında yüzeylerinde kahve rengi lekelerin oluştuğunu bildirmişti.

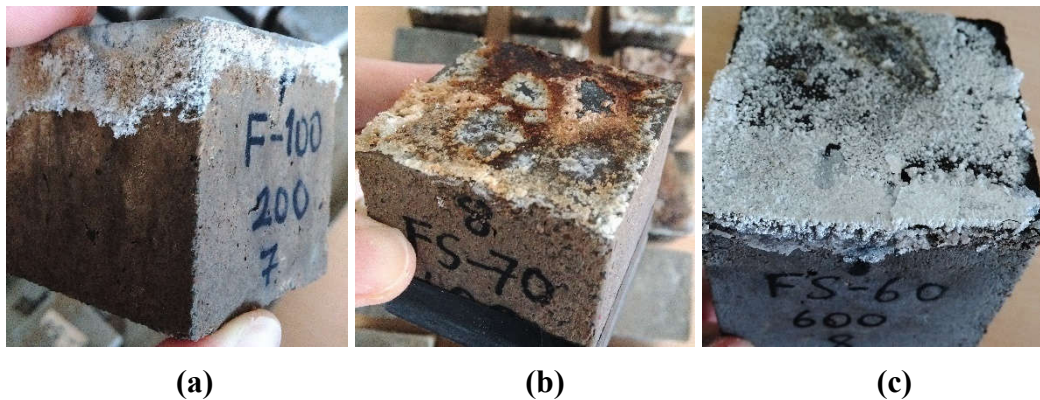
Yüksek sıcaklık + Na₂SO₄ etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları

Geopolimer betonların 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrası Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme katsayıları Tablo 17’de gösterilmiştir. 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄ ve 600°C+ Na₂SO₄ sonrasında bütün gruplarda YFC oranının artmasıyla genellikle kılcal su emme katsayılarında azalma gözlemlenmiştir. Genel olarak 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasındaki kılcal su emme katsayı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Yüksek Sıcaklık+Na₂SO₄ Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi

Karışım Grubu	Kılcal Su Emme Katsayısı (g/m ² x h ^{0,5})			
	200°C+Na ₂ SO ₄	400°C+Na ₂ SO ₄	600°C+Na ₂ SO ₄	800°C+Na ₂ SO ₄
F-100	1,65	1,75	1,9	1,9
FS-80	1,65	1,81	1,85	1,84
FS-70	1,63	1,83	1,91	1,89
FS-60	1,55	1,61	1,85	2,03
FS-50	1,23	1,43	1,85	2,16

En yüksek kılcal su emme katsayısı 800°C+Na₂SO₄ sonrasında FS-50 grubunda, en düşük kılcal su emme katsayısı ise 200°C+Na₂SO₄ sonrasında yine FS-50 grubunda gözlemlenmiştir. İkincil durabilite testi için yüksek sıcaklık sonrasında sülfat etkisine maruz bırakılan bütün gruplarda kılcal su emme katsayıları sadece yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelere göre artış göstermiştir.



Şekil 65. 200°C+Na₂SO₄ (a), 400°C+Na₂SO₄ (b) ve 600°C+Na₂SO₄ (c)’ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri

200°C+ Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında numunelere kılcal su emme deneyi uygulanmıştır. Şekil 65’te görüldüğü gibi 200°C+Na₂SO₄

400°C+Na₂SO₄ ve 600°C+Na₂SO₄ sonrasında numunelere uygulanan su emme deneyi sonucunda yüzeylerinde çiçeklenme gözlemlenmiştir. Geopolimerizasyon reaksiyonu sırasında numunelerin yapısındaki alkalilerin tamamen reaksiyona dahil olmaması neticesinde, numuneler herhangi bir nemli ortamla karşılaşınca yüzeyde çiçeklenme gözlemlenir (Turhan 2020). Ayrıca 400°C+Na₂SO₄ ve 600°C+Na₂SO₄ maruz kalan numunelerin yüzeyinin tamamına yakınının deney neticesinde ıslandığı gözlemlenmektedir. Literatürde çiçeklenmenin numunelerin suyla temas etmesi sonrasında gözeneklerde olan serbest alkalilerden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Sızan alkaliler atmosferde CO₂'nin çözünmesiyle oluşan karbonik asit ile reaksiyona girer ve numune yüzeylerinde gözlemlenen kristal tuzlar oluşur bu olaya çiçeklenme denir (Škvára *et al.* 2009; Zhang *et al.* 2014,2018; Yao *et al.* 2016; Longhi *et al.* 2019a, 2019b).

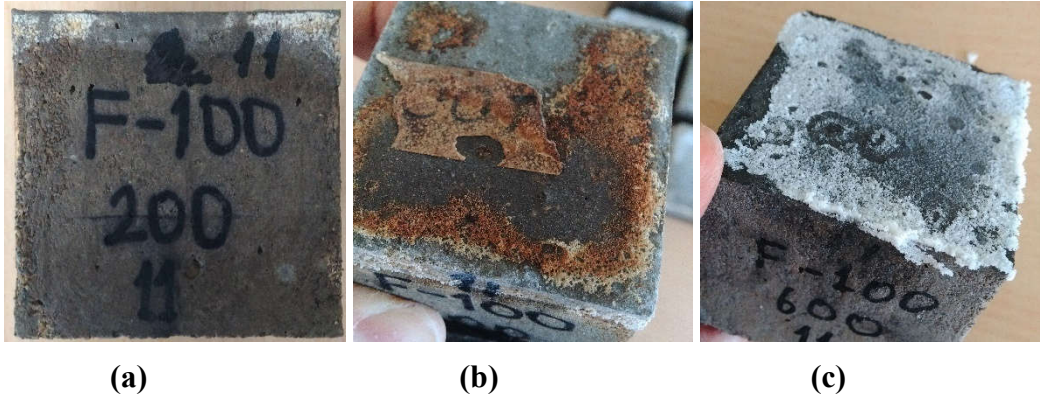
Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası kılcal su emme sonuçları

Geopolimer betonların 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrası NaCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme katsayıları Tablo 18'de gösterilmiştir. 200°C+NaCl, 400°C+NaCl ve 600°C+NaCl sonrasında bütün gruplarda 800°C+NaCl sonrasında ise YFC oranının artmasıyla kılcal su emme katsayıları da artış göstermiştir. Genel olarak 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasındaki kılcal su emme katsayı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 18. Yüksek Sıcaklık + NaCl Sonrası Kılcal Su Emme Katsayısı Değişimi

Karışım Grubu	Kılcal Su Emme Katsayısı (g/m ² x h ^{0.5})			
	200°C+NaCl	400°C+NaCl	600°C+NaCl	800°C+NaCl
F-100	1,74	1,71	1,85	1,86
FS-80	1,67	1,77	1,82	1,84
FS-70	1,54	1,81	1,85	1,87
FS-60	1,46	1,51	1,84	2,04
FS-50	1,09	1,54	1,83	2,11

En yüksek kılcal su emme katsayısı 800°C+NaCl sonrasında FS-50 grubunda, en düşük kılcal su emme katsayısı ise 200°C+NaCl sonrasında FS-50 karışım grubunda gözlemlenmiştir. Ayrıca ardışık durabilite açısından sonuçlar incelendiğinde yüksek sıcaklık sonrası NaCl'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme katsayılarının sadece yüksek sıcaklığa maruz bırakılanlara göre arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 66. 200°C+NaCl (a), 400°C+NaCl (b) ve 600°C+NaCl (c)'ye maruz bırakılan numunelerin kılcal su emme deneyi sonrasındaki görüntüleri

200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında numunelere kılcal su emme deneyi uygulanmıştır. Şekil 66'da 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄ ve 600°C+Na₂SO₄ sonrasında sıcaklığın artmasıyla numunelerin yüzeyinde oluşan çiçeklenmelerinde arttığı gözlemlenmiştir.

Ağırlık Değişimi

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık değişimleri

Numunelerin 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve kaldıktan sonra ölçülen ağırlıklarının değişimi Tablo 19'da gösterilmiştir.

Tablo 19. Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri

Karışım Grubu	Ağırlık Değişimi (%)			
	200°C	400°C	600°C	800°C
F-100	0.97	1.81	3.48	7.19
FS-80	0.33	2.14	3.27	6.22
FS-70	0.37	2.84	3.47	6.70
FS-60	0.40	2.18	3.61	6.88
FS-50	0.36	1.96	4.29	6.00

Sonuçlara göre sıcaklığın artmasıyla bütün gruplarda ağırlıklardaki azalma oranları da artmıştır. Bu durum numunelerin yapısındaki serbest suyun buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Suyun buharlaşması numunenin mikro yapısına zarar vermekte ve ağırlık kaybının yaşanmasına sebep olmaktadır (Kong *et al.* 2007; Duan *et al.* 2015; Kantarcı 2018; Yang *et al.* 2019). Genel olarak F-100 karışımlarının ağırlık kaybının daha fazla olduğu cüruf oranının artmasıyla ağırlık kaybının azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca sıcaklığın artışıyla değişen basınç dayanımı sonuçlarının ağırlık değişimi sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Zhang *et al.* (2020) çalışmalarında ürettikleri geopolimer betonları 100, 200,

400, 600, 800 ve 1000°C'ye maruz bırakmışlardır. Sonuçta sıcaklığın artmasıyla numunelerdeki ağırlık kaybının arttığını bildirmişlerdir. Derinpınar (2021) da çalışmasında geopolimer beton numuneleri 150, 300, 450, 600 ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Sonuçta sıcaklığın artışıyla dayanım kaybı artmış ve YFC oranının artmasıyla da ağırlık kaybı oranı azalmıştır.

Yüksek sıcaklık+HCl etkisi sonrası ağırlık değişimleri

Numunelerin 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl'ye maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra ölçülen ağırlıklarının yüzde değişimi Tablo 20'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Yüksek Sıcaklık+HCl Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri

Karışım Grubu	Ağırlık Değişimi (%)			
	200°C+HCl	400°C+HCl	600°C+HCl	800°C+HCl
F-100	8,75	7,35	8,03	6,86
FS-80	10,07	8,60	8,51	5,92
FS-70	10,12	8,72	8,44	6,03
FS-60	10,27	8,68	8,62	6,44
FS-50	11,22	9,12	9,60	7,15

Sonuçlar incelendiğinde genellikle YFC oranının artmasıyla yüksek sıcaklık+HCl sonrasında numunelerin ağırlık kaybı artmıştır. 200°C+HCl sonrasında bütün gruplarda ağırlık kaybı diğer sıcaklık+HCl sonrası değerlere göre daha fazladır. 800°C+HCl sonrasında ise ağırlık kaybı diğer sıcaklık+HCl sonrası değerlere göre daha azdır. En yüksek ağırlık kaybı 200°C+HCl sonrası FS-50 grubunda en az ağırlık kaybı ise 800°C+HCl sonrası FS-80 grubunda gözlemlenmiştir. Asit etkisinden kaynaklanan ağırlık kaybının sebebinin betonun asidik çözelti ile girdiği reaksiyon olduğu düşünülmektedir. Ayrıca literatürde ağırlık kaybının yapıdaki Si-O-Al bağlarının kırılmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Bakharev 2005; Djobo *et al.* 2016; Thunuguntla and Rao 2018).

Yüksek sıcaklık+ Na₂SO₄ etkisi sonrası ağırlık değişimleri

Numunelerin 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄'ye maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra ölçülen ağırlıklarının yüzde değişimi Tablo 21'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Yüksek Sıcaklık+Na₂SO₄ Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri

Karışım Grubu	Ağırlık Değişimi (%)			
	200°C+Na ₂ SO ₄	400°C+Na ₂ SO ₄	600°C+Na ₂ SO ₄	800°C+Na ₂ SO ₄
F-100	1,47	0,77	+0,1	+1,74
FS-80	2,09	0,43	+0,1	+1,16
FS-70	2,01	0,47	+0,14	+1,08
FS-60	1,95	0,65	+0,23	+1,56
FS-50	2,52	1,11	+0,25	+1,65

Sonuçlara göre 200°C+Na₂SO₄ sonrasında en fazla olmak üzere 200°C+Na₂SO₄ ve 400°C+Na₂SO₄ sonrasında geopolimer betonlarda ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. 800°C+Na₂SO₄ sonrasında daha fazla olmak üzere 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonra ise ağırlık artışı gözlemlenmiştir. 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında bütün grupların ağırlık değişimi birbirine çok yakındır. Hatta hemen hemen değişiklik olmadı şeklinde ifade edebiliriz. Yavuz (2020)'da çalışmasında sülfat etkisi neticesinde geopolimer beton numunelerde ağırlık değişiminin ihmal edilebilecek düzeylerde olduğunu söylemiş ve bu yüzden ağırlık değişiminin olmadığını ifade etmiştir. Sülfat etkisi sonrasında ağırlığın artmasının ise geopolimer betonda oluşan gözeneklere dolan tuzlardan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Komljenovic *et al.* 2013; Kwasny *et al.* 2018; Ganeshan and Venkataraman 2019; Jin *et al.* 2020).

Yüksek sıcaklık+ NaCl etkisi sonrası ağırlık değişimleri

Numunelerin 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl'ye maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra ölçülen ağırlıklarının yüzde değişimi Tablo 22'de gösterilmiştir.

Tablo 22. Yüksek Sıcaklık+NaCl Etkisi Sonrası Numunelerin Ağırlık Değişimleri

Karışım Grubu	Ağırlık Değişimi (%)			
	200°C+NaCl	400°C+NaCl	600°C+NaCl	800°C+NaCl
F-100	1,53	0,74	+0,23	+0,23
FS-80	2,21	0,34	+0,10	+0,74
FS-70	2,16	0,33	+0,10	+0,74
FS-60	1,87	0,77	+0,36	+0,87
FS-50	2,60	0,55	+0,39	+0,86

Sonuçlara göre 200°C+NaCl sonrasında en fazla olmak üzere 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrasında geopolimer betonlarda ağırlık kaybı gözlemlenmiştir ve 400°C+NaCl

sonrasındaki ağırlık kaybı ihmal edilebilecek kadar düşüktür. 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında ise geopolimer betonlarda birbirine çok yakın ve ihmal edilebilecek seviyede ağırlık artışı gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da tuz etkisi sonrasında ağırlık artışının gözlemlendiği çeşitli çalışmada ifade edilmiştir. Bu ağırlık artışının geopolimer betonlara etki eden tuz çözeltisinin numunelerin yapılarında meydana getirdiği boşlukların daha sonra sodyum ve klor iyonlarının oluşturduğu yeni yapılarla dolmasından kaynaklandığı bildirilmiştir (Özcan 2018; Aygörmmez 2018; Jin *et al.* 2020). Albitar *et al.* (2017) çalışmasında uçucu kül bazlı ürettiği geopolimer betonları %5 konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde 9 ay bekletmiştir ve ölçümler neticesinde ağırlık artışının oluştuğunu gözlemlemiştir.

UPV

28 ve 90 günlük UPV sonuçları

Geopolimer betonlara 28. ve 90. günde tahribatsız yöntemlerden biri olan UPV deney yöntemi uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 23'te gösterilmiştir. Hem 28 hem de 90 günlük sonuçlarda en yüksek UPV değerleri FS-50 karışım grubunda gözlemlenmiştir. En düşük sonuçlar ise F-100 Karışım grubunda gözlenmiştir. 28 ve 90 günlük UPV değerlerinin basınç dayanımı ve kılcal su emme katsayı sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı arttıkça numunelerin UPV artmaktadır (Demirboğa *et al.* 2004). Kılcal su emme katsayısı arttıkça numunedeki boşluk miktarı artacağı için UPV azalmaktadır (Binici vd. 2012)

Tablo 23. 28 ve 90 Günlük UPV Değerleri

Karışım Grubu	28 Günlük Darbe Hızı (m/s)	90 Günlük Darbe Hızı (m/s)
F-100	2936	2679
FS-80	3162	2793
FS-70	3222	2885
FS-60	3232	2913
FS-50	3586	3186

Tablo 23'teki sonuçlara baktığımız zaman cüruf miktarının artmasıyla UPV değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Negahban *et al.* (2021) çalışmasında bu durumu desteklemektedir. Geçiş hızı numunedeki boşluk miktarı yani yoğunluğuyla bağlantılıdır. YFC miktarının artmasıyla geopolimer betonun yoğunluğu artmaktadır bu sebeple geçiş hızı YFC oranının artmasıyla artmaktadır. Numunenin içinde ne kadar az boşluk varsa dalga bir yüzeyden diğer yüzeye o kadar kısa sürede ulaşır (Binici *et al.* 2009).

Yüksek sıcaklık sonrası UPV sonuçları

Geopolimer betonların 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasındaki UPV değerleri Tablo 24'te görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 28 ve 90 günlük UPV değerlerinde olduğu gibi YFC oranının artmasıyla UPV değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek UPV değerleri bütün sıcaklıklarda F-50 karışım grubunda, en düşük UPV değerleri ise bütün sıcaklıklarda F-100 karışım grubunda gözlemlenmiştir.

Tablo 24. Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonrası UPV Değerleri

Karışım Grubu	28 Günlük	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
F-100	2936	2846	2427	1890	1454
FS-80	3162	3289	2451	2024	1932
FS-70	3222	3325	2359	2093	2026
FS-60	3232	3362	2618	2128	2102
FS-50	3586	3521	3080	2242	2214

Numunelere uygulanan sıcaklığın artmasıyla Tablo 24'te bütün gruplarda UPV değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir (Sawan *et al.* 2020). Bunun sebebinin artan sıcaklıkla beraber numunelerim içerisindeki suyu buharlaşması sonucu artan boşluk miktarı ve oluşan çatlaklar olduğu düşünülmektedir (Ghosh *et al.* 2018; Tok 2021; Tammam 2021). Yüksek sıcaklık sonrası UPV değerleri ile basınç dayanımı sonuçları paralellik göstermektedir. Kılcal su emme katsayıları da katsayı arttıkça UPV değerleri azaldığı için sonuçlarla uyumludur.

Yüksek sıcaklık+HCl etkisi sonrası UPV sonuçları

Geopolimer betonların 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasındaki UPV değerleri Tablo 25'te görülmektedir. Sonuçlara göre yüksek sıcaklık sonrasında ardışık durabilite testi için numuneleri HCl çözeltisine maruz bırakmak UPV değerlerini azaltmıştır. YFC oranının artmasıyla UPV değerleri artmıştır. 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında en yüksek UPV FS-50 karışım grubunda en düşük UPV ise F-100 karışım grubunda gözlemlenmiştir. Tablo 25'teki UPV sonuçları 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasındaki basınç dayanımı sonuçlarıyla orantılıdır. Basınç dayanımının artmasıyla UPV değerleri artmıştır. Özcan (2018) yaptığı çalışmada geopolimer betonları HCl asit çözeltisine maruz bırakmıştır ve sonuçta numunelerin basınç dayanımlarındaki düşüşe paralel olarak UPV değerlerinde de düşüş olduğunu bildirmiştir. İkincil durabilite olarak yüksek sıcaklık sonrasında asit etkisini uyguladığımızda da benzer bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 25. Yüksek Sıcaklık + HCl Etkisi Sonrası UPV Değerleri

Karışım Grubu	200°C + Asit	400°C + Asit	600°C + Asit	800°C + Asit
F-100	1924	1818	1771	1901
FS-80	2155	1858	1869	1980
FS-70	2229	1899	1936	2024
FS-60	2213	2108	1989	2024
FS-50	2222	2261	2031	2033

Yüksek sıcaklık + Na₂SO₄ etkisi sonrası UPV sonuçlar

Geopolimer betonların 200°C+ Na₂SO₄, 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasındaki UPV değerleri Tablo 26’da görülmektedir. Sonuçlara göre yüksek sıcaklık sonrasında ardışık durabilite testi için numuneleri Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakmak UPV değerlerini azaltmıştır. Özcan (2018) geopolimer betonları sadece sülfat etkisine maruz bırakmıştır ve neticede sülfat etkisi UPV’nin azalmasına sebep olmuştur. YFC oranının artmasıyla UPV değerleri artmıştır. 200°C+ Na₂SO₄, 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasında en yüksek UPV değeri FS-50 karışım grubunda en düşüğü ise F-100 karışım grubunda gözlemlenmiştir.

Tablo 26. Yüksek Sıcaklık + Na₂SO₄ Etkisi Sonrası UPV Değerleri

Karışım Grubu	200°C+Sülfat	400°C+Sülfat	600°C+Sülfat	800°C+Sülfat
F-100	2126	1890	1777	2121
FS-80	2396	2021	1847	2158
FS-70	2463	2068	1925	2358
FS-60	2525	2289	1950	2564
FS-50	2684	2479	2146	2688

Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasında dayanımlarda 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklardan sonraki dayanım sonuçlarına göre bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu bakımdan 800°C sonrası UPV değerleri 800°C+ Na₂SO₄ sonrasındaki UPV değerleriyle uyumludur. Ayrıca 800°C sonrasındaki UPV değerlerine göre 800°C+Na₂SO₄ sonrasında UPV değerlerinde artış olduğu Tablo 26’daki verilerden gözlemlenmektedir. Tammam (2021) çalışmasında UK bazlı geopolimer betonlar üretmiştir. Numuneleri farklı sürelerde Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakmıştır ve sonuçta UPV değerlerinde ilk 2 ayın sonunda artış olduğunu gözlemlemiştir. Bu çalışmada ardışık durabilite testlerinde de yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ etkisinde benzer bir sonuçla karşılaşılmıştır.

Yüksek sıcaklık + NaCl etkisi sonrası UPV sonuçları

Geopolimer betonların 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasındaki UPV değerleri Tablo 27’de görülmektedir. Sonuçlara göre yüksek sıcaklık sonrasında ardışık durabilite testi için numuneleri NaCl çözeltisine maruz bırakmak geçiş hızını azaltmıştır. Özcan (2018) geopolimer betonları sadece tuz etkisine maruz bırakmıştır ve neticede tuz etkisi UPV değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. YFC oranının artmasıyla geçiş hızları da artmıştır. 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında en yüksek geçiş hızı FS-50 karışım grubunda en düşük geçiş hızı ise F-100 karışım grubunda gözlemlenmiştir.

Tablo 27. Yüksek Sıcaklık + NaCl Etkisi Sonrası UPV Değerleri

Karışım Grubu	200 °C+ NaCl	400 °C+ NaCl	600 °C+ NaCl	800 °C+ NaCl
F-100	1946	1827	1852	2121
FS-80	2304	2068	1986	2265
FS-70	2394	2073	2047	2361
FS-60	2396	2422	2108	2604
FS-50	2758	2523	2225	2674

Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında dayanımlarda 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklardan sonraki dayanım sonuçlarına göre bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu bakımdan 800°C+NaCl sonrası basınç dayanımı sonuçları 800°C+NaCl sonrasındaki UPV değerleriyle uyumludur. Ayrıca 800°C sonrasındaki UPV değerlerine göre 800°C+NaCl sonrasında UPV değerlerinde artış olduğu Tablo 27’deki verilerden gözlemlenmektedir.

İç Yapı Analizleri

Geopolimer beton numunelerde araştırmacılar yapılan durabilite deneylerinin numunelerin içyapısındaki etkisini, içyapıda oluşan reaksiyonları tespit etmek için içyapı analiz testlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada geopolimer betonlar önce 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Daha sonra geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için HCl, Na₂SO₄ ve NaCl’ye maruz bırakılmıştır. Durabilite etkileri neticesinde geopolimer betonların SEM, XRD ve FT-IR ile iç yapı analizleri yapılmıştır.

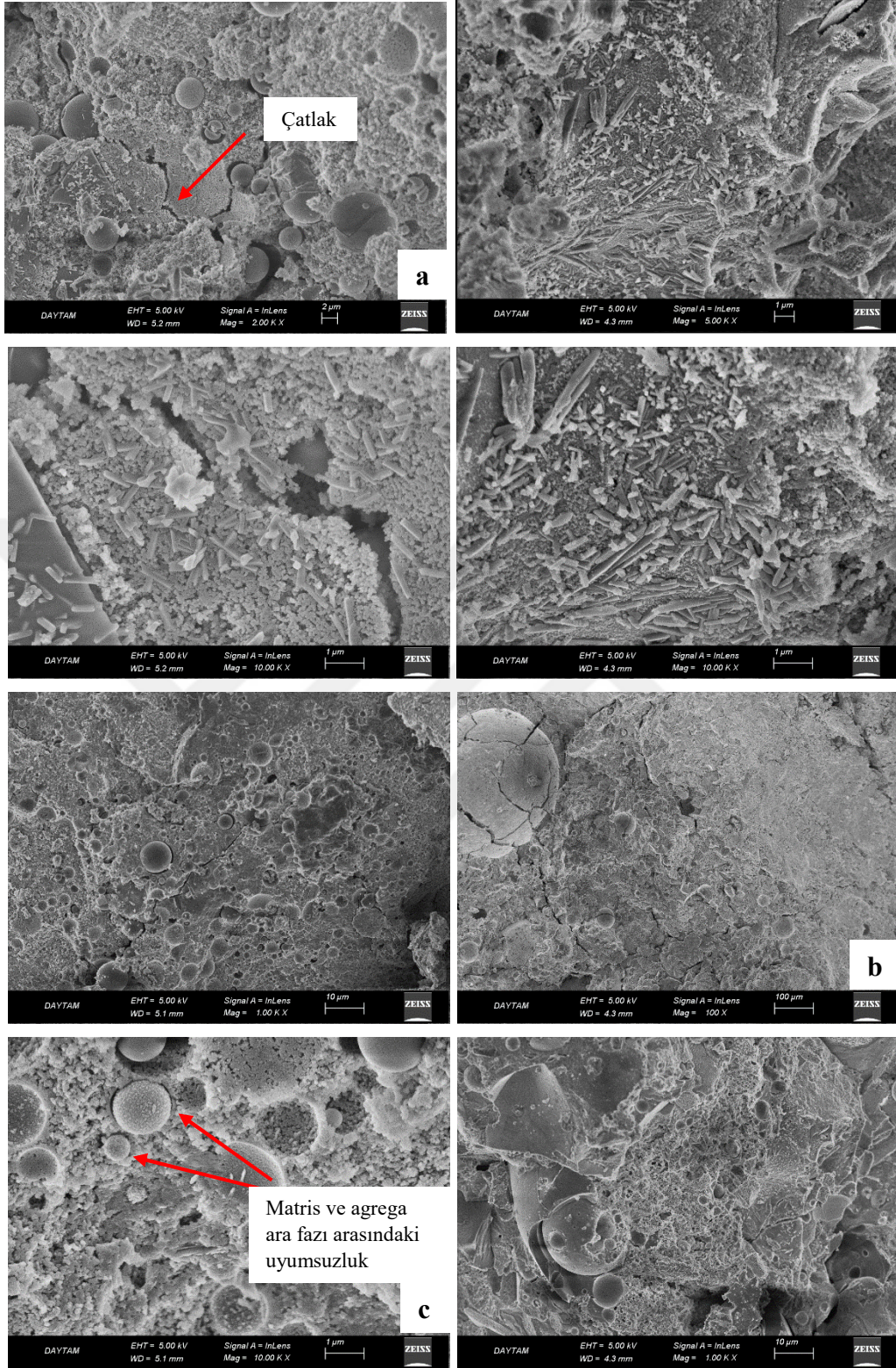
SEM analizi

Yüksek sıcaklık sonrası SEM analizi sonuçları

200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılan F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarında basınç dayanımı, kılcal su emme, ağırlık değişimi ve UPV deneylerinin sonuçlarına göre belirlenen F-100, FS-70 ve FS-50 karışım gruplarının SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. F-100 karışım grubunun 200°C, 400°C sonrası SEM görüntüleri Şekil 67’de 600°C, 800°C sonrası SEM görüntüleri ise Şekil 68’de gösterilmiştir. F-100 karışım grubunda sıcaklığın artmasıyla beraber içyapıda çatlakların ve boşlukların belirginleştiği gözlemlenmektedir. 200°C ve 400°C’de kılcal çatlakların olduğu (Şekil 67a ve Şekil 67b), agregalarla matris yapısı ara yüzeyinde boşlukların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 67c). 600°C ve 800°C’de sıcaklığın artmasıyla yoğun mikro yapının azaldığı, çatlakların daha çok belirginleştiği (Şekil 68a) ve içyapıda boşlukların olduğu Şekil 68c’de görülmektedir. SEM analizi için alınan örneklerin basınç dayanımı deneyi sonrasındaki parçacıklardan temin edilmesi görüntülerde çatlakların gözlemlenmesine sebep olabilir (Albidah *et al.* 2022). Çatlakların ve boşlukların sıcaklığın yükselmesiyle artışı geopolimer betonlarda dayanım düşüşüne sebep olmuştur (Dong *et al.* 2020; Ye *et al.* 2017). 600 °C’ye kadar F-100 karışımında hala reaksiyona girmeyen parçacıkların olduğu gözlemlenmiştir. Marjanović *et al.* (2015) çalışmasında UK parçacıkların genellikle küresel olduğunu ifade etmektedir. F-100 karışımının da tamamı UK’dan oluşmaktadır. Yani reaksiyona girmedeği görülen parçacıklar UK’dan kaynaklandığı düşünülmektedir. 800°C’de artık çözünmeyen parçacıklar azalmıştır (Zhang *et al.* 2020) ve gözenekli süngerimsi yapı Şekil 68b’de gözlemlenmektedir. Junaid (2015) çalışmasında yüksek sıcaklıklarda geopolimer betondan buharlaşan serbest suyun sebep olduğu çatlakların artmasıyla özellikle 800°C’de geopolimer betonların matris fazının parçalanmasıyla ve farklı fazların meydana gelmesiyle dayanım kaybının meydana geldiğini belirtmiştir. (Khan and Sarker 2020). Derinpınar *et al.* (2022) çalışmasında 450°C ve sonrasındaki sıcaklıklarda geopolimer betonlarda çatlakların, jel yapıdaki bozulmaların arttığını ve bu artışla numunelerin mekanik özelliklerinde azalmalar gözlemlendiğini ifade etmiştir. Bu sonuçlar bu çalışmanın yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı ve SEM analizi verileriyle uyumludur.

200 °C

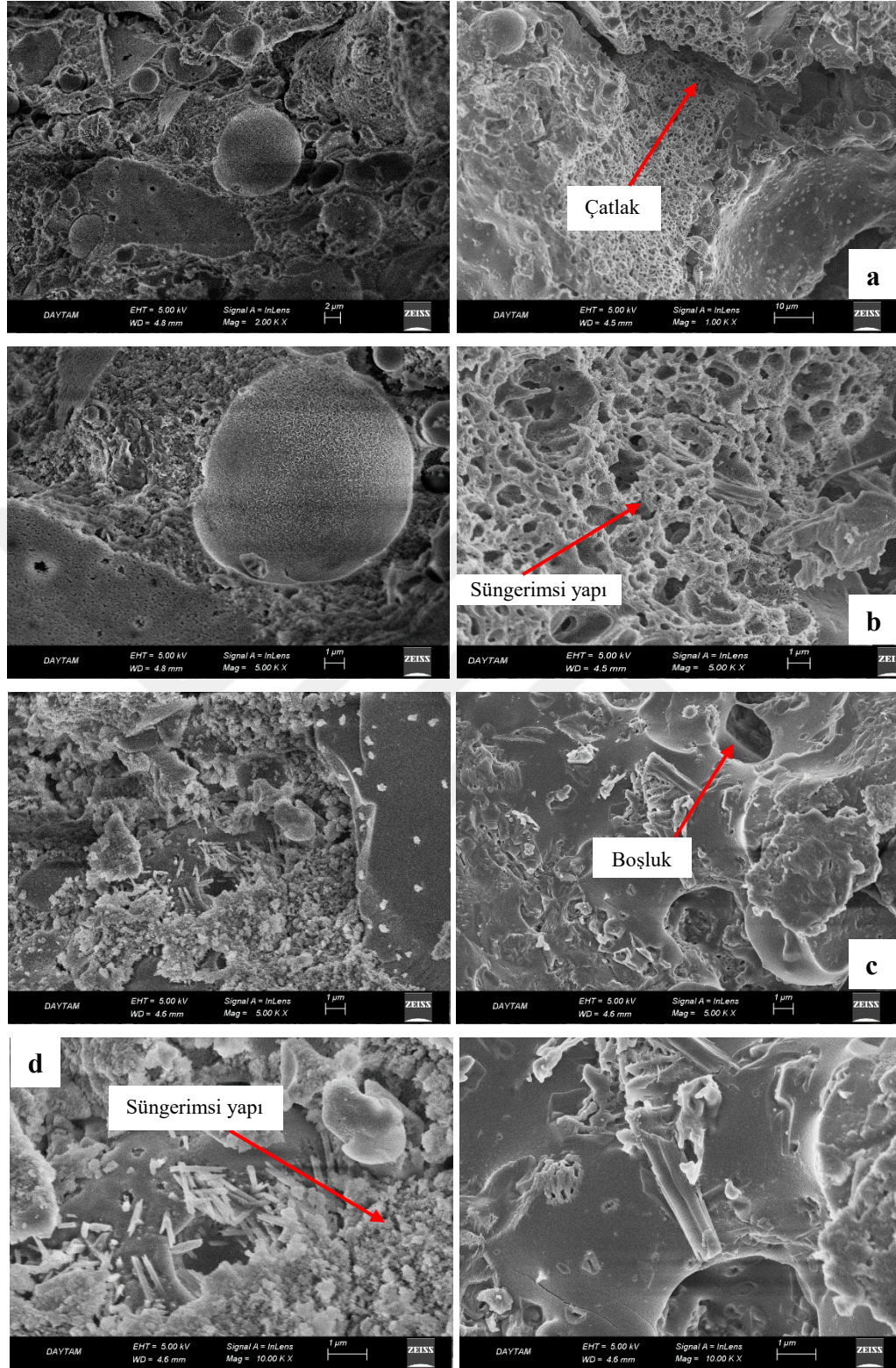
400 °C



Şekil 67. F-100 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri

600 °C

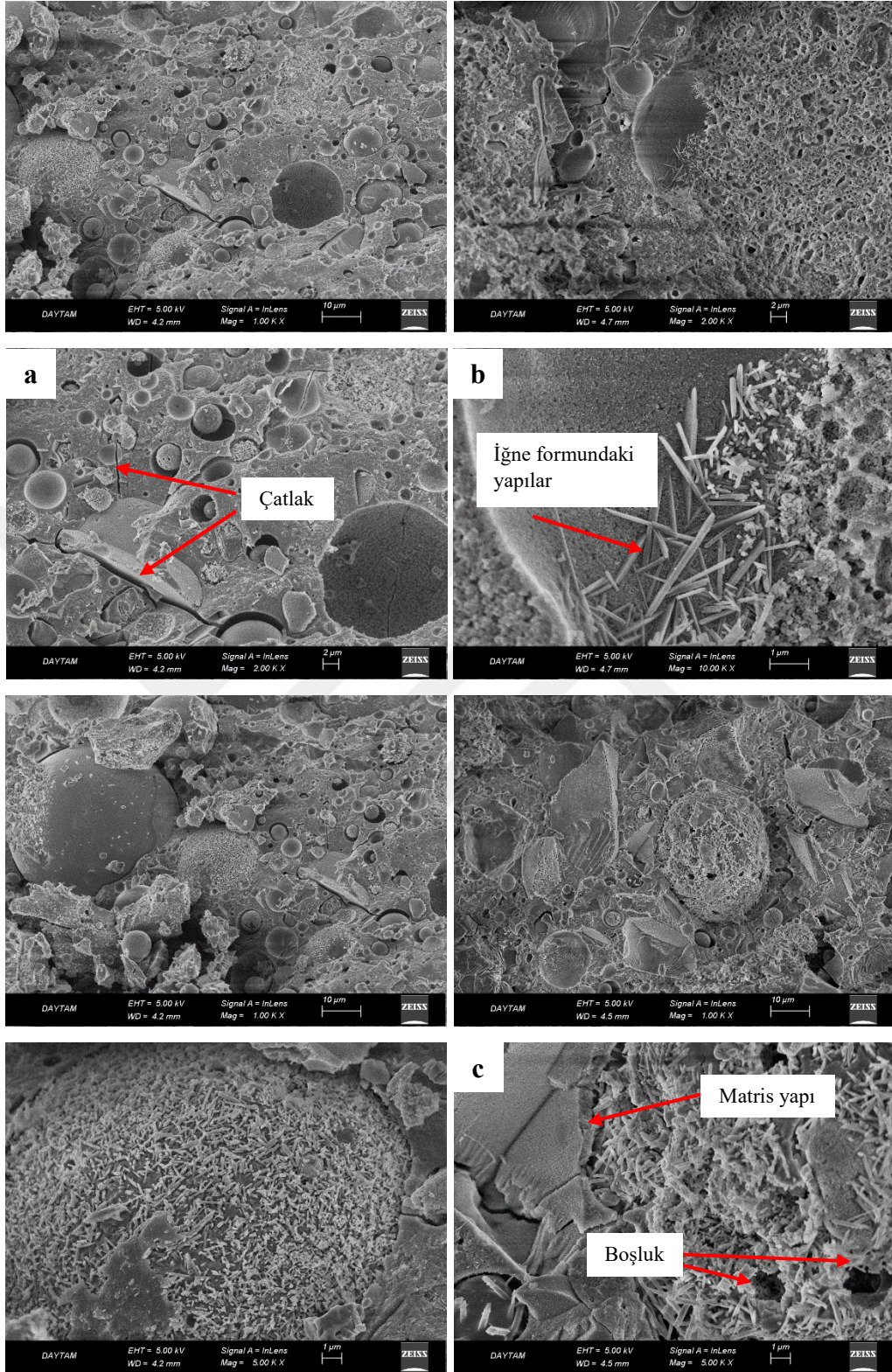
800 °C



Şekil 68. F-100 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüler

200 °C

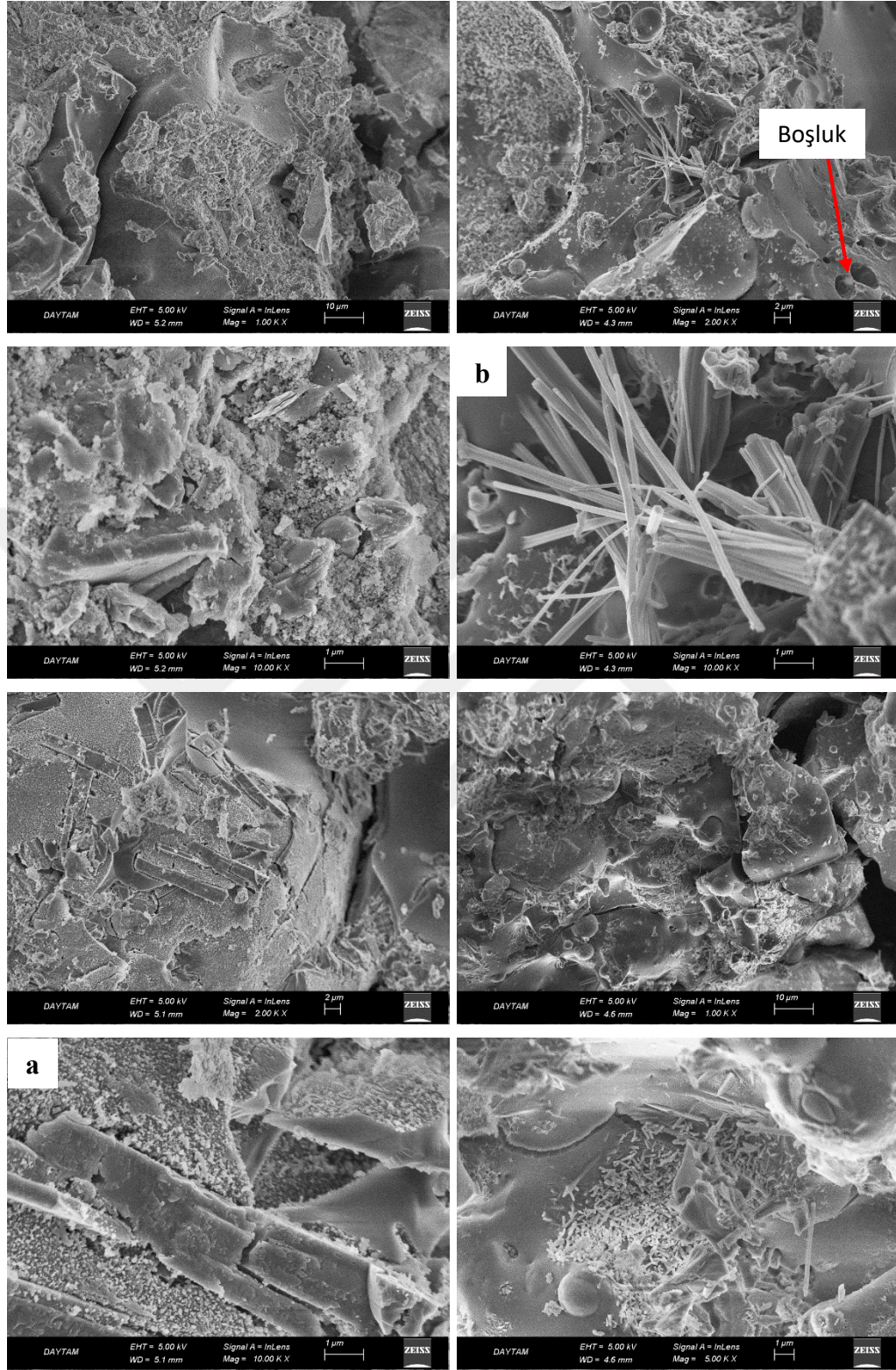
400 °C



Şekil 69. FS-70 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri

600 °C

800 °C



Şekil 70. FS-70 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri

FS-70 karışım grubunun 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri Şekil 69’da 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri ise Şekil 70’te gösterilmiştir. FS-70’te yüksek sıcaklıklar sonrasında reaksiyona girmeyen parçacıklar 400°C’den sonra gözlemlenmemiştir. 400°C ve sonrasındaki sıcaklıklarda içyapıda iğne formundaki yapıların belirginleştiği

gözlemlenmektedir (Şekil 70b). F-100 karışımında olduğu gibi FS-70'te de çatlaklar gözlemlenmiştir (Şekil 70a ve Şekil 70c). YFC oranının artmasından kaynaklı yapıda bir yoğunluk gözlemlenmektedir bu sebeple boşluk oranı F-100'e göre daha azdır. Tuyan *et al.* (2018) çalışmasında iğne forumundaki bu yapıların kristal bir oluşum (kuvars, kalsit, dolomit) olduğunu ifade etmektedir. Bu iğne formundaki oluşumların azalmasıyla basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Bu çalışmada sonuçlara göre yüksek sıcaklık sonrası sıcaklık arttıkça SEM görüntülerinde jel yapıda iğne formundaki oluşumların arttığını ve basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmektedir.

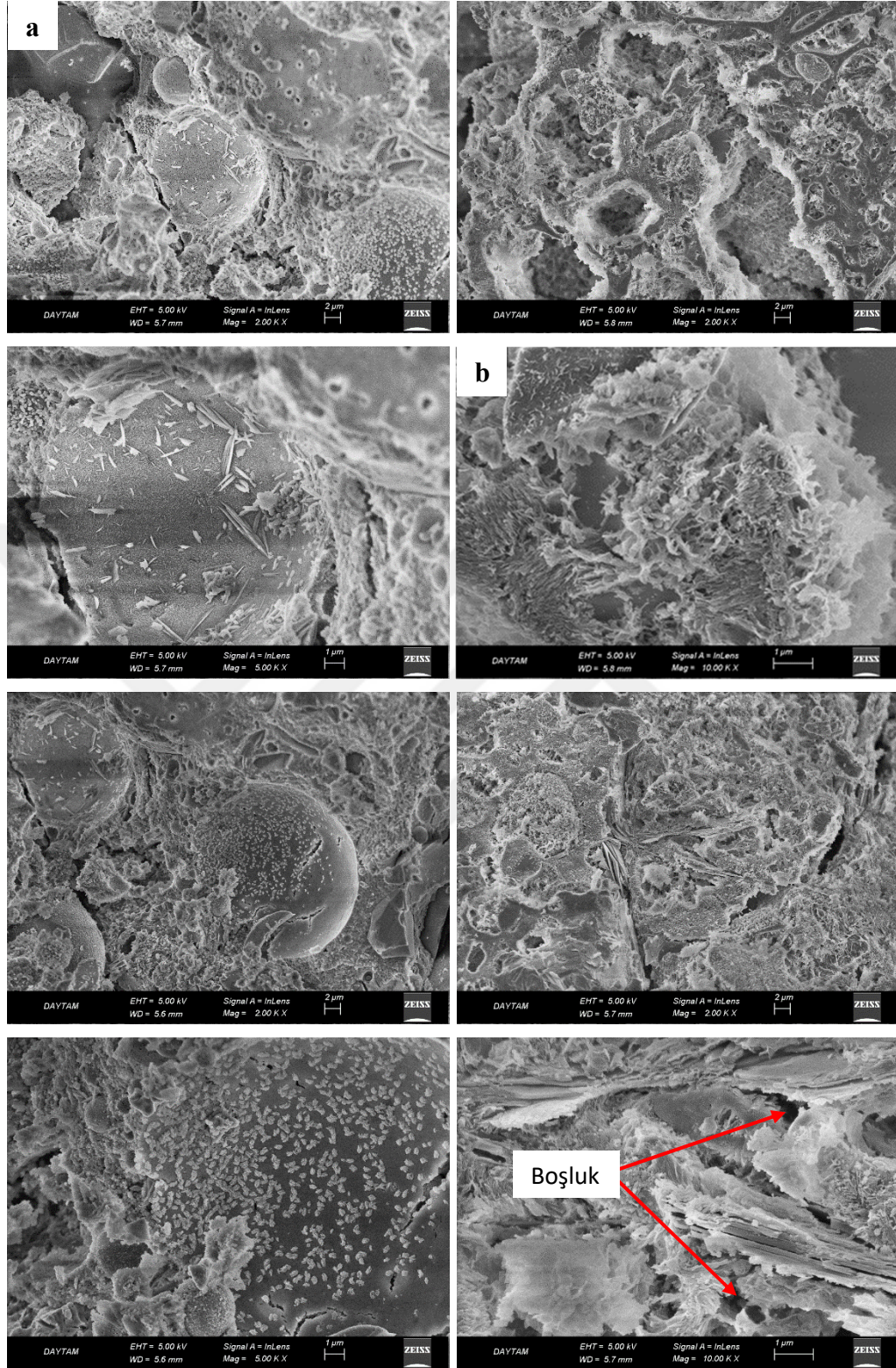
FS-50 karışım grubunun 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri Şekil 71'de 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri ise Şekil 72'de gösterilmiştir. F-100 ve FS-70 karışım gruplarında olduğu gibi iğne forumunda yapılar (Şekil 76b, Şekil 77a ve Şekil 77b), topaklanma (Şekil 77d) ve çatlaklar (Şekil 71a ve Şekil 72c) FS-50 karışım grubunda da gözlemlenmiştir. Fakat karışım gruplarında cüruf oranının artmasıyla birlikte iç yapıdaki sıkılık ve yoğunluk artmıştır yüksek sıcaklık etkisi neticesinde oluşan boşluk miktarı da azalmıştır.

Manjunath *et al.* (2019) çalışmasında YFC bazlı geopolier betonlar üretmiştir. Geopolimer betonlar dört farklı yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sonuçta 200°C'ye kadar numunelerde kılcal çatlak oluşumu dediğimiz çatlaklar gözlemlenmiştir. 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda bu çatlaklar artış göstermiştir. 800°C'de kılcal çatlaklar iyice derinleşip genişlemiştir Sonuçta sıcaklığın artmasıyla oluşan çatlaklarda belirginleşmiş ve mekanik özelliklere daha zarar verici boyuta ulaşmıştır. 900°C-1100°C sıcaklıklarda geopolimer betonların iç yapısında çok fazla gözeneklilik, çatlak oluşumu ve matris yapısında ciddi değişimler gözlemlenmektedir (Saavedra and Gutiérrez 2017; Durgun and Sevinç 2018; Kuranlı *et al.* 2022).

Sonuçta sıcaklığın artmasıyla geopolimer betonların matrisinde gözlemlenen bu çatlak, gözeneklilik, iğnemsî yapılar, topaklanma ve agregayla matris yapı arasındaki uyumsuzluk artmaktadır ve neticede geopolimer betonların sıcaklık arttıkça basınç dayanımı düşmektedir (Wang *et al.* 2022; Derinpınar 2021). Geopolimer betonlarda sıcaklık etkisinin artması agrega ve matris yapısının ısıl genleşme katsayılarının farkının artmasına sebep olmaktadır. Artan bu farkta iç yapıda gerilmeleri oluşturmakta ve çatlakları meydana getirmektedir (Topal *et al.* 2021). Yani geopolimer betonların basınç dayanımındaki düşüşler iç yapılarıyla paraleldir.

200 °C

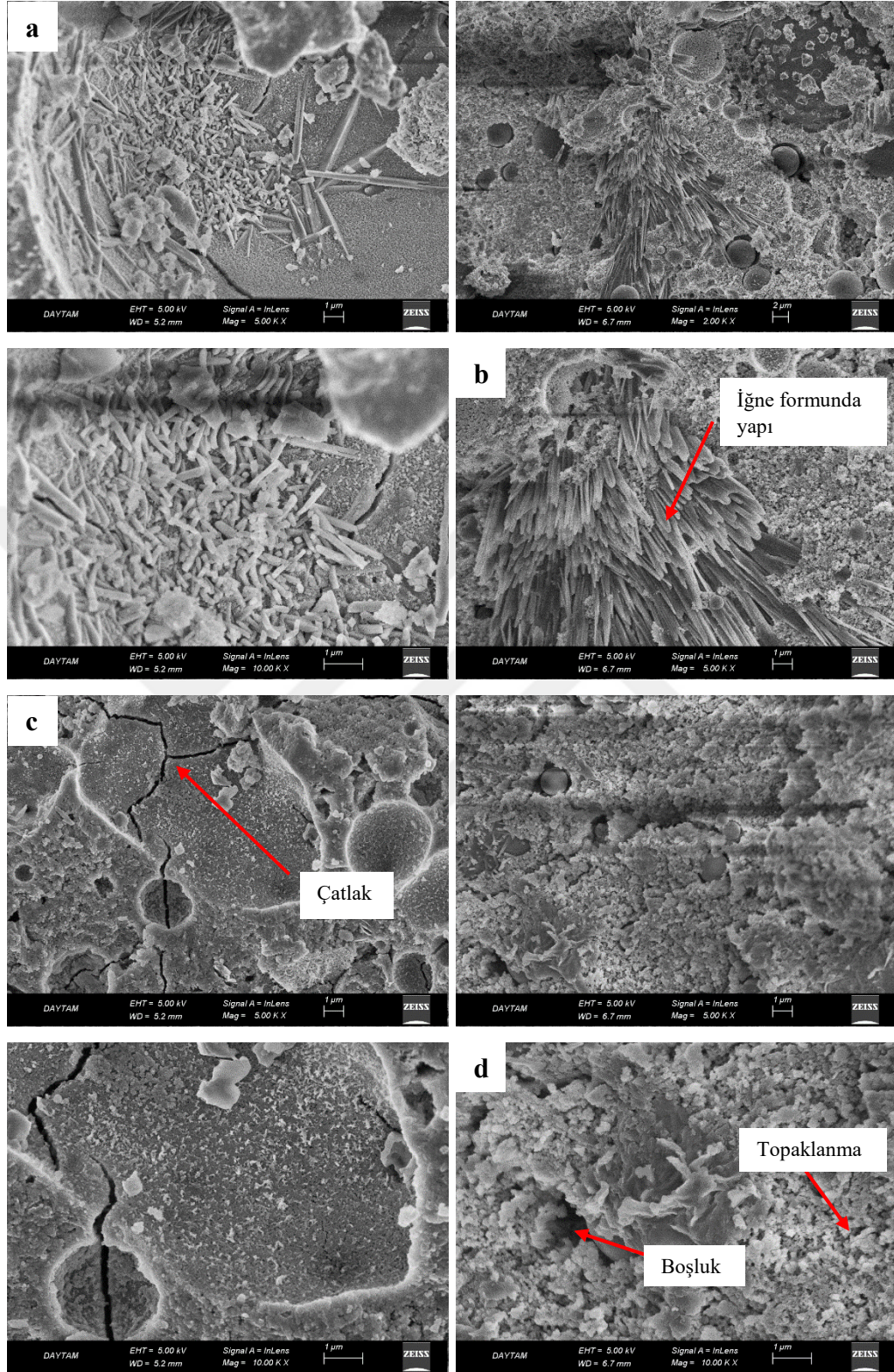
400 °C



Şekil 71. FS-50 200°C ve 400°C sonrası SEM görüntüleri

600 °C

800 °C



Şekil 72. FS-50 600°C ve 800°C sonrası SEM görüntüleri

Yüksek sıcaklık+HCl sonrası SEM analizi sonuçları

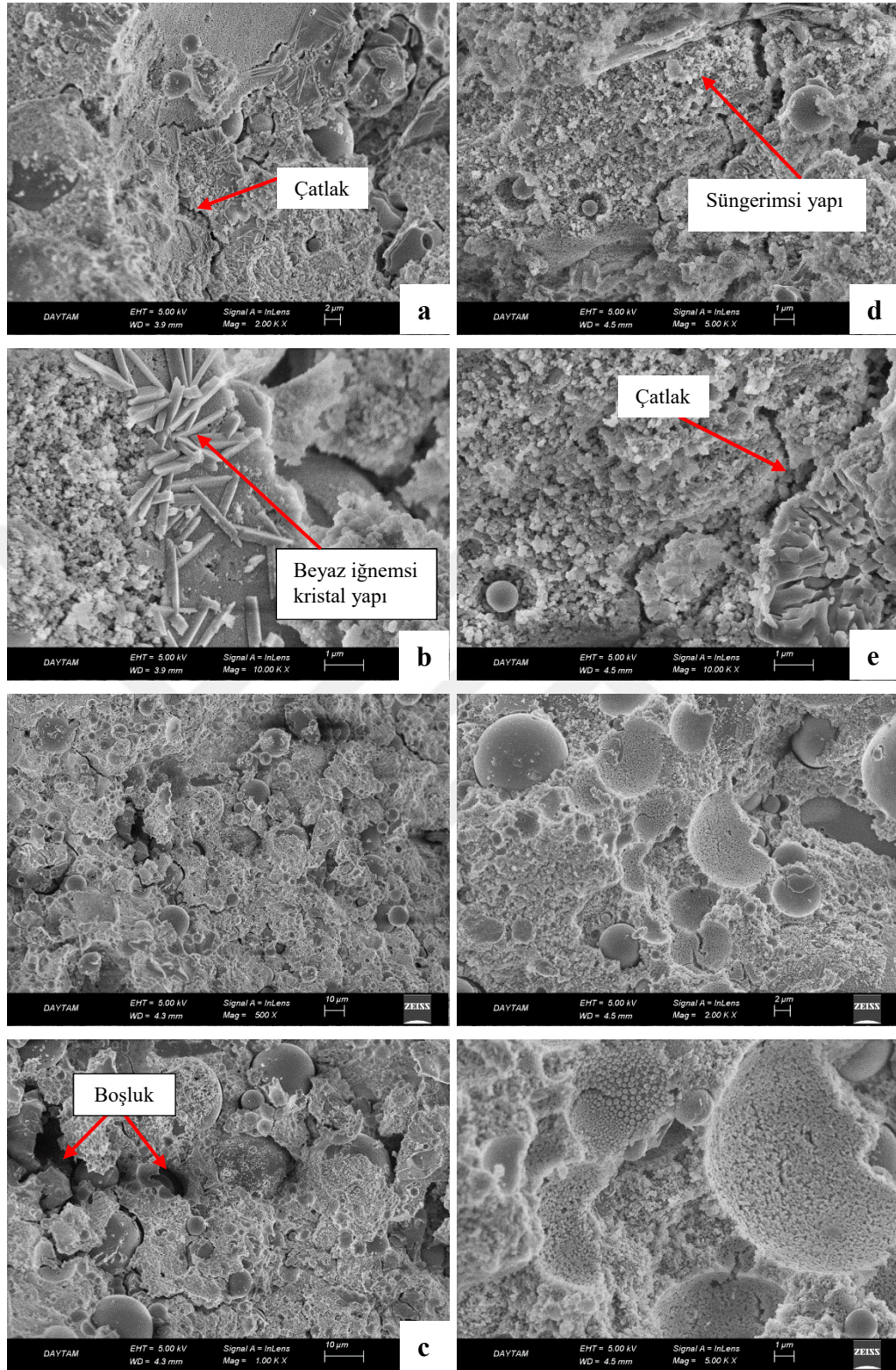
200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarına uygulanan basınç dayanımı, kılcal su emme, ağırlık değişimi ve UPV deneylerinin sonuçlarına göre en iyi sonuçları veren F-100 karışım grubunun SEM

görüntüleri aşağıda verilmiştir. 200°C+HCl ve 400°C+HCl sonrasında SEM görüntüleri Şekil 73'te 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında ise SEM görüntüleri Şekil 74'te gösterilmiştir. Şekil 73a, Şekil 73e ve Şekil 74a'da içyapıda oluşan çatlaklar gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık sonrasında asit etkisi neticesinde geopolimer betonun iç yapısında oluşan boşluklar Şekil 73c ve Şekil 74d'de gözlemlenmektedir. Şekil 73d'de yüksek sıcaklık sonrasında olduğu gibi yüksek sıcaklık+HCl etkisi sonrasında da süngerimsi yapının devamı gözlemlenmektedir. 800°C+HCl sonrasında Şekil 73b ve Şekil 74c'de gözlemlendiği gibi beyaz iğnemi kristal yapıdaki formlar belirginleşmiştir. Bu iğnemi formdaki etrenjite benzeyen yapıların UK ve YFC'nin birlikte kullanımından kaynaklandığı düşünülmektedir (Topal *et al.* 2021). Mehta and Siddique (2017) ise çalışmalarında bu beyaz iğnemi kristal yapıdaki formların NaOH ve Na₂SiO₄ alkali aktivatörlerin birlikte kullanımlarından kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada da UK ve YFC bağlayıcı malzeme olarak NaOH ve Na₂SiO₄ ise alkali aktivatör olarak birlikte kullanılmıştır. Fakat en verimli sonucu veren karışım grubumuz olan F-100 grubunun tamamı uçucu külden oluşmaktadır. Bu yüzden Mehta and Siddique (2017)'nin ifadeleri beyaz iğnemi kristal yapıdaki formların oluşma sebebine daha uygun bulunmaktadır.

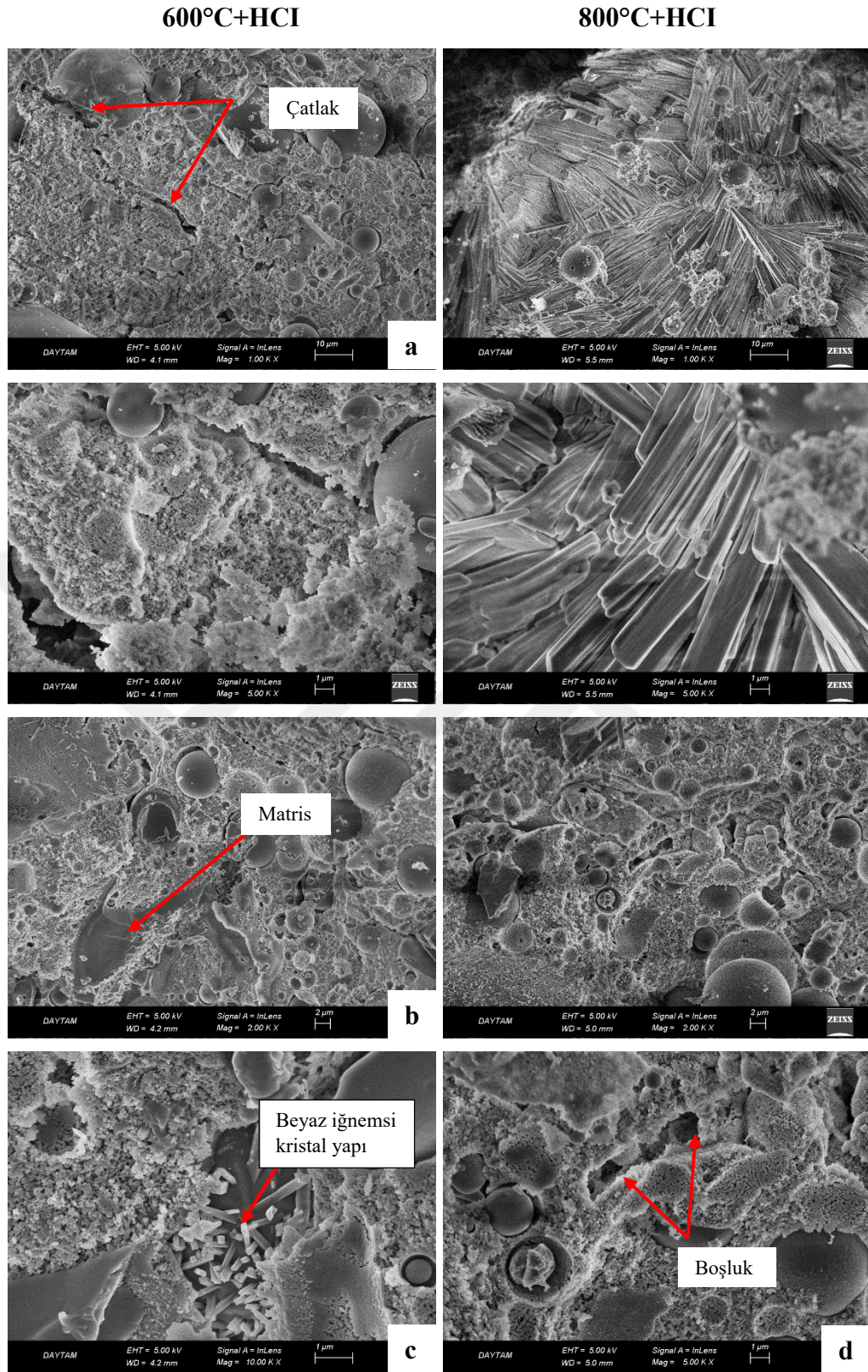
İkincil durabilite testi için geopolimer betonlara uygulanan yüksek sıcaklık sonrası HCl etkisi neticesinde SEM görüntülerine göre her sıcaklıktan sonra çatlaklar ve boşluklar derinleşmiş, büyümüştür. Çatlakların büyümesi ve derinleşmesi geopolimer betonların geçirgenliğinin artmasına sebep olmuştur. Kılcal geçirimsizlik deney sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklık + HCl sonrasında geopolimer betonların katsayı değerlerinde genel olarak artış olduğu görülmektedir. Albegmpri *et al.* (2022) çalışmalarında ürettikleri geopolimer betonları asit çözeltisine maruz bırakmış ve SEM görüntülerinde gözlemlenen çatlaklar sonucunda geçirimsizliğin arttığını ifade etmişlerdir. Matris yapıda 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında matris yapısında bozulmalar gözlemlenmiştir ve geopolimer betonların içyapısındaki yoğunluk azalmıştır (Şekil 74b). Basınç dayanımı sonuçlarında 800°C+HCl etkisinden sonra 800°C sonrasındakine oranla basınç dayanımında daha fazla azalma gözlemlenmiştir. SEM görüntülerine göre 800°C+HCl etkisinden sonra geopolimer betonun matris yapısında ciddi bozulma, çatlak ve boşluk gözlemlenmektedir dolayısıyla basınç dayanımındaki bu azalma SEM görüntüleriyle paraleldir.

200°C+HCl

400°C+HCl



Şekil 73. F-100 200°C+HCl ve 400°C+HCl sonrası SEM görüntüleri



Şekil 74. F-100 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrası SEM görüntüleri

Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrası SEM analizi sonuçları

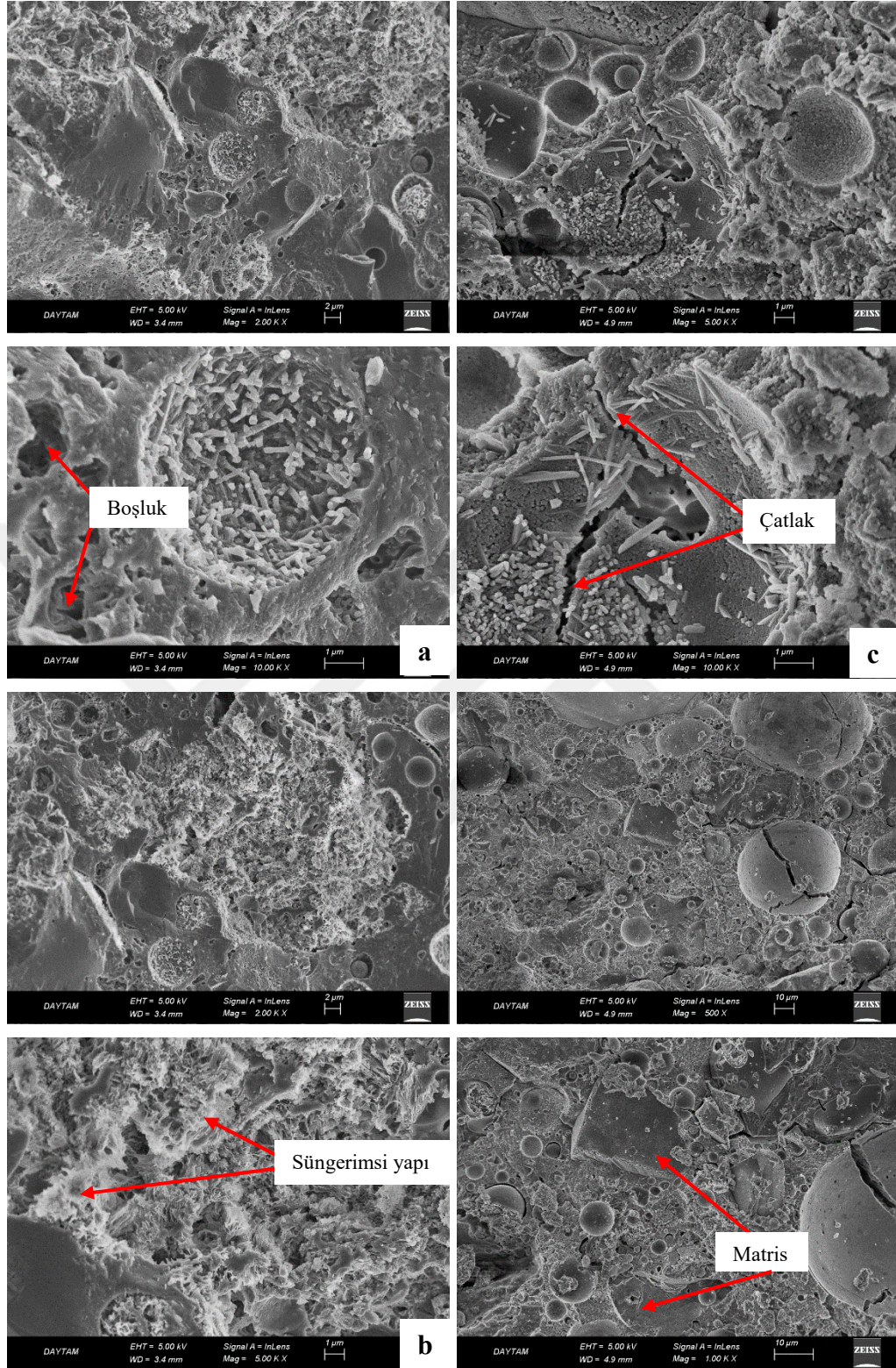
200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarına uygulanan basınç dayanımı, kılcal su emme, ağırlık değişimi ve UPV deneylerinin sonuçlarına göre en iyi sonuçları veren FS-70 karışım

grubunun SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. 200°C+Na₂SO₄ ve 400°C+Na₂SO₄ sonrasında SEM görüntüleri Şekil 75'te 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında ise SEM görüntüleri Şekil 76'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrasında SEM görüntüleri incelendiğinde içyapıda çatlak ve boşluklar gözlemlenmiştir (Şekil 75a, Şekil 75c, Şekil 76a ve Şekil 76c). Boşluk miktarının yüksek sıcaklık sonrasına göre yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ etkisinden sonra iyileştiği Şekil 75 ve Şekil 76'da gözlemlenmektedir.

Sülfat etkisine maruz bırakılan geopolimer betonlarda kristaller oluşur ve matrisin daha sıkı bir yapıya dönüşmesini sağlar. Sülfat etkisinden sonra numunelerde meydana gelen dayanım artışının matris yapısında oluşan bu kristal yapıların boşluklara dolmasından kaynaklanabileceği ifade edilmiştir (Bakharev 2005; Hu *et al.* 2019 Chen *et al.* 2020). Bu çalışmanın basınç dayanımı sonuçlarına göre de yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrasında dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca ağırlık değişimi sonuçları incelendiğinde özellikle 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında geopolimer betonların ağırlıklarında 600°C ve 800°C sonrasına göre artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ neticesinde gözeneklere kristal yapıların dolduğunu desteklemektedir. Diğer durabilite etkilerinden sonra olduğu gibi yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ etkisinden sonra da beyaz iğnemsî kristal yapılar görülmektedir (Şekil 76b ve Şekil 76d). Ayrıca matris yapısında bozulma ile süngerimsi bir yapı gözlemlenmektedir (Şekil 75b).

200°C+ Na₂SO₄

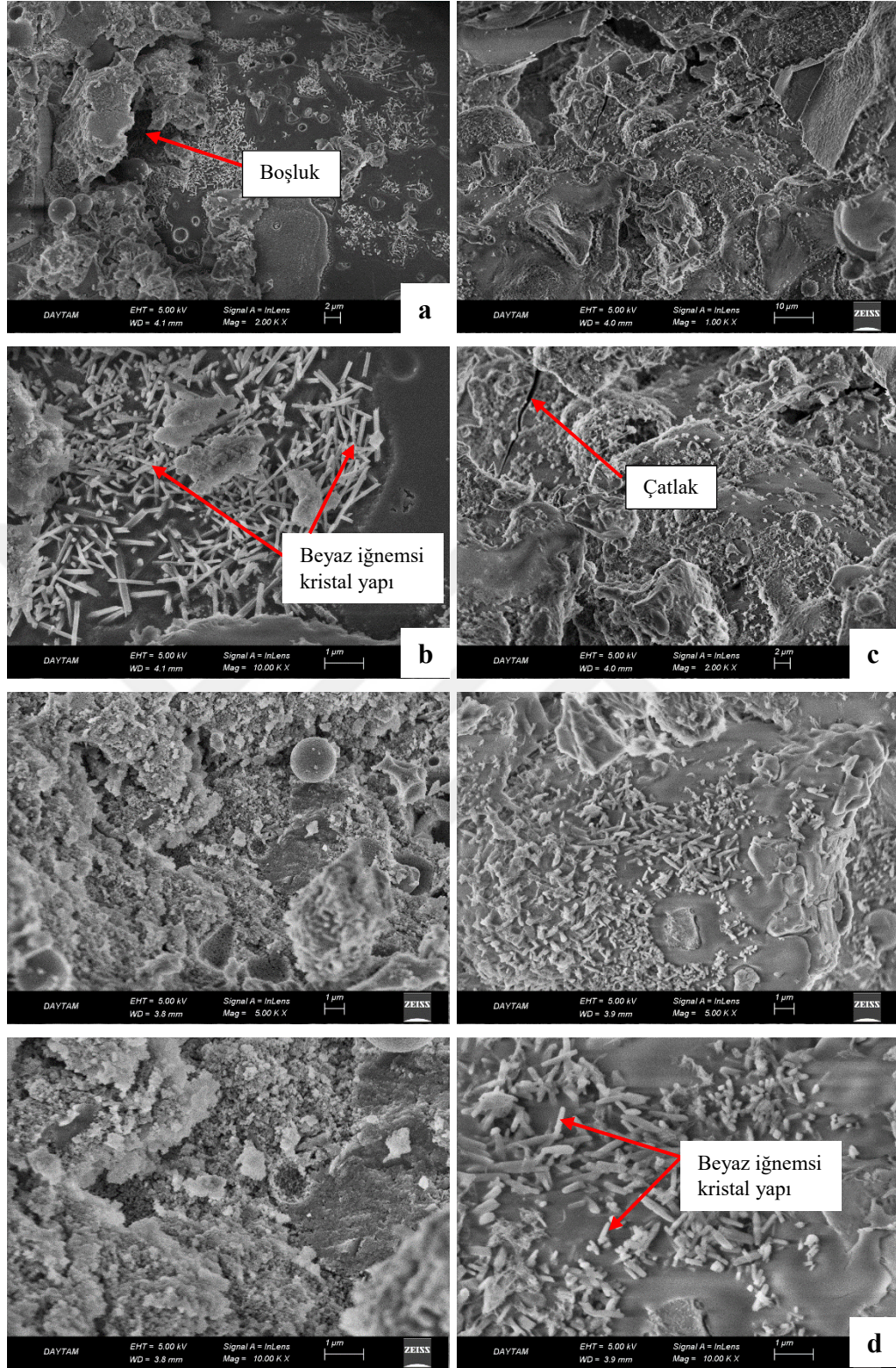
400°C+ Na₂SO₄



Şekil 75. FS-70 200°C+ Na₂SO₄ ve 400°C+ Na₂SO₄ sonrası SEM görüntüleri

600°C+ Na₂SO₄

800°C+ Na₂SO₄



Şekil 76. FS-70 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrası SEM görüntüleri

Yüksek sıcaklık+NaCl sonrası SEM analizi sonuçları

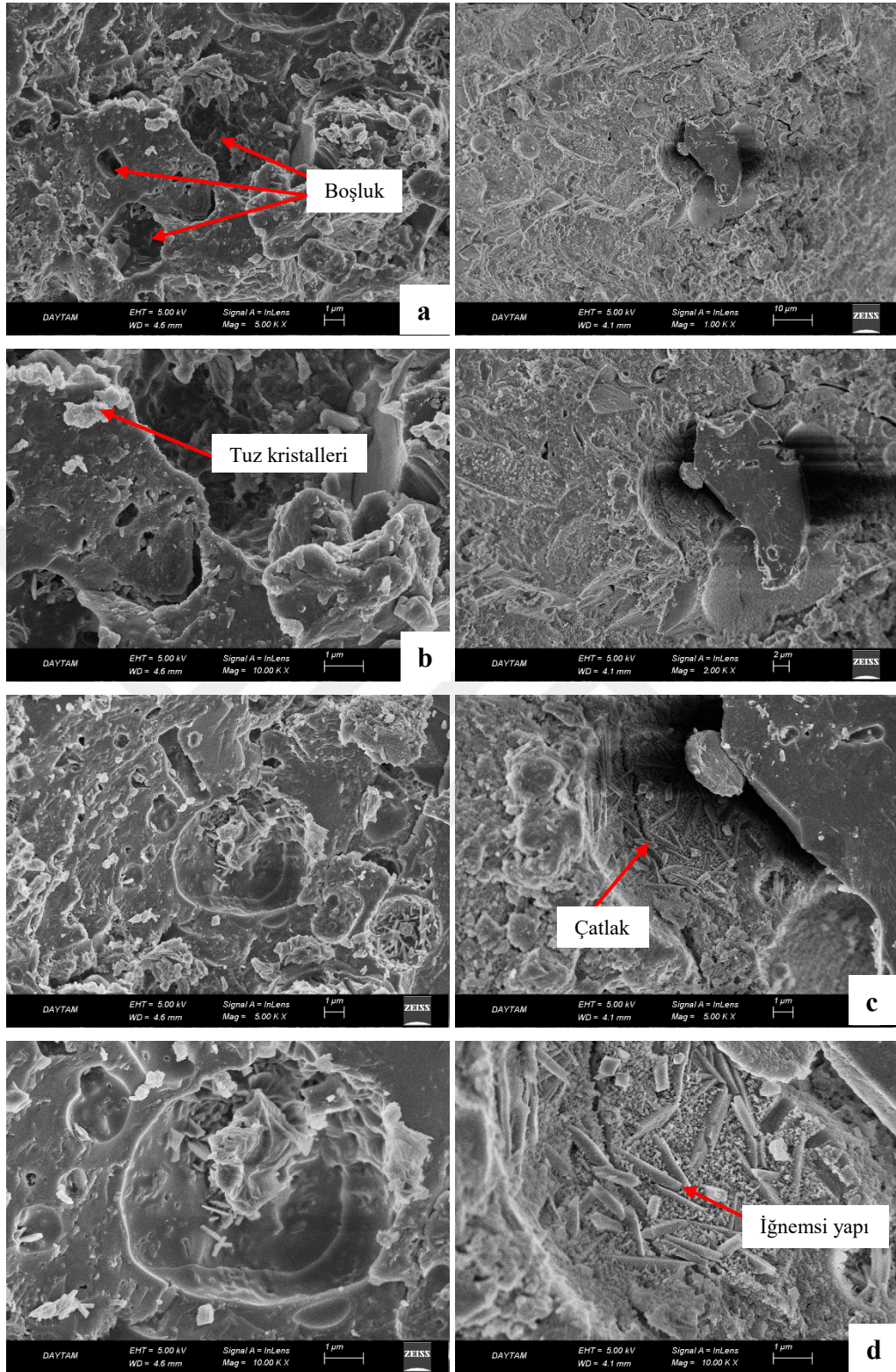
200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında F-100, FS-80, FS-70, FS-60 ve FS-50 karışım gruplarına uygulanan basınç dayanımı, kılcal su emme, ağırlık değişimi ve UPV deneylerinin sonuçlarına göre en iyi sonuçları veren FS-50 karışım grubunun

SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrasında SEM görüntüleri Şekil 77’de 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında ise SEM görüntüleri Şekil 78’de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık+ NaCl etkisi sonrasındaki SEM görüntülerine göre iç yapıda özellikle 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında yoğun bir oluşum gözlemlenmiştir.

Gözenekler ve boşluklar yüksek sıcaklık etkisine göre azalmıştır ve bu durum kılcal su emme katsayı değerlerinin azalmasıyla desteklenmektedir (Şekil 77a ve Şekil 78b). Gözeneklerdeki bu azalmanın boşluklara ve çatlaklara dolan tuz parçacıklarından (Şekil 77b) kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM görüntülerine göre çatlak oluşumu da yüksek sıcaklık+ NaCl sonrasında azalmıştır (Şekil 77c ve Şekil 78a). Ayrıca bu yoğun yapı sayesinde basınç dayanımı değerlerinde, yüksek sıcaklık sonrasında göre yüksek sıcaklık+ NaCl etkisinde artış gözlemlenmektedir. Bu çalışmadaki SEM görüntülerini destekler nitelikte Zhang *et al.* (2022) çalışmasında ürettiği geopolimer beton numunelerin tuz etkisinden sonra gözeneklerinin dolduğunu ve kompakt bir yapı meydana geldiğini sonuçta tuz etkisinin basınç dayanımında artışa sebep olduğunu ifade etmiştir.

200°C+NaCl

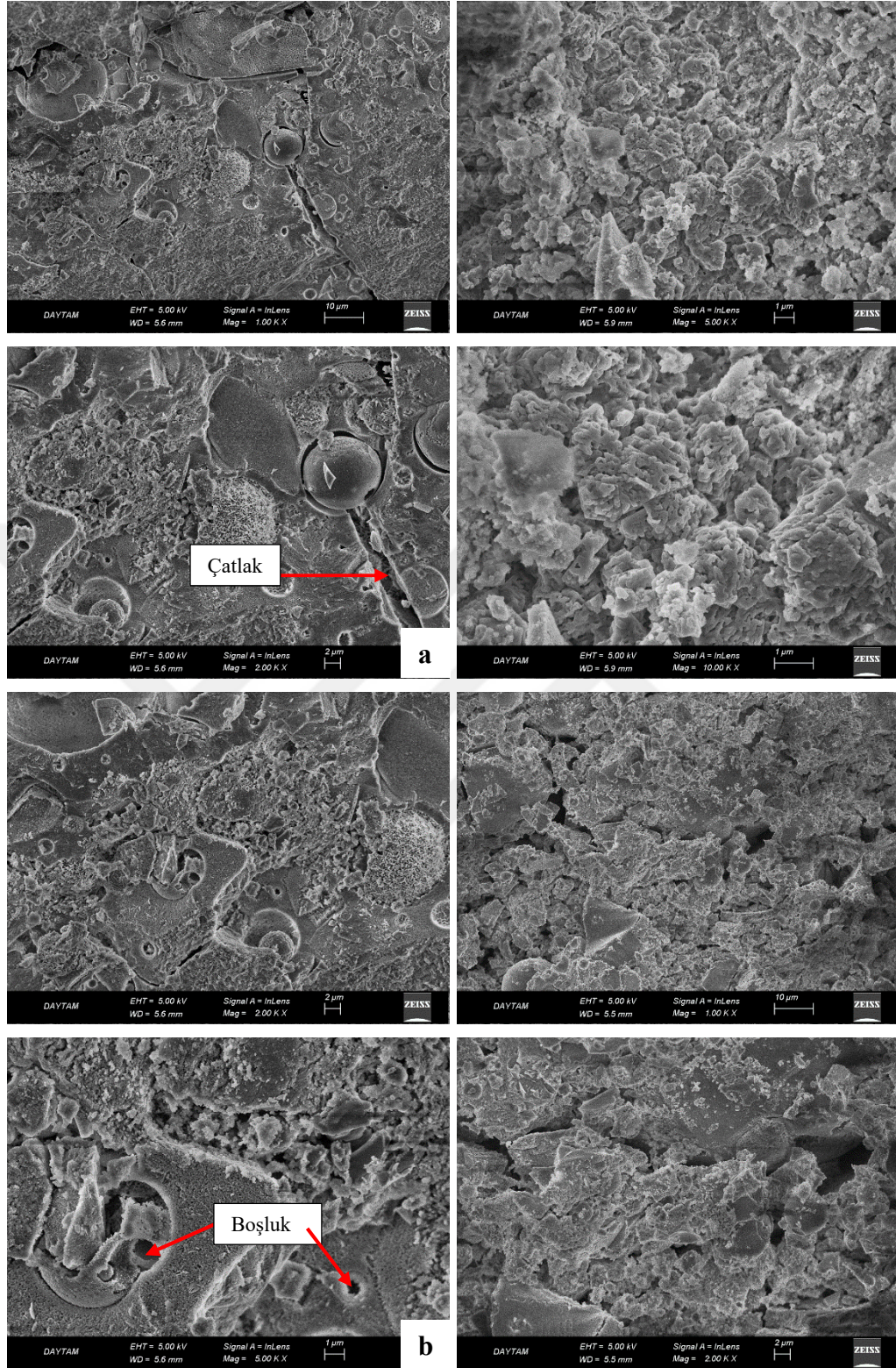
400°C+NaCl



Şekil 77. FS-50 200°C+NaCl ve 400°C+NaCl sonrası SEM görüntüleri

600°C+NaCl

800°C+NaCl



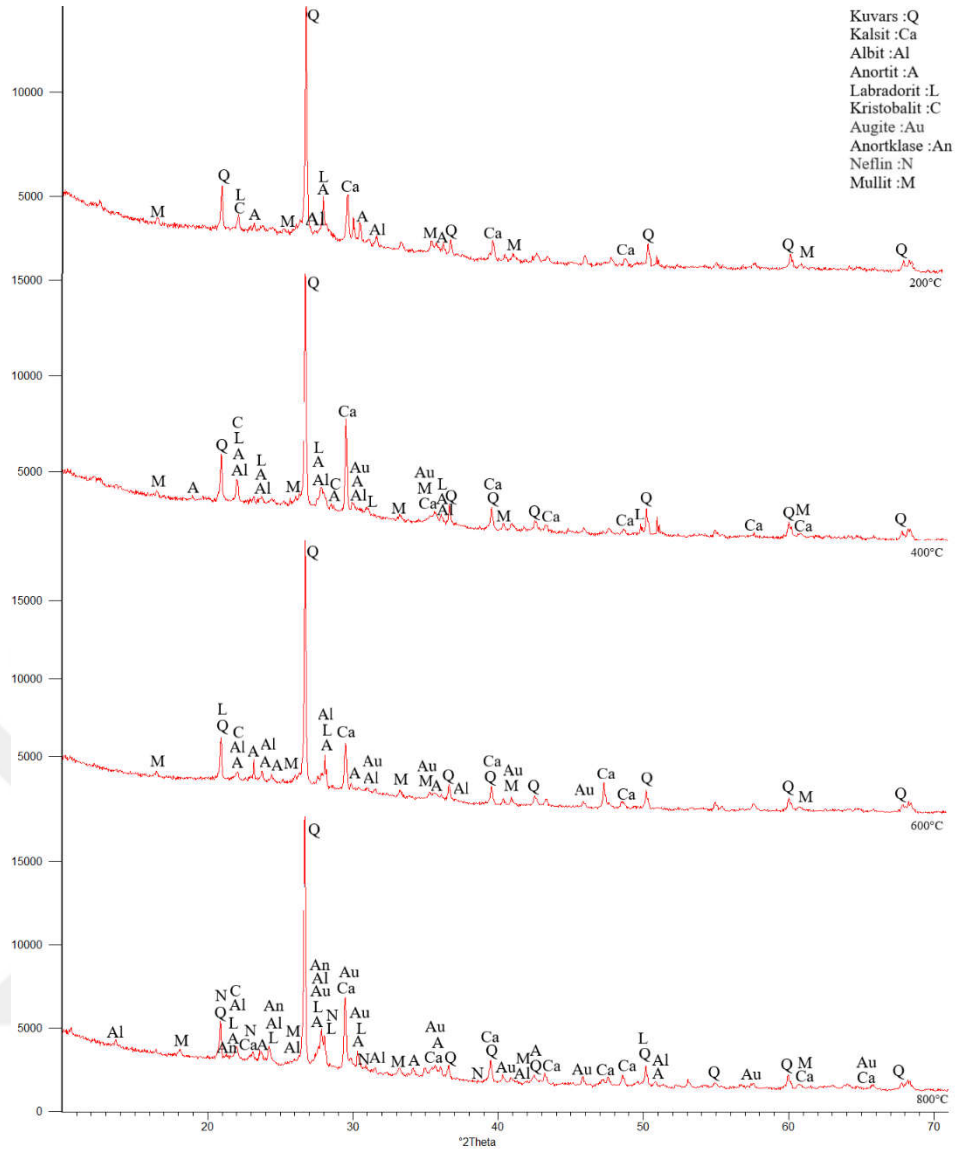
Şekil 78. FS-50 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrası SEM görüntüleri

XRD analizi

Yüksek sıcaklık sonrası XRD analizi sonuçları

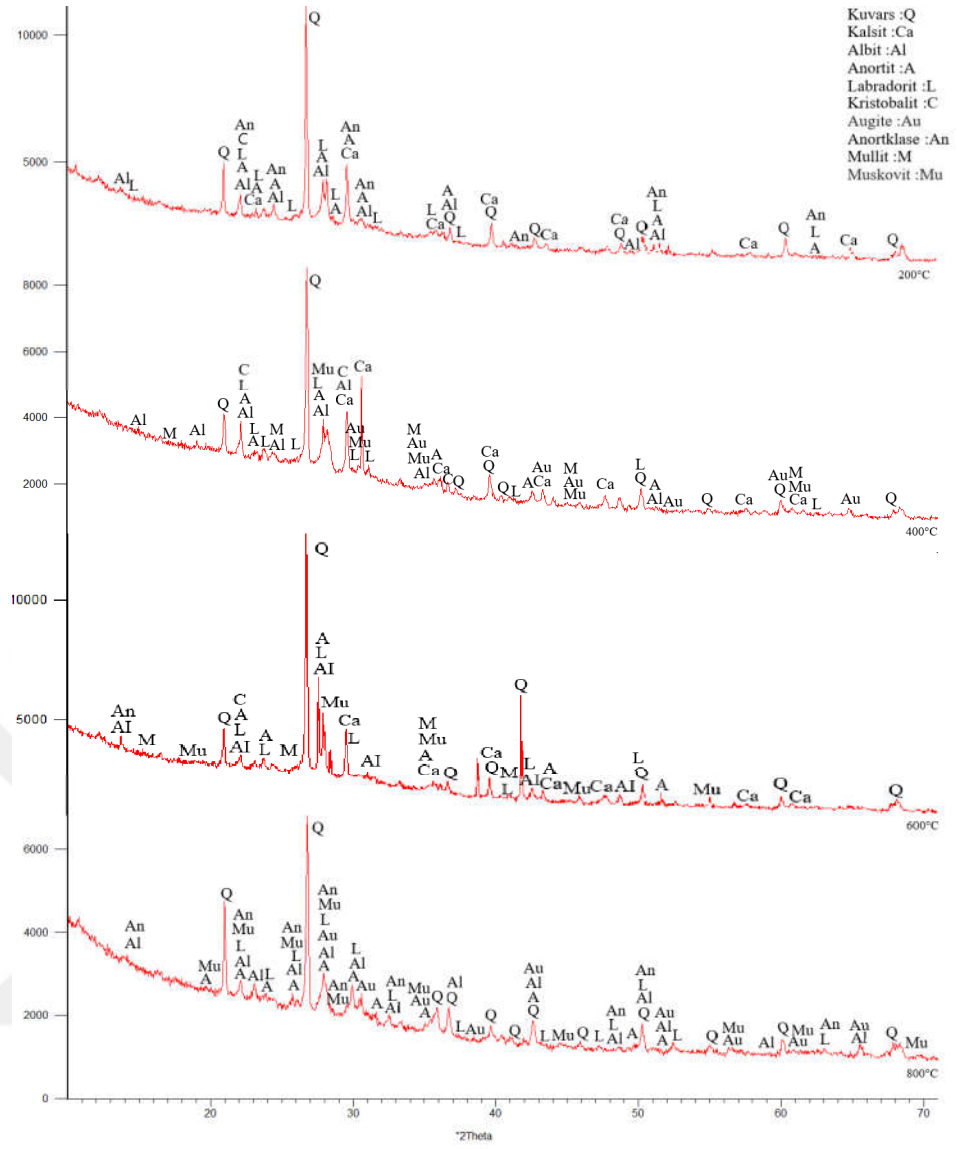
Geopolimer betonların ardışık durabilite etkilerini incelemek için numuneler ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise HCl, Na₂SO₄ ve NaCl'ye maruz

bırakılmıştır. Bu durabilite etkilerinden sonra mekanik özellikleri en iyi olan karışım gruplarının mineralojik bileşenlerini incelemek için XRD analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrasında XRD uygulanan karışım grupları F-100, FS-70 ve FS-50'dir. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra F-100 karışım grubunun Şekil 79'da FS-70 karışım grubunun Şekil 80'de ve FS-50 karışım grubunun Şekil 81'de analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 79, Şekil 80 ve Şekil 81'deki grafikler incelendiğinde numunelerde Kuvars (SiO_2), Kalsit (CaCO_3), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) Anortklase ($\text{NaKAlSi}_3\text{O}_8$), Neflin (NaAlSiO_4), Augite (CaMgFeAlSiO), Muskovit (NaKAlSiOOH), Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), Labradorit (CaONaOAlSiO), Kristobalit (SiO_2) mineralleri gözlemlenmiştir. F-100 karışım grubunda 27°'de 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda belirgin kuvars piki gözlemlenmiştir. Bouaissi *et al.* (2019) çalışmasında geopolimer beton üretmek için UK ve YFC kullanmıştır. Numunelere uyguladığı XRD analizinde 27°'de yüksek yoğunluğa sahip kuvars pikini gözlemlediğini ifade etmiştir. Kuvars piklerinin yüksek ve belirgin olmasının sebebi kristal fazlı olmasıdır. %100 UK kullanılan F-100 karışım grubunda piklerin daha kısa ve dar olması mineralojik yapıda oksitlerin ve farklı kristal fazların olduğunu gösterir (Thomas and Thomas 2021). Şekil 79'a göre kuvars mineralinin pikleri bütün sıcaklıklardan sonra 21-69° arasında yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Kuvars pikleri sıcaklığın artmasıyla yükselmiştir ve yükselme Şekil 79'da analiz sonuçları verilen F-100 karışımında çok daha belirgindir. Geopolimer betonlarda kalsit minerali yüksek sıcaklık sonrasında 22°, 29°, 39° civarında belirgin pikler oluşturmuştur. Kalsit piklerinin yüksekliği FS-50 karışım grubunda sıcaklık arttıkça azalmaktadır. UK kullanımından kaynaklanan mullit mineralinin yoğunluğu YFC oranının artmasıyla azalmıştır. Şekil 81'de FS-50 karışımında yüksek sıcaklıktan sonra mullit minerali gözlemlenmemiştir. Yang *et al.* (2014) çalışmasında UK'ün %100 kullanıldığı karışımlarda XRD analizi sonucunda numunelerde bulunan ana fazların mullit ve kuvars olduğunu ifade etmiştir. Nath and Kumar (2013) çalışmasında mullitin UK'den kaynaklandığını ve karışımlarda YFC oranının artmasıyla mullit yoğunluğunun azaldığını ifade etmiştir. Bunun mullitin YFC den gelen farklı minerallerle birleşip farklı yapılar oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Rashad *et al.* 2021). F-100 karışım grubunda anortklase, augite ve neflin 800°C'den sonra XRD analizinde gözlemlenmiştir. 27° arasındaki belirgin pikte anortklase, labradorit, anorhit, albit ve augite belirlenmiştir. Yong-Sing *et al.* (2022) çalışmasında geopolimer betonların yüksek sıcaklığa maruz kalmasının kararlı kristal fazların oluşmasını kolaylaştırdığı ifade etmiştir. Ayrıca çalışmasında numunelerin 900°C'ye maruz kalmasıyla mineralojik yapısında neflin gözlemlenmiştir. 800°C'e sonrasında mullit az miktarda kısa pikler halinde gözlemlenmiştir ve piklerin kısa olmasının sebebinin mullit mineralinin amorf yapıda olmasıdır (Ahmari *et al.* 2012).



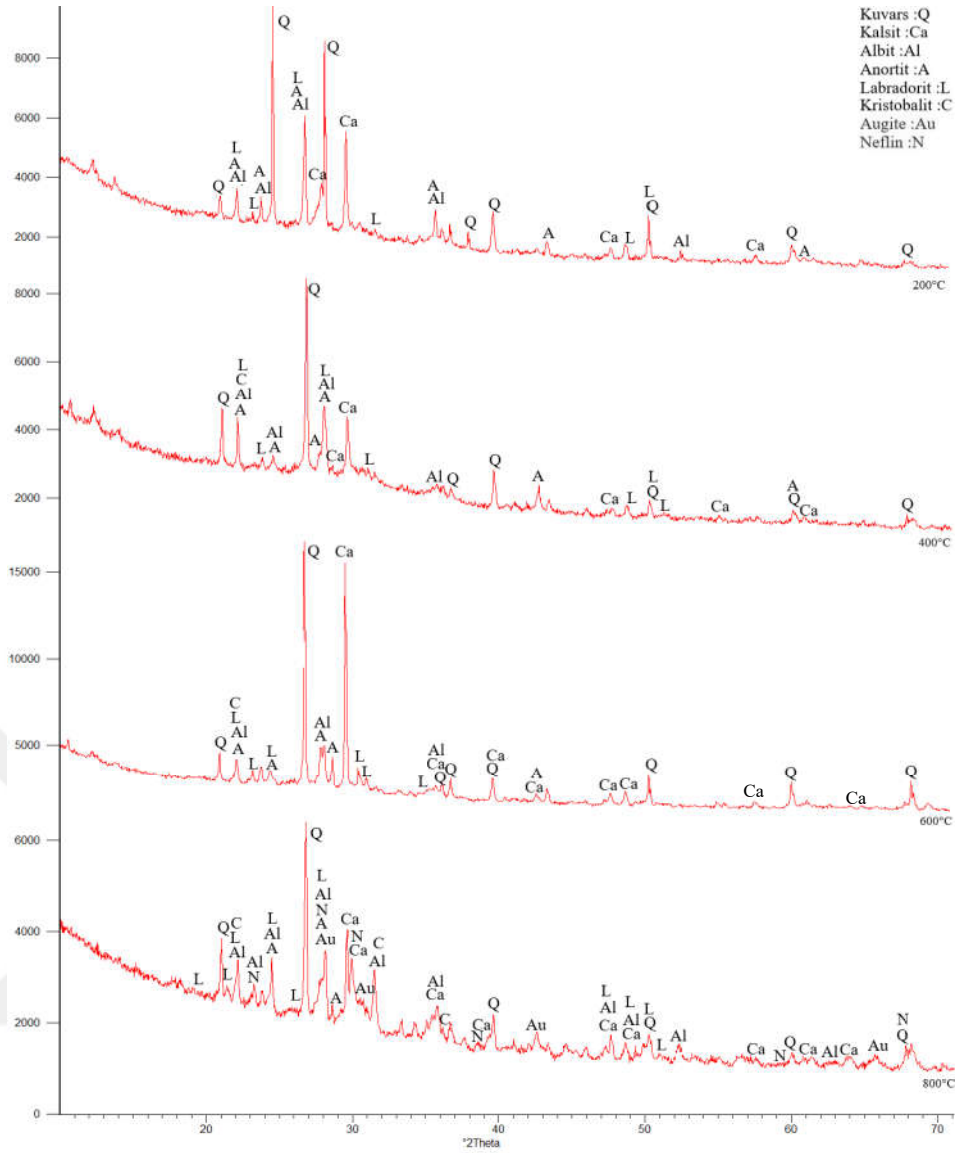
Şekil 79. F-100 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları

FS-70 karışım grubunda F-100'e göre mullit ve neflin kaybolmuştur ve ek olarak muskovit oluşmuştur. Karışıma katılan %30 YFC ile yeni bileşiklerin meydana geldiği düşünülmektedir. Fakat mullit 400°C ve 600°C sonrasında 26°-27° arasında yoğun bir şekilde gözlemlenmiştir. Kuvars piki yine aynı şekilde 27°'de ve YFC'den kaynaklı kalsit piklerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 79, Şekil 80 ve Şekil 81'e göre kalsit bileşiği 25°-65° arasındaki piklerde yoğunlaşmıştır. Dişçi (2021) çalışmasında kalsit bileşiğinin oluşumunun zayıf bir kristal yapıya sahip olan CSH'nin geopolimer betonlarda var olduğunun göstergesi olduğunu ifade etmiştir. 22° pik noktasında cristobalit, muskovit, labradorit, albit, anorhit bileşikleri meydana gelmiştir ve pikin yüksekliği sıcaklığın artmasıyla azalmıştır.



Şekil 80. FS-70 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları

UK'den kaynaklanan kuvars ve YFC'den kaynaklanan kalsit hazırlanan karışımlarda ana malzemedir. YFC oranının artmasıyla kalsit daha belirgin piklerde gözlemlenir. (Ahmari *et al.* 2012). FS-50 karışım grubunda 22°'de kristobalit tüm sıcaklıklardan sonra gözlemlenmiştir. Labradorit, Anortit ve Albit bileşiklerinde bulunana elementlerin benzerliği sebebiyle genellikle yakın piklerde gözlemlenmiştir. F-100, FS-70 ve FS-50'de 22-36° arasında amorf yapıdaki bileşiklerin oluşturduğu tepeler yoğunluktadır (Dişçi 2021; Tan *et al.* 2022). Augite ve neflin 800°C'den sonra XRD analizinde gözlemlenmiştir. 28-29° arasındaki belirgin pikte labradorit, anorhit, neflin, albit ve augite belirlenmiştir. Genel itibariyle sıcaklığın artmasıyla kuvars ve kalsit mineralleri dağılmış ve farklı mineraller belirginleşmiştir (Rashad *et al.* 2012).

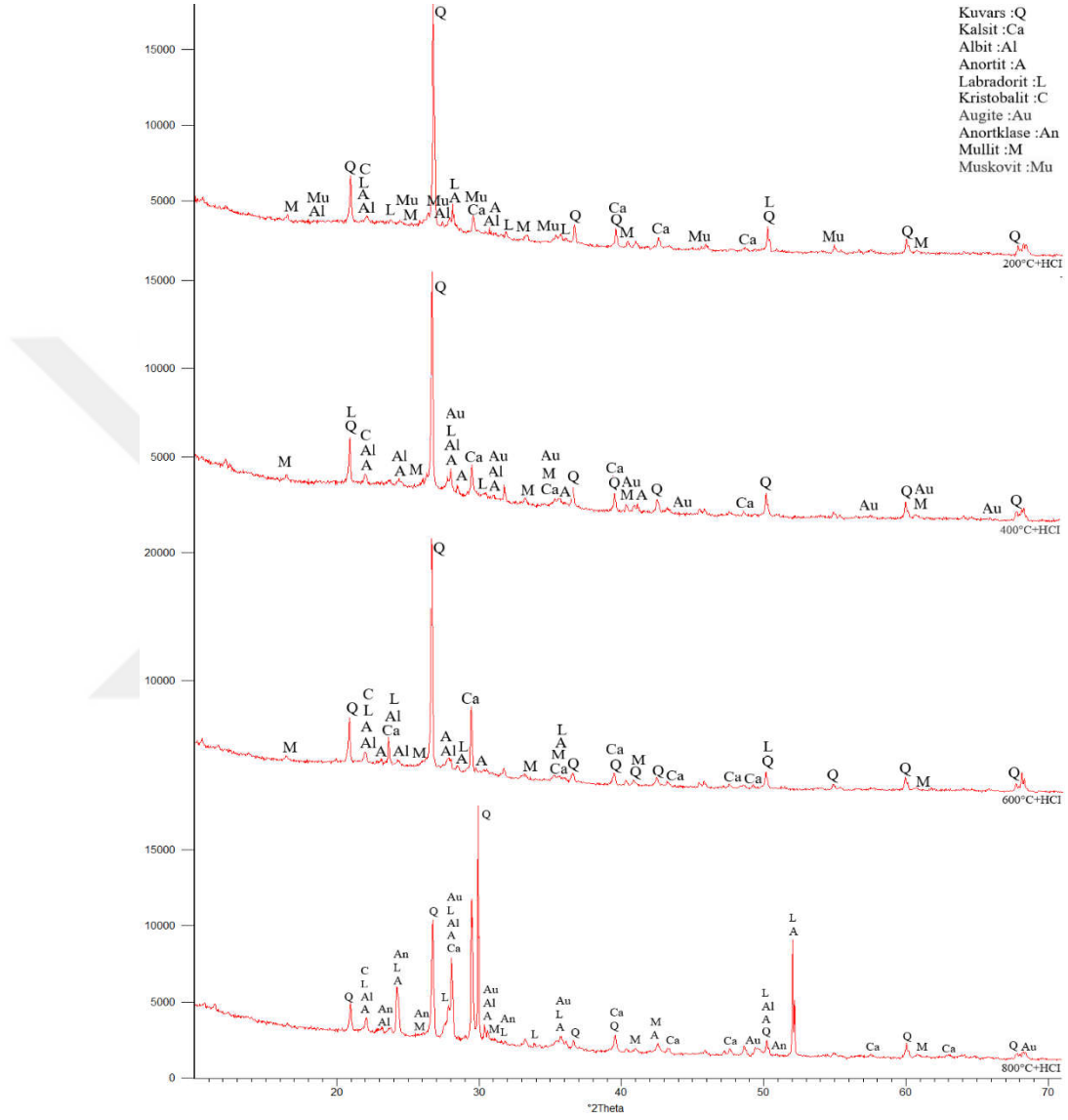


Şekil 81. FS-50 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında XRD analiz sonuçları

Yüksek sıcaklık+ HCl sonrası XRD analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+HCl sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna mineralojik bileşenlerini incelemek için XRD analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+ HCl sonrası en iyi mekanik özellikler F-100 karışım grubunda gözlemlenmiştir. Şekil 82’de F-100’ün 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasındaki XRD analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. F-100 karışım grubunda 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında olduğu gibi 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında da 27° pikinde kuvars bileşiği gözlemlenmiştir ve 22°-69° arasında pikler dağılmıştır. Yüksek sıcaklık+HCl sonrasında kuvars bileşiğinin gözlemlendiği piklerin yüksekliklerinde artış gözlemlenmiş ve belirginlikleri artmıştır. Geopolimer betonların yüksek sıcaklık+HCl’ye maruz kalması neflin

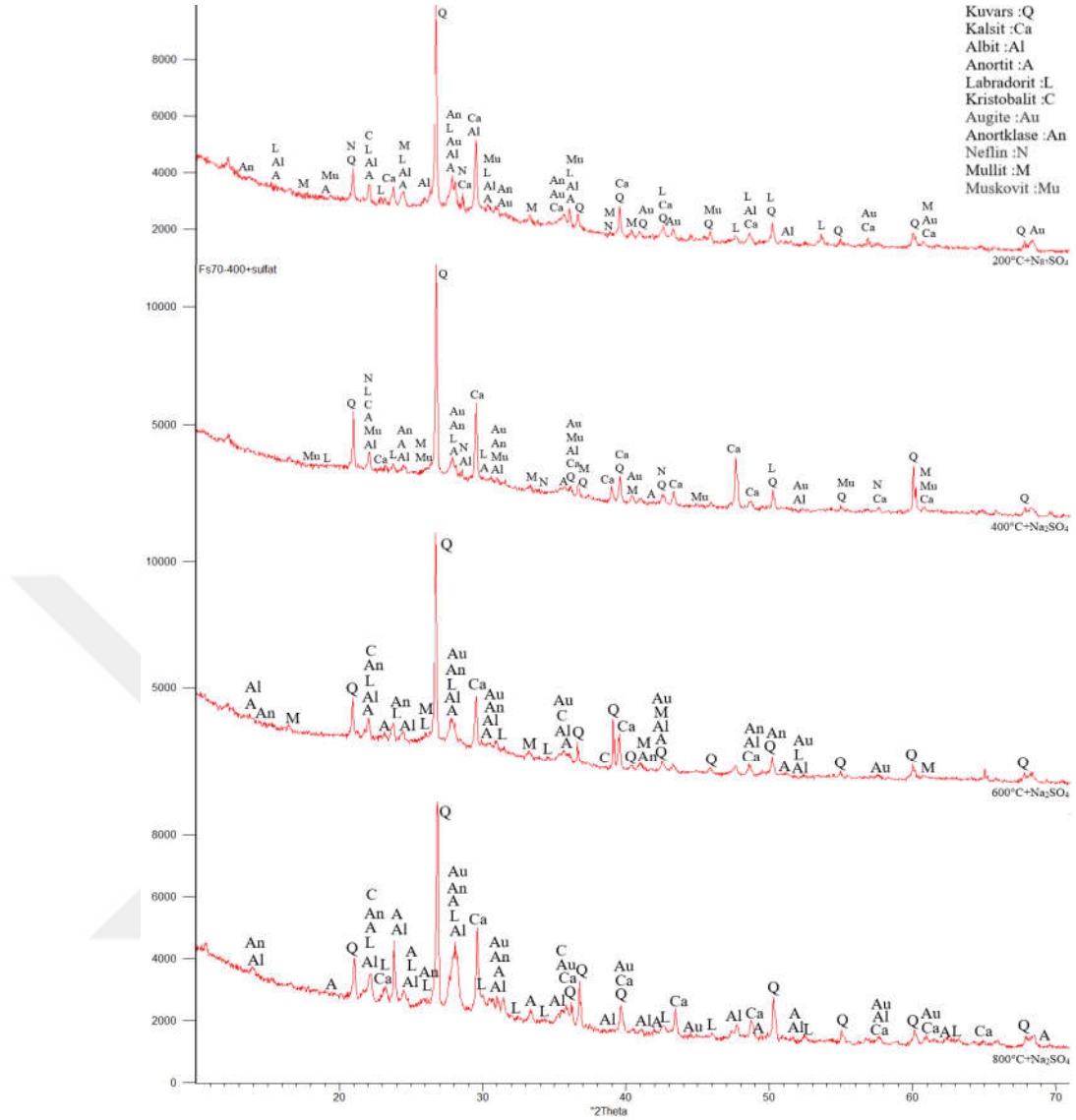
bileşiğinin yok olmasına ve asitten gelen H^+ iyonlarıyla yapılan reaksiyonlarla muskovit bileşiğinin oluşmasına sebep olmuştur. Diğer bileşiklerin yüksek sıcaklık etkisinden sonraki gibi olduğu Şekil 82’de gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık sonrasında olduğu gibi yüksek sıcaklık+ HCl etkisi sonrasında da 28° ve 22° pikinde mineral bakımından bir yoğunlaşma gözlemlenmiştir.



Şekil 82. FS-100 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında XRD analiz sonuçları

Moghaddam *et al.* (2021) çalışmasında UK bazlı geopolimer betonlar üretmiş ve asite maruz bırakmıştır. XRD analizi neticesinde mineralojik yapıda kuvars miktarı artış gösterirken albit miktarının sabit kaldığını ifade etmiştir. Tan *et al.* 2022 çalışmasında geopolimer betonları asite maruz bırakmış ve neticede kalsit, kuvars ve mullitin baskın bileşikler olduğunu gözlemlenmiştir.

Yüksek sıcaklık+ Na₂SO₄ sonrası XRD analizi sonuçları



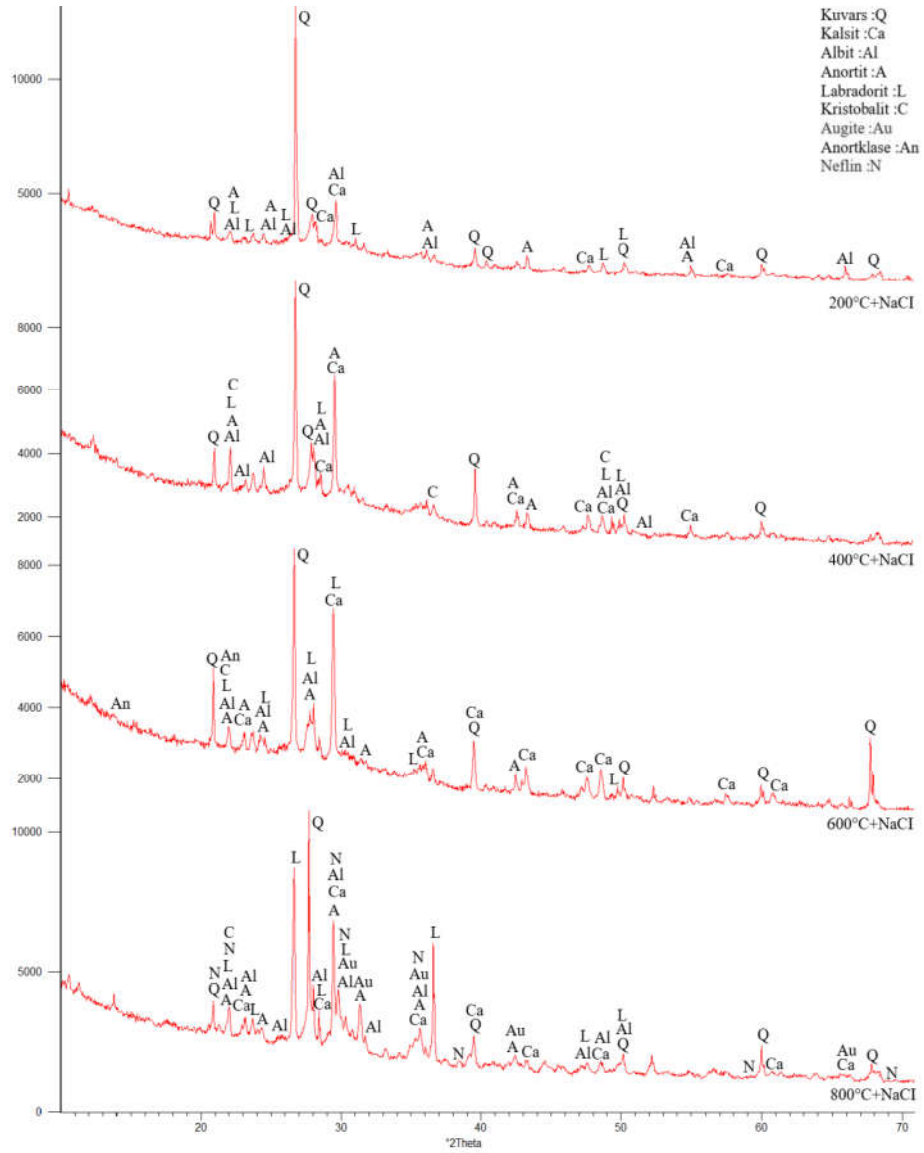
Şekil 83. FS-70 200°C+ Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında XRD analiz sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna mineralojik bileşenlerini incelemek için XRD analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrası en iyi mekanik özellikler FS-70 grubunda gözlemlenmiştir. Şekil 83'te FS-70'in 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasındaki XRD analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık+ Na₂SO₄ sonrasında numunelerin mineralojik yapısında kristal faz yoğunluğu fazladır. FS-70 karışım grubunda 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında olduğu gibi 200°C+Na₂SO₄, 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında da 27° pikinde kuvars bileşiği gözlemlenmiştir ve 21°-68° arasında pikler

dağılmıştır. Yüksek sıcaklık+ Na_2SO_4 etkisinden sonra yüksek sıcaklık sonrası oluşan kristal fazlardan farklı olarak neflin oluşmuştur. Pasupathy *et al.* (2021) çalışmasında geopolimer beton numuneleri sülfat etkisine maruz bırakmış ve XRD analizine tabi tutmuştur. Sonuçta çalışmada numunelerde kalsit, kuvars ve mullitin sayısız pikiyle karşılaştığını ifade etmiştir. Ayrıca kalsit piklerinin karbonatlaşmayı ifade ettiğini belirtmiştir. Bu bilgi çalışmada yüksek sıcaklık+ Na_2SO_4 etkisinden sonra numunelerde FT-IR analizinde gözlemlenen karbonatlaşma olayını destekler niteliktedir. Karbonatlaşma yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında da gerçekleşmektedir. Ardışık durabilite etkileri arasından en fazla kristal faz yoğunluğu yüksek sıcaklık+ Na_2SO_4 etkisinden sonra gözlemlenmiştir. Bakri *et al.* (2012) çalışmasında kristal fazların artması neticesinde geopolimer betonların dayanımında bir artış gözlemlendiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada da yüksek sıcaklık+ Na_2SO_4 neticesinde geopolimer betonların dayanımında artış olduğu basınç dayanımı sonuçlarında gözlemlenmektedir.

Yüksek sıcaklık+ NaCl sonrası XRD analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+ NaCl sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna mineralojik bileşenlerini incelemek için XRD analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+ NaCl sonrası en iyi mekanik özellikler FS-50 karışım grubunda gözlemlenmiştir. Şekil 84'te FS-50'in 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasındaki XRD analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. FS-50 karışım grubunda 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında olduğu gibi 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında da 27° pikinde kuvars bileşiği gözlemlenmiştir ve 22°-69° arasında pikler dağılmıştır. Yüksek sıcaklık +NaCl sonrasında kuvars bileşiğinin gözlemlendiği piklerin yüksekliklerinde azalış gözlemlenmiş ve pikler kısalmıştır. Yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında yüksek sıcaklık etkisi sonrasından farklı olarak anortklase kristal fazı Şekil 84'teki grafikte gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık+ NaCl etkisinden sonra kristal faz yoğunluğu 22°-29°-30° arasındaki piklere doğru kaymıştır. Bütün XRD grafiklerinde 22°'de oluşan pikte gözlemlenen kristobalit fazı yüksek sıcaklık+NaCl etkisi sonrasında da gözlemlenmiştir.

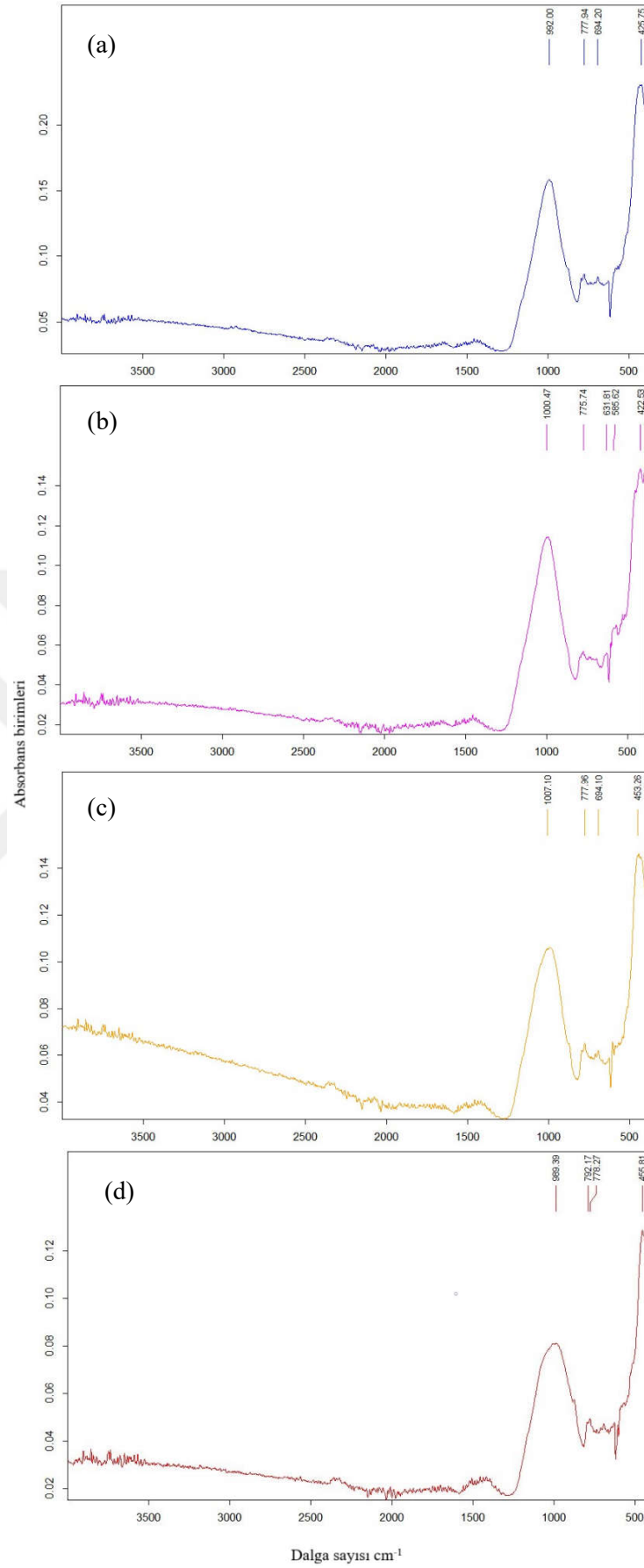


Şekil 84. FS-50 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında XRD analiz sonuçları

FT-IR analizi

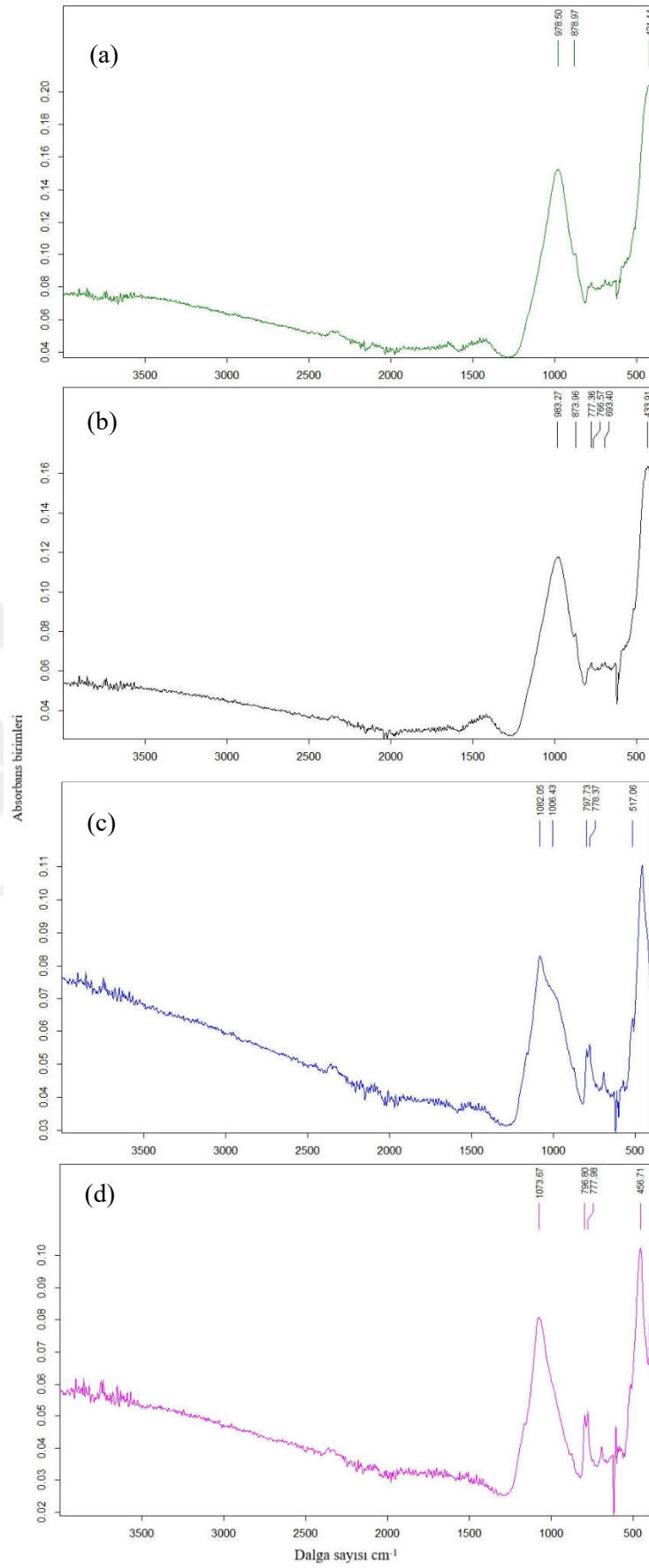
Yüksek sıcaklık sonrası FT-IR analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonların ardışık durabilite etkilerini incelemek için numuneler ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise HCl, Na₂SO₄ ve NaCl'ye maruz bırakılmıştır. Bu durabilite etkilerinden sonra mekanik özellikleri en iyi olan karışım gruplarına iç yapıda meydana gelen bağ yapılarını incelemek için FT-IR analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrasında FT-IR uygulanan karışım grupları F-100, FS-70 ve FS-50'dir. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra F-100 karışım grubunun Şekil 85'te FS-70 karışım grubunun Şekil 86'da ve FS-50 karışım grubunun Şekil 87'de analiz sonuçları verilmiştir.



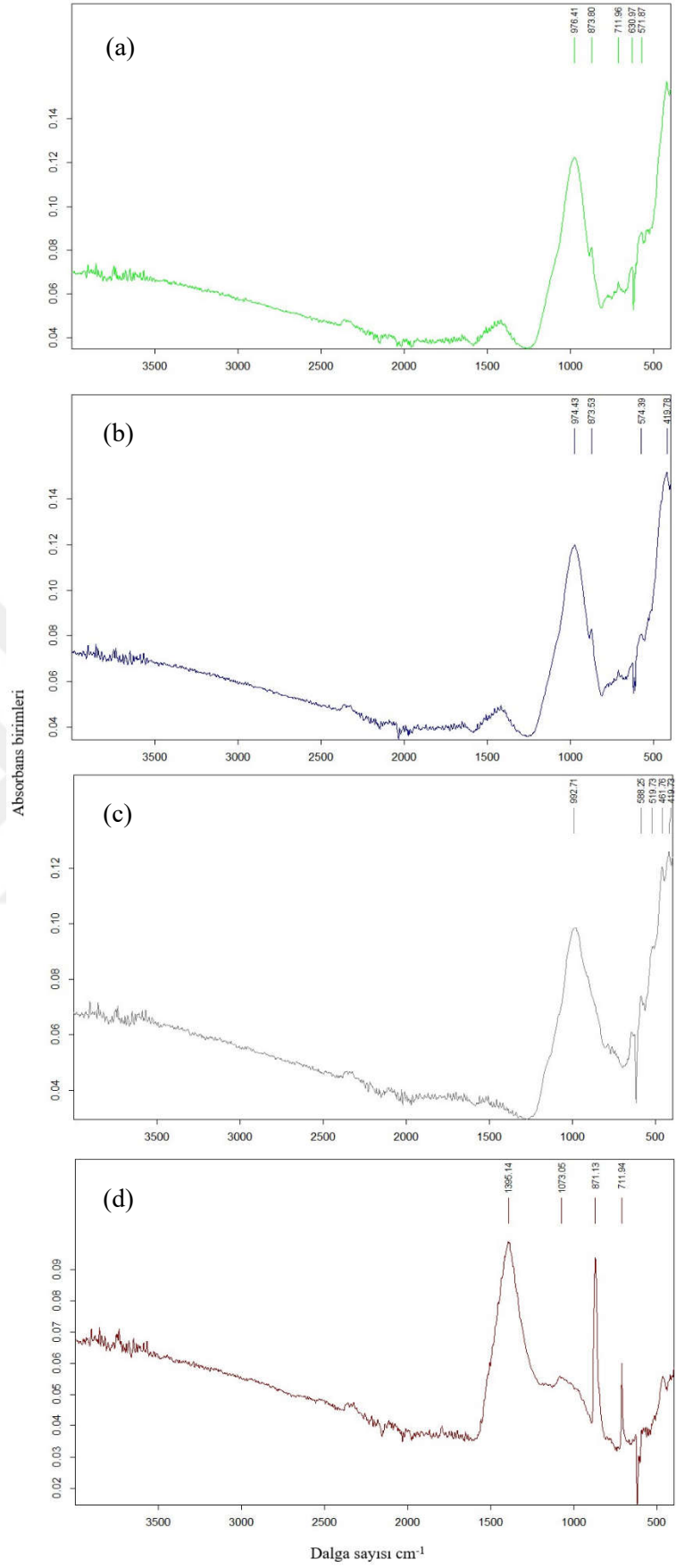
Şekil 85. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası F-100 numunesi FT-IR spektrumu

Şekil 85'teki grafikler incelendiğinde F-100 karışım grubunun 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarından sonra 992-1007 cm⁻¹, Şekil 86'daki grafiklerde FS-70 karışım grubunun 978-1082 cm⁻¹, Şekil 87'deki grafiklerde FS-50 karışım grubunun 974-1395 cm⁻¹ arasında titreşim verdiği gözlemlenmektedir. Nath and Kuman (2013) çalışmasında UK ve YFC kullanarak geopolimer betonlar üretmiştir. FT-IR analizi sonucunda geopolimer betonların 1200–900 cm⁻¹ aralığında güçlü bantlar oluşturduğunu ifade etmiştir. Bu aralıktaki geniş bantlar Si-O-T bağ yapısının oluşturduğu asimetrik titreşimlere karşılık gelmektedir (Rees *et al.* 2007; Panias *et al.* 2007; Guo *et al.* 2010). Samantasinghar and Singh (2018) çalışmasında geopolimer betonların matris yapısının oluşumu sırasında bağ yapılarının tekrar düzenlenmesi neticesinde meydana gelen Si-O-T(Si/Al) titreşimlerinin oluşturduğu 950-1100 cm⁻¹ civarındaki bant, geopolimerlerin ağ yapılarını anlamak açısından önemlidir. Karışım gruplarında cüruf oranının artması ile dalga sayılarının genellikle yüksek dalga sayılarına doğru kaydığı gözlemlenmektedir. Ayrıca YFC oranının artmasıyla Al indirgenmesi sonucu N-A-S-H ile C-S-H oluşmaktadır ve bu olay geopolimerizasyon reaksiyonunda değişiklik meydana getirir, reaksiyonu hızlandırır ve geopolimer betonların yapısını güçlendirir bu yüzden mukavemette iyileşme gerçekleşir (Nagajothi and Elavenil 2021; Rajini *et al.* 2021). Bu çalışmada da YFC oranının artmasıyla 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında dayanımda artış gözlemlenmiştir.



Şekil 86. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası FS-70 numunesi FT-IR spektrumu

FT-IR analizi sonuçlarına göre bütün sıcaklıklardan sonra F-100, FS-70 ve FS-50 karışım gruplarında sırasıyla 990 cm^{-1} , 1029 cm^{-1} , 1084 cm^{-1} civarında titreşimler oluşmuştur. Revathi and Jeyalakshmi (2021) çalışmasında $370\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ aralığında geopolimer betonlarda gerçekleşen Si-O-Si/Al bağının asimetric gerilme, simetric gerilme ve eğilme titreşimi gibi titreşim durumları olduğunu ifade etmiştir. Yüksek sıcaklık sonrasında FT-IR analizi uygulanan üç karışım grubunda da $517\text{--}777\text{ cm}^{-1}$ civarında titreşimler Şekil 85, Şekil 86 ve Şekil 87’de gözlemlenmektedir. Tüm spektrumlarda 777 cm^{-1} titreşiminde gözlemlenen bantlar Al-O bağının gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 536 , 580 , 643 ve 696 cm^{-1} titreşimlerinde bulunan bantlar Si-O-Al, Si-O-Si bağlarının germe ve bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Stephan *et al.* 2018; Mustakim *et al.* 2021). $430\text{--}470\text{ cm}^{-1}$ arasında bulunan bant aralıkları Mg-O yapısının gerilme titreşimini ifade eder (Hsu and Nacu 2005). 874 cm^{-1} civarında meydana gelen titreşimler üç karışım grubunda da gözlemlenmiştir. 870 cm^{-1} titreşimi Si-OH bağının eğilme titreşimini ifade etmektedir. Bu eğilme titreşimi reaksiyon derecelerinde azalmayı gösterir ve bu azalmada dayanım düşüşü gerçekleştiğini temsil eder (Zhang *et al.* 2010; Dişçi 2021). Bu ifadeleri destekler nitelikte 28 günlük dayanımlarla yüksek sıcaklık sonrası dayanımlar ile karşılaştırıldığında üç grupta da dayanım düşüşünün olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle F-100, FS-70 ve FS-50 karışım gruplarında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle numuneler düşük yoğunluk göstermiştir. Bu durum geopolimer betonların yüksek sıcaklığa karşı stabilitesini iyi derecede koruduğunu gösterir (Razak *et al.* 2022).

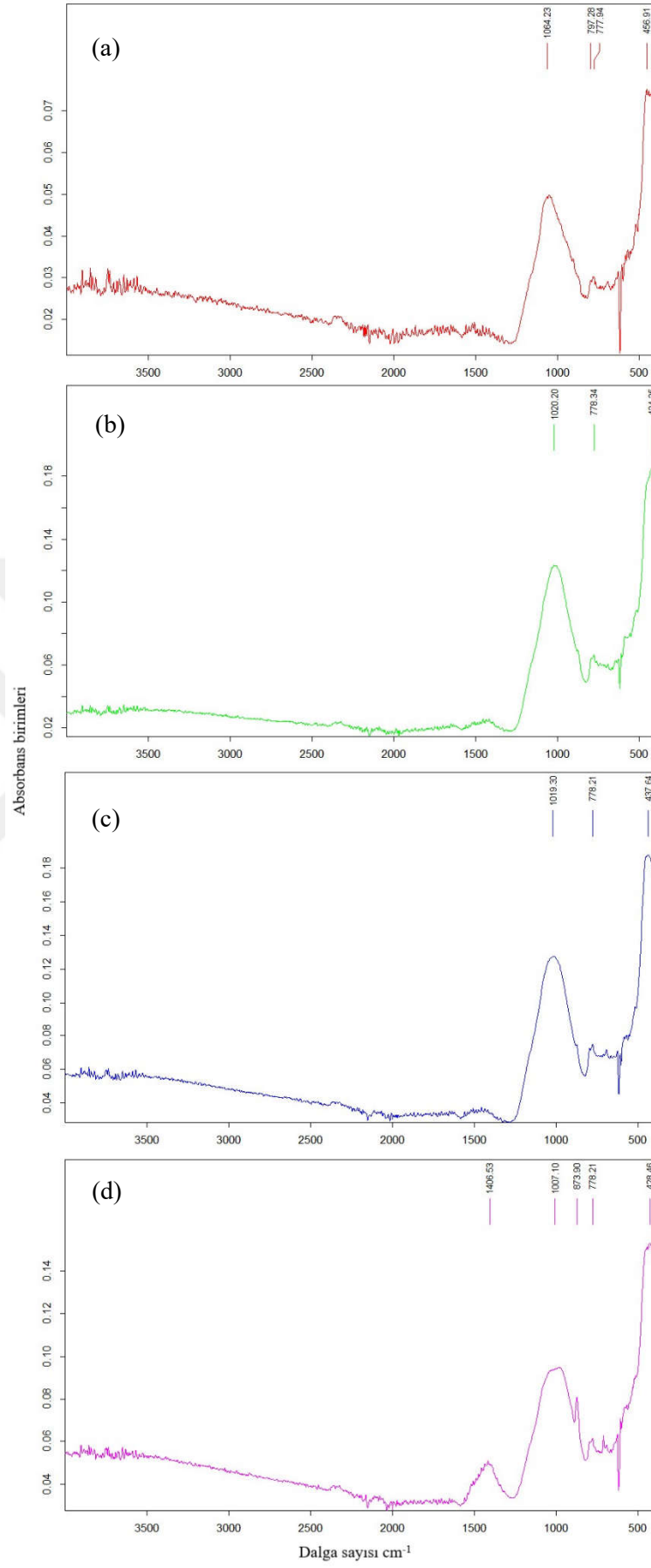


Şekil 87. (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C sonrası FS-50 numunesi FT-IR spektrumu

Yüksek sıcaklık + HCl sonrası FT-IR analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+HCl sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna iç yapıda meydana gelen bağ yapılarını incelemek için FT-IR analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+ HCl sonrası en iyi mekanik özellikler F-100 grubunda gözlemlenmiştir. Şekil 88'de F-100'ün 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasındaki FT-IR spektrumu incelendiğinde geopolimer betonların 1019-1407 cm⁻¹ arasında titreşim verdiği gözlemlenmektedir. F-100 karışım grubu yüksek sıcaklık sonrasında 992-1007 cm⁻¹ aralığında titreşim vermişti. Yani yüksek sıcaklık+ HCl sonrasında Si-O-T bağ yapısının oluşturduğu asimetrik titreşimlerin dalga sayısında 27-400 cm⁻¹ arasında bir kayma gözlemlenmiştir (İsmail et al. 2014; Wang et al. 2018). 1008-1048 cm⁻¹ aralığındaki titreşimler T-O-T(Al/Si) bağlarının asimetrik germe titreşimlerini ifade etmektedir ve bu aralıktaki titreşimlerin artmasına Al ve Si yapılarının az çözünmesinin sebep olduğu ifade edilmiştir (Dişçi 2021). 200°C+HCl, 400°C+HCl, 600°C+HCl ve 800°C+HCl sonrasında F-100 karışım grubunda 424-778 cm⁻¹ arasında titreşimler Şekil 88'de gözlemlenmektedir. Bu bant aralığı yüksek sıcaklık etkisi sonrasına göre genişleme göstermiş ve arada 517 cm⁻¹'deki dalga boyunda bulunan titreşim 424 cm⁻¹'e gerilemiştir. Valencia-Saavedra *et al.* (2020) çalışmasında YFC ve UK kullanarak ürettiği geopolimer betonları asit etkisine maruz bırakmıştır. Asit etkisi sonrasında FT-IR analizinde 470 cm⁻¹ bandındaki titreşim artışının Si-O-Si ve O-Si-O bağlarının sayısında bir artış gerçekleştiğinin bir göstergesi olduğunu ifade etmiştir.

Asit etkisi sonrası FT-IR spektrumlarında genellikle 900 -1200 cm⁻¹ civarında değişiklik gözlemlendiği ve bu değişikliğin N-A-S-H, C-A-S-H fazında gerçekleşmiş olabileceği belirtilmiştir Bernal *et al.* 2012). 800°C+HCl sonrasında Şekil 88d'de 1407 cm⁻¹ dalga sayısında bant gözlemlenmiştir. Musumeci *et al.* (2007) çalışmasında 1470 cm⁻¹ civarında gözlemlenen bandın kalsit içerisinde bulunan O-C-O bağının bandını yansıttığını ifade etmiştir.

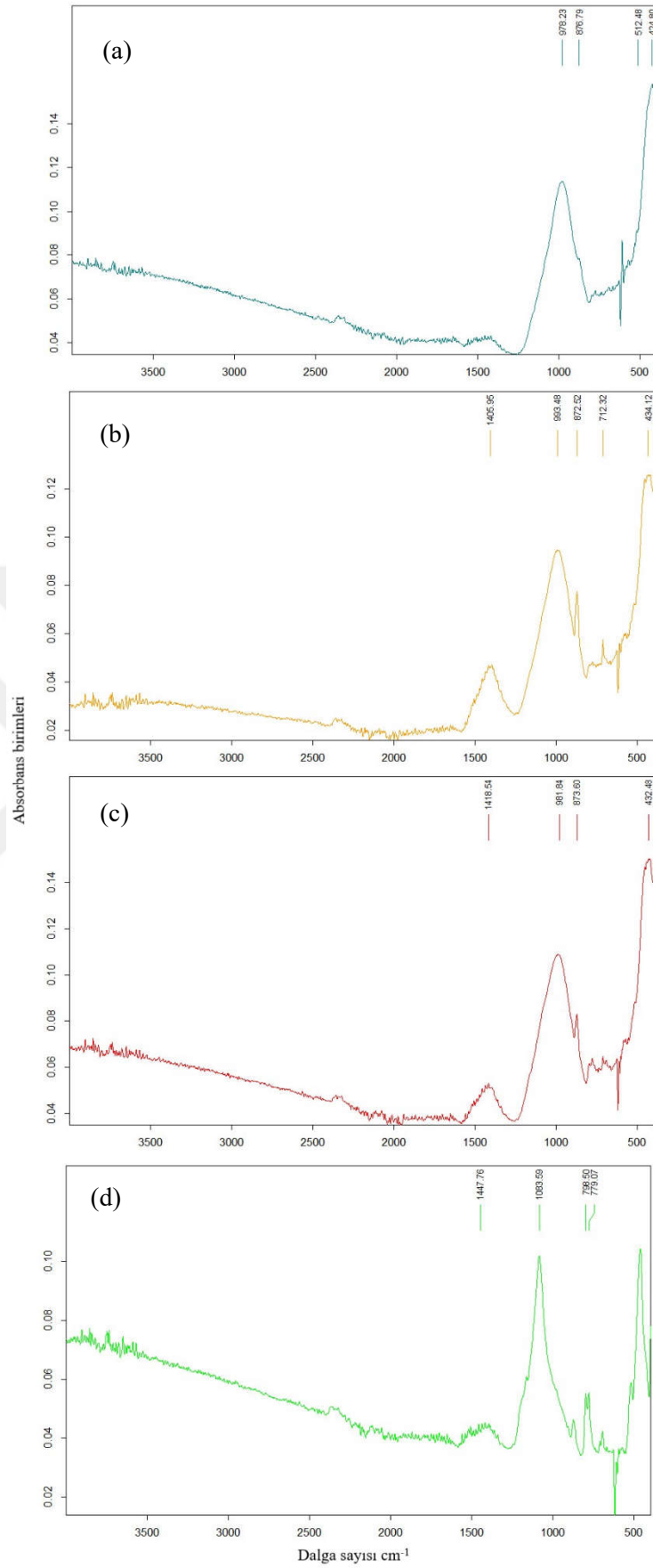


Şekil 88. (a) 200°C+HCl, (b) 400°C+HCl, (c) 600°C+HCl ve (d) 800°C+HCl sonrası F-100 numunesi FT-IR spektrumu

Yüksek sıcaklık + Na₂SO₄ sonrası FT-IR analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+ Na₂SO₄ sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna içyapıda meydana gelen bağ yapılarını incelemek için FT-IR analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrası en iyi mekanik özellikler FS-70 karışım grubunda gözlemlenmiştir. Şekil 89’da FS-70’in 200°C+ Na₂SO₄, 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasındaki FT-IR spektrumu incelendiğinde geopolimer betonların 978-1448 cm⁻¹ arasında titreşim verdiği gözlemlenmektedir. FS-70 karışım grubu yüksek sıcaklık sonrasında 978-1082 cm⁻¹ aralığında titreşim vermişti. Yani yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ sonrasında Si-O-T bağ yapısının oluşturduğu asimetrik titreşimlerin dalga sayısında 0-366 cm⁻¹ arasında bir kayma gözlemlenmiştir. O-C-O bağ yapısının 1430 cm⁻¹ bandında oluşturduğu titreşim bağlayıcıda meydana gelen kalsitin tipik karbonat ürünü ile ilgilidir (Walling *et al* 2018; Panias *et al.* 2007).

Şekil 89’da 400°C+ Na₂SO₄, 600°C+ Na₂SO₄ ve 800°C+ Na₂SO₄ sonrasında sırasıyla 1406 cm⁻¹, 1419 cm⁻¹, 1449 cm⁻¹ bantlarında titreşimler oluşmuştur. El-Didamony *et al.* (2012) çalışmasında 1422 cm⁻¹ civarındaki düşük yoğunluğa sahip olan bantların [CO₃]⁻² gruplarından kaynaklandığını ifade etmiştir. Özellikle 1427-1472 cm⁻¹ arasındaki kısa bantlarda oluşan karbonatlaşmanın atmosferle temastan kaynaklandığını belirtmiştir. Bu çalışmada yüksek sıcaklık+ Na₂SO₄ etkisinden sonra numunelerde havayla temastan kaynaklanan karbonatlaşma gözlemlenmiştir. Rajini *et al.* (2021) çalışmasında bu çalışmanın XRD sonuçlarını destekler nitelikte, geopolimer betonlarda oluşan karbonattan kaynaklanan anortit ve kalsit 1423 cm⁻¹ bandında gözlemlendiğini ifade etmiştir. 400°C+Na₂SO₄, 600°C+Na₂SO₄ ve 800°C+Na₂SO₄ sonrasında FS-70 karışım grubunda 424-512 cm⁻¹ eğilme titreşimini ifade eden bant gözlemlenmiştir ve bu titreşimler Si-O-Si, O-Si-O bağ yapılarına karşılık gelmektedir (Panias *et al.* 2007). Yüksek sıcaklık sonrasında olduğu gibi 777 cm⁻¹ civarında titreşim bantları gözlemlenmiştir, bu titreşim bandında fazla bir kayma olmamıştır ve bantlar Al-O bağının gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır.

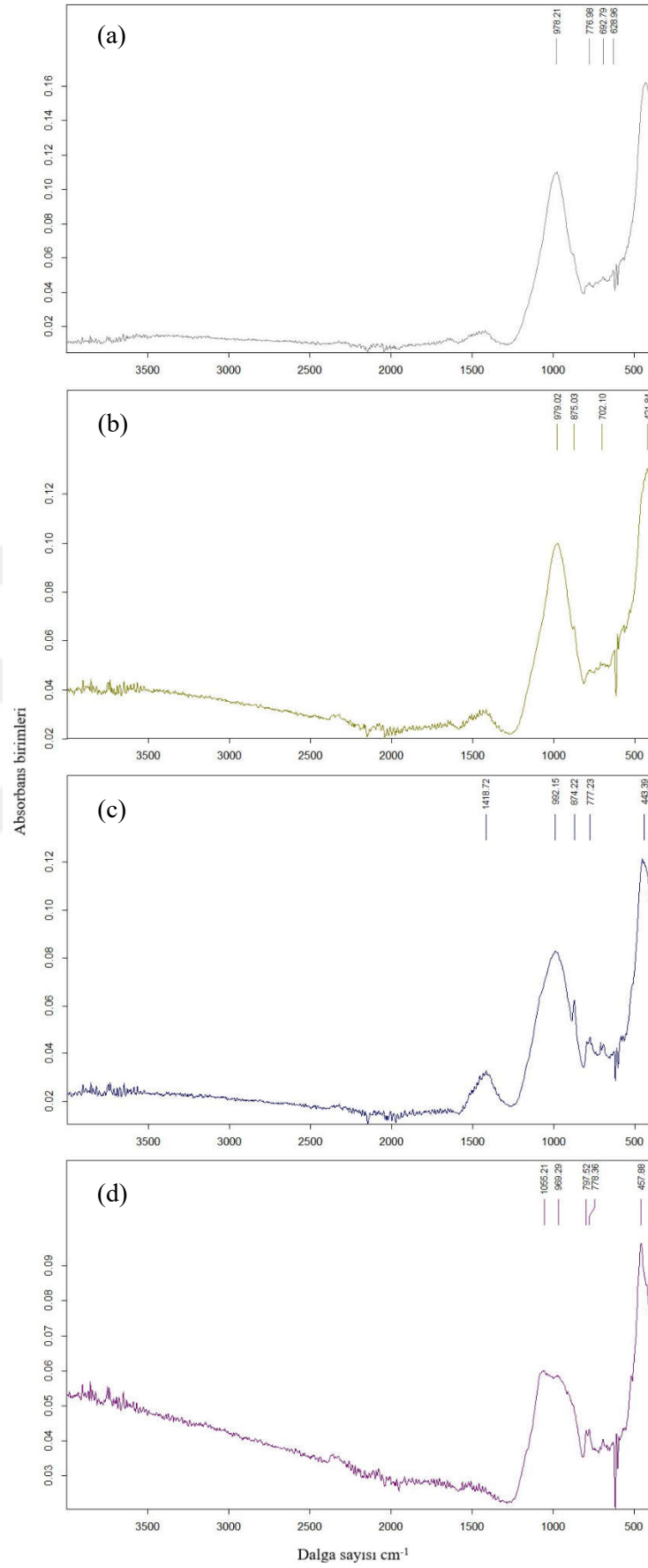


Şekil 89. (a) 200°C+ Na_2SO_4 , (b) 400°C+ Na_2SO_4 , (c) 600°C+ Na_2SO_4 ve (d) 800°C+ Na_2SO_4 sonrası FS-70 numunesi FT-IR spektrumu

Yüksek sıcaklık + NaCl sonrası FT-IR analizi sonuçları

Çalışmada geopolimer betonlar ardışık durabilite testi için ilk olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara daha sonra ise NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık+ NaCl sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan karışım grubuna içyapıda meydana gelen bağ yapılarını incelemek için FT-IR analizi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık+NaCl sonrası en iyi mekanik özellikleri veren karışım FS-50'dir.

Şekil 90'da FS-50'in 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasındaki FT-IR spektrumu incelendiğinde geopolimer betonların 978-1418 cm⁻¹ arasında titreşim verdiği gözlemlenmektedir. FS-50 karışım grubu yüksek sıcaklık sonrasında 974-1395 cm⁻¹ aralığında titreşim vermişti. Yani yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında Si-O-T bağ yapısının oluşturduğu asimetrik titreşimlerin dalga sayısında 4-23 cm⁻¹ arasında bir kayma gözlemlenmiştir. Literatürde 800–1200 cm⁻¹ aralığında tanımlanan piklerin çoğunun Si-O-Si(AI) titreşimleriyle alakalı olduğu belirtilmiştir (Criado *et al.* 2007; Liu *et al.* 2016). Şekil 90'da 200°C+NaCl, 400°C+NaCl, 600°C+NaCl ve 800°C+NaCl sonrasında 775 cm⁻¹ civarında titreşimlerin olduğu gözlemlenmektedir. Pasupathy *et al.* (2021) çalışmasında geopolimer beton numunelerin FT-IR analizi sonucunda 785 cm⁻¹ bandında oluşan titreşimlerin kuvars bileşeninin kristal fazıyla ilgili olduğunu belirtmiştir. 777 cm⁻¹'den 785 cm⁻¹'e kaymasının sebebinin matris yapıdaki AI artışından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Li *et al.* 2019). 600°C+NaCl sonrasında FT-IR analizi sonrasında 1419 cm⁻¹ germe titreşimini ifade eden bant gözlemlenmiştir ve bu bantta O-C-O bağ yapısı oluşmaktadır. Gharzouni *et al.* (2021) çalışmasında 1408-1448 cm⁻¹ arasındaki titreşimlerde karbonatlaşma oluşması sebebiyle [HCO₃]⁻ bağ yapısını gözlemlemiştir. Neticede yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında FT-IR analizindeki titreşim bantlarında çok fazla bir kayma gözlemlenmemiştir.



Şekil 90. (a) 200°C+NaCl, (b) 400°C+NaCl, (c) 600°C+NaCl ve (d) 800°C+NaCl sonrası FS-50 numunesi FT-IR spektrumu

SONUÇLAR

Bu çalışmada UK ve YFC'nin farklı oranlarda karıştırılmasıyla üretilen ve ardışık durabilite testi için önce yüksek sıcaklıklara (200°C, 400°C, 600°C, 800°C) ardından HCl, Na₂SO₄ ve NaCl etkisine maruz bırakılan geopolimer betonların basınç dayanımı (28. ve 90. gün), kılcal su emme, UPV, SEM, XRD, FT-IR ve ağırlık değişimi sonuçları aşağıda verilmiştir.

- 28 ve 90 günlük basınç dayanımları tüm karışımlarda FS-50 grubunda sırasıyla 63,12 MPa ve 68,52 MPa olarak en yüksek değere ulaşmıştır ve karışım gruplarında daha yoğun matris yapısının oluşmasını sağlayan YFC'nin oranının artmasıyla geopolimer betonların basınç dayanımları artmıştır. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sonrasında FS-50 karışım grubunda sırasıyla %12,8, %23, %43,39, ve %61,96 oranlarında azalma gözlemlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık+ HCl etkisinden sonra YFC miktarının artmasıyla basınç dayanımdaki azalma oranının da arttığı ve yüksek sıcaklık+HCl etkisinden sonra maksimum ve minimum dayanım düşüşlerinin sırasıyla FS-50 ve F-100 gruplarında olduğu gözlemlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl etkisi sonrasında genel olarak basınç dayanımlarında artış olmuştur. Artış oranları %0,07 ile %4,64 arasında olduğu için ardışık durabilite etkisinin dayanımı negatif yönde fazla etkilemediği görülmüştür.
- Karışımların fiziksel görünimleri incelendiğinde 400°C'den sonra renk pembeye dönüşürken 600°C'den sonra ise griye dönmüş ve sıcaklığın artışıyla kılcal çatlaklar belirginleşmiştir. Yüksek sıcaklık+HCl etkisinden sonra ise renk değişimi kahverengiye doğru koyulaşmıştır ve yüzeyde kılcal çatlakların ve gözeneklerin belirginleştiği gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl etkileri sonrasında fiziksel görüntüde benzer değişimler gerçekleşmiştir. Numune yüzeylerinde açık kahverengiye doğru bir renk değişimi, matlaşma, pürüzlülük, tanecik şeklinde tuz kristalleri ve beyaz leke oluşumları gözlemlenmiştir.
- 28 ve 90 günlük kılcal su emme katsayılarına göre en yüksek kılcal su emme değerleri F-100 ve en düşük kılcal su emme değerleri FS-50 karışım gruplarında gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında sıcaklığın artmasıyla gözenekler ve çatlaklar çoğalmış ve kılcal su emme katsayıları genellikle artmıştır.

Yüksek sıcaklık+HCl sonrasında YFC oranının artmasıyla kılcal su emme katsayılarında artış olduğu ve en düşük katsayının F-100 karışım grubunda olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında katsayı değerlerinde birbirine çok yakın olmakla beraber artış gözlemlenmiştir.

- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre genel olarak yüksek sıcaklık sonrasında F-100 karışımlarının ağırlık kaybının daha fazla olduğu YFC oranının artmasıyla ağırlık kaybının azaldığı gözlemlenmektedir. YFC oranının artmasıyla yüksek sıcaklık+HCl sonrasında numunelerin ağırlık kaybı artmıştır. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl etkisi sonrasında numune ağırlıklarında artış gözlemlenmiştir.
- UPV deney sonuçları yüksek sıcaklık, yüksek sıcaklık+HCl, yüksek sıcaklık+Na₂SO₄, ve yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında basınç dayanımı sonuçlarıyla genellikle uyumludur.
- SEM analizinde geopolimer betonlarda YFC oranının artışıyla numunelerde daha kompakt bir yapı olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde sıcaklığın artışıyla boşluklar ve kılcal çatlakların arttığı, yüksek sıcaklık+HCl sonrasında çatlaklar ve boşlukların derinleştiği ve büyüdüğü gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında ise numunelerde oluşan kristal yapının yüksek sıcaklık sonrasında oluşan gözeneklere dolup yapıyı sıkılaştırdığı gözlemlenmiştir.
- XRD analizinde yüksek sıcaklık, yüksek sıcaklık+HCl, yüksek sıcaklık+Na₂SO₄ ve yüksek sıcaklık+NaCl sonrasında numunelerde 28°'de pik olduğu ve bu pikte kuvars mineralinin olduğu ve mineral yoğunluklarının da genellikle 20°-30° arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.
- En yüksek basınç dayanımlara sahip grupların FT-IR analizlerinde 1200–900 cm⁻¹ aralığında güçlü ve geniş bantlar olduğu ve Si-O-Si/Al bağ yapısını temsil eden asimetrik titreşimlerin olduğu görülmüştür. Genellikle her karışım grubunda 1427-1472 cm⁻¹ arasındaki kısa bantlarda oluşan karbonatlaşmanın atmosferle temastan kaynaklandığı ve 470 cm⁻¹ bandındaki titreşim artışının Si-O-Si ve O-Si-O bağlarının sayısında bir artış gerçekleştiğinin bir göstergesi olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Abdalqader, A. F., Jin, F., Al-Tabbaa, A., 2016. Development of greener alkali-activated cement: utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113, 66-75.
- Abdel-Ghani, N. T., Elsayed, H. A., AbdelMoied, S., 2018. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance. *Hbrc Journal*, 14(2), 159-164.
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., Zhang, L., 2012. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718-729.
- Aiken, T. A., Kwasny, J., Sha, W., Soutsos, M. N., 2018. Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 111, 23-40.
- Akbulut, F., 2020. Kırmızı Çamur ve Yüksek Fırın Cürufunun Perlit Esaslı Geopolimer Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akbulut, F., Polat, R., Karagöl, F. F., 2021. Erzurum Pasinler Bölgesi Perlitin Alüminosilikat Kaynağı Olarak Geopolimer Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 37-45.
- Al-Akhras, N. M., 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and concrete research*, 36(9), 1727-1734.
- Albegmprli, H. M., Al-Qazzaz, Z. K., Rejeb, S. K., 2022. Strength performance of alkali activated structural lightweight geopolymer concrete exposed to acid. *Ceramics International*, 48(5), 6867-6873.
- Albidah, A., Alqarni, A. S., Abbas, H., Almusallam, T., Al-Salloum, Y., 2022. Behavior of Metakaolin-Based geopolymer concrete at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 317, 125910.
- Albitar, M., Ali, M. M., Visintin, P., Drechsler, M., 2017. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374-385.
- Allen, A. J., Thomas, J. J., Jennings, H. M., 2007. Composition and density of nanoscale calcium-silicate-hydrate in cement. *Nature materials*, 6(4), 311-316.
- Almakhadmeh, M., Soliman, A. M., 2021. Effects of mixing water temperatures on properties of one-part alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*, 266, 121030.
- Altındal, İ., 2020. Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alzaza, A., Ohenoja, K., Illikainen, M., 2021. One-part alkali-activated blast furnace slag for sustainable construction at subzero temperatures. *Construction and Building Materials*, 276, 122026.
- Alzaza, A., Ohenoja, K., Isteri, V., Hanein, T., Geddes, D., Poikelispää, M., Illikainen, M., 2022. Blending eco-efficient calcium sulfoaluminate belite ferrite cement to enhance

- the physico-mechanical properties of Portland cement paste cured in refrigerated and natural winter conditions. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104469.
- Arıöz, Ö., Tuncan, M., Tuncan, A., Kavas, T., 2009. Uçucu Kül esaslı geopolimer tuğla üretimi, Tübitak Projesi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Tahir, M. M., Aziah, N., 2013. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolimer concrete. *Construction and building materials*, 43, 80-86.
- Arslan, M., 2001. Beton: Dökümü, kalıpları, kusurları ve dayanıklılığı. Atlas.
- Askarian, M., Tao, Z., Samali, B., Adam, G., Shuaibu, R., 2019. Mix composition and characterisation of one-part geopolymers with different activators. *Construction and Building Materials*, 225, 526-537.
- Ataman, R., 1991. Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon.
- Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O. K. A. N., Bilim, C., İlkentapar, S. E. R. H. A. N., Luga, E., 2015. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolimer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and building materials*, 96, 673-678.
- Aygörmez, Y., 2018. K Colemanit Atığı Ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., Uysal, M., 2020. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolimer composites. *Construction and Building Materials*, 235, 117502.
- Bakharev, T., 2005. Durability of geopolimer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), 1233-1246.
- Bakharev T, Sanjayan J.G, Chen B., 2003. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 33(16), 7-11
- Bakharev, T., 2005. Resistance of geopolimer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- Bakharev, T., 2006. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134-1147.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B., 2002. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 211-216.
- Bakri, A. M. M., Kamarudin, H., Bnhussian, M., Rafiza, A. R., Zarina, Y., 2012. Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly ash-based geopolimer. *ACI Materials Journal*, 109, 503-508.
- Barbosa, V. F., MacKenzie, K. J., 2003. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials Research Bulletin*, 38(2), 319-331.
- Başçarşivć, Z., 2015. The resistance of alkali-activated cement-based binders to chemical attack. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, Woodhead Yayıncılık, 373-396.

- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., Maiti, S., 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and building materials*, 68, 501-516.
- Behfarnia, K., Shahbaz, M., 2018. The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete. *Journal of Building Engineering*, 20, 442- 454.
- Bellum, R. R., Muniraj, K., Madduru, S. R. C., 2020. Influence of slag on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57, 530-545.
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., Provis, J. L., 2012. Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 138-151.
- Binici, H., Eken, M., Aksoğan, O., 2012. Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Toros Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. *Yapı Teknolojileri Dergisi*8, 1, 12-25.
- Binici, H., Temiz, H., Aksogan, O., Ulusoy, A., 2009. The engineering properties of fired brick incorporating textile waste ash and basaltic pumice. *Journal of The Faculty of Engineering And Architecture of Gazi University*, 24(3).
- Bosoaga, A., Masek, O., Oakey, J. E., 2009. CO2 capture technologies for cement industry. *Energy procedia*, 1(1), 133-140.
- Bouaissi, A., Li, L. Y., Abdullah, M. M. A. B., Bui, Q. B., 2019. Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 210, 198-209.
- Bouguermouh, K., Bouzidi, N., Mahtout, L., Pérez-Villarejo, L., Martínez-Cartas, M. L., 2017. Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 463, 128-137.
- Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., Lukić, I., 2017. Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, 152, 614-631.
- Chen, S., Zhang, Y., Yan, D., Jin, J., Tian, Y., Liu, Y., Fujitsu, S., 2020. The influence of Si/Al ratio on sulfate durability of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 265, 120735.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3), 224-229.
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., Rattanasak, U., 2014. Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093.
- Comrie, D. C., Kriven, W. M., 2003. Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. *Ceramic Transactions*, 153, 211-225.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., 2007. Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio: Part I: FTIR study. *Microporous and mesoporous materials*, 106(1-3), 180-191.
- Cristelo, N., Fernández-Jiménez, A., Castro, F., Fernandes, L., Tavares, P., 2019. Sustainable alkaline activation of fly ash, aluminium anodising sludge and glass powder blends with

- a recycled alkaline cleaning solution. *Construction and Building Materials*, 204, 609-620.
- Davidovits, J., 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J., 2008. *Geopolymer Chemistry and applications*, Saint Quentin, France.
- Davidovits, J., 2015. Institut Geopolymere, Saint-Quentin. *Geopolymer Chemistry & Applications*, 558-568.
- Davidovits, J., Comrie, D. C., Paterson, J. H., Ritcey, D. J., 1990. Geopolymeric concretes for environmental protection. *Concrete International*, 12(7), 30-40.
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoc, M. B., 2004. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. *Cement and concrete research*, 34(12), 2329-2336.
- Derinpınar, A. N., 2021. Cam Tozu Katkılı ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Derinpınar, A. N., Karakoç, M. B., Özcan, A., 2022. Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., Sirivivatnanon, V., 2007. Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512-518.
- Deb, P. S., Nath, P., Sarker, P. K., 2014. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- Deb, P. S., Sarker, P. K., Barbhuiya, S., 2016. Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*. 72, 235-245.
- Diaz, E., Allouche, E. and Eklund, S., 2010. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel*, 89 (5), 992-996.
- Dişçi, E., 2021. Tek Parçalı Karışım Yöntemiyle Üretilen Perlit Esaslı Geopolimer Betonlarda Nano Katkıların ve Kür Koşullarının Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., Kumar, S., 2016. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606–614.
- Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., 2020. Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate. *Construction and Building Materials*, 236, 117611.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., Shen, C., 2015. An Investigation of The Microstructure and Durability of a Fluidized Bed Fly Ash–Metakaolin Geopolymer After Heat And Acid Exposure. *Materials and Design* .74, 125-137.

- Durgun, M. Y., Sevinç, A. H., 2019. High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions. *Construction and Building Materials*, 196, 66-81.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Materyal Science*, 42, 2917-2933.
- El-Didamony, H., Amer, A. A., Abd Ela-ziz, H., 2012. Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water. *Ceramics international*, 38(5), 3773-3780.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara, Türkiye, 757 sayfa.
- Eren, Ş., 2020. Endüstriyel Atık Bazlı Jeopolimer Betonda Atık Döküm Kumunun Doğal Agregaya Yerine İkame Edilerek Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(3), 746-757.
- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I. and Palomo, A., 2007. Durability of alkali activated fly ash cementitious materials. *Journal of materials science*, 42 (9), 3055- 3065.
- Fernández-Jiménez, A., Monzó, M., Vicent, M., Barba, A., Palomo, A., 2008a. Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous and mesoporous materials*, 108(1-3), 41-49.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Pastor, J. Y., Martín, A., 2008b. New cementitious materials based on alkali-activated fly ash: performance at high temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(10), 3308-3314.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I. and Sanz, J., 2006. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91 (1-3), 111-119.
- Fernández-Jiménez, A., Pastor, J. Y., Martín, A., Palomo, A., 2010. High-Temperature Resistance in Alkali-Activated Cement. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(10), 3411-3417.
- Fernando, P. T., Said, J., 2011. Resistance to acid attack, abrasion and leaching behavior of alkali-activated mine waste binders. *Materials and structures*, 44(2), 487-498.
- Ganeshan, M., & Venkataraman, S., 2019. Durability and microstructural studies on fly ash blended self-compacting geopolymer concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 23, 1-15.
- Gharzouni, A., Hyvernaud, E., Texier-Mandoki, N., Bourbon, X., Rossignol, S., 2021. Influence of the nature and amount of carbonate additions on the thermal behaviour of geopolymers: A model for prediction of shrinkage. *Construction and Building Materials*, 296, 123752.
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K., Kumar, S., 2018. Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of building engineering*, 16, 39-44.
- Girgin, S., 2016. NaOH ile Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., Aldred, J., 2015. Brisbane West Wellcamp Havalimanı'nda EFC jeopolimer beton uçak kaldırımları. *Beton*, 2015, 1-9.

- Gopalakrishnan, R., Chinnaraju, K., 2019. Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. *Construction and Building Materials*, 204, 70-83.
- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., Bhattacharjee, B., 2009. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273-283.
- Guerrero, E.A. L., Zamorano. L.Y. G., Relinque. E. J., 2020. Effect of the addition of TiO₂ nanoparticles in alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*. 245, 118370.
- Guo, X., Shi, H., Dick, W. A., 2010. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
- Gu, Y. M., Fang, Y. H., You, D., Gong, Y. F., Zhu, C. H., 2015. Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below-and about-normal temperature. *Construction and Building Materials*, 79, 1-8.
- Haddad, R.H., Alshbuol, O., 2016. Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials*. 1, 699-707.
- Hamouda, A. A., Amiri, H. A. A., 2014. Factors affecting alkaline sodium silicate gelation for in-depth reservoir profile modification. *Energies*, 7(2), 568-590.
- Hardjito, D., Rangan. B.V., 2005. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Research Report GCI, Curtin University of Technology, Perth.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M. and Rangan, B.V., 2004. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101 (6), 467-472.
- Hassan, A., Arif, M., Shariq, M., 2019. Effect of curing condition on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1-9.
- Hongen, Z., Feng, J., Qingyuan, W., Ling, T., Xiaoshuang, S., 2017. Uçucu Kül Esaslı Betonların Özelliklerine Çimentonun Etkisi. *ACI Materials Journal*, 114 (5).
- Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F., 2016. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthetized fly ash geopolymer at elevated temperatures: a comparative study. *Journal of Building Engineering*, 8, 123-130.
- Hsu, J. P., Nacu, A., 2005. Preparation of submicron-sized Mg (OH) 2 particles through precipitation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 262(1-3), 220-231.
- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., Tam, V. W., 2019. Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 226, 139-151.
- Hwang, C.L., Huynh, T.P., 2015. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Constr. Build. Mater.* 101, 1-9.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., Van Deventer, J. S., 2014. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- Jin, M., Wang, Z., Lian, F., Zhao, P., 2020. Freeze-thaw resistance and seawater corrosion resistance of optimized tannery sludge/metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 265, 120730.

- Joseph, B., Mathew, G., 2015. Behaviour Of Geopolymer Concrete Exposed To Elevated Temperatures. Doctor Of Philosophy Thesis, Cochin University of Science and Technology, Kerala.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., Ideker, J. H., 2011. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and concrete research*, 41(12), 1232-1243.
- Junaid, M. T., 2015. Performance of Geopolymer Concrete at Elevated Temperatures. Doctor Of Philosophy Thesis. School of Engineering and Information Technology, The University of New South Wales Australian, Defence Force Academy, Canberra ACT 2610, Australia.
- Kantarıcı, F., 2013. Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kantarıcı, F., 2018. Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kaplan, G., Öz, A., Bayrak, B., Alcan, H. G., Çelebi, O., Aydın, A. C., 2022. Effect of quartz powder on mid-strength fly ash geopolymers at short curing time and low curing temperature. *Construction and Building Materials*, 329, 127153.
- Karahan, O., Atış, C.D., Bilim, C., 2017. Alkali ve Isı ile Aktifleştirilen Yüksek Dayanımlı F Sınıfı Uçucu Kül Geopolimer Harçların Durabilitesi.
- Karakoç, M. B., Türkmen, I., Maraş, M. M., Kantarıcı, F., Demirboğa, R., 2016. Ferrokrom cüruf esaslı jeopolimer betonun sülfat direnci. *Ceramics International*, 42, 1254-1260.
- Kaufmann, J. P., 2004. Experimental identification of ice formation in small concrete pores. *Cement and concrete Research*, 34(8), 1421-1427.
- Kayacıklı, İ. E., 2020. Farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Keklik, U., 2020. Silis Dumanı İçeren Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Durabilite Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Khale, D., Chaudhary, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *J. Mater. Sci.*, 47, 729-746.
- Khan, M. N. N., Sarker, P. K., 2020. Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar. *Construction and Building Materials*, 263, 120177.
- Khater, H. M., 2012. Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. *Journal of materials in civil engineering*, 24(1), 92-101.
- Khoury, G. A., 1992. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of concrete Research*, 44(161), 291-309.
- Kızılkanat, A., Yüzer, N., 2008. Compressive strength-color change relationship in mortars subjected to high temperatures. *Teknik Dergi*, 19(2).
- Koenig, A., Herrmann, A., Overmann, S., Dehn, F., 2017. Resistance of alkali-activated binders to organic acid attack: Assessment of evaluation criteria and damage mechanisms. *Construction and Building Materials*, 151, 405-413.

- Komljenović, M., Baščarević, Z., Bradić, V. 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 35-42.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Marjanovic, N., Nikolic, V., 2013. External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*. 49, 31–39.
- Komnitsas, K. A., 2011. Potential of Geopolymer Technology Towards Green Buildings and Sustainable Cities. *Procedia Engineering*. 21, 1023–1032.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986-991.
- Kong, D.L., Sanjayan, J.G., Sagoe-Crentsil, K., 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37 (12), 1583-1589.
- Krivenko, P. V., Kovalchuk, G. Y., 2007. Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2944-2952.
- Kuranlı, Ö. F., Uysal, M., Abbas, M. T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmmez, Y., Al-mashhadani, M. M., 2022. Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. *Construction and Building Materials*, 325, 126747.
- Kurtoglu, A. E., Alzeebaree, R., Aljumaili, O., Nis, A., Gulsan, M. E., Humur, G., Cevik, A., 2018. Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 6(4), 345.
- Kurtuluş, M., 2019. Yüksek fırın cürufunun aktifleştirilmesinde aktivatör tipinin ve aktivatör ekleme zamanının macun dolgu özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A., Cleland, D. J., 2018. Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*. 166, 537–553.
- Liu, Y., Zhu, W., Yang, E. H., 2016. Alkali-activated ground granulated blastfurnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder. *Construction and Building Materials*, 112, 1005-1012.
- Li, X., Wang, Z., Jiao, Z., 2013. Influence of curing on the strength development of calcium-containing geopolymer mortar. *Materials*, 6(11), 5069-5076.
- Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y., 2004. Development of sustainable cementitious materials, *Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology*, Beijing, China, pp. 55-76.
- Longhi, M. A., Walkley, B., Rodriguez, E. D., Kirchheim, A. P., Zhang, Z., Wang, H., 2019a. New selective dissolution process to quantify reaction extent and product stability in metakaolin-based geopolymers. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107172.
- Longhi, M. A., Zhang, Z., Rodríguez, E. D., Kirchheim, A. P., Wang, H., 2019b. Efflorescence of alkali-activated cements (geopolymers) and the impacts on material structures: A critical analysis. *Frontiers in Materials*, 6, 89.
- Luo, Q., Wang, Y., Hong, S., Xing, F., Dong, B., 2021. Properties and microstructure of lithium-slag-based geopolymer by one-part mixing method. *Construction and Building Materials*, 273, 121723.

- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M., 2018. One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34.
- Lyon, R.E., Balaguru, P., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J. and Davidovics, M., 1997. Fire-resistant aluminosilicate composites. *Fire and materials*, 21 (2), 67-73.
- Ma, C. K., Awang, A. Z., Omar, W., 2018. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90-102.
- Ma, C., Zhao, B., Wang, L., Long, G., Xie, Y., 2020. Clean and low-alkalinity one-part geopolymeric cement: effects of sodium sulfate on microstructure and properties. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119279.
- Mallikarjuna Rao, G., Kireety, C. H., 2019. Durability studies on alkali activated fly ash and ggbs-based geopolymer mortars. In *Sustainable Construction and Building Materials* (pp. 85-97). Springer, Singapore.
- Manjunath, R., Narasimhan, M. C., & Umesha, K. M. (2019). Studies on high performance alkali activated slag concrete mixes subjected to aggressive environments and sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 229, 116887.
- Marjanović, N., Komljenović, M., Bašcarević, Z., Nikolić, V., Petrović, R., 2015. Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends. *Ceramics International*, 41(1), 1421-1435.
- Mane, S., Jadhav, H., 2012. Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature. *Magnesium*, 1(5), 384-390.
- McNulty, E., 2009. Geopolymers: An Environmental Alternative to Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America.
- Mehta, A., Siddique, R., Ozbakkaloglu, T., Shaikh, F. U. A., Belarbi, R., 2020. Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties. *Construction and Building Materials*, 257, 119548.
- Mehta, A., Siddique, R., 2017. Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 136-143.
- Moghaddam, S. C., Madandoust, R., Jamshidi, M., Nikbin, I. M., 2021. Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*, 281, 122571.
- Musumeci, A. W., Frost, R. L., Waclawik, E. R., 2007. A spectroscopic study of the mineral paceite (calcium acetate). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 67(3-4), 649-661.
- Mustakim, S. M., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., Kaze, C. R., 2021. Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 13(8), 2415-2428.
- Nagajothi, S., Elavenil, S., 2021. Effect of GGBS Addition on reactivity and microstructure properties of ambient cured fly ash based geopolymer concrete. *Silicon*, 13(2), 507-516.
- Nath, P. ve Sarker, PK., 2017. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 22-31.

- Nath, P., Sarker, P. K., 2014. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171.
- Nath, S. K., Kumar, S., 2013. Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 38, 924-930.
- Negahban, E., Bagheri, A., Sanjayan, J., 2021. Pore gradation effect on Portland cement and geopolymer concretes. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104141.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Shaikh, F. U. A., 2015. Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. *Ceramics International*, 41(4), 5696-5704.
- Nematullahi, B., Shaikh, F. U. A., Sanjayan, J., 2015. Synthesis of heat and ambient cured one part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. *Ceramics International*. 41, 5696-5704.
- Nguyen, A.D., Skvara, F., 2016. The influence of ambient pH on fly ash-based geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 72, 275-283.
- Nnaemeka, O. F., Singh, N. B., 2020. Durability properties of geopolymer concrete made from fly ash in presence of Kaolin. *Materials Today: Proceedings*, 29, 781-784.
- Okoye, F. N., Prakash, S., Singh, N. B., 2017. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of Cleaner Production*. 149,1062-1067.
- Olivia, M., Nikraz H., 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials and Design*. 36, 191–198.
- Özcan, A., 2018. Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Malatya.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T., 1999. Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., Perraki, T., 2007. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301(1-3), 246-254.
- Part, W. K., Ramli, M., Cheah, C. B., 2015. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370-395.
- Pasupathy, K., Cheema, D. S., Sanjayan, J., 2021. Durability performance of fly ash-based geopolymer concrete buried in saline environment for 10 years. *Construction and Building Materials*, 281, 122596.
- Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., B. K., Mohanty, A. N., 2016. A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 133, 117-125.
- Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jiménez, J. R., Fernández-Rodríguez, J. M., Suescum-Morales, D., 2021. Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior. *Journal of Building Engineering*, 44, 103317.
- Peiwei, G., Min, D., Naiqian, F., 2001. The influence of superplasticizer and superfine mineral powder on the flexibility, strength and durability of HPC. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 703-706.

- Phoo-ngernkhama, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Sinsiri, T., 2013. High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive.
- Poloju, K. K., Srinivasu, K., 2021. Impact of GGBS and strength ratio on mechanical properties of geopolymer concrete under ambient curing and oven curing. *Materials Today: Proceedings*, 42, 962-968.
- Prasanphan, S., Wannagon, A., Kobayashi, T., Jiemsirilers, S., 2019. Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution. *Construction and Building Materials*, 221, 409-420.
- Provis, J. L., 2009. Activating solution chemistry for geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 50-71). Woodhead Publishing.
- Provis, J. L., 2014. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how and what?. *Materials and Structures*, 47, 11-25.
- Provis, J. L., Duxson, P., Kavalerova, E., Krivenko, P. V., Pan, Z., Puertas, F., Van Deventer, J. S., 2014. Historical aspects and overview. In *Alkali activated materials* (pp. 11-57). Springer, Dordrecht.
- Provis, J. L., Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. *Chemical engineering science*, 62(9), 2318-2329.
- Provis, J. L., Van Deventer, J. S., 2009. Introduction to geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 1-11). Woodhead Publishing.
- Prud'Homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Peyratout, C., Smith, A., Rossignol, S., 2011. In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. *Applied clay science*, 51(1-2), 15-22.
- Rajarajeswari, A., Dhinakaran, G., 2016. Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing. *Constr. Build. Mater.* 126, 552–559.
- Rajini, B., Rao, A. N., Sashidhar, C., 2021. Micro-level studies of fly ash and GGBS-based geopolymer concrete using Fourier transform infra-red. *Materials Today: Proceedings*, 46, 586-589.
- Rangan, B.V., 2014. Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*. 88 (4), 41-59.
- Rao, A. K., Kumar, D. R., 2020. Comparative study on the behaviour of GPC using silica fume and fly ash with GGBS exposed to elevated temperature and ambient curing conditions. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1833-1837.
- Rashad, A. M., 2015. An investigation of high-volume fly ash concrete blended with slag subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 93, 47-55.
- Rashad, A. M., Zeedan, S. R., 2011. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3098-3107.
- Razak, S.N.A, Shafiq, N., Guillaumat, L., Farhan, SA, Lohana, V.K., 2022. Yangına Maruz Kalmış Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton: Yanma Sıcaklığının Mekanik ve Mikroyapısal Özellikler Üzerine Etkileri. *Malzemeler*, 15 (5), 1884.
- Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., 2018. Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering* 20, 712–722.

- Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Van Deventer, J. S., 2007. Attenuated total reflectance fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gel aging. *Langmuir*, 23(15), 8170-8179.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., Yan, Z., 2017. Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56-66.
- Ren, J., Zhang, L., San Nicolas, R., 2020. Degradation process of alkali-activated slag/fly ash and Portland cement-based pastes exposed to phosphoric acid. *Construction and Building Materials*, 232, 117209.
- Ren, W., Xu, J., Bai, E., 2016. Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015124.
- Revathi, R., Jeyalakshmi, R., 2021. Fly ash–GGBS geopolymer in boron environment: A study on rheology and microstructure by ATR FT-IR and MAS NMR. *Construction and Building Materials*, 267, 120965.
- Rickard, W. D., Temuujin, J., Van Riessen, A., 2012. Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition. *Journal of non-crystalline solids*, 358(15), 1830-1839.
- Saavedra, W. G. V., De Gutiérrez, R. M., 2017. Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 154, 229-235.
- Samantasinghar, S., & Singh, S. P. (2018). Effect of synthesis parameters on compressive strength of fly ash-slag blended geopolymer. *Construction and Building Materials*, 170, 225-234.
- Sarker, P. K., 2011. Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Materials and structures*, 44(5), 1021-1030.
- Sawan, S. A., Zawrah, M. F., Khattab, R. M., Abdel-Shafi, A. A., 2020. In-situ formation of geopolymer foams through addition of silica fume: Preparation and sinterability. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 121998.
- Saxena, S.K., Kumar, M., Singh, N.B., 2017. Fire Resistant Properties of Alumino Silicate Geopolymer cement Mortars. *Materials Today*. 4, 5605–5612.
- Setzer, M. J., 1976. Action of frost and deicing chemicals: basic phenomena and testing. *Freeze—thaw durability of concrete*, 3-21.
- Shaikh, F. U. A., Vimonsatit, V., 2015. Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Fire and materials*, 39(2), 174-188.
- Shariati, M., Shariati, A., Trung, N. T., Shoaee, P., Ameri, F., Bahrami, N., Zamanabadi, S. N., 2021. Alkali-activated slag (AAS) paste: Correlation between durability and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials*, 267, 120886.
- Sharma, A., Basumatary, N., Singh, P., Kapoor, K., Singh, S. P., 2021. Potential of geopolymer concrete as substitution for conventional concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Shoaee M., 2013. Hafif Betonda Tuz Etkisi ($MgCl_2$, $NaCl$), Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 78-90.

- Singh, N. B., Middendorf, B., 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Škvára, F., Jílek, T. and Kopecký, L., 2005. Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, 49 (3), 195-204.
- Škvára, F., Kopecký, L., Myšková, L., Šmilauer, V., Alberovska, L., Vinšová, L., 2009. Aluminosilicate polymers—influence of elevated temperatures, efflorescence. *Ceramics–Silikáty*, 53(4), 276-282.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., Lukey, G. C., 2007. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and concrete research*, 37(2), 251-257.
- Song, X. J., Marosszeky, M., Brungs, M., Munn, R. 2005. Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. In *International Conference on Durability of Building Materials and Components* (Vol. 10).
- Suwan, T., Fan, M., 2017. Effect of manufacturing process on the mechanisms and mechanical properties of fly ash-based geopolymer in ambient curing temperature. *Materials and Manufacturing Processes*, 32, 461-467.
- Şahmaran, M., Yaman, İ. Ö., Tokyay, M., 2009. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and concrete composites*, 31(2), 99-106.
- Şeker, O., 2019. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Tan, J., Dan, H., Ma, Z., 2022. Metakaolin based geopolymer mortar as concrete repairs: Bond strength and degradation when subjected to aggressive environments. *Ceramics International*.
- Tammam, Y., Uysal, M., Canpolat, O., 2021. Effects of alternative ecological fillers on the mechanical, durability, and microstructure of fly ash-based geopolymer mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-24.
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, T., MacKenzie, K. J. D., 2014. Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials. *Ceramics International*, 40(10), 16475-16483.
- Temuujin, J., Van Riessen, Williams, A. R., 2009. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *J Hazard Mater*, 167, 82-88.
- Thakur, R. N., Ghosh, S., 2009. Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 68-74.
- Thomas, J. V., Thomas, R. M., 2022. Improvement in field applicability of concrete using fly ash and ground granulated blast furnace slag by sodium silicate activation. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(3), 337-349.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S., 2009. Acid resistance of fly ash based geopolymer mortars. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 36.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S., 2010. Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 3, 36–40.

- Thunuguntla, C. S., Rao, T. D. G., 2018. Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. 193, 173–188.
- Tok, L.V., 2021. Yüksek Fırın Cürufu ve Bentonit Tabanlı Geopolimer Harçların Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Topal, Ö., Karakoç, M. B., Özcan, A., 2021. Effects of elevated temperatures on the properties of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) based geopolymer concretes containing recycled concrete aggregate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-15.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2008. Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçlarda Donma Çözümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(2), 1-16.
- Topçu, İ. B., Toprak, M. U., 2009. Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2), 153-164.
- Turhan, D., Polat, R., 2021 Investigation of the Properties of Perlite-Based Geopolymer Concrete with Red Mud. *International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering*.
- Türkmen, İ., Karakoç, M. B., Kantarcı, F., Maraş, M. M., Demirboğa, R., 2016. Fire resistance of geopolymer concrete produced from Elazığ ferrochrome slag. *Fire Mater.* 40, 836–847.
- Tuyan, M., Çakır A. Ö., Ramyar. K., 2018. Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135, 242–252.
- Uğurlu, A. İ., Karakoç, M. B., Özcan, A., 2021. Effect of binder content and recycled concrete aggregate on freeze-thaw and sulfate resistance of GGBFS based geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 301, 124246.
- Ustabaş, İ., 2008. Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton ve Harçların Performansının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Valencia-Saavedra, W. G., de Gutiérrez, R. M., Puertas, F., 2020. Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids. *Construction and Building Materials*, 257, 119503.
- Van Deventer, J. S. J., Feng, D., Duxson, P., 2010. Dry mix cement composition, methods and system involving same, US Patent 7,691,198 B2
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S., Lukey, G. C., 2002. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
- Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J. and Lukey, G., 2003. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 57 (7), 1272-1280.
- Wang, J., Zheng, C., Mo, L., GangaRao, H., Liang, R., 2022. Assessment of recycling use of GFRP powder as replacement of fly ash in geopolymer paste and concrete at ambient and high temperatures. *Ceramics International*.

- Wang, K., Lemouagna, P. N., Tang, Q., Li, W., He, Y., Cui, X., 2017. Low temperature depolymerization and polycondensation of a slag-based inorganic polymer. *Ceramics International*, 43, 9067-9076.
- Wang, Y., Han, F., Mu, J., 2018. Solidification/stabilization mechanism of Pb (II), Cd (II), Mn (II) and Cr (III) in fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 160, 818-827.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., Setunge, S., 2017. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building materials*, 143, 272-279.
- Xie, T., Özbakkaloglu, T., 2015. *Ceramics International* Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International* Volume, 41, 5945-5958.
- Xu, H., Li, Q., Shen, L., Wang, W., Zhai, J., 2010. Synthesis of thermostable geopolymer from circulating fluidized bed combustion (CFBC) bottom ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 198-204.
- Xu, H., Van Deventer, J. S. J., 1999. The geopolymerisation of natural alumino-silicates. In *Proc. 2nd Internat. Conf. Geopolymere* (Vol. 99, pp. 43-63).
- Xu, Y., Wong, Y. L., Poon, C. S., Anson, M., 2001. Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and concrete research*, 31(7), 1065-1073.
- Yalçın, H., Gürü, M., 2006. Çimento ve beton. Palme Yayıncılık.
- Yang, Z., Mocadlo, R., Zhao, M., Sisson, Jr. R. D., Tao, M., Liang, J., 2019. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*. 221, 308–317.
- Ye, J., Zhang. W., Shi. D., 2017. Properties of an aged geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and slag. *Cem. Concr. Res.* 100 (Suppl. C) 23–31.
- Yıldırım A.N., 2007. Pomza ve Uçucu Kül Kullanılarak İmal Edilen Hafif Betonların Agresif Su Ortamlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yao, X., Yang, T., Zhang, Z., 2016. Compressive strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash–slag blends associated with efflorescence. *Materials and Structures*, 49(7), 2907-2918.
- Yip, C.K., Lukey, G.C., Provis, J.L., Van Deventer, J.S., 2008. Kalsiyum silikat kaynaklarının jeopolimerizasyona etkisi. *Çimento ve Beton Araştırmaları*, 38 (4), 554-564.
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., Shi, X., 2020. Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262, 120924.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., Wang, F., 2016. Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 109, 17-24.
- Zhang, H. Y., Liu, J. C., Wu, B., 2021. Mechanical properties and reaction mechanism of one-part geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 273, 121973.
- Zhang, M., Xu, H., Zeze, A. L. P., Liu, X., Tao, M., 2022. Coating performance, durability and anti-corrosion mechanism of organic modified geopolymer composite for marine concrete protection. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104495.

- Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Sietins, J. M., Granados-Focil, S., Pepi, M. S., Tao, M., 2018. Reaction kinetics of red mud-fly ash based geopolymers: Effects of curing temperature on chemical bonding, porosity, and mechanical strength. *Cement and Concrete Composites*, 93, 175-185.
- Zhang, T., Zhang, Y., Xiao, Z., Yang, Z., Zhu, H., Ju, J. W., Yan, Z., 2019. Development of a novel bioinspired cement-based composite material to improve the fire resistance of engineering structures. *Construction and Building Materials*, 225, 99-111.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Ma, X., Reid, A., Wang, H., 2018. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. *Cement and concrete composites*, 92, 165-177.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H., 2014. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and concrete research*, 64, 30-41.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Wang, H., Bullen, F., Reid, A., 2013. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. *Thermochimica acta*, 565, 163-171.
- Zhang, Z., Wang, H., Provis, J. L., Bullen, F., Reid, A., Zhu, Y., 2012. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide. *Thermochimica acta*, 539, 23-33.
- Zhao, R., Sanjayan, J. G., 2011. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete research*, 63(3), 163-173.
- Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., Li, D., 2016. A comparative study of high-and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials & Design*, 95, 63-74.
- Zhuang, H. J., Zhang, H. Y., Xu, H., 2017. Resistance of geopolymer mortar to acid and chloride attacks. *Procedia Engineering*, 210, 126-131.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Nisa YAZICI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Of Anadolu Lisesi (2014)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2019)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı (2022)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi