T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU YAPILARINDA KULLANILABİLİR POMZA ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Cemal KARAASLAN

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Haziran - 2021

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Cemal KARAASLAN tarafından yapılan "Su Yapılarında Kullanılabilir Pomza Esaslı Geopolimer Betonların Geliştirilmesi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Tamer BAĞATUR

Üye : Doç. Dr. Gültekin AKTAŞ

Üye : Doç. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU

Üye : Doç. Dr. Mehmet KARATAŞ

Üye : Doç. Dr. Ömer Faruk CAN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 25/06/2021

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

26/07/2021

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ

Enstitü Müdür V.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca öneri ve desteklerini esirgemeyen ve bu tez çalışmasının tamamlanmasını sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tamer BAĞATUR'a, bu tezin laboratuvar çalışmaları boyunca, öneri ve destekleriyle yol gösteren ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Engin YENER'e ve bu çalışmanın mikroyapı analizlerinde yaptıkları yardımlardan dolayı Sayın Doç Dr. Rıza Polat'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda laboratuvarlarını kullandığımız, Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü ile çalışanlarına ve İnşaat Müh. Sayın Tanju Sarıtaş'a teşekkür ederim. Ayrıca MÜF0720A17 nolu Bilimsel Araştırma Projesi'nin finansal desteklerinden dolayı Iğdır Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca laboratuvarlarını hizmetimize açan Arkoz Madencilik A.Ş. bünyesinde yer alan Ağrı Çimento Fabrikası ile çalışanlarına ve özellikle buradaki deneysel çalışmaların yürütülmesinde yardımcı olan Kalite Kontrol Müh. Sayın Felek Aras'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmada kullandığımız pomzayı temin ettiğimiz Miğferler İnşaat Şirketi yetkililerine ve agregayı temin ettiğimiz Başyol Yapı Taahhüt Şirketi yetkililerine teşekkür ederim.

Ayrıca doktora çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem, eşim ve kızlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **I**

İÇİNDEKİLER ..... **II**

ÖZET ..... **VII**

ABSTRACT ..... **VIII**

ÇİZELGE LİSTESİ ..... **IX**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **XI**

EK LİSTESİ ..... **XVI**

KISALTMA VE SİMGELER ..... **XVII**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Beton 3

1.2. Beton Su Yapıları 4

1.3. Beton Su Yapılarında Karşılaşılan Problemler 7

1.3.1. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon 7

1.3.2. Deniz Suyu Etkisi 9

1.3.3. Korozyon 11

1.3.4. Asit ve Sülfat Saldırısı 14

1.3.5. Islanma-Kuruma Etkisi 17

1.3.6. Çiçeklenme 18

1.4. Portland Çimentolarının Çevresel Etkileri 19

1.5. Geopolimer 20

1.6. Geopolimerlerin Tarihçesi 22

1.7. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler 25

1.7.1. Alkali Aktivatör 25

1.7.1.1. Sodyum Hidroksit 26

1.7.1.2. Sodyum Silikat 26

1.7.2. Toz Bağlayıcı 26
1.7.2.1. Yapay Puzolanlar 27
1.7.2.2. Doğal Puzolanlar 28
1.7.2.3. Pomza 30
1.7.2.4. Toz Bağlayıcının Reaktivitesi 31
1.7.3. Su 34
1.7.4. Su-Azaltıcı Katkı Maddeleri 34
1.8. Geopolimer Bağlayıcıların Karışım Oranları ve Karıştırma İşlemi 35
1.8.1. Sodyum Hidroksit Konsantrasyonu 35
1.8.2. Sodyum Silikat – Sodyum Hidroksit Oranı (SS/SH) 37
1.8.3. Alkali Aktivatör - Toz Bağlayıcı Oranı (a/b) 38
1.8.4. Karıştırma ve Yerleştirme İşlemleri 38
1.9. Geopolimerlerin Kürü 38
1.9.1. Kür Şekli 39
1.9.2. Kür Süresi 39
1.9.3. Kür Sıcaklığı 40
1.10. Taze ve Sertleşmiş Haldeki Geopolimerlerin Özellikleri 40
1.10.1. İşlenebilirlik 41
1.10.2. Mekanik Özellikler 41
1.10.3. Durabilite 41
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 43
3. MATERYAL VE METOT 57
3.1. Materyal 57
3.1.1. Toz Bağlayıcı 57
3.1.2. Alkali Aktivatör 62
3.1.3. Agrega 63
3.1.4. Su 65

3.2. Metot 65
3.2.1. Karışıma Girecek Bileşenlerin Hazırlanması 65
3.2.2. Agrega Deneyleri 66
3.2.3. Karışım Oranları 67
3.2.3.1. PGP Hamurların Karışım Oranları 67
3.2.3.2. GP Harçların Karışım Oranları 68
3.2.3.3. PGP Betonların Karışım Oranları 70
3.2.4. Karıştırma 70
3.2.5. Yerleştirme 72
3.2.6. Kür 76
3.2.6.1. Hamur Numunelerin Kür İşlemi 76
3.2.6.2. Harç Numunelerin Kür İşlemi 77
3.2.6.3. Beton Numunelerin Kür İşlemi 79
3.2.7. İşlenebilirlik 80
3.2.8. Standart Kıvam 80
3.2.9. Priz Süresi 81
3.2.10. PGP Çimentonun Hacim Sabitliği 83
3.2.11. Fiziksel Özelliklerin Tayini 84
3.2.12. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı 85
3.2.13. Beton Numunelerin Çekme Dayanımı 86
3.2.14. Islanma-Kuruma Performansının Belirlenmesi 87
3.2.15. Deniz Suyu Etkisi 88
3.2.16. Çiçeklenme 89
3.2.17. Asit Etkisi 89
3.2.18. Aşınma Dayanıklılığı 91
3.2.19. Donma-Çözülme Tesiri 93
3.2.20. Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini 94

3.2.21. Geopolimerlerin Karakterizasyonu 95
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 99
4.1. PGP Hamurlarla Yapılan Çalışma 99
4.1.1. Pomzanın Öğütüldüğü İncelik ve Öğütülme Şekli 99
4.1.2. Sodyum Hidroksit Çözeltisinin Molaritesi 100
4.1.3. Sodyum Silikat İçeriği 101
4.1.4. Mineral Katkı İçeriği 104
4.1.5. Kür Süresi 105
4.1.6. Kür Sıcaklığı 108
4.1.7. Priz Süresi 109
4.1.8. Hacim Sabitliği 110
4.2. PGP Harçlarla Yapılan Çalışma 111
4.2.1. PGP Harç Karışımların İşlenebilirliği 111
4.2.2. PGP Harç Numunelerin Fiziksel Özellikleri 114
4.2.3. PGP Harç Numunelerin Basınç Dayanımı 117
4.2.4. PGP Harç Numunelerin Islanma-Kuruma Performansı 123
4.2.5. PGP Harç Numunelerin Deniz Suyu Performansı 127
4.2.6. PGP Harç Numunelerde Çiçeklenme 130
4.2.7. PGP Harç Numunelerin Sülfürik Asit Performansı 135
4.3. PGP Betonlarla Yapılan Çalışma 141
4.3.1. PGP Betonların Fiziksel Özellikleri 142
4.3.2. PGP Betonların Basınç Dayanımı 144
4.3.3. PGP Betonların Islanma-Kuruma Performansı 147
4.3.4. PGP Betonların Sülfürik Asit Direnci 151
4.3.5. PGP Betonların Aşınma Dayanıklılığı 161
4.3.6. PGP Betonların Donma-Çözülme Performansı 163
4.3.7. PGP Betonların Basınç Altında Su İşleme Derinliği 167

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 171

6. KAYNAKLAR 177

EKLER 193

ÖZGEÇMİŞ 195

ÖZET

SU YAPILARINDA KULLANILABİLİR POMZA ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Cemal KARAASLAN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

Portland Çimentosu'nun üretiminde büyük miktarda enerji sarfiyatının olması ve yüksek oranda CO_2 salınımının gerçekleşmesinden dolayı bu çimentolara alternatif olabilecek bağlayıcı arayışları önem kazanmıştır. Alternatif bağlayıcılar arasında, yüksek sıcaklık direnci, erken yüksek dayanım, asit etkilerine karşı dayanıklılık ve düşük çevresel etki gibi üstün özelliklere sahip olan geopolimerler, ön plana çıkmaktadır. Geopolimerler, çimento ve su yerine puzolan ve alkali aktivatörler kullanılarak üretilmektedir. Bu çalışmada puzolan olarak Iğdır'dan elde edilen pomza ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikattan oluşan çözelti kullanılmıştır. Su yapılarının maruz kaldığı yıpratıcı dış etkilere karşı yeterli derecede dayanıklılığa sahip pomza esaslı geopolimer betonların geliştirilmesi, bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır. Bu kapsamda, uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu pomzaya ikame edilerek geopolimer hamur, harç ve betonlar hazırlanmış ve taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri araştırılmıştır. Geopolimer hamurlarla yapılan çalışmaların sonuçları dikkate alınarak, alkali aktivatör içeriği ve kür koşulları gibi parametreler harç ve beton karışımlarında sabit seviyelerde tutulmuştur. Buna göre üretilen harç ve betonların işlenebilirlik, fiziksel ve mekanik özellikler, durabilite ve mikroyapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde XRD, BET, FTIR ve SEM-EDX gibi yöntemler kullanılmıştır. Çalışma, pomza esaslı geopolimer bağlayıcıların, uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu katkısı sayesinde yeterli derecede işlenebilirlik ve dayanıma ulaştığını göstermiştir. Bu katkılar ile pomza esaslı geopolimer betonların, su yapılarının da sık sık maruz kaldığı, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, deniz suyu, aşınma ve asit gibi etkilere karşı yeterli dayanıklılığa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca pomza esaslı geopolimerlerin, kalsiyum alüminat çimentosu katkısı ile oda sıcaklığında dahi kabul edilebilir sürelerde prizini tamamladığı ve yeterli dayanıma ulaştığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su Yapıları, Geopolimer, Pomza, Alkali Aktivasyon, Doğal Puzolanlar, Durabilite, Mikroyapı, Sülfürik Asit

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF PUMICE BASED GEOPOLYMER CONCRETE FOR HYDRAULIC STRUCTURES

PhD THESIS

Cemal KARAASLAN

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DICLE UNIVERSITY

2021

Due to the large amount of energy consumption and high CO_2 emission in the production of Portland Cement, the search for binders that can be an alternative to these cements has gained importance. Among the alternative binders, geopolymers, which have superior properties such as good fire resistance, early high strength, resistance against acid attack and environmental friendliness, stand out. Geopolymers are produced by using pozzolan and alkali activators instead of cement and water. In this study, pumice obtained from Iğdır as natural pozzolan and solution consisting of sodium hydroxide and sodium silicate as alkali activator were used. The aim of this thesis study is to develop pumice-based geopolymer concretes with sufficient resistance against the destructive effects that hydraulic structures are exposed to. In this context, geopolymer pastes, mortars and concretes were prepared by substituting fly ash and calcium aluminate cement to pumice, and their properties in fresh and hardened state were investigated. Considering the results of the work done with geopolymer pastes, parameters such as alkali activator content and curing conditions were kept at constant levels in mortar and concrete mixtures. Accordingly, the workability, physical and mechanical properties, durability and microstructures of the mortars and concretes produced were examined in detail. Methods such as XRD, BET, FTIR and SEM-EDX were used for microstructure investigations. The study showed that pumice-based geopolymer binders achieved sufficient workability and strength thanks to the admixture of fly ash and calcium aluminate cement. With these additives, it has been determined that the pumice-based geopolymer concretes have sufficient durability against effects such as wetting-drying, freezing-thawing, sea water, abrasion and acid, which water structures are also frequently exposed to. In addition, it has been determined that pumice-based geopolymers complete their setting and reach sufficient strength in acceptable times even at room temperature with the addition of calcium aluminate cement.

Keywords: Hydraulic Structures, Geopolymer, Pumice, Alkali Activation, Natural Pozzolan, Durability, Microstructure, Sulfuric Acid

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1. GP bağlayıcıların tarihsel gelişimi 24

Çizelge 1.2. Farklı pomzalarla üretilen GP'lerle yapılan bazı çalışmalar 31

Çizelge 1.3. GP üretiminde kullanılacak DP'lerin reaktivitelerini arttırma yöntemleri 32

Çizelge 2.1. GP tamir malzemesinin bağ dayanımı ve kırılma tarzı 54

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan çimento ve puzolanların kimyasal kompozisyonları 59

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan çimento ve puzolanların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri 60

Çizelge 3.3. Alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri 63

Çizelge 3.4. Standart kumun sahip olması gereken sınır değerler ve elek analizi 64

Çizelge 3.5. Beton karışımların üretiminde kullanılan agregaların elek analizi 64

Çizelge 3.6. Beton karışımlarda kullanılan agregaların bazı fiziksel özellikleri 65

Çizelge 3.7. Kür koşulları etkisinin araştırıldığı çalışmanın karışım oranları 67

Çizelge 3.8. Alkali aktivatör etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait karışım oranları 68

Çizelge 3.9. PGP harçların karışım oranları 69

Çizelge 3.10. Betonların karışım oranları 70

Çizelge 3.11. Kür koşulları etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait kür sıcaklık ve süreleri 76

Çizelge 3.12. Aşınmaya karşı direnç sınıfları 93

Çizelge 4.1. PGP ve PC bağlayıcıların priz başlangıç ve bitiş süreleri 109

Çizelge 4.2. PGP ve PC çimentolarının genleşme miktarları 110

Çizelge 4.3. Harç numunelerin yayılma miktarları 112

Çizelge 4.4. Harç numunelerin fiziksel özellikleri 115

Çizelge 4.5. Harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 118

Çizelge 4.6. Islanma-kuruma etkisi sonrası PGP harç numunelerin basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı 124

Çizelge 4.7. PGP harç numunelerin deniz suyu etkisi sonrası kalan basınç dayanımları ve dayanım kaybı miktarı 128

Çizelge 4.8. PGP harç numunelerin çiçeklenme sınıfları 134

Çizelge 4.9. Sülfürik asit etkisine maruz bırakılan PGP harç numunelerin ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları 136

Çizelge 4.10. Beton numunelerin fiziksel özellikleri 142

Çizelge 4.11. Beton numunelerin boşluk hacmi dağılımı 143

Çizelge 4.12. BET analizi sonuçları 143

Çizelge 4.13. Beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 145

Çizelge 4.14. Islanma-kuruma etkisi sonrası beton numunelerin kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı 148

Çizelge 4.15. Sülfürik asit etkisindeki betonların ağırlık değişimi ve basınç dayanımı kaybı 152

Çizelge 4.16. Beton numunelerin geniş diskli aşınma deneyiyle belirlenmiş aşınma miktarları 162

Çizelge 4.17. Beton numunelerin donma-çözülme etkisi sonrası kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı 163

Çizelge 4.18. Beton numunelerin basınç altında su işleme derinliği 168

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Itaipu barajı 6

Şekil 1.2. Betondan imal edilmiş su yapıları a) su iletim boruları b) akedük 6

Şekil 1.3. Glen Canyon Barajı tünelinde kavitasyon hasarı 8

Şekil 1.4. Deniz suyuna maruz kalan betonarme bir elemanda oluşabilecek bozulmaların diyagramatik gösterimi 11

Şekil 1.5. Donatı çeliğinin korozyonundan dolayı betonun genleşip çatlaması 13

Şekil 1.6. Sülfürik asit etkisiyle kanalizasyon borusunun bozulması a) bozulmanın oluşumu b) bozulmuş bir kanalizasyon borusu 15

Şekil 1.7. Sülfat saldırısı sonucu bir su yapısında oluşan hasar 17

Şekil 1.8. Servis ömrü boyunca birçok ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalan betonarme bir deniz feneri 18

Şekil 1.9. Pomzanın toz bağlayıcı olarak kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar 30

Şekil 1.10. Uçucu küllerin mekanik aktivasyonu a) doğal FA tanecikleri b) öğütülmüş FA tanecikleri 33

Şekil 1.11. Farklı molaritelere sahip NaOH çözeltisinin FA taneciğinde yaptığı değişimler 36

Şekil 2.1. Tamir malzemelerinin kırılma tarzları 55

Şekil 3.1. Malzemelerin öğütülmesinde kullanılan öğütücüler 57

Şekil 3.2. Pomza ocağına ait resimler: (a) ve (b) Ocağın farklı bölgelerinden çekilmiş resimleri; (c) Ocağın uydu görüntüsü 58

Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcılar 59

Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcıların XRD grafikleri 60

Şekil 3.5. Toz bağlayıcıların tane boyutu dağılımı 61

Şekil 3.6. Toz bağlayıcıların SEM görüntüleri 62

Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler 63

Şekil 3.8. Harç ve beton karışımlarında kullanılan agregalar 65

Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan özgül ağırlık sehpası 67

Şekil 3.10. PGP hamur karışımının hazırlanması 71

Şekil 3.11. PGP beton karışımında kullanılan toz bağlayıcılar ve hazırlanmış beton karışımı 72

Şekil 3.12. Hamur numune kalıbı 73

Şekil 3.13. Harç numune kalıpları 73

Şekil 3.14. Beton numune kalıpları 74

Şekil 3.15. Sarsma cihazı yardımıyla sıkıştırma işlemi 75

Şekil 3.16. Numune kalıplarının jelatin bantla sarılması 75

Şekil 3.17. Sıcak kür işleminde kullanılan etüvler 76

Şekil 3.18. Kalıptan çıkarılan PGP hamur numuneler 77

Şekil 3.19. PGP harç numunelerin sıcak kürü 77

Şekil 3.20. Yeterli sertleşmeyi sağladıktan sonra kalıptan çıkarılıp tekrar kür koşullarına bırakılan numuneler 78

Şekil 3.21. Bir karışıma ait harç numunelerin tamamı 79

Şekil 3.22. Bütün harç numunelerinin olduğu bir görüntü 79

Şekil 3.23. Yayılma tablası deneyi 80

Şekil 3.24. Standart kıvamın elde edilmesi süreci 81

Şekil 3.25. Priz başlangıç ve bitiş süresinin tayini 82

Şekil 3.26. Le Chatelier halkasının doldurulması ve kapatılması 83

Şekil 3.27. 24 saatin sonunda gösterge uçları arasındaki mesafenin ölçülmesi 84

Şekil 3.28. Küp hamur numuneler ile küp ve prizmatik harç numunelerin dayanımlarının ölçüldüğü pres 85

Şekil 3.29. Beton numunelerin basınç dayanımlarının ölçüldüğü pres 86

Şekil 3.30. Beton eğilme-yarma test cihazı 87

Şekil 3.31. GP harç numunelerin ıslanma-kuruma döngüleri 88

Şekil 3.32. Deniz suyu etkisine maruz bırakılan harç numuneler 89

Şekil 3.33. Asit etkisine maruz bırakılan prizmatik harç numuneler 90

Şekil 3.34. Asit etkisine maruz bırakılan beton numuneler 90

Şekil 3.35. Geniş diskli aşındırma cihazının diyagramatik görünümü 91

Şekil 3.36. Aşınma testinde kullanılan cihaz 92

Şekil 3.37. Donma-çözülme kabinine bırakılan beton numuneler 94

Şekil 3.38. Betonun basınç altında su işleme derinliğinin tayini 95

Şekil 3.39. Çalışmada kullanılan XRF cihazı 96

Şekil 3.40. Çalışmada kullanılan XRD cihazı 96

Şekil 4.1. Farklı SS/SH oranına sahip PGP hamur numunelerin basınç dayanımının, molariteye bağlı değişimi 100

Şekil 4.2. Islanma-kuruma etkisiyle yarılan PGP hamur numuneler 101

Şekil 4.3. PGP hamur numunelerin SS/SH oranına bağlı FTIR spektrumları 102

Şekil 4.4. PGP hamur numunelerin ıslanma-kuruma performansı 103

Şekil 4.5. SS içermeyen (10-0) ve SS içeren (10-1) PGP hamur numunelerin SEM görüntüleri 104

Şekil 4.6. SS/SH oranı 3 olan PGP hamur numunede bulunan iğne şekilli kristal yapılar 104

Şekil 4.7. Düşük ve yüksek kür sıcaklıklarında kür süresinin PGP hamur numunelerin basınç dayanımına etkisi 105

Şekil 4.8. 60 °C sıcaklıkta kür edilen PGP hamur numunelerin kür süresine bağlı FTIR spektrumları 107

Şekil 4.9. Kür süresinin farklı kür sıcaklıklarında PGP hamurun basınç dayanımına etkisi 108

Şekil 4.10. Farklı AC içeriğine sahip PGP harçların yayılma miktarının FA içeriğine bağlı değişimi 113

Şekil 4.11. Farklı AC içeriğine sahip PGP harç numunelerin yoğunluğuna FA içeriğinin etkisi 116

Şekil 4.12. PGP harç numune yoğunluklarının AC içeriğine bağlı değişimi 117

Şekil 4.13. AC içermeyen ve farklı FA içeriğine sahip oda sıcaklığında kür olmuş PGP harç numunelerin basınç dayanımlarının zamanla değişimi 120

Şekil 4.14. Sıcak kür görmüş farklı FA içeriğine sahip AC içermeyen PGP harç numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları 121

Şekil 4.15. Sıcak kür görmüş farklı dayanım yaşlarındaki PGP harç numunelerin basınç dayanımının FA ve AC içeriğine bağlı değişimi 122

Şekil 4.16. Oda sıcaklığında kür görmüş ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı 28 günlük basınç dayanımı değişimi 123

Şekil 4.17. Oda sıcaklığında kür edilen ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı ıslanma-kuruma performansı 125

Şekil 4.18. Sıcak küre tabi tutulmuş PGP harç numunelerin ıslanma-kuruma performansı 126

Şekil 4.19. Oda sıcaklığında kür olan ve AC içermeyen PGP harç numunelerin FA içeriğine bağlı ıslanma-kuruma ve deniz suyu performansı 129

Şekil 4.20. Oda sıcaklığında kür olan ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı deniz suyu etkisi performansı 129

Şekil 4.21. Sıcak küre tabi tutulan ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin deniz suyu etkisi performansının AC içeriğine bağlı değişimi 130

Şekil 4.22. Çiçeklenme sonucu oluşan beyaz birikintilerin XRD analizi 131

Şekil 4.23. PGP harç numunelerin çiçeklenme miktarları 133

Şekil 4.24. Sülfürik asit etkisinde 2 ay kalan PGP ve PC harç numunelerin görsel değişimi 137

Şekil 4.25. Sülfürik asit etkisinde 2 ay bekletilen PGP harç numunelerindeki görsel değişim 138

Şekil 4.26. Sülfürik asit etkisinde 4 ay kalan sıcak kür görmüş PGP harç numunelerindeki ağırlık değişimi 139

Şekil 4.27. Farklı FA içeriğine sahip AC içermeyen PGP harç numunelerinin sülfürik asit etkisiyle basınç dayanımı kaybının kür şekline bağlı değişimi 140

Şekil 4.28. Sülfürik asit etkisinde 4 ay kalan sıcak kür görmüş PGP harç numunelerindeki basınç dayanımı değişimi 141

Şekil 4.29. Beton numunelerin 77 K'deki N_2 adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermleri 144

Şekil 4.30. Beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 145

Şekil 4.31. Beton numunelerin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları 146

Şekil 4.32. Beton numunelerin XRD analizleri 147

Şekil 4.33. Beton numunelerin ıslanma-kuruma sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları 149

Şekil 4.34. Farklı tesirlere maruz bırakılan 30FA-0AC beton numunesinin FTIR grafiği 150

Şekil 4.35. Islanma-kuruma etkisi sonrası beton numunelerin XRD analizleri 151

Şekil 4.36. Sülfürik asit etkisindeki PC betonlarda meydana gelen şekilsel değişim 152

Şekil 4.37. Sülfürik asit etkisindeki GP betonlarda meydana gelen şekilsel değişim 153

Şekil 4.38. 120 gün sülfürik asit etkisinde kalan betonların şekilsel değişimi 155

Şekil 4.39. Asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinin agrega yüzeyinde oluşması 155

Şekil 4.40. Beton numunelerin sülfürik asit etkisi sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları 157

Şekil 4.41. Sülfürik asit etkisinde kalmış PGP hamur fazının almış olduğu hal 158

Şekil 4.42. Sülfürik asit etkisine maruz bırakılan beton numunelerin XRD analizi 159

Şekil 4.43. Sülfürik asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları 160

Şekil 4.44. Sülfürik asit etkisiyle beton numunelerde oluşan reaksiyon ürünlerinin XRD analizi 161

Şekil 4.45. Geniş diskli aşınma deneyine tabi tutulan beton numuneler 163

Şekil 4.46. Beton numunelerin donma-çözülme sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları 165

Şekil 4.47. 30FA-20AC beton numunesinin donma-çözülme sonrası SEM görüntüsü 166

Şekil 4.48. Beton numunelerin donma-çözülme sonrası XRD analizleri 167

Şekil 4.49. Beton numunelerinin su işleme derinlikleri 169

EK LİSTESİ

EK 1. Alkali Aktivatör İçeriğinin PGP Bağlayıcıların Özelliklerine Etkisinin Araştırıldığı Çalışmanın Tüm Sonuçları

EK 2. Kür Koşullarının PGP Bağlayıcıların Özelliklerine Etkisinin Araştırıldığı Çalışmanın Tüm Sonuçları

KISALTMA VE SİMGELER

AA : Alkali aktivatör

AAÇ : Alkali-aktive çimentolar

a/b : Alkali aktivatörün toz bağlayıcıya ağırlıkça oranı

AC : Kalsiyum Alüminat Çimentosu

Al : Alüminyum

Al_2O_3 : Alümin

Albit : $NaAlSi_3O_8$

Anorthit : $CaAl_2Si_2O_8$

ASR : Alkali-silika reaksiyonu

BET : Brunauer, Emmett ve Teller (yüzey alanı ve mikrogözenek ölçüm) Yöntemi

C-S-H : Kalsiyum-silika-hidrat ($C_3S_2H_3$)

C-FA : C-sınıfı uçucu kül

C_2S : Dikalsiyum silikat

C_3A : Trikalsiyum alüminat

C_3S : Trikalsiyum silikat

C_4AF : Tetrakalsiyum alüminoferrit

C_4ASH_{12} : Kalsiyum-alümino-monosülfohidrat

$C_6AS_3H_{32}$: Kalsiyum-alümino-trisülfohidrat (etrenjit)

Ca : Kalsiyum

$Ca(OH)_2$: Kalsiyum hidroksit (CH)

$CaCO_3$: Kalsiyum karbonat (saf kalker)

CaO : Sönmemiş kireç

$CaSO_4.2H_2O$: Alçıtaşı (CSH_2)

CH : Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$)

CO_2 : Karbondioksit

CSH_2 : Alçıtaşı ($CaSO_4.2H_2O$)

DP : Doğal puzolan

FA : Fly ash (uçucu kül, UK)

F-FA : F-sınıfı uçucu kül

Fe : Demir

Fe_2O_3 : Ferrik oksit

$Fe(OH)_2$: Ferros hidroksit

$Fe(OH)_3$: Ferrik hidroksit
FTIR : Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
GP : Geopolimer
GYFC : Granüle yüksek fırın cürufu
ICP : Atomik Emisyon Spektrometresi
H_2S : Hidrojen sülfit
H_2SO_4 : Sülfürik asit
HCl : Hidroklorik asit
K_2SiO_3 : Potasyum silikat
KOH : Potasyum hidroksit
M : Molarite
Mg : Magnezyum
$Mg(OH)_2$: Brusit
$MgSO_4$: Magnezyum sülfat
MIP : Mercury Intrusion Porosimetry - Cıva Püskürtmeli Porozimetre
MK : Metakaolin
Na_2SiO_3 : Sodyum silikat (SS)
Na_2SO_4 : Sodyum sülfat
NaOH : Sodyum hidroksit (SH)
$(OH)^-$: Hidroksil iyonu
PC : Portland Çimentosu
PGP : Pomza esaslı geopolimer
SAK : Su azaltıcı katkı maddesi
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
SH : Sodyum hidroksit (NaOH)
Si : Silisyum
SiO_2 : Silika
SS : Sodyum silikat (Na_2SiO_3)
SS/SH : Sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine ağırlıkça oranı
UPV : Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrases Dalga Hızı) yöntemi
XRD : X-ışını kırınımı
XRF : X-ışını floresansı
YP : Yapay puzolan
VK : Volkanik kül

1. GİRİŞ

Bir yapı malzemesi olarak beton, dünya çapında, sudan sonra en çok kullanılan malzemedir. Baraj, kanal, köprü ayağı ve kanalizasyon borusu gibi birçok su yapısı da betondan inşa edilmektedir. Betonun bu kadar çok kullanılmasının bir sonucu olarak, betonun bileşenlerinden olan Portland Çimentosu (PC), küresel çapta, bir yılda 4.1 milyar ton civarında tüketim miktarlarına ulaşmaktadır. Tüketilen bu çimentonun üretiminde büyük bir paya sahip olan Türkiye, PC üretiminde dünya çapında 5'inci sırada yer almaktadır. Beton üretiminde PC'ye bu kadar yoğun talebin olmasına karşın, üretiminde yüksek oranda CO_2 salınımının gerçekleşmesi ve büyük miktarda enerji sarfiyatının gerekmesi, PC sektörü için problem oluşturmaktadır. Ayrıca PC üretiminde gerekli olan hammadde kaynaklarının azalması ve beton su yapılarında da sıkça karşılaşılan asit-sülfat saldırısı ve aşınma etkisi gibi yıpratıcı etkilere karşı durabilitesinin iyi olmamasından dolayı PC'ye alternatif bağlayıcı arayışları önem kazanmıştır.

Alternatif bağlayıcılar arasında olan geopolimer (GP) bağlayıcılar, çevresel etkilerinin düşük olması ve yıpratıcı dış etkilere karşı daha dayanıklı olmalarından dolayı son dönemlerde yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. GP bağlayıcılarda klinker kullanımı söz konusu değildir. GP bağlayıcılar, PC'nin su ile reaksiyonundan bağlayıcı özellik elde etmenin yerine, doğal puzolan (DP) veya yapay puzolanların (YP) alkaliler ile aktive edilmeleriyle bağlayıcılık özelliği kazanırlar. GP beton üretiminde toz bağlayıcı olarak, genellikle granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), uçucu kül (FA; fly ash) gibi YP'ler veya metakaolin (MK) gibi ısıl işlem görmüş DP'ler kullanılmaktadır. Bu toz bağlayıcılar ile üretilen GP betonların çevresel etkileri ve asit ve sülfat etkilerine karşı hassasiyetleri, PC betonlardan daha düşük olmaktadır. Ancak GYFC ve FA'nın, PC betonlarda mineral katkı olarak kullanılmaları ve bu toz bağlayıcılar başka bir endüstri dalında atık veya yan ürün olarak elde edildiklerinden o endüstrideki üretime bağlı olmaları sebeplerinden dolayı GP üretiminde DP'lerin kullanılmaları, önem arz etmektedir. Ayrıca MK gibi ısıl işleme tabi tutulmuş DP'ler enerji sarfiyatından dolayı ikinci planda kalmaktadırlar.

Isıl işlem görmemiş DP'ler, ısıl işlem açısından enerji sarfiyatı gerektirmemeleri ve yerelde de bulunabildiklerinden nakliye mesafelerinin kısalması ile çevresel etkileri ve maliyetleri düşük, sürdürülebilir kaynak durumundadırlar. Bundan dolayı son 10 yılda DP esaslı GP bağlayıcılar yoğun bir şekilde araştırılmış ve bu meraklı araştırma devam

etmektedir. Ancak bu DP'ler yeterli derecede reaktif Si ve Al içeriğine sahip olmadıklarından, bu DP'ler ile üretilen GP betonlar, yeterli dayanıma sahip olabilmelerine karşın genellikle yeterince dayanıklı olamamaktadır. Bu durum, DP esaslı GP betonların, su yapıları gibi yoğun bir şekilde yıpratıcı dış etkenlere maruz kaldığı şiddetli ortamlarda kullanımını zorlaştırmaktadır. Ancak son yıllarda, bu GP'lerin dayanıklılığını arttıracak bazı yöntemler önerilmiş ve etkinlikleri tartışılmıştır. Çalışmalar, bu yöntemler kullanılarak DP esaslı GP betonları daha kalıcı kılmanın mümkün olabileceğine işaret etmektedir. Önerilen yöntemler dikkate alınarak, bu çalışma için mineral katkı kullanma yöntemi, uygun görülmüştür.

Türkiye'de yaklaşık 2.8 milyar ton rezervi bulunan, yüksek oranda Si ve Al içeriğine sahip ve bir DP olan pomza, GP üretiminde toz bağlayıcı olarak iyi bir alüminosilikat kaynağı olma konumundadır. Ancak pomzanın GP üretiminde toz bağlayıcı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar henüz yeterli seviyede değildir. Pomza esaslı geopolimer (PGP) ile yapılmış mevcut çalışmalar ise genellikle bu bağlayıcının özelliklerine kür koşulları ve alkali aktivatör içeriğinin etkisi gibi konulara yoğunlaşmışlardır. Su yapılarının maruz kaldığı yıpratıcı dış etkenlere maruz kalacak bir PGP betonun dayanıklılığı üzerine herhangi bir çalışma gerçekleştirilememiştir.

Bu tez çalışması için Iğdır ili sınırları dahilinde bulunan pomza ocakları araştırılmıştır. Kimyasal ve mineralojik analizler neticesinde, Küçük Ağrı Dağı'nın Iğdır tarafına bakan ve Aralık ilçesinde bulunan ocaktan elde edilen pomzanın kullanılması kararlaştırılmıştır. Iğdır-Aralık'tan elde edilen bu pomza ile su yapıları gibi şiddetli ortamlarda kalıcı olabilecek seviyede dayanım ve dayanıklılığa sahip GP betonların geliştirilmesi, bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır. Bu amaç ile yeterli işlenebilirlik ve dayanıma sahip ve su yapılarının sık sık maruz kaldıkları, ıslanma-kuruma etkisi, deniz suyu etkisi, çiçeklenme, aşınma, asit hücumu ve donma-çözülme etkilerine karşı PC beton kadar dayanıklı olan PGP beton üretilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, PGP bağlayıcılar ile hamur, harç ve beton karışımlar üretilmiştir. Bu karışımların taze haldeki özellikleri, bu karışımlar ile üretilen numunelerin fiziksel, mekanik özellikleri ve durabilitelerinin yanında mikroyapıları araştırılmıştır. Bu çalışmalar, 3 aşamada gerçekleşmiştir:

- *PGP hamur numunelerle yapılan çalışma:* Kür koşulları ve alkali aktivatör (AA) içeriği gibi parametrelerin PGP bağlayıcının özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde harç numunelerle yapılacak çalışmada bu parametreler sabit tutulmuştur. Ayrıca pomzaya ikame edilecek mineral katkının ne olacağına dair araştırmalar gerçekleştirilmiştir.
- *PGP harç numunelerle yapılan çalışma:* Hamur numunelerle yapılan çalışmanın neticesinde karar verilen FA ve kalsiyum alüminat çimentosu (AC) katkıları, farklı oranlarda pomzaya ikame edilerek PGP harç numuneler üretilmiş ve taze ve sertleşmiş haldeki bazı özellikleri araştırılmıştır.
- *PGP beton numunelerle yapılan çalışma:* Harç numunelerle yapılan çalışma neticesinde elde edilen veriler dikkate alınarak 3 karışım seçilmiş ve bu karışımlarla PGP beton numuneler üretilmiştir. PGP beton numunelerin dayanım, dayanıklılık ve mikroyapıları daha detaylı araştırılarak PC beton numuneler ile kıyaslanmıştır.

Giriş kısmında tez çalışması ana hatları belirtildikten sonra bu bölümün kalan kısmında, bu çalışmayla ilgili teorik temeller açıklanacaktır.

1.1. Beton

Beton ve çelik, inşaat yapılarında en yaygın kullanılan iki malzemedir. Ancak mühendis, genellikle yapının yapıldığı beton hakkında çelikten daha az bilgiye sahiptir. Çelik, dikkatlice kontrol edilen koşullar altında üretilmektedir; özellikleri bir laboratuvarda belirlenir ve bu özellikler, üreticinin sertifikasında açıklanır. Bu nedenle, çelik konusunda, proje tasarımcısının yalnızca çeliği ilgili bir standarda uygun olarak belirtmesi ve uygulamadaki mühendisin donatıyla ilgili işçiliği denetlemesi yeterlidir. Fakat bir şantiyede beton için durum tamamen farklıdır. Beton bileşenlerinden olan çimentonun kalitesinin üretici tarafından çeliğe benzer bir şekilde garanti edildiği doğrudur ve uygun çimentonun seçilmesi koşuluyla beton bir yapıda çimento kaynaklı problem, hemen hemen hiç yoktur. Ancak yapıda kullanılan malzeme, çimento değil betondur. Beton yapı elemanları ise çoğunlukla bir fabrikada üretilmemekte ve bu elemanların kalitesi üretildikleri betonun tasarım, uygulama ve bakımına (kür) bağlı olmaktadır (Neville 1995).

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen, başlangıçta şekil verilebilir (taze) haldeyken, zamanla katılaşıp şekil verilemez hale gelip dayanım kazanan (sertleşen) bir yapı malzemesidir. İyi bir beton ile kötü bir beton, tamamen aynı malzemelerden oluşur. Bir betonun iyi olabilmesi için betonun doğru tasarlanması, bu tasarıma uygun üretilmesi, uygun tarzda taşınması, yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve hidratasyonun sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi için kür edilmesi gerekir. Bir betonun "iyi" olduğuna hükmetmek için ise iki kriter vardır: Hem taze halde hem de sertleşmiş halde, betonun kendisinden beklenen performansı sergileyebilmesidir. Taze haldeki betondan beklenen, karıştırma, yerine yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kolayca yapılabilmesine olanak sağlayacak kıvamda olması ve bu işlemler esnasında segregasyona izin vermeyecek derecede kohezif olmasıdır. Sertleşmiş haldeki betondan beklenen ise hedeflenen minimum dayanıma sahip olması ve yapıda hizmet verdiği süre içerisinde çevrede oluşan yıpratıcı dış etkenlere karşı yeterince dayanıklı (durabil) olmasıdır (Neville 1995; Erdoğan 2016).

Beton, çağımızda irili ufaklı birçok yapıda kullanılmakta olan en önemli ve popüler yapı malzemesidir. İnsanların yaşadıkları evlerin, çalıştıkları iş yerlerinin, eğitim gördükleri okulların, spor yaptıkları tesislerin, arabalarını park ettikleri park yerlerinin ve garajların büyük bir bölümünün yapımında beton kullanılmaktadır. Üzerinde yürünülen kaldırımlar, seyahat edilen veya insanların ihtiyacı olan malların getirip gönderildiği karayollarının, demiryollarının, havaalanlarının ve limanların yapımında da beton kullanılmaktadır. İçme suyunun veya atık suların depolandığı tanklar ve bu suların taşındığı borular betondan yapılmaktadır. Enerji üretimi için kurulan barajların ve atom reaktörlerinin bir bölümünde ve enerji nakli için kullanılan direklerin yapımında, yine, beton kullanılmaktadır (Erdoğan 2016). Bu örnekleri daha da arttırmak mümkündür. Fakat burada, bu kadarıyla yetinilip 1.2. ve 1.3.'üncü bölümde betondan imal edilmiş su yapıları ve bu su yapılarının karşılaştığı problemler anlatılacaktır.

1.2. Beton Su Yapıları

Dünyadaki tüm canlılar yaşamlarını sürdürmek için suya muhtaçtırlar. Eski çağlardan bu yana insan toplulukları suyun bulunduğu yerlere yerleşmişlerdir. İnsan toplulukları, kentleşme ve devletleşme ile paralel olarak, akedük (su kemeri), kanal ve liman gibi su yapılarını yapmaya başlamışlardır. Mezopotamya, Mısır, Hindistan,

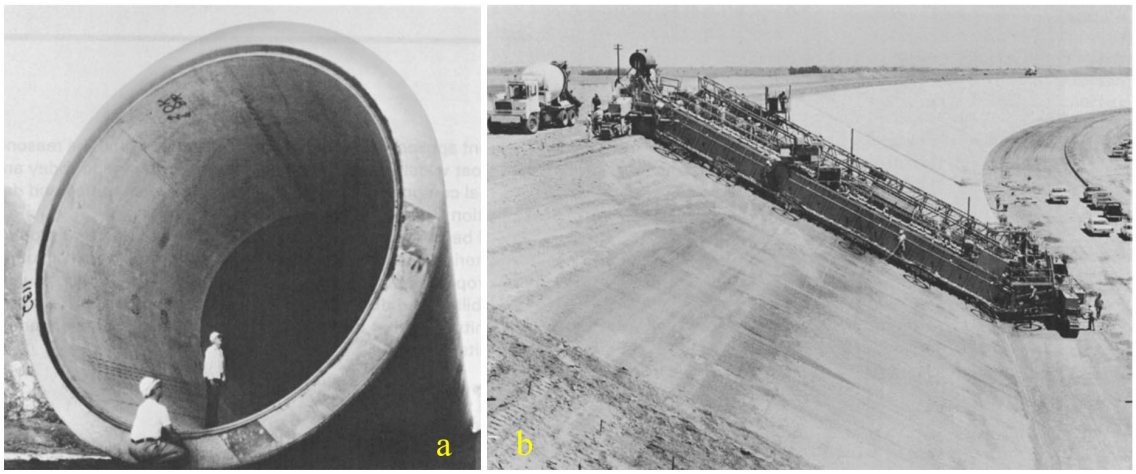
Pakistan ve Çin'de kurulmuş medeniyetler, Fırat, Dicle, Nil, Ganj, İndus ve Huang-Ho (Sarı Irmak) nehirlerinin kenarlarında yer almıştır. M.Ö. 3000 ve 2000 yıllarında özellikle akarsuların kontrolü ve sulama amacıyla ilgili su yapıları tesis edildiğini gösteren kalıntılar ve belgeler sözü edilen yerlerde bulunmaktadır (Aküzüm ve Öztürk 1996; Erdoğan ve Erdoğan 2007a).

Baraj, kanalizasyon boruları, açık ve kapalı kanallar gibi su yapıları, ekonomik ve sosyal faydaları olan çok önemli altyapı tesisleridir (Wu ve ark. 2007). Bu altyapı tesisleri, PC kullanımının yaygınlaşmasıyla PC esaslı betondan üretilmeye başlanmıştır. Su borusu, köprü ve baraj gibi su yapıları, 19. yüzyılın sonlarından itibaren PC betonlardan üretilmesine karşın PC beton ile üretilmiş ilk dikkat çekici su yapısı, 1935 yılında tamamlanan Hoover Barajı'dır. ABD'deki ilk mega proje olarak kabul edilen 221 m yükseklikteki Hoover Barajı'nın betonları, ilk yıllarda dövülerek sıkıştırılmışken 1933 yılının başlarından itibaren dahili vibratörler kullanılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Wilde 2004; Erdoğan ve Erdoğan 2007a). Tahmini maliyeti 18.5 milyar dolar olan 12 600 MW kurulu güce sahip olan 180 m yüksekliğindeki Itaipu barajı ve hidroelektrik santrali ise Brezilya'nın Paraguay sınırındaki Paraná Nehri'nin üzerinde bulunmaktadır (Şekil 1.1.). Bu görkemli yapının inşasında, santralin baraj, derivasyon yapısı ve prefabrik kiriş, döşeme ve diğer yapısal elemanların inşasında toplam 12.5 milyon metreküplük on iki beton türü kullanılmıştır (Mehta ve Monteiro 2014).



Şekil 1.1. Itaipu barajı (Mehta ve Monteiro 2014)

Şekil 1.2.'de betondan imal edilmiş devasa su iletim borusu ve akedük inşaatına ait su kemeri kesiti verilmiştir. Central Arizona Projesi'ne ait olan bu boru hattı sistemi (Şekil 1.2.a), her biri 225 ton ağırlığa sahip, uzunluğu 6.7 m ve dış çapı 7.5 m olan 1560 beton borudan oluşmaktadır. Kaliforniya akedüğü (Şekil 1.2.b.), 750 km uzunluğuyla yılda 5.22 milyar metreküp suyun işlenebildiği hidrolik sistemin bir parçasıdır (Mehta ve Monteiro 2014).



Şekil 1.2. Betondan imal edilmiş su yapıları a) su iletim boruları b) akedük (Mehta ve Monteiro 2014)

Betonun su yapılarında böylesine devasa miktarlarda kullanılmasına karşın, bu malzemeyle yapılan su yapıları, bazı önemli dış etkilere maruz kalmaktadır. Bu dış etkiler, beton su yapılarında çok önemli durabilite problemlerine yol açabilmektedir.

1.3. Beton Su Yapılarında Karşılaşılan Problemler

Beton su yapılarının çoğu, servis ömrü boyunca, aşınma, donma-çözülme, ısıl yorulma, korozyon ve karbonatlaşma gibi yıpratıcı dış etkilerin tesirinde kalmaktadır. Bu tesirler, su yapılarının dayanım, stabilite ve durabilitesini ciddi bir şekilde etkilemektedirler (Wu ve ark. 2007). Bu etkilere maruz kalan PC esaslı betonların önemli bir kısmı, servis ömründen önce işlevini yitirmekte ve hizmet veremez duruma gelmektedir (Graham ve ark. 1987; Mehta 2002). Bu bölümde beton su yapılarının servis ömrü boyunca en çok karşılaştıkları etkilerden bazıları detaylandırılacaktır.

1.3.1. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon

Bazı inşaat yapılarında, beton yüzeylerinde yıpranmanın (wearing) etkisiyle yapı, servis veremez hale gelebilmektedir. Yüzeyde oluşan bu yıpranmalar, aşınma, erozyon ve kavitasyon olmak üzere 3 farklı şekilde olabilmektedir (Graham ve ark. 1987; Mindess ve ark. 2003).

Birçok durumda, beton yüzeyleri aşınmaya maruz kalır. Yaya ve araç trafiğinin etki ettiği kaldırım, döşeme ve kara yolları, sık sık aşınmaya maruz kalan beton yapılardandır. Akan sular tarafından taşınmakta olan askı halindeki kum, çakıl veya diğer katı tanecikler ise sürtünme ve çarpma etkisi oluşturarak baraj, kanal, menfez, köprü ayağı gibi su yapılarını aşındırır. Aşınma, beton yüzeyinde bölgesel olarak uygulanan yüksek gerilmeler barındırdığından dolayı betonun yüzey bölgesinin mukavemeti ve sertliği, aşınmaya karşı direnci güçlü bir şekilde etkilemektedir (Neville 1995; Erdoğan 2016).

Beton için önemli olan aşınma türlerinden biri olan erozyon, akan suyun beton yüzeyine teması ile gerçekleşir. Erozyonun miktarı, su tarafından taşınan maddelerin miktarına, şekline, büyüklüğüne, sertliğine, suyun akış hızına ve betonun kalitesine bağlı olmaktadır. Diğer aşınma türlerinde olduğu gibi erozyon için de beton kalitesi, aşınma dayanıklılığı üzerinde çok etkili olmaktadır. Bunun yanında beton karışımına giren malzemeler ve bunların sahip olduğu özellikler de erozyon türü aşınma dayanıklılığına etki etmektedir. Özellikle agrega boyutu ve sertliği erozyon türü aşınma dayanıklılığına

önemli katkı sağlamaktadır. Buna karşın daha küçük boyutlu agregalar ile üretilen betonların erozyonu daha üniform olmaktadır (Neville 1995; Erdoğan 2016).

Su yapılarında karşılaşılan kavitasyon olayı ise hızlı akan suların akış yönlerindeki ani değişiklikten kaynaklanmaktadır. Bu durum, değişikliğin olduğu yerin hemen altındaki bir bölgede bulunan suda, düşük basınca sebep olmakta ve bu bölgedeki suda buhar cepleri oluşmasına yol açmaktadır. Buhar cepleri içeren suyun akmaya devam edip biraz ileride yüksek basınçlı bir bölgeye gelmesiyle, buhar patlaması yer almakta ve buradaki betonun yüzeyinde çok büyük gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmelerin sonucu olarak beton yüzeyinde oyulma/aşınma oluşmaktadır. Kavitasyon hasarı, açık kanallarda genellikle 12 m/s'yi aşan durumlarda yaşanırken, atmosferik basıncın çok altında olma ihtimalinin olduğu kapalı kanallarda ise daha düşük hızlarda da gerçekleşebilmektedir. Şekil 1.3.'te Glen Canyon Barajı tünelinde beton kaplamada gerçekleşen 12.5 metrelik kavitasyon hasarı görülmektedir. Kavitasyonu önlemenin birinci koşulu, su taşıyan sistemlerin tasarımının ani değişikliklere yol açmayacak tarzda tasarlanmasıdır (Neville 1995; Erdoğan 2016).



Şekil 1.3. Glen Canyon Barajı tünelinde kavitasyon hasarı (Mehta ve Monteiro 2014)

Temelde aşınma ile ilgili olan bu üç hasar için de beton tasarımının doğru yapılması ile aşınma miktarı azaltılabilmektedir. Beton tasarımında en etkili yöntem, seçilecek beton sınıfının yüksek olmasıdır. Genel olarak basınç dayanımı yüksek olan betonların aşınma dayanıklılığı da yüksek olmaktadır. Çok etkili bir diğer yöntem de beton yüzeyinin uygun bir metotla düzeltilmesi ve kür işleminin doğru yapılmasıdır. Bilindiği gibi yerine yerleştirilen betonun sahip olduğu iri agregalar yer çekiminin etkisiyle aşağı doğru inmeye çalışırken, ince tanecikler ise suyla beraber yukarıya doğru hareket etme eğiliminde olurlar. Terleme olarak adlandırılan bu durumda, betonun üst tabakasında su/çimento oranı yüksek ve dolayısıyla yüzeyi zayıf bir tabakaya sahip bir yapı oluşmaktadır. Bu durumun betona zarar vermemesi için yüzey düzeltme işleminin, terlemenin bittiği ya da çok yavaşladığı bir zamanda yapılması gerekir. Yüzeyin sürtünme katsayısını azaltıcı ve/veya yüzey sertleştirici katkı malzemesi kullanılması, polimer emdirilmiş beton kullanılması ve vakumlu beton kullanılması, aşınmayı azaltan diğer yöntemlerdendir (Graham ve ark. 1987; Neville 1995; Baradan ve ark. 2010; Erdoğan 2016).

1.3.2. Deniz Suyu Etkisi

Birçok beton veya betonarme yapı denizle doğrudan temas halindedir veya dolaylı olarak deniz ortamından etkilenmektedir. Deniz suyunun etki ettiği betonlar, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalabilir. Deniz dalgalarının yoğun aşındırıcı etkileri, tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimleriyle bünyede kalan tuzların kristalizasyonu, donma çözülme ve çelik donatının korozyonu, deniz suyundan kaynaklanan yıpratıcı etkenlerdendir. Beton-betonarme deniz yapıları, servis ömürleri boyunca, deniz ortamından kaynaklanan yıpratıcı etkilerin hemen hemen hepsine aynı anda ve tekrarlı olarak maruz kalmaktadır (Neville 1995; Baradan ve ark. 2010).

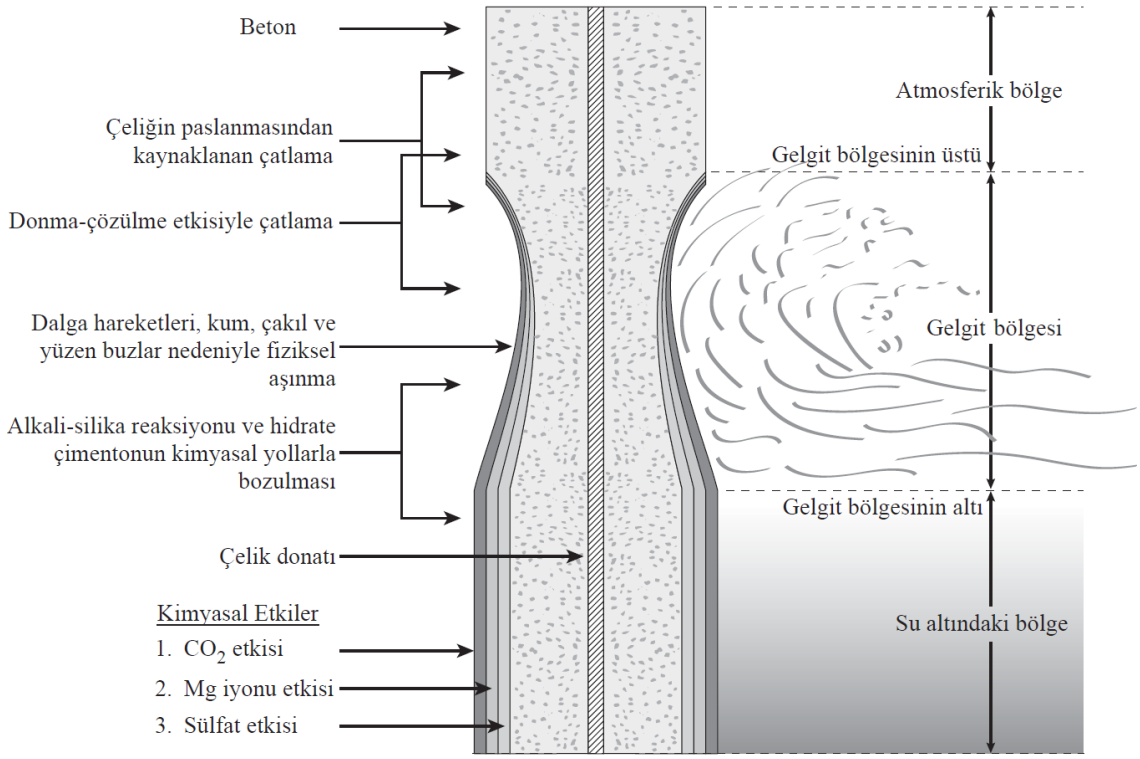
Deniz suyundan kaynaklı kimyasal etki sınıfından olan donatı korozyonu ve sülfat saldırısı sırasıyla 1.3.3. ve 1.3.4. başlık numaralı bölümlerde anlatılacağından, burada sadece magnezyum sülfatın betonda yaptığı kimyasal değişiklikler ve ıslanma-kurumanın yaptığı fiziksel etkiler açıklanacaktır. Magnezyum (Mg) iyonları, kalsiyum (Ca) iyonlarıyla aşağıda görüldüğü gibi yer değiştirmektedir.

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2$$

Brusit olarak bilinen $Mg(OH)_2$, beton yüzeyindeki boşluklarda çökelerek, daha fazla reaksiyonun olmasını engelleyen koruyucu bir tabaka oluşturmaktadır. Ancak dalgaların bu koruyucu tabakayı aşındırmasıyla Mg iyonları, reaksiyonlarına devam etmektedir. Bu durum, deniz suyundan kaynaklı yıpratıcı etkilerin birbirini beslemesine örnek oluşturmaktadır. Dalga etkisi, kimyasal etkiyi beslerken, kimyasal etki de tuzların oluşumu ve kristalizasyonu ile betonun dalga etkisinden kaynaklanacak aşınmaya karşı daha savunmasız hale gelmesine yardımcı olmaktadır (Neville 1995).

Deniz suyunun fiziksel etkilerinden olan ıslanma-kuruma ise beton gözeneklerinde tuzların çökelip birikmesine sebep olmaktadır. Biriken tuz kristallerinin oluşturduğu basınçtan dolayı genleşip, yıpranabilmektedir. Sertleşmiş betonun gözeneklerinde tuz birikmesi, betonun içerisine giren deniz suyunun kapiler yolla yukarı çıkıp buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu olay, betonun, su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmektedir. Deniz sularının gelgit hareketiyle yükselip alçalması sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma-kuruma devirlerinin etkisinde kalmaktadır. Bu tür ıslanma-kuruma durumu ile karşı karşıya kalan beton devamlı olarak su içerisinde kalan betondan daha çok hasar görmektedir. Hatta sabit olarak deniz suyu içerisinde kalan betonların bir miktar kür olabildikleri de ifade edilmektedir (Neville 1995; Erdoğan 2016).

Şekil 1.4.'te bir yapının deniz suyuna göre bulunduğu konuma bağlı olarak maruz kalabileceği değişik deniz ortamları ve deniz suyu etkisiyle betonarme bir elemanda oluşabilen bozulma mekanizmaları gösterilmektedir. Beton bir deniz yapısına yapılan saldırının türü ve şiddeti, o yapının maruz kaldığı koşullara bağlıdır. Yapının tamamen su altında kalan bölümleri, nadiren donma-çözülme etkisine veya çelik donatının korozyonuna maruz kalır. Ancak bu bölgedeki betonlar, kimyasal saldırılara karşı daha hassas olacaklardır. Şekil 1.4.'te beton elemandan içeriye doğru genel bir kimyasal saldırı modeli gösterilmiştir. Bu eleman dışarıdan içeriye doğru sırasıyla CO_2, Mg iyonu ve sülfat etkilerine maruz kalabilmektedir. Gelgit bölgesinin üzerindeki bölümde bulunan beton, donma-çözülme etkisine maruz kalabileceği gibi bu betonun içinde gömülü halde bulunan çeliğin de korozyona karşı savunmasız olacağı görülmektedir. Ancak yukarıda da ifade edildiği gibi en şiddetli bozulmanın gelgit bölgesinde olması muhtemeldir çünkü burada yapı her türlü fiziksel ve kimyasal saldırılara maruz kalmaktadır (Mehta ve Monteiro 2014).



Şekil 1.4. Deniz suyuna maruz kalan betonarme bir elemanda oluşabilecek bozulmaların diyagramatik gösterimi (Mehta ve Monteiro 2014)

Betonu, deniz suyundan kaynaklanan çeşitli yıpratıcı etkilere karşı dayanıklı hale getirmenin en etkili yolu, geçirimliliği düşük olan beton kullanılmasıdır. Betonun geçirimliliği, su/çimento oranının düşürülmesi, uygun malzeme seçimi, yeterli sıkıştırma ve doğru kür koşullarıyla sağlanabilir (Neville 1995; Erdoğan 2016).

1.3.3. Korozyon

Deniz yapıları, menfezler, köprü ayakları ve kolorüre maruz kalan diğer betonarme su yapılarında korozyon olayına sık sık rastlanmaktadır. Aslında doğru tasarlanmış, üretilmiş ve bakımları yapılmış betonarme bir su yapısında, beton, fiziksel ve kimyasal yollarla donatıyı korozyondan koruyabilmektedir. Zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesiyle fiziksel koruma, betonun sahip olduğu yüksek pH değeriyle ise kimyasal koruma sağlanmış olmaktadır. Ancak uygulamalarda yapılan hatalardan dolayı korozyon, günümüzde betonarme yapıların servis ömrünü belirleyen en önemli faktör olarak kabul edilmektedir (Baradan ve ark. 2010).

Korozyon olayının gerçekleşebilmesi için anot, katot ve elektrolite ihtiyaç vardır. Anot, elektron üreten ünite; katot, üretilen elektronları tüketen (emen) ünite; elektrolit ise, içerisinde elektron akımının yer alabildiği ortamdır. Betonarme donatılarının üzerinde

birçok noktada anot ve katot oluşmaktadır. Donatının etrafını saran beton tabakası ise donatı üzerindeki anot ve katot bölgeleri arasında elektron akımının yer alabildiği eloktrolit görevini yapmaktadır. Korozyonun mekanizması aşağıda özetlendiği gibi gerçekleşmektedir:

Anodik bölgede gerçekleşen aşağıdaki reaksiyon sonucunda ortaya çıkan F^{++} iyonları, eloktrolit solüsyonun içerisine girmektedir. Elektronlar ise çelik çubuk boyunca hareket ederek, katodik bölge tarafından kazanılmaktadır:

$$Fe - 2e^{-} \rightarrow Fe^{++}$$

Katodik bölgede, önce hidroksil iyonlarının ortaya çıktığı reaksiyon yer almaktadır. Daha sonra da bu hidroksil iyonları ile eloktrolit solüsyonun içerisinde F^{++} iyonları reaksiyona girerek ferros hidroksit oluşturmaktadır:

$$2e^{-} + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2(OH)^{-} \text{ (hidroksil iyonu)}$$

$$Fe^{++} + 2(OH)^{-} \rightarrow Fe(OH)_2 \text{ (ferros hidroksit)}$$

Ferros hidroksit, beton ortamında mevcut olan su ve oksijenle birleşerek ferrik hidroksit oluşmasına yol açmaktadır. Ferrik hidroksit ise, ferrik oksit (Fe_2O_3) ve su durumuna dönüşebilmektedir. Buradaki su, korozyon olayının devamına yardımcı olabilmektedir:

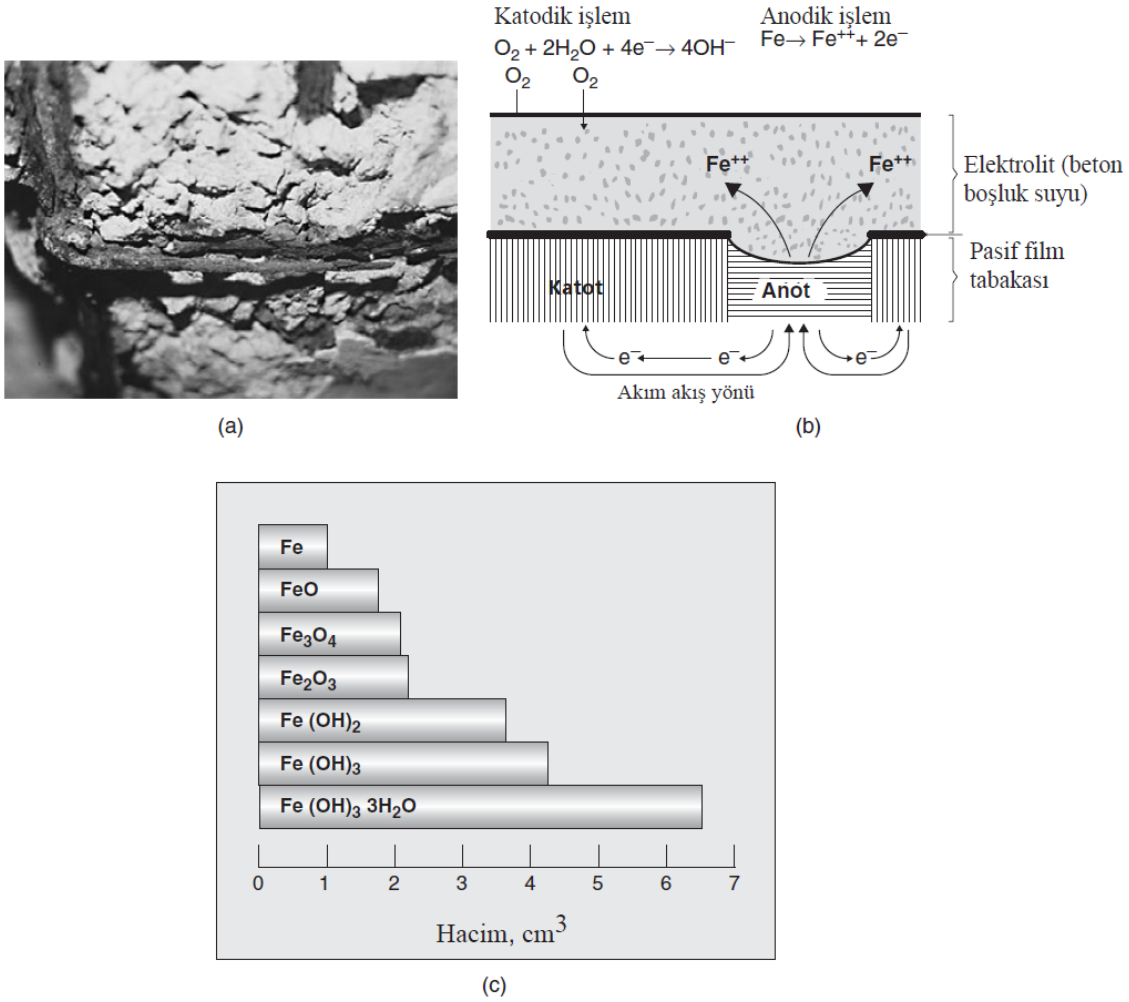
$$2Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 \text{ (ferrik hidroksit)}$$

$$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$$

Korozyon olayında yer alan reaksiyonlardan görülebileceği gibi, anodik bölgenin Fe^{++} iyonlarının solüsyon içerisine girmesiyle, bu bölgedeki demirde azalma olmaktadır. Katodik bölge üzerinde ise, ferros hidroksit ve ferrik hidroksit gibi korozyon ürünleri yerleşmiş olmaktadır.

Şekil 1.5.'te donatı çeliğinin korozyon mekanizması ve korozyon sebebiyle çeliğin içinde olduğu betonun yıpranması gösterilmiştir. Şekil 1.5. (a), çeliğin korozyonundan dolayı donatı kesitinin daralmasını ve oluşan korozyon ürünlerinin hacminin fazla olmasından dolayı betonun genleşip çatladığını ve sonunda paspayı tabakasının attığını göstermektedir. Şekil 1.5. (b), yukarıda anlatılan donatı çeliğinin korozyon mekanizmasını temsil etmektedir. Şekil 1.5. (c) ise oksidasyon türüne bağlı

olarak donatı korozyon ürününün (pas), korozyona uğramış çelik miktarının altı (6) katına kadar çıkabileceğini göstermektedir (Mehta ve Monteiro 2014).



Şekil 1.5. Donatı çeliğinin korozyonundan dolayı betonun genleşip çatlaması (Mehta ve Monteiro 2014)

Çimentonun, C_3S ve C_2S anabileşenlerinin suyla reaksiyonundan ortaya çıkan $Ca(OH)_2$, betona alkalinite sağlamaktadır (pH değeri 12.5 – 13 civarındadır). Betonun sahip olduğu bu pH değeri, betonun içindeki çelik donatı üzerinde ince bir oksit tabakası oluşturarak çeliği korozyona karşı pasif duruma getirmektedir (Şekil 1.5.b.). Ancak betonun bünyesine giren sularla birlikte sızan tuzların veya karbonatlaşma olayının etkisiyle betonun alkalinitesi düşmektedir. Betonun sahip olduğu pH değerinin 9-10 gibi sayılara inmesiyle koruyucu oksit tabakası kırılmakta ve beton, çelik donatıyı korozyona karşı koruyamaz hale gelmektedir (Erdoğan 2016).

Betonarme su yapılarında çok sık görülen korozyon sebeplerinden birisi de klor iyonunun varlığıdır. Beton üretiminde kullanılan malzemelerden kaynaklanan klor

iyonları bir kenara bırakıldığında, su yapılarına etki eden klor iyonları, deniz suyu veya denize yakın bölgelerdeki sisten kaynaklanmaktadır. Klor iyonları, betonun içindeki donatıları koruyan oksit tabakasının kırılmasına sebep olmaktadır. Böylelikle donatıların korozyonu daha kısa sürede başlamaktadır (Erdoğan 2016).

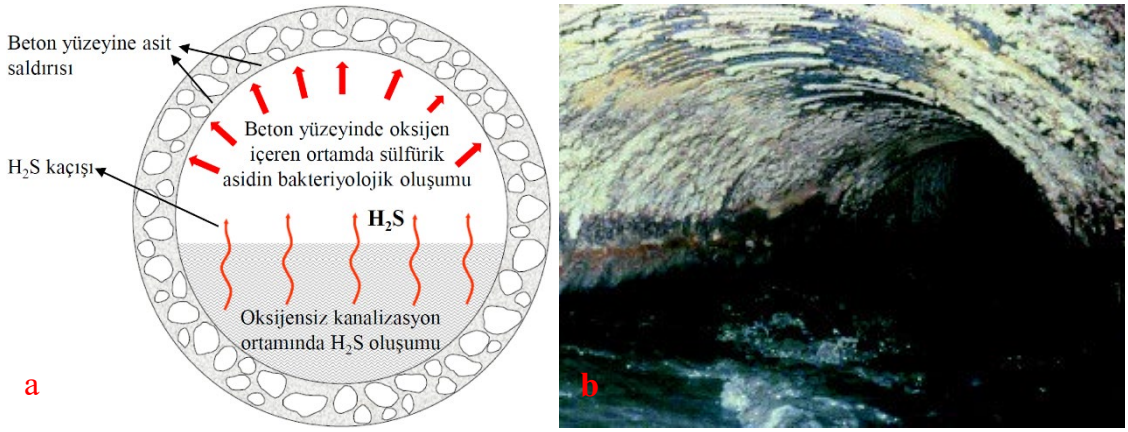
Yukarıda ifade edildiği gibi betonun sahip olduğu alkalinite, betonun içerisinde bulunan çelik donatının üzerinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak, donatıyı korozyona karşı koruyabilmektedir. Ancak betonun bünyesine dışarıdan sızan su ve suyla beraber taşınan bazı maddeler, koruyucu tabakayı kırarak, donatı korozyonunu mümkün kılmaktadır. Bu durumda, basit ve çok etkili yöntem olarak geçirimliliği düşük beton üretilmesi makul bir seçim olacaktır. Bu yüzden standartlar, deniz ortamında üretilecek betonlarda, su/çimento oranı ve çimento dozajı değerlerini sınırlayarak betonun geçirimliliğini düşürmeyi ve pas payını yüksek tutarak sızıntıların donatıya ulaşmasını engellemeyi hedeflemektedirler (ACI-211.1-91 2002; TS-802 2016).

1.3.4. Asit ve Sülfat Saldırısı

Doğru karışımın kullanılması ve uygun kür işlemlerinin uygulanması ile üretilen betonlar genellikle kimyasal etkilere karşı oldukça dayanıklıdırlar. Ancak betonun, sülfürik asit (H_2SO_4) gibi asitlerden ve sülfat saldırısı gibi beton bünyesinde genleşen ürünler oluşturan reaksiyonlardan oldukça çok etkilendiği bilinmektedir. Asit ve sülfat gibi kimyasal saldırıların betondaki etkisi, çimento hidratasyon ürünlerinin çözünmesiyle bünyeyi terk etmesi veya bünyede zarar verici bir şekilde birikmesi ile gerçekleşmektedir (Neville 1995). Sertleşmiş betonun içerisine sızan su veya su buharında bulunan asitler, betonun genleşip hasar görmesine yol açan ve asit hücumu (saldırısı) olarak adlandırılan kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Asit hücumu karşısında, betona bağlayıcılık kazandıran C-S-H jelleri dahi çözünebilmektedir. Ancak en kolay çözünen hidratasyon ürünü, betonun durabilitesiyle ilgili birçok problemin de kaynağı olan kalsiyum hidroksittir (Neville 1995; Erdoğan 2016).

Beton veya betonarme su yapılarına bakıldığında ise özellikle kanalizasyon sistemleri, asit etkisine maruz kalırlar (Graham ve ark. 1987). Organik atık maddelerinin taşındığı kanalizasyon borularında, atık maddelerin içerdiği kükürtlü bileşenler, yüksek sıcaklığın etkisiyle anaerobik bakterilerle birleşerek, nemli ortamda hidrojen sülfide (H_2S) dönüşür. H_2S gazının, aslında betonda yıpratıcı bir etkisi yoktur. Ancak H_2S

gazının, betonun açıkta kalan yüzeyindeki nemli tabakanın içerisine girmesi ve anaerobik bakteriler tarafından oksidasyona uğratılmasıyla oluşan H_2SO_4'ün betona zararlı etkileri olmaktadır. Bu yüzden kanalizasyon borularının akış seviyesinin üstündeki beton yüzeylerinde, bu oluşuma sıkça rastlanmaktadır. Sülfürik asit (H_2SO_4) etkisiyle sertleşmiş çimento hamuru, yavaş yavaş çözülür ve betonda aşamalı olarak bozulma meydana gelir. Şekil 1.6.'da kanalizasyon sistemlerinde sülfürik asidin oluşumu ve sülfürik asit saldırısı diyagramatik olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu şekilde sülfürik asit etkisiyle hasar gören bir kanalizasyon sisteminin resmi verilmiştir.



Şekil 1.6. Sülfürik asit etkisiyle kanalizasyon borusunun bozulması a) bozulmanın oluşumu b) bozulmuş bir kanalizasyon borusu (Baradan ve ark. 2010)

Tuzlar, katı haldeyken, betona zararlı etkileri olmamaktadır. Ancak çözelti halinde bulunan tuzlar, çimento hamurundaki hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girerek, betonun zarar görmesine sebep olurlar. Yeraltı suyu, deniz suyu ve toprakta bulunan sodyum, potasyum, magnezyum ve kalsiyum esaslı sülfatlar, yaygın olarak betona etki eden tuzlardandır. Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularla beraber giren bu sülfatlar, betonun genleşip çatlamasına sebep olan kimyasal reaksiyonların gelişmesine sebep olmaktadır. Su kanalları, beton borular ve deniz yapılarında sıkça karşılaşılan bu olay, sülfat saldırısı olarak isimlendirilmektedir.

Beton üretiminde kullanılan PC'deki her bir anabileşen (C_3S, C_2S, C_3A ve C_4AF) suyla ayrı ayrı reaksiyona girerek hidrate olmaktadır. C_3S ve C_2S'in suyla ayrı ayrı reaksiyona girmesiyle çimento hamuruna bağlayıcılık sağlayan C-S-H ($C_3S_2H_3$) jellerinin yanı sıra kalsiyum hidroksit (CH) de oluşmaktadır. C_3A ise klinkerle birlikte öğütülen ve Portland Çimentosu'nun yapısında var olan alçıtaşı (CSH_2) ve suyla birlikte reaksiyona girerek kalsiyum-alümino-sülfohidratları (C_4ASH_{12} ve C_6ASH_{32}) oluşturmaktadır.

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

$$C_3A + 3CSH_2 + 10H \rightarrow C_4ASH_{12}$$

Betonun içerisine sızan sularda sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat ($MgSO_4$) gibi sülfatlar bulunduğu takdirde, yukarıda gösterilen hidratasyon ürünleriyle aralarında iki aşamalı reaksiyonların gerçekleşmesine sebep olmaktadır: Bunlar,

1. Hidratasyon ürünü olan CH ile sülfatların tepkimeye girerek alçıtaşının oluşması,

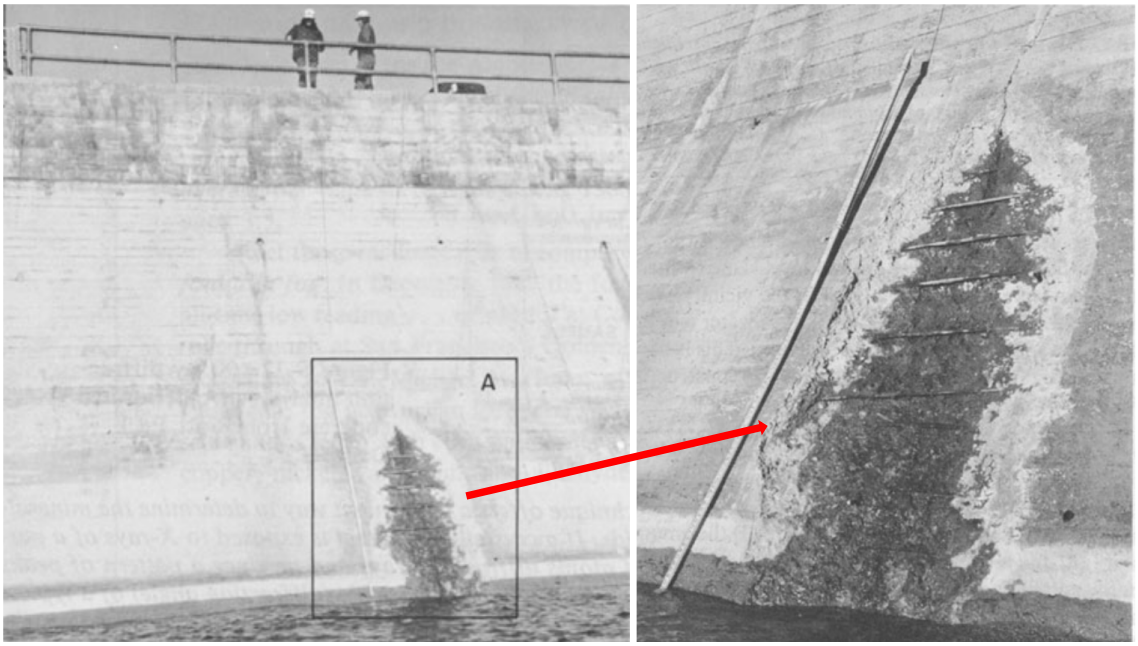
$$CH + NS + 2H \rightarrow CSH_2 + NH$$

$$CH + MS + 2H \rightarrow CSH_2 + MH$$

2. Yarı kararlı haldeki C_4ASH_{12}'nin ilk tepkime sonucu ortaya çıkan alçıtaşı (CSH_2) ile reaksiyonu.

$$C_4ASH_{12} + 2CSH_2 + 16H \rightarrow C_6AS_3H_{32} \text{ (etrenjit)}$$

Çimento kimyasında kullanılan sembolleriyle belirtilen bileşiklerin formülleri "Kısaltma ve Simgeler" bölümünde verildiğinden burada tekrarlanmamıştır. Bu reaksiyonları gerçekleştiren betonlar, beyazımsı bir görünüm almaktadırlar. Genellikle beton blokların kenar ve köşelerinden başlayan sülfat etkisi, zamanla betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına yol açmaktadır (Neville 1995; Erdoğan 2016). Şekil 1.7.'de, bir barajın türbin çıkış kanalında sülfat etkisiyle oluşmuş hasar verilmiştir. Yapılan incelemelerde genel olarak betonun sağlam olduğunu ancak resimde *A* ile gösterilen bölgede 20 cm derinliğe kadar sülfatın hasar verdiği tespit edilmiştir (Mehta ve Monteiro 2014).



Şekil 1.7. Sülfat saldırısı sonucu bir su yapısında oluşan hasar (Mehta ve Monteiro 2014)

Sülfat etkisinin azaltılması için uygulanacak yöntemlerden biri C_3A içeriği düşük çimentoların kullanılmasıdır. Böylelikle ikinci reaksiyon gerçekleşmemiş olacaktır. Hem asit hücumu hem de sülfat hücumunun azaltılması için bir başka yöntem de CH miktarını azaltıcı tedbirler alınmasıdır. DP veya YP kullanılarak CH'nin, C-S-H jellerine dönüştürülmesi veya C_3S içeriği düşük, C_2S içeriği yüksek çimentoların kullanılması bu tedbirlere örnek olarak verilebilir. Fakat kullanılan bağlayıcılarla (çimentolar) ilgili tedbirlerin yanı sıra, diğer kalıcılık problemlerinde olduğu gibi asit ve sülfat hücumlarına karşı da alınabilecek çok etkili bir önlem, geçirimliliği düşük, kaliteli beton üretilmesidir. Böylelikle dışarıdan su ve sularla birlikte girebilecek zararlı maddelerin girişi önlenmiş ve kalıcı yapılar sağlanmış olacaktır (Neville 1995; Mindess ve ark. 2003; Erdoğan 2016).

1.3.5. Islanma-Kuruma Etkisi

Beton su yapılarını etkileyen önemli dış etkenlerden biri de ıslanma-kuruma etkisinin beton bünyesinde ek gerilmeler oluşturarak hasara sebep olmasıdır. Deniz sularının gelgit hareketiyle yükselip alçalması, dalgaların etkisiyle deniz suyunun sıçraması bu etkiyi doğurabilmektedir. Ayrıca bir yüzeyi ıslak, diğer yüzeyi kuru olan iskele ve rıhtım gibi yapılarda, ıslak yüzeyden kapiler yolla emilen deniz suyunun açık yüzeyden buharlaşmasıyla da benzer etki oluşabilmektedir. Islanma-kuruma etkisi, betonun içerisine sızan deniz suyundaki tuzların, suyun buharlaşmasından sonra betonun gözeneklerinde birikmesiyle başlamaktadır. Betonun su yüzeyinde kalan bölgelerinde

oluşan bu olay, ıslanma-kuruma döngülerinin artmasıyla daha fazla tuzun betonun gözeneklerinde birikmesiyle gelişmektedir. Biriken tuzların kristalleşmesi sonucunda betonun bünyesinde büyük basınçlar oluşmaktadır. Tekrar ıslanma durumlarında ise suyla temas eden tuzların hacimlerinin artmasının etkisiyle beton, genleşip yıpranmaktadır (Mindess ve ark. 2003; Baradan ve ark. 2010; Erdoğan 2016). Şekil 1.8.'de, servis ömrü boyunca tekrarlı bir şekilde ıslanma-kuruma döngülerine maruz kalan betonarme bir deniz feneri verilmiştir.



Şekil 1.8. Servis ömrü boyunca birçok ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalan betonarme bir deniz feneri (Baradan ve ark. 2010)

1.3.6. Çiçeklenme

Çimentonun kalsiyum silikatlı anabileşenlerinin hidratasyonu sonucu, çimento hamuruna bağlayıcı özellik kazandıran C-S-H jelleri dışında CH'nin de oluştuğu, daha önce ifade edilmişti. C-S-H jelleri, şiddetli sızdırma koşullarına uzun süreli maruz kalmadığı sürece ayrışmazlar. CH ise suyla beraber en kolay şekilde betondan süzülen hidratasyon ürünüdür. Ayrıca yapısal olarak, betonda çatlakların bulunması, betonun iyi sıkıştırılmaması veya derzlerin iyi yapılmaması gibi nedenler, suyun betonda kapiler yolla hareketini kolaylaştırmaktadır. Beton içerisine suların sızmasıyla CH ve bazı tuzlar, suda çözünürler. Eriyik halde bulunan CH ve tuzlar, suyla beraber beton yüzeyine taşınır ve suyun buharlaşması ile yüzeyde birikirler. CH ($Ca(OH)_2$) ve CO_2 reaksiyona girerek beton yüzeyinde beyaz lekeler halinde bulunan kalsiyum karbonatı ($CaCO_3$) oluştururlar. Ayrıca Na, K veya Ca'nın sülfat ve karbonatlarının da oluşabildiği bu olay, beton teknolojisinde çiçeklenme olarak ifade edilir. Beton su yapılarında, kanalların iç yüzeyleri ve beton borular, çiçeklenmenin kolayca gerçekleşebildiği yerlerdir.

CH ve tuzların çözünüp taşınmasında, yağmur suları gibi sertlik derecesi düşük olan sular, Ca ve Mg iyonları içeren sert sulardan daha etkilidir. Ayrıca CH, soğuk sularda, sıcak sulardan daha kolay çözündüğü için kar suları, çiçeklenmenin yer almasında yağmur sularından daha etkilidirler. Bunların bir sonucu olarak, kış aylarında çiçeklenme olayı daha fazla olmakta, ilkbahar aylarında azalmakta ve yaz aylarında neredeyse hiç meydana gelmemektedir.

Çiçeklenme, aslında bir durabilite problemi olmaktan çok estetik açıdan bir problem olarak kabul edilebilir ve beton yüzeyindeki bu lekeler ilk oluştuklarında fırça ve suyla; sonraki aşamalarda ise hidroklorik asit (HCl) çözeltisi yardımıyla temizlenebilir. Ancak CH'nin çözünmesi fazla olursa beton boşluklu bir yapıya sahip olur. Boşluklu yapı, betonun dayanımını azalttığı gibi su ve suyla beraber zararlı maddelerin betonun bünyesine daha rahat girmesini sağlayarak, betonun dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir.

C_3S miktarı düşük olup C_2S miktarı fazla olan çimento kullanımıyla ve/veya puzolanların çimentoya ikamesi yoluyla sertleşmiş çimento hamurundaki CH miktarının az olmasını sağlamak, çiçeklenmeyi azaltmaktadır. Aynı zamanda diğer durabilite problemlerinde olduğu gibi çiçeklenmeyi de azaltmanın en etkili yolu, geçirimliliği düşük boşluksuz beton üretimidir (Neville 1995; Mindess ve ark. 2003; Mehta ve Monteiro 2014; Erdoğan 2016).

1.4. Portland Çimentolarının Çevresel Etkileri

Portland Çimentosu (PC), 1824 yılında bir duvar ustası olan İngiliz Joseph Aspdin tarafından icat edilmesinden sonra büyük ilerlemeler kaydederek günümüze kadar gelmiştir (Erdoğan ve Erdoğan 2010). PC üretim ve tüketimi, artarak devam etmekte ve PC ile üretilen beton, dünya çapında sudan sonra en çok kullanılan malzeme konumundadır. Dünya çapında PC tüketimi, bir yılda ortalama, 4.1 milyar ton civarındadır. 2020 verilerine göre tüketilen bu çimentonun 72.3 milyon ton kadarı Türkiye'de üretilmektedir. Bu haliyle Türkiye, dünya çimento üretiminde beşinci sırada yer almaktadır. Ve yine 2020 verilerine göre Türkiye, üretilen bu çimentonun %22.5 kadarını ihraç etmiştir (TÜRKÇİMENTO 2021).

Beton üretimi için çimentoya artan taleple beraber, PC sektörü çok önemli iki problemle karşı karşıyadır. Bu problemler, PC üretiminde büyük miktarda enerji

sarfiyatının olması ve üretim esnasında yüksek oranda CO_2 salınımının gerçekleşmesidir. Bilindiği gibi PC klinkerinin üretiminde kalker ($CaCO_3$) ve kil, döner fırında 1350 – 1450 °C arası sıcaklıklarda pişirilmektedir. Bu işlem, yüksek miktarda enerji sarfiyatı gerektirmektedir. Ayrıca pişirme işlemi esnasında, 900 °C civarında $CaCO_3$, sönmemiş kireç (CaO) ve CO_2 olarak ayrışmakta ve bu CO_2 doğaya salınmaktadır. Bir ton PC üretiminde yaklaşık bir ton CO_2 salınımı gerçekleşmektedir (Roy 1999). PC endüstrisi kaynaklı CO_2 salınımı, dünya çapında, bir yılda 1.35 milyar ton civarında olmaktadır. Bu miktar, insan kaynaklı CO_2 salınımının yaklaşık %7'sine denk gelmektedir (Malhotra 2002; Disu ve Kolay 2021).

Çevresel etkilerinin yanında, PC üretimi için ihtiyaç duyulan hammaddelerin kısıtlı olması ve hammaddelerin giderek azalması, çevresel etkisi düşük olan bağlayıcı arayışlarını ortaya koymaktadır. Çevre dostu bağlayıcı örneklerinden biri, doğal veya yapay puzolanların, beton üretiminde PC'ye ikame edilerek mineral katkı olarak kullanılmasıdır (Mehta 2002). Ancak puzolanların reaksiyonu, PC hidratasyonunu takiben gerçekleştiği dolayısıyla yavaş olduğu için puzolan katkılı betonların dayanım kazanma hızı, düşük olmaktadır. Bu durum, PC'ye ikame edilebilecek puzolan miktarını kısıtlamaktadır. Çevresel etkisi düşük olan bağlayıcı örneklerinden başka biri ise PC klinkeri kullanılmadan üretilen geopolimerlerdir. Kireç ve PC'den sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilen geopolimerler, çevre dostu yapısı, üstün mekanik özellikleri ve durabilitesi ile dikkat çekmektedir (Davidovits 2015; Singh ve ark. 2015).

1.5. Geopolimer

Geopolimerler (GP), doğal veya yapay puzolanların (DP ve YP), alkali aktivatörler (AA) ile aktivasyonundan elde edilirler. Puzolan olarak yüksek miktarda reaktif Si ve Al içeren FA, GYFC, MK ve volkanik kül (VK) gibi toz bağlayıcılar kullanılırken, AA olarak, NaOH (sodyum hidroksit, SH), KOH (potasyum hidroksit), Na_2SiO_3 (sodyum silikat, SS) ve K_2SiO_3 (potasyum silikat) gibi alkaliler kullanılmaktadır. GP beton karışımlarında PC esaslı beton karışımlarından farklı olarak PC yerine puzolanlar ve su yerine AA çözeltileri kullanılmaktadır. Ancak betonun üçüncü bileşeni olan agregada durum neredeyse aynıdır: GP betonlarda, PC betonlarda olduğu gibi beton karışımının ağırlıkça %75-80'ini oluşturan agrega, en büyük hacmi kaplamaktadır (Mehta 2002; Hardjito 2005).

Jeolojik kökenli toz bağlayıcılar kullanıldığından ve oluşan ürünler bir polimerizasyon reaksiyonu sonucu meydana geldiğinden dolayı 20. yüzyılın ortalarından itibaren üzerinde çalışmaların gerçekleştiği ve genellikle alkali-aktive çimento (AAÇ) olarak adlandırılan bu bağlayıcı sistemlerine, Davidovits, "geopolimer" ismini vermiştir (Hardjito ve Rangan 2005). Ayrıca Davidovits, GP sistemlerin hammadde, reaksiyon mekanizmaları ve ürün olarak AAÇ'den farklı olduğunu öne sürmektedir. Ancak birçok çalışmada bu iki ifade aynı anlamda kullanıldığından biz de bu çalışmada iki ifadeyi aynı anlamda kullanacağız. Ayrıca günümüzde "geopolimer" terimi, yaygın olarak inorganik polimer, AAÇ, alkali-bağlı seramik ve hidro-seramik gibi isimler ile ifade edilen amorf yapılı alkali alüminosilikatları tanımlamak için kullanılır. Terminolojideki bu çeşitliliğe karşın bu isimlerin hepsi aynı kimya kullanılarak sentezlenen malzemeleri tanımlamaktadır (Duxson ve ark. 2007; Singh ve ark. 2015).

Tedarik zincirinin sınırlı olması, bazı inşaat yapılarında nasıl uygulanacağıyla ilgili belirsizliklerin bulunması, işlenebilirliğinin iyi olmaması ve dikkatli kür gerektirmesinden dolayı GP bağlayıcıların bütün yapılarda PC yerine kullanılmasının henüz mümkün olmadığını göstermektedir (Provis 2018). Aslında büyük bir potansiyele sahip olan ve henüz geniş çaplı uygulama alanı bulamayan GP bağlayıcıların, asit direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı gibi üstün özelliklerinden günümüzde yararlanmak mümkündür. Bu üstün özellikleri sayesinde kanalizasyon boruları ve refrakter malzemeler gibi bazı özel uygulamalarda GP betonların kullanımı yaygınlaşmaktadır (Cheng ve Chiu 2003; Allouche ve Montes 2013). GP beton endüstrisinin yaygınlaşmasında, PC esaslı betonların üretilmesi, taşınması ve yerleştirilmesi gibi süreçlerde kullanılan teknoloji, bazı küçük değişiklerle GP betonlar için de kullanılabilecektir (Palomo ve ark. 2011; Provis 2018).

GP betonun üstün özelliklerinden bir tanesi de yüksek sıcaklık (yangın) direncidir. Zehirli dumanlar çıkarmaması, alev almaması ve çelik donatıların ısı transferine karşı donatıları koruyucu nitelikte olması gibi özelliklerinden dolayı PC betonun yangına dayanıklı olduğu söylenebilir. Ancak 800 °C'de betonun basınç dayanımında % 61-80 civarında kayıp yaşandığı bilinmektedir (Neville 1995). Bu durum, 300 °C'den itibaren başlayan ve 900 °C gibi sıcaklıklarda tamamen ayrışmayla neticelenen, C-S-H jelinin dehidratasyonu ile açıklanabilir (Menéndez ve Vega 2010). PC betonlardan farklı olarak, seramik benzeri mikroyapıya sahip olan GP betonlar, fiziksel ve kimyasal olarak bağlı

olan suyun alüminosilikat ağına zarar vermeden buharlaşmasına izin veren nano gözenekleri aracılığıyla yüksek sıcaklıkta iyi yangın direnci gösterirler (Singh ve ark. 2015).

PC esaslı bağlayıcılara kıyaslandığında GP esaslı bağlayıcıların üstün taraflarından biri de alkali-silika reaksiyonlarının (ASR), GP betonlarda pek meydana gelmemesidir. ASR'nin GP betonlarda daha az etkili olması sayesinde, reaktif agregaların yoğun olduğu, buna karşılık reaktif olmayan agregaların uzak olduğu bölgelerde, reaktif agregaların kullanımına imkan tanıyacağından ekonomik avantajlar sağlayacaktır (Singh ve ark. 2015).

PC esaslı bağlayıcılar, içeriğine bağlı olarak çok yüksek hidratasyon ısılarına sahip olabilmektedir. Özellikle baraj gibi kütle betonlarda, bu bağlayıcıların yüksek hidratasyon ısıları, önemli durabilite problemlerine yol açabilecek çatlaklara sebep olabilmektedir. Yapılan çalışmalar, GP bağlayıcıların PC bağlayıcılardan daha düşük hidratasyon ısılarına sahip olduğunu göstermektedir. (Guo ve ark. 2010; Kantarcı 2018).

1.6. Geopolimerlerin Tarihçesi

Davidovits, Mısır piramitlerinin blok taşlar halinde büyük rampalar veya araçlar kullanılarak insan gücüyle yukarıya taşınmasının mümkün olmadığını, yerinde kalıplara dökülen bir tür beton ile üretilerek sıkıştırıldığını ve çöl sıcaklığı etkisiyle birkaç saat içinde kuruyarak sertleştiğini öne sürmektedir. Davidovits, Mısırlı işçilerin öğütülmüş kireçtaşını çalışma sahasına kovalarla taşıyıp, bağlayıcı alümina ve silika sağlamak için Nil toprağı ile karıştırdığını ve çözeltiyi alkalin yapmak için katalizör olarak mevcut tuzları eklemiş olduğunu iddia etmektedir. Buradaki katılaşma ve dayanım kazanmanın bir tür polimerizasyon işlemi sonucunda gerçekleştiğini ifade etmektedir. Klasik betondan farklı bir tür betonla üretildiğini iddia ettiği bu blokların, Mısır'ın sert iklimine karşı 4000 yıldır dayanabilmesine rağmen piramitleri onarmak için kullanılan günümüz harçlarının 15-20 yıl içinde hasar görmesini geopolimerlerin durabilitesinin ne kadar iyi olduğuna örnek olarak göstermektedir (Davidovits 1987; Akman 2003). Davidovits tarafından öne sürülen ve bazı deneysel çalışmalarıyla desteklenen bu düşünce, başka araştırmacılarca da deneysel olarak ispat edilmeye çalışılmıştır (Barsoum ve ark. 2006). Bu blokların bir tür betonla üretildiği sabit olsa dahi bu betonların günümüzde tanımlanan GP betonlardan farklı olacağı düşünüldüğünden bu konuda verilen bilgilerle yetinilip

burada, daha somut veriler üzerinden geopolimerlerin tarihçesi açıklanacaktır (Provis ve Van Deventer 2009).

Alkalilerin çimento türü bağlayıcılarda bir bileşen olarak ilk kullanımı, Alman bilim insanı Hans Kühl'ün KOH ve öğütülmüş cüruftan oluşan karışımların priz alma sürelerini araştırdığı 1930 yılına dayanmaktadır. 1937 yılında ise L. Chassevent, NaOH ve KOH'u cürufların reaktivitesini ölçmede kullanmıştır. Fakat klinker içermeyen toz bağlayıcılar üzerine yapılan ilk kapsamlı laboratuvar çalışması, 1940 yılında A.O. Purdon tarafından cüruf ve alkali karışımları üzerine gerçekleştirilmiştir (Shi ve ark. 2003; Firdous ve ark. 2018). Glukhovsky, 1957 yılında ilk olarak Ca içermeyen veya Ca içeriği düşük olan killeri alkali metal çözeltileriyle bir araya getirerek bağlayıcı üretilmesinin mümkün olduğunu keşfetmiştir. Ürettiği bu bağlayıcılara "toprak çimentoları" ve bu bağlayıcılarla ürettiği betonlara ise "toprak silikatları" adını vermiştir. (Glukhovsky 1959; Shi ve ark. 2003). Glukhovsky tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan sonra AAÇ üzerine birçok araştırma yapılmış ve ilerlemeler kaydedilmiştir. 1981'e gelindiğinde Fransız bilim insanı Davidovits, alkalileri pişirilmiş kaolin, kireçtaşı ve dolomit karışımıyla bir araya getirerek bir tür AAÇ üretmiştir. Polimerik yapıya sahip olmalarından ötürü bu bağlayıcıya geopolimer (GP) adını vermiştir. Ayrıca Davidovits, 1985'te "Erken Yüksek Dayanımlı Mineral Polimer" adıyla patentini aldığı bu bağlayıcı için sık sık *Pyrament*, *Geopolycem* ve *Geopolymite* gibi çeşitli ticari marka isimleri kullanmıştır (Davidovits 1984, 1994; Shi ve ark. 2003).

Li ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, GP bağlayıcıların ortaya çıkması ve gelişimi ile ilgili bazı önemli gelişmeler, Çizelge 1.1.'de görüldüğü gibi özetlenmiştir (Li ve ark. 2010).

Çizelge 1.1. GP bağlayıcıların tarihsel gelişimi

İsim	Yıl	Önem
Feret	1939	Çimento için kullanılan cüruflar.
Purdon	1940	Alkali-cüruf bileşimi.
Glukhovsky	1959	Alkalin çimentonun teorik esasları ve gelişimi.
Glukhovsky	1965	"Alkalin çimento" teriminin ilk kez kullanılması.
Davidovits	1979	"Geopolimer" teriminin ilk kez kullanılması.
Malinowski	1979	Tarihi su kemerlerinin karakterizasyonu.
Forss	1983	F-çimentosu (alkali-cüruf-süperakışkanlaştırıcı).
Langton ve Roy	1984	Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin karakterizasyonu.
Davidovits ve Sawyer	1985	"Pyrament" çimento patentinin alınması.
Krivenko	1986	Doktora tezi, R_2O-RO-SiO_2-H_2O.
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melilit cüruflarının aktive edilmesi.
Malek ve ark.	1986	Alkali-aktive cüruf-düşük seviyeli radyoaktif atık formları.
Davidovits	1987	Antik ve modern betonların karşılaştırılması.
Deja ve Malolepsy	1989	Klorür iyonlarına karşı dayanıklılığın tespit edilmesi.
Kaushal ve ark.	1989	Alkalin karışımlarından adyabatik kür edilmiş nükleer atık oluşumları.
Roy ve Langton	1989	Tarihi betonlar ile PC betonların benzerlikleri.
Majundar ve ark.	1989	$C_{12}A_7$-cüruf aktivasyonu.
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali-aktive cüruf.
Wu ve ark.	1990	Cüruf ve cüruflu çimentoların aktive edilmesi.
Roy ve ark.	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive çimentolar.
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive çimentolar.
Palomo ve Glasser	1992	Metakaolin esaslı kimyasal bağlı çimentolar.
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosunun hidratasyonu.
Glukhovsky	1994	Antik ve modern betonlar ile gelecekteki betonlar.
Krivenko	1994	Alkalin çimentolar.
Wang ve Scivener	1995	Cüruf ve alkali-aktive cürufların mikroyapısı.
Shi	1996	Alkali-aktive cürufların dayanım, gözenek yapısı ve geçirgenliği.
Fernández-Jiménez ve Puertas	1997	Alkali-aktive cürufların kinetiği üzerine çalışmalar.
Katz	1998	Alkali-aktive uçucu küllerin mikroyapıları.
Davidovits	1999	Geopolimerik sistemlerin kimyası.
Roy	1999	Alkali-aktive çimentoların avantajları ve uygulamasının önündeki engeller.
Palomo	1999	Alkali-aktive uçucu küller – geleceğin çimentosu.
Gong ve Yang	2000	Kırmızı çamur ve cüruf esaslı alkali-aktive çimentolar.
Puertas ve ark.	2000	Uçucu kül ve cüruf kombinasyonlarıyla alkali aktive edilmiş bağlayıcılar.
Bakharev	2001/2	Alkali-aktive cüruflarla üretilen betonlar.
Palomo ve Palacios	2003	Tehlikeli atıkların kontrolü (immobilizasyon).
Grutzeck	2004	Alkali aktive sistemlerde zeolit oluşumu.
Sun	2006	Sialit teknolojisi.
Duxson	2007	Geopolimer teknolojisi: Durum değerlendirmesi.
Hajimohammadi, Provis ve Deventer	2008	GP çimentoların torbalanmış halde üretilmesi (tek parça).
Provis and Deventer	2009	Geopolimer: Yapı, proses, özellik ve uygulamaları.

İsimleri verilen çalışmaların referansları burada verilmemiştir. İlgili çalışmadan alınabilir (Li ve ark. 2010). Ayrıca not edilmesi gereken noktalardan biri de şudur ki Li ve ark., burada verilen çalışmalardan bazılarında çalışmayı gerçekleştiren ekipten ilk ismi vermekle yetinmişlerdir.

1.7. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Geopolimerler, yüksek oranda Al_2O_3 ve SiO_2 içeren uçucu kül, metakaolin veya yüksek fırın cürufu gibi toz malzemelerin alkali hidroksit ve alkali silikat gibi kimyasal çözeltilerle aktive edilmesiyle elde edilmektedirler. Hammadde açısından GP bağlayıcıların birbirinden çok farklı içeriklere sahip olabileceği ifade edilebilir. Fakat farklı hammaddeler kullanılarak üretilen GP bağlayıcıların reaksiyon ürünlerinin, yapısal olarak birbirine benzediği belirtilmektedir (Duxson ve ark. 2007). Betonda dolgu malzemesi olarak kullanılan agrega açısından bakıldığında PC ve GP betonlar için durum neredeyse aynıdır. Bu yüzden GP harç ve beton üretiminde kullanılan ince ve iri agrega burada anlatılmayacaktır. Bu bölümde GP bağlayıcı hamuru oluşturan alkali aktivatör, toz bağlayıcı, su-azaltıcı katkı maddesi ve alkalin çözelti hazırlanmasında kullanılan su anlatılacaktır.

1.7.1. Alkali Aktivatör

Toz bağlayıcı aktivasyonunda, sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) gibi alkali aktivatörler (AA) kullanılabilmektedir (Palomo, Grutzeck, ve ark. 1999; Rattanasak ve Chindaprasirt 2009; Lizcano ve ark. 2012; Yang ve ark. 2012). Ancak daha iyi bir GP yapı oluşturması ve ekonomik olması sebebiyle NaOH ve Na_2SiO_3 karışımından oluşan çözelti, en yaygın kullanılan alkali aktivatör türüdür (Hardjito ve Rangan 2005; Leong ve ark. 2016).

Potasyum hidroksitin alkalinitesi, sodyum hidroksitin alkalinitesinden yüksek olduğundan dolayı KOH çözeltisi kullanıldığında, toz bağlayıcıda daha fazla çözünme meydana geleceği düşünülebilir. Ancak gerçekte, NaOH, silikat ve alüminat monomerlerinin çözünmesinde daha etkilidirler (Van Jaarsveld ve Van Deventer 1999; Duxson ve ark. 2007). NaOH ve KOH çözeltilerinin birlikte AA olarak kullanılması da mümkündür. Yapılan bir çalışmada NaOH çözeltisine KOH çözeltisi de eklendiğinde GP bağlayıcının ortalama boşluk çapının arttığı ve asit direncinin düştüğü tespit edilmiştir (Bakharev 2005). Bu tez çalışmasında kullanıldığından ve yapılan çalışmaların çoğunda yalnız SH ve/veya SH ile SS çözeltilerinden oluşan multi aktivatör kullanıldığından burada sadece SH ve SS anlatılacaktır.

1.7.1.1. Sodyum Hidroksit

Kostik soda da denilen sodyum hidroksit (SH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sülfürik asit ile beraber kimya endüstrisinin temel taşlarından biridir. Üretimi için bu üç temel kimyasaldan bir veya daha fazlasını gerektirmeyen tek bir kimyasal neredeyse yoktur ve ayrıca SH'ye bağlı olmayan endüstriyel ürün neredeyse hiç yoktur. Tuzlu suyun elektrolizi yoluyla üretilen SH, çözelti halindeki sıvı olarak temin edilebileceği gibi katı olarak da bulunabilmektedir. Türkiye'de katı SH, genellikle pul şeklindeki payet kostik ve küresel şekle yakın boncuk kostik olarak satışa sunulmaktadır. SH, inşaat sektöründe çimentonun hidratasyonunu hızlandırmak üzere kullanılmasına karşın nihai dayanımda düşüşlere sebep olabilmektedir. SH, GP üretiminde çözelti halinde kullanılmaktadır. Katı haldeki SH tanelerinin suda çözünmesi ekzotermik bir süreç olduğundan çözelti haline getirileceği zaman dikkat gerektirmektedir (Shi ve ark. 2003).

1.7.1.2. Sodyum Silikat

Sodyum silikat (SS), $Na_2O{\cdot}nSiO_2$ formülüne sahip bileşiklerin genel adıdır. Buradaki *n* oranı, teorik olarak herhangi bir sayı olabilmesine karşın ticari amaçlarla üretilen sıvı SS için 1.60 ila 3.85 arasında bir değere sahiptir. Bu aralığın dışındaki SS sıvıları, sınırlı stabiliteye sahiptirler ve pratik değildirler. SS, öncelikle kum ve sodyum karbonatın 1350–1450 °C'de eritilmesiyle elde edilen SS camının daha sonra 140-160 °C sıcaklık ve uygun buhar basıncı altında otoklavda çözülmesiyle elde edilir. SS; kağıt, sabun, refrakter malzeme üretimi ve tekstil endüstrilerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bir yapı malzemesi olarak sodyum silikat, erken sertleştirici ve kendi kendine iyileşme mekanizması sağlayıcı olarak kullanılabilmektedir (Mostavi ve ark. 2015). Bu özelliklerinin bir sonucu olarak, sodyum silikat, püskürtme betonlarda (shotcrete) kullanılmaktadır (Shi ve ark. 2003).

1.7.2. Toz Bağlayıcı

GP bağlayıcıların sentezlenmesinde DP ve YP toz bağlayıcı (alüminosilikat kaynağı) olarak kullanılabilmektedir. YP sınıfı toz bağlayıcılar, GYFC, FA ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürün veya atık olabileceği gibi şeker pancarı küspesi külü ve pirinç kabuğu külü gibi tarımsal kökenli atıklar da olabilmektedir. DP sınıfı toz bağlayıcılar ise VK, volkanik tüf, diatomlu toprak ve pomza ile ısıl işlem görmüş doğal

killer ve şeyller gibi doğal kaynaklardır (Erdoğan ve Erdoğan 2007b; Garcia-Lodeiro ve ark. 2015; Mehta ve Siddique 2016; Firdous ve ark. 2018).

GP üretiminde kullanılan toz bağlayıcıların reaktivitesi, bu malzemelerin kimyasal yapı, mineralojik bileşim, morfoloji, incelik ve camsı faz içeriği gibi özelliklerine bağlıdır. Geopolimerlerde toz bağlayıcıdan beklenilen temel özellikler, amorf yapıda olması, yeterli derecede reaktif camsı içeriğe sahip olması, su ihtiyacının az olması ve alüminyumu kolayca serbest bırakabilmesidir (Singh ve ark. 2015; Djobo ve ark. 2017).

AAÇ esaslı betonlarda GYFC'nin toz bağlayıcı olarak kullanılması, uzun yıllardan beri devam etmektedir. Kalsiyum içeriği düşük olan GP bağlayıcı üretiminde ise 90'lı yılların ortalarına kadar kaolin ve MK'nin toz bağlayıcı olarak kullanımı yaygın iken bu tarihten sonra FA kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Xu ve Van Deventer 2002). Daha önce yapılan çalışmalar, FA, GYFC ve MK gibi kalsine edilmiş toz bağlayıcılar ile üretilen geopolimerlerin, pomza, kaolin ve tüf gibi ısıl işleme tabi tutulmamış toz bağlayıcılarla üretilenlere kıyasla daha yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca ısıl işlem görmüş toz bağlayıcılarla üretilen geopolimerlerin dayanım gelişiminin çok daha hızlı olduğunu göstermiştir. Kalsine edilmeyen toz bağlayıcılarla üretilen GP bağlayıcıların kabul edilebilir dayanım seviyelerine çıkması, daha uzun süreler gerektirmektedir (Palomo, Blanco-Varela, ve ark. 1999; Barbosa ve ark. 2000; Xu ve Van Deventer 2002).

1.7.2.1. Yapay Puzolanlar

GP üretiminde en sık kullanılan YP sınıfı toz bağlayıcılar, FA ve GYFC'dir. Reaktivitesi yüksek olan bu iki alüminosilikat kaynağı arasındaki temel farklardan biri Ca içeriğidir. GYFC, genellikle yüksek Ca içeriğine sahip iken FA'nın AC içeriği geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu yüzden FA'lar içerik açısından iki ayrı sınıfta değerlendirilmektedir. En genel haliyle Ca içeriği düşük olan FA'lar, F sınıfı FA (F-FA) veya silissi FA ve Ca içeriği yüksek olanları ise C sınıfı FA (C-FA) veya kalkersi FA olarak sınıflandırılmaktadır (TS-EN-197-1 2002; ASTM-C618 2019).

F-FA esaslı GP bağlayıcıların, genellikle daha güçlü bir yapı ve daha iyi bir durabiliteye sahip olduğu ifade edilmektedir (Duxson ve ark. 2007; Temuujin, Van Riessen, ve ark. 2009). Diğer taraftan Ca içeriği yüksek olan C-FA ve GYFC, GP

bağlayıcıların oda sıcaklığında kabul edilebilir sürelerde priz alıp dayanım gelişimini tamamlamalarına olanak sağlamaktadır. Bazı çalışmaların mikroyapı analizleri, FA taneciklerinin bazı durumlarda tamamen reaksiyona girmediklerini göstermektedir. FA taneciklerinin bütünüyle reaksiyona girmemesi, bağlayıcı fazın gelişimini bazen yetersiz kılsa da reaksiyona girmeyen bu tanecikler, mikro-agrega görevi görerek mikro-çatlakların ilerlemesini engelleme gibi bazı mühendislik özelliklerin iyileşmesini de sağlayabilmektedir (Xu ve Van Deventer 2002; Duxson ve ark. 2007; Robayo-Salazar ve ark. 2016). Reaksiyona girmemiş bu FA taneciklerinin rijit bir tanecik olması sebebiyle bağlayıcı hamur fazında çatlaklara sebep olabileceği ifade edilmesine karşın birinci görüş daha ağır basmaktadır (Cao ve ark. 2018).

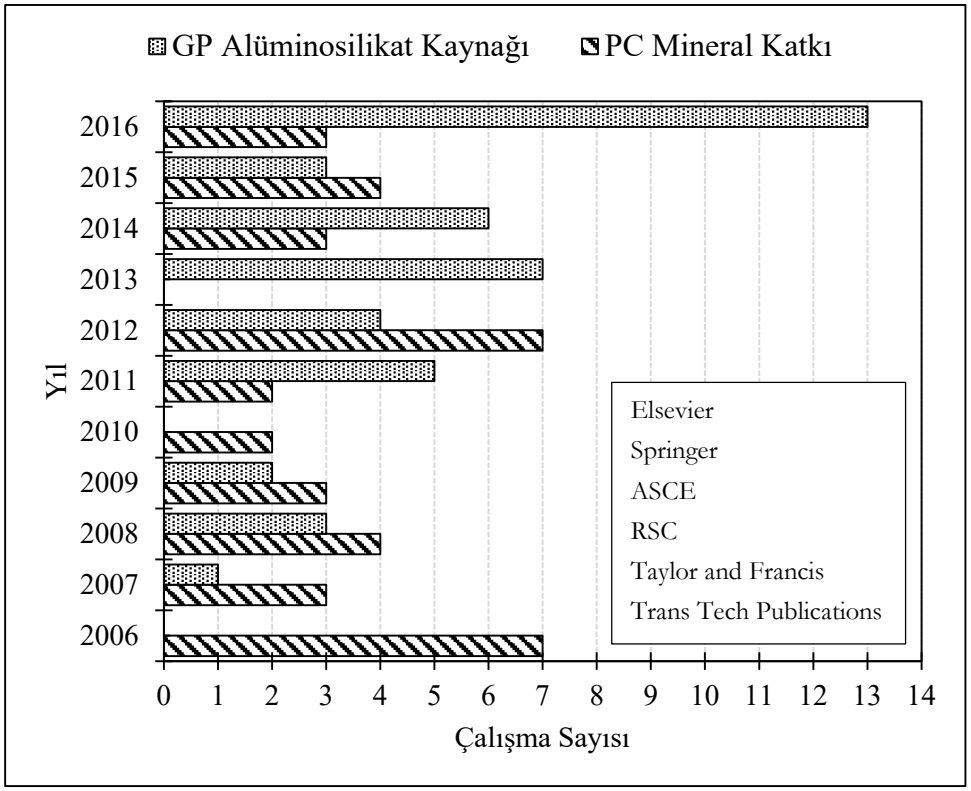
PC esaslı çimentolara alternatif olacak bağlayıcı arayışlarının artmasıyla birlikte GP bağlayıcılar üzerine çalışmalar, önemli ölçüde artmıştır. Ancak bu çalışmaların çoğu MK, FA ve GYFC gibi toz bağlayıcılar ile gerçekleştirilmiş, doğal kaynaklardan elde edilip ısıl işleme tabi tutulmamış DP'ler ile daha az çalışma gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel yan ürün olan GYFC ve FA'nın miktarı, endüstrideki ana malzemenin üretim miktarına bağlı olduğundan yapı malzemesi olarak kullanımları sınırlı olacaktır. Ayrıca kömürün yakılması işlemlerinin azaltılmasını hedefleyen dekarbonizasyon, kömürün yakılması ile elde edilen FA'ın üretilmesini sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı ek bir işlem gerektirmeyen ve ekolojik ayak izi düşük olan DP'lerin GP üretiminde hammadde olarak kullanımı önem kazanmaktadır (Firdous ve ark. 2018; Provis 2018).

1.7.2.2. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar (DP), kaynağına göre kimyasal kompozisyonu oldukça farklı olabilen fakat genellikle SiO_2 içeriği fazla olan jeolojik kaynaklardır (Bondar ve ark. 2011a). VK, GP bağlayıcı üretiminde en çok kullanılan DP sınıfı alüminosilikat kaynaklarındandır (Tchakoute ve ark. 2013; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016c; Ndjock ve ark. 2017). VK dışında, volkanik tüf (Kantarcı ve ark. 2019), perlit (Vaou ve Panias 2010), andezit (Bondar ve ark. 2011c), kaolin (Heah ve ark. 2011) ve bazalt (Moon ve ark. 2014) gibi DP sınıfı alüminosilikat kaynakları kullanılabilmektedir. Ayrıca DP sınıfı bir toz bağlayıcı olup ancak bir tür kalsine kaolin olan MK, ısıl işlemin etkisiyle kristal yapısının kısmen kaybederek reaktif bir malzemeye dönüşmektedir. Bu yüzden MK, GP için reaktivitesi yüksek iyi bir toz bağlayıcı hükmündedir ve birçok çalışmada alüminosilikat

kaynağı olarak kullanılmıştır (Duxson ve ark. 2005; Duxson ve ark. 2007). Ancak MK taneciklerinin plaka şekilli yapıya sahip olmalarından dolayı ıslatılması gereken yüzey alanları fazladır. GP gibi yüksek viskoziteye sahip bağlayıcı sistemlerde alüminosilikat kaynağı olarak kullanıldığında, su ihtiyacının fazla olmasından dolayı rötre ve çatlaklara sebep olabilmektedir (Li ve ark. 2010).

DP sınıfı toz bağlayıcılar, aslında uzun yıllardır Portland-puzolan tipi çimento üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir. Mineral katkı maddesi olarak kullanıldıklarında DP'ler, kendisinden daha pahalı olan klinkerin miktarını azaltarak ekonomiklik sağlama, klinker üretimindeki CO_2 miktarını azaltma ve hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$'yi bağlayarak durabiliteyi iyileştirme gibi avantajlar sağlarlar. Ancak DP'lerin puzolanik aktivitelerinin düşük olması, betonun dayanım kazanma hızını düşürdüğünden dolayı TS EN 197-1 (2012), DP'lerin çimentoya ikame miktarını %35 ile sınırlamaktadır (TS-EN-197-1 2002; Erdoğan 2016; Djobo ve ark. 2017). Son dönemlerde, DP'lerin beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak sınırlı miktarda değil de Portland çimentosunun yerine kullanılması, daha çok ilgi çekmektedir. Djobo ve ark., DP ile ilgili 2006 ve 2016 yılları arasında yayınlanan çalışmaları incelemiş ve Şekil 1.9.'da verilen şu değişimi görmüştür: 2012'ye kadar DP'lerin mineral kakı maddesi olarak kullanımı daha çok araştırılmasına karşın, bu tarihten sonra DP'lerin GP üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılması daha fazla araştırılmaya başlanmıştır (Djobo ve ark. 2017).



Şekil 1.9. Pomzanın toz bağlayıcı olarak kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar

Bir DP olan pomzanın GP üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, son yılların önemli konularından biri olmuştur.

1.7.2.3. Pomza

Pomza, magmadan çıkan lavların ani soğuması sonucu magmada bulunan gazların bünyeyi terk etmesiyle oluşan oldukça gözenekli bir yapıya sahip volkanik bir taştır. Pomza taşındaki bu gözenekler, mikroskobik boyutlardan gözle rahat görülebilir boyutlara kadar değişebilmektedir. Bu gözenekli yapısının bir sonucu olarak pomza taşı, oldukça düşük bir yoğunluğa sahip olabilmektedir. Pomza taşı, yoğunluğunun düşük olmasından dolayı hafif beton olarak bölme duvar, asmolen ve panel üretiminde kullanılmaktadır. Bu malzemeyle üretilen yapı elemanları, yapının ısı ve ses yalıtımını iyileştirmektedirler. Yüksek silika içeriği ve amorf yapısı olan pomza taşı, ince taneli halde öğütüldüğünde çok iyi puzolanik karakter gösterebilmektedir. Bu özelliği sayesinde pomza, inşaat sektöründe Portland-puzolan tipi çimentoların üretilmesinde kullanılabilmektedir (Özodabaş ve Yılmaz 2013; Erdoğan ve Erdoğan 2020).

Dünya'daki bazı volkanik alanlarda yoğunlaşan pomza yataklarının yaklaşık olarak 18 milyar ton rezerve sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu pomza yataklarının

çoğunluğu, Amerika Birleşik Devletleri, Türkiye ve İtalya'da bulunmaktadır. Yaklaşık 2.8 milyar ton pomza rezervine sahip olan Türkiye, dünya pomza rezervinin yaklaşık % 15.8'ine sahiptir. Türkiye'de bulunan pomza rezervinin %55.7'si Doğu Anadolu bölgesinde, kalan kısmı ise İç Anadolu bölgesinde bulunmaktadır (Özodabaş ve Yılmaz 2013).

Pomzanın GP bağlayıcı üretiminde kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çizelge 1.2.'de değişik çalışmalarda, GP üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan pomzaların kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Çizelge 1.2.'den de görülebileceği gibi pomza ile ilgili bu çalışmaların 2015'ten sonra yoğunluk kazandığı görülecektir. Yapılan bu çalışmalar, yüksek Al ve Si içeriği ile sahip olduğu amorf yapı sayesinde GP sentezi için pomzanın iyi bir alüminosilikat kaynağı olabileceğini göstermiştir. Ancak yine de pomza ile ilgili çalışmalar, henüz yeterli düzeyde değildir. Özellikle PGP bağlayıcıların durabilitesi ile ilgili yeni çalışmaların yapılması gerektiği görülmektedir.

Çizelge 1.2. Farklı pomzalarla üretilen GP'lerle yapılan bazı çalışmalar

Pomza	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	LOI
İran (Allahverdi ve ark. 2008)	61.6	18.0	4.9	6.7	2.6	1.7	2.0		0.1	2.2
Türkiye (Yadollahi ve ark. 2015)	67.1	14.1	1.9	0.9	0.3	0.1				3.9
İran (Nadoushan ve Ramezanianpour 2016)	64.9	12.1	5.2	7.4	2.0	2.5	1.9	0.8	0.2	2.5
ABD (Almalkawi ve ark. 2017)	76.2	13.5	1.1	0.8	0.1		1.8			5.0
Tayland (Wongsa ve ark. 2018)	60.4	16.7	4.0	2.4	0.9	4.0	3.4	0.5	-	-
Türkiye (Top ve Vapur 2018)*	41.5	15.5	19.3	11.7	3.1			3.9	0.2	0.9
Türkiye (Safari ve ark. 2020)	75.2	14.0	2.0	0.5	0.2	2.1	5.1	0.1	0.3	4.4
İtalya (Occhipinti ve ark. 2020)	70.9	12.8	1.0	0.8	0.6	4.5	4.7	0.2		
İran (Mobasheri ve ark. 2021)	58.1	14.0	3.6	11.5	1.5	5.2	1.9		0.4	3.1
Türkiye (Sarıdemir ve Bulut 2021)	51.2	16.9	8.4	9.7	7.0	3.2	0.2	1.5	0.01	1.4
Türkiye (Balun ve Karataş 2021)	63.6	14.8	6.8	2.7	1.0	4.4			0.02	4.6

*Bazaltik pomza, toz bağlayıcı olarak değil agrega olarak kullanılmıştır. Filler olarak kullanılan agrega kısmının reaksiyonlara katılacağı düşünüldüğünden buraya alınmıştır.

1.7.2.4. Toz Bağlayıcının Reaktivitesi

GP sentezi açısından bir toz bağlayıcının reaktivitesi, alkalin ortamda kolayca çözünebilme kapasitesiyle ifade edilmektedir. Bu reaktivite, toz bağlayıcının kimyasal ve mineralojik kompozisyonu ve inceliğine bağlı olmaktadır (Lemougna ve ark. 2014;

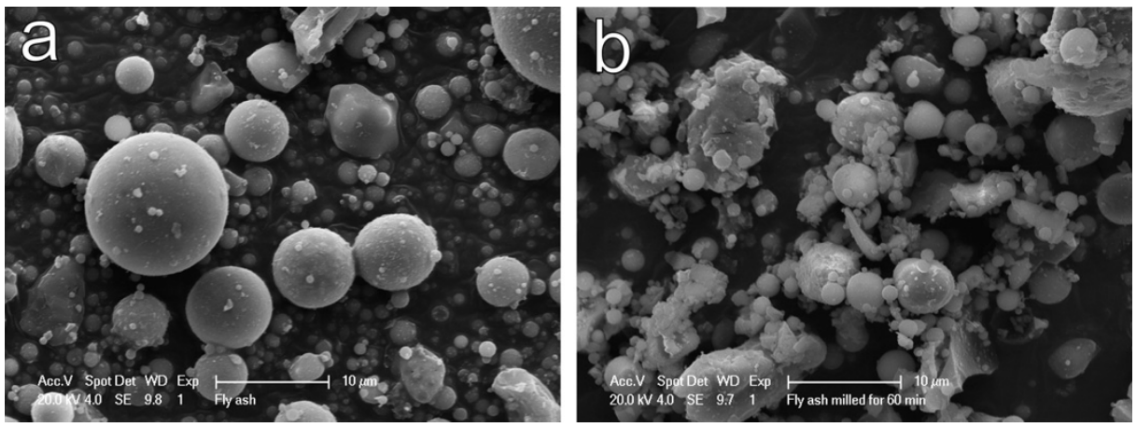
Djobo ve ark. 2017; Firdous ve ark. 2018). Toz bağlayıcıların reaktivitelerini belirlemede kullanılan kimyasal yöntemler, DP'lerin reaktivitelerinin diğer alüminosilikat kaynaklarına göre düşük olduğunu göstermektedir (Lemougna ve ark. 2014; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016c). Bundan dolayı bazı araştırmacılar tarafından DP'lerin reaktivitesini arttıracak bazı yöntemler önerilmiştir. Çizelge 1.3.'te, önerilen bu yöntemler özetlenmiştir.

Çizelge 1.3. GP üretiminde kullanılacak DP'lerin reaktivitelerini arttırma yöntemleri (Djobo ve ark. (2017) çalışmasından uyarlanmıştır.)

Çalışma	İşlem adı	İşlemin tarifi	Sonuçlar
(Bondar ve ark. 2011c)	Kalsinasyon	800 °C'de 12 saat kalsinasyon	- Puzolanik aktivitenin artması - Alkali çözünebilirliğin artması - Kil minerallerinde dehidroksilasyon - Kızdırma kayının azalması - Amorf fazın artması
(Kouamo ve ark. 2013)	Alkali füzyon	NaOH ile birlikte kalsinasyon	- Amorf fazın artması - Minerallerin pik şiddetinin azalması - Mineralojik içeriğin değişmesi - Kil minerallerinin ayrışması
(Djobo, Elimbi, ve ark. 2016a)	Mekanik aktivasyon	Öğütme süresini arttırma	- Kristalliliğin azalması - Minerallerin pik şiddetinin azalması - Mineralojik içeriğin değişmesi - Tane boyutunun küçülmesi - Çekirdeklenme noktasının artması
(Bondar ve ark. 2011a)	Mineral katkı	Kaolin, kalsine dasit ve sönmüş kireç katkısı	- Yoğun mikroyapı oluşumu - Hammaddede SiO_2, Al_2O_3 ve CaO gibi oksitlerin artması - Reaksiyona giren parçacık miktarının artması

Çizelge 1.3.'te verilen yöntemler kullanılarak değiştirilen reaktivite, ancak belli koşullar altında etkili olabilir. Kalsinasyon, toz bağlayıcının mineralojik kompozisyonunda kil minerallerinin bulunduğu durumda etkilidir. Ayrıca uygun kalsinasyon sıcaklığı, toz bağlayıcıda bulunan kil minerallerinin tipine bağlı değişmekte ve kalsinasyon, 700-900 °C gibi yoğun enerji sarfiyatı isteyen yüksek sıcaklıkları gerektirmektedir. Alkali füzyon yöntemi, kalsinasyonu 550 °C gibi nispeten daha az enerji sarfiyatı gerektiren bir sıcaklık değerini önermektedir. Fakat alkali füzyon yönteminde reaksiyona girmeyen NaOH'yi, metakaolin gibi başka bir alüminosilikat kaynağını ekleyerek tüketmek ihtiyacı doğmaktadır. Mekanik aktivasyon yöntemi, toz bağlayıcıdaki amorf faz miktarını ve daha yüksek enerji durumuna gelen reaktif merkez sayısını arttırmaktadır. Ayrıca mekanik aktivasyon, sadece kil minerallerinin değil, tüm

minerallerin yapısını değiştirmektedir. Ancak mekanik aktivasyon, DP'lerin zaten fazla olan su ihtiyaçlarını daha da arttırmaktadır. Hamur numune üretiminde nispeten problem oluşturmayan bu durum, harç ve beton gibi ıslatılması gereken yüzey alanının arttığı agregalı sistemlerde sorun oluşturmaktadır (Bondar ve ark. 2011c; Kouamo ve ark. 2013; Balczár ve ark. 2016; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016a; Djobo ve ark. 2017). Şekil 1.10.'da ham haldeki FA ile mekanik aktivasyona uğramış FA taneciklerinin SEM görüntüleri görülmektedir (Temuujin, Williams, ve ark. 2009). Şekil 1.10.'dan da görülebileceği gibi doğal haldeki FA tanecikleri küresel halde olmalarına karşın, öğütme sonrası, bir kısım FA taneciklerinin bu yapıyı kaybettiği görülmektedir. Benzer bir durumu DP için de söylemek mümkündür: Öğütme süresinin artmasıyla toz bağlayıcıların yüzey alanlarının artması ve taneciklerinin düzensiz şekil almaları sonucu, su ihtiyaçları artmaktadır.



Şekil 1.10. Uçucu küllerin mekanik aktivasyonu a) doğal FA tanecikleri b) öğütülmüş FA tanecikleri

Ön-işlem uygulayarak DP'lerin reaktivitelerini arttırma dışında mineral katkı ikamesi yoluyla da DP'lerin özellikleri iyileştirilebilmektedir. Puzolanik aktivitesi düşük olan DP'lere kendisinden daha reaktif olan bir alüminosilikat kaynağının ikame edilmesine dayanan mineral katkı yöntemi, DP esaslı GP'lerin işlenebilirliğini ve basınç dayanımını arttırmakta ve daha fazla çapraz bağlı alüminosilikat ağının oluşumuna katkı sağlamaktadır. Enerji sarfiyatı gerektirmemesi ve karışımın su ihtiyacını arttırmayıp tersine azalttığından dolayı etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Bondar ve ark. 2011a; Kouamo ve ark. 2012; Risdanareni ve ark. 2016; Robayo-Salazar ve ark. 2016; Vafaei ve Allahverdi 2016).

1.7.3. Su

Geopolimer üretiminde kullanılan su, NaOH ve KOH gibi taneli yapıdaki katı taneciklerden çözelti oluşturulması veya ek-su olarak GP karışımının işlenebilirliğini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle çözelti oluşturmak için kullanıldığında, suda bulunabilecek yabancı maddelerin olası yan etkilerine imkan vermemek için saf su kullanılması önerilmektedir (Hardjito ve ark. 2004; Zhao ve Sanjayan 2011; Hamidi ve ark. 2016; Albitar ve ark. 2017). Diğer taraftan, çözelti oluşturmak için laboratuvar ortamından sağlanan musluk suyu da kullanılabilmektedir (Vora ve Dave 2013; Luhar ve Khandelwal 2015).

1.7.4. Su-Azaltıcı Katkı Maddeleri

GP esaslı hamur, harç ve betonların sahip oldukları yüksek kohezyondan dolayı karılabilme ve yerleştirilebilmeleri zor olmaktadır. PC esaslı taze harç ve betonların işlenebilirliğini ölçmede kullanılan test yöntemleri kullanıldığında, GP esaslı taze harç ve betonların işlenebilirliğinin genellikle daha düşük olduğu görülmektedir. Geopolimerlerin daha iyi bir kıvama sahip olması ve böylelikle yeterli işlenebilirliğe ulaşabilmeleri için normal miktarda su-azaltıcı katkı maddeleri (akışkanlaştırıcı), yüksek miktarda su-azaltıcı katkı maddeleri (süper-akışkanlaştırıcı) ve yeni nesil su-azaltıcı katkı maddeleri (hiper-akışkanlaştırıcı) kullanılabilmektedir.

Aslında PC karışımlar için üretilen bu katkı maddelerinin GP karışımların işlenebilirliği üzerinde nasıl bir etki yapacağı tam olarak belli değildir. Ayrıca kullanılan AA türü, katkı maddesinin miktarı ve içeriğindeki aktif madde gibi parametreler, katkı maddesinin etkisi üzerinde belirleyici bir role sahiptirler. Hardjito ve ark. tarafından yapılan bir çalışma, toz bağlayıcının %2'si miktarında kullanıldığında, naftalin esaslı su-azaltıcı katkı maddelerinin, GP karışımının işlenebilirliğinin arttırdığını ve dayanımda çok az bir düşüşe sebep olduğunu göstermiştir. Ancak bu değerin üstünde su-azaltıcı katkı maddesi kullanımı, basınç dayanımı değerinde önemli düşüşlere sebep olmuştur (Hardjito ve ark. 2004). Yapılan başka bir çalışmada ise toz bağlayıcının %1'i olarak kullanıldığında naftalin bazlı su-azaltıcı katkı maddesi, yalnız SH ile aktive edilen taze karışımın işlenebilirliğini arttırırken, modifiye polikarboksilat bazlı su-azaltıcı katkı maddesi ise SH+SS ile aktive edilen taze karışımın işlenebilirliği üzerinde etkili olmuştur (Nematollahi ve Sanjayan 2014).

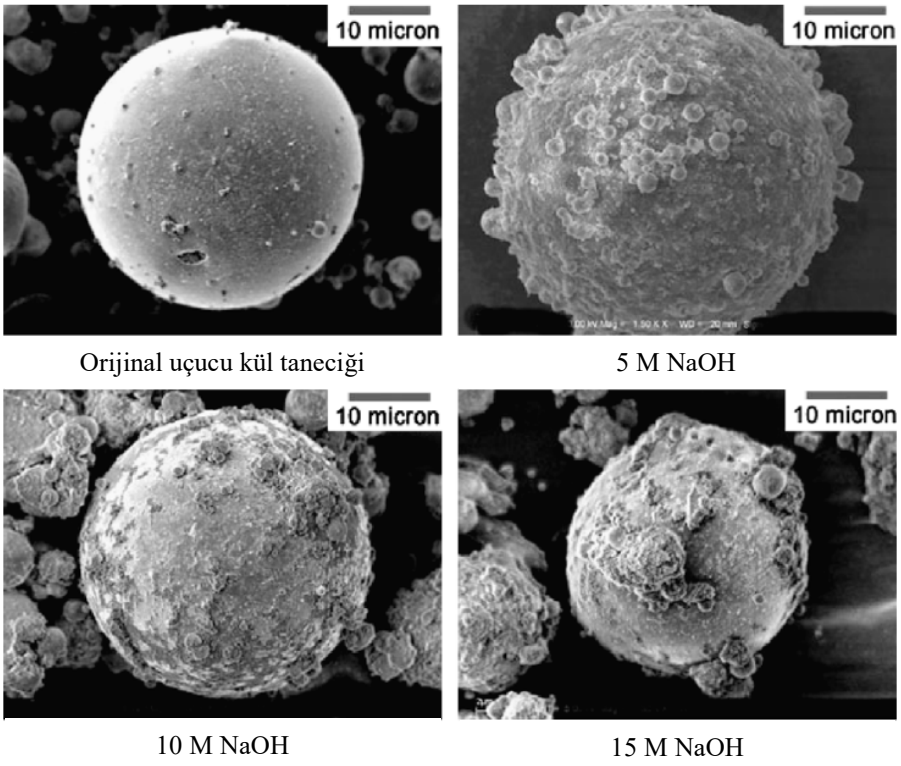
Chindaprasirt ve ark., uçucu kül esaslı GP bağlayıcı sistemlerde, su-azaltıcı katkı maddelerinin dayanımda düşüşlere sebep olduğunu, aynı işlenebilirliği ek-su kullanarak da elde edilebileceğini ifade etmektedirler. Temelde PC esaslı harç ve betonlar için üretilen bu katkı maddeleriyle aynı derecede işlenebilirlik sağlayan ek-suyun dayanıma olan etkisinin, katkı maddelerinin etkisinden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir (Chindaprasirt ve ark. 2007).

1.8. Geopolimer Bağlayıcıların Karışım Oranları ve Karıştırma İşlemi

AAÇ'nin yoğun bir şekilde araştırılmaya başlandığı dönemlerden beri, bu bağlayıcılarla üretilecek harç veya betonların karışım oranlarını belirlemede kullanılacak bazı yöntemler önerilmiştir. Ancak bu yöntemler, daha fazla deneysel verilere ihtiyaç duymaktadır (Shi ve ark. 2003). Bu yüzden burada bu yöntemler ve içerikleri anlatılmayacak, SH konsantrasyonu, SH/SS oranı ve AA-toz bağlayıcı (a/b) oranı gibi önemli parametrelerin GP bağlayıcı özelliklerine etkileri, ayrı başlıklar altında incelenecektir.

1.8.1. Sodyum Hidroksit Konsantrasyonu

AA çözeltisi, Si ve Al oksitlerinin toz bağlayıcıdan çözülmesinde çok önemli bir role sahiptir. Özellikle AA konsantrasyonu, toz bağlayıcıdan gerekli Si ve Al oksitlerini çözmede ve sonuç olarak GP bağlayıcıların yeterli dayanıma ulaşabilmelerinde çok önemli bir role sahiptir. Bilindiği üzere PC, suyla birleştirilir birleştirilmez, her bir anabileşeni suyla ayrı ayrı reaksiyona girerek hidratasyon ürünleri oluşturmaktadır. GP üretiminde kullanılan toz bağlayıcılar da NaOH çözeltisiyle bir araya gelince, toz bağlayıcı taneciklerinin yüzeyinden itibaren Si, Al ve diğer ikincil iyonlar çözülmeye başlar (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009). Şekil 1.11.'de farklı konsantrasyona sahip NaOH çözeltileri ortamında 10 dakika bulundurulan FA taneciğinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 1.11.'den de görülebileceği gibi FA taneciği, ilk başta nispeten pürüzsüz bir görünümündedir. 10 dakikanın sonunda 5 M NaOH çözeltisinin olduğu ortamda FA taneciğinin 0.5-2 μm boyutlu küre şekilli jel parçacıklarıyla biraz kaplandığı görülmektedir. Ancak aynı sürenin sonunda 10 M ve 15 M NaOH çözeltili ortamlarda, FA taneciğinin yüzeyinde daha çok jelin oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla NaOH çözeltisinin molaritesinin artmasıyla toz bağlayıcıdaki çözülme miktarının arttığı söylenebilir (Haddad ve Alshbuol 2016).



Şekil 1.11. Farklı molaritelere sahip NaOH çözeltisinin FA taneciğinde yaptığı değişimler (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009)

Ancak değişik çalışmalarda birbirinden farklı SH molaritesi, optimum değer olarak önerilmiştir (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009; Görhan ve Kürklü 2014; Atiş ve ark. 2015; Hamidi ve ark. 2016). Bu değerler arasında farklılık olması, kullanılan hammadde ve kür koşullarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Hardjito ve Rangan, yaptıkları çalışmada farklı SS içeriklerine sahip FA esaslı GP betonlarda, SH molaritesinin 8 M'den 14 M'ye çıkmasıyla basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir (Hardjito ve Rangan 2005). Takeda ve ark., 50 °C'de 72 saat kür ettikleri VK esaslı GP bağlayıcı için optimum NaOH konsantrasyonunu 13.5 M olarak tespit ederken, Görhan ve Kürklü, FA esaslı GP harçlara farklı kür sıcaklığı ve süresi uyguladıktan sonra 85 °C kür sıcaklığı ve 6 M NaOH konsantrasyonunu optimum değerler olarak belirlemiştir (Görhan ve Kürklü 2014; Takeda ve ark. 2014).

Bu durumda, toz bağlayıcıdan yeterli miktarda Si ve Al'ın çözülmesi ve böylelikle iyi bir GP bağlayıcı elde edilmesi için NaOH çözeltisinin yeterli bir konsantrasyon değerinde olması gerektiği ve bu değerin de kullanılan hammadde ve kür koşullarına bağlı değişeceği kanaatine varılabilir. Bunun yanında, yapılan çalışmalara bakıldığında, 10 M ve 12 M NaOH konsantrasyonunun optimum olduğunu ifade edenler ağır basmaktadır (Puertas ve ark. 2000). Dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de bu optimum değere

kadar NaOH konsantrasyonu, GP bağlayıcının mekanik özellikleri üzerinde çok etkili iken bunun üstündeki değerlerde konsantrasyonun etkisi azalmaktadır. Chindaprasirt ve ark., C-FA ile yaptığı çalışmada, 10 M ile 20 M arasında NaOH konsantrasyonunun GP bağlayıcının dayanımı üzerinde pek etkisinin olmadığını belirlemiştir (Chindaprasirt ve ark. 2007).

NaOH konsantrasyonunun GP bağlayıcılar üzerindeki önemli etkilerinden biri ise NaOH konsantrasyonun artmasıyla taze haldeki GP hamur, harç ve beton karışımların viskozitesinin artmasının bir sonucu olarak işlenebilirliğinin azalmasıdır (Chindaprasirt ve ark. 2007). Bu yüzden birbirine yakın mekanik özellikleri sağlamaları durumunda, düşük molariteyi tercih etmek daha doğru bir seçim olacaktır.

1.8.2. Sodyum Silikat – Sodyum Hidroksit Oranı (SS/SH)

İyi bir geopolimerik yapı elde edilmesi için SH çözeltisi yanında SS çözeltisinin de kullanılması önerilmektedir (Palomo, Grutzeck, ve ark. 1999; Xu ve Van Deventer 2000; Nematollahi ve Sanjayan 2014). SH çözeltisinin yanında SS çözeltisinin de kullanılması, reaksiyon ürünü olan Si miktarını arttırma yoluyla mekanik dayanımı iyileştirmektedir (Criado ve ark. 2005).

Chindaprasirt ve ark. C-FA ile yaptıkları çalışmada, GP harçların dayanımının, SS/SH oranının 0.67-1.00 arasında olduğu durumda, bu oranın 1.50-3.00 olduğu durumdan daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca SS/SH oranının GP harçların dayanımı üzerindeki etkisinin, düşük NaOH konsantrasyonu değerlerinde nispeten daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir (Chindaprasirt ve ark. 2007). Benzer şekilde, başka bir çalışmada da SS/SH oranının 0.5'ten 1.0'a çıkmasıyla dayanımda artışlar yaşanmış, bunun üzerindeki değerlerde sürekli azalma meydana gelmiştir (Morsy ve ark. 2014). Buna karşın Hardjito ve Rangan, F-FA ile yaptıkları çalışmada, SS/SH oranının artmasıyla dayanımın arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca düşük SH konsantrasyonunda SS/SH oranının artmasıyla dayanımda çok önemli artışlar olduğunu, yüksek SH konsantrasyonunda ise SS/SH oranının artmasıyla dayanım artışının daha düşük oranda olduğunu tespit etmişlerdir (Hardjito ve Rangan 2005). Benzer şekilde, başka bir çalışmada yalnız SH ile aktive edilen ve oda sıcaklığında kür edilen FA esaslı GP bağlayıcının 28 günlük basınç dayanımı, 1.5 MPa olarak ölçülmüş, aynı karışımda SS/SH

oranı 2.0 olacak şekilde SS eklendiğinde ise basınç dayanımı, 42.8 MPa olarak ölçülmüştür (Phoo-ngernkham ve ark. 2015).

1.8.3. Alkali Aktivatör - Toz Bağlayıcı Oranı (a/b)

Alkali aktivatörün toz bağlayıcıya ağırlıkça oranı (a/b), daha çok toz bağlayıcının ıslatılacak yüzey alanına (su ihtiyacına) bağlı olduğundan dolayı GP sentezinde kritik bir öneme sahip olmadığı ifade edilir (Djobo ve ark. 2017). Ancak karışımın yeterli bir işlenebilirliğe ulaşmasından sonra, a/b oranının artmaya devam etmesi, geopolimerleşmeyi zorlaştıracağından dayanımda düşüşlere sebep olacaktır (Ruiz-Santaquiteria ve ark. 2012; Haddad ve Alshbuol 2016). Ayrıca a/b oranının artmasıyla karışımdaki AA miktarı artmakta ve bunun sonucu olarak sertleşmiş hamurda reaksiyona girmeyen alkali miktarı daha fazla olmaktadır. Reaksiyona girmeyen alkalilerin fazla olması, çiçeklenmenin miktarını arttırmaktadır (Vafaei ve Allahverdi 2017).

1.8.4. Karıştırma ve Yerleştirme İşlemleri

Birçok çalışmada, GP bağlayıcı üretiminde, önce katı bileşenlerin karıştırma işlemi gerçekleştirilmiş daha sonra alkali aktivatör eklenerek ek bir karıştırma işlemi daha uygulanmıştır (Van Jaarsveld ve ark. 1998; Kouamo ve ark. 2012; Balun ve Karataş 2021).

Taze haldeki GP bağlayıcılar, genellikle oldukça katı kıvamda olup, yüksek viskozite ve kohezyona sahip olduklarından dolayı karıştırılmaları güç olmaktadır. Bu yüzden GP bağlayıcıların karılma işleminde klasik mikserler yerine daha güçlü mikserlerin kullanılması önerilmektedir (Teixeira-Pinto ve ark. 2002; Hardjito ve Rangan 2005).

Hardjito ve Rangan, biri sürekli diğeri ise aralıklı olmak üzere karılma süresinin GP betonların işlenebilirlik ve dayanıma etkisini araştırmışlardır (Hardjito ve Rangan 2005). Bu çalışmaya göre hem sürekli hem de aralıklı karıştırma için karılma süresinin artmasıyla basınç dayanımında artış yaşanırken, işlenebilirlikte hafif bir düşüş olmuştur.

1.9. Geopolimerlerin Kürü

GP betonların kürü, suyun içinde kür edilen PC betonlardan farklı olarak, belli bir sıcaklık değerinde açık havada veya buhar altına olmaktadır. GP betonlarda sıcak kür

işlemi, genellikle polimerizasyon reaksiyonlarının yeterince gerçekleşmesi için uygulanmaktadır (Jindal 2019). Geopolimer betonlar oda sıcaklığında kür edildiklerinde, genellikle yeterli dayanıma sahip olamadıklarından dolayı çoğu çalışmada, etüv tarzı fırınlarda sıcak küre tabi tutulmuşlardır (Heah ve ark. 2011; Atiş ve ark. 2015). Geopolimer betonların kürü ile alakalı yapılan çalışmalar genellikle oda sıcaklığı ve/veya 40-100 °C gibi sıcaklık değerleri ile gerçekleştirilmiştir (Palomo, Grutzeck, ve ark. 1999; Temuujin, Williams, ve ark. 2009; Rovnaník 2010; Atiş ve ark. 2015; Kantarcı ve ark. 2019).

1.9.1. Kür Şekli

PC esaslı betonlar, suyun içerisinde kür edilmekte ve karakteristik basınç dayanımları da bu yöntemle belirlenmektedir (TS-EN-12390-2 2002). Bu yöntem, PC esaslı betonlar için oldukça uygundur. Fakat GP esaslı betonlar için durum biraz farklıdır. Numunelerin suyun içerisinde bekletilmesiyle gerçekleştirilen kür yöntemi, GP numunelerin içerisindeki AA'nın süzülmesine yol açarak, dayanımının yeterince gelişmemesine sebep olabilmektedir. GP numunelerinin açıkta kür edilmeleri ise yüzeyde çatlakların oluşmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca bu yöntemin sadece yalnız SH ile aktive edilen GP betonlarda kullanılması önerilmektedir (Kovalchuk ve ark. 2007). Yapılan birçok çalışma, numune yüzeylerinin tamamen kapatılmasıyla gerçekleştirilen kür yönteminin, GP betonlar için en uygun metot olduğunu göstermektedir. Bu yöntemle kür edilen geopolimerlerin daha yoğun yapıda oldukları ve dayanımlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Kovalchuk ve ark. 2007; Provis 2018).

Yapılan bir çalışma, otoklav kürünün diğer kür yöntemlerine göre daha kristal yapı oluşmasına sebep olduğunu göstermiştir (Bondar ve ark. 2011a). Ayrıca otoklav kürü, PC betonlarda olduğu gibi GP betonlarda da çiçeklenmenin sınırlı kalmasını sağlayabilmektedir (Kani ve ark. 2012).

1.9.2. Kür Süresi

Yüksek kür sıcaklıklarında kür süresinin uzaması, suyun bir kısmının buharlaşmasına yol açarak ileriki yaşlarda dayanım kayıplarına sebep olan mikro-boşlukların oluşmasına neden olabilmektedir (Heah ve ark. 2011). Bundan dolayı kür süresinin belli bir değere kadar artmasıyla dayanım artarken bunun üzerindeki değerlerde

dayanımda düşüşler yaşanabilmektedir (Van Jaarsveld ve ark. 2002; Chindaprasirt ve ark. 2007). Yapılan çalışmalarda kullanılan hammaddelerin farklılığı, karışım oranlarının farklılığı ve kür sıcaklıklarının farklılığı gibi sebeplerden dolayı dayanım açısından optimum kür süresi için bir değer belirtmek mümkün olmamaktadır. Ancak bu çalışmalarda optimum kür süresinin 24-72 saat aralığında yoğunlaştığını söylemek mümkündür.

1.9.3. Kür Sıcaklığı

Kür sıcaklığı, yoğun bir GP jeli oluşumunda ve dolayısıyla dayanım gelişimi üzerinde çok önemli bir role sahiptir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b). GYFC, camsı faza sahip olan bir malzeme olduğundan aktivasyonu nispeten kolaydır ve bu malzemeyle üretilen GP bağlayıcıların dayanımı, oda sıcaklığında da kabul edilebilir seviyelere çıkmaktadır. Buna karşın FA ve DP'ler, yüksek miktarda kristal faz barındırdıklarından aktivasyonlarının sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için 40-85 °C gibi orta dereceli sıcaklığa ihtiyaç duyarlar (Phoo-ngernkham ve ark. 2015).

Otoklav kürünün uygulandığı bir çalışmada, düşük kür sıcaklığı, daha homojen bir jel oluşumu sağlamasına karşın, yüksek kür sıcaklığı, basınç dayanımının yüksek olmasını sağlamıştır. Çelişkili görünen bu durum, otoklav kürünün yüksek sıcaklık etkisiyle alüminosilikat kaynağının reaktivitesini arttırmasıyla açıklanabilir (Bondar ve ark. 2011a).

Yukarıda belirtilen, optimum kür süresinin belli bir değer ile ifade edilememesinin sebeplerini, optimum kür sıcaklığının da bir değer ile ifade edilememesinin nedeni olarak sıralayabiliriz. Bunun yanında yapılan çalışmalarda, optimum kür süresinin 60-90 °C sıcaklık aralığında yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Chindaprasirt ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, C-FA ile elde edilmiş GP harçların dayanımı, kür sıcaklığının 75 °C'ye kadar artmasıyla artmış, bunun üstündeki sıcaklık değerinde ise azalmıştır (Chindaprasirt ve ark. 2007).

1.10. Taze ve Sertleşmiş Haldeki Geopolimerlerin Özellikleri

GP hamur ve dolayısıyla harç ve betonlar, PC betonlarda olduğu gibi başlangıçta şekil verilebilir haldeyken, zamanla şekil verilemez katı hale dönüşmektedir. GP

karışımların taze haldeki işlenebilirliği ve sertleşmiş haldeki mekanik özellikleri ile uzun süreli davranışını ifade eden durabilitesinden bahsedilecektir.

1.10.1. İşlenebilirlik

Geopolimerlerin inşaat yapılarında bağlayıcı olarak kullanılmasıyla ilgili en önemli problemlerden birisi, bu bağlayıcıların işlenebilirliği ile ilgilidir. GP bağlayıcının yüksek kohezyonu, hareketini (akmasını) zorlaştırmaktadır. Bu durum, taze betonun, karıştırma, yerine yerleştirme ve sıkıştırma gibi özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca GP bağlayıcıların reolojik özelliklerini istenilen yönde iyileştirmeye yönelik kimyasal katkı maddelerinin henüz olmaması, bu problemin aşılmasını zorlaştırmaktadır (Provis 2018).

Aktivatör olarak SS ve SH'nin birlikte kullanıldığı karışımlar, yalnız SH ile aktive edilen GP karışımlara oranla daha viskoz bir görüntüye sahiptirler. Ancak mini slamp benzeri testler yapıldığında, yalnız SH ile aktive edilen karışımların işlenebilirliği daha düşük değerler almaktadır (Nematollahi ve Sanjayan 2014).

1.10.2. Mekanik Özellikler

Geopolimerler, genellikle erken yüksek dayanımının yüksek olmasıyla ön plana çıkmaktadır. 2-3 gün içerisinde 100 MPa basınç dayanımına ulaşabilmektedir (Atiş ve ark. 2015). Ayrıca GP'lerin çekme ve eğilme dayanımı açısından da klasik betondan daha iyi olduğu ifade edilebilir (Haddad ve Alshbuol 2016). Yapışma kabiliyetinin iyi olmasından dolayı dayanım açısından, agrega-bağlayıcı hamur ara yüzeyi bazı durumlarda bağlayıcı hamurdan daha üstün olabilmektedir.

1.10.3. Durabilite

GP betonların özellikle asit ve yüksek sıcaklık (yangın) etkisine karşı, PC betonlardan üstün olduğunu rahatlıkla ifade edebiliriz. Buna karşın bazı DP esaslı GP'lerin ıslanma-kuruma ve donma-çözülme gibi etkilere karşı daha dayanıksız olduğunu ifade etmek gerekir. 20. yüzyılın ortalarından itibaren üretilen-uygulanan cüruf esaslı bazı alkali-aktive betonların durabilitesi, aynı zamanlarda üretilen ve benzer yıpratıcı etkilere maruz kalan PC esaslı betonların durabilitesinden düşük olmamıştır (Buchwald ve ark. 2015; Provis 2018).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

GP bağlayıcılarla ilgili literatürde yapılan araştırmalar, konuyla ilgili, nitelikli birçok yayının olduğunu göstermiştir. Bu çalışmaların hepsi için burada özet sunmak elbette mümkün değildir. Ayrıca konunun teorik temellerinin anlatıldığı bölümde konuyla ilgili yapılan çalışmalara değinildiğinden dolayı burada sadece birkaç çalışmanın özetinin sunulması uygun bulunmuştur.

Hardjito ve ark., uçucu kül esaslı geopolimerlerin geliştirilmesine yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (Hardjito ve ark. 2004). Önceki çalışmaların çoğunda GP hamurların davranışları üzerinde durulmuş iken, bu çalışmada GP betonların basınç dayanımına etki eden parametreler üzerinde durularak onun davranışı hakkında bilgiler sunulmuştur. Bu çalışmadan önceki çalışmalarda genellikle küçük boyutlu numuneler üzerinde testler yapılırken bu çalışmada normal boyuttaki numuneler üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca patent ve ticari yönelimli önceki çalışmaların bir kısmı, karışım oranları ve deney süreci hakkında yeterli bilgi sunmamışken, bu çalışmada bütün detaylar paylaşıldığı için bu çalışmanın ayrı bir önemi vardır (Hardjito ve Rangan 2005).

Çalışmada, F sınıfı olarak tanımlanan düşük kalsiyum içerikli uçucu kül (F-FA), SH ve 2 modül SS ile aktive edilmiştir. Kür süresince buharlaşmadan dolayı olabilecek sıvı kaybını engellemek için hazırlanan numunelerin yüzeyi jelatinle sarılarak 60 °C sıcaklıkta 24 saat kür edilmişlerdir. Farklı parametrelerin basınç dayanımına etkileri aşağıdaki gibi bulmunmuştur:

• SH konsantrasyonu: SH konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımında artış olmuştur. Ancak ağırlıkça SS/SH oranının artmasıyla, SH konsantrasyonuna bağlı dayanım artışı oranı azalmaktadır.

• SS/SH oranı: Bu oranın 0.4'ten 2.5'e çıkmasıyla basınç dayanımında artışlar olmuştur. SH konsantrasyonunun düşük olduğu durumda (8 M) bu oranın artmasıyla dayanım artışı fazla olurken, yüksek konsantrasyonda (14 M) bu artış daha az olmuştur.

• Kür sıcaklığı: kür sıcaklığının artmasıyla basınç dayanımında artışlar olurken, 60 °C sıcaklığının üstündeki değerlerde basınç dayanımında önemli artışlar meydana gelmemiştir.

• Kür süresi: 60 °C sıcaklıkta uzun süreli kür işlemi, malzemede sorun oluşturmadan dayanım artışına sebep olmuştur. Ancak verilen sıcaklık değeri için, 48 saatten fazla kür süresi, önemli derecede dayanım artışlarını meydana getirmemiştir.

• Su azaltıcı katkı maddesi (SAK): Naftalin esaslı SAK, FA esaslı taze GP betonun işlenebilirliğini arttırmıştır. Toz bağlayıcının %2'si kadar SAK kullanıldığında basınç dayanımında belirgin bir düşüş olmazken, bu oranın üstündeki SAK kullanımında basınç dayanımı düşmüştür.

• Dinlendirme süresi (rest period): Karışımın kalıba yerleştirildikten sonra etüve konuluncaya kadar geçen süre olarak tanımladığı dinlendirme süresine (1 saat) sahip olan numunelerin basınç dayanımının, dinlendirme süresine sahip olmayan numunelerinkinden pek farklı olmadığı görülmektedir.

• Gecikme süresi (delay time): Malzemenin karıştırılmasından kalıplara konulmasına kadar geçen süre gecikme süresi olarak tanımlanmıştır. 1 saat gecikme süresi basınç dayanımında küçük değişimlere sebep olmuştur. Bu düşüşün, ortamın sıcaklığı ve neminin ufak değişimlerinden kaynaklanabileceği kanısına varılmıştır. Ayrıca araştırma GP karışımının, herhangi bir priz alma göstergesi olmadan 120 dakika boyunca işlenebildiğini ve bunun sonucunda elde edilen numunelerin basınç dayanımında herhangi bir bozulma meydana gelmediğini göstermiştir.

• Su içeriği: Ek-su ile su içeriğinin arttırılması, basınç dayanımında düşüşlere sebep olmuştur.

• Betonun yaşı: 24 saat kür edilen numunelerde basınç dayanımı zamanla pek bir değişim göstermemiştir.

• Rötre, sünme ve sülfat direnci: 7 günlük basınç dayanımı 53.7 MPa olan GP beton numunelerin rötre (büzülme) değerleri ölçülmüş ve oldukça düşük değerler olduğu görülmüştür. Aynı numunelerin dayanım değerinin %40'ı kadar (22 MPa) yük uygulandığında 6 haftanın sonunda, sünme faktörü (sünme deformasyonunun elastik deformasyona oranı) 0.30 olarak bulunmuştur. 6 haftadan sonra sünme faktöründe pek değişiklik olmamıştır. %5 sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi içerisinde 12 hafta bekletilen numunelerin basınç dayanımı, ağırlık ve uzunluğunda önemli bir değişiklik olmamıştır.

Kantarcı ve ark., Nevşehir'den elde edilen volkanik tüf ile yaptıkları çalışmada, GP harç ve betonların üretim parametrelerini optimize etmişlerdir (Kantarcı ve ark. 2019). AA olarak, yalnız SH veya SH + SS (multi çözelti) kullanılmıştır. Multi çözeltinin kullanıldığı karışımlarda SH konsantrasyonu sabit 10 M, silis modülü harç için 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 ve beton için 0.6, 0.8 olarak alınmıştır. Yalnız NaOH çözeltisinin kullanıldığı harç ve beton karışımlarında NaOH konsantrasyonu 10, 12, 14 ve 16 olarak belirlenmiştir. GP harç karışımlarında (a/b) oranı 0.35 ve 0.45 alınmışken, beton karışımlarında 0.50 ve 0.60 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler 72 saat boyunca farklı sıcaklıklarda kür edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- SH konsantrasyonunun artışıyla harç numunelerin basınç dayanımı artmıştır.
- a/b oranı arttıkça beton ve harç numunelerin basınç dayanımları artmıştır.
- Tüm yaş gruplarında silis modülünün 0.6 ve 0.8 olduğu harç numunelerin basınç dayanımı değeri en yüksek çıkmıştır. Ancak silis modülü ile basınç dayanımı arasında tam bir bağlantı kurulamamıştır.
- AA çözeltisinin buharlaşmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda kür edilen numunelerin basınç dayanımları daha düşük çıkmıştır.
- Ultrases dalga hızı (UPV) test cihazı değerleri ile basınç dayanımı arasında güçlü bir korelasyon kurulmuştur.
- Yalnız NaOH çözeltisi ile hazırlanan harç ve beton numuneler daha yoğun ve kompakt bir mikroyapıya sahip olmuştur.
- XRD analizlerinde harç ve beton numunelerde, hammaddede bulunmayan kristal yapıya sahip albit ve kiyanit minerallerine rastlanmıştır.

Chindaprasirt ve ark., geopolimerlerin dayanım ve işlenebilirliğini inceledikleri çalışmalarında yüksek kireçli FA'yı SH ve SS ile aktive etmişlerdir (Chindaprasirt ve ark. 2007). Kumun toz bağlayıcıya ağırlıkça oranı, 2.75 alarak harç numuneler hazırlanmıştır. SH konsantrasyonu 10, 15 ve 20 M olarak seçilmiş ve SS/SH oranı 0.67, 1.00, 1.50 ve 3.00 olarak belirlenmiştir. Çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- SH konsantrasyonunun artmasıyla GP karışımının işlenebilirliği azalmıştır.

• GP karışımının işlenebilirliği ek su katılması veya SAK kullanımıyla arttırılabilir. Ancak SAK'ın, GP harç numunelerin dayanımı üzerinde olumsuz etkileri vardır.

• Deney sonuçları, yüksek kireçli FA esaslı geopolimerlerde yüksek dayanım elde etmek için optimum SS/SH oranının 0.67-1.00 aralığında olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Hardjito ve Rangan tarafından gerçekleştirilen SS/SH oranının artmasıyla dayanımın arttığı düşük kireçli FA esaslı GP beton çalışmasından farklılık göstermektedir (Hardjito ve Rangan 2005).

• SH çözeltisinin 10-20 M arasındaki konsantrasyonunun dayanım üzerindeki etkisi oldukça küçüktür.

• GP karışımı kalıplara yerleştirilip kaplandıktan sonra 6 saate kadar oda sıcaklığında bekletildikten sonra etüve konulmuştur. İfade edilen dinlendirme süresinin (çalışmada *delay time* olarak isimlendirilmiş) dayanım üzerinde kayda değer olumsuz bir etkisi olmamıştır.

• 60 °C kür sıcaklığı için kür süresinin 2-3 güne kadar artmasıyla dayanım artış göstermesine karşın daha uzun süreli kürün dayanıma katkısı olmamıştır.

• 30-75 °C aralığındaki sıcaklıklarda dayanım, sıcaklıkla artmış ve optimum sıcaklık 75 °C olarak elde edilmiştir. Kür sıcaklığı 90 °C olduğunda ise dayanım düşmeye başlamıştır.

Kani ve ark., doğal bir puzolan olan pomza ile elde edilen GP bağlayıcıların çiçeklenmelerini tayin etmek için Taftan (İran) pomzasını SH ve SS ile aktive ederek hazırladıkları GP hamur numuneler üzerine bir dizi deneyler yapmışlardır (Kani ve ark. 2012). Karışıma Alüminyum (Al) sağlamak amacıyla, toz bağlayıcıya, ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında MK, GYFC ve 3 tür AC ikame edilmiştir. Hidrotermal kürün çiçeklenmeye etkisini incelemek üzere numuneler % 95 relatif nem ve 25 °C sıcaklığa sahip ortamda 7 gün kür edildikten sonra 20 saat boyunca 45, 65, 85, 105 ve 125 °C sıcaklıklarda buhara doygun ortamda hidrotermal küre maruz bırakılmıştır. Çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir

• Çiçeklenme, DP esaslı GP bağlayıcılarda bazen problem oluşturabilir. Ancak, Al içeriği zengin katkılarla veya hidrotermal kür ile çiçeklenme azaltılabilir.

• 65 °C ve üzeri sıcaklıklardaki hidrotermal kür, çiçeklenmeyi önemli oranda azaltmanın yanında, basınç dayanımını ufak da olsa iyileştirmiştir.

• Çalışılan pomza için, çiçeklenmeyi azaltmada, özellikle Secar 71 isimli AC, hidrotermal kürden daha etkili olmuştur.

• AC katkısı, GP bağlayıcıda çapraz bağlanma derecesini arttırarak alkalilerin bünyede mobilitesini zorlaştırır. Aynı zamanda, bu katkılı bağlayıcı, mekanik özellikleri de geliştirir.

Tchakoute ve ark., oda sıcaklığında GP bağlayıcı üretiminde VK'nin kullanılabilirliğini araştırmışlardır (Tchakoute ve ark. 2013). Bu amaçla, kimyasal ve mineralojik yapı, amorf faz bileşimi, tane boyutu dağılımı ve özgül yüzey alanı özelliklerine göre iki farklı VK kullanılmıştır. Bu VK'lerden birincisi, özgül yüzey alanı, amorf yapıdaki Al_2O_3, SiO_2 ve CaO miktarı düşük; ikincisi ise bu değerleri yüksek olan malzemeden seçilmiştir. AA çözeltisinin silis modülü, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 ve 1.4 olarak seçilerek GP hamur numuneler üretilmiş ve 28 gün oda sıcaklığında kür edilmişlerdir. Dayanım ölçümlerinde, tüm örnekler için 28 günlük basınç dayanımı esas alınmıştır. Deneysel çalışmalarında aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

• İçeriğinde amorf yapıdaki serbest CaO miktarı az ve özgül yüzey alanı düşük olan VK ile (birincisi) yapılan GP bağlayıcılar, 14 günün sonunda bile kolayca işlenebilmiş yani herhangi bir priz alma emaresi göstermemiştir. İfade edilen özellikleri iyi olan VK (ikincisi) ile yapılan GP bağlayıcılarda ise priz alma süresi, silis modülünün artmasıyla azalarak 490-180 dakika arasında değişmiştir.

• GP hamurda etrenjitin oluşması, GP numunelerin şişmesine sebep olmuştur. Çatlak oluşumuna sebep olan bu durum, basınç dayanımının düşük olmasıyla sonuçlanmıştır (9-19 MPa).

• İkinci VK ile yapılan GP hamur numunelerin basınç dayanımı, daha yüksek bir aralıkta değişmiştir (23-50 MPa). Her iki VK için de GP hamur numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, silis modülünün artması ile artmıştır.

Djobo ve ark., yaptıkları çalışmada VK esaslı GP harçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile durabilitesini araştırmışlardır (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b). Silika modülü 1.4 olacak şekilde SH ve SS çözeltilerini karıştırarak hazırladıkları AA ile VK'yi aktive

etmişlerdir. a/b oranı, 0.45 olan GP hamura maksimum dane çapı 1.20 mm olan kum eklenerek GP harç hazırlanmıştır. GP harç kalıplara dökülerek numuneler oluşturulmuştur. Numunelerin bir kısmı deney gününe kadar 27 °C sıcaklıkta kür edilirken, diğer kısmı ise 24 saat 80 °C sıcaklıkta kür edildikten sonra deney gününe kadar ilk kısım ile aynı koşullarda bekletilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

• Su emme kapasitesi, iki numune grubu için de 7 ile 28. gün arasında artmış, sonrasında ise zamanla pek bir değişiklik göstermemiştir. Su emme kapasitesine paralel olarak 7 ile 28. gün arasında porozite artmış sonrasında zamanla kayda değer değişiklik olmamıştır. 27 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde birim ağırlık zamanla azalırken 80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde az da olsa zamanla artış gözlenmiştir.

• 27 ve 80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde 28 günlük maksimum basınç dayanımı, sırasıyla 20.5 ve 37.9 MPa olmuştur. Bu zaman zarfından sonra basınç dayanımı değerlerinde kayda değer bir artış gözlenmemiştir.

• 25 tane ıslanma-kuruma döngüsünden sonra şekilsel herhangi bir bozukluk gerçekleşmemiş ve 27 ve 80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerde basınç dayanımı kaybı, sırasıyla %24 ve %14 olarak elde edilmiştir.

• 27 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin asit direnci (ağırlıkça %5 H_2SO_4 çözeltisi), 80 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerden daha iyi çıkmıştır.

• Sülfürik asit (H_2SO_4) ile GP bağlayıcı arasındaki etkileşimlerin sonucunda alçıtaşı oluşmuştur.

Kong ve Sanjayan, çalışmalarında, numune boyutları, kullanılan agreganın boyutları, agrega türü ve SAK cinsinin FA esaslı GP bağlayıcının yüksek sıcaklık altındaki davranışına etkisini incelemişlerdir (Kong ve Sanjayan 2010). Numuneleri 800 °C sıcaklığa maruz bırakmış ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

• Numune boyutları, GP hamurun yüksek sıcaklıklardaki direncini etkileyen çok önemli bir faktördür. Numune boyutlarının artmasıyla yüksek sıcaklığın etkisindeki hamur numunelerin yüzeyi ile iç bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı, termal çatlaklar oluşturarak dayanım kayıplarında önemli artışlar meydana getirmektedir.

• Maksimum dane çapı 10 mm'den küçük olan agregalarla üretilen GP betonların yüksek sıcaklık direnci, maksimum dane çapı 10 mm'den büyük olan agregalarla üretilen GP betonların yüksek sıcaklık direncinden oldukça düşüktür.

• Bazalt ile üretilen GP betonun basınç dayanımı değeri, GP hamurun basınç dayanımı değerine çok yakınken, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci, cüruf agregası ile üretilen GP betonun basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direncinden yüksek olmuştur. Buna karşın cüruf ile üretilen karışımların işlenebilirliği, bazalt ile üretilen karışımların işlenebilirliğinden daha iyi olmuştur.

• PC esaslı betonlar için hazırlanan SAK'ların GP esaslı betonların işlenebilirliğine etkileri oldukça az olmasına karşın, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direncine çok olumsuz etkileri olmuştur.

• GP betonu oluşturan bağlayıcı hamur ve agreganın termik genleşme özellikleri arasındaki fark, GP betonun yüksek sıcaklık direnci performansını belirleyen önemli unsurlardan biridir.

Guo ve ark., farklı silika modülüne sahip AA ile C-FA'yı farklı oranlarda karıştırarak hazırladıkları GP hamur numuneleri, farklı sıcaklık ve sürelerde kür etmişlerdir (Guo ve ark. 2010). Çalışmada, basınç dayanımının belirlenmesinin yanında, basınç dayanımı en yüksek olan numunelerin (75 °C'de 8 saat kür edilen 28 günlük numune) XRD, SEM-EDXA ve FTIR gibi yöntemlerle mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilerek aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

• Basınç dayanımı deneyleri, C-FA esaslı GP bağlayıcı için 8 saatten fazla sıcak kürün faydası olmadığını ve optimum kür sıcaklığının da 75 °C olduğunu göstermiştir. Bu sıcaklık değerinde 8 saat kür edilen numunelerin basınç dayanımı 63.4 MPa olmuştur.

• XRD analizlerinde, GP jel pikinin yanında C-S-H jel pikinin de gözlemlenmesi, C-FA esaslı GP bağlayıcılarda, geopolimerik reaksiyonlarla birlikte hidratasyon reaksiyonlarının da gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, XRD grafiğinde gismondin pikine rastlanması, FA'daki kuvarsın reaksiyona girmeyen kristal bileşeniyle açıklanmıştır.

• FTIR grafiği, geopolimerleşen örnekte Si/Al – O ve Si – O – Si/Al bağlarının oluştuğunu ve 1648 – 3466 cm^{-1} arasında gözlenen geniş bantın, OH ve H-O-H gruplarının var olduğunu göstermektedir.

• SEM görüntüleri, farklı boyutlardaki küresel FA taneciklerinin alkalin ortamın ve sıcak kürün etkisiyle şeklinin değişmeye başladığını göstermiştir. Zamanla küresel şeklin bozulduğu, alümino-silikatın bir kısmının FA taneciklerinden ayrıştığı ve parçalanan FA taneciğinin iç bölgesinin reaksiyon ürünü olan mikroparçacıklarla büyük oranda dolduğu tespit edilmiştir.

Vafaei ve Allahverdi, Taftan Dağı'ndan elde ettikleri doğal puzolana farklı miktarlarda AC ikame ederek hazırladıkları toz bağlayıcıyı SS + SH karışımından oluşan alkali çözeltiyle aktive etmişlerdir (Vafaei ve Allahverdi 2016). Bu karışımdan elde ettikleri numuneleri, 20 saat boyunca 95 °C'de hidrotermal küre tabi tuttuktan sonra bir dizi deneye tabi tutmuşlardır. Bu deneylerin sonucunda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

• AC içeriğinin artmasıyla beraber GP karışımın işlenebilirliğinde az da olsa iyileşme olurken, priz süresinde önemli düşüşler yaşanmıştır. Priz süresindeki bu önemli değişim, geopolimerleşme reaksiyonlarından daha hızlı olan, AC bileşenlerinin suyla gerçekleştirdikleri hidratasyon reaksiyonu ile açıklanabilir.

• Toz bağlayıcıdaki reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının artması, geopolimerleşme sürecinde önemli rol oynayarak daha kompakt bir bağlayıcının oluşmasına sebep olmaktadır.

• Yarı adiyabatik kalorimetre ölçümleri, AC içeriğinin, alüminosilikat kaynağında çözünmeyi hızlandırdığı ve polikondensasyon sürecini kolaylaştırdığını göstermiştir.

• AC içeriğinin artmasıyla (%0-24), basınç dayanımı sürekli artmıştır. Toz bağlayıcıdaki AC ve aktivatördeki Na_2O içeriği sabit tutulduğunda silika modülünün 1.0'dan 1.5'e yükselmesiyle basınç dayanımı artarken, 1.5'ten 2.0'a yükselmesiyle ise basınç dayanımında düşüşler olmuştur.

• FTIR analizleri, AC ikamesinin çapraz bağlı alümino-silikat ağ yapısını arttırdığını göstermektedir.

Haddad ve Alshboul, GP beton üretiminde Ürdün'den elde ettikleri DP'yi kullanmışlardır (Haddad ve Alshbuol 2016). Toz bağlayıcı aktivasyonunu, farklı molaritelere sahip (10, 12 ve 14 M) SH çözeltisini farklı oranlarda (0.4, 2.5 ve 3.0) SS çözeltisi ile karıştırarak hazırladıkları AA ile gerçekleştirmişlerdir. Farklı sıcaklık (ortam sıcaklığı, 40, 80 ve 120 °C) ve sürelerde (24 ve 48 saat) kür ettikleri numunelerin basınç ve çekme dayanımı ölçümleri ile SEM görüntü analizlerini gerçekleştirerek aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

• Aktivatörün bağlayıcıya oranının (a/b) 0.45 değerine kadar artmasıyla basınç dayanımı artarken bunun üzerindeki 0.50 değerinde düşmüştür. Ayrıca SEM görüntüleri de bu oranın 0.30 olduğu durumda var olan mikro-çatlak, boşluklu yapı ve reaksiyona girmemiş parçacıkların, bu oranın 0.45 değerine çıkmasıyla nispeten azaldığını göstermiştir.

• SH molaritesinin artmasıyla (10-14 M), basınç dayanımının arttığı gözlemlenirken işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür. SEM görüntüleri de 14 M SH ile hazırlanan numunelerin 10 M SH ile hazırlanan numunelerden daha yoğun bir yapıya sahip olup reaksiyona girmeyen parçacıkların daha az olduğunu göstermiştir.

• Ağırlıkça SS/SH oranının artmasıyla, basınç dayanımında önemli artışlar olurken bu oranın 2.5 değerinin üzerine çıkmasıyla önemli dayanım artışı olmamıştır. Aynı şekilde SEM analizleri, bu oranın 2.5 olduğu numunelerde, bu oranın 0.4 olduğu numunelere kıyasla daha fazla polimerize yapının görüldüğünü ve boşlukları az olan alümino-silikat jelin oluştuğunu göstermiştir.

• Ortam sıcaklığında kür edilen numunelerin basınç dayanımı zamanla artmaktadır. Bununla birlikte 28 günde kazanılan dayanımın %80'inden fazlası 7 günde elde edilmiştir. Çekme dayanımı ise ortalama olarak basınç dayanımının %22'si kadar olmuştur ki bu değer PC esaslı betonun yaygın bilinen değerinden yüksektir.

• Kür sıcaklığının 80 °C'ye kadar artmasıyla basınç dayanımı artarken bunun üstündeki 120 °C değerinde önemli düşüşler yaşanmıştır. Kür süresinin 24 saate kadar artmasıyla basınç dayanımında önemli artışlar yaşanırken bunun üstündeki değerlerde dayanım artışı sınırlı olmuştur. En yüksek 28 günlük basınç dayanımı ise 31.9 MPa ile SS/SH ve a/b oranlarının sırasıyla 2.5 ve 0.45 olduğu, 80 °C sıcaklıkta 48 saat kür edilen numuneden elde edilmiştir.

Tchakoute Kouamo ve ark., Kamerun'dan elde ettiği VK ve MK'ye farklı oranlarda alümin (Al_2O_3) ikame ederek GP hamur numuneler üretmişlerdir (Kouamo ve ark. 2012). Bu numuneler üzerinde basınç dayanımı ölçümleri, XRD, FTIR ve SEM analizleri gerçekleştirerek aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

• XRD ve FTIR analizleri, MK esaslı GP bağlayıcıların, VK esaslı GP bağlayıcılardan daha fazla geopolimerik faza sahip olduğunu göstermiştir.

• Basınç dayanımı ölçümleri, MK'ye %20 ve VK'ye %40 Al_2O_3 ikamesinin basınç dayanımını sırasıyla %18.1 ve %32.4 artırdığını göstermiştir. Al_2O_3 ikamesi, belirtilen orandan fazla MK esaslı GP bağlayıcıya katkı sağlamazken, reaktivitesi düşük VK esaslı GP bağlayıcıya %40'a kadar önemli yarar sağlamıştır.

• SEM görüntüleri, MK esaslı GP numunelerin daha fazla homojen yapıya sahip olduğunu göstermiştir. VK esaslı GP numunelerde ise reaksiyona kısmen girmiş veya hiç girmemiş VK taneciklerinin ve mikro-çatlakların bulunduğu, ancak Al_2O_3 ikamesinin mikro-çatlak ve reaksiyona girmemiş tanecik miktarını azaltarak daha homojen yapı oluşturduğu gözlenmiştir.

Atis ve ark., FA esaslı GP harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarına SH molaritesi, kür sıcaklığı ve kür süresinin etkisini incelemişlerdir (Atiş ve ark. 2015). 45 °C'den 115 °C'ye 10 °C'lik adımlarla kür sıcaklığını, %4'ten %20'ye kadar SH çözeltisindeki Na içeriğini %2 artırarak SH molaritesini araştırmışlardır.

Çalışmada %14 (15.49 Mol) derişime sahip SH çözeltisiyle aktive edilip 115 °C'de 24 saat kür edilen karışımda en yüksek basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla 120 MPa ve 15 MPa olarak elde edilmiştir.

Ariffin ve ark., sülfürik asidin, palm yağı kabuğu külü ve uçucu külden oluşan toz bağlayıcı ile ürettikleri GP beton numunelere etkilerini araştırmışlardır (Ariffin ve ark. 2013). Karışımın a/b oranını 0.4, SS/SH oranını 2.5 alarak hazırladıkları GP betonu oda sıcaklığında kür ederek 28. günde basınç dayanımını 28 MPa ve karışımın s/ç oranını 0.59 alarak hazırladıkları PC betonun 28. günde basınç dayanımını 27 MPa olarak tespit etmişlerdir. Basınç dayanımları ve çökme değerleri birbirine yakın olan bu iki betonu, 18 ay boyunca % 2 sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisinde bekletip, periyodik olarak bu numunelerin, şekil, ağırlık, dayanım ve mikroyapı açısından değişimlerini gözlemlemişlerdir.

Buna göre 18 ayın sonunda GP betonun basınç dayanımı kaybı % 35 olurken, PC betonun basınç dayanımı kaybı % 68 olarak kaydedilmiştir. Ağırlık kaybı ve şekilsel değişim açısından da GP betonun, PC betondan üstün olduğu tespit edilmiştir.

XRD, FTIR, TGA/DTG ve SEM-EDX ile yapılan mikroyapı analizleri ve bu analizler üzerine yapılan detaylı değerlendirmeler, sülfürik asit tesirine maruz kalan betonun kalıcılığını etkileyen temel faktörün bağlayıcı jelin yapısı olduğunu saptamışlardır. Buna göre PC betonun, Ca içeriği fazla olan C-S-H jelleri yapısal olarak sülfürik asitten önemli derecede etkilenirken, GP betonun sahip olduğu N-A-S-H jel yapısı aynı ortamdan neredeyse hiç etkilenmemektedir.

Bakharev, derişimleri % 5 olan asetik asit ve sülfürik asit ortamlarının, SH, SS ve SH + KOH çözeltileri ile aktive edilmiş F-FA esaslı GP hamurlara etkilerini araştırmıştır (Bakharev 2005). 5 ayın sonunda her iki asit ortamı için de GP numunelerde şekil ve renk değişimi ile kütle kaybı çok az olurken, PC esaslı numunelerde çok önemli şekil ve renk değişimleri yaşanmıştır. Bu süreçte, asetik asit ortamına maruz bırakılan GP numunelerden yalnız SH ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımlarında sürekli düşüş yaşanırken, diğerlerinde azalmalardan sonra artışlar meydana gelerek dalgalanmalar olmuştur. Sülfürik asit ortamında ise 2 ayın sonunda bütün numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma % 80'den fazla olurken, yalnız SH ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma 5 ayın sonunda % 17.5 olmuştur. Asit etkisi ile oluşan mikroyapısal değişimi gözlemlemek için kullanılan XRD, FTIR, BET ve SEM analizlerinden aşağıdaki durumlar tespit edilmiştir:

• Geopolimerlerin asit ortamındaki bozulması çoğunlukla alüminosilikat polimerlerin depolimerizasyonundan ve yeni zeolitik yapıların oluşmasından kaynaklanmaktadır.

• Toplam boşluk hacmi diğer GP numunelerinkinden çok fazla olan yalnız SH ile üretilen numunelerin asit direncinin çok daha iyi olması, SH'li numunelerin sahip oldukları boşlukların ebatlarının küçük olmasından dolayı asitin iç-yapıda hareketinin zorlaşması ve böylece etkisinin azalması ile açıklanabilir.

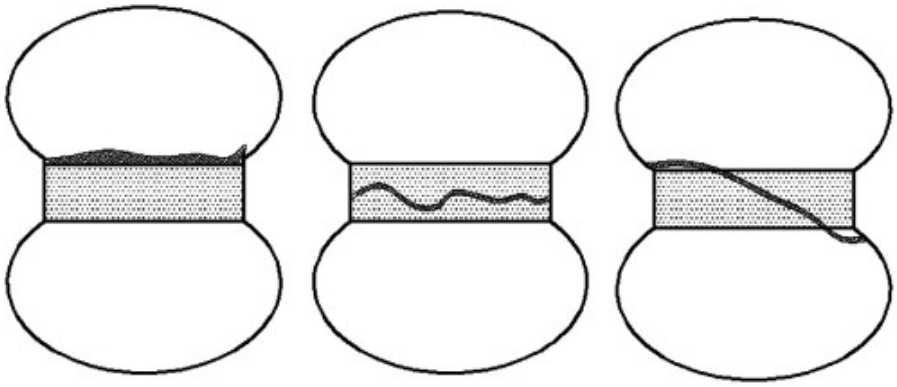
• GP bağlayıcıların PC bağlayıcılara nispeten asit dirençlerinin iyi olmasında, GP bağlayıcıların Ca içeriklerinin düşük olması ve çapraz bağlı polimer zincirlere sahip olmaları etkili olmaktadır.

Hu ve ark., birincisi PC, ikincisi MK esaslı GP ve sonuncusu cüruf katkılı MK esaslı GP olmak üzere üç tamir hamurunun basınç dayanımı, yapışma gücü (bağ) dayanımı ve aşınma direnci performanslarını test etmişlerdir (Hu ve ark. 2008). Bu çalışmada, PC tamir hamurunun ilk günlerdeki basınç dayanımı, GP tamir hamurlarının basınç dayanımlarından düşük; nihai basınç dayanımlarından ise yüksek olmuştur. Kalsiyum içeriği oldukça yüksek olan cürufun katkı olarak kullanıldığı tamir hamurunun priz süresi kısaldığı gibi dayanım kazanma hızı da artmıştır. Bağ dayanımını ölçmek için daha önceden hazırladıkları ve yeterli dayanıma erişmiş PC harç elemanları, bu tamir harçlarıyla birbirine yapıştırmışlardır. Bağ dayanımı testleri, 8 saat, 1, 3, 7 ve 28 gün sonunda belirlenmiştir (Çizelge 2.1.). PC, katkısız GP ve katkılı GP hamurlarının 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 46.1, 40.9 ve 44.5 MPa olarak birbirine çok yakın olmasına karşın, GP tamir karışımlarının bağ dayanımı PC tamir karışımının bağ dayanımından daha iyi olmuştur.

Çizelge 2.1. GP tamir malzemesinin bağ dayanımı ve kırılma tarzı

Tamir Karışımı	Bağ Dayanımı (MPa)					Kırılma Tarzı				
	8 s	1 g	3 g	7 g	28 g	8 s	1 g	3 g	7 g	28 g
PC	-	-	0.34	1.17	1.95	B	A	A	A	A
Katkısız GP	0.42	1.23	2.34	2.43	2.91	B	B	C	C	C
Katkılı GP	0.45	1.27	2.40	2.47	3.04	B	B	C	C	C

Ayrıca bu testler, kırılma işleminin Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi üç farklı tarzda gerçekleştiğini göstermiştir. PC tamir malzemeli örneklerin genel itibariyle Tarz A ile kırılmaları, bu malzemenin ara-yüzey bağ kuvvetinin zayıf olduğunu göstermektedir. GP tamir malzemeli örneklerin Tarz B ve Tarz C ile kırılmaları, taze malzemede bulunan alkali aktivatör ile sertleşmiş durumdaki PC harç eleman yüzeyi arasında reaksiyonların gelişerek bağ dayanımının arttığına işaret etmektedir.



Şekil 2.1. Tamir malzemelerinin kırılma tarzları

Çalışma, aşınma direncinin test yaşının artmasıyla arttığını göstermiştir. Ayrıca GP hamurun aşınma direncinin, PC hamurun aşınma direncinden önemli bir derecede daha iyi olduğunu göstermiştir.

Zhao ve ark., biri yüksek dayanıma sahip PC beton, diğer üçü %10, 30 ve 50 cüruf katkılı (ikame) FA esaslı GP beton olmak üzere 4 numune grubunun donma-çözülme performanslarını, ASTM C666 standardına göre araştırmışlardır (Zhao ve ark. 2019). Yüzde 10 cüruf katkılı GP beton, birkaç donma-çözülme döngüsünden sonra parçalanmıştır. Yüzde 30 cüruf katkılı GP betonda ise ilk 25 döngünün sonunda önemli bir ağırlık kaybı yaşanmazken, 50 döngünün sonunda yüzeyde soyulmalar gerçekleşmesi neticesinde %2'ye yakın kütle kaybı ve %40'ın üzerinde basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. Yüzde 50 cüruf katkılı GP betonun basınç dayanımı kaybı, 225 döngüye kadar %25'i aşmazken, sonraki 75 döngüde dayanım kaybı, önemli oranda hızlanmıştır. PC betonun basınç dayanımı kaybı, 300 döngünün sonunda %25 değerine yakın olmuştur.

Mikroyapı gözlemleri, donma-çözülme döngüleri sonrası GP betonlardaki dayanım kayıplarının bağlayıcı hamurda oluşan mikro-çatlaklardan kaynaklandığını göstermiştir. PC betonlarda ise 225 döngünün sonunda gözlemlenen numunenin bağlayıcı hamurunda mikro-çatlaklara rastlanmamış, sadece hafif soyulmaların olduğu tespit edilmiştir. XRD ve MIP (Mercury Intrusion Porosimetry - Cıva Püskürtmeli Porozimetre) analizleri, %10 cüruf katkılı GP betonda temel reaksiyon ürününün N-A-S-H olduğunu ve N-A-S-H jelinin, donma-çözülme performansının düşük olmasına sebep olan çok miktarda geçiş boşluklarına (0.1–0.01 μm boyut aralığında) sahip olduğunu göstermiştir. Cüruf içeriğinin artması, C-S-H ve C-A-S-H jel miktarlarını arttırıp bağlayıcı hamuru

daha yoğun bir yapıya dönüştürdüğünden dolayı %50 cüruf katkılı GP betonun donma-çözülme performansı, diğer GP betonlara göre daha iyi olmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler ile bu malzemelerin özellikleri ve deneysel çalışmada kullanılan yöntemler açıklanacaktır.

3.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında teste tabi tutulan PGP hamur, harç ve beton numunelerin üretilmesinde kullanılan malzemeler ile ilgili açıklamalar bu kısmın içeriğini oluşturmaktadır.

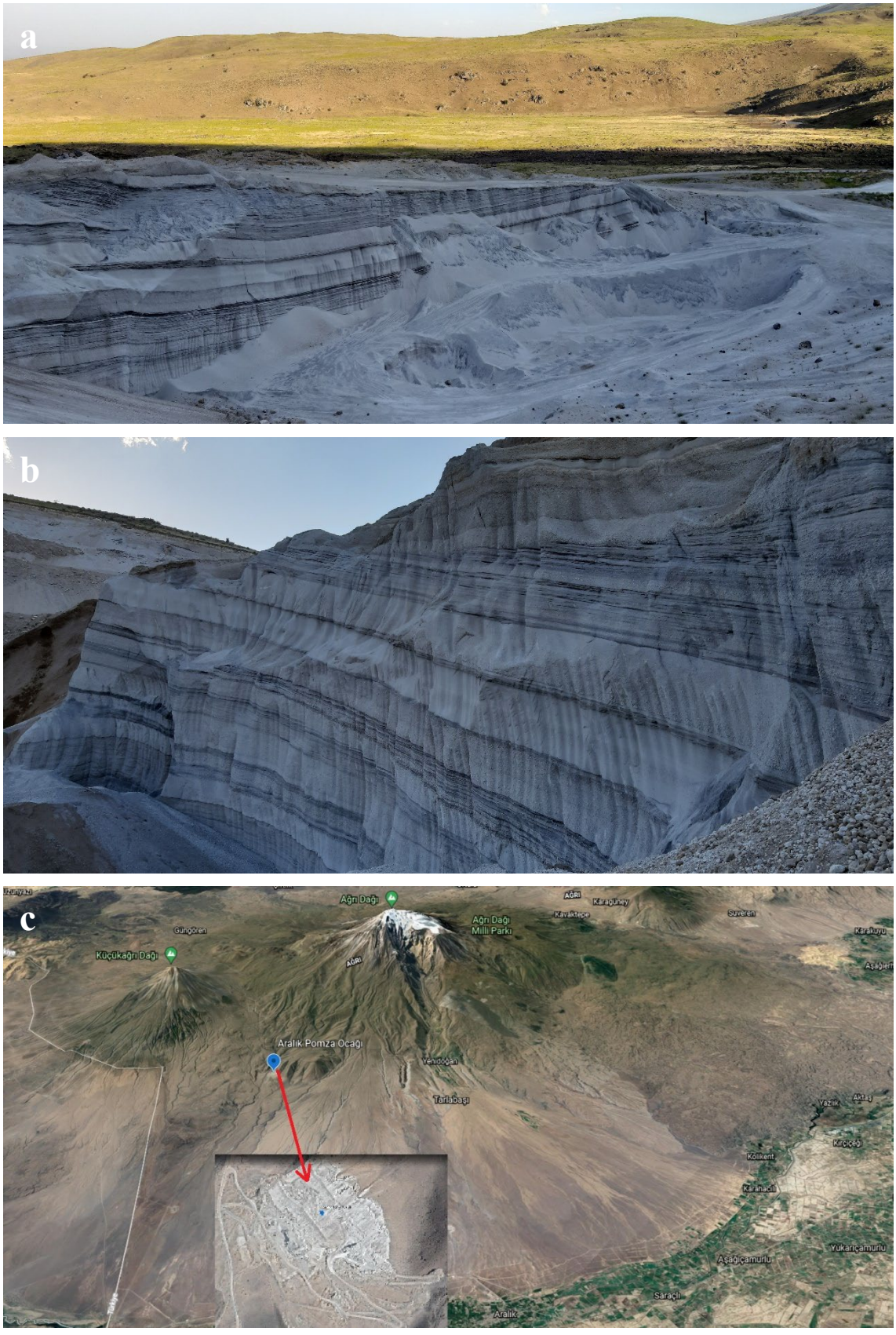
3.1.1. Toz Bağlayıcı

Geopolimer üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak pomza, FA ve AC kullanılmıştır. Ayrıca bu geopolimerleri kıyaslamak için Portland Çimentosu kullanılarak şahit numuneler üretilmiştir. Toz bağlayıcı olarak kullanılan pomza, Küçük Ağrı Dağı'ndan (Aralık-Iğdır) sağlanmıştır. Bu pomza, yerel firmalarca bölme duvar briketlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Ocaktan iri taneli halde elde edilen pomza, reaktivitesini artırmak amacıyla, bilyalı öğütücüde öğütülmüştür. XRD ve FTIR analizleri için hamur, harç ve betonlardan alınan örnekler halkalı öğütücüde öğütülmüştür. Çalışmada kullanılan bilyalı ve halkalı öğütücüler Şekil 3.1.'de verilmiştir.



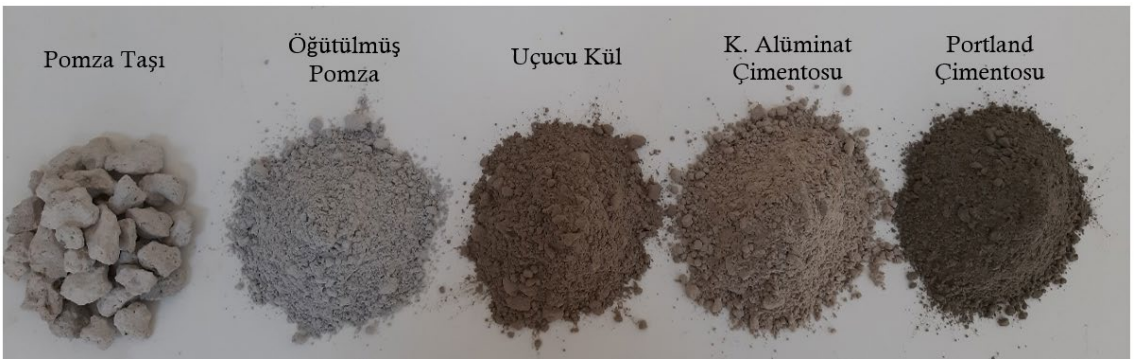
Şekil 3.1. Malzemelerin öğütülmesinde kullanılan öğütücüler

Kıyaslamak amacıyla ilk olarak hem bilyalı hem de halkalı öğütücü ile pomza taşı öğütülmüştür. Halkalı öğütücüyle agreganın öğütülmesi, zahmetli ve sürekli malzeme ekleyip boşaltma gerektirdiğinden çalışma, bilyalı öğütücü ile öğütülen malzemeyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.'de pomza ocağının farklı bölgelerinden çekilmiş resimleri ile uydu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.2. Pomza ocağına ait resimler: (a) ve (b) Ocağın farklı bölgelerinden çekilmiş resimleri; (c) Ocağın uydu görüntüsü

Pomzaya ikame edilen uçucu kül (FA), Çatalağzı Termik Santrali'nden (Zonguldak) temin edilmiştir. Kalsiyum Alüminat Çimentosu (AC) olarak ÇİMSA tarafından üretilen ve torbalanmış halde satılan Refro 50 ürünü kullanılmıştır. Çalışmada toz bağlayıcı olarak kullanılan Pomza, FA, AC ve PC, Şekil 3.3.'te verilmiştir. AC ve PC'nin havadaki nem ile reaksiyona girerek prehidratasyona uğramaması için nemden arındırılmış halde muhafaza edilmişlerdir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcılar

Çizelge 3.1.'de, PGP üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan toz bağlayıcıların ve PC'nin X-Işını Floresansı (XRF) yöntemiyle elde edilen kimyasal içerikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan çimento ve puzolanların kimyasal kompozisyonları

Toz Bağlayıcı	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOSS
Pomza	3.56	67.49	13.07	3.98	0.69	2.63	2.36	0.18	3.69
Uçucu Kül	2.46	55.51	23.09	6.64	1.58	0.14	3.56	0.24	1.63
Alüminat Çimento.	37.60	4.50	52.90	1.29	0.78	0.00	0.46	0.03	0.25
Portland Çimentosu	63.60	19.42	4.68	2.93	1.43	0.38	0.44	2.49	2.65

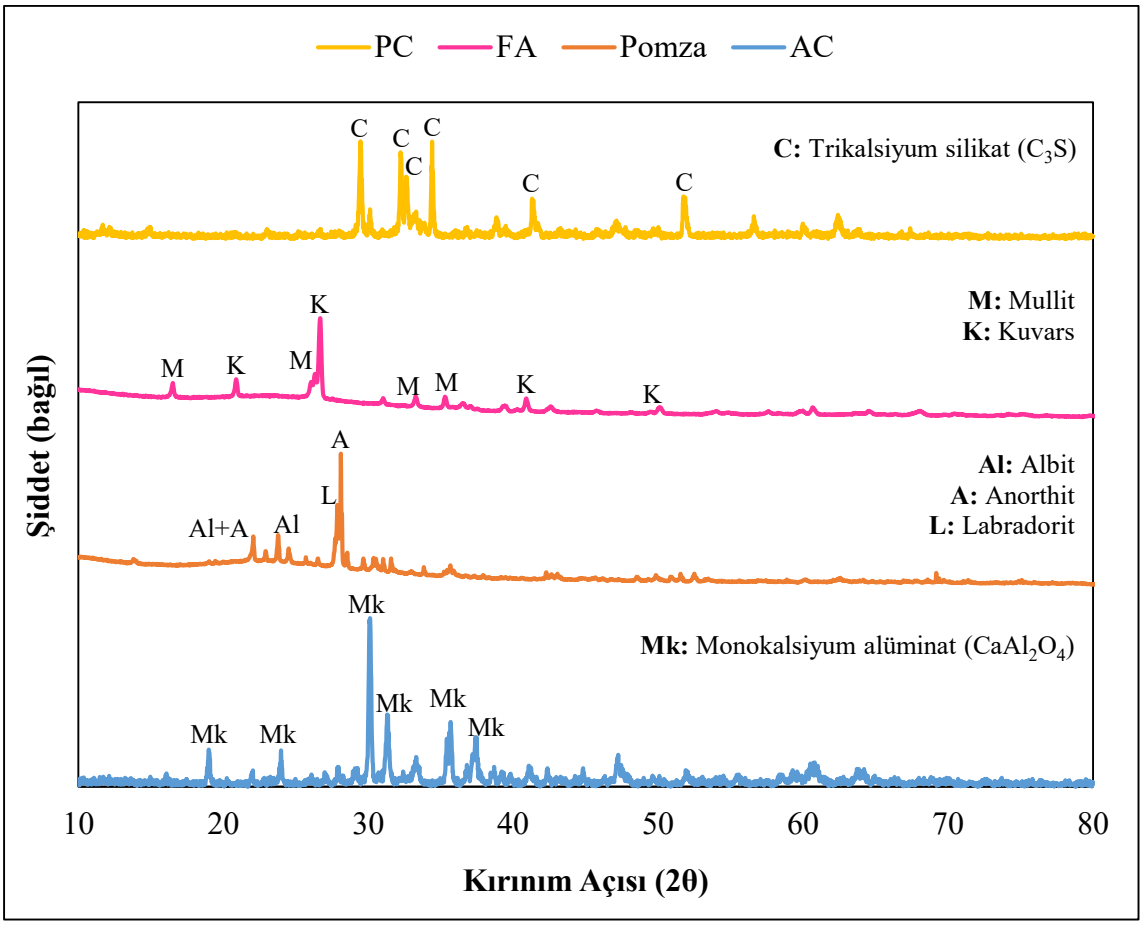
LOSS: Kızdırma kaybı (Loss on ignition)

Çalışmadaki kontrol numunelerinin üretilmesinde, Ağrı Çimento Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 197-1'e uyumlu CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çimento ve puzolanlara ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan çimento ve puzolanların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

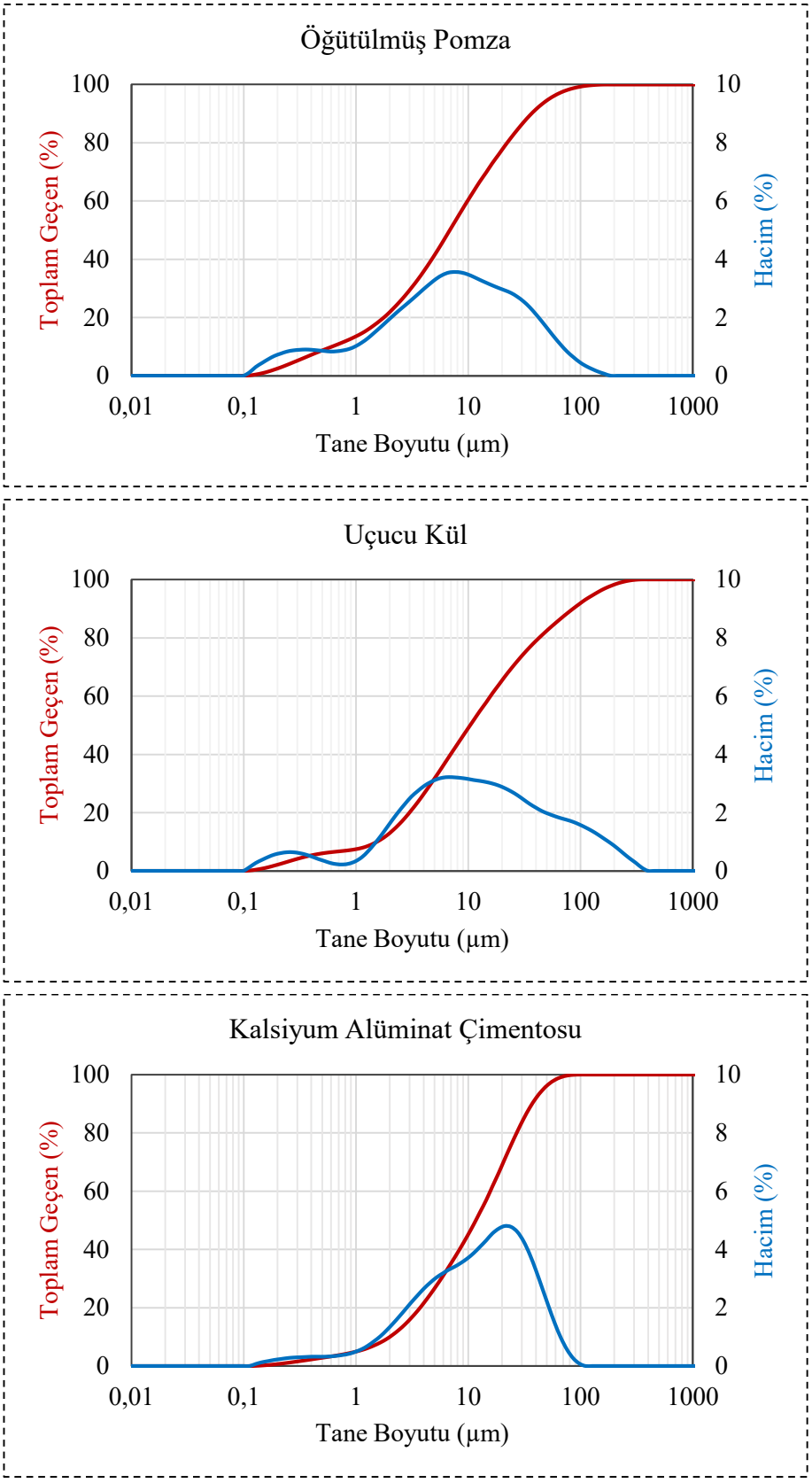
Toz Bağlayıcı	Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)	Dayanım Aktivite İndeksi	Basınç Dayanımı (MPa)
Pomza	2.67	4980	74.2	-
Uçucu Kül	2.13	3805	84.5	-
Alüminat Çimentosu	3.03	3600	-	24 saat ≥ 60
Portland Çimentosu	3.12	3650	-	28 gün ≥ 60

Şekil 3.4.'te ise pomza ve uçucu külün X-Işını Kırınımı (XRD) metodu analizleri verilmiştir. Şekil 3.4.'ten de görülebileceği gibi PGP üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılacak toz bağlayıcılarda birbirinden farklı minerallere rastlanmaktadır.



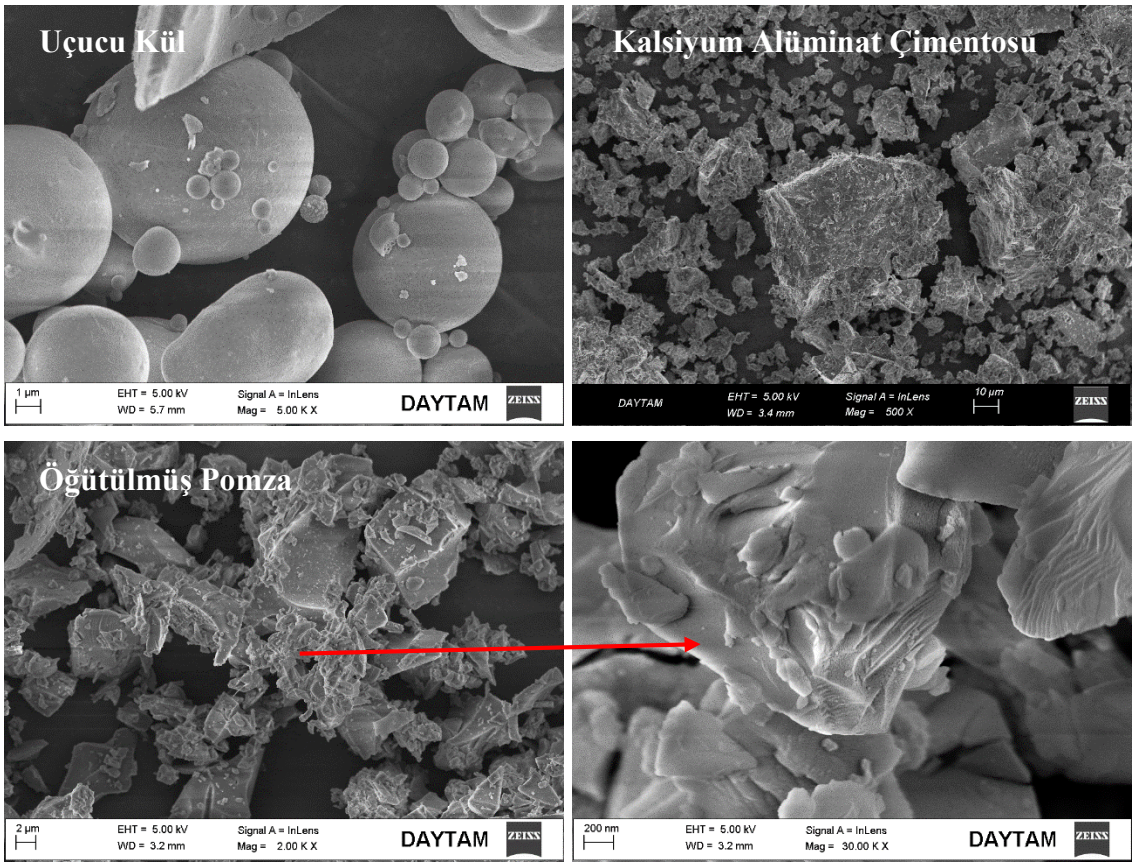
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcıların XRD grafikleri

PGP üretiminde toz bağlayıcı olarak kullanılan pomza, FA ve AC'nin tane boyutu dağılımı, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda (ÇÜMERLAB) Malvern Panalytical marka, Mastersizer 3000 model cihaz ile belirlenmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Toz bağlayıcıların tane boyutu dağılımı

Toz bağlayıcıların SEM görüntüleri uçucu külün küresel şekle sahip olduğunu buna karşın öğütülmüş pomzanın ise düzgün bir şekle sahip olmadığını ve köşeli yapıda olduğunu göstermektedir (Şekil 3.6.). Bu durum, pomza taneciklerinin yüzey alanın ıslatılması için daha fazla sıvı ihtiyacı olduğu hakkında fikir vermektedir. Daha önce yapılan çalışmalar ve bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ön deneyler de bunu doğrular niteliktedir. AC taneciklerinin de pomza taneciklerine benzer olarak düzensiz bir şekle sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6. Toz bağlayıcıların SEM görüntüleri

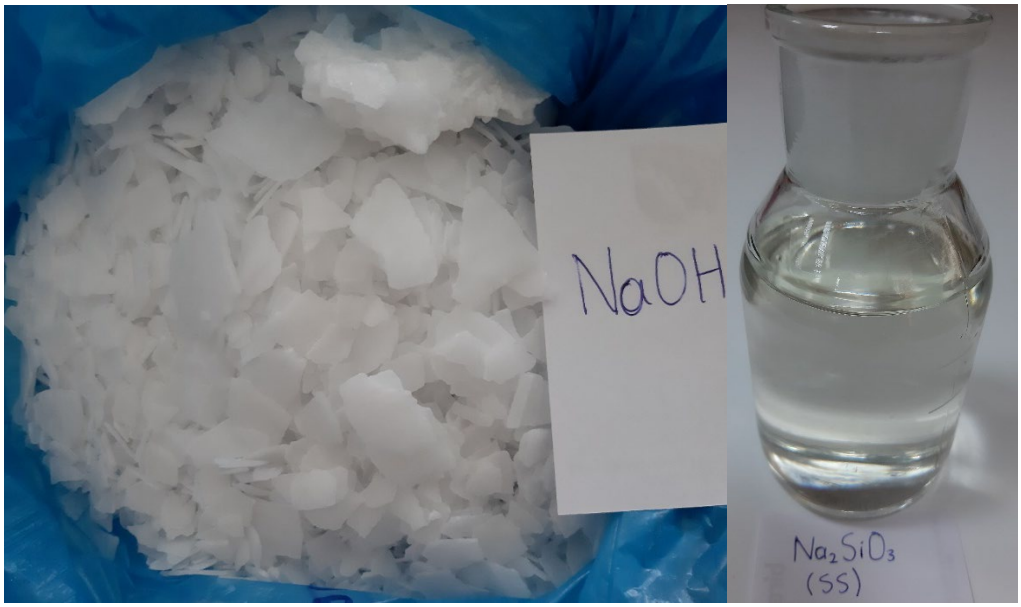
3.1.2. Alkali Aktivatör

Toz bağlayıcıları aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH, SH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3, SS) kullanılmıştır. SH ve SS aktivatörleri kimyasal malzemeler üreten "Pozitif Kimya" (İstanbul) firmasından sağlanmıştır. Alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Alkali aktivatörlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	SH (katı)	SS (sıvı)
Moleküler formül	NaOH	$Na_2O.2SiO_2$
Moleküler ağırlık (g/mol)	40.01	182.15
Renk	Beyaz	Jel (Renksiz)
Yoğunluk (g/cm^3)	2.13	1.39
Na_2O içeriği (%)	-	12.00
SiO_2 içeriği (%)	-	24.50
H_2O içeriği (%)	-	63.50

SH, katı halde, SS ise sıvı halde temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu alkalilerin temin edildikleri halleri Şekil 3.7.'de verilmiştir. SS olduğu haliyle, SH ise karışıma bağlı olarak farklı molaritelere sahip çözeltiler haline getirildikten sonra kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler

3.1.3. Agrega

PGP harç numunelerin üretilmesinde agrega olarak Limak Trakya Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 196-1'e uygun maksimum tane boyutu 2 mm olan CEN Standart Kum'u kullanılmıştır. Çizelge 3.4.'te standart kumun elek analizi ve ilgili standartta sahip olması gereken sınır değerler verilmiştir (TS-EN-196-1 2009).

Çizelge 3.4. Standart kumun sahip olması gereken sınır değerler ve elek analizi

Elek göz açıklığı (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Elek üzerinde kalan yığışımlı (%)	0.0	10.8	30.3	65.0	87.9	98.4
Sınır değerler (TS EN 196-1)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

PGP beton numunelerin üretilmesinde kullanılan agregalar, Iğdır'da beton kilit taşı ve kanalizasyon borusu gibi prefabrik (ön üretimli) elemanlar üreten Hakra İnşaat firmasından sağlanmıştır. Bu agregalar aynı firma tarafından hem hazır beton hem de prefabrik beton elemanların imalatında kullanılmaktadır. Üç boy sınıfına ayrılmış halde temin edilen agregalar, uygun gradasyonun elde dilmesi için belirli miktarlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Boy sınıflarına ayrılmış olan agregaların elek analizi, bu agregalardan elde edilen kombinasyon ve ilgili standarttaki sınır değerler, Çizelge 3.5.'te gösterilmiştir (TS-802 2016).

Çizelge 3.5. Beton karışımların üretiminde kullanılan agregaların elek analizi

Elek Göz Açıklığı	**Agrega Boy Sınıfları**				
	0-5	5-12	12-19	**Kombinasyon**	**TS 802:2016**
16.0 mm	100.0	100.0	93.5	98.5	85-99
11.2 mm	100.0	98.2	2.1	77.1	68-90
8.0 mm	100.0	63.6	0.0	68.6	48-77
4.0 mm	97.1	1.7	0.0	52.8	33-64
2.0 mm	73.6	0.0	0.0	39.7	22-52
1.0 mm	54.6	0.0	0.0	29.5	15-41
0.5 mm	26.3	0.0	0.0	14.2	10-30
250 µm	12.1	0.0	0.0	6.5	6-20
125 µm	5.7	0.0	0.0	3.1	3-11
63 µm	2.3	0.0	0.0	1.2	1-5

Kombinasyon: %54*(0-5) + %23*(5-12) + %23*(12-19)

Beton karışımlarında kullanılan agregaların bazı fiziksel özellikleri, Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Beton karışımlarda kullanılan agregaların bazı fiziksel özellikleri

Agrega Sınıfı	Özgül Ağırlık *	Su Emme (%)	Kaynak
0 – 5 (kum)	2.71	1.6	Dere agregası
5 – 12	2.83	1.1	Ocak agregası (kırmataş)
12 – 19	2.84	1.0	Ocak agregası (kırmataş)

* Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta özgül ağırlık

Harç karışımların üretilmesinde kullanılan standart kum ile beton karışımların üretilmesinde kullanılan ince ve iri agregaların resmi, Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Harç ve beton karışımlarında kullanılan agregalar

3.1.4. Su

SH çözeltisinin hazırlanmasında, yabancı maddelerin muhtemel yan etkilerini gidermek için saf su kullanılmıştır. PGP harç ve beton karışımların üretilmesinde kullanılan ek su ve beton numunelerin basınç altında su işleme derinliğinin tayininde tüketilen su, şehir şebeke suyundan elde edilen musluk suyudur.

3.2. Metot

Deneylere tabi tutulan PGP numunelerin, karışıma hazırlanmaları, karışım oranları, üretim işlemleri, kür rejimleri ve teste tabi tutulmaları gibi süreçlerde kullanılan yöntemlerin açıklanması bu kısmın içeriğini oluşturmaktadır.

3.2.1. Karışıma Girecek Bileşenlerin Hazırlanması

Uçucu kül ve öğütülen pomza, PGP hamurun karıştırma işleminden önce 24 saat boyunca 105 °C'de etüvde bekletilmiştir. Pul (payet) halinde bulunan katı SH tanecikleri,

hazırlanan çözeltinin aşırı ısınmasını engellemek için saf suya aşamalı olarak eklenmiştir. Farklı molaritelere sahip SH çözeltilerinin hazırlanmasında Hardjito ve Rangan tarafından belirtilen değerler kullanılmıştır (Hardjito ve Rangan 2005). Buna göre konsantrasyonu 8 molar (M) olarak seçilen SH çözeltisinin hazırlanmasında, 1 kg SH çözeltisi için 262 g NaOH katısı ve 10, 12 ve 14 M için sırasıyla 314, 361 ve 404 g NaOH katısı kullanılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlanarak hazır hale getirilen SH çözeltisi, 24 saat bekletildikten sonra SS çözeltisiyle karıştırılmıştır. Hamur numunelerin üretilmesinde, iki çözeltinin birbirinin içerisinde tam çözünebilmesi için SS-SH karışımı 24 saat bekletildikten sonra kullanılmıştır (Davidovits 2002; Hardjito ve Rangan 2005). Harç ve beton numunelerin üretiminde ise SH ve SS çözeltileri 5 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra 1 saat bekletilerek kullanılmıştır (Kantarcı 2018).

Beton üretiminde kullanılan agreganın yüzeyindeki ince malzemeyi gidermek için agregalar yıkanmıştır. Yıkama işleminden sonra agregalar açıkta kurumaya bırakılarak hava kurusu halde kullanılmışlardır.

3.2.2. Agrega Deneyleri

İri agreganın özgül ağırlık ve su emme kapasitesi hem özgül ağırlık sehpası hem de piknometre ile elde edilirken, ince agreganın özgül ağırlık ve su emme kapasitesi piknometre ile elde edilmiştir. Şekil 3.9.'da, çalışmada kullanılan özgül ağırlık sehpasının resmi ve Abraham Hunisi ile ince agreganın doygun-yüzey kuru hale getirilmesi verilmiştir. Agregaların elek analizi, 2 farklı elek setiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan özgül ağırlık sehpası

3.2.3. Karışım Oranları

PGP hamur, harç ve betonların karışım oranları, genel olarak bütün karışımların kabul edilebilir bir kıvama sahip olacağı şekilde tasarlanmıştır. Bu karışımlara ait karışım oranları farklı başlıklar halinde ele alınmıştır.

3.2.3.1. PGP Hamurların Karışım Oranları

Kür koşullarının, PGP hamurların özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait karışım oranları Çizelge 3.7.'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kür koşulları etkisinin araştırıldığı çalışmanın karışım oranları

Pomza (g)	FA (g)	10 M SH (g)	SS (g)	a/b	SS/SH
2940	1260	630	1260	0.45	2

Alkali aktivatör içeriğinin PGP hamurların özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait karışım oranları Çizelge 3.8.'de verilmiştir. Kür etkisinin araştırıldığı ilk çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da alkali aktivatörün toz bağlayıcıya ağırlıkça oranı 0.45 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.8. Alkali aktivatör etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait karışım oranları

Karışım	Pomza (g)	FA (g)	SH (g)	SS (g)	SH (M)	SS/SH
8-0	90.0	30.0	54.0	0.0	8	0
8-1			27.0	27.0		1
8-2			18.0	36.0		2
8-3			13.5	40.5		3
10-0	90.0	30.0	54.0	0.0	10	0
10-1			27.0	27.0		1
10-2			18.0	36.0		2
10-3			13.5	40.5		3
12-0	90.0	30.0	54.0	0.0	12	0
12-1			27.0	27.0		1
12-2			18.0	36.0		2
12-3			13.5	40.5		3
14-0	90.0	30.0	54.0	0.0	14	0
14-1			27.0	27.0		1
14-2			18.0	36.0		2
14-3			13.5	40.5		3

Bu çalışmada karışımların isimlendirilmesinde SH'nin konsantrasyonu (molaritesi) ve SS/SH oranı kullanılmıştır. Buna göre ilk sayı, SH'nin molaritesini (M), ikinci sayı ise SS/SH oranını ifade etmektedir.

3.2.3.2. GP Harçların Karışım Oranları

TS EN 196-1'e göre çimentoların basınç dayanımını belirlemek için üretilecek harçlarda, ağırlıkça kumun çimentoya (toz bağlayıcıya) oranı, 3.0'dır (TS-EN-196-1 2009). Yang ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kum ağırlığının toz bağlayıcı ağırlığına oranının 2.5 değerine kadar yükselmesiyle GP harçların basınç dayanımının arttığı ancak bu değerin üstündeki oranlarda basınç dayanımında önemli ölçüde düşüşlerin olduğu tespit edilmiştir (Yang ve ark. 2009). Sözü edilen çalışmada, bu konuda daha çok çalışma yapılması gerektiği ve GP çimentoların basınç dayanımlarının belirlenmesinde PC çimentolara kıyasla daha düşük kum-toz bağlayıcı oranı kullanılabileceği ifade edilmektedir. Ön deneylerde benzer bir durumu tespit etmemize karşın, standartta belirtilen kum-toz bağlayıcı oranı olan 3.0 değeri kullanılmıştır. Bu kum-toz bağlayıcı oranı ile üretilen PGP harçların işlenebilirliği yeterli düzeyde olmadığından ek-su kullanılmıştır. Fakat ek-su ile PGP harçların basınç dayanımlarında düşüş olacağı beklenmektedir. Hardjito ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada,

PC betonlarda su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ters ilişkiye benzer bir durumun, GP betonlarda su/katılar oranı ile basınç dayanımı arasında da olduğu tespit edilmiştir (Hardjito ve ark. 2004).

PGP harçlarla gerçekleştirilen çalışmaya ait karışım oranları Çizelge 3.9.'da verilmiştir. Ayrıca PGP harçları kıyaslamak için PC CEM I 42.5 R ile standart harç karışım üretilmiştir. Standarda uygun olarak bu karışımda, suyun çimentoya oranı 0.5 ve standart kumun çimentoya oranı 3.0 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.9. PGP harçların karışım oranları

Karışım	Pomza (g)	FA (g)	AC (g)	SH (g)	SS (g)	Kum (g)	Ek-su (g)
Pomza	450	-	-	75	172.5	1450	30
0FA-**10**AC	405	-	45	75	172.5	1450	30
0FA-**20**AC	360	-	90	75	172.5	1450	30
0FA-**30**AC	315	-	135	75	172.5	1450	30
10FA-**0**AC	405	45	-	75	172.5	1450	30
10FA-**10**AC	360	45	45	75	172.5	1450	30
10FA-**20**AC	315	45	90	75	172.5	1450	30
10FA-**30**AC	270	45	135	75	172.5	1450	30
20FA-**0**AC	360	90	-	75	172.5	1450	30
20FA-**10**AC	315	90	45	75	172.5	1450	30
20FA-**20**AC	270	90	90	75	172.5	1450	30
20FA-**30**AC	225	90	135	75	172.5	1450	30
30FA-**0**AC	315	135	-	75	172.5	1450	30
30FA-**10**AC	270	135	45	75	172.5	1450	30
30FA-**20**AC	225	135	90	75	172.5	1450	30
30FA-**30**AC	180	135	135	75	172.5	1450	30

PGP harçların karışım oranlarının belirlenmesinde kıvamı en düşük olan Pomza karışımının kabul edilebilir bir işlenebilirliğe ulaşması hedeflenmiştir. PGP'lerin su ihtiyacı fazla olduğu için karıştırma, kalıplara yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerine imkan sağlayacak en düşük sıvı içeriği esas alınmıştır. Buna göre a/b oranı 0.55 alınarak ve her karışıma 30 g ek-su ilave ederek bütün karışımlar hazırlanmıştır. Gerek hamur numunelerle yapılan çalışma gerekse ön deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında SS/SH oranı 2.3 olarak alınmıştır. PGP harç karışımların isimlendirilmesi, içerdikleri FA ve/veya AC içeriğine göre yapılmıştır. İkame yüzdeleri, bu toz bağlayıcıların önüne yazılarak isimlendirme yapılmıştır. Referans harç ise Portland Çimentosu'nun baş harfleriyle ifade edilmiştir (PC). Portland çimentosu, uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu için

kısaltma yapılırken isimlerinin baş harfleri değil de sırasıyla PC, FA ve AC kullanılmıştır. Bunun sebebi, numuneler üretilirken bu kısaltmaların kullanılmış olmasıdır. Bir karışıklık olmaması için burada da bu kısaltmalar kullanılmıştır.

3.2.3.3. PGP Betonların Karışım Oranları

Betonlarla yapılan çalışmanın karışım oranları ve bu oranlara bağlı isimlendirmeler, Çizelge 3.10.'da görülmektedir. Bu isimler, harç karışımlarla yapılan çalışmayla aynıdır.

Çizelge 3.10. Betonların karışım oranları

Karışım	Pomza (kg)	FA (kg)	AC (kg)	SH (kg)	SS (kg)	Agr. (kg)	Ek-su (kg)
30FA-**0**AC	8.155	3.495	-	1.942	4.468	51.876	0.750
30FA-**10**AC	6.990	3.495	1.165	1.942	4.468	51.876	0.750
30FA-**20**AC	5.825	3.495	2.330	1.942	4.468	51.876	0.750
	Portland Çimentosu (kg)			Su (kg)		Agrega (kg)	
PC	11.650			5.825		51.876	

PGP harç numunelerle gerçekleştirilen çalışmanın ışığında, taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri iyi olan 3 karışım seçilmiştir. Seçilen bu üç PGP karışım ve referans karışım ile beton numuneler hazırlanmış ve mekanik özellikleri ve durabiliteleri daha detaylı incelenmiştir. Bu üç karışımın seçiminde, %30 FA ikamesinin hem mekanik özellikleri iyileştirmesi hem de özellikle işlenebilirliği arttırması, belirleyici olmuştur. Bu yüzden üç PGP karışımında da %30 FA, pomzaya ikame edilmiştir. Diğer taraftan AC içeriğinin sağladığı üstün mekanik özellik ve durabiliteden dolayı belli bir miktar kullanılması kararlaştırılmıştır. Hem FA'ye göre pahalı olması hem de harçlarla yapılan çalışmada %20 ikame miktarından fazla kullanıldığında dayanım gelişimine etkisinin azalmasından dolayı AC içeriği, %20 ile sınırlandırılmıştır. GP betonların SS/SH ve a/b oranları, PGP harç karışımlarında olduğu gibi sırasıyla 2.3 ve 0.55 olarak alınmıştır. PC betonun su/çimento oranı, PC harç karışımında olduğu gibi 0.5 olarak alınmıştır.

3.2.4. Karıştırma

Hamur karışımların karıştırma işlemine pomza ve uçucu kül katılarının miksere eklenmesiyle başlanmıştır (Şekil 3.10.). Toz bağlayıcılar 5 dakika karıştırıldıktan sonra daha önce hazırlanan alkali aktivatörler, toz bağlayıcı karışımına yavaş yavaş eklenerek karıştırma işlemine 5 dakika daha devam edilerek bu işlem tamamlanmıştır.



Şekil 3.10. PGP hamur karışımının hazırlanması

Harç karışımların karıştırma işlemi de benzer şekilde katı malzemelerin homojen dağılımı sağlandıktan sonra alkali aktivatör eklenmiştir. Buna göre pomzaya FA (eğer varsa) ve AC (eğer varsa) eklenerek mikserde 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda standart kum eklenerek 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Katılardan oluşan bu karışım homojenleştirildikten sonra aralıklı olarak alkali aktivatör ve ek-su eklenerek sırasıyla 3 ve 2 dakika süreyle karıştırmaya devam edilerek bu işlem 15 dakikada tamamlanmıştır.

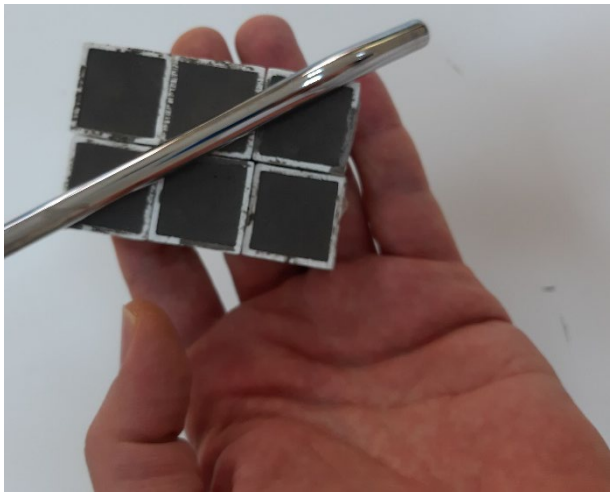
Hamur ve harç karışımlarda olduğu gibi beton karışımlarda da katıların homojen dağılımı sağlandıktan sonra sıvı malzemeler eklenmiştir. Toz bağlayıcılar pan tipi mikserde 5 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra agrega eklenerek 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu sürenin ardından aralıklı olarak alkali aktivatör ve ek su eklenerek sırasıyla 3 ve 2 dakika süreyle karıştırmaya devam edilerek karıştırma işlemi 15 dakikada tamamlanmıştır. Şekil 3.11.'de 30FA-20AC karışımında kullanılan toz bağlayıcılar ve bu toz bağlayıcılara sırasıyla agrega, alkali aktivatör ve ek-su eklenmesiyle hazırlanan PGP beton karışım görülmektedir. Taze haldeki PGP beton karışımı, koyu renkte ve oldukça kohezif yapıya sahiptir.



Şekil 3.11. PGP beton karışımında kullanılan toz bağlayıcılar ve hazırlanmış beton karışımı

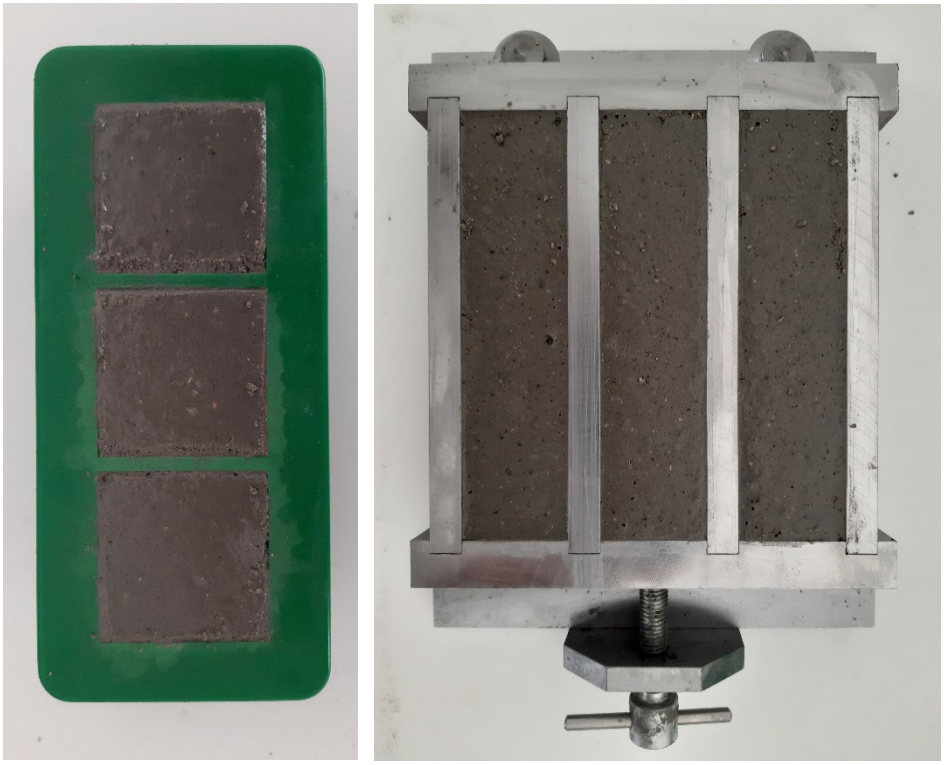
3.2.5. Yerleştirme

Hamur karışımlar, tek tabakada, iç ebatları 20x20x20 mm^3 olan plastik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.12.).



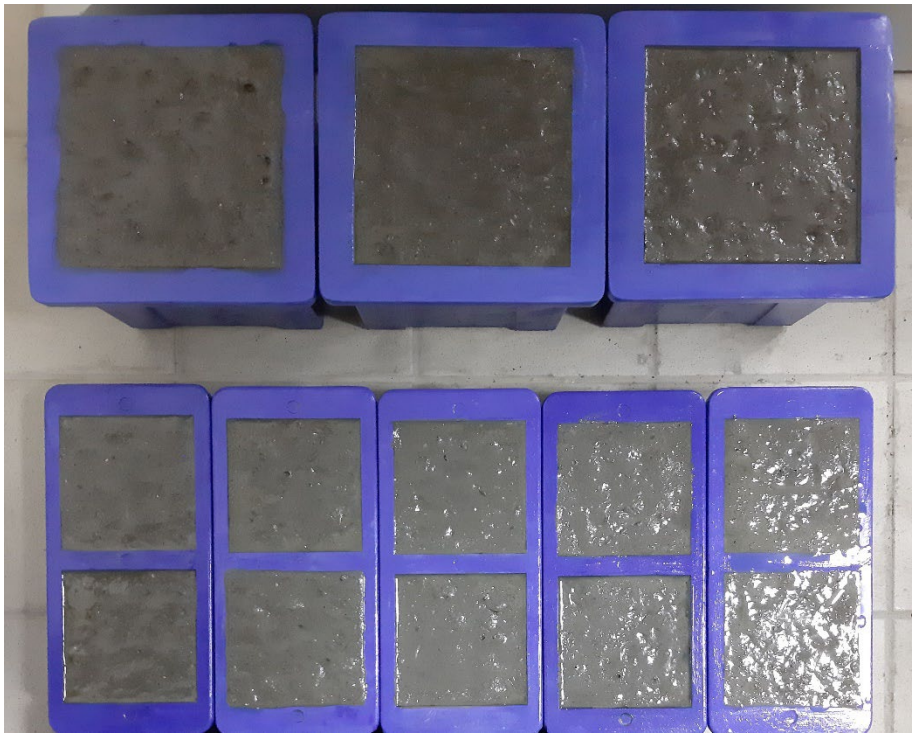
Şekil 3.12. Hamur numune kalıbı

Harç karışımlar, 40x40x40 mm^3 iç ölçülerine sahip olan plastik küp ve 40x40x160 mm^3 iç ölçülerine sahip metal prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Harç numune kalıpları

Beton karışımları ise 100x100x100 mm^3 ve 150x150x150 mm^3 iç ölçülerine sahip plastik küp kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Beton numune kalıpları

Karışımlar yerleştirilmeden önce tüm plastik kalıpların iç yüzeyleri ince yağ ile yağlanırken, metal kalıpların iç yüzeyleri ise kauçuklu gres yağı ile yağlanmıştır. Sıcaklık etkisi altında GP bağlayıcı, metale (çelik) yapıştığından mümkün olduğu kadar metal kalıp kullanımından kaçınılmıştır. Zorunlu durumlarda (prizmatik numune kalıpları) metal kalıp özel kauçuklu gres yağı ile kalın bir şekilde yağlanmıştır.

Kalıpların üstündeki fazla malzeme alındıktan sonra hamur ve harç numune kalıplarının sarsma tablası üzerinde 240 defa, beton numune kalıplarının ise 60 defa vuruş yapılarak hapsolmuş hava boşluklarının çıkması sağlanmıştır (Şekil 3.15.). Hamur ve harç numunelerde daha fazla vuruş yapılmasının sebebi, bazı karışımların (pomza içeriğinin yüksek olduğu karışımlar) çok kohezif yapıya sahip olmasıdır.



Şekil 3.15. Sarsma cihazı yardımıyla sıkıştırma işlemi

Sıkıştırma işlemi tamamlanan numunelerin kalıpları, kür süresince suyun buharlaşarak bünyeyi terk etmesini önlemek amacıyla jelatin film ile sarılarak kür işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Numune kalıplarının jelatin bantla sarılması

3.2.6. Kür

Kür sıcaklığı ve süresinin FA katkılı PGP bağlayıcıların özelliklerine etkileri hakkında bilgi sahibi olmak için hamur numuneler üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucuna göre harç ve beton karışımların kür süresi ve kür sıcaklığına karar verilmiştir. PGP hamur, harç ve betonların sıcak kür işleminde kullanılan etüvler Şekil 3.17.'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Sıcak kür işleminde kullanılan etüvler

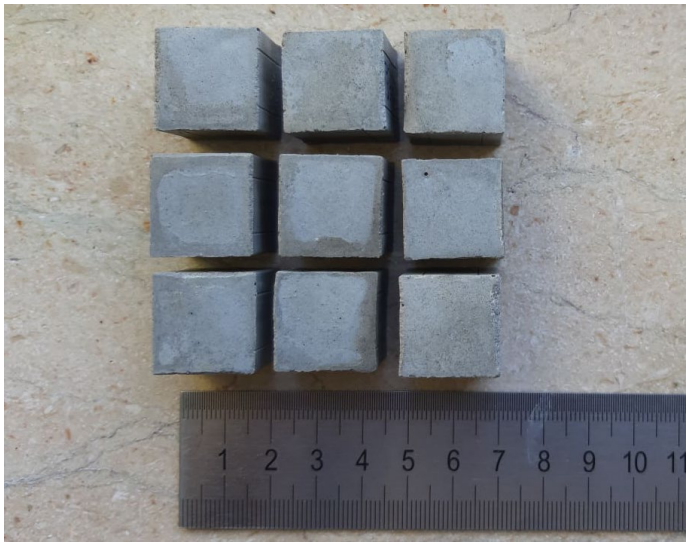
3.2.6.1. Hamur Numunelerin Kür İşlemi

Alkali aktivatör bileşenlerinin FA katkılı PGP bağlayıcının özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmada, hamur numuneler 48 saat boyunca 65 °C'de kür edilmiştir. Kür koşulları etkisinin araştırıldığı çalışmada ise hamur numuneler, Çizelge 3.11.'de görüldüğü gibi farklı sıcaklık ve sürelerde küre tabi tutulmuşlardır.

Çizelge 3.11. Kür koşulları etkisinin araştırıldığı çalışmaya ait kür sıcaklık ve süreleri

Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)
Oda sıcaklığı (~23)	-
60	4, 8, 24, 48, 96 ve 168
75	4, 8, 24, 48, 96 ve 168
90	4, 8, 24, 48, 96 ve 168
105	2, 4, 8, 24, 48, 96 ve 168

Kür sürelerinin sonunda numunelerin filmleri açılarak test gününe kadar laboratuvar ortamında açıkta bekletilmişlerdir. Şekil 3.18.'te kür süresini tamamladıktan sonra kalıptan çıkarılan numuneler verilmiştir.



Şekil 3.18. Kalıptan çıkarılan PGP hamur numuneler

3.2.6.2. Harç Numunelerin Kür İşlemi

Palomo ve ark. FA esaslı GP numunelerle gerçekleştirdikleri çalışmalarında, yeterli mekanik gelişimi sağlayacak reaksiyon ürünlerinin gelişimi için 65 °C'de 7 gün veya 85 °C'de 24 saat kür işleminin uygun olacağını belirtmişlerdir (Palomo ve ark. 2004). Benzer şekilde, bu çalışmada hamur numunelerle yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlardan hareketle PGP harç numunelerin, 7 gün 60 °C'de kür edilmesi uygun görülmüştür. Ancak harç numunelerde, hamur numunelere ek olarak AC katkısının etkisi de araştırılmıştır. AC katkısı, oda sıcaklığında da önemli miktarda dayanım kazandırdığından dolayı harç numuneler ayrıca oda sıcaklığında kür edilmiştir. Oda sıcaklığında kür edilen numuneler, Şekil 3.16.'da, sıcak küre tabi tutulan ve etüve yerleştirilen numuneler ise Şekil 3.19.'da verilmiştir.



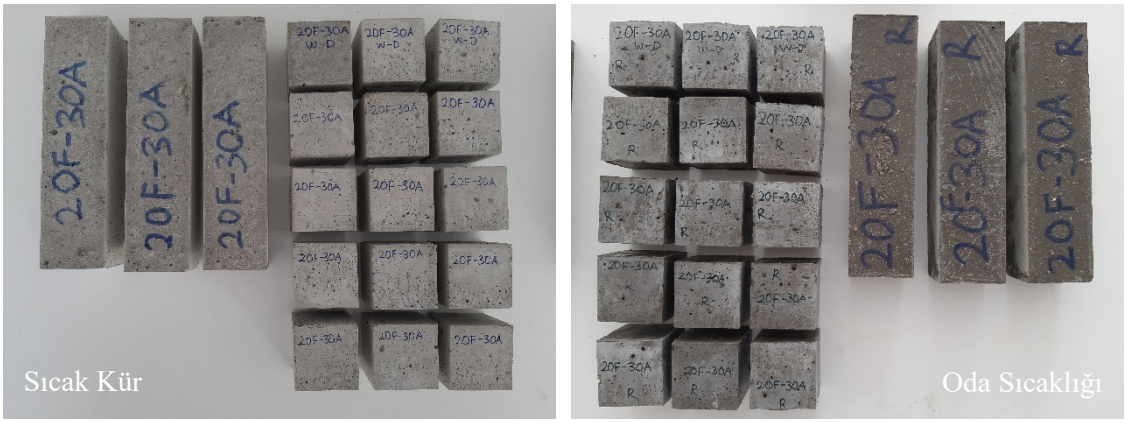
Şekil 3.19. PGP harç numunelerin sıcak kürü

AC içeriğinin olduğu veya sıcak küre tabi tutulan harç numunelerin tümü 24 saatin sonunda yeterli sertliğe ulaştıklarından bu sürenin sonunda kalıptan çıkarılmışlardır. Kalıptan çıkarılan numuneler tekrar jelatin film ile sarılarak kür sürelerini tamamlayıncaya kadar etüvde bekletilmişlerdir (Şekil 3.20.).



Şekil 3.20. Yeterli sertleşmeyi sağladıktan sonra kalıptan çıkarılıp tekrar kür koşullarına bırakılan numuneler

7 günün sonunda tüm numunelerin filmleri açılarak test gününe kadar laboratuvar ortamında açıkta bekletilmişlerdir (Şekil 3.21.). Şahit numuneler ise ilgili standartlarda belirtildiği gibi suda kür edilmişlerdir.



Şekil 3.21. Bir karışıma ait harç numunelerin tamamı

Kür işlemi tamamlandıktan sonra laboratuvar ortamında açıkta bekletilen ve bütün harç numunelerin bulunduğu (7. günde kırılmaya tabi tutulanlar hariç) görüntü, Şekil 3.22.'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Bütün harç numunelerinin olduğu bir görüntü

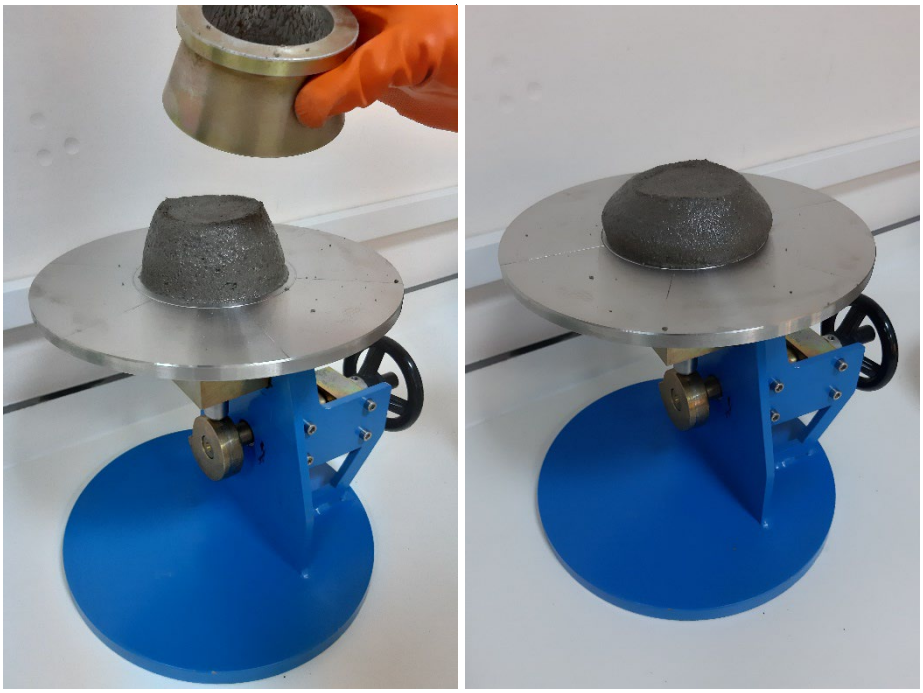
3.2.6.3. Beton Numunelerin Kür İşlemi

PGP beton numuneler, hamur ve harç numunelerle yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlardan hareketle 7 gün 60 °C'de kür edilmiştir. Tüm beton numuneler, 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılıp jelatin film ile sarılarak tekrar etüve konulmuştur. 7 günün

sonunda numuneler, etüvden alınmış ve filmden çıkarılarak deney gününe kadar laboratuvar ortamında açıkta bekletilmiştir. Şahit numuneler ise ilgili standartlarda belirtildiği gibi suda kür edilmişlerdir. PGP harç numunelerin kür süreciyle ilgili yeterli görsel verildiğinden dolayı ve resimlerin içeriği çok fazla kaplamaması amacıyla beton numunelerin kür süreciyle ilgili resimler verilmemiştir.

3.2.7. İşlenebilirlik

PGP harç karışımlarının işlenebilirliği hakkında fikir sahibi olmak için yayılma tablası deneyi kullanılmıştır. Karışım örnekleri, TS EN 1015-3 (2000) standardına uygun olarak, yayılma kalıbına iki tabaka halinde ve her tabaka 10'ar kez tokmaklanarak doldurulmuştur (TS-EN-1015-3 2000). Yüzeyi temizlenen yayılma kalıbı, yavaşça kaldırılarak alınmıştır. Ardından yaklaşık olarak her saniyede bir düşüş olacak şekilde 15 kez tablanın düşüşü sağlanmıştır. Üç yönden yayılma miktarları ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları o karışımın yayılma değeri olarak tespit edilmiştir. Bir karışımın yayılma testinin gerçekleştirilmesi Şekil 3.23.'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Yayılma tablası deneyi

3.2.8. Standart Kıvam

TS EN 196-3 (2010) standardına uyun olarak standart kıvamın belirlenmesi için Vicat cihazına takılan sonda, taban plâkasının üzerine kadar indirilmiş ve taksimatlı

gösterge üzerinde sıfır okunacak şekilde ayarlanmıştır (TS-EN-196-3 2010). Sonra sonda yukarı kaldırılarak duruş konumuna alınmıştır. Çimento hamurunun seviyesi ayarlandıktan sonra, hemen Vicat kalıbı ve taban plâkası Vicat cihazına yerleştirilmiştir. Sonda hamur ile temas edinceye kadar yavaşça indirildikten sonra hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için sonda bu durumda 1-2 saniye tutulmuştur. Sonra hareket eden parçalar çabuk bir şekilde serbest bırakılıp, sondanın kendi ağırlığı ile düşey olarak hamurun merkezine girmesi sağlanmıştır. Sondanın batma işleminin tamamlanması veya sondanın serbest bırakılmasından 30 saniye sonrası (hangisi önce ise) esas alınarak sondanın alt yüzü ile taban plâkası arasındaki mesafe okunmuştur. Standart kıvam tayini, değişik miktarlarda alkali aktivatör içeren hamurlarla, sonda ve taban plâkası arasındaki mesafe (6 ± 1) mm oluncaya kadar tekrar edilmiştir. Hamurun Vicat kalıbına yerleştirilme süreci, 'Priz Süresi' tayininde anlatılan metotla aynıdır (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Standart kıvamın elde edilmesi süreci

3.2.9. Priz Süresi

Bu çalışmada üretilen harç karışımların bazıları seçilerek, priz süreleri belirlenmiştir. AC, oda sıcaklığında bekletilen örneklerin priz süreleri üzerinde çok etkili olduğu için AC'nin tüm seviyeleri (%10, 20 ve 30) için priz süreleri tayin edilmiştir. Yalnız pomza ve %30 FA ikamesiyle üretilen karışımların yanında, çalışmada şahit numunelerin üretilmesinde kullanılan, CEM I 42.5 R Portland çimentosunun da priz süreleri belirlenmiştir.

Toz bağlayıcı miktarlarına bağlı olarak hazırlanan çimento hamuru, daha önce hafifçe yağlanmış taban plâkası üzerine yerleştirilmiş Vicat kalıbına fazla miktarda olmak üzere hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon işlemi yapmadan hemen yerleştirilmiştir. Kalıbın

üstüne taşan çimento hamuru fazlalığı, düzgün kenarlı bir spatül ile yavaş testere hareketi uygulanıp sıyırılarak düzgün bir yüzey elde edilmiştir.

Bu deney, her karışım için iki numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Standart kıvama getirilen hamurun bulunduğu Vicat kalıplarından biri, prizin tamamlanmasına kadar 20 (±1) °C'de tutulan kür odasında bekletilirken, diğeri ise 60 °C'de etüvde bekletilmiştir.

Priz başlangıç süresinin tayini için Vicat cihazına takılmış olan iğne taban plâkasının üzerine indirildikten sonra iğneli Vicat cihazı taksimatlı gösterge üzerinde sıfıra ayarlanmıştır. Sonra iğne yukarı kaldırılarak duruş pozisyonuna alınmıştır. Hamurla dolu Vicat kalıpları, uygun aralıklarla kür ortamından alınarak Vicat cihazına ve iğnenin altına yerleştirilmiştir. İğne, hamur ile temas edinceye kadar yavaşça indirildikten sonra hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için iğne bu durumda 1-2 saniye bekletilmiştir. Sonra hareket eden parçalar birden bırakılarak iğnenin düşey olarak hamurun içine girmesi sağlanmıştır. İğnenin hamura batması tamamlandıktan sonra veya iğnenin serbest bırakılmasından 30 saniye sonra (hangisi daha önce olmuşsa) taksimatlı göstergede okuma yapılmıştır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından iğnenin ucu ile taban plâkası arasındaki mesafeyi veren bu değerin 4 (±1) mm olmasına kadar geçen süre priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir (Şekil 2.25.).

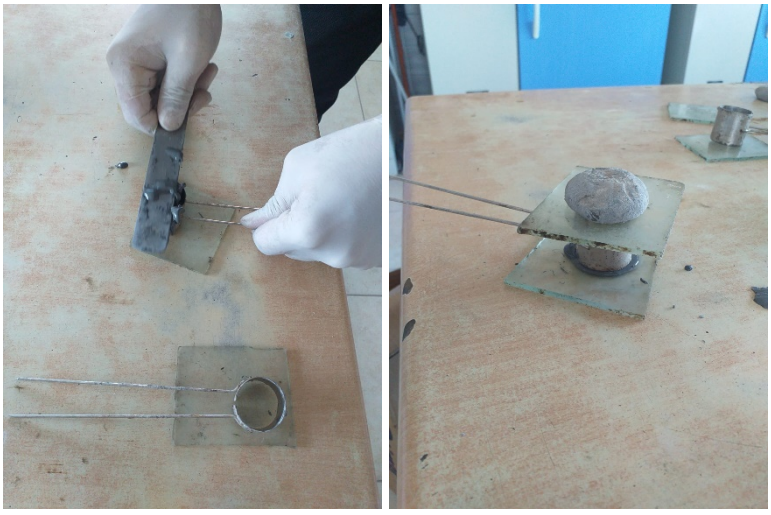


Şekil 3.25. Priz başlangıç ve bitiş süresinin tayini

Taban plâkasının üzerinde bulunan priz başlama süresinin tayini deneyinde kullanılmış olan dolu kalıp ters çevrilmiş ve priz sonu süresinin tayini, hamurun başlangıçta taban plâkası ile temas eden yüzeyi üzerinde gerçekleştirilmiştir. İğne, küçük batmaların doğru şekilde gözlenebilmesini kolaylaştırmak için iğne bağlantı halkası ile cihaza tutturulmuştur. Priz başlama süresinin tayinindeki işlem uygulandıktan sonra iğnenin ilk 0,05 mm kadar battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman arasındaki süre farkı, priz sonu süresi (priz bitiş noktası) olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.25.) (TS-EN-196-3 2010).

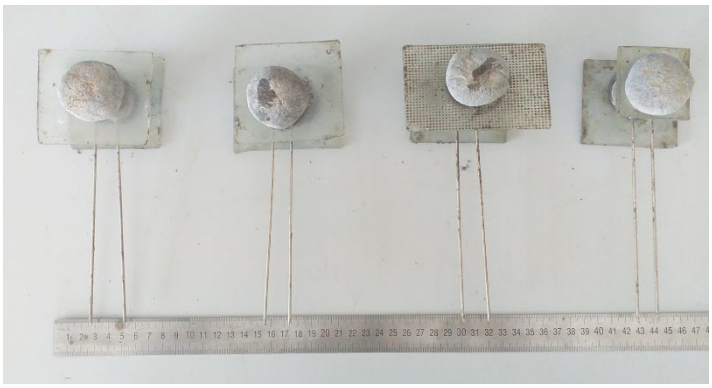
3.2.10. PGP Çimentonun Hacim Sabitliği

PGP çimentoların genleşme miktarları (hacim sabitliği), TS EN 196-3 (2010) standardına göre ölçülerek kontrol numunesi olarak belirlenen CEM I 42.5 R Portland Çimentosu'nun genleşme miktarıyla kıyaslanmıştır (TS-EN-196-3 2010). Standard kıvama getirilen çimento hamuru, taban plakası üzerine konulmuş ve yağlanmış Le Chatelier (Löşatölye) kalıbına normal dışı sıkıştırma işlemi uygulamaksızın doldurulmuştur (Şekil 3.26.). Çimento hamuru ile doldurulan Le Chatelier kalıbının üst yüzeyi, el ile tesviye edilerek düzeltilmiştir. PGP numunelerinin kalıpları, üstü hafif yağlanmış plakalar ile örtüldükten sonra 60 °C sıcaklıktaki etüve konulmuşlardır. PGP numuneleri, oda sıcaklığında 24 saatin sonunda yeterli katılaşmayı sağlayamadıklarından dolayı sadece sıcak kür uygulanan numunelerin genleşme miktarları belirlenmiştir. Kontrol numunesi ise (20 ± 1) °C'de ve bağıl nemi % 90'dan az olmayan nemli ortamda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.26. Le Chatelier halkasının doldurulması ve kapatılması

24 saatin sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe ölçülmüştür (A) (Şekil 3.27.). Ardından kalıpların aktarıldığı su banyosu, 30-35 dakika süreyle tedricen ısıtılarak kaynama noktasına getirilmiş ve kaynama sıcaklığında 3 saat bekletilmiştir. Sıcak ortamdan alınan kalıpların, laboratuvar ortam sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Bu süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe ölçülmüştür (B). Böylece A ve B ölçümleri arasındaki fark, test edilen çimentonun hacim genleşme değeri olarak bulunmuştur (B-A).



Şekil 3.27. 24 saatin sonunda gösterge uçları arasındaki mesafenin ölçülmesi

3.2.11. Fiziksel Özelliklerin Tayini

Fiziksel özellikler olarak, yoğunluk ve su emme oranı ölçülmüştür. PGP hamur ve harç numunelerin su emme kapasitesi ve yoğunluğunu belirlemek için 3 numunenin 28. günde ağırlıkları ölçülmüştür (A). Suda 24 saat bekletildikten sonra, bu numunelerin sudaki ağırlıkları, özgül ağırlık sehpası yardımıyla ölçülmüştür (B). Son olarak doygun-yüzey kuru (DYK) ağırlıkları belirlenmiştir (C). Buna göre;

Su emme kapasitesi yüzde olarak, =((C-A)/A)×100 formülüyle,

Yoğunluk ise =(A/(C-B)) formülü ile hesaplanmıştır.

Hamur ve harç numuneler ile beton karışımların üretiminde kullanılan iri agregaların fiziksel özelliklerinin tayininde kullanılan özgül ağırlık sehpası, Şekil 3.9.'da verilmiştir.

3.2.12. Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı

Tüm PGP hamur numunelerin basınç dayanımları, 28. günde 20 ton kapasiteli, yükleme hızını otomatik olarak ayarlayabilen çimento basma ve eğilme test presinde ölçülmüştür (Şekil 3.28.).

PGP harç numunelerin tüm yaşlardaki basınç dayanımları ve yıpratıcı etkiler sonucundaki basınç dayanımı ile asit etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı Şekil 3.28.'de verilen aynı çimento basma ve eğilme test presi cihazında ölçülmüştür (TS-EN-196-1 2009).



Şekil 3.28. Küp hamur numuneler ile küp ve prizmatik harç numunelerin dayanımlarının ölçüldüğü pres

Beton numunelerin basınç dayanımları 28. ve 90. günde 300 ton kapasiteli, yükleme hızını otomatik olarak ayarlayabilen beton basma presi cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 3.29.). Aynı şekilde, beton numunelerin, donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve asit etkisi gibi yıpratıcı etkilerin sonunda dayanım kaybını belirlemek için aynı test ünitesi kullanılmıştır. GP hamur, harç ve beton numunelerin pres ile gerçekleştirilmiş bütün kırılma işlemlerinde, yükleme, kalıplanan yüzey doğrultusunda uygulanmıştır (TS-EN-12390-3 2003).



Şekil 3.29. Beton numunelerin basınç dayanımlarının ölçüldüğü pres

3.2.13. Beton Numunelerin Çekme Dayanımı

Basınç altında su işleme derinliği ölçülen numunelerin yarma testinden elde edilen ölçümleri, beton numunelerin çekme dayanımı değerleridir. Çekme dayanımının belirlendiği, beton eğilme-yarma test cihazı Şekil 3.30.'da verilmiştir (TS-EN-12390-6 2002).



Şekil 3.30. Beton eğilme-yarma test cihazı

3.2.14. Islanma-Kuruma Performansının Belirlenmesi

Islanma-kuruma performansını belirlemek için bu çalışmada, laboratuvar ortamında belli bir süre numuneleri suda bekletip belli bir sürede de açıkta bırakarak kuruması sağlanmıştır. Bazı çalışmalarda ıslanma-kuruma etkisi araştırılırken 24 saat suda bekletmenin ardından numuneler farklı sıcaklıklarda etüvde bekletilerek kurumaları sağlanmıştır (Puertas ve ark. 2003; Slavik ve ark. 2008; Lemougna ve ark. 2014; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b; Firdous ve ark. 2018). Ancak sıcaklığın numunelerde yeni bir kür etkisi oluşturacağı ve böylece GP bağlayıcının gerçek ıslanma-kuruma davranışını göstermeyeceği düşünüldüğünden oda sıcaklığında bekletilerek kurumasının sağlanması tercih edilmiştir. Islanma-kuruma sonrası basınç dayanımındaki kayıp (%), ıslanma-kuruma performansını göstermektedir.

PGP hamur numunelerin ıslanma-kuruma performansını belirlemek için 28 günlük numuneler musluk suyuna bırakılıp 24 saat bekletilmiştir. Numuneler, bu sürenin sonunda sudan çıkarılarak laboratuvar ortamında, açıkta, 48 saat bekletilmiştir. 72 saatlik

bu süreç, 1 “döngü” olarak kabul edilmiştir. 5. döngünün sonunda numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir.

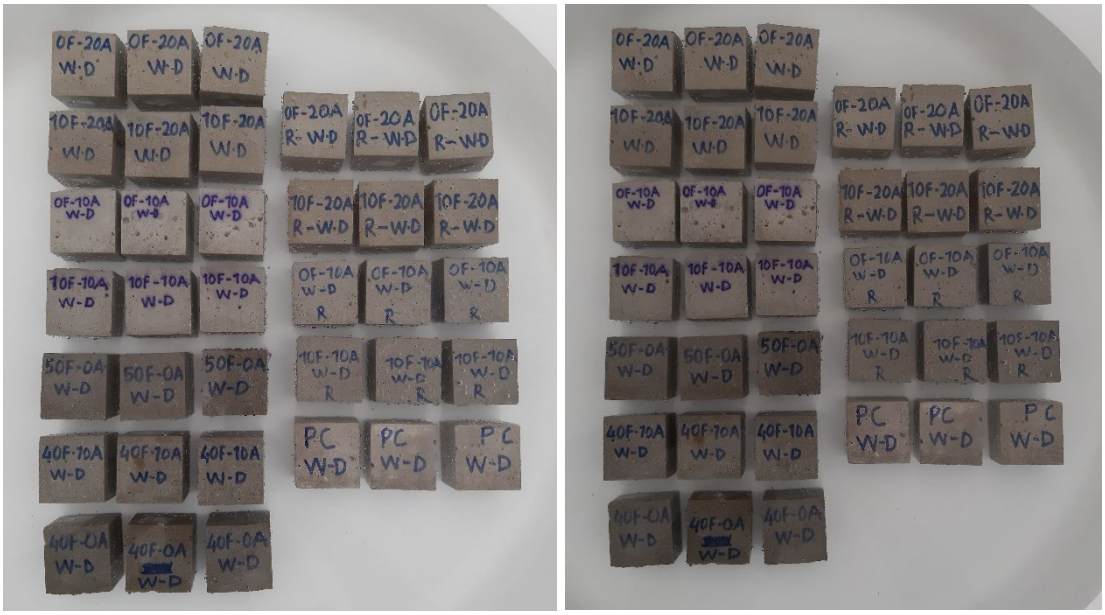
PGP harç ve beton numunelerin ıslanma-kuruma performansını belirlemek için 28 günlük numuneler musluk suyuna bırakılıp 24 saat bekletilmiştir (Şekil 3.31.). Numuneler, bu sürenin sonunda sudan çıkarılarak laboratuvar ortamında, açıkta, 24 saat bekletilmiştir. 48 saatlik bu süreç, 1 “döngü” olarak kabul edilmiştir. 20. döngünün sonunda numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımındaki kayıp, PGP numunelerin ıslanma-kuruma etkisine karşı direncini ifade etmektedir.



Şekil 3.31. GP harç numunelerin ıslanma-kuruma döngüleri

3.2.15. Deniz Suyu Etkisi

PGP harç numunelerin deniz suyu direncini belirlemek için numuneler 28. günde Mersin Limanı’ndan elde edilen deniz suyuna bırakılmıştır. Şekil 3.32.’de deniz suyu etkisine maruz bırakılan harç numunelerinden bazıları görülmektedir. Her 60 günde bir kullanılan deniz suyu değiştirilmiştir. 180 günün sonunda numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. Basınç dayanımı kaybı, harç numunelerin deniz suyu performansı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.32. Deniz suyu etkisine maruz bırakılan harç numuneler

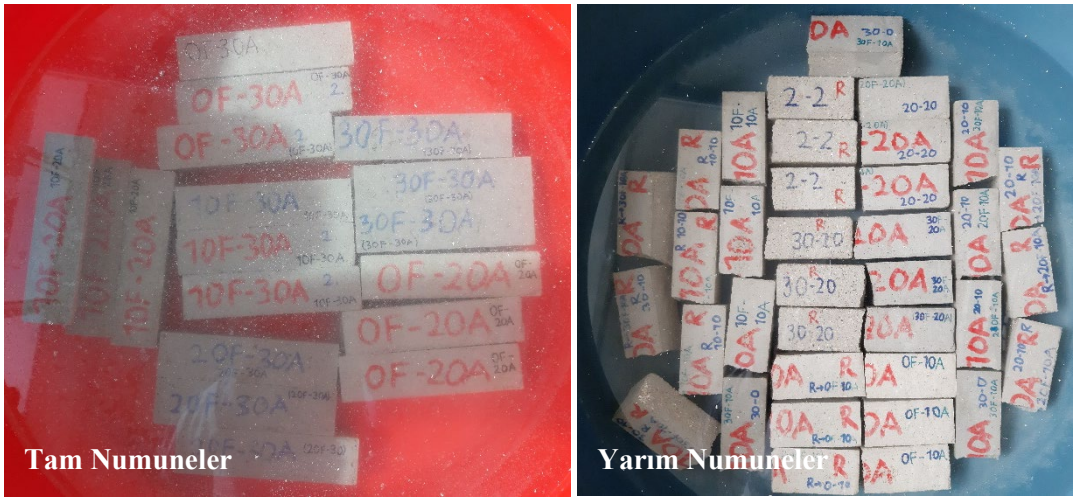
3.2.16. Çiçeklenme

PC esaslı betonlarda, çiçeklenmenin, temelde CH olmak üzere beraberinde bazı tuzların suyla beraber yüzeye çıkıp kristalleşmesiyle oluştuğu daha önce ifade edilmişti. GP betonlarda ise en basit haliyle çiçeklenmenin, reaksiyona girmemiş sodyum iyonlarının suyla beraber beton yüzeyine çıkıp, CO_2 ile reaksiyona girmesiyle karbonatlaşarak beyaz birikintiler oluşturması olduğunu söyleyebiliriz (Kani ve Allahverdi 2009a; Temuujin ve Van Riessen 2009). Deniz suyunda 6 ay bekletilen PGP harç numunelerinin görsel değişimi, bu numunelerin çiçeklenme performansı olarak değerlendirilmiştir (Kani ve ark. 2012). Sadece gözlem ile yapılan bu değerlendirme, PGP harçlarda reaksiyona girmeyen serbest alkaliler hakkında fikir verecektir.

3.2.17. Asit Etkisi

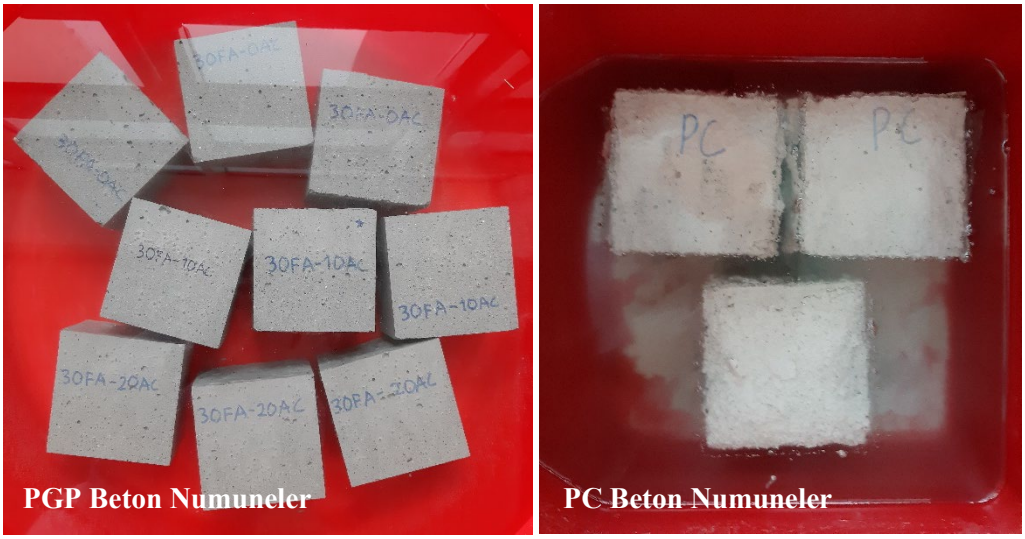
PGP harç numunelerin asit direncini belirlemek için kanalizasyon borularının da maruz kaldığı sülfürik asit (H_2SO_4) tercih edilmiştir (Bakharev 2005). Buna göre her bir veri için 40x40x160 mm boyutlu 3 tane prizmatik numune, 28. günde %5 derişime sahip sülfürik asit çözeltisinin içerisine bırakılmıştır (Şekil 3.33.). 60 günün sonunda, numunelerin şekil değişimleri, ağırlık kayıpları ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Ortadan ikiye bölünen 3 prizmatik numuneden 6 adet yaklaşık olarak 40x40x80 mm boyutlu, yine prizma şekilli yarım numune elde edilmiştir. Bu yarım numunelerin yarısı, alt ve üst yüzeyleri 40x40 mm ölçülerindeki metal kırma başlığına yerleştirilerek

numunenin basınç dayanımı belirlenmiştir (Şekil 3.28.). Kalan diğer yarım numuneler ise yeniden hazırlanmış %5 derişime sahip sülfürik asit çözeltisinin içerisine daldırılmıştır (Şekil 3.33.). 60 günün sonun numunelerin şekil değişimleri, ağırlık kayıpları ve basınç dayanımları belirlenmiştir. İlk işlemdeki şekil değişimi, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kaybı, 60 günlük asit etkisi performansını ifade ederken, sonraki işlemdeki değişimler ise 120 günlük asit etkisi performansını göstermektedir.



Şekil 3.33. Asit etkisine maruz bırakılan prizmatik harç numuneler

GP beton numunelerin asit direnci ise 100x100x100 mm boyutundaki küp numunelerle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.34.). Harç numunelerin asit etkisi davranışını belirlemek için anlatılan yöntem, beton numuneler için de uygulanmıştır.

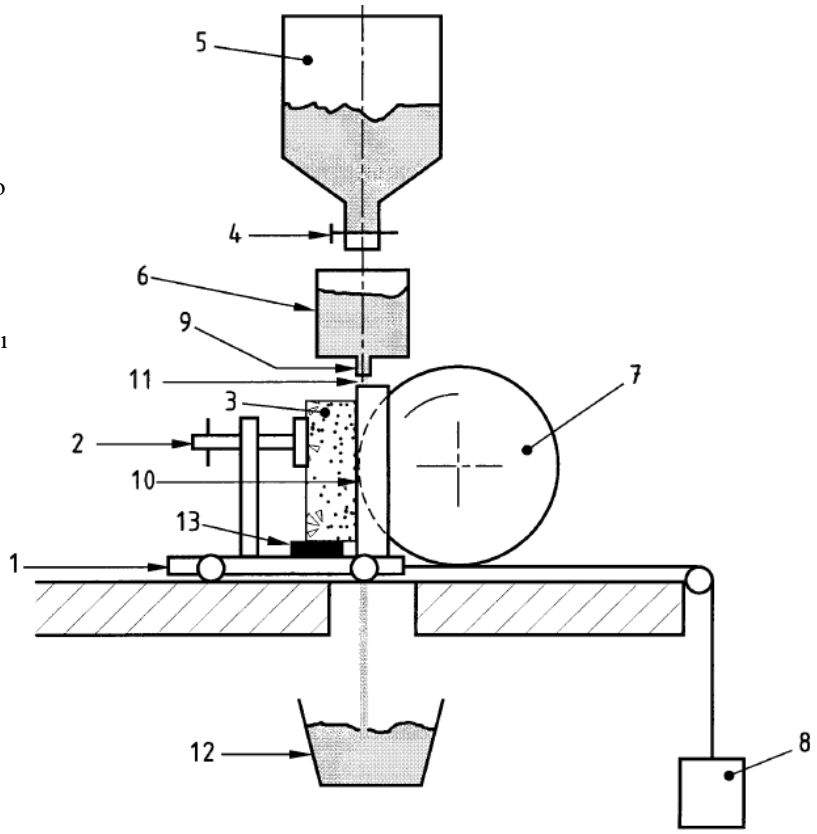


Şekil 3.34. Asit etkisine maruz bırakılan beton numuneler

3.2.18. Aşınma Dayanıklılığı

Aşınma testi, TS EN 1339 (2005) standardında açıklanan geniş diskli aşınma deneyine uygun olarak, bir boyutu 100 mm olan beton küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geniş diskli aşındırma cihazının çalışma prensibi diyagramatik olarak Şekil 3.35.'te gösterilmiştir (TS-EN-1339 2005).

1 Numune tutma kızağı
2 Tespit vidası
3 Deney numunesi
4 Kontrol vanası
5 Zımpara tozu silosu
6 Akış yönlendirici alt silo
7 Geniş aşındırma diski
8 Karşı ağırlık
9 Çıkış ağzı
10 Oyuk
11 Aşındırıcı malzeme akışı
12 Aşındırıcı malzeme toplayıcı
13 Takoz



Şekil 3.35. Geniş diskli aşındırma cihazının diyagramatik görünümü

Numunenin temizlenen yüzeyi, çapı 200 (± 1), genişliği 70 (±) mm olan ve dakikada 76 devir yapan aşındırma diskine denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Aşındırıcı olarak mermer tozunun kullanıldığı deney düzeneğinde, 76 devrin sonunda numunenin aşınan yüzeyi temiz bir bez yardımıyla silinmiştir. Aşınma etkisiyle beton numune yüzeyinde oluşan oyuğun boyuna sınırları, bir cetvel kullanılarak kurşun kalem ile çizilmiştir (*l1 l2*). Ardından oyuğun orta noktasından enine bir doğru çizilmiştir (A-B). Son olarak kalibrasyon amacıyla oyuğun her iki ucundan 10 (±) mm mesafede enine iki doğru daha çizilmiştir (C-D).

Sonuç, kalibrasyon katsayısı ile düzeltilen ve daha sonra en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılan boyuttur. Kalibrasyon katsayısı, 20,0 ile kaydedilen kalibrasyon değeri arasındaki farktır. Örnek olarak C-D ve A-B değerleri sırasıyla 19.6 mm ve 22.5 mm olan numunenin aşınma değeri, 22.5 + (20.0 -19.6) = 22.9 mm, yuvarlatılarak 23.0 mm olarak bulunur. Çalışmada kullanılan geniş diskli aşındırma cihazı, Şekil 3.36.'da verilmiştir.



Şekil 3.36. Aşınma testinde kullanılan cihaz

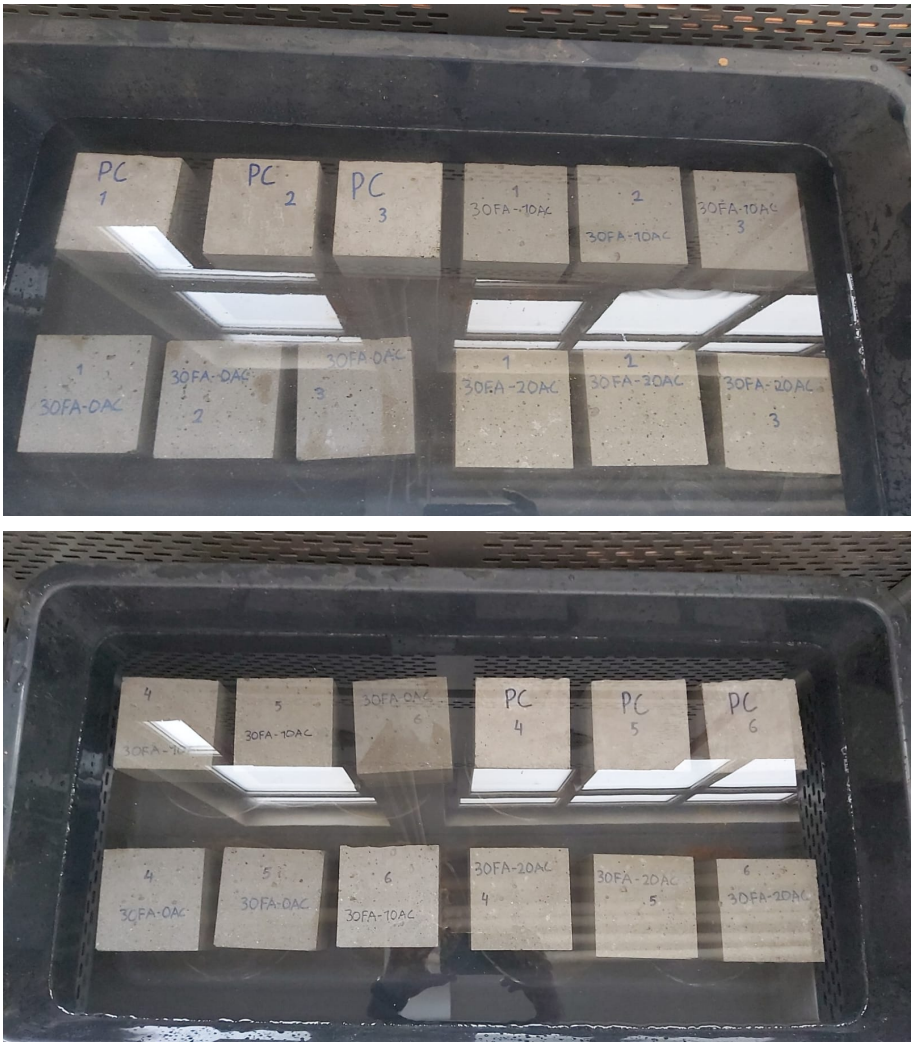
TS EN 1339 (2005) standardı, ölçülen oyuk genişliği değerine bağlı olarak aşınmaya direnç sınıfları belirlemiştir. Aşınmaya direnç sınıflarının sınır değerleri ve notasyonları, Çizelge 3.12.'de verilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen aşınma değerleri, bu sınıflandırma sistemine göre tasnif edilmiştir.

Çizelge 3.12. Aşınmaya karşı direnç sınıfları

Sınıf	Sınıf Gösterimi	Oyuk Genişliği (mm)
1	F	Performans ölçülemez
2	G	≤26
3	H	≤23
4	I	≤20

3.2.19. Donma-Çözülme Tesiri

Beton numunelerin donma-çözülme direnci, ASTM C666 standardına göre donma-çözülme test kabininde yapılmıştır (ASTM-C666 2003). Bir boyutu 100 mm olan küp numunelerin su içerisinde donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak gerçekleştirildiği çalışmada, kabinin sıcaklığı, 180 dakikada +4 °C'den -18 °C'ye kadar düşürüldükten sonra 60 dakikada -18 °C'den +4 °C'ye kadar yükseltilmektedir. 240 dakikalık bu işlem bir döngü olarak kabul edilmektedir. Art arda iki tane 50 döngüden sonra basınç dayanımı ve ağırlıktaki kayıp PGP beton numunelerin donma-çözülme direncini göstermektedir. Donma-çözülme tesirine maruz bırakılan beton numuneler Şekil 3.37.'de verilmiştir. Beton numunelerin ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngülerinin tamamlanacağı gün, bu numunelerin yaşının, 90 günlük olacağı şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.37. Donma-çözülme kabinine bırakılan beton numuneler

3.2.20. Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini

Beton numunelerin basınç altında su işleme derinliği, TS EN 12390-8 (2002) standardına uygun biçimde, bir boyutu 150 mm olan 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (TS-EN-12390-8 2002). Beton numunelerin basınçlı suya maruz kalacak yüzeyi (kalıplanan yüzeylerden biri) ve cihazın basınçlı su uygulayacak kısmında su sızmasını engelleyen lastik bantlar silindikten sonra numuneler cihaza yerleştirilmiştir. Numuneler, 72 (± 2) saat süreyle 500 (± 50) kPa su basıncına tabi tutulmuştur (Şekil 3.38.). Deney esnasında, deney numunesinin basınç uygulanmayan yüzeyleri, belirli aralıklarla gözlenmiş ve yüzeylerde su sızıntılarının olduğu numuneler kayda geçirilmiştir. Belirtilen sürenin sonunda cihazdan çıkarılan numunelerin basınçlı su uygulanan yüzeyindeki fazla su, silinerek temizlenmiştir. Numune, basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde, ortasından yarılarak ikiye bölünmüştür. Basınçlı su uygulanan yüzeyi

alt tarafa getirilen numunenin su işleyen kısmın kesiti belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulduktan sonra ıslak alanın sınırları işaretlenmiştir. Basınç uygulanan deney alanından itibaren, suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek en yakın milimetreye yuvarlatılmak suretiyle basınç altında su işleme derinliği tayin edilmiştir.



Şekil 3.38. Betonun basınç altında su işleme derinliğinin tayini

3.2.21. Geopolimerlerin Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında üretilen PGP hamur harç ve betonların mikroyapı incelemeleri farklı yöntemlerle yapılmıştır. Bu yolla PGP bağlayıcıların mikroyapısal değişimleri gözlemlenmiştir.

Çalışmada kullanılan toz bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları, Ağrı Çimento Fabrikası'nda bulunan Bandwise WDX–200 model XRF (X-Ray Fluorescence) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan XRF cihazı, Şekil 3.39.'da görülmektedir.



Şekil 3.39. Çalışmada kullanılan XRF cihazı

Çalışmada kullanılan toz bağlayıcıların ve üretilen numunelerin mineralojik yapısı, Ağrı Çimento Fabrikası'nda bulunan Tongda TD-3500 model XRD (X-Ray Diffractometer) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan XRF cihazı, Şekil 3.40.'ta görülmektedir.



Şekil 3.40. Çalışmada kullanılan XRD cihazı

Gözenekli yapıya sahip katı haldeki numunelerin yüzey alanlarını ve gözenek hacim ve dağılımlarını belirlemek için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (DAYTAM) bulunan Micromeritics 3Flex 3 portlu BET (Brunauer, Emmett ve Teller) yüzey alanı ve mikrogözenek ölçüm cihazı kullanılmıştır.

GP bağlayıcıların moleküler bağ yapısını görmek amacıyla Iğdır Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (ALUM) bulunan 4000-650 cm^{-1} dalga boyu aralığında çalışabilen Agilent Cary 630 model FTIR (Fourier-Transform Infrared) spektrometre cihazı kullanılmıştır.

Toz bağlayıcıların morfolojisi ve katı haldeki numunelerin mikroyapı ve kimyasal içeriklerini belirlemek için DAYTAM'da bulunan, ZEIS Gemini Sigma 300 model taramalı elektron mikroskobu (SEM; Scanning Electron Microscope) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX; Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, hamur, harç ve beton karışımlarla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalarla kıyaslanarak yorumlanması, bu bölümün içeriğini oluşturmaktadır.

4.1. PGP Hamurlarla Yapılan Çalışma

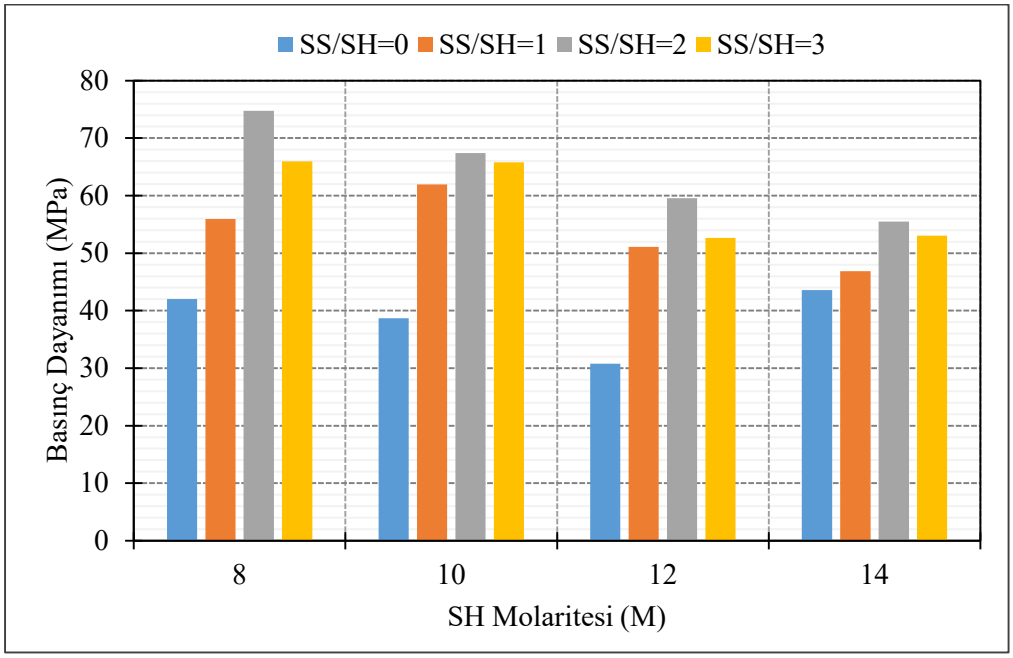
GP bağlayıcı özelliklerini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bütün bu parametrelerin etkisini araştırmak çok zor ve hatta neredeyse mümkün olmadığından bu parametrelerin bir kısmının seviyesinin azaltılması veya sabitleştirilmesi yoluna gitmek doğru bir yöntem olacaktır. Bunun için literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak laboratuvarda deneme-yanılma yöntemiyle ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda ön denemenin yanında alkali aktivatör içeriği ve kür şartlarının FA katkılı PGP bağlayıcılar üzerindeki etkilerinin araştırıldığı iki ayrı çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ilkinde %30 FA ikameli PGP hamur numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerine kür sıcaklığı ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. İkinci çalışmada ise birinci çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda FA ikameli PGP hamur numunelere, SS'nin SH'ye ağırlıkça oranı ve SH'nin molaritesinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu iki çalışmada da su yapıları için çok önemli olan ve GP betonların durabilitesi hakkında fikir veren, ıslanma-kuruma etkisi de incelenmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçların bütünü, EK 1. ve EK 2.'de sunulmuştur. Burada sadece araştırılan parametrelerin PGP bağlayıcılara etkileri özetlenecektir.

4.1.1. Pomzanın Öğütüldüğü İncelik ve Öğütülme Şekli

Farklı inceliklere sahip pomzalarla yapılan çalışmalar, inceliğin artmasıyla priz süresinin kısaldığını ve basınç dayanımının arttığını göstermiştir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016a). Halkalı öğütücü ile 1-2 dakika gibi kısa sürelerde elde edilen inceliğe, bilyalı öğütücüde daha uzun sürelerde ulaşılabilmektedir. Ancak yaklaşık olarak aynı inceliğe sahip olan öğütülmüş pomzalardan, bilyalı değirmenle öğütülen pomza ile üretilen karışımların işlenebilirliği daha düşük olmaktadır. Bunun muhtemel sebeplerinden biri, halkalı öğütücünün bilyalı öğütücüden daha homojen öğütmesi olabilir.

4.1.2. Sodyum Hidroksit Çözeltisinin Molaritesi

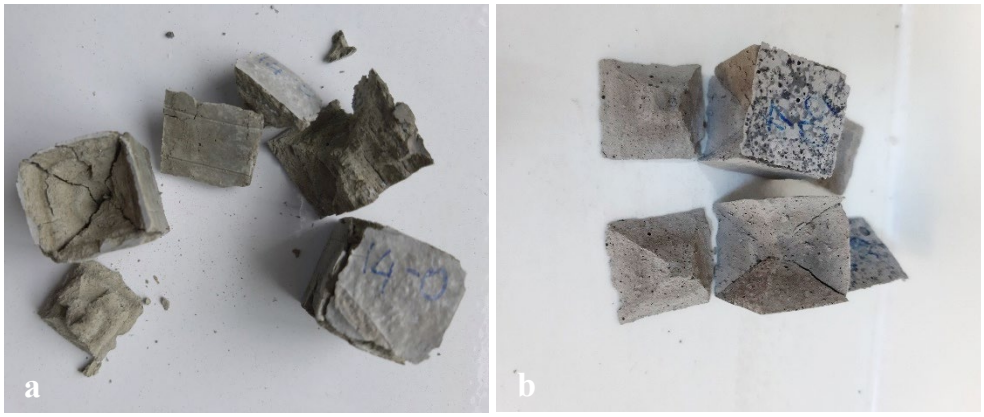
GP bağlayıcıların özelliklerine, alkali aktivatör (AA) içeriğinin etkisini araştırmak üzere hamur numuneler üretilmiş ve bazı testlere tabi tutulmuştur. Bu çalışma, SH molaritesinin artmasıyla taze haldeki karışımların işlenebilirliğinin düştüğünü ve sertleşmiş haldeki numunelerin yoğunluğunun arttığını göstermiştir. Farklı SS/SH oranlarına sahip PGP hamur numunelerin basınç dayanımlarının, SH molaritesine bağlı değişimi Şekil 4.1.'de verilmiştir. Şekil 4.1.'den de görülebileceği gibi yalnız SH çözeltisinin AA olarak kullanıldığı karışımlarda molaritenin artmasıyla basınç dayanımında önce düşüşler olmasına karşın 14 M seviyesinde en yüksek değere ulaşmıştır. Diğer taraftan, SS çözeltisinin de SH çözeltisi ile beraber kullanıldığı karışımların hepsinde, sabit bir SS/SH oranı için 8 M ve 10 M SH çözeltisi ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımları, 12 M ve14 M SH ile aktive edilen numunelerinin basınç dayanımından büyük olmuştur. Dikkat çekici bir diğer nokta ise 14 M SH ile aktive edilen karışımların basınç dayanımlarının, SS içeriğinden fazla etkilenmemesidir. Bu durum, Hardjito ve Rangan tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada da gözlemlenmiştir (Hardjito ve Rangan 2005).



Şekil 4.1. Farklı SS/SH oranına sahip PGP hamur numunelerin basınç dayanımının, molariteye bağlı değişimi

Sadece SH ile aktive edilen numuneler, ıslanma-kuruma döngüleri sonrasında ya dağıldıklarından ya da büyük çatlak ve yarıkların mümkün kılmamasından dolayı basınç

dayanımları ölçülememiştir (Şekil 4.2.a.). Ancak dağılan veya yarılan numuneler için şöyle bir farktan söz edilebilir: 12 M ve 14 M SH ile aktive edilenler ilk döngüden sonra yarılmaya başlamışken, 8 M ve 10 M SH ile aktive edilenler 5. döngüye doğru yarılmışlardır.



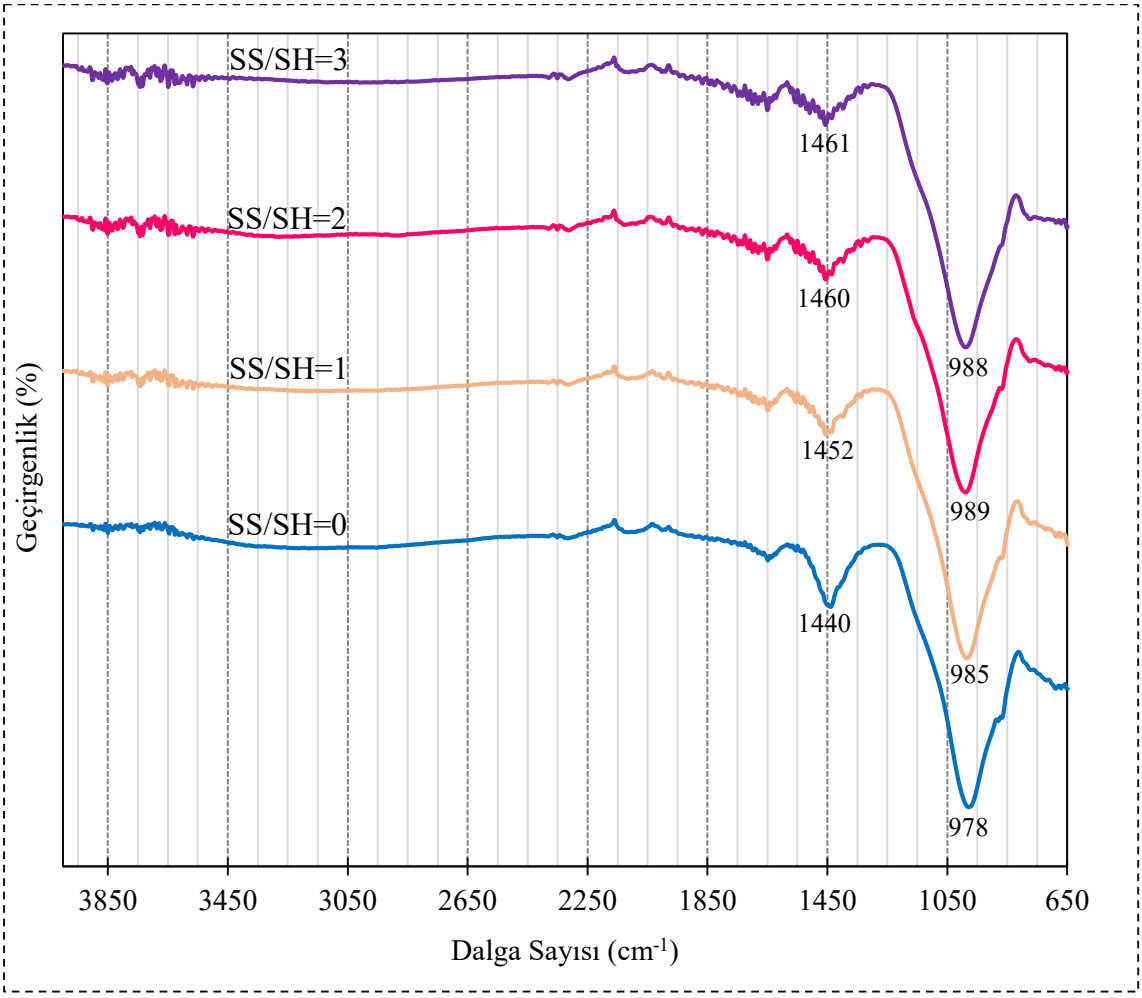
Şekil 4.2. Islanma-kuruma etkisiyle yarılan PGP hamur numuneler a) 14-0 b) 60-4

4.1.3. Sodyum Silikat İçeriği

SH çözeltisi yanında, SS çözeltisinin de kullanıldığı numunelerin, yalnız SH çözeltisi ile üretilenlere oranla daha iyi mekanik özellikler taşıdığı görülmüştür. Ancak SS çözeltisi, taze haldeki karışımların viskozitesini arttırıp karıştırma işlemini zorlaştırmıştır. SS çözeltisinin SH çözeltisine ağırlıkça oranının 2'ye kadar yükselmesiyle hamur numunelerin basınç dayanımında artış yaşanırken, bunun üstündeki değerlerde hafif düşüşler yaşanmıştır (Şekil 4.1.). Bu çalışmadaki SH molarite değerleri için optimum SS/SH oranının 2 olduğu söylenebilir. SS çözeltisinin kullanılmadığı numunelerin hem dayanımlarının SS'nin de SH ile birlikte kullanıldığı numunelerin dayanımlarından düşük olması hem de ıslanma-kuruma döngüleri sonrası yarılıp dağılmaları, iyi bir GP bağlayıcı için SS'nin SH ile birlikte kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Palomo, Grutzeck, ve ark. 1999; Xu ve Van Deventer 2000; Hardjito ve ark. 2004; Görhan ve Kürklü 2014; Nematollahi ve Sanjayan 2014). Bu durum, SS'nin SH ile birlikte kullanılmasıyla reaksiyon ürünü olan Si miktarının artması ve bunun sonucu olarak dayanımının artmasıyla açıklanmaktadır (Criado ve ark. 2005).

Farklı oranlarda SH içeriğine sahip, 10 M SH ile hazırlanan PGP hamur numunelerin FTIR spektrumları, Şekil 4.3.'te verilmiştir. SS/SH oranı "0" olan numunenin FTIR spektrumu, 2650-3450 cm^{-1} bandında geniş fakat zayıf bir çukurun olduğunu göstermektedir. Bu geniş çukur, SS/SH oranı arttıkça düz bir çizgi halini

almakta ve SS/SH oranının "3" olduğu numunede neredeyse tamamen kaybolmaktadır. Bu bant, geopolimer matrisinde tam olarak reaksiyona girmemiş bileşiklerde -OH (hidroksil) gruplarının varlığını göstermektedir (North ve Swaddle 2000; Zhang ve ark. 2012; Jansson ve ark. 2015). Bu durum, yukarıda ifade edildiği gibi geopolimerizasyonun daha sağlıklı bir şekilde ilerlemesi için SS'nin de SH ile birlikte kullanılmasının daha doğru olduğunu göstermektedir.



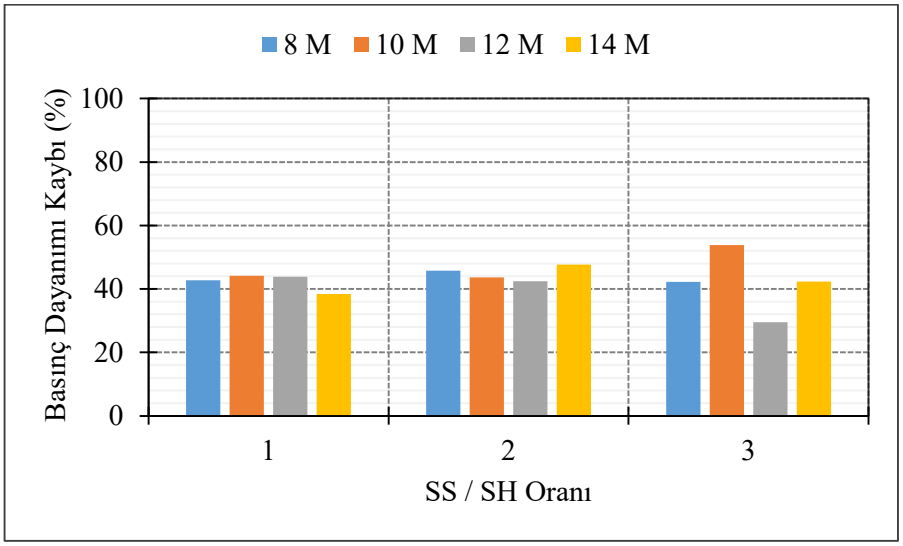
Şekil 4.3. PGP hamur numunelerin SS/SH oranına bağlı FTIR spektrumları

FTIR spektrumunun 1440-1461 cm^{-1} bandında pik(ler)in bulunması, O-C-O fonksiyonel gruplarının asimetrik gerilme titreşimlerine atfedilmektedir. Belirtilen bant aralığında PGP numunelerin piklere sahip olması, sertleşmiş hamurun yapısında reaksiyona girmeyen alkali katyonların (Na^+ gibi) varlığını ve bunların açık ortamda CO_2 ile reaksiyona girerek alkali karbonatlara (Na_2CO_3 gibi) dönüştüğü hakkında fikir vermektedir (Bernal 2016). Sadece SH kullanılan numunenin spektrumunda 1440 cm^{-1}'de bulunan pik, SS/SH oranın artmasıyla 1461 cm^{-1}'e doğru kaymakta ve

keskinleşmektedir. Bu durum, SS/SH oranının artmasıyla karbonatlaşmanın azaldığını göstermektedir. Karbonatlaşmadaki bu azalma, Na^+ katyonlarının negatif yüklü AlO_4^- grupları tarafından dengelenmesiyle açıklanabilir (Zhang ve ark. 2012; Bernal 2016; Davidovits 2017).

FTIR grafiğinde 900-1300 cm^{-1} aralığında bulunan geniş ve derin spektrum, GP malzemelerin önemli bir parmak izidir ve Si-O-T'nin (T: tetrahedral Si veya Al) asimetrik gerilme fonksiyonel grubunu göstermektedir (Erdogan 2015; Król ve ark. 2016; Petrus ve ark. 2019). Bu bölgedeki pikin konumu, SS/SH oranının artmasıyla 978 cm^{-1}'den 988 cm^{-1}'e kaymıştır. Bu durum da aynı şekilde, alkali çözeltide SS kullanılmasıyla geopolimerizasyonun ilerlediğini ve SiO^n yapısındaki koordinasyon seviyesinin arttığını göstermektedir (Davidovits 2008; Criado ve ark. 2012; Erdogan 2015).

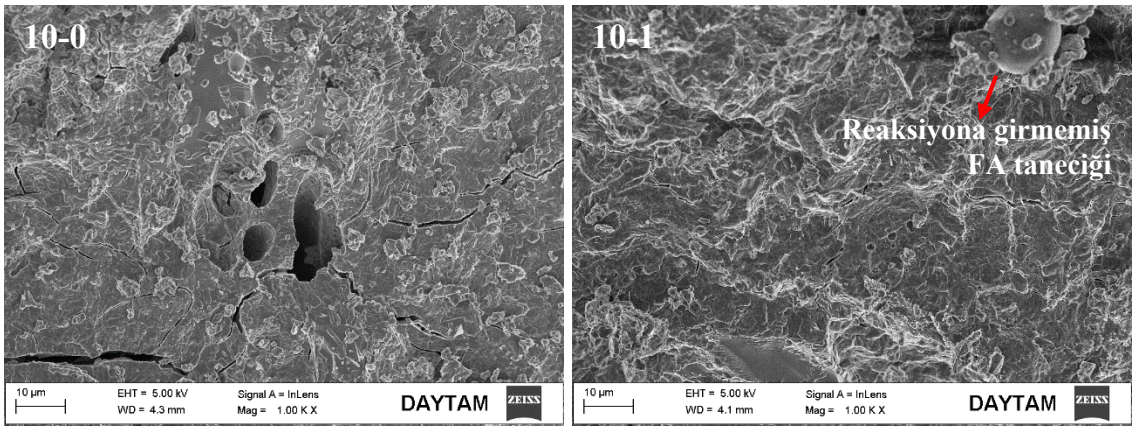
SS ve SH çözeltilerinin birlikte kullanıldığı numunelerin '5 ıslanma-kuruma döngüsü' sonrası basınç dayanımlarındaki kayıp, yüzde olarak Şekil 4.4.'te verilmiştir. Şekil 4.4.'ten de görülebileceği gibi SS çözeltisinin de olduğu karışımlar için SS/SH oranı ve SH molaritesinin, ıslanma-kuruma performansı üzerinde çok etkili olmadığı söylenebilir. Özellikle SS/SH oranı 1 ve 2 olan karışımların ıslanma-kuruma sonrası dayanım kaybı, SH molaritesinden pek etkilenmemekte ve birbirine çok yakın olarak % 42 civarında olmaktadır.



Şekil 4.4. PGP hamur numunelerin ıslanma-kuruma performansı

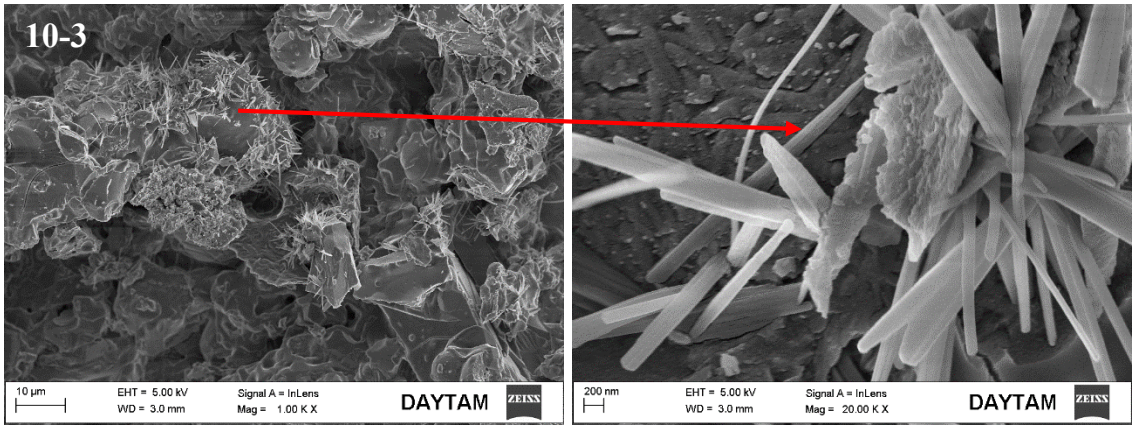
Şekil 4.5.'te PGP hamur numunelerin, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile elde edilen mikroyapılarına ait resimler görülmektedir. PGP hamur numunelerin mikroyapılarına bakıldığında, SS içeriğinin mikro-çatlakları ve boşlukları azalttığı

görülmektedir. Mikro-çatlak ve boşlukların azalması, mekanik özellikleri de iyileştirmektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.5. SS içermeyen (10-0) ve SS içeren (10-1) PGP hamur numunelerin SEM görüntüleri

Ayrıca SS içeriğinin artmasıyla iğne şekilli kristal yapıların arttığı görülmektedir (Şekil 4.6.). Bu durum, yapılan başka çalışmalarda da gözlenmektedir (Moon ve ark. 2014; Singh ve ark. 2015).



Şekil 4.6. SS/SH oranı 3 olan PGP hamur numunede bulunan iğne şekilli kristal yapılar

SEM görüntüleri, PGP hamurunun homojen bir yapıdan çok, kısmen reaksiyona girmiş veya hiç reaksiyona girmemiş toz bağlayıcı tanecikleri, mikro-çatlaklar, boşluklar ve bağlayıcı jelden oluşan heterojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Jiang ve ark. 2020).

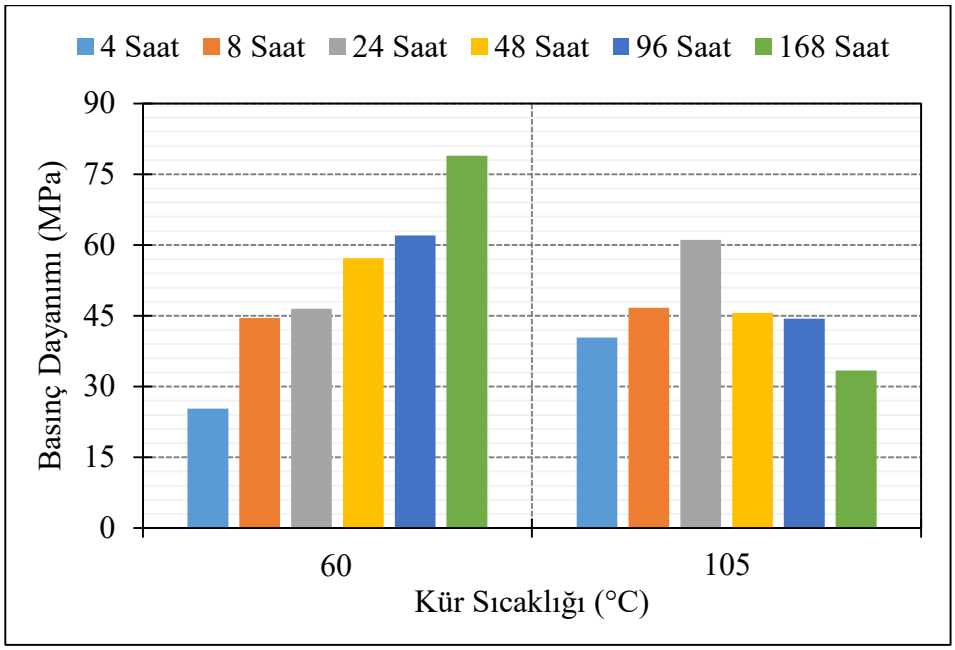
4.1.4. Mineral Katkı İçeriği

Hamur numunelerle yapılan çalışmalarda FA, AC, silis dumanı, klinker ve alümina tozu (Al_2O_3) mineral katkı olarak araştırılmıştır. FA, AC ve Al_2O_3 içeriğinin artmasıyla PGP hamur karışımlarının işlenebilirliği artmıştır. Silis dumanı ve klinker içeriğinin işlenebilirlik üzerinde olumlu bir etkisine rastlanamamıştır. Ancak pomzaya

%3 klinker ikamesinin bile oda sıcaklığında priz süresini önemli derecede kısalttığı tespit edilmiştir. FA ve AC ikamesiyle PGP hamur numunelerin basınç dayanımı ve ıslanma-kuruma performansında önemli artışlar yaşanırken, alümina ikamesiyle numunelerin basınç dayanımı ve ıslanma-kuruma performansındaki artış sınırlı kalmıştır.

4.1.5. Kür Süresi

PGP hamur numunelerle yapılan çalışma, düşük kür sıcaklıklarında kür süresinin artmasıyla basınç dayanımının artmaya devam ettiğini göstermiştir. Buna karşın yüksek kür sıcaklıklarında, basınç dayanımının kür süresiyle bir miktar arttıktan sonra bir miktar düşüş yaşadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7.'de düşük (60 °C) ve yüksek (105 °C) sıcaklıkta kür edilen PGP hamur numunelerin kür süresine bağlı basınç dayanımı değişimi gösterilmektedir.



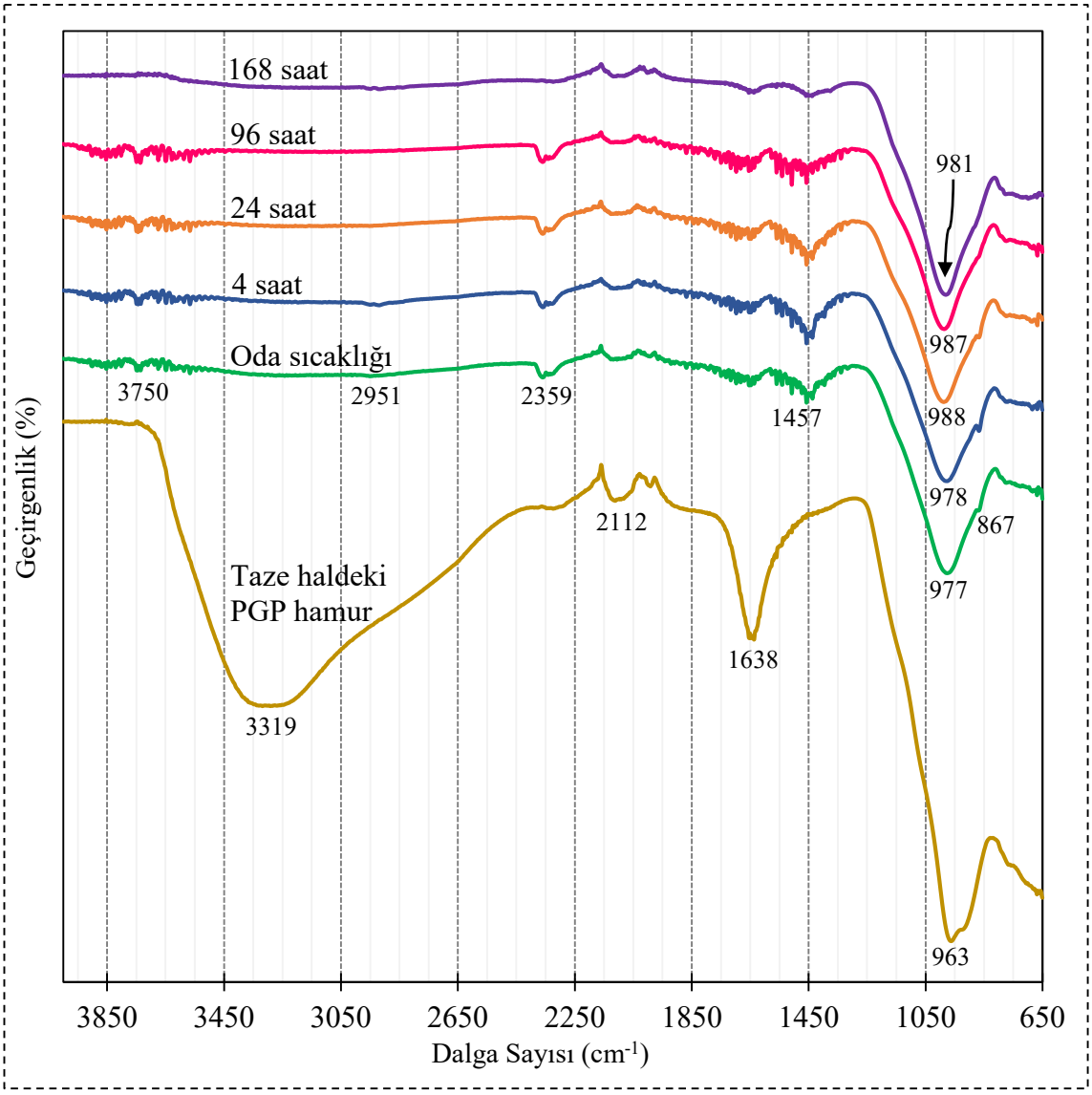
Şekil 4.7. Düşük ve yüksek kür sıcaklıklarında kür süresinin PGP hamur numunelerin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.7.'den de görülebileceği gibi 60 °C sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımları, 168 saate (7 gün) kadar sürekli artmıştır. Hardjito ve Rangan tarafından yapılan bir çalışmada, 60 °C'de kür edilen FA esaslı GP betonların basınç dayanımları da benzer şekilde zamanla artış göstermiştir (Hardjito ve Rangan 2005). Burada vurgulanması gereken noktalardan biri de 60 °C'de 4 saat kür edilen numunelerin basınç dayanımları kabul edilebilir bir seviyeye çıkmasına karşın, ıslanma-kuruma döngüleri sonrasında bu numunelerin parçalanması olayıdır (Şekil 4.2.b.). Buna karşılık

aynı sıcaklıkta 168 saat kür edilen numunelerin ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımı, 74.4 MPa ile en yüksek değeri vermiştir.

Şekil 4.8.'de 60 °C sıcaklıkta kür edilen PGP hamur numunelerin kür süresine bağlı olarak FTIR spektrumları verilmiştir. Ayrıca bu şekilde, kıyaslamak amacıyla oda sıcaklığında kür edilen numune ile karıştırma işlemi henüz tamamlanmış taze haldeki PGP hamurun da FTIR spektrumları verilmiştir. Taze haldeki PGP hamuru spektrumunun 3319 cm^{-1} ve 1638 cm^{-1} bandında bulunan geniş ve şiddeti büyük pikler, H-OH eğilme ve -OH simetrik ve asimetrik gerilme fonksiyonel gruplarını göstermektedir. Bu bantlar, su ve çözünmüş oligomerik türlerdeki -OH gruplarına dayandırılmaktadır (North ve Swaddle 2000; Boonserm ve ark. 2012; Jansson ve ark. 2015; Davidovits 2017). Ekzotermik geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda bu fonksiyonel gruplar yeni ürünlere dönüşmekte ve açığa çıkan su, buharlaşarak bünyeden uzaklaşmaktadır (Davidovits 2017). Reaksiyonların devam etmesi ile taze haldeki bu malzeme, zaman içinde sertleşmiş bir geopolimer yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle taze haldeki PGP hamurda görülen bu fonksiyonel grupların (H-OH ve –OH) pikleri, sertleşmiş PGP numunelerinde neredeyse tamamen kaybolmaktadır (Şekil 4.8.).

Sertleşmiş haldeki PGP hamur numunelerin FTIR spektrumlarında 1450 cm^{-1} bandının etrafındaki küçük tepe noktaları, atmosferik karbonatlaşmadan dolayı oluşan sodyum karbonata (Na_2CO_3) dayandırılan O-C-O asimetrik gerilme titreşimini göstermektedir (Bernal 2016). FTIR spektrumlarına dikkat edildiğinde, 60 °C sıcaklıkta kür edilen bu numunelerin kür süresinin artmasıyla karbanotlaşmayı gösteren bu bantların şiddetinin azaldığı görülmektedir. Karbonatlaşmadaki bu azalma, Na^{+} ve Ca^{++} katyonlarının geopolimer 3 boyutlu ağ yapısında (Davidovits 2017) bulunan negatif yüklü $AlO4^{-}$ tarafından bağlanmalarıyla açıklanabilir. Dolayısıyla 60 °C sıcaklıkta, kür süresinin 168 saate kadar artmasıyla geopolimerik ağın yoğunlaşmaya devam ettiğini söylemek mümkündür. Geopolimerik yapıdaki bu iyileşme, mekanik özelliklere de yansımaktadır (Şekil 4.7.)



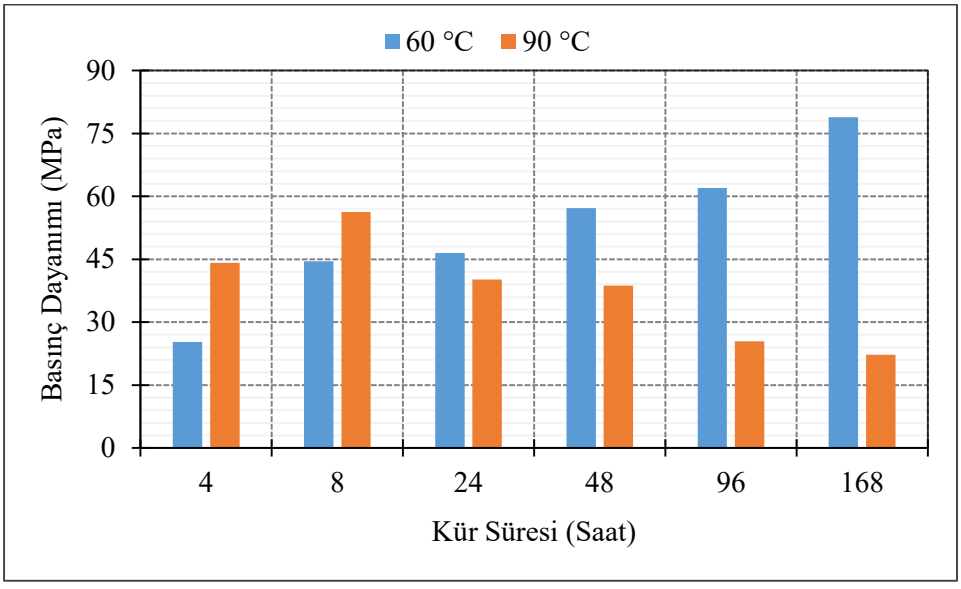
Şekil 4.8. 60 °C sıcaklıkta kür edilen PGP hamur numunelerin kür süresine bağlı FTIR spektrumları

PGP hamur numunelerin FTIR grafiklerinde, 900-1300 cm^{-1} aralığında bulunan ve geopolimerlerin önemli bir parmak izi olan geniş ve yoğun pikler, Si-O-T'nin (T: tetrahedral Si veya Al;) asimetrik gerilme fonksiyonel grubunu göstermektedir (Erdogan 2015; Król ve ark. 2016; Petrus ve ark. 2019). Taze haldeki hamurdan farklı olarak, sertleşmiş hamur numunelerde bu pik değerindeki keskinliğin azaldığı görülmektedir. Buradaki azalma, taze hamurdaki monomer ve oligomer formlarındaki çözünmüş silikat ve alüminatların geopolimerizasyon reaksiyonları ile yeni bağlar oluşturarak ağ yapısına dahil olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca sıcak kürün etkisiyle (kür süresinin artması ile) geopolimerizasyonun artması, bu pikin konumunu daha büyük bir dalga sayısına doğru kaydırmıştır. Bu pikin taze hamurdaki konumu, 963 cm^{-1} iken, sıcak kür uygulanan numunelerde konum, 987 cm^{-1}'e kadar kaymıştır. Bu değişim, SiO^n yapısındaki

koordinasyonun arttığını ve daha fazla polimerize birimler oluştuğunu göstermektedir. Al-O bağına atfedilen 867 cm^{-1} dalga sayısındaki pik, kür süresinin 168 saate çıkmasıyla kaybolmaktadır. Bu durum, 60 °C'de kür süresinin artmasıyla geopolimer ağında tetrahedral $AlO4^-$ birimlerinin daha fazla yer aldığını ve polimerizasyonun ilerlediğini göstermektedir. Böylece su etkilerine (Şekil 4.2.b. ve EK B) ve karbonatlaşmaya (Şekil 4.8.) karşı daha dayanıklı ve daha kararlı bir geopolimerik yapı oluştuğu anlaşılmaktadır.

4.1.6. Kür Sıcaklığı

PGP hamur numunelerin basınç dayanımı ve ıslanma-kuruma performansına farklı kür sıcaklıklarının etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.9.'da 60 ve 90 °C sıcaklıklarda 168 saate kadar kür edilen PGP hamur numunelerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 60 °C'de kür edilen numunelerin 8 ile 24 saat arasındaki kür süresinde sahip olduğu dayanıma, 90 °C'de kür edilen numuneler, yaklaşık 4 saatte ulaşmışlardır. Bu durum, kür sıcaklığının artmasıyla geopolimerizasyon sürecinin hızlandığını göstermektedir. Yüksek kür sıcaklığı, toz bağlayıcıdaki Al ve Si'lerin daha hızlı bir şekilde çözülmesine ve daha erken reaksiyonlara katılmalarına olanak sağlamaktadır (Muñiz-Villarreal ve ark. 2011; Kuenzel ve Ranjbar 2019).



Şekil 4.9. Kür süresinin farklı kür sıcaklıklarında PGP hamurun basınç dayanımına etkisi

Fakat Şekil 4.7. ve 4.9.'dan da rahatlıkla görülebileceği gibi yüksek kür sıcaklığı uzun süre uygulandığında basınç dayanımında düşüşlere sebep olmaktadır (Heah ve ark. 2011; Nurruddin ve ark. 2018). 90 ve 105 °C'de kür edilen numuneler, maksimum dayanıma sırasıyla 8 ve 24 saatte ulaşmışlardır. Fakat 90 ve 105 °C sıcaklık değerleri için

bu süreden daha uzun kürün, basınç dayanımında düşüşlere neden olduğu görülmektedir. Buna karşılık, 60 ve 75 °C'de kür edilen numunelerin basınç dayanımında sürekli artış olmuştur (EK B). Yüksek kür sıcaklıklarının uzun süre uygulanması ile dayanımda düşüşlerin yaşanması, iki yolla açıklanabilir. Yüksek sıcaklıklar geopolimerizasyonu hızlandırırken çözünme için gereken sürenin daralmasına sebep olur. Dolayısıyla alüminosilikat kaynağındaki taneciklerin yeterince parçalanmasını ve sıvı fazda yeterli miktarda oligomer ve Al / Si türlerinin oluşmasını engeller (Muñiz-Villarreal ve ark. 2011). Ek olarak, yüksek kür sıcaklığı ve hızlı ekzotermik reaksiyonlar, suyun hızla, kısa sürede katılaşmış olan bağlayıcı hamurun bünyesinden atılmasına sebep olur. Sertleşmiş hamurdaki bu büzülme, dayanımın düşmesinden sorumlu boşluk ve çatlakların yer almasıyla sonuçlanır (Heah ve ark. 2011; Mo ve ark. 2014).

4.1.7. Priz Süresi

Standart kıvamdaki PGP ve PC hamur karışımların priz başlangıç ve bitiş süreleri belirlenmiş ve Çizelge 4.1.'de sunulmuştur. GP bağlayıcıların priz süresi, birinci derecede, kullanılan toz bağlayıcının inceliği ve içerdiği serbest CaO miktarından etkilenmektedir. Toz bağlayıcının inceliği ve serbest CaO içeriğinin artması, GP bağlayıcının priz almasını hızlandırmaktadır (Temuujin, Williams, ve ark. 2009; Temuujin, Van Riessen, ve ark. 2009; Firdous ve ark. 2018). Çizelge 4.1.'den de görülebileceği gibi Ca içeriği düşük olan (Çizelge 3.1.) FA ve pomza ile üretilen PGP bağlayıcıların oda şartlarında priz alması, 8 günden daha fazla olmaktadır.

Çizelge 4.1. PGP ve PC bağlayıcıların priz başlangıç ve bitiş süreleri

Karışım	FA İkamesi (%)	AC İkamesi (%)	Oda Sıcaklığı		Sıcak Kür (60°C)	
			Priz Baş. (Dakika)	Priz Bitiş (Dakika)	Priz Baş. (Dakika)	Priz Bitiş (Dakika)
Pomza	-	-	≥ 9 gün	≥ 9 gün	220	257
0FA-**10**AC	-	10	80	195	65	105
0FA-**20**AC	-	20	62	110	41	50
0FA-**30**AC	-	30	43	63	33	40
30FA-**0**AC	30	-	≥ 8 gün	≥ 8 gün	230	270
PC	-	-	164	231	-	-

Ca içeriği az olan GP bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda priz almasının 24 saatten fazla sürebildiği başka çalışmalarca da ortaya konmuştur (Hardjito ve ark. 2008; Nath ve

Sarker 2014; Kuri ve ark. 2021). Hatta Tchakoute ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, spesifik yüzey alanı az ve CaO içeriği düşük olan bir DP ile sentezlenen GP bağlayıcının priz alması, oda sıcaklığında 14 günde tamamlanamamıştır (Tchakoute ve ark. 2013). Puzolanik aktivitelerinin düşük olmasından dolayı DP esaslı GP bağlayıcıların oda sıcaklığındaki priz süresinin, daha uzun olacağı ifade edilmektedir (Alahverdi ve ark. 2008; Djobo ve ark. 2017). Bu çalışmada da benzer şekilde, bir YP olan FA'nın pomzaya ikame edildiği 30FA-0AC karışımının oda koşullarında priz alması, sadece pomza ile elde edilen karışımın priz almasından az da olsa kısa sürmüştür.

AC ikamesi ile PGP bağlayıcıların oda sıcaklığında priz almasının oldukça kısaldığı görülmektedir (Vafaei ve Allahverdi 2017). AC'nin pomzaya %10 miktarında bile ikamesi, oda sıcaklığında priz bitiş süresini, 9 günden 195 dakikaya kadar düşürebilmektedir. Bu durum, PGP betonların sadece fabrikada önceden üretilip yapıya hazır halde getirildiği prefabrik beton eleman olarak değil aynı zamanda yapıdaki yerinde dökme işlemine de olanak sağlayacaktır.

4.1.8. Hacim Sabitliği

Standart kıvama sahip PGP hamur karışımların hacim kararlılığını belirlemek için Le Chatelier aleti kullanılmıştır. Sadece pomza ile üretilen hamurun genleşme miktarı, %30 FA ikamesi ve %30 AC ikamesi ile hazırlanan hamurların genleşme miktarlarıyla kıyaslanmıştır. Çizelge 4.2.'de çimentoların hacim sabitliği ile alakalı olan genleşme miktarları verilmiştir. TS EN 197-1 (2002) standardına göre beton üretiminde kullanılacak çimentoların dayanıklı olarak kabul edilebilmesi için genleşme miktarının 10 mm'yi geçmemesi gerekmektedir (TS-EN-197-1 2002). PC ve PGP çimentolarının genleşme miktarları eşit ve 0.5 mm gibi oldukça düşük bir değere sahip olmuştur.

Çizelge 4.2. PGP ve PC çimentolarının genleşme miktarları

Karışım	FA İkamesi (%)	AC İkamesi (%)	Genleşme Miktarı (mm)
Pomza	-	-	0.5
0FA-**30**AC	-	30	0.5
30FA-**0**AC	30	-	0.5
PC	-	-	0.5

Serbest CaO veya MgO'nun, çimento kompozisyonunda fazla miktarda bulunmaları halinde çimento hamurunda genleşmeye sebep oldukları bilinmektedir

(Erdoğan 2016). Toz bağlayıcıların genleşme miktarlarının düşük olması, bu malzemelerin MgO ve serbest CaO miktarlarının az olmasıyla açıklanabilir (Çizelge 3.1.). Ancak bu CaO ve/veya MgO içeriğinin mineralojik yapısı da önemli olmaktadır. FA esaslı GP çimentolarla yapılan bir çalışmada, cürufun FA'ya ikame edilmesiyle karışımdaki MgO miktarı arttırılmasına karşılık genleşeme miktarında pek bir değişiklik yaşanmamıştır (Kuri ve ark. 2021). Kuri ve ark., cüruf ve cüruf içerikli hamurların XRD analizinde, Mg'nin kristal forsterit formunda bulunduğunu belirlemişlerdir. Oysa Mg'nin mineral periklaz formda bulunduğu durumda genellikle hidratasyon yoluyla genleşemeye sebep olduğu ifade edilmektedir (Snellings ve ark. 2012; Kuri ve ark. 2021).

4.2. PGP Harçlarla Yapılan Çalışma

PGP harçlarla yapılan çalışma, taze haldeki karışımlar ile sertleşmiş haldeki numuneler üzerinde gerçekleştirilen bir kısım testlerden oluşmaktadır. Ayrıca bu testlerden elde edilen değerler, standart PC harç numuneler ile kıyaslanmıştır. Bu kısımda PGP harçların işlenebilirlik, fiziksel özellik, basınç dayanımı ve bir kısım durabilite özellikleri detaylandırılacaktır.

4.2.1. PGP Harç Karışımların İşlenebilirliği

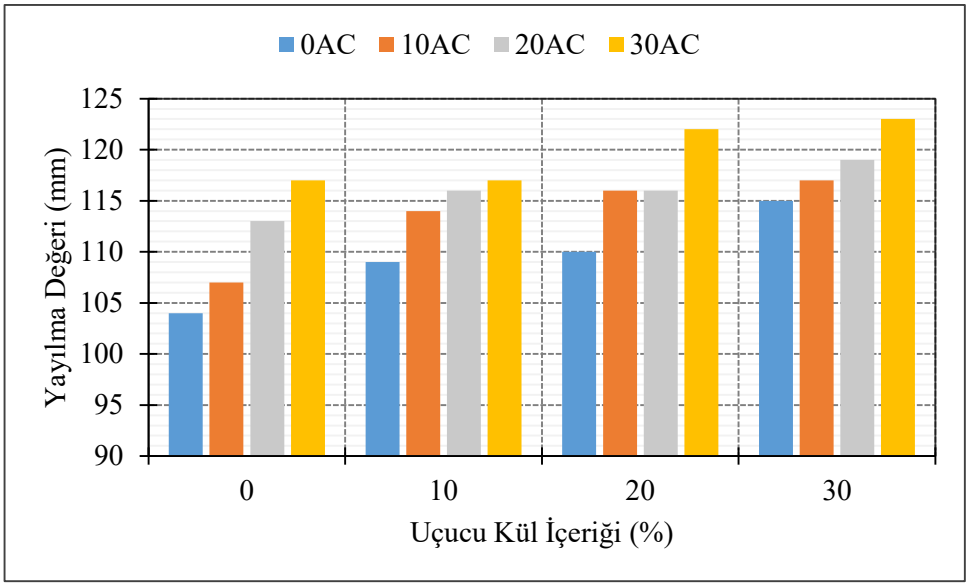
Taze haldeki harç karışımların yayılma tablasından elde edilen işlenebilirlik (yayılma miktarı) değerleri, Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi PGP harçların yayılma değerleri, 104 mm ile 123 mm arasında değişmektedir. Referans karışımın (PC) yayılma değeri ise 119 mm olmuştur. Ayrıca kıyaslama amaçlı %100 FA ile üretilen GP harç karışımın yayılma miktarı 166 mm olmuştur. PGP harç karışımlarda ek-su bulunduğu halde özellikle pomza içeriği yüksek olanların yayılma miktarları, referans karışımın yayılma miktarından düşüktür. FA ve GYFC ile üretilen GP harçlarla yapılan bir çalışmada, kumun toz bağlayıcıya oranının 2.5'i aşmasıyla yayılma tablası değerinde keskin bir düşüşün olduğunu tespit edilmiştir (Yang ve ark. 2009). Bu çalışmada kumun toz bağlayıcıya oranı 3 olduğundan dolayı PGP harç karışımların yayılma değerlerinin düşük olmasında, benzer bir durumun etkili olmuş olabileceği söylenebilir.

Çizelge 4.3. Harç numunelerin yayılma miktarları

Karışım İsmi	Yayılma Değeri (mm)	Karışım İsmi	Yayılma Değeri (mm)
Pomza	104	**20**FA-**10**AC	116
0FA-**10**AC	107	**20**FA-**20**AC	116
0FA-**20**AC	113	**20**FA-**30**AC	122
0FA-**30**AC	117	**30**FA-**0**AC	115
10FA-**0**AC	109	**30**FA-**10**AC	117
10FA-**10**AC	114	**30**FA-**20**AC	119
10FA-**20**AC	116	**30**FA-**30**AC	123
10FA-**30**AC	117	**PC**	119
20FA-**0**AC	110	**FA**	166

Şekil 4.10.'da, farklı AC içeriğine sahip harç karışımların yayılma miktarlarının, FA içeriğine bağlı değişimi grafik olarak sunulmuştur. PGP harç karışımların işlenebilirliği hem FA hem de AC içeriğinin artmasıyla iyileşmektedir (Şekil 4.10.). Yalnız pomza ile üretilen PGP harç karışımın işlenebilirliği oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni, Şekil 3.6.'da da görülebileceği gibi öğütülmüş pomza taneciklerinin köşeli, yassı ve düzensiz şekle sahip olmasıdır. Girinti ve çıkıntısının çok olduğu bu taneciklerin ıslatılması gereken yüzey alanları daha fazla olmaktadır. Böylece karışımın su ihtiyacı artmakta; işlenebilirliği düşmektedir. Ayrıca FA ve pomzanın Çizelge 3.2.'de bulunan özgül yüzey alanlarına bakıldığında da bu durumu açıklamak mümkündür. Çizelge 3.2.'den de görülebileceği gibi pomzanın özgül yüzey alanı, 4980 cm^2/g ve FA'nın özgül yüzey alanı ise 3805 cm^2/g'dır.

AC ikamesi ile işlenebilirliğin iyileşmesini ise homojen ve düzgün öğütme ile açıklamak mümkündür. Üretim koşulları iyi olan bir fabrikada üretildiğinden AC taneciklerinin pomza taneciklerine oranla daha az yapraklanma göstereceği dolayısıyla su ihtiyacının daha az olacağını söylemek mümkündür. Ayrıca Şekil 3.5.'te de görüldüğü gibi öğütülmüş pomza taneciklerinin yaklaşık %14'ü 1 μm'den küçük iken, AC için bu değer, yaklaşık % 5'tir. Dane boyutu daha büyük olduğundan dolayı su ihtiyacı daha az olan AC'nin pomzaya ikamesiyle karışımın işlenebilirliği iyileşmektedir. Ayrıca sulu süspansiyonlarda, AC'nin kümelenme eğiliminin daha düşük olmasından dolayı pomza ile ikamesi halinde karışımın işlenebilirliğini iyileştirdiğini ifade etmek mümkündür (Assis ve ark. 2009; Vafaei ve Allahverdi 2017).



Şekil 4.10. Farklı AC içeriğine sahip PGP harçların yayılma miktarının FA içeriğine bağlı değişimi

FA'nın, harç karışımların işlenebilirliğini arttırması, yukarıdaki açıklamaların yanında, iki farklı yönden daha açıklanabilir. Bunlardan ilki, Şekil 3.6.'da da görüldüğü gibi FA tanecikleri, küresel yapıdadırlar ve bunun sayesinde iç sürtünmeyi azaltarak karışımın akıcılığını arttırırlar. İkincisi ise FA'nın özgül ağırlığı, pomzanın özgül ağırlığından düşük olduğundan dolayı FA içeriği ile aynı ağırlıkta daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur elde etmek mümkün olmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze karışımdaki kum tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır (Erdoğan 2016).

İşlenebilme, taze betonun, kolayca karılabilmesi, segregasyon yapmadan taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi özelliklerinin bütününü barındırmaktadır. Ayrıca işlenebilme özelliği, taze betonun kayma dayanımı, akıcılık, kohezyon ve adezyon gibi özellikleriyle ilgilidir. PC esaslı harç ve betonların işlenebilirliğini belirlemek için birçok yöntem olmasına karşın, hiç biri işlenebilmenin bütün özelliklerini barındırmaz (Erdoğan 2016). PC esaslı harçların işlenebilirliğini belirlemede kullanılan yayılma tablasının, GP esaslı harçların işlenebilirliğini belirlemede ne kadar uygun bir yöntem olacağı tam olarak belli değildir. Çünkü taze haldeki GP hamur, harç ve betonların kohezyonu PC esaslı olanlara nispeten oldukça yüksektir.

Son olarak ifade edilmesi gereken noktalardan biri de GP karışımların sahip olduğu kohezyonun sağlayacağı faydadır. GP karışımların kohezif olması, bu betonların

karılma ve yerleştirme gibi işlemlerini zorlaştırmasına karşın, taşıma ve yerleştirme gibi süreçlerde bu betonların segregasyonunu azaltacaktır (Neville 1995).

4.2.2. PGP Harç Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Harç numunelerin yoğunluk ve su emme kapasiteleri, Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi oda sıcaklığında kür edilen PGP harç numunelerin yoğunlukları, 2.06 ile 2.13 g/cm^3 arasında değişirken, sıcak küre tabi olan PGP harç numunelerin yoğunlukları ise 2.03 ile 2.10 g/cm^3 arasında değişmektedir (%50 FA içeren ve %50 AC içeren hariç). PC ile üretilen referans harç numunenin yoğunluğu, 2.17 g/cm^3 ile bütün PGP harç numunelerinden daha yüksek olmuştur. Bu durum, PC'nin özgül ağırlığının diğer toz bağlayıcıların özgül ağırlığından yüksek olmasıyla açıklanabilir (Çizelge 3.2.). Oda sıcaklığında kür edilen PGP harç numunelerin su emme oranları, %1.84 ile %5.47 arasında değişirken, sıcak küre tabi olan PGP harç numunelerin su emme oranları ise %2.75 ile %6.06 arasında değişmektedir. PC ile üretilen referans harç numunenin su emme oranı, %3.33 ile PGP harç numunelerin su emme oranlarının ortalamasından daha düşük olmuştur. Bu çalışmada elde edilen su emme oranları, benzer bir çalışmada elde edilen su emme oranlarından oldukça küçük olmuştur (Mobasheri ve ark. 2021). Böyle bir fark olmasının bir sebebinin, bu çalışmada kullanılan kür sıcaklıklarının, sözü edilen çalışmanın kür sıcaklığından düşük olması olduğu düşünülmektedir. Çünkü kür sıcaklığının belli bir dereceden fazla olması, suyun daha hızlı ve yoğun bir şekilde buharlaşmasına yol açarak daha poroz bir yapıya sebep olmaktadır (Heah ve ark. 2011; Mo ve ark. 2014).

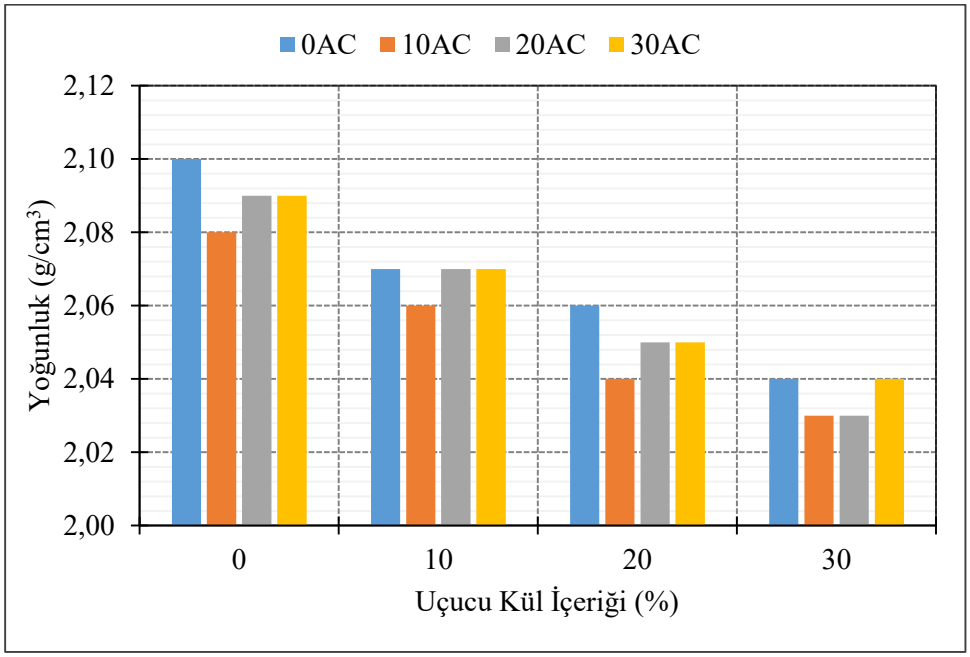
Çizelge 4.4. Harç numunelerin fiziksel özellikleri

Karışım İsmi	Fiziksel Özellikler			
	Oda Sıcaklığı		Sıcak Kür	
	Yoğunluk (g/cm^3)	Su Emme Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Su Emme Oranı (%)
Pomza	2.13	2.58	2.10	2.75
0FA-**10**AC	2.09	4.86	2.08	5.20
0FA-**20**AC	2.11	4.59	2.09	5.35
0FA-**30**AC	2.11	5.15	2.09	5.36
10FA-**0**AC	2.11	2.61	2.07	2.70
10FA-**10**AC	2.09	5.02	2.06	5.41
10FA-**20**AC	2.11	3.71	2.07	5.19
10FA-**30**AC	2.10	5.19	2.07	5.73
20FA-**0**AC	2.10	2.38	2.06	3.65
20FA-**10**AC	2.06	5.35	2.04	5.65
20FA-**20**AC	2.07	4.64	2.05	5.64
20FA-**30**AC	2.10	4.32	2.05	5.86
30FA-**0**AC	2.10	1.84	2.04	3.42
30FA-**10**AC	2.06	5.47	2.03	5.76
30FA-**20**AC	2.06	4.72	2.03	5.60
30FA-**30**AC	2.09	4.78	2.04	6.06
0FA-**50**AC	-	-	2.14	4.72
50FA-**0**AC	-	-	2.00	5.85
PC	2.17	3.33	-	-

Sıcak küre tabi tutulan numunelerin yoğunluklarının oda sıcaklığında kür edilen emsallerine oranla düşük olması, kür esnasında sıcaklığın etkisiyle suyun daha fazla dışarıya çıkmasının bir sonucu olarak, yoğunluğun düşmesiyle açıklanabilir. Djobo ve ark. tarafından DP esaslı GP hamurlar ile yapılan bir çalışmada, kür sıcaklığının artmasıyla yoğunluğun düştüğü ve su emme oranının yükseldiği tespit edilmiştir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016a). Bu durum, bu çalışmadaki bütün karışımlar için geçerlidir. Aynı karışım için sıcak küre tabi tutulan harç numunelerle kıyaslandığında, oda sıcaklığında kür edilen harç numunelerin su emme oranları düşük; yoğunlukları ise yüksektir (Çizelge 4.4.). Djobo ve ark. tarafından GP harçlarla gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise bu durumun tam tersi gözlenmektedir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b). Firdous ve ark., ilk çalışmada uygulanan en yüksek kür sıcaklığının 60 °C, diğerinde ise 80 °C olmasına

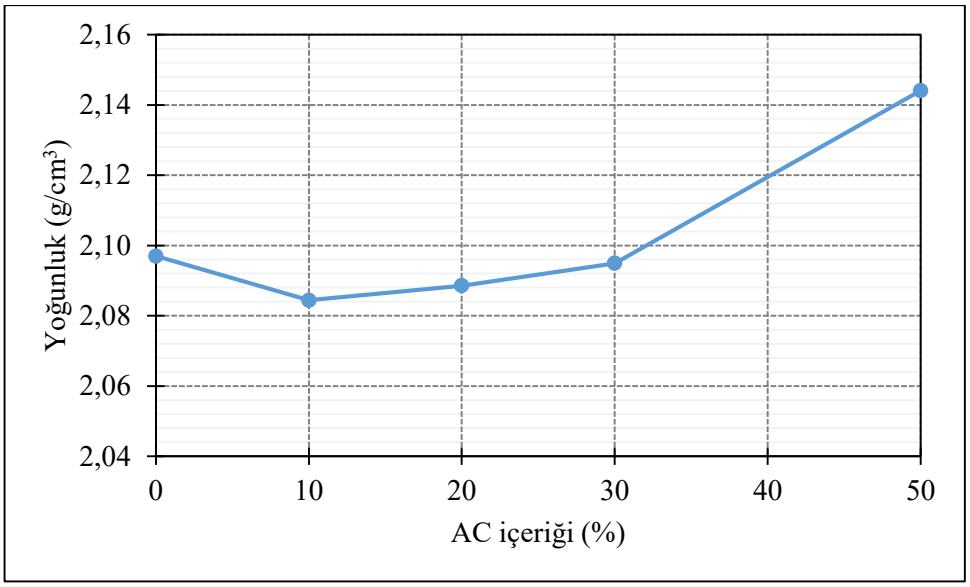
dikkat çekerek, görünüşte birbirine zıt olan bu durumun bir sebebinin, çalışılan sıcaklık değerleri olabileceğini öne sürmektedirler (Firdous ve ark. 2018). Başka bir sebep olarak da çalışmaların birinin harç numuneler, diğerinin de hamur numuneler üzerinde gerçekleştirilmesinden kaynaklı olabileceğini ifade etmektedirler. Ancak bu çalışmada harç numunelerden elde edilen sonuçlar, sözü edilen çalışmalardan, hamur numuneler ile gerçekleştirilenin sonuçlarıyla uyuşmaktadır. Dolayısıyla bu durumun yaşanmasında, yukarıda açıklanan sebeplerden birincisinin daha etkili olduğu söylenebilir.

PGP harçlarda, karışımlar arası yoğunluk değişimine bakıldığında, iki faktörün etkili olduğu düşünülmektedir. Birincisi, karışıma giren bileşenlerin özgül ağırlıkları: Özgül ağırlığı düşük olan FA ikamesiyle PGP harç numunelerin yoğunluklarında düşüş olmaktadır. Şekil 4.11'de, her AC içeriği (%0, 10, 20 ve 30) için FA içeriğine bağlı yoğunluk değişimi gösterilmiştir. Şekilden kolaylıkla görülebileceği gibi sabit bir AC içeriği için FA ikamesinin artmasıyla yoğunluk sürekli düşmüştür. Böylelikle karışıma giren bileşenlerin sahip olduğu özgül ağırlığın, yoğunluk üzerindeki etkisi tespit edilmiş olmaktadır. İkinci olarak, karışıma giren bileşenlerin kendi aralarındaki etkileşimin doğurduğu gözeneklerin boyut ve dağılımları: Bu etkileşimler sonucu toplam boşluk hacmi fazla olan numunelerin yoğunluğu düşmektedir. Bu konuya, 4.3.1. başlığında ayrıca değinilecektir.



Şekil 4.11. Farklı AC içeriğine sahip PGP harç numunelerin yoğunluğuna FA içeriğinin etkisi

Şekil 4.11.'den de görülebileceği gibi sabit bir FA içeriği dikkate alındığında ise AC ikamesinin artmasıyla yoğunluk bir miktar azaldıktan sonra tekrar bir miktar artmaktadır. AC'nin özgül ağırlığı, öğütülmüş pomzanın özgül ağırlığından yüksek olduğundan dolayı AC içeriğinin artmasıyla PGP harç numunelerin yoğunluğunun artması beklenmektedir. Bu durumun sebebi tam olarak tespit edilememiştir. Ancak yoğunluğun, sadece karışıma giren bileşenlerin özgül ağırlıklarıyla belirlenemeyeceği, bileşenlerin kendi aralarındaki etkileşimleri ve bu bileşenlerin kür koşullarına bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabileceği açıktır. Ayrıca AC içeriğinin %30'dan daha fazla olmasıyla elde edilen numunenin yoğunluğunun artmaya devam ettiği ve AC içermeyen numunenin yoğunluğunun üstüne çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. PGP harç numune yoğunluklarının AC içeriğine bağlı değişimi

4.2.3. PGP Harç Numunelerin Basınç Dayanımı

Harç karışımlarla üretilen numuneler, oda sıcaklığında veya 60 °C'de 7 gün kür edilerek 7, 28 ve 90. günde kırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlemden elde edilen basınç dayanımı değerleri, Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Karışım İsmi	Basınç Dayanımı (MPa)					
	Oda Sıcaklığı			Sıcak Kür		
	7	28	90	7	28	90
Pomza	0.0	21.9	50.4	6.8	25.5	40.8
0FA-**10**AC	17.1	34.5	44.9	39.6	47.4	53.6
0FA-**20**AC	26.9	32.6	37.5	59.7	57.8	57.9
0FA-**30**AC	24.4	38.7	46.2	53.1	57.3	54.8
10FA-**0**AC	0.0	20.0	51.0	11.1	30.5	42.6
10FA-**10**AC	17.7	36.0	45.8	40.3	50.3	54.2
10FA-**20**AC	28.2	30.3	33.8	58.3	62.7	65.6
10FA-**30**AC	25.8	39.6	47.9	62.3	65.9	63.6
20FA-**0**AC	0.0	20.3	43.1	13.1	32.3	47.2
20FA-**10**AC	16.8	34.6	42.7	41.7	50.1	54.8
20FA-**20**AC	22.9	27.8	30.5	65.9	70.6	70.3
20FA-**30**AC	24.3	42.3	53.6	55.8	62.8	61.6
30FA-**0**AC	0.0	23.0	43.8	15.1	38.6	46.5
30FA-**10**AC	17.3	34.2	41.8	43.1	52.1	55.7
30FA-**20**AC	20.7	26.4	30.1	68.0	70.3	69.5
30FA-**30**AC	23.6	40.3	50.6	49.4	56.1	60.8
PC	38.3	47.9	65.8	-	-	-

Çizelge 4.5.'ten de görülebileceği gibi PGP harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımları, 20.0 ile 70.6 MPa arasında değişmektedir. Herhangi bir ön işleme tabi tutulmamış DP'ler ile sentezlenmiş GP'ler ile kıyaslandığında bu çalışmada, mineral katkı ilavesiyle elde edilen 70.6 MPa basınç dayanımı değeri, oldukça iyi bir değerdir (Villa ve ark. 2010; Haddad ve Alshbuol 2016; Kantarcı ve ark. 2019). Ön işlem görmemiş ve/veya mineral katkı kullanılmayan DP'ler kullanılarak elde edilen GP bağlayıcıların dayanım değerlerinin düşük olması, daha önce ifade edildiği gibi DP'lerin düşük reaktivitelerinin bir sonucu olarak, alkalin ortamda az çözülme göstermeleri ile açıklanmaktadır. Buna karşın Çizelge 1.3.'te gösterildiği gibi DP'lere, kalsinasyon, alkali füzyon ve mekanik aktivasyon gibi ön işlem uygulanması veya mineral katkı ikamesi ile dayanım değerleri daha üst seviyelere çıkarılabilmektedir (Bondar ve ark. 2011b; Kouamo ve ark. 2013; Takeda ve ark. 2014; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016a; Robayo ve ark. 2016). Dayanım ve dayanıklılık açısından kararlı bir GP bağlayıcı elde edilmesi için

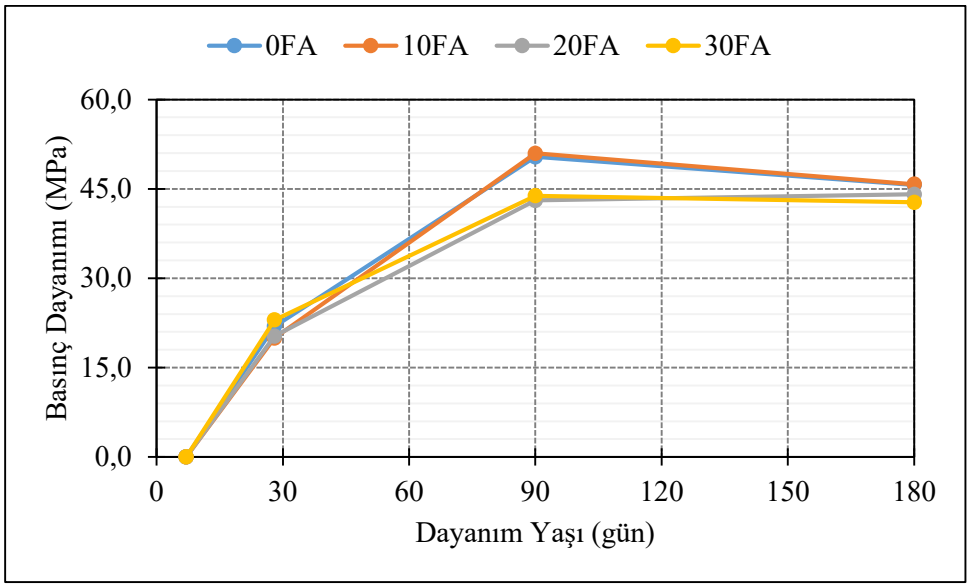
birden fazla alüminosilikat kaynağının birlikte toz bağlayıcı olarak kullanılması önerilmektedir. Bu yolla, birlikte kullanılan tüm toz bağlayıcıların olumlu özelliklerinden faydalanılacağı düşünülmektedir (Xu ve Van Deventer 2002). Bu çalışmada da benzer şekilde pomza, FA ve AC'nin birlikte kullanılmasıyla dayanımda artış yaşanmaktadır.

PGP harç numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında, bütün karışımlar için sıcak kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı, sıcak kür uygulanmayan numunelerin basınç dayanımından daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, GP bağlayıcıların kabul edilebilir bir sürede yeterli bir dayanıma ulaşmaları için sıcak kürün gerekli olduğunu göstermektedir (Kani ve Allahverdi 2009b; Heah ve ark. 2011; Balun ve Karataş 2021).

AC içermeyen karışımların oda sıcaklığında kür edilen numunelerinin 7 günde katılaşmalarını tamamlayamadıkları, daha önce ifade edilmişti (Çizelge 4.1.). Bu yüzden 7 günlük basınç dayanımları 0.0 olarak verilmiştir. Ancak bu numunelerin, katılaşmalarını tamamladıktan sonra zamanla 51.0 MPa gibi yüksek sayılabilecek bir değere ulaştıkları görülmektedir. FA esaslı GP ile yapılan bir çalışmada da benzer şekilde oda sıcaklığında kür edilen numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 0.0 ve 42.8 MPa olmuştur (Phoo-ngernkham ve ark. 2015). Yalnız pomza ile hazırlanan ve 60°C'de kür edilen PGP numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı, 6.8 MPa değerinde kalırken, 28 günlük basınç dayanımı 3.75 katına çıkarak 25.5 MPa değerine ulaşmıştır. Safari ve ark., Van-Erciş pomzasını SS/SH oranı, 2.5 ve SH molaritesi, 8 M olan AA ile aktive ederek hazırladıkları PGP hamur numuneleri, 120 saat 60 °C'de küre tabi tuttukları çalışmada, PGP numunelerinin 28 günlük basınç dayanımını, 7 günlük basınç dayanımının yaklaşık 5 katı olarak bulmuşlardır (Safari ve ark. 2020).

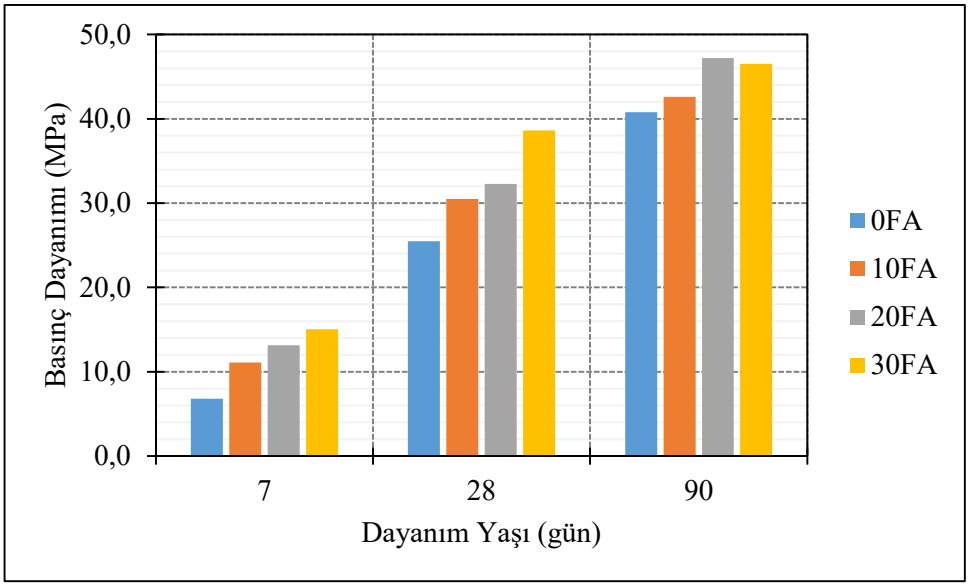
Bitlis-Tatvan'dan elde edilen pomza ile gerçekleştirilen bir çalışmada, oda sıcaklığı ve 60 °C'de kür edilen PGP numunelerin basınç dayanımlarının 90 güne kadar arttığı tespit edilmiştir (Balun ve Karataş 2021). Bu çalışmada da benzer şekilde %100 pomza ile üretilen PGP harç numunelerin basınç dayanımları 90 güne kadar artmıştır. Oda sıcaklığında kür edilen tüm PGP harç numunelerin basınç dayanımlarının 90 güne kadar arttığı görülmektedir. AC içermeyen oda sıcaklığında kür görmüş PGP harçların basınç dayanımlarının 90 günden sonra düşebildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.13.). Özellikle FA içeriğinin az olduğu veya hiç olmadığı numunelerde bu durum daha belirgin

olmuştur. Sadece FA ile üretilen GP numunelerde ise 180 güne kadar dayanım artışının devam ettiği tespit edilmiştir. VK ile gerçekleştirilen bir çalışmada ise oda sıcaklığında kür edilen GP harçların basınç dayanımının 180 güne kadar artmaya devam ettiği tespit edilmiştir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b).



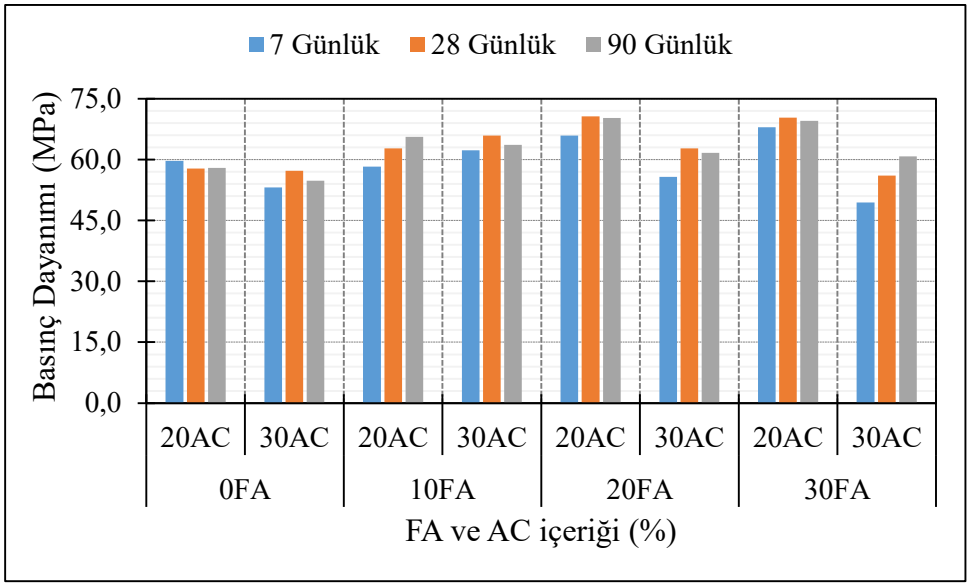
Şekil 4.13. AC içermeyen ve farklı FA içeriğine sahip oda sıcaklığında kür olmuş PGP harç numunelerin basınç dayanımlarının zamanla değişimi

Şekil 4.14.'te AC içermeyen sıcak küre tabi tutulmuş farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin basınç dayanımının zamanla değişimi verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi farklı dayanım yaşlarındaki PGP harç numunelerinin FA içeriğinin artmasıyla basınç dayanımları sürekli artmaktadır. Sadece dayanım yaşı 90 olan numunelerde FA içeriğinin %20'den %30'a çıkmasıyla basınç dayanımında çok hafif bir düşüş yaşanmıştır.



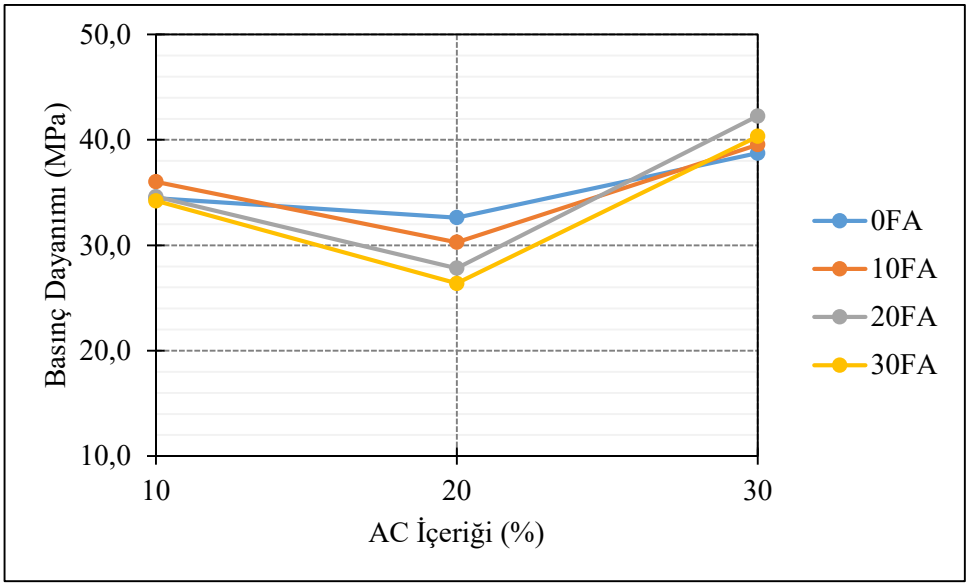
Şekil 4.14. Sıcak kür görmüş farklı FA içeriğine sahip AC içermeyen PGP harç numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları

Sıcak küre tabi tutulmuş numunelerden %20 ve %30 AC içeriğine sahip olanların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları grafik halinde Şekil 4.15.'te verilmiştir. Şekil 4.15.'ten de görülebileceği gibi bazı karışımların dayanımında zamanla düşüşler yaşanmıştır. AC içeriği %20 ve %30 olan bu karışımların basınç dayanımının 7 ve 90 gün zaman aralığında çok fazla gelişmediği görülmektedir. Bunu, sıcaklık etkisi ile geopolimerizasyonun 7 gün içerisinde çoğunlukla tamamlanması ve AC'nin çok reaktif olmasından reaksiyonlarını kısa süre tamamlaması ile açıklayabiliriz. Sıcak kür ve AC içeriği ile dayanım gelişiminin kısa sürede tamamlanması, prefabrik beton elemanların üretilmesinde çok fayda sağlayacaktır. Erken yüksek dayanıma ulaşan bu elemanlar uzun süre depolanmadan kullanıma sunulacağından ekonomik faydalar sağlayacaktır. Böylece kanalizasyon borusu, kanal, menfez ve su oluğu gibi prefabrik su yapılarının PGP betondan üretilmesine imkan sağlanmış olacaktır.



Şekil 4.15. Sıcak kür görmüş farklı dayanım yaşlarındaki PGP harç numunelerin basınç dayanımının FA ve AC içeriğine bağlı değişimi

Mobasheri ve ark., pomzaya %24 AC ikame ederek hazırladıkları ve 24 saat oda sıcaklığından sonra sıcak küre tabi tuttukları PGP harçların basınç dayanımının, 7 ve 28 gün arasında çok gelişmediğini tespit etmişlerdir (Mobasheri ve ark. 2021). Şekil 4.15.'te görüldüğü gibi benzer bir durum, bu çalışmada, sıcak küre tabi tutulan %20 ve %30 AC içeriğine sahip PGP harç numunelerde de yaşanmıştır. Ayrıca bu çalışmadaki oda sıcaklığında kür edilmiş %20 AC içeriğine sahip numunelerde yaşanmış ve bu numunelerde 7 ve 28 gün arasında basınç dayanımı gelişimi nispeten az olmuştur. Buna karşılık, %10 ve %30 AC içeriğine sahip numunelerde 7 ve 28 gün arasında basınç dayanımı önemli derece artmıştır. Oda sıcaklığında kür edilen AC içeriğine sahip PGP harçlara bakıldığında, AC içeriğinin %10'dan %20'ye çıkmasıyla numunelerin 28 günlük basınç dayanımının düştüğü ve %20'den %30'a çıkmasıyla %10 AC içeriğine sahip numunelerin basınç dayanımının üstüne çıktığı görülmektedir (Şekil 4.16.). Ayrıca Şekil 4.16.'dan da görülebileceği gibi %20 AC içeriğine sahip numunelerde FA içeriğinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.16. Oda sıcaklığında kür görmüş ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı 28 günlük basınç dayanımı değişimi

AC içeriğine sahip ve oda sıcaklığında kür olan PGP harçların 90 günlük basınç dayanımları, 50 MPa'nın üstüne çıkabilmektedir. Ayrıca sonraki başlıkların altında anlatıldığı gibi bu harçların durabiliteleri de kabul edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla masif yapılar ve barajlardaki betonlar gibi ilk zamanlarda yüksek bir dayanım gerektirmeyen yapılarda, AC ikamesi ile PGP betonların yerinde dökme işlemine imkan sağlanacağı tahmin edilmektedir (Erdoğan 2016).

4.2.4. PGP Harç Numunelerin Islanma-Kuruma Performansı

Harç numunelerin 20 ıslanma-kuruma döngüsü sonrası kalan basınç dayanımları ve basınç dayanımlarındaki kayıp, Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Eksi (-) değerler, ıslanma-kuruma etkisi sonrası basınç dayanımının arttığını göstermektedir. PC, hidrolik bağlayıcı olduğundan yani suyun altında sertleşebilen ve suda çözünmeyen bir bağlayıcı olduğundan dolayı normal sulardan olumsuz bir şekilde etkilenmez. Ayrıca çimento taneciklerinin hidratasyonunun sağlıklı bir şekilde devam etmesi için sürekli suyun altında bulunması halinde kuru ortama oranla daha iyi dayanım gelişimi göstermektedir (Erdoğan 2016). Bu yüzden PC referans karışımına ait numuneler, ıslanma-kuruma etkisi sonrası %24 dayanım artışına sahip olmuştur. Hidrolik bağlayıcı özelliklerine tam olarak sahip olmayan (Blanc ve ark. 2020) ve alkali-aktive bağlayıcı olarak kabul edilen (Werling ve ark. 2020) GP'lerin de sulu ortamda pek dayanım kaybı yaşamadığı bilinmektedir. Ancak DP esaslı GP'lerin sulu ortamda önemli derecede dayanım kayıpları

yaşadığı ifade edilmektedir (Djobo ve ark. 2017; Firdous ve ark. 2018). Bundan dolayı ıslanma-kuruma etkisine karşı DP esaslı GP bağlayıcıların dayanıklılıkları, bu malzemelerin durabiliteleri ile ilgili önemli bir göstergedir. Su yapıları gibi sürekli ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kalan yapıların üretildiği PGP betonların da bu etkilere karşı durabil olması gerekecektir.

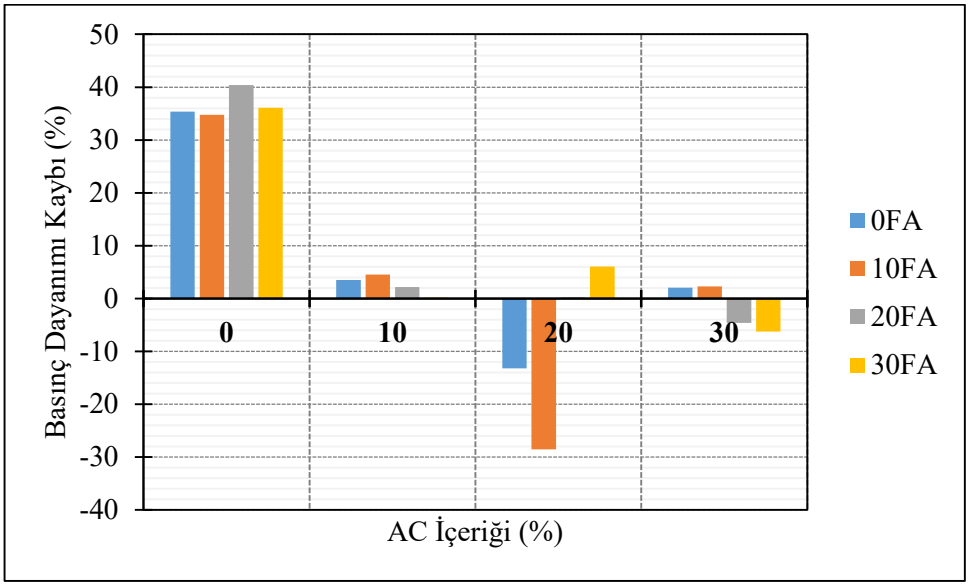
Çizelge 4.6. Islanma-kuruma etkisi sonrası PGP harç numunelerin basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı

Karışım İsmi	Islanma-Kuruma Performansı			
	Oda Sıcaklığı		Sıcak Kür	
	Basınç Dayan. (MPa)	Basınç Dayan. Kaybı (%)	Basınç Dayan. (MPa)	Basınç Dayan. Kaybı (%)
Pomza	14.2	35	16.6	35
0FA-**10**AC	33.3	3	35.0	26
0FA-**20**AC	36.9	-13	54.7	5
0FA-**30**AC	37.9	2	51.0	11
10FA-**0**AC	13.0	35	15.6	49
10FA-**10**AC	34.4	5	41.9	17
10FA-**20**AC	38.9	-29	58.8	6
10FA-**30**AC	38.7	2	58.7	11
20FA-**0**AC	12.1	40	18.7	42
20FA-**10**AC	33.9	2	38.5	23
20FA-**20**AC	27.8	0	62.4	12
20FA-**30**AC	44.2	-5	56.5	10
30FA-**0**AC	14.7	36	19.6	49
30FA-**10**AC	34.2	0	41.9	20
30FA-**20**AC	24.8	6	63.2	10
30FA-**30**AC	42.9	-6	50.9	9
PC	59.5	-24	-	-

Çizelge 4.6.'dan da görülebileceği gibi oda sıcaklığında kür edilen ve sıcak küre tabi tutulan PGP harç numunelerin basınç dayanımı kayıpları, sırasıyla %40 ile %-29 ve %49 ile %5 arasında değişmektedir. Pomza karışımı dışında bütün karışımlarda, oda sıcaklığında kür edilen numunelerin basınç dayanımı kaybı, sıcak küre tabi tutulan numunelerin kaybından daha az olmuştur. Ancak %100 pomza ile hazırlananı dahil tüm karışımlarda sıcak küre tabi tutulan numunelerin ıslanma-kuruma etkisi sonrası kalan

basınç dayanımı, oda sıcaklığında kür edilen numunelerin kalan basınç dayanımından daha yüksek olmuştur.

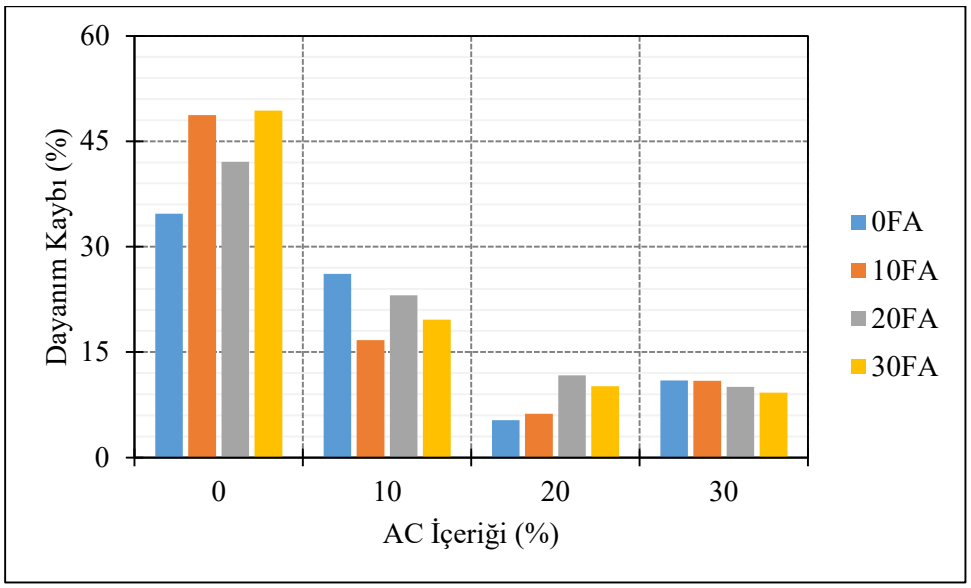
PGP harçların ıslanma-kuruma etkisiyle dayanım kayıplarına bakıldığında, genel itibariyle AC içeriğinin artmasıyla dayanım kaybının azaldığı ve hatta oda sıcaklığında kür edilen numunelerin dayanımlarının arttığı görülmektedir. Şekil 4.17.'de oda sıcaklığında kür edilmiş farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin ıslanma-kuruma etkisi sonrası basınç dayanımı kaybı miktarları, AC içeriğine bağlı olarak verilmiştir. Şekil 4.17.'den kolaylıkla görülebileceği gibi AC içermeyen PGP harç numuneler, ıslanma-kuruma etkisiyle önemli derecede dayanım kayıpları yaşamaktadır. Dolayısıyla bu numunelerin, su tesirlerine karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmadıklarını ifade edebiliriz. Buna karşın AC içeren oda sıcaklığında kür edilmiş PGP harç numunelerin su tesirlerinden oldukça az etkilendikleri ve hatta %20 ve %30 AC içeriğine sahip numunelerin su altında dayanım kazandıkları görülmektedir.



Şekil 4.17. Oda sıcaklığında kür edilen ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı ıslanma-kuruma performansı

Şekil 4.18.'de, sıcak küre tabi tutulan ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin, AC içeriğine bağlı basınç dayanımı kayıpları, grafik halinde verilmiştir. Şekil 4.18.'den de görülebileceği gibi AC içermeyen karışımların dayanım kaybı, %49 gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır. Buna karşın AC içeriğinin artmasıyla PGP harç numunelerin dayanım kaybı, %10'un altına kadar inmektedir. FA içermeyen ve %10 FA içeren numunelerde AC içeriğinin %20'den %30'a çıkmasıyla dayanım kaybında hafif bir yükselme olmasına karşın, %20 ve %30 FA içeren numunelerde AC içeriğinin

%20'den %30'a çıkmasıyla dayanım kaybında düşüş devam etmiştir. Tüm bunlar, AC içeriği ile PGP bağlayıcıların su tesirlerine karşı dayanıklılığının yeterli seviyelere çıkarılabileceğini göstermektedir. Burada ifade edilmesi gereken bir nokta da şudur ki AC içeriği yüksek olan karışımların oda sıcaklığında kür edilen numuneleri, ıslanma-kuruma etkisi altında dayanım kazanabiliyorken, sıcak küre tabi olan numunelerde böyle bir durum yaşanmamıştır. Bunun muhtemel nedeni, oda sıcaklığında kür edilen numunelerde yer alan AC taneciklerinin bütünüyle reaksiyona girmemesi ve suyla temas ettiklerinde, bu taneciklerin C-S-H türü bağlar yaparak dayanım kazanmasıdır (Guo ve ark. 2010). Buna karşılık sıcak küre tabi olan numunelerde bulunan AC tanecikleri, sıcak kür sayesinde neredeyse bütünüyle reaksiyona girdiklerinden suyla bir araya geldiklerinde yeni bağ oluşumu ve dolayısıyla dayanım artışı meydana gelmemektedir.



Şekil 4.18. Sıcak küre tabi tutulmuş PGP harç numunelerin ıslanma-kuruma performansı

PGP numunelerin basınç dayanımındaki azalma, başka çalışmalarda da gözlemlenmektedir. Ancak PGP karışımların tümü göz önüne alındığında dayanım kaybının olduğu ve bazılarında önemli seviyelere çıktığı görülmektedir. PC esaslı bağlayıcılarda etkili olmayan fakat özellikle DP esaslı GP bağlayıcılarda karşılaşılan bu durum, sulu ortamda bir kısım Si-O-Si bağlarının zayıf Si-OH bağlarına dönüşmesi sonucu, dayanımda düşüşlere sebep olduğuyla açıklanmaktadır (Lemougna ve ark. 2013, 2014; Kaze ve ark. 2021). Islanma-kuruma etkisiyle PGP harçların önemli derecede dayanım kayıpları yaşaması, sürekli su tesirlerine maruz kalan su yapılarında bu bağlayıcılarla elde edilen betonların kullanımını zora sokmaktadır. Ancak AC içeriği ile bu bağlayıcıların ıslanma-kuruma performansının önemli derecede arttırılabileceği ve bu

yapılarda kullanımlarına imkan sağlayacağı görülmektedir. Islanma-kuruma tesiri sonrası kalan basınç dayanımı ve dayanım kaybı miktarı ve karışımların işlenebilirliği birlikte değerlendirildiğinde 30FA-20AC karışımına ait sıcak küre tabi olan numunelerin, optimum PGP harç olduğu kabul edilebilir. Dayanım kaybının %10 olmasının yanında kalan basınç dayanımının 63.2 MPa ile en yüksek değerde olması, bunu ortaya koymaktadır. Ayrıca daha önce ifade edildiği gibi pomza kullanılarak üretilen GP'lerin işlenebilirliği iyi olmadığından 30FA-20AC karışımında FA ve AC'nin olması daha işlenebilir beton üretimine olanak sağlayacaktır.

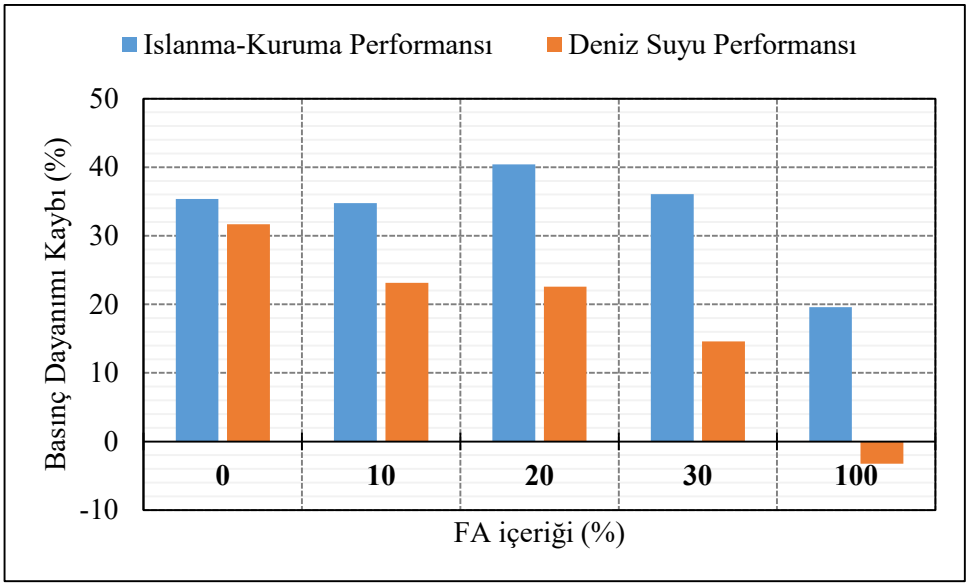
4.2.5. PGP Harç Numunelerin Deniz Suyu Performansı

Harç numunelerin deniz suyu etkisi altındaki dayanıklılığını belirlemek için bu numuneler, deniz suyunun içinde 6 ay boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, bu numunelerin kalan basınç dayanımları ve buna bağlı dayanım kayıpları ölçülmüştür (Çizelge 4.7.). Çizelge 4.7.'den de görülebileceği gibi PGP harç karışımların deniz suyu etkisi sonrası dayanım kayıpları, oda sıcaklığında kür edilenlerde %32 ile %-27 arasında değişirken, sıcak küre tabi tutulanlarda %35 ile %-5 arasında değişmiştir. PC referans harç karışımı, 28 günden sonra, açıkta veya ıslanma-kuruma etkisi sonrası önemli dayanım gelişimi sağlarken, deniz suyu ortamında daha fazla süre beklemesine rağmen az da olsa dayanım kaybı yaşamıştır (Çizelge 4.5.-4.7.). Ouda ve Gharieb, öğütülmüş seramik atığı ve işlenmiş FA ile hazırladıkları GP hamur numunelerin, deniz suyunda 1 ay bekletilmesiyle basınç dayanımlarının biraz arttığını ancak 6 ay bekletilmesi sonucu %50'ye kadar dayanım kayıpları yaşadıklarını belirlemişlerdir (Ouda ve Gharieb 2021). Yapılan başka bir çalışmada ise deniz suyunun karışım suyu, deniz kumunun da agrega olarak kullanılmasıyla GP harç ve betonların dayanımlarında kayda değer düşüşlerin yaşandığını belirlemişlerdir (Luhar ve Luhar 2020).

Çizelge 4.7. PGP harç numunelerin deniz suyu etkisi sonrası kalan basınç dayanımları ve dayanım kaybı miktarı

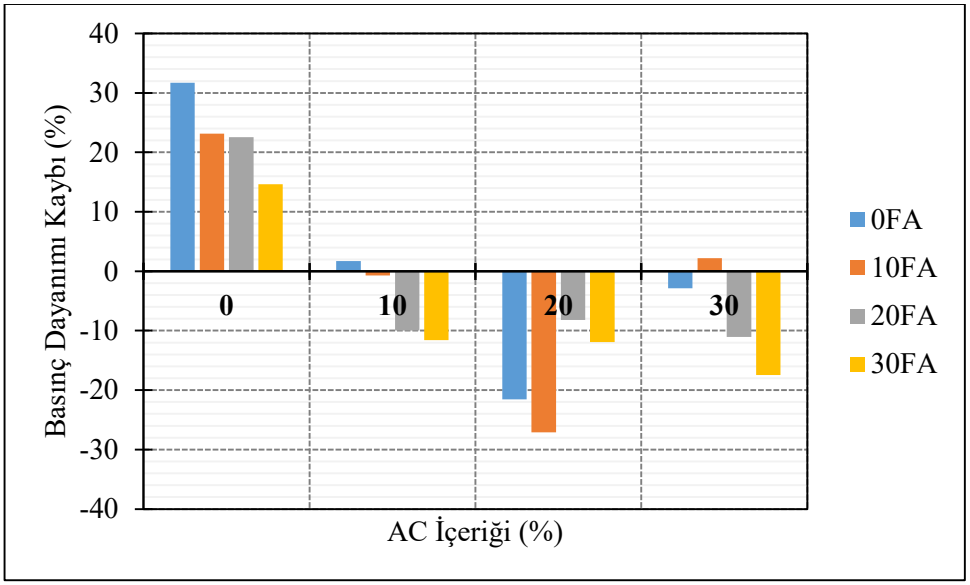
Karışım İsmi	Deniz Suyu Performansı			
	Oda Sıcaklığı		Sıcak Kür	
	Basınç Dayan. (MPa)	Basınç Dayan. Kaybı (%)	Basınç Dayan. (MPa)	Basınç Dayan. Kaybı (%)
Pomza	15.0	32	18.8	26
0FA-**10**AC	33.9	2	39.6	16
0FA-**20**AC	39.7	-22	58.6	-1
0FA-**30**AC	39.9	-3	53.3	7
10FA-**0**AC	15.4	23	19.8	35
10FA-**10**AC	36.3	-1	43.9	13
10FA-**20**AC	38.5	-27	55.8	11
10FA-**30**AC	38.7	2	62.5	5
20FA-**0**AC	15.7	23	25.2	22
20FA-**10**AC	38.1	-10	43.3	14
20FA-**20**AC	30.1	-8	62.8	11
20FA-**30**AC	47.0	-11	60.6	3
30FA-**0**AC	19.6	15	25.4	34
30FA-**10**AC	38.2	-12	45.3	13
30FA-**20**AC	29.5	-12	71.3	-1
30FA-**30**AC	47.4	-17	58.7	-5
PC	46.8	2	-	-

Deniz suyu ortamında, AC içeriğine sahip olmayan PGP harç numunelerinde dayanım kaybı yaşanmasının bir sebebi, daha önce anlatıldığı gibi sulu ortamda bir kısım Si-O-Si bağlarının Si-OH bağlarına dönüşmesiyle dayanım kaybının gerçekleşmesi olabilir. Ancak burada bir farktan söz etmek mümkündür: AC içermeyen ve oda sıcaklığında kür edilen numunelerde FA içeriğinin artmasıyla dayanım kaybı belirgin bir şekilde azalmasına karşın, ıslanma-kuruma etkisinde böyle bir durum yaşanmamıştır. Şekil 4.19.'da, oda sıcaklığında kür edilen ve AC içermeyen karışımların ıslanma-kuruma ve deniz suyu etkisine karşı dirençlerini gösteren basınç dayanımı kayıpları FA içeriğine bağlı olarak verilmiştir. FA içeriğinin artmasıyla deniz suyu etkisindeki PGP harç numunelerin dayanım kaybı azalmaktadır. Hatta %100 FA ile üretilen ve deniz suyu etkisinde 6 ay bekletilen GP numunelerin basınç dayanımı bir miktar artmıştır.



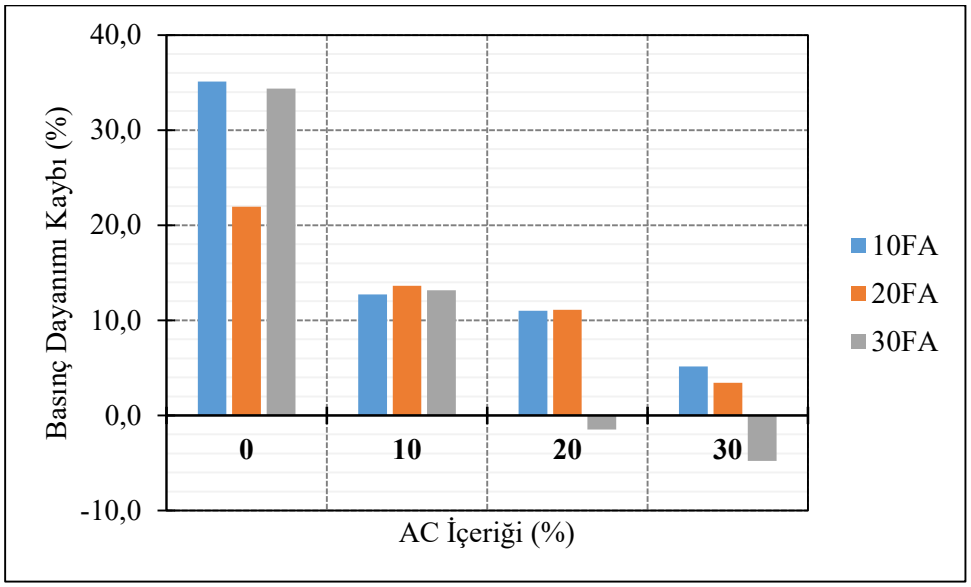
Şekil 4.19. Oda sıcaklığında kür olan ve AC içermeyen PGP harç numunelerin FA içeriğine bağlı ıslanma-kuruma ve deniz suyu performansı

AC içeriğine sahip olan ve oda sıcaklığında kür edilen numunelerde %20 AC içeriğine sahip PGP harçların deniz suyu performansının genellikle daha iyi olduğu söylenebilir. Şekil 4.20.'de, oda sıcaklığında kür edilen farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin deniz suyu etkisine karşı performansının AC içeriğine bağlı değişimi verilmiştir. Şekilden açık bir şekilde görülebileceği gibi AC içermeyen karışımlarda deniz suyu etkisiyle önemli derecede dayanım kayıpları yaşanmasına karşın AC içeriğine sahip numunelerin neredeyse hepsinde dayanım artışı meydana gelmiştir. Özellikle %20 AC içeriğine sahip numunelerde, genel anlamda daha fazla dayanım artışı meydana gelmiştir.



Şekil 4.20. Oda sıcaklığında kür olan ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin AC içeriğine bağlı deniz suyu etkisi performansı

Sıcak küre tabi tutulan numunelerin deniz suyu etkisi performansına bakıldığında, oda sıcaklığına benzer şekilde, AC içeriğinin PGP harçların deniz suyuna karşı dayanıklılığını arttırdığı görülmektedir. Ancak oda sıcaklığından biraz farklı olarak, Şekil 4.21'den de görülebileceği gibi AC içeriğinin artmasıyla deniz suyu etkisi nedeniyle yaşanan dayanım kaybı, sürekli bir şekilde düşmektedir (FA içermeyen numuneler hariç). Bu durum, deniz suyuna maruz kalacak su yapılarının inşa edileceği PGP betonlarda AC katkısının kullanılmasını gerekli kılmaktadır.



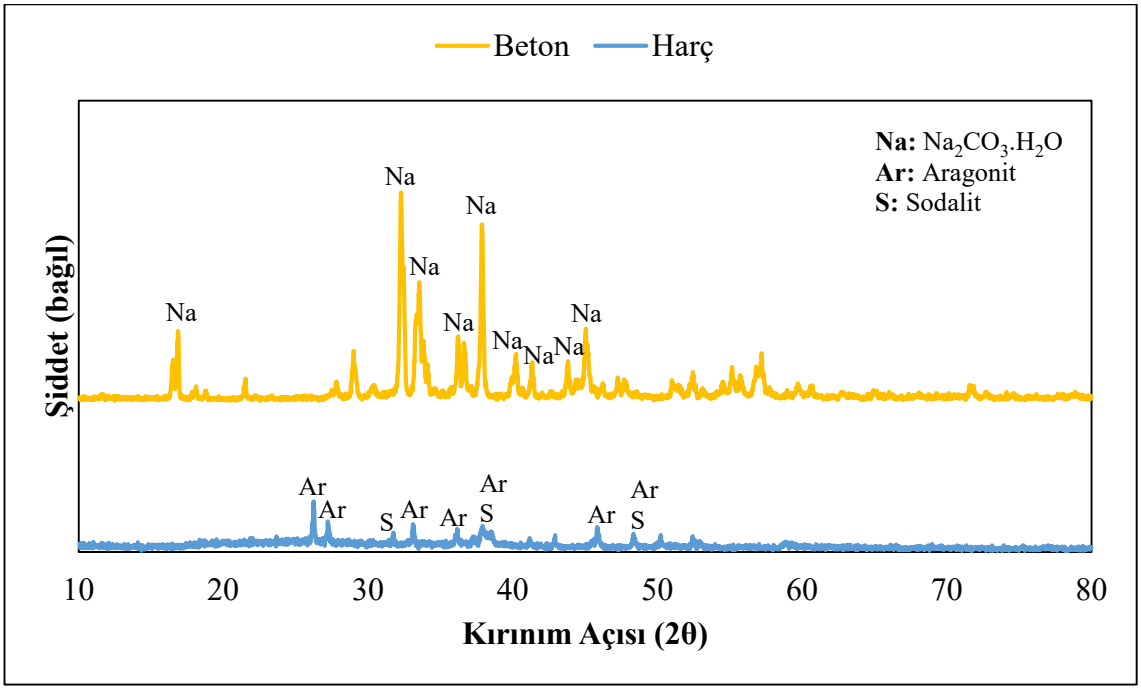
Şekil 4.21. Sıcak küre tabi tutulan ve farklı FA içeriğine sahip PGP harç numunelerin deniz suyu etkisi performansının AC içeriğine bağlı değişimi

Gerek oda sıcaklığı ve gerekse sıcak kür görmüş numunelerin deniz suyuna karşı dayanıklılıklarına bakıldığında AC içeriğinin çok önemli bir role sahip olduğu görülmektedir. Deniz suyu etkisi sonrası kalan basınç dayanımı ve dayanım kaybı miktarı birlikte değerlendirildiğinde, 71.3 MPa kalan basınç dayanımı ve %1 basınç dayanımı artışı ile 30FA-20AC karışımına ait sıcak küre tabi tutulmuş numuneleri, deniz suyuna karşı en dayanıklı numuneler olarak kabul edebiliriz.

4.2.6. PGP Harç Numunelerde Çiçeklenme

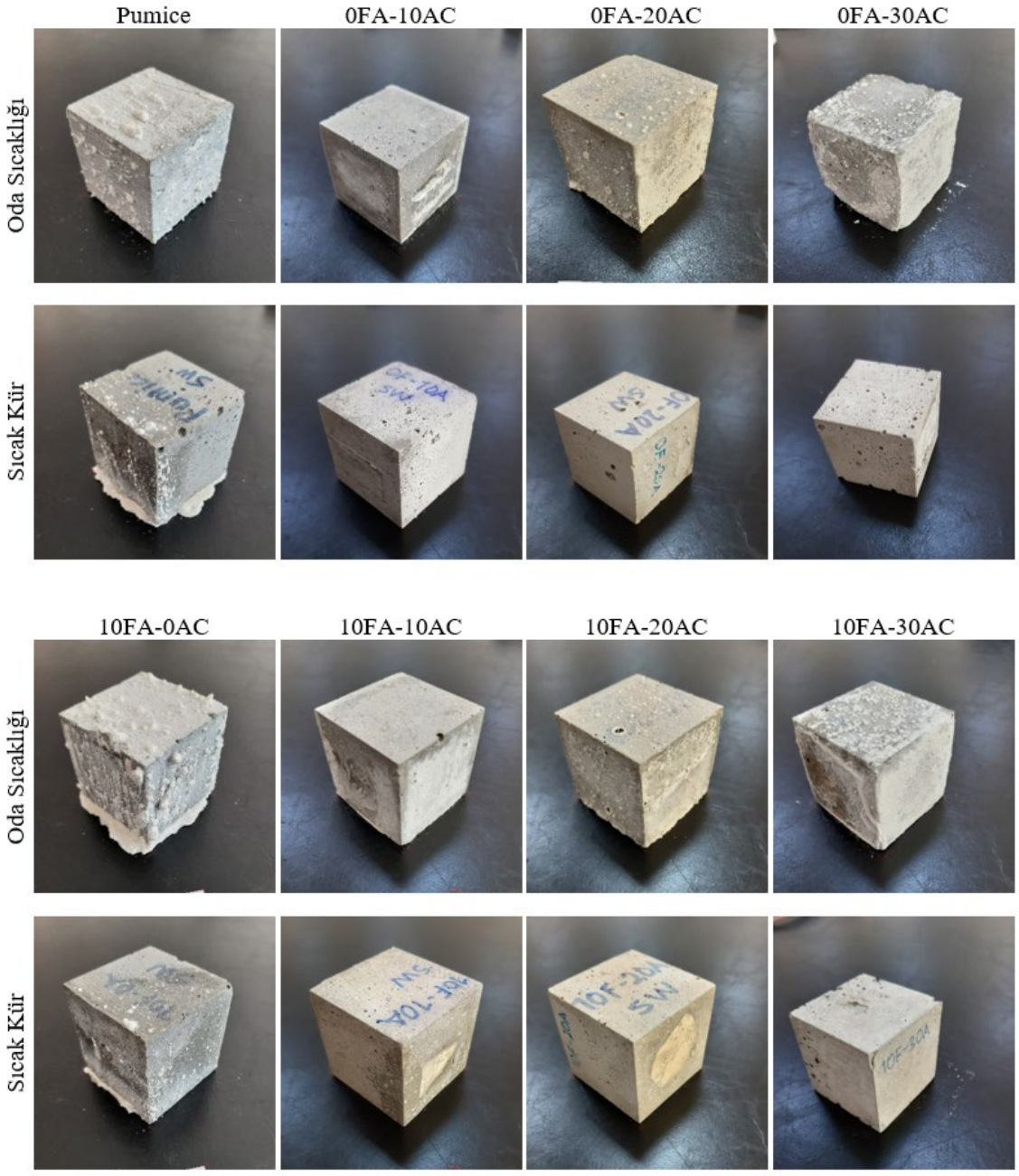
GP bağlayıcılar, su veya nemin varlığında, alkalilerin yüzeye taşınmasından dolayı sık sık çiçeklenmeye maruz kalırlar. Yüzeye çıkan bu alkaliler, havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek alkali-karbonatların oluşmasına sebep olmaktadır (Shi ve ark. 2003). Bu alkali karbonatlar, beton yüzeyinde beyaz birikintiler oluştururlar. Deniz suyunda 180 gün süreyle bekletilen *Pumice* harç numunelerinin üzerinden alınan beyaz birikintilerden

elde edilen XRD analizi Şekil 4.22.'de sunulmuştur. Bu şekilde ayrıca kıyaslamak amacıyla normal su etkisiyle oluşan ve Şekil 4.49.'da görüntüsü verilen 30FA-0AC beton numunesinin üzerine yerleşen beyaz birikintilerin de XRD analizi verilmiştir. Normal su etkisiyle beton numunede oluşan bu birikintilerin sodyum karbonatlı ürünler olduğu görülmektedir. Buna karşılık deniz suyu ortamında harç numune üzerinde oluşan beyaz birikintilerin ise sodalit ($Na_8(Al_6Si_6O_{24})Cl_2$) ve aragonit ($CaCO_3$) olduğu tespit edilmiştir.

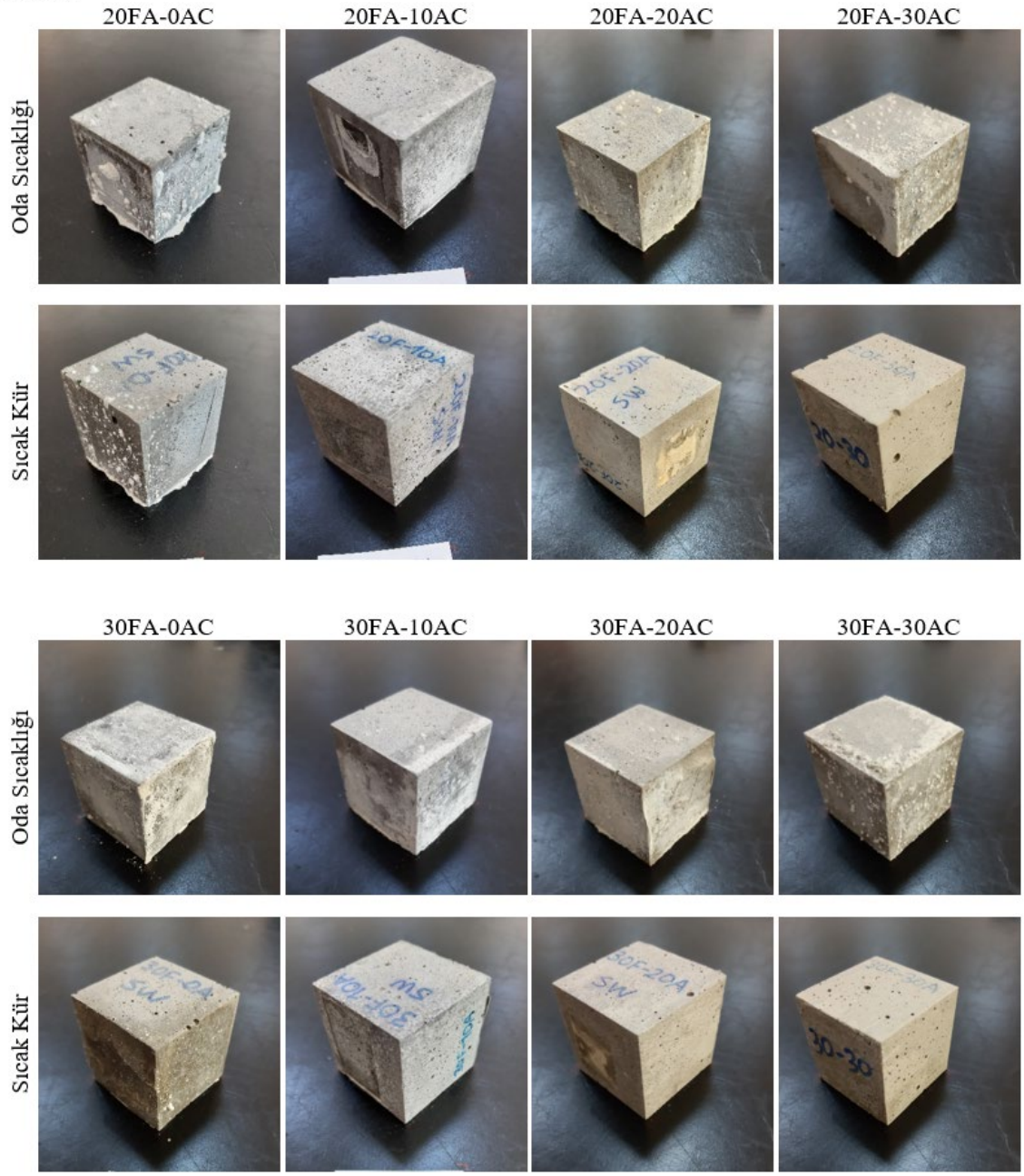


Şekil 4.22. Çiçeklenme sonucu oluşan beyaz birikintilerin XRD analizi

Deniz suyunda 6 ay bekletildikten sonra çıkarılan PGP harç numunelerin görsel değişimi Şekil 4.23.'te verilmiştir. XRD analizi verilerinden yola çıkılarak sodalit ve aragonit yoğunluklu olduğu tahmin edilen bu beyaz birikintilerin fazla olması, serbest alkali (özellikle Na) içeriği ve dolayısıyla reaksiyonların ne kadar geliştiği hakkında fikir vermektedir.


Pumice
0FA-10AC
0FA-20AC
0FA-30AC
Oda Sıcaklığı
Sıcak Kür
10FA-0AC
10FA-10AC
10FA-20AC
10FA-30AC
Oda Sıcaklığı
Sıcak Kür

devamı



Şekil 4.23. PGP harç numunelerin çiçeklenme miktarları

Şekil 4.23. incelendiğinde, 2 önemli nokta dikkat çekmektedir. Birincisi, sıcak kür ve oda sıcaklığı kürü kıyaslandığı zaman, sıcak kür ile çiçeklenmenin azaldığı kolaylıkla anlaşılmaktadır. Bu durum, reaksiyona girmeyen Na miktarının sıcak kür ile azaldığını ve geopolimerleşmenin yeterli bir şekilde gerçekleşmesi için sıcak kür işleminin gerekli olduğunu göstermektedir. İkinci olarak, özellikle sıcak küre tabi tutulan numunelere bakıldığı zaman, AC içeriğinin artmasıyla çiçeklenmenin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Sıcak kür görmüş ve %20 ile %30 AC içeriğine sahip numunelerde,

çiçeklenmeye, hemen hemen hiç rastlanmamıştır. Son olarak, sıcak küre tabi tutulmuş numunelerde, FA içeriğinin artmasıyla çiçeklenmenin bir miktar azaldığı söylenebilir. Çizelge 4.8.'de PGP harç numunelerinin çiçeklenme dereceleri, gözlemsel analizler sonucu 3 sınıfa ayrılmıştır. Buna göre C sınıfı, çiçeklenmenin en çok olduğu sınıfı ifade etmektedir. B sınıfı, çiçeklenmenin az olduğu sınıfı ifade ederken, A sınıfı ise çiçeklenmenin hemen hemen hiç gözlemlenmediği sınıfı belirtmek için kullanılmıştır (Allahverdi ve ark. 2008).

Çizelge 4.8. PGP harç numunelerin çiçeklenme sınıfları

Karışım İsmi	Çiçeklenme Sınıfı	
	Oda Sıcaklığı	Sıcak Kür
Pomza	C	C
0FA-**10**AC	B	A
0FA-**20**AC	B	A
0FA-**30**AC	C	A
10FA-**0**AC	C	B
10FA-**10**AC	B	A
10FA-**20**AC	B	A
10FA-**30**AC	B	A
20FA-**0**AC	C	B
20FA-**10**AC	B	A
20FA-**20**AC	B	A
20FA-**30**AC	B	A
30FA-**0**AC	B	A
30FA-**10**AC	B	A
30FA-**20**AC	B	A
30FA-**30**AC	B	A
PC	B	-

Kani ve ark., pomzaya GYFC, MK ve üç farklı AC ikame ederek hazırladıkları PGP numunelerin çiçeklenme derecelerini gözlemlemişlerdir (Kani ve ark. 2012). Bu çalışmaya benzer şekilde, GYFC ve MK'nin çiçeklenme miktarını çok az bir şekilde azalttığını, buna karşılık AC'nin çiçeklenmeyi önemli oranda azalttığını belirlemişlerdir. Birçok çalışmada, GP karışımında Na_2O/Al_2O_3 oranının artmasıyla çiçeklenmenin arttığı ifade edilmiştir (Alahverdi ve ark. 2008; Kani ve ark. 2012). Na'nın alüminosilikat yapı içerisindeki bağının zayıf olması ve/veya bir kısım Na'nın reaksiyona girmemesi nedeniyle Na_2O/Al_2O_3 oranının artmasıyla çiçeklenmenin arttığı ifade edilmektedir (Škvára ve ark. 2009). Aynı zamanda Al içeriği yüksek mineral katkılar kullanılarak da Na_2O/Al_2O_3 oranının düşürülmesi ve böylece çiçeklenmenin azaltılması mümkündür

(Kani ve ark. 2012; Kouamo ve ark. 2012). Al içeriğince zengin olan AC, bunun önemli örneklerinden biridir. AC içeriğinin çiçeklenmeyi önemli derecede azaltması, Al içeriğince zengin olması, bu Al içeriğinin kaynağının FA'daki gibi alüminosilikat değil de kalsiyum-alüminat olması (Kani ve ark. 2012) ve daha yoğun bir yapı oluşturarak suyun mobilitesini azaltmasıyla açıklanabilir (Djobo, Elimbi, Manga, ve ark. 2016).

PGP harç numunelerin ıslanma-kuruma performansı anlatılırken, sıcak kürün etkisiyle AC taneciklerinin neredeyse tamamen reaksiyona girdiğini bundan dolayı bu taneciklerin su ile temasıyla dayanım artışı meydana gelmediği ifade edilmişti. Oda sıcaklığında kür edilen ve AC içeriğine sahip numunelerin bir kısmının ise suyla temaslarında reaksiyona girmeyen AC taneciklerin C-S-H türü yapılar oluşturarak dayanım artışı gösterebildikleri görülmüştü. PGP harç numunelerinin çiçeklenme eğilimi, bunu destekler mahiyettedir. AC içeren karışımların oda sıcaklığında kür edilen numunelerinin, sıcak küre tabi olanlardan daha fazla çiçeklenme göstermeleri, oda sıcaklığında, alkalilerin AC taneciklerini tamamen çözüp reaksiyona girmediklerini, böylelikle bir kısım alkalilerin bağlanmayıp serbest kaldığını ve suyla beraber yüzeye çıkıp biriktiğini göstermektedir.

4.2.7. PGP Harç Numunelerin Sülfürik Asit Performansı

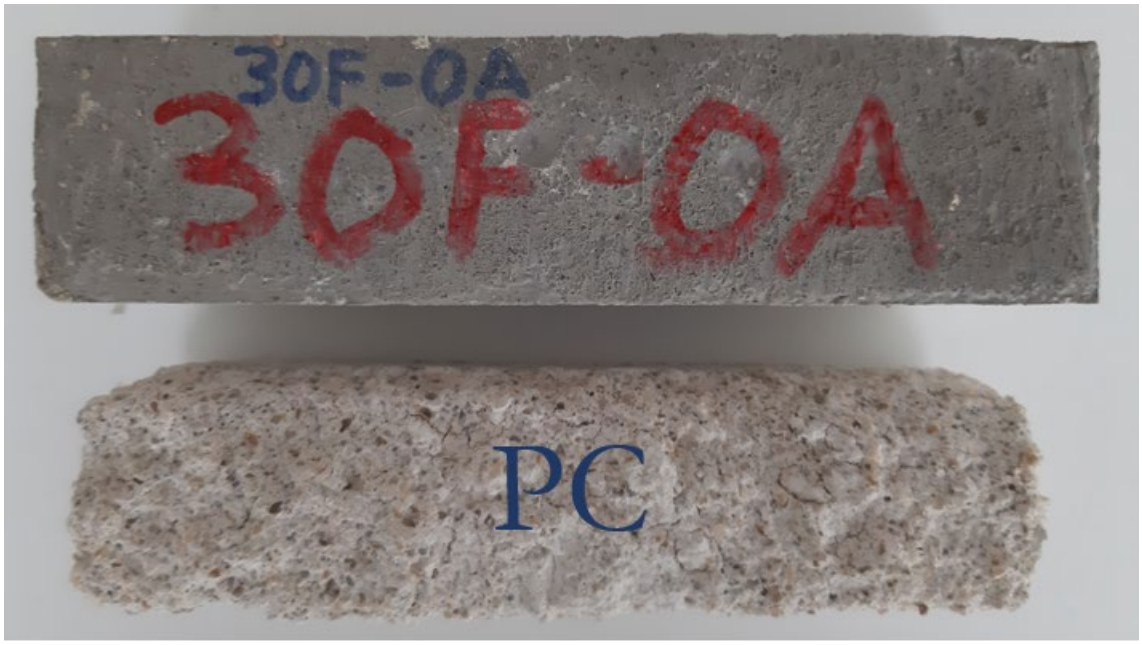
Sülfürik asidin PGP bağlayıcı üzerindeki etkisini belirlemek için prizma şeklindeki PGP harç numuneler, 2 ay boyunca %5 sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda bu numunelerin ağırlık değişimleri ile eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme testi sonrası, yaklaşık ortadan ikiye bölünen numunelerin yarısı üzerinde basınç dayanımı ölçümleri yapılırken, kalan numuneler tekrar 2 ay boyunca %5 sülfürik asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, numunelerin ağırlık ve basınç dayanımı değişimleri ölçülmüştür. Çizelge 4.9.'da PGP harç numunelerin 2 ve 4 ay süreli sülfürik asit etkisi sonrası ağırlık ve basınç dayanım kayıpları verilmiştir.

Çizelge 4.9. Sülfürik asit etkisine maruz bırakılan PGP harç numunelerin ağırlık ve basınç dayanımı kayıpları

Karışım İsmi	Sülfürik Asit Performansı							
	Oda Sıcaklığı				Sıcak Kür			
	60 Gün		120 Gün		60 Gün		120 Gün	
	Ağırlık Kaybı %	Dayanım Kaybı %	Ağırlık Kaybı %	Dayanım Kaybı %	Ağırlık Kaybı %	Dayanım Kaybı %	Ağırlık Kaybı %	Dayanım Kaybı %
Pomza	4.0	39	5.5	55	2.5	40	4.1	44
0FA-**10**AC	-0.2	36	0.3	47	-0.3	37	1.0	39
0FA-**20**AC	1.7	31	2.9	53	0.3	26	0.6	53
0FA-**30**AC	1.2	39	1.5	56	-0.9	31	-1.0	50
10FA-**0**AC	3.7	35	5.5	45	1.8	48	3.8	57
10FA-**10**AC	0.2	42	1.3	49	-0.3	38	1.0	40
10FA-**20**AC	2.5	41	4.5	62	0.5	34	0.7	56
10FA-**30**AC	0.9	44	2.4	43	-1.5	33	-0.8	50
20FA-**0**AC	3.4	23	4.3	42	1.6	53	2.3	60
20FA-**10**AC	0.4	45	0.8	57	0.2	43	1.0	47
20FA-**20**AC	2.0	50	2.7	55	-0.9	40	0.5	49
20FA-**30**AC	1.1	36	1.8	47	-1.3	41	-0.7	50
30FA-**0**AC	3.5	35	6.5	46	1.8	67	4.1	69
30FA-**10**AC	1.4	47	2.2	59	0.8	45	1.1	51
30FA-**20**AC	2.5	60	2.6	70	-1.2	32	0.3	49
30FA-**30**AC	1.6	38	2.1	39	-1.5	33	-2.2	50
PC	25.6	*	*	*	-	-	-	-

*Asit etkisiyle şekil bozulduğundan ölçümler yapılamamıştır.

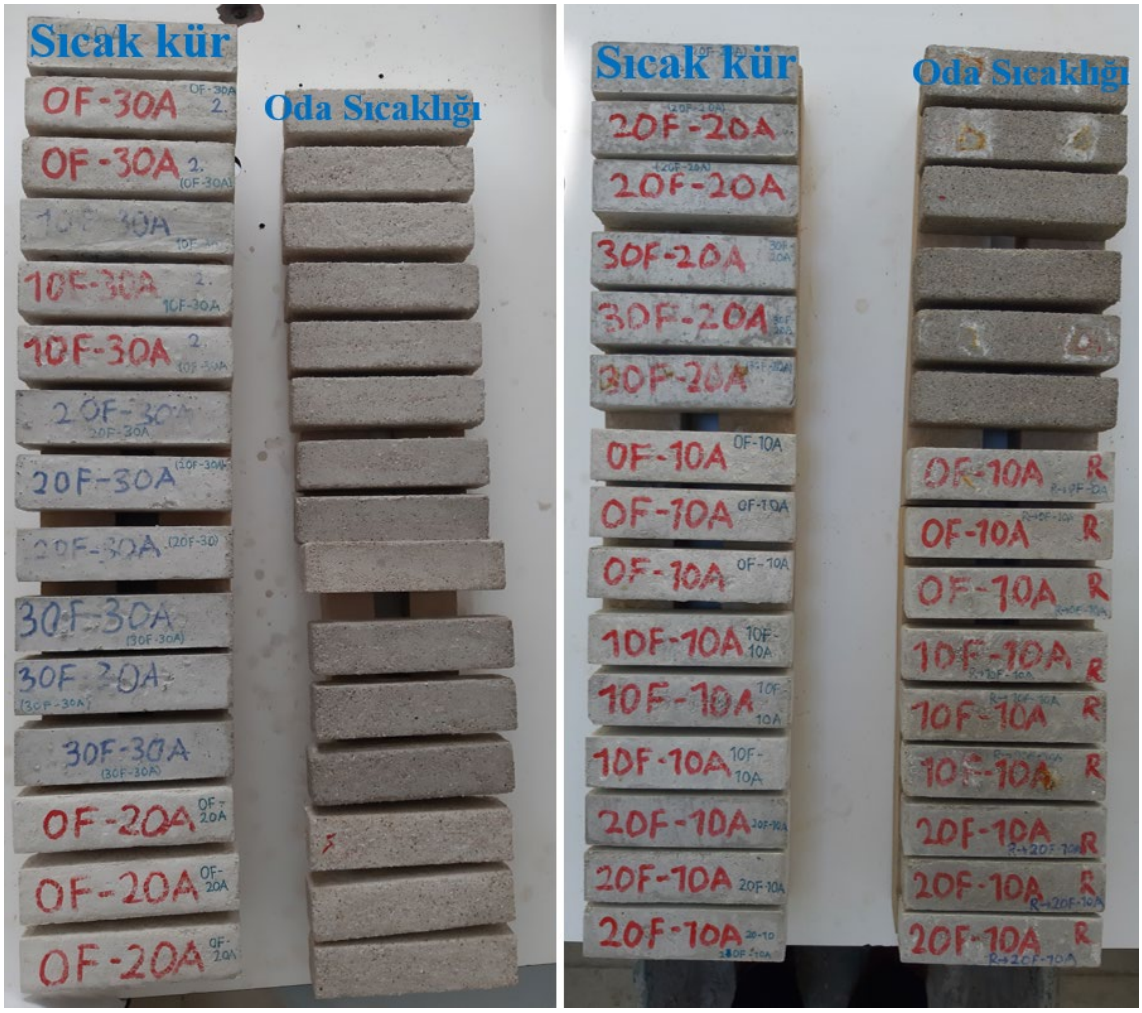
PC referans karışımı numuneleri, 2 ay sülfürik asit etkisinden sonra, bağlayıcı hamurunun çözülmesi sonu önemli derecede ağırlık kaybı yaşamıştır. Ayrıca bu etki sonrası, bu numuneler, eğilme ve basınç testine tabi tutulamayacak kadar şekil değişikliğine uğradıkları için dayanım ölçümleri yapılamamış ve 2 aydan sonra tekrar asit etkisine maruz bırakılamamıştır. Şekil 4.24.'te, 2 ay sülfürik asit etkisinde kalan PGP ve PC harç numunelerindeki görsel değişim verilmiştir. Şekil 4.24.'ten de görülebileceği gibi PC harç numune, bağlayıcı hamurun çözülmesi sonucu boyunda kısalmaya ve eninde daralmaya uğramıştır. PGP numunesi ise şekil olarak hiçbir değişime uğramamıştır.



Şekil 4.24. Sülfürik asit etkisinde 2 ay kalan PGP ve PC harç numunelerin görsel değişimi

Sülfürik asit etkisinde 2 ay bekletilen PGP harç numunelerdeki görsel değişim, Şekil 4.25.'te verilmiştir. İki blok halinde verilen iki resimde soldaki numuneler, sıcak küre tabi tutulmuş olanlar ve sağdaki numuneler ise oda sıcaklığında kür edilen numunelerdir. Resimlerde F, FA yerine ve A, AC yerine kullanılmıştır. Şekilden rahatlıkla görülebileceği gibi sıcak kür görmüş numunelerin hiçbirinde önemli derecede şekil değişimi yaşanmamıştır. Buna karşılık oda sıcaklığında kür edilen numunelerin bazılarında bağlayıcı hamur, yüzeyden itibaren bir miktar çözünmüştür. Bunun bir sonucu olarak numunelerin üzerindeki yazılar silinmiştir. Oda sıcaklığında kür edilen numunelere bakıldığında AC içeriğinin %10 ve altında olduğu karışımlara ait numunelerde bağlayıcı hamurun çözünmesine rastlanmadığı görülmektedir (Şekil 4.25.). AC içeriğinin %20 ve %30 olduğu karışımların oda sıcaklığında kür edilen bütün numunelerinde bu çözünmeye rastlanmıştır. Bağlayıcı hamurdaki bu çözünme, PC harç numunesindeki bozulmaya benzer şekildedir. Burada AC içeriğinin yüksek olması ve PC arasındaki ortak özelliklerinden birisi karışımlarda Ca miktarlarının fazla olmasıdır. Dolayısıyla AC içeriği yüksek PGP karışımlardaki bozulmanın C-S-H jellerinin çözülmesiyle ilgili olduğunu düşünebiliriz (Ariffin ve ark. 2013). AC betonların asit ortamında kütle kaybı yaşadığı bilinmektedir (Davidovits 1994). Ancak AC içeriği yüksek olduğu halde sıcak küre tabi olan PGP numunelerinde bir çözünmeye rastlanmaması, aynı karışımın farklı kür koşullarında birbirinden farklı ürünler meydana getirdiği fikrini doğurmaktadır. Buna göre alkalin ortamda, AC'nin oda sıcaklığında,

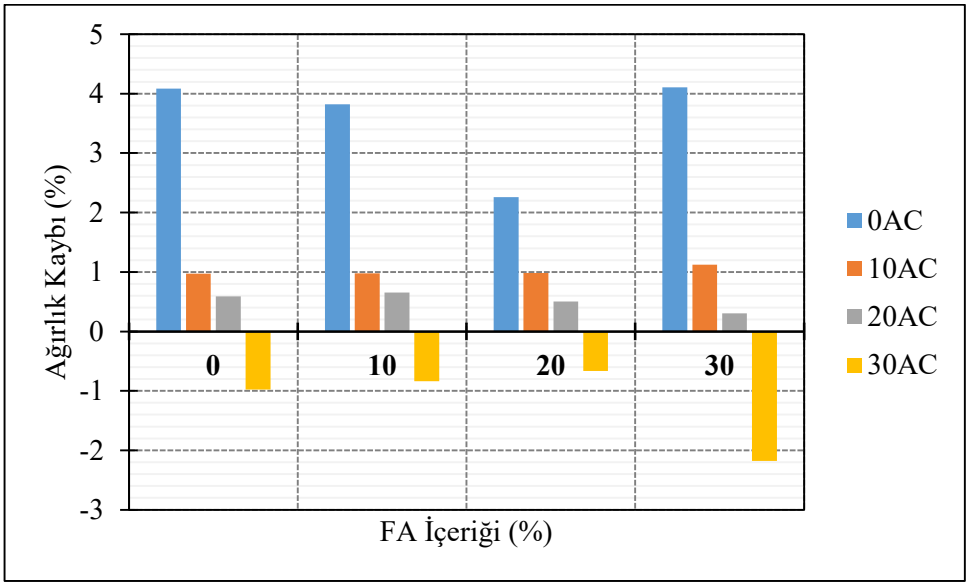
aside karşı dayanıksız C-S-H türü yapıları da oluşturduğu ve 60 °C gibi sıcaklıklarda ise daha çok aside karşı dayanıklı N-A-S-H (Ariffin ve ark. 2013) tarzı yapıları ürettiği düşünülebilir.



Şekil 4.25. Sülfürik asit etkisinde 2 ay bekletilen PGP harç numunelerindeki görsel değişim

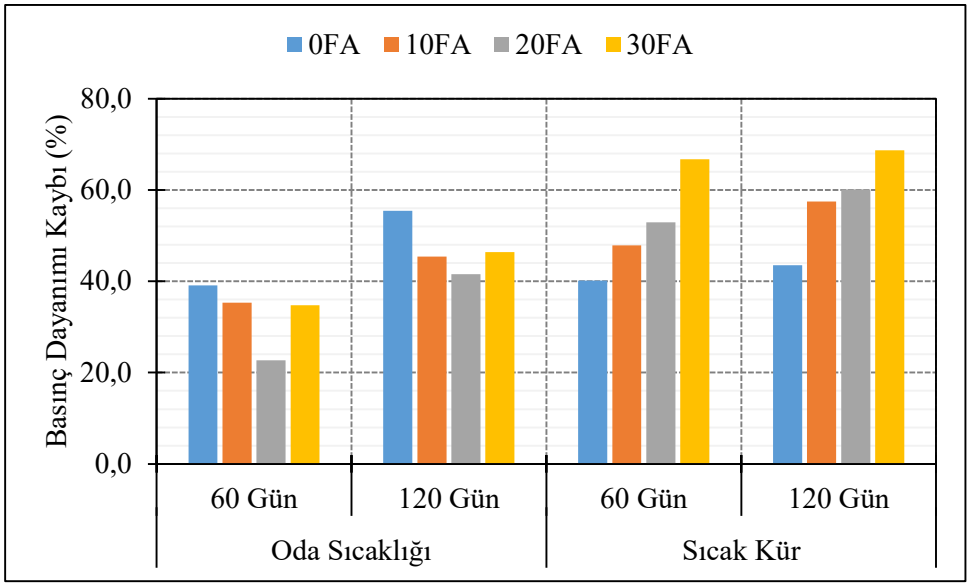
Asit etkisiyle en çok malzeme kaybına uğrayan numuneler AC içeriği yüksek olup oda sıcaklığında kür edilmiş olan numuneler olduğundan bu numunelerde, diğerlerinden daha fazla ağırlık kaybı beklenmektedir. Ancak oda sıcaklığında kür edilen numunelerdeki ağırlık kaybına bakıldığı zaman AC içermeyen karışımlarda daha fazla ağırlık kaybı olduğu görülmektedir. Bu durumu iki şekilde açıklamak mümkündür. Bunlardan birincisi, Ca içeriği düşük olan GP bağlayıcılarda, asit ortamında Si-O-Al bağlarının parçalanması, Si-OH ve Al-OH bağlarının sayısının artması ve GP matrisindeki silisik asit miktarının artması ile açıklanabilir. Buna göre asit ortamı, GP jel yapısındaki alüminyum miktarının azalmasına ve Si/Al oranının artmasına sonuç olarak ağırlık kaybına sebep olmaktadır (Bakharev 2005; Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b). AC

içermeyen karışımlardaki ağırlık kaybı böylelikle açıklanmış olmaktadır. İkincisi, AC içeriğinin yüksek olduğu numunelerde asit ile reaksiyona giren Ca, numunenin ağırlığını arttıran yeni ürünler oluşturmaktadır (Bakharev 2005; Mehta ve Siddique 2017; Aiken ve ark. 2018). Asit etkisinde 4 ay kalan sıcak kür görmüş farklı AC içeriğine sahip PGP harç numunelerin FA içeriğine bağlı ağırlık değişimi, Şekil 4.26.'da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi sıcak kür görmüş PGP harçların sülfürik asit etkisindeki ağırlık kaybı, FA içeriğinden az etkilenmektedir. Buna karşın tüm karışımlar için AC içeriğinin artmasıyla ağırlık kaybı azalmış ve %30 AC içeriğinde ağırlık artışı meydana gelmiştir.



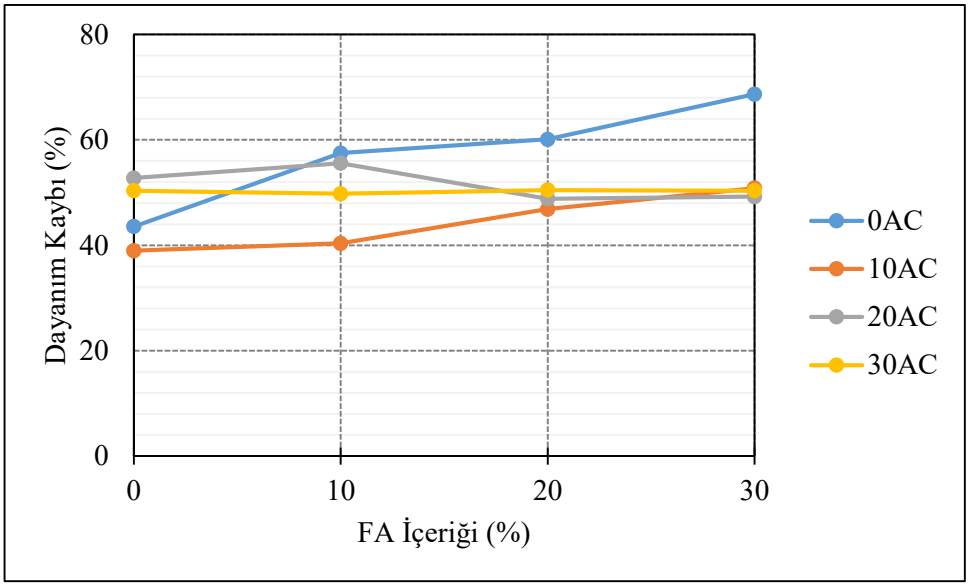
Şekil 4.26. Sülfürik asit etkisinde 4 ay kalan sıcak kür görmüş PGP harç numunelerindeki ağırlık değişimi

Şekil 4.27.'de farklı FA içeriğine sahip, AC içermeyen PGP harç numunelerinin sülfürik asit etkisiyle basınç dayanımı kaybının kür şekline bağlı değişimi verilmiştir. Şekilden rahatlıkla görülebileceği gibi sıcak küre tabi olan numunelerin basınç dayanımı kaybı, FA içeriğinin artmasıyla sürekli bir şekilde artmaktadır. Buna karşılık oda sıcaklığında kür edilen numunelerin basınç dayanımı kaybı ise %30 FA içeriği dışında, FA içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Kür şekline bağlı bu farklılığın olması, kür sıcaklığına bağlı oluşan reaksiyon ürünlerinin farklılığı ve bu ürünlerin sülfürik aside karşı hassasiyetlerinin farklı olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.27. Farklı FA içeriğine sahip AC içermeyen PGP harç numunelerinin sülfürik asit etkisiyle basınç dayanımı kaybının kür şekline bağlı değişimi

Sülfürik asit etkisinde kalan karışımların oda sıcaklığı ve 60 °C'de kür görmüş numunelerinin dayanım kaybı miktarları arasında bir ilişki kurulamamıştır. DP ile yapılan başka bir çalışmada, 80°C'de kür edilen numunelerin sülfürik asit etkisiyle basınç dayanımı kaybının, oda sıcaklığında kür edilenlere oranla çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b). Bu iki çalışmanın sonuçları arasındaki farklılık, kür koşulları ve kullanılan malzemelerin farklılığından kaynaklanıyor olabilir. Farklı AC içeriğine sahip sıcak kür görmüş PGP harç numunelerinin 4 aylık sülfürik asit etkisi sonrası basınç dayanımı değişimi, FA içeriğine bağlı olarak Şekil 4.28.'de verilmiştir. AC içeriğinin %0 ve %10 olduğu durumlarda, PGP harç numunelerinin 4 aylık asit direnci, FA içeriğinin artmasıyla azalmıştır. AC içeriğinin %30 olduğu durumda ise tüm FA değerlerinde dayanım kaybı %50 olmuştur.



Şekil 4.28. Sülfürik asit etkisinde 4 ay kalan sıcak kür görmüş PGP harç numunelerindeki basınç dayanımı değişimi

PGP harç numunelerin sülfürik asit etkisine karşı dayanıklılıkları, iyi sayılabilecek seviyededir. PC harç numuneleri, 2 ayın sonunda büyük oranda ağırlık kaybına uğramış ve dayanım ölçümü gerçekleştirilmeyecek derecede şekil değişimine maruz kalmıştır. Buna karşılık PGP harç numunelerinin ağırlık değişimi sınırlı kalmış ve bu numunelerin çoğu, neredeyse hiç şekil değişikliğine uğramamıştır. PGP esaslı harçların sülfürik asit etkisine karşı PC esaslı harçlardan daha dayanıklı olması, kanalizasyon borusu gibi sülfürik asit etkisine sıklıkla maruz kalan su yapılarında PGP esaslı bağlayıcıların kullanımını, daha doğru bir tercih yapmaktadır.

4.3. PGP Betonlarla Yapılan Çalışma

Harç karışımlarla yapılan çalışmanın sonuçları göz önünde bulundurularak, 3 tane karışım seçilmiş ve bu karışımlardaki toz bağlayıcı oranları kullanılarak beton numuneler üretilmiştir. Harç numunelerle yapılan çalışmadan farklı olarak beton numunelerle yapılan çalışmada PGP betonlar, oda sıcaklığında kür edilmemiş, sadece 60 °C'de kür edilmiştir. Ayrıca kıyaslama amaçlı PC esaslı beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numuneler üzerinde bir kısım dayanım ve dayanıklılık testleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, beton numuneler üzerinde bazı mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, üretilen betonların mekanik ve durabilite özellikleri, mikroyapı analizleri ile beraber açıklanacaktır.

4.3.1. PGP Betonların Fiziksel Özellikleri

Beton numunelerinin yoğunluk ve su emme oranları, Çizelge 4.10.'da verilmiştir. PGP betonların yoğunluk ve su emme oranları sırasıyla 2.28 ile 2.31 kg/dm^3 ve %2.1 ile %4.2 arasında değişmektedir. PC betonun yoğunluğu, 2.45 kg/dm^3 ve su emme oranı ise %0.9 olarak ölçülmüştür. PGP betonların yoğunluğunun PC betonun yoğunluğundan düşük olması yani daha hafif olmaları, PGP betonlarla üretilen prefabrik yapı elemanlarının nakliye ve işçiliğinde kolaylık sağlayacaktır. Su yapıları açısından baktığımızda PGP betondan üretilecek kanalizasyon borusu, büz ve menfez gibi prefabrik yapı elemanlarının işçilik ve nakliye bedellerinin düşürülebileceği söylenebilir.

Çizelge 4.10. Beton numunelerin fiziksel özellikleri

Karışım Adı	Fiziksel Özellikler	
	Yoğunluk kg/dm^3	Su Emme Oranı (%)
30FA-**0**AC	2.31	2.1
30FA-**10**AC	2.28	4.2
30FA-**20**AC	2.31	2.8
PC (Şahit Numune)	2.45	0.9

Beton numunelerin BET analizinden elde edilmiş farklı boyuttaki boşlukların hacim açısından dağılımı, Çizelge 4.11.'de verilmiştir (Lee ve ark. 2016). PGP beton numunelerine bakıldığında, %10 AC içeren numunelerin yoğunluğu, AC içermeyen numunelerin yoğunluğundan daha düşük olduğu görülmektedir. Benzer bir durum, PGP harç numunelerde de gözlemlenmişti (Çizelge 4.4.). Harç numunelerde olduğu gibi beton numunelerde de AC içeriğinin %20'ye çıkmasıyla numune yoğunluğu artmaya başlamaktadır. Özgül ağırlığı, pomzanın özgül ağırlığından daha yüksek olan AC'nin %10 kadar pomza ile ikamesinde numune yoğunluğunun artma yerine azalmasını şöyle açıklamak mümkündür: Çizelge 4.11.'de verilen makroboşluk hacimlerine bakıldığında 30FA-10AC için bu değer, %42.09 iken, diğer iki PGP beton numune için bu değer %0.00'dır. Dolayısıyla %10 AC ikamesinin makroboşluklara sebep olduğu ve böylece boşluk hacmi daha fazla olan 30FA-10AC numunesinin yoğunluğunun 30FA-0AC numunesine göre düştüğünü ifade etmek mümkündür. Nitekim su emme oranlarına bakıldığında 30FA-10AC numunelerinin su emme oranı, 30FA-0AC numunelerinin su emme oranının 2 katı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.11. Beton numunelerin boşluk hacmi dağılımı (%)

Karışım Adı	Mikroboşluk hacmi (<2 nm)	Mezoboşluk hacmi (2 nm-50 nm)	Makroboşluk hacmi (50 nm<)
30FA-**0**AC	3.61	96.39	0.00
30FA-**10**AC	0.83	57.08	42.09
30FA-**20**AC	0.00	100.00	0.00
PC	0.38	66.01	33.61

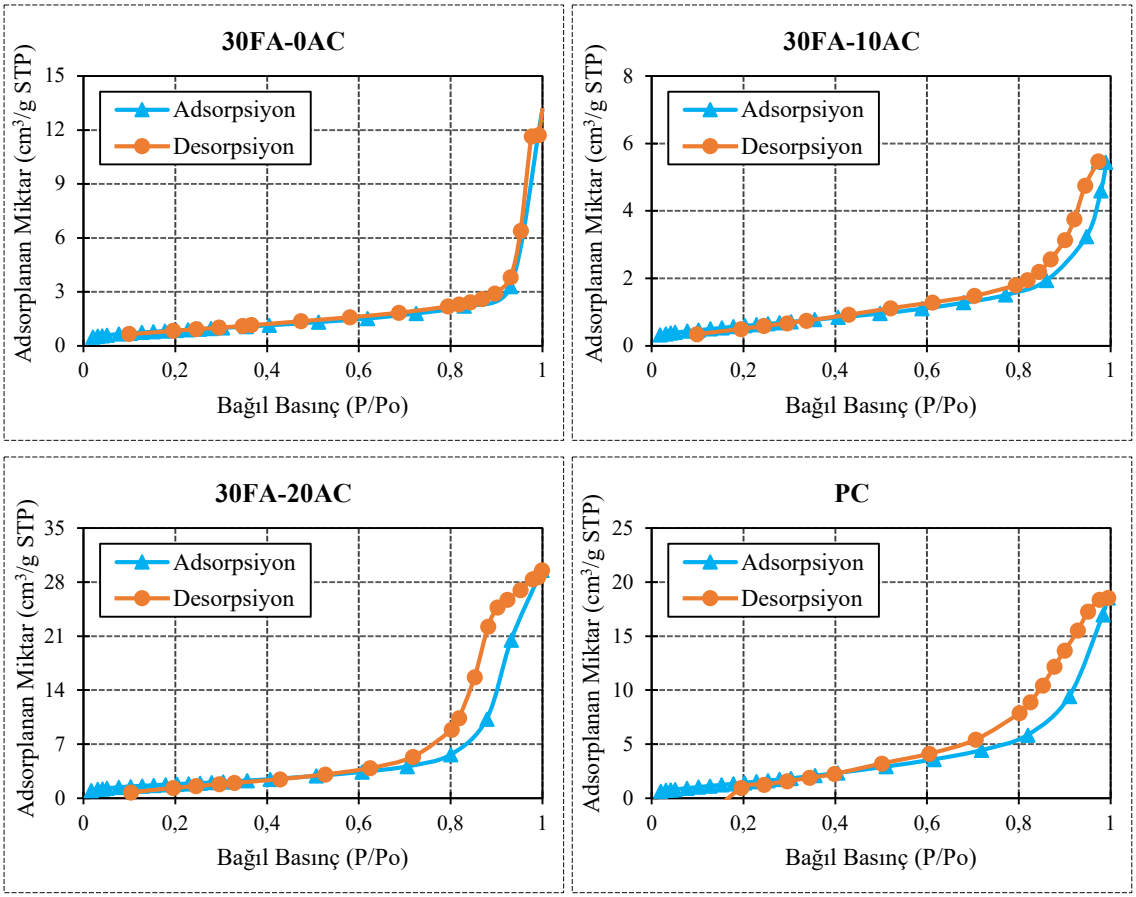
Beton numunelerin BET analizinden elde edilmiş boşluk hacmi, yüzey alanı ve ortalama çapı, Çizelge 4.12.'de sunulmuştur. Burada 40.3122 nm çapından küçük boşluklara yer verildiği için makroboşluklara (≥ 50 nm) sahip olan 30FA-10AC numunesinin boşluk hacmi düşük görülmektedir.

Çizelge 4.12. BET analizi sonuçları

Karışım Adı	BET yüzey alanı (m^2/g)	BJH absorbsiyon ortalama boşluk çapı (nm)	Boşluk hacmi* (cm^3/g)
30FA-**0**AC	3.15	6.2091	0.00922
30FA-**10**AC	2.29	13.2141	0.00761
30FA-**20**AC	6.54	14.8474	0.04134
PC	6.17	12.8549	0.02648

*Tek noktalı absorbsiyon: P/Po=0.9500'de, 40,3122 nm çapından küçük gözeneklerin toplam boşluk hacmi

Şekil 4.29.'da beton numunelerin 77 K'deki azot (N_2) adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri sunulmuştur. Tüm beton numunelerin azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermlerinin, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry) sınıflandırma sistemi tarafından belirlenmiş 6 sınıf izoterm tiplerinden V. Tip izoterme benzediği görülmektedir (Sing 1985). Bu izoterm tipi, adsorplayıcı-adsorplanan etkileşimi zayıf olan büyük oranda mezogözenek (2 nm < gözenek boyutu < 50 nm) barındıran katı malzemelerdeki adsorpsiyonu göstermektedir (Chang ve ark. 2009; Lee ve ark. 2016).



Şekil 4.29. Beton numunelerin 77 K'deki N_2 adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermleri

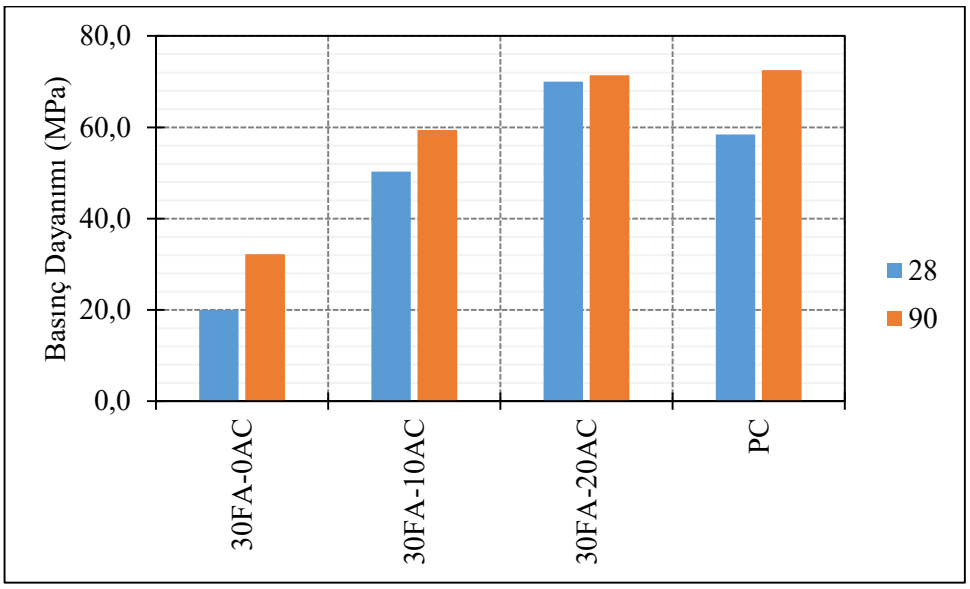
4.3.2. PGP Betonların Basınç Dayanımı

Beton numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, Çizelge 4.13.'te verilmiştir. PGP beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, sırasıyla 20.0 ile 70.0 MPa arasında ve 32.2 ile 71.4 MPa arasında değişmektedir. PC beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımı ise sırasıyla 58.4 ve 72.5 MPa olarak ölçülmüştür. AC içermeyen 30FA-0AC karışımı esas alındığında, %10 ve %20 AC içeriğinin, 28 günlük basınç dayanımını sırasıyla %152 ve %250 arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum, AC içeriğinin PGP bağlayıcılar için ne kadar hayati olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.13. Beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Karışım Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	
	28 Günlük	90 Günlük
30FA-**0**AC	20.0	32.2
30FA-**10**AC	50.3	59.4
30FA-**20**AC	70.0	71.4
PC (Şahit Numune)	58.4	72.5

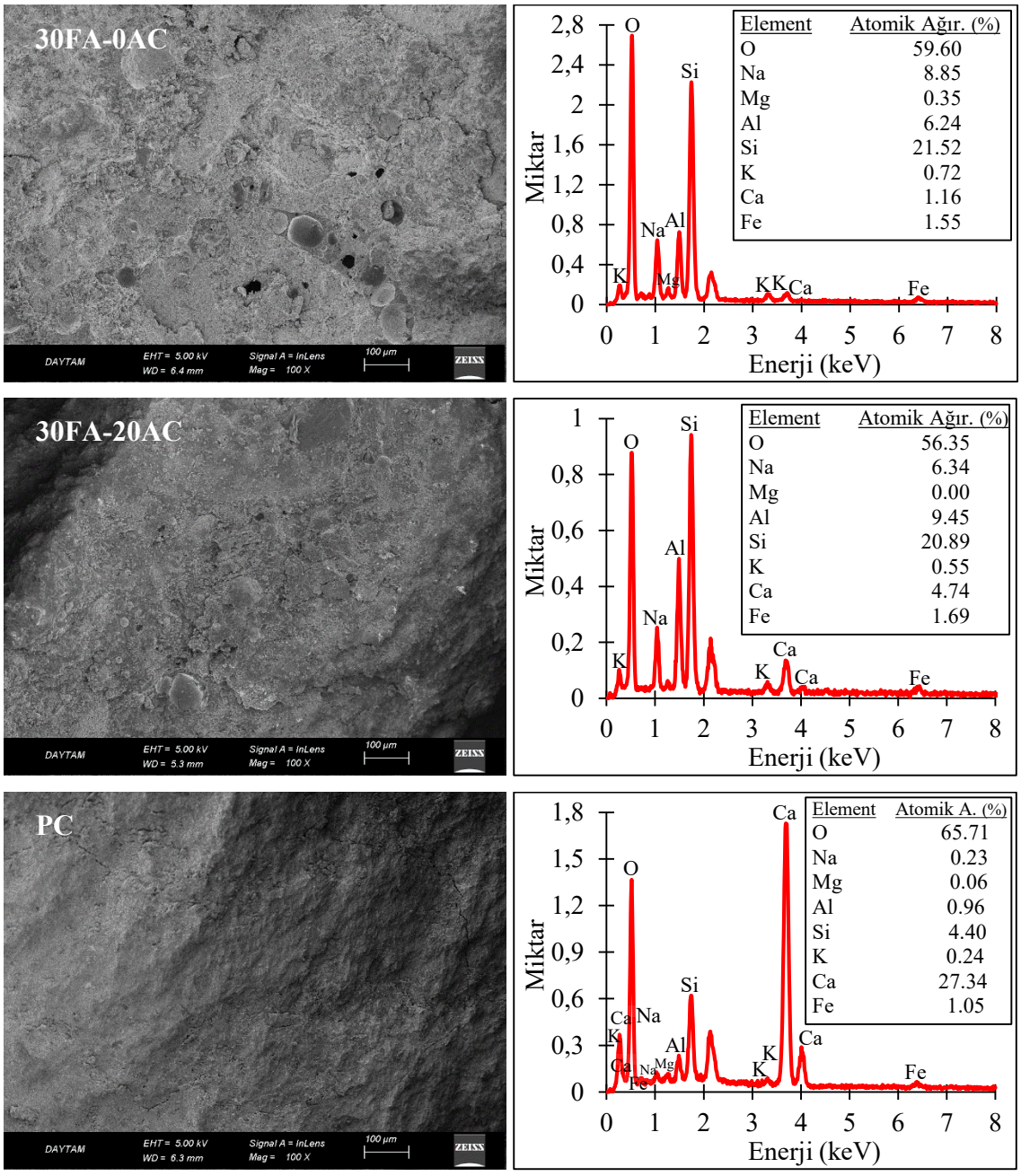
Şekil 4.30.'da, beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları verilmiştir. Şekilden rahatlıkla görülebileceği gibi AC içermeyen 30FA-0AC numunelerinin dayanım gelişimi, 28 günden sonra da ciddi bir şekilde devam etmiştir. AC içeriğinin %20 olduğu 30FA-20AC numunelerinin dayanım gelişimi, büyük oranda ilk 28 günde tamamlanmıştır. AC içeriği, %0, %10 ve %20 olan PGP betonların 28 günden 90 güne kadar basınç dayanımı artışı sırasıyla %61, %18 ve %2 olurken, PC için bu değer, %24 olmuştur. Harç numunelerle yapılan çalışmada da belirtildiği gibi AC içeriği %20 ve %30 olan numuneler, sıcak küre tabi tutulduğu taktirde nihai dayanımının neredeyse tamamını, 7 günde tamamlamaktadır (Çizelge 4.5.). AC katkısının sağladığı önemli faydalardan biri olan erken yüksek dayanım, prefabrik beton elemanların depolanma süresini kısaltacaktır. Kanalizasyon borusu, menfez ve su kanaleti olukları gibi prefabrik eleman üretiminde PGP betonların kullanımının fayda sağlayacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.30. Beton numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Herhangi bir etkiye maruz bırakılmayan bu numunelerin SEM görüntüleri ve bu yüzeylerden alınan EDX spektrumları, Şekil 4.31.'de verilmiştir. Ayrıca EDX

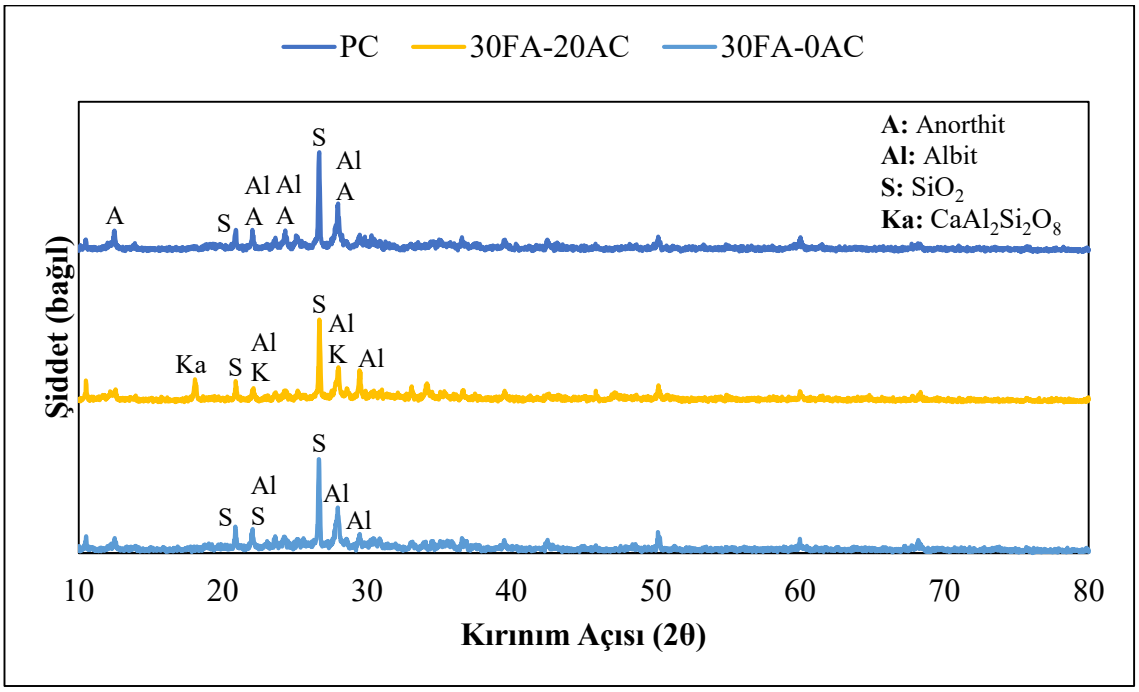
analizinden elde edilen element içeriği miktarları da spektruma ait grafiğin köşesinde listelenmiştir.



Şekil 4.31. Beton numunelerin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

Herhangi bir etkiye maruz bırakılmayan ve 28. günde basınç dayanımları ölçülen beton numunelerin XRD analizleri, Şekil 4.32.'de verilmiştir. 30FA-0AC numunesinin XRD analizinde gözlemlenen albit, $(Na_{0.98}Ca_{0.02})(Al_{1.02}Si_{2.98}O_8)$ formunda tespit edilmiştir. Beton numunelerin XRD analizinde bulunan SiO_2 ve/veya kuvars, ince agrega olarak kullanılan kum kaynaklıdır. Sertleşmiş PGP bağlayıcı yapısında $CaAl_2Si_2O_8$

(kalsiyum alüminosilikat) ve albit yoğunlaşmışken, sertleşmiş PC hamurunun yapısı daha çok albit ve anorthitten oluşmaktadır.



Şekil 4.32. Beton numunelerin XRD analizleri

4.3.3. PGP Betonların Islanma-Kuruma Performansı

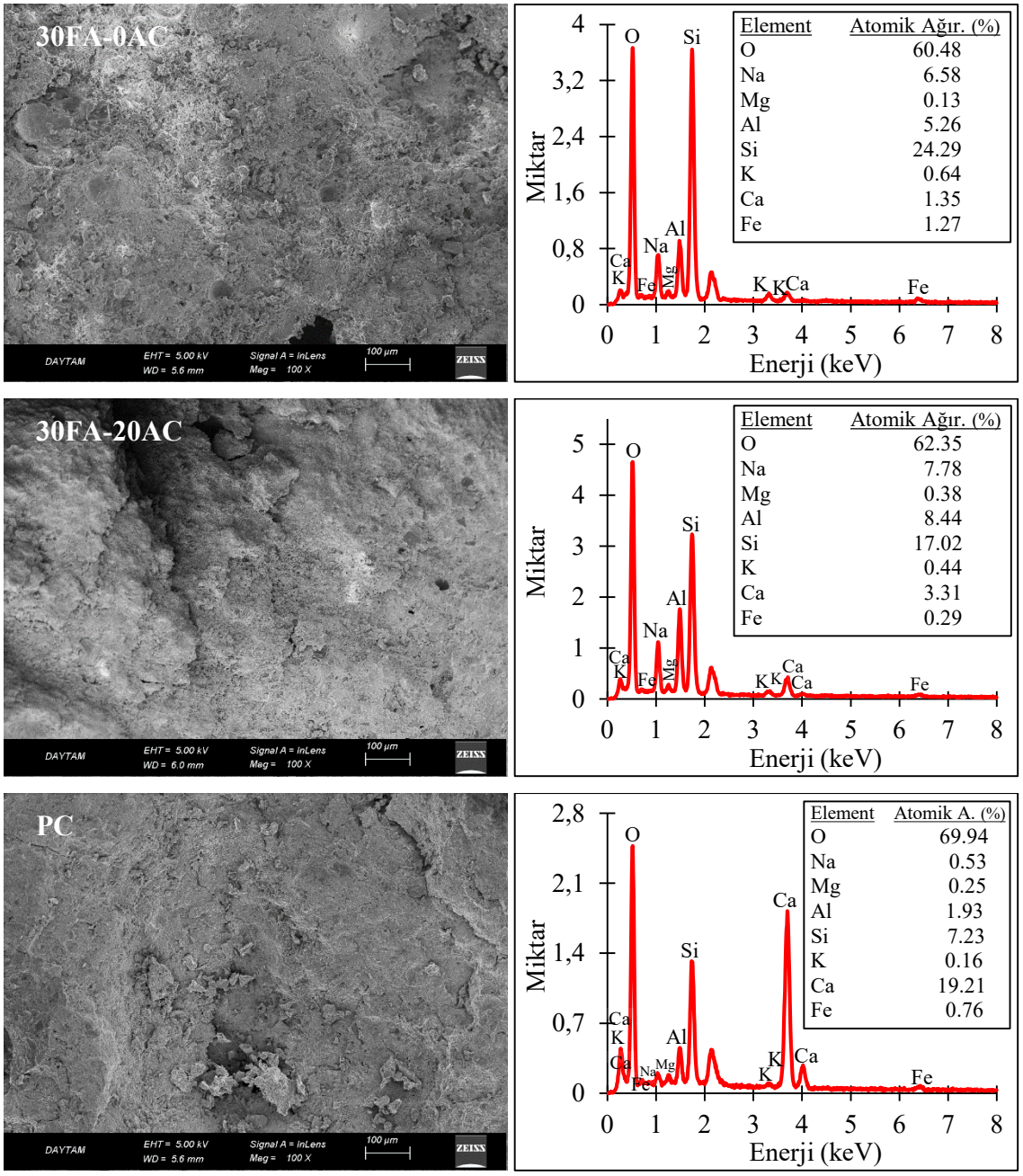
Beton numunelerin 20 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda kalan basınç dayanımları ve basınç dayanımı kaybı miktarları, Çizelge 4.14.'te verilmiştir. PC beton numuneleri, ıslanma-kuruma etkisi sonrası basınç dayanımlarını arttırmıştır. Hidrolik bir bağlayıcı olan PC, sulu ortamda, çimento tanecikleri ve su arasındaki ilave reaksiyonların katkısıyla bunu sağlamaktadır. Buna karşılık PGP betonlar, %36.7 ile %1.4 arasında basınç dayanımı kaybı yaşamışlardır. AC içeriğinin %10 olmasıyla basınç dayanımı kaybı %17.1'e düşerken, AC içeriğinin %20'ye çıkmasıyla basınç dayanımı kaybı çok sınırlı kalmıştır.

Çizelge 4.14. Islanma-kuruma etkisi sonrası beton numunelerin kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı

Karışım Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Kaybı (%)
30FA-**0**AC	20.4	36.7
30FA-**10**AC	49.3	17.1
30FA-**20**AC	70.4	1.4
PC (Şahit Numune)	74.2	-2.3

PGP betonların ıslanma-kuruma etkisiyle dayanım kaybı yaşaması, sulu ortamda bir kısım Si-O-Si bağlarının zayıf Si-OH bağlarına dönüşmesiyle açıklanmaktadır (Lemougna ve ark. 2013, 2014; Kaze ve ark. 2021). Bu çalışmadaki karışım oranları ve kür koşulları için AC içermeyen PGP betonların su yapılarında kullanılmasının pek mümkün olmadığı sonucu çıkmaktadır. Çünkü sürekli ıslanma-kuruma etkilerine maruz kalan su yapılarında, ıslanma-kuruma dayanıklılığı iyi olmayan bir betonun kullanılması mümkün değildir. Ancak AC içeriği %20 olan 30FA-20AC karışımıyla hazırlanan betonların hem dayanım hem de ıslanma-kuruma dayanıklılığı çok iyi olduğu için PGP betonların su yapılarında kullanılması mümkün olmaktadır.

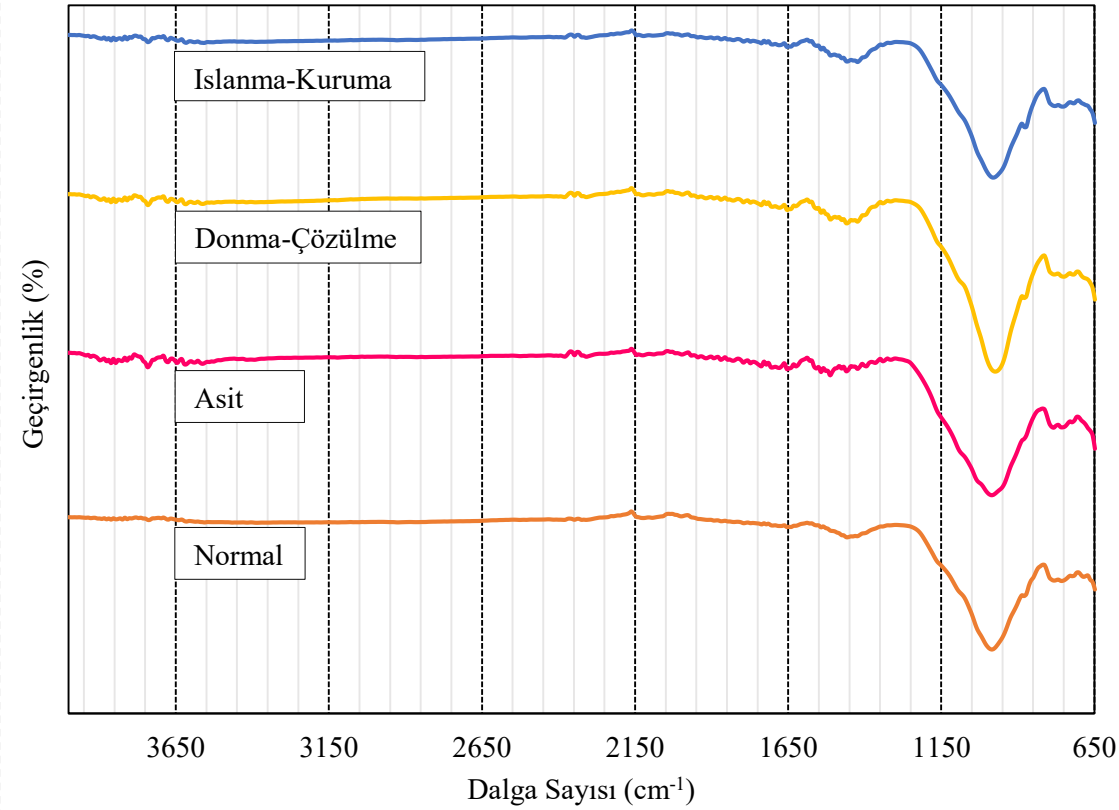
Şekil 4.33.'te ıslanma-kuruma etkilerine maruz kalan beton numunelerin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları verilmiştir. 30FA-0AC numunesinin ıslanma-kuruma etkisi sonrası EDX analizine bakıldığında Na miktarının, normal numuneye göre biraz azaldığı görülmektedir. Bu durum, reaksiyona girmeyen bir kısım serbest Na'ların ıslanma-kuruma döngüleri esnasında bünyeyi terk etmesiyle açıklanabilir.



Şekil 4.33. Beton numunelerin ıslanma-kuruma sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

Şekil 4.34.'te, herhangi bir etkiye maruz kalmamış normal 30FA-0AC beton numunesi ile aynı karışımın sülfürik asit (4 ay), ıslanma-kuruma (20 döngü) ve donma-çözülme (100 döngü) tesirlerine maruz kalan numunelerinin FTIR spektrumları verilmiştir. Bu numunelerin FTIR spektrumlarına bakıldığında, 800 cm^{-1} ile 1250 cm^{-1} arasında geniş ve şiddeti büyük piklerin olduğu görülmektedir. Bu aralıktaki pikler, Si-O-T'nin (T: tetrahedral Si veya Al) asimetrik gerilme titreşimiyle bağlantılıdır (Panagiotopoulou ve ark. 2015). Yaklaşık 879 cm^{-1} bandında görülen ve deforme olmuş sodyum bikarbonata atfedilen (Criado ve ark. 2005) pikin, asit etkisiyle kaybolmaya

başladığı görülmektedir. Asit etkisine maruz kalan numune dışında diğer üç numunede de 1450 cm^{-1} civarlarında belirgin olan pik, NaOH ile üretilen malzemelerde sıkça görülen atmosferik karbonatlaşmaya işaret etmektedir (Li ve ark. 2012).

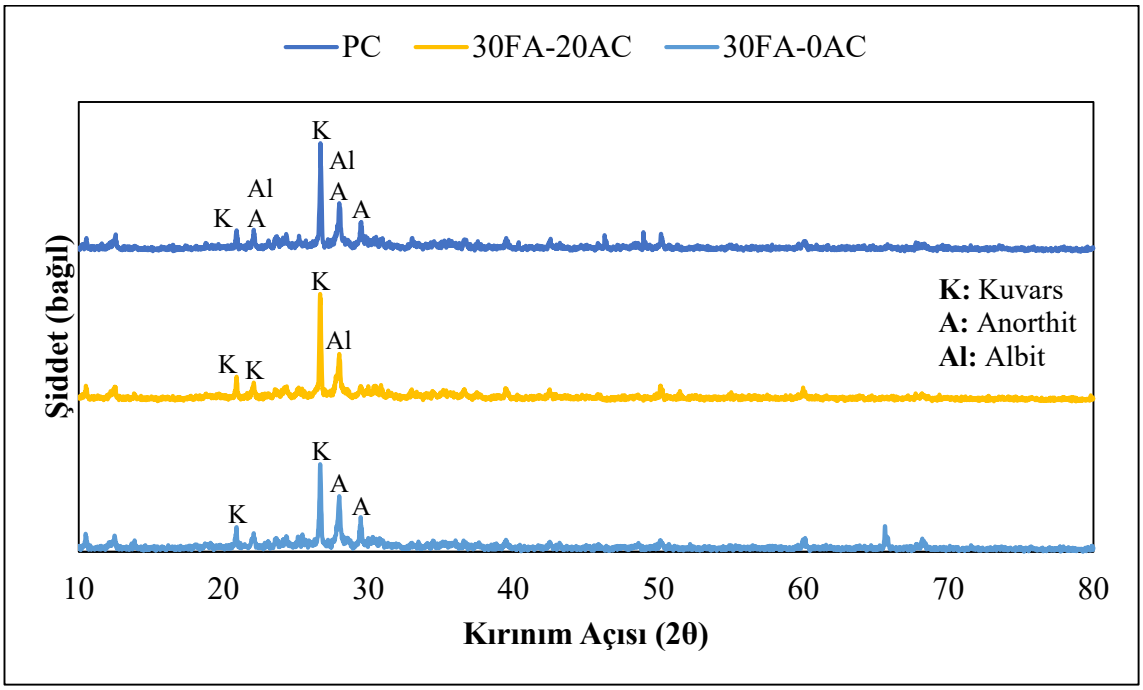


Şekil 4.34. Farklı tesirlere maruz bırakılan 30FA-0AC beton numunesinin FTIR grafiği

Normal numunede olmayan fakat farklı tesirlere maruz kalmış diğer üç numunede 1350 – 1950 cm^{-1} arasında rastlanan küçük küçük pikler, O-C-O gerilme titreşimlerine ve H-O-H eğilme titreşimlerine dayandırılmaktadır (Ahmari ve Zhang 2013; Vafaei ve Allahverdi 2017; Syahyadi ve ark. 2020). Benzer şekilde normal numunede olmayan fakat farklı tesirlere maruz kalmış diğer üç numunede 2350 cm^{-1} civarında rastlanan pikler, –OH ve O–H'nin gerilme titreşimlerine atfedilmektedir (Mijarsh ve ark. 2015; Vafaei ve Allahverdi 2016). Ve yine normal numunede küçük olan ancak farklı tesirlere kalan numunelerde belirginleşen 3740 – 3750 cm^{-1} arasındaki pik, O-H-O eğilme titreşimlerinin sebep olduğu, OH gerilme titreşimlerine atfedilmektedir (Baco ve ark. 2015).

FTIR analizlerine bakıldığında, ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve sülfürik asit tesirlerinin PGP bağlayıcıda benzer değişikliklere sebep olduğu anlaşılmaktadır. FTIR analizleri, bu tesirlerin ortak özelliği olan su ortamının geopolimerik yapıda –OH ve H-O-H türü bağlar oluşturduğunu göstermektedir. Dolayısıyla özellikle AC içermeyen PGP betonların farklı etkilere karşı benzer mekanizmayla yıprandığı söylenebilir. Yani buradaki bozulmanın, sulu ortamın etkisiyle bir kısım Si-O-Si bağlarının zayıf Si-OH bağlarına dönüşmesiyle oluştuğunu söylemek mümkündür (Lemougna ve ark. 2013).

Islanma-kuruma etkisine maruz bırakılan beton numunelerin XRD analizi Şekil 4.35.'te sunulmuştur. Islanma-kuruma sonrası, 30FA-0AC numunesinin XRD grafiğinde anorthite ($CaAl_2Si_2O_8$) rastlanmaktadır. Normal numunenin XRD grafiğinde ise albit ($NaAlSi_3O_8$) görülmüştü. Bu durum, EDX analizlerinde 30FA-0AC numunesinin Na miktarının azalması ve Ca miktarının artmasında da gözlemlenmişti.



Şekil 4.35. Islanma-kuruma etkisi sonrası beton numunelerin XRD analizleri

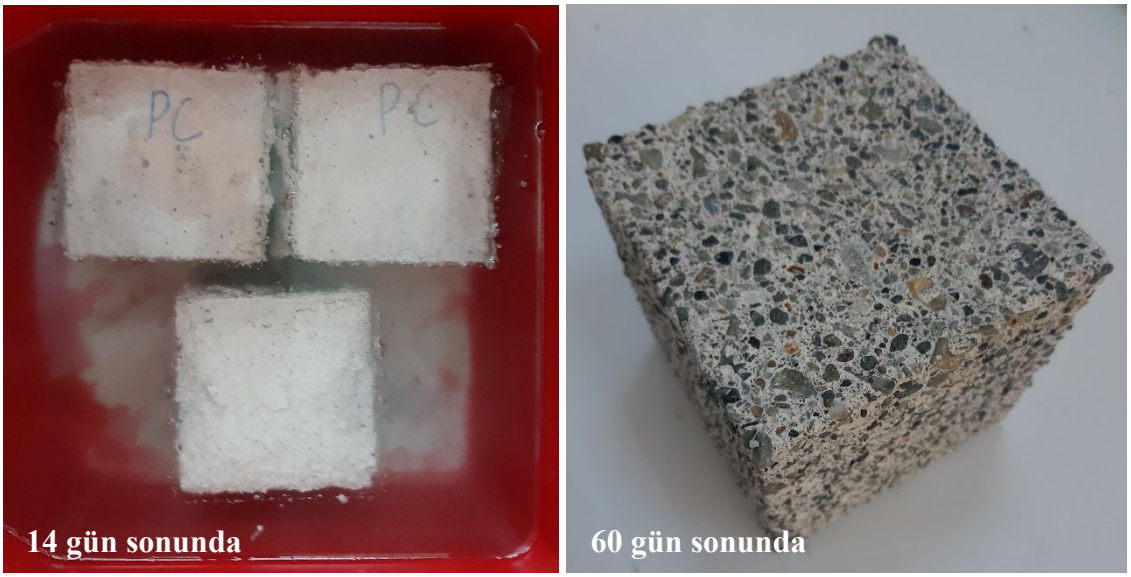
4.3.4. PGP Betonların Sülfürik Asit Direnci

Beton numuneler, 4 ay boyunca %5 derişimdeki sülfürik asit çözeltisinde bekletilmiş ve şekilsel değişim, ağırlık değişimi ile dayanım kayıpları belirlenmiştir. Beton numunelerdeki şekilsel değişim, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı kaybı, 2 ve 4 ay sonunda ölçülmüştür (Çizelge 4.15.).

Çizelge 4.15. Sülfürik asit etkisindeki betonların ağırlık değişimi ve basınç dayanımı kaybı

Karışım İsmi	60 Gün		120 Gün	
	Ağırlık Kaybı (%)	Dayanım Kaybı (%)	Ağırlık Kaybı (%)	Dayanım Kaybı (%)
30FA-**0**AC	-0.9	38.8	0.5	47.4
30FA-**10**AC	-0.7	21.3	0.1	31.7
30FA-**20**AC	-0.9	14.9	0.3	35.8
PC	4.8	28.1	16.6	72.6

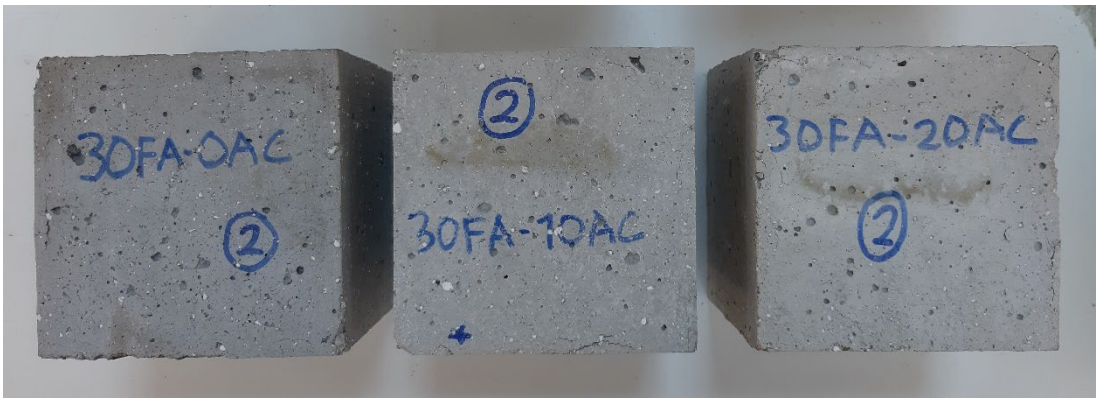
Şekil 4.36.'da sülfürik asit etkisindeki beton numunelerin 14 gün içinde aldıkları hal ile 60 günün sonunda bağlayıcı hamurun çözülmesiyle oluşan durum, verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi beton numuneler, 2 hafta içinde önemli çözülme gösterirken, 2 ayın sonunda bağlayıcı hamurun çözülmesi sonucu beton numunenin yüzeyinde önemli miktarda aşınma meydana gelmektedir. Beton numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı da bu çözülmeyle açıklanabilir (Çizelge 4.15.).



Şekil 4.36. Sülfürik asit etkisindeki PC betonlarda meydana gelen şekilsel değişim

Sülfürik asit etkisindeki PGP betonlarda ise 2 ayın sonunda bağlayıcı hamurda herhangi bir çözünme meydana gelmemesine karşın yüzeye yakın bölgelerde hacim artışına sebep olan reaksiyon ürünleri gözlenmektedir (Şekil 4.37.). Beyaz renkli bu reaksiyon ürünleri/lekeler, numune yüzeylerinin çatlamasına neden olmuşlardır. Hacim artışının sürekliliği durumunda ise beton yüzeylerin numune köşelerinden başlayarak tabaka halinde dökülmesine yol açacaktır. Bazı çalışmalarda, beyaz renkli bu reaksiyon

ürünlerinin alçıtaşı olduğu ifade edilmektedir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b; Vafaei ve Allahverdi 2018; Vafaei ve ark. 2018).



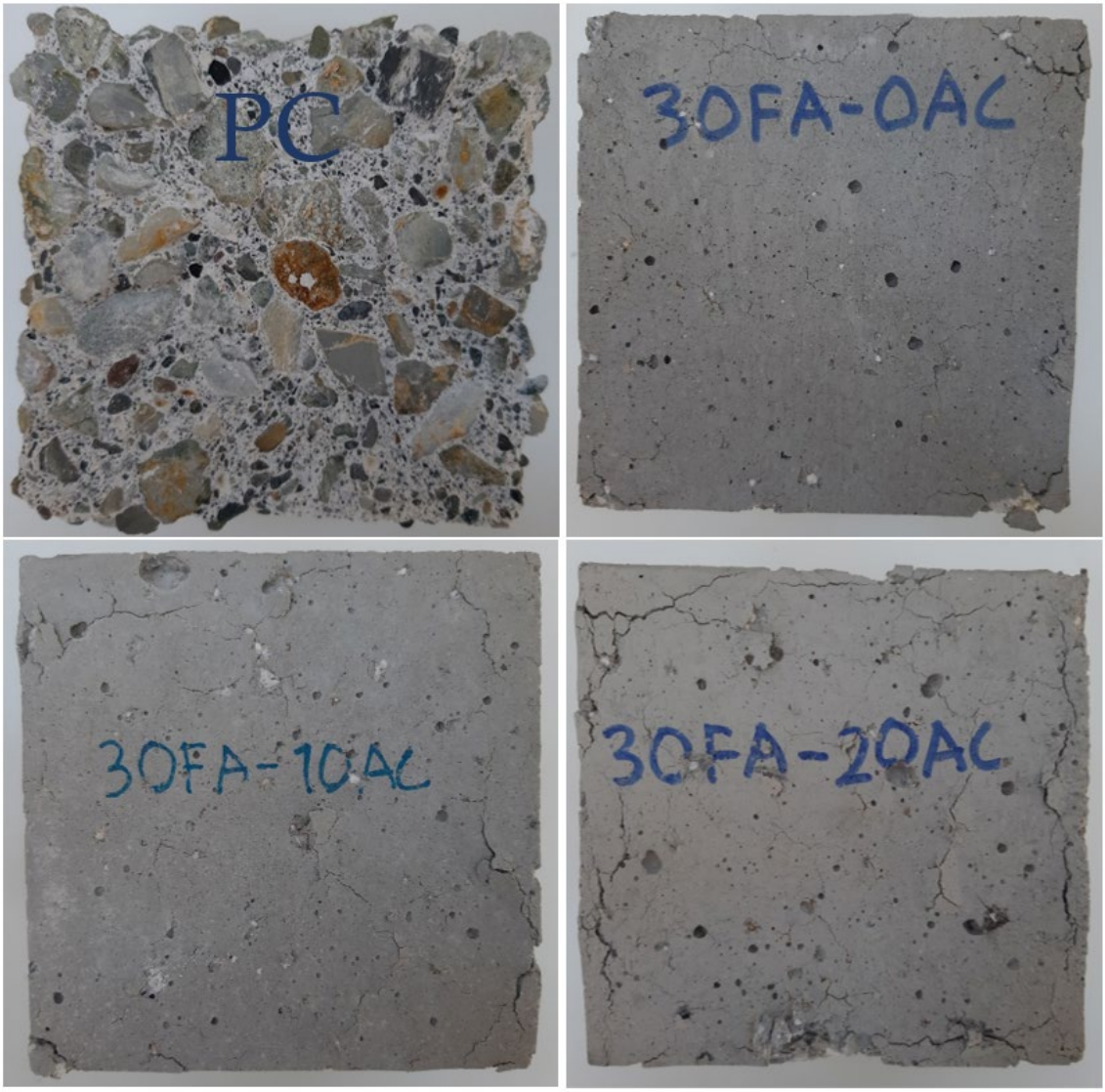
Şekil 4.37. Sülfürik asit etkisindeki GP betonlarda meydana gelen şekilsel değişim

Sülfürik asit çözeltisinde 2 ay bekletilen PC beton numunelerde önemli ağırlık kaybı yaşanırken; GP beton numunelerin ağırlığında çok az bir artış meydana gelmiştir. Birçok çalışmada rastlanan bu durum, yeni reaksiyon ürünlerinin oluşması (Şekil 4.37.) veya sıcak kürün etkisiyle numunede oluşmuş yeni boşlukların çözeltiyle dolması ile açıklanabilmektedir (Bakharev 2005; Mehta ve Siddique 2017; Aiken ve ark. 2018). Bakharev, GP numunelerdeki ağırlık artışının sebeplerinden biri olarak düşünülen bu reaksiyon ürünlerinin, amorf yapılı silika olduğunu ifade etmektedir (Bakharev 2005). Ancak yukarıda da ifade edildiği gibi birçok çalışmada bu reaksiyon ürünleri, alçıtaşı olarak belirlenmiştir. PC betonların 2 aylık asit etkisi sonrası ağırlık kaybı, %4.8 olmasına karşın numunede önemli derecede aşınma meydana gelmiştir. Burada aşınma olarak ifade edilen şey, sülfürik asit etkisi ile çözünen bağlayıcı hamurun, yıkanarak ayrılmasıdır. PC bağlayıcıların Ca içeriğince zengin olması, sertleşmiş bağlayıcı hamurun asit ile reaksiyona girerek alçıtaşı şeklinde çökelmesine sebep olmaktadır (Ariffin ve ark. 2013). PC numunesindeki bu aşınmanın, asit ile reaksiyonu sonucu alçıtaşına dönüşen bağlayıcı hamur olduğu tahmin edilmektedir.

2 ay asit etkisinde kalan numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında, 30FA-0AC numunesindeki dayanım kaybının, %38.8 olduğu görülmektedir. 30FA-0AC numunesinde meydana gelen bu dayanım kaybı, asit etkisiyle meydana geldiği gibi sulu ortamda bir kısım Si-O-Si bağlarının Si-OH bağlarına dönüşmesinin etkisiyle (Şekil 4.34.) de olmuş olabilir (Lemougna ve ark. 2013, 2014). Nitekim Çizelge 4.15.'te de görüldüğü gibi 30FA-10AC, 30FA-20AC ve PC numunelerindeki dayanım kaybı, 2

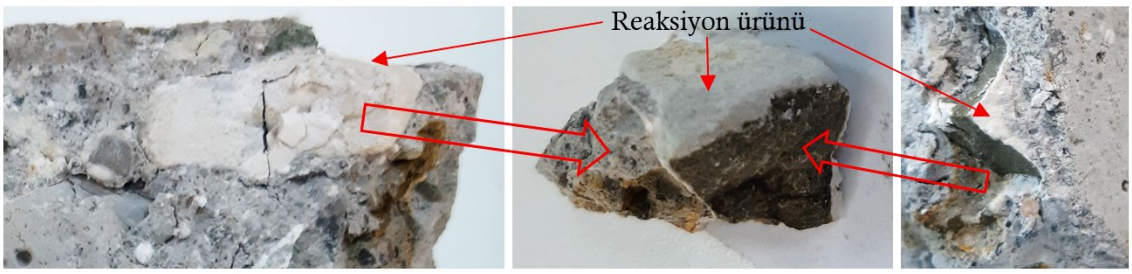
aydan 4 aya geçerken sırasıyla 1.49, 2.40 ve 2.58 katına çıkarken, 30FA-0AC numunesinde bu oran, 1.22 katına çıkabilmiştir. Dolayısıyla AC içeriğinin düşük olduğu veya hiç olmadığı PGP numuneleri, normal su, deniz suyu, asit çözeltisi gibi sulu ortamlardan çok etkilenmektedir ve bunun bir sonucu olarak önemli dayanım kayıpları yaşamaktadır (Lemougna ve ark. 2014; Djobo ve ark. 2017). Sonuç olarak özellikle DP esaslı GP betonların ıslanma-kuruma, deniz suyu veya asit gibi etkilere maruz kaldığında yaşadığı dayanım kaybını, yıpratıcı bu etkenlerle açıklamanın yanında sulu ortamın genel bir etkisi olduğunu da gözden kaçırmamak gerekir.

PC bağlayıcı hamurunun asit etkisiyle çözülüp yıkanması, 2 aydan sonra da devam etmiş ve 4 ayın sonunda aşınma miktarı çok daha fazla olmuştur. PGP betonlarda ise reaksiyon ürünü olan beyaz lekelerin miktarı/hacmi artmaya devam etmiş ve bunun bir sonucu olarak beton yüzeyinde çatlaklar ilerlemiş ve köşelerden başlayarak dökülmeler başlamıştır (Şekil 4.38.). Gözlemsel analizler, sülfürik asit etkisiyle oluşan bozulmaların PGP ve PC betonlarda farklı mekanizmalarla oluştuğunu göstermektedir. PGP betonlarda, hacim artışına sebep olan reaksiyon ürünleri bozulma mekanizmasını oluştururken, PC betonlarda bağlayıcı hamurun çözülüp yıkanması bozulmayı ilerletmektedir.



Şekil 4.38. 120 gün sülfürik asit etkisinde kalan betonların şekilsel değişimi

Asit etkisiyle PGP betonlarda oluşan ve bu betonların yıpranmasına sebep olan reaksiyon ürünleri, genellikle hapsolmuş hava boşluklarına yerleşerek ve bazen de agrega-bağlayıcı hamur ara-yüzeyine yapışarak (Şekil 4.39.) büyümektedir.



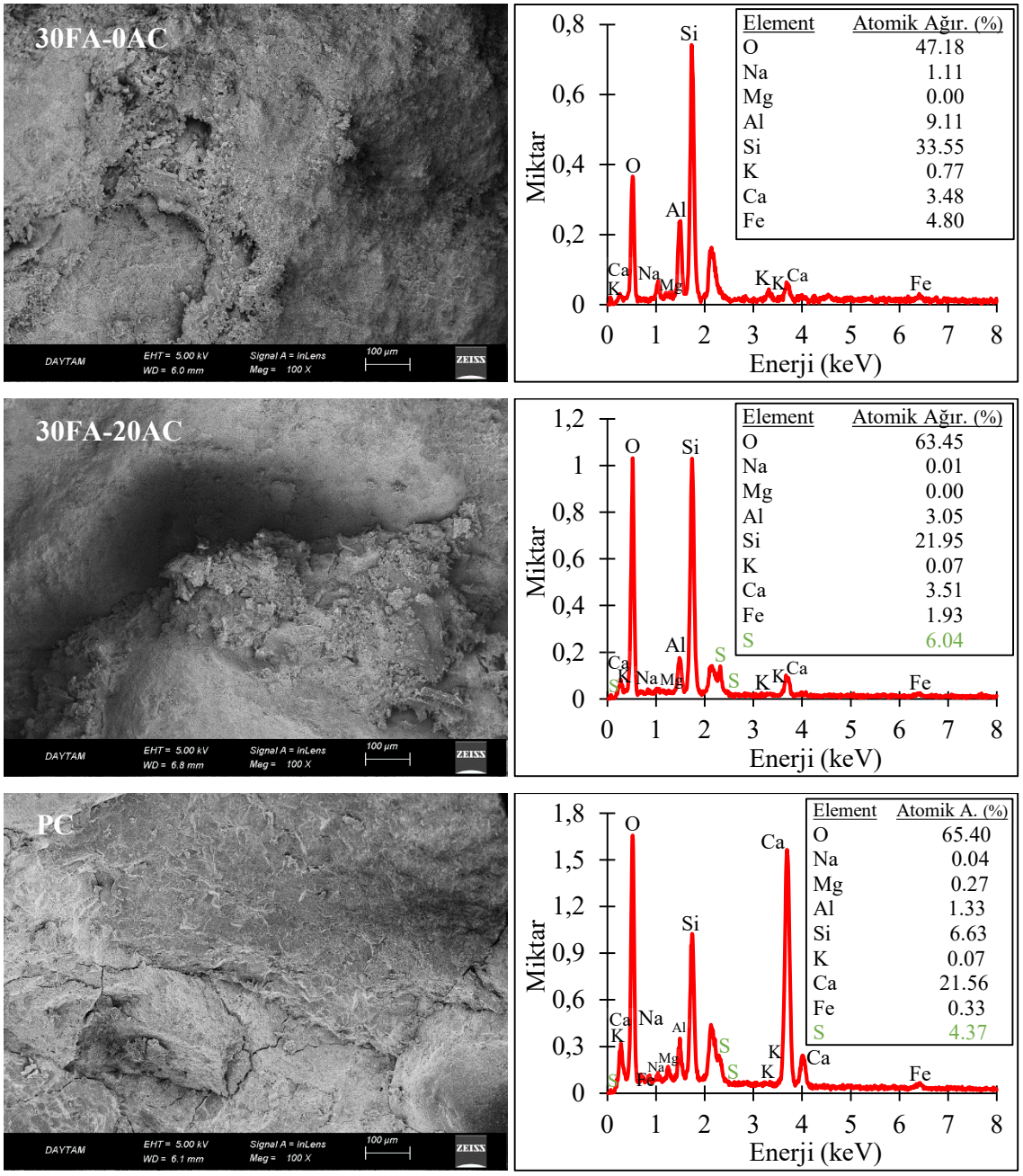
Şekil 4.39. Asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinin agrega yüzeyinde oluşması

PGP beton numunelerinin 120 gün asit etkisi sonrasındaki ağırlık değişimlerine baktığımızda, %1'in altında azalma meydana geldiği görülmektedir. İlk 60 günün

sonunda %1'in altında da olsa ağırlığın arttığı ve bunun asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinden olabileceği ifade edilmişti. Gözlemsel analizler (Şekil 4.38.), 120 gün sonunda bu reaksiyon ürünlerinin arttığını göstermesine karşın, ağırlıkta azalmanın olması, bu reaksiyon ürünlerinin etkisiyle beton yüzeyinde oluşan çatlakların neticesinde köşelerden itibaren dökülmeye başlayan parçaların varlığı ile açıklanabilir. PC beton numunelerde ise asit saldırısıyla bağlayıcı hamurun daha fazla çözünmesi ve beraberinde agreganın yıkanması sonucu ağırlık kaybı, %16.6 gibi oldukça ciddi bir değere ulaşmıştır.

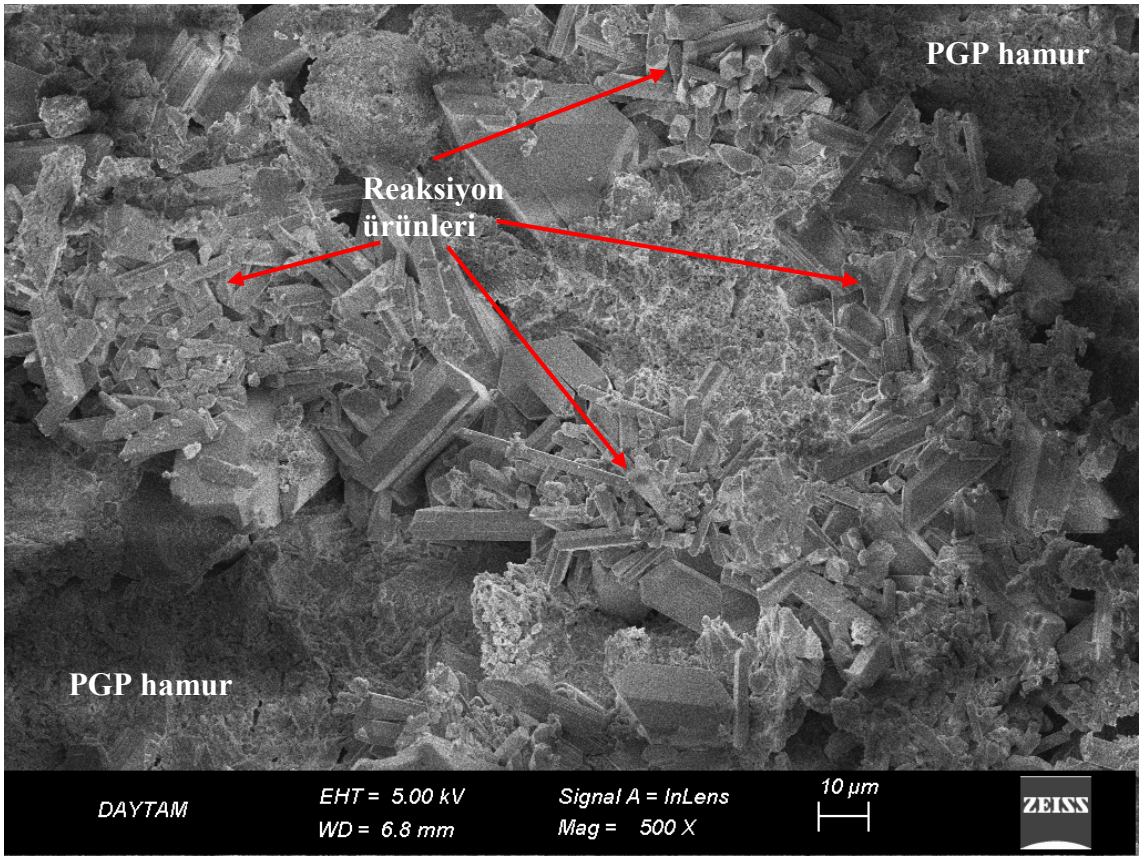
PGP beton numunelerde AC içeriğinin artmasıyla 60 günden sonra dayanım kaybı hızı, artmıştır. AC içermeyen PGP beton numunesinde 60 günden sonra dayanım kaybı hızının azalmasının sebepleri, daha önce tartışılmıştı. AC içeren PGP betonlarda ise AC içeriğinin sağlamış olduğu Ca ile açıklanabilir. Ca kaynaklı reaksiyon ürünlerinin asit etkisine karşı daha savunmasız olması, AC içeriğine sahip PGP betonların asit etkisiyle bozulmalarında önemli bir rol oynamaktadır (Bakharev 2005; Ariffin ve ark. 2013). %10 (30FA-10AC) ve %20 AC (30FA-20AC) içeriğine sahip PGP betonlarda 60 günün sonunda dayanım kaybı, sırasıyla %21.3 ve %14.9 olmuş, 120 günün sonunda ise sırasıyla %31.7 ve %35.8 olmuştur. AC içeriği daha düşük olan 30FA-10AC numunesinin 60 günün sonunda daha fazla dayanım kaybına uğraması, bu numunenin geçirgenliğinin daha fazla olmasıyla açıklanabilir (Çizelge 4.11.). Yani ilk 60 günde geçirimlilik, bozulma üzerinde daha etkili olurken, sonraki 60 gün içinde AC içeriğinin bozulma üzerinde daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir. PC beton numunesi ise 120 günün sonunda %72.6 gibi çok büyük bir dayanım kaybı yaşamıştır.

Buraya kadar, sülfürik asit etkisiyle beton numunelerdeki bozulmaların sebepleri; şekilsel gözlemler, ağırlık değişimleri ve dayanım kayıpları üzerinden açıklanmıştır. Bundan sonraki kısımda bu numunelerdeki bozulmalar, mikroyapı analizleriyle açıklanacaktır. Şekil 4.40'ta, 120 gün süreyle sülfürik asit etkisinde kalan beton numunelerden alınan örneklerden alınan SEM görüntüleri ve EDX spektrumları, sunulmuştur.



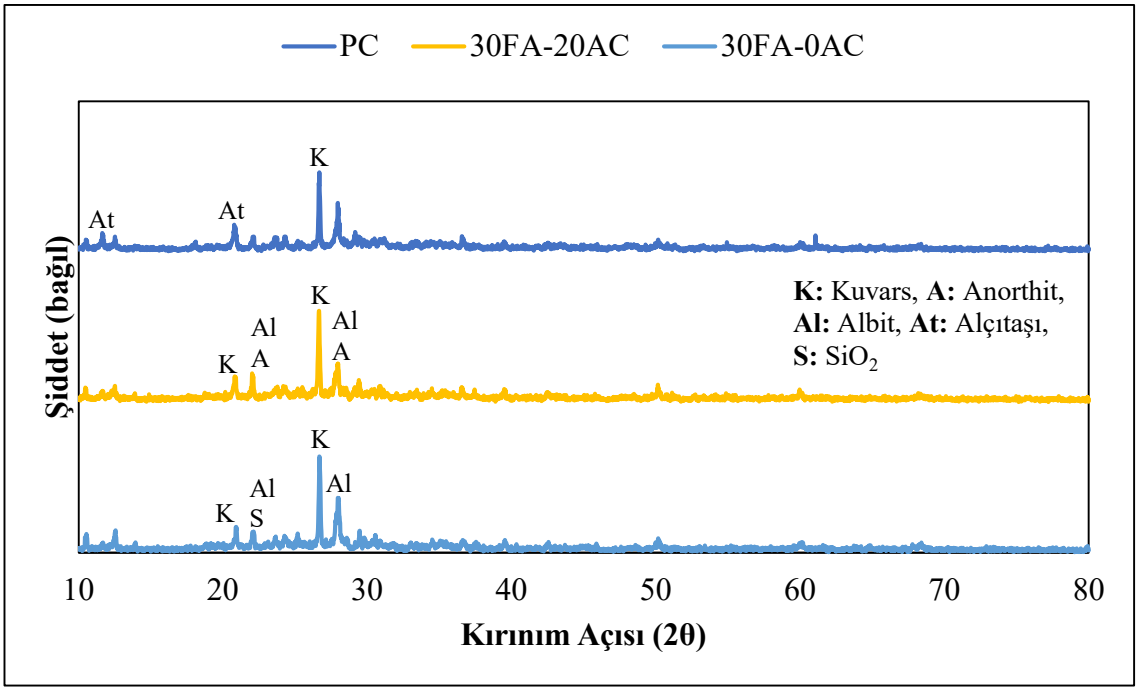
Şekil 4.40. Beton numunelerin sülfürik asit etkisi sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

SEM görüntülerine bakıldığında, yukarıda sözü edilen beyaz renkli reaksiyon ürünlerinin genellikle düzgün şekilli çubuk biçiminde olduğu ve bazı bölgelerde biriktiği görülmektedir (Şekil 4.41.). EDX analizine bakıldığında ise asit etkisine maruz kalmayan numunelerden farklı olarak asit etkisine maruz kalan numunelerde, kükürt (S) miktarının arttığı gözlenmektedir. Bu S, sülfürik asit (H_2SO_4) ile sertleşmiş hamur arasında gerçekleşen reaksiyona işaret etmektedir.



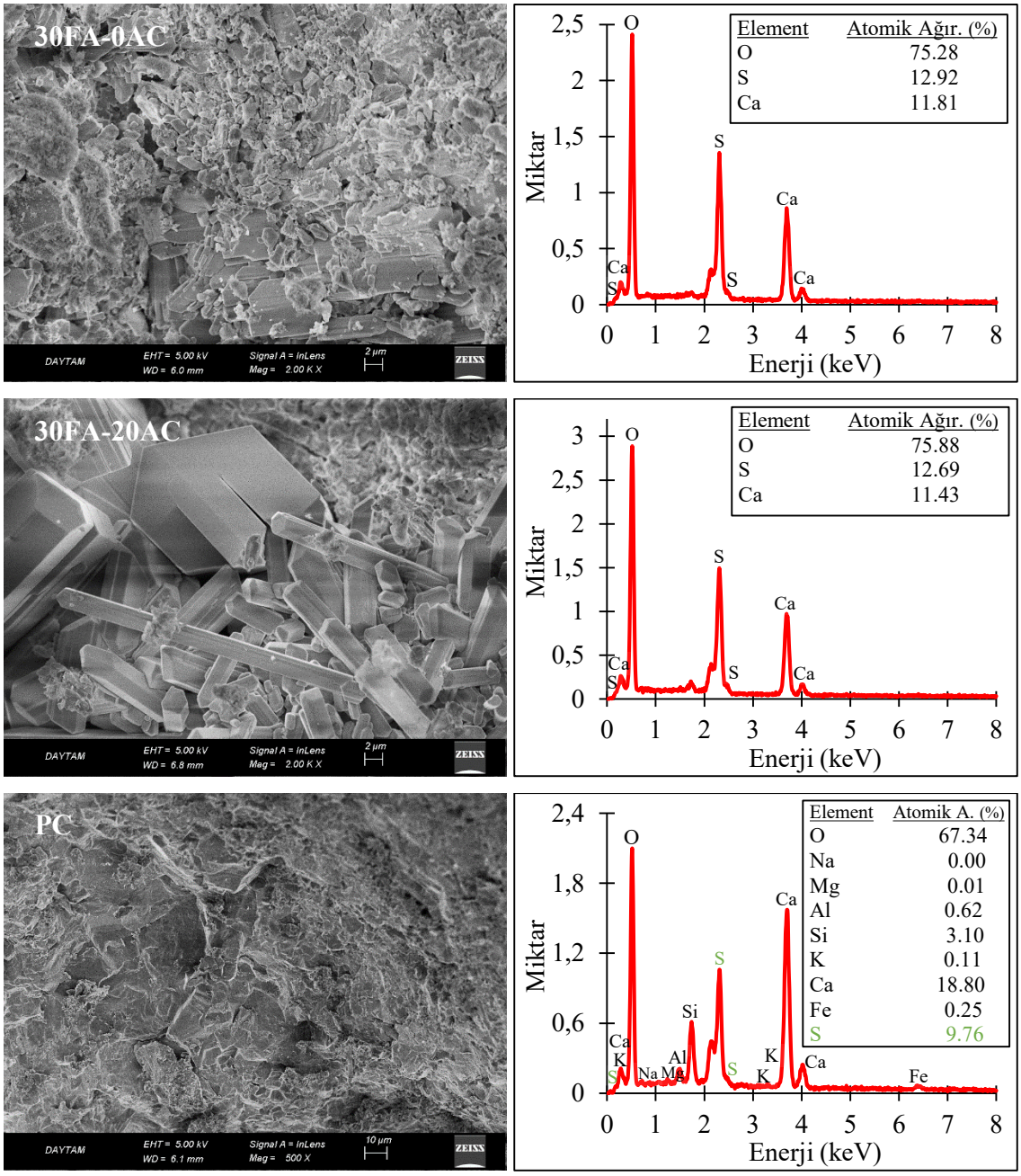
Şekil 4.41. Sülfürik asit etkisinde kalmış PGP hamur fazının almış olduğu hal

Sülfürik asit etkisinde 120 gün bekletilen beton numunelerden alınan örnekler üzerinde XRD analizi, gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.42.'de sunulmuştur. Özellikle PC esaslı beton numuneden alınan örnekte, alçıtaşına rastlanmıştır. Bu örnekler dışında, sülfürik asit etkisiyle PC betondan yıkanan beyaz ürünler ve PGP betonda oluşan beyaz lekeler üzerinde ayrıca SEM-EDX ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.42. Sülfürik asit etkisine maruz bırakılan beton numunelerin XRD analizi

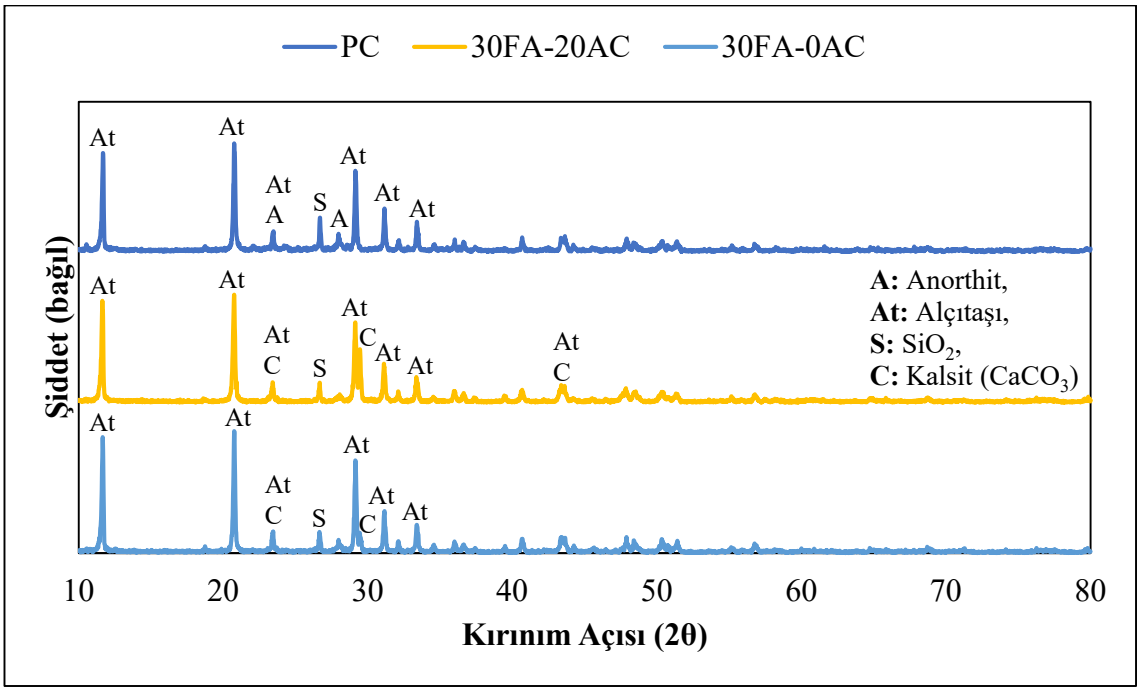
Beton numunelerde sülfürik asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinin olduğu bölgeden alınan SEM görüntüleri ve EDX spektrumları, Şekil 4.43'te verilmiştir. Burada not edilmesi gereken hususlardan biri şudur ki sülfürik asit etkisiyle PC betonda oluşan reaksiyon ürünleri yıkandığından dolayı SEM-EDX için örnek oluşturulamamış ve mevcut numunede beyaz birikintilerin olduğu bölgelere yoğunlaşmayla yetinilmiştir. PGP betonlarda oluşan reaksiyon ürünlerinin, çubuk şekilli yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 4.41. ve 4.43.). Ayrıca çubuk şekilli bu reaksiyon ürünlerinden alınan EDX spektrumları, %75-76 oranında O, %12-13 oranında S ve %11-12 oranında Ca olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.43. Sülfürik asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünlerinin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

Sülfürik asit etkisinde 120 gün bekletilen bu beton numunelerde, sülfürik asit etkisiyle oluşan reaksiyon ürünleri, sertleşmiş hamur bünyesinden alınıp öğütülerek XRD analizine tabi tutulmuştur. Şekil 4.44.'te verilen bu analizlerin sonuçlarına bakıldığında, hem PC hem de PGP numuneleri için bağlayıcı fazdaki değişim, alçıtaşının varlığıdır. PGP numunelerden alınan örneklerde ayrıca kalsite ($CaCO_3$) rastlanmıştır. Kalsit, sertleşmiş hamur fazından bulunan serbest CaO'nun CO_2 ile reaksiyonundan oluşmuş olabilir. Ancak genel olarak bakıldığında hem SEM-EDX hem de XRD analizleri, oluşan

bu reaksiyon ürünlerinin alçıtaşı olduğunu göstermektedir (Djobo, Elimbi, ve ark. 2016b; Vafaei ve Allahverdi 2018; Vafaei ve ark. 2018)



Şekil 4.44. Sülfürik asit etkisiyle beton numunelerde oluşan reaksiyon ürünlerinin XRD analizi

Gerek ağırlık kaybı ve gerek dayanım kayıpları dikkate alındığında sülfürik asit etkisinde, PGP betonların PC betonlardan daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Bu durum, kanalizasyon borusu gibi sülfürik asit etkisine maruz kalan beton su yapılarında, PGP betonların PC betonlardan daha iyi bir seçim olabileceğini göstermektedir.

4.3.5. PGP Betonların Aşınma Dayanıklılığı

Beton numunelerin aşınma dirençleri, TS EN 1339 (2005) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Beton numunelerin aşınma miktarları ve bu miktarlara bağlı olarak TS EN 1339 (2005) standardında belirtilmiş aşınma sınıfları, Çizelge 4.16.'da gösterilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi PGP betonların aşınma miktarı, PC betonun aşınma miktarından az olmuştur. Bu durum, başka çalışmalarda da tespit edilmiştir (Shi ve ark. 2003; Hu ve ark. 2008; Ramujee ve Potharaju 2014). İfade edilmesi gereken noktalardan biri de kendisinin sahip olduğu basınç dayanımı değeri, şahit numunenin basınç dayanımına oranla oldukça düşük olan 30FA-0AC numunesinin aşınma direncinin, şahit numunenin aşınma direncinden daha iyi olmasıdır. Aşınma testinin gösterdiği sonuçlar dışında, çelik bir uç yardımıyla çizilmeye çalışılan şahit

numunede belirgin çizgiler oluşturulabiliyorken, daha büyük kuvvetle 30FA-0AC numunesinde sadece çok yüzeysel bir iz oluşturulabilmiştir.

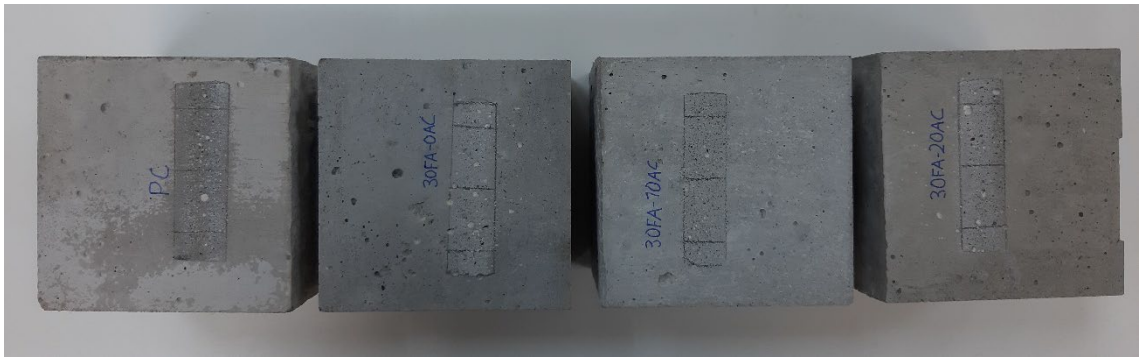
Çizelge 4.16. Beton numunelerin geniş diskli aşınma deneyiyle belirlenmiş aşınma miktarları

Karışım Adı	Aşınma miktarı (mm)	Aşınma Sınıfı
30FA-**0**AC	18.0	I
30FA-**10**AC	16.0	I
30FA-**20**AC	18.0	I
PC (Şahit Numune)	21.5	H

PGP betonları, kendi aralarında değerlendirilecek olursa 30FA-0AC numunesinin dayanımı, 30FA-20AC numunesinin dayanımından çok daha düşük olmasına rağmen aşınma dirençlerinin aynı seviyede olduğu görülmektedir. Bazı çalışmalar, basınç dayanımı ve aşınma direnci arasında genel anlamda doğru orantı olduğunu söylemesine karşın bu çalışma, bunun tam olarak gerçeği yansıtmadığını göstermiştir (Ramujee ve Potharaju 2014; Yan ve ark. 2017; Lau ve ark. 2019). Aynı beton için zamanla basınç dayanımındaki artış, aşınma direncine de yansıması beklenen bir durumdur. Ancak GP betonların aşınma direncinin PC betonlara kıyasla daha iyi olması, GP betonların aşınma etkisi altındaki davranışının basınç dayanımından başka, bağ dayanımı ve çekme dayanımı gibi özellikleriyle ilgili olabileceği kanaatini oluşturmuştur (Hu ve ark. 2008; Al-Mashhadani ve ark. 2018). Özellikle *Önceki Çalışmalar* bölümünde anlatılan Hu ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma bunu destekler mahiyettedir (Hu ve ark. 2008). Çizelge 4.13. ve 4.16'dan görülebileceği gibi 28 günlük basınç dayanımları birbirine çok yakın olan bu numunelerin aşınma dirençleri arasında önemli fark bulunmaktadır. Sonuç olarak bağ dayanımının bir etkisi olarak yapışma kabiliyeti daha iyi olan GP bağlayıcılı sistemlerin aşınma direnci, PC bağlayıcılı sistemlerden daha iyi olmaktadır.

Aşınma dayanıklılığı, su yapıları için çok önemli bir özelliktir. Akan sular tarafından taşınan askı halindeki katı tanecikler, sürtünme ve çarpma etkisi oluşturarak baraj, kanal, menfez, köprü ayağı gibi su yapılarını aşındırırlar. Akan suyun beton yüzeyine teması, bir başka aşınma türü olan erozyona sebep olmaktadır. Hızlı akan suların akış yönlerindeki ani değişiklikler ise su yapılarında kavitasyon olayına sebep olmaktadır (Graham ve ark. 1987; Erdoğan 2016). PGP betonların aşınma dayanıklılığının PC betonlardan daha iyi olması, su yapılarında PGP betonların kullanılabileceğini ve bu üç

aşınma türüne karşı daha uzun servis ömrüne sahip beton su yapılarına imkan sağlayabileceğini göstermektedir. Geniş diskli aşınma deneyine tabi tutulan beton numuneler, Şekil 4.45.'te görülmektedir.



Şekil 4.45. Geniş diskli aşınma deneyine tabi tutulan beton numuneler

4.3.6. PGP Betonların Donma-Çözülme Performansı

Bir ayrıtı 100 mm olan küp beton numunelerin donma-çözülme dayanıklılığı, ASTM C666 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir (ASTM C666 2003). Donma-çözülme döngüleri sonrası beton numunelerde oluşan ağırlık ve dayanım kayıpları, ölçülmüştür. Donma-çözülme döngüleri sonunda beton numunelerinde kayda değer bir ağırlık kaybı, yaşanmamıştır. Donma-çözülme döngüleri sonrası beton numunelerin kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kayıpları, Çizelge 4.17.'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Beton numunelerin donma-çözülme etkisi sonrası kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı

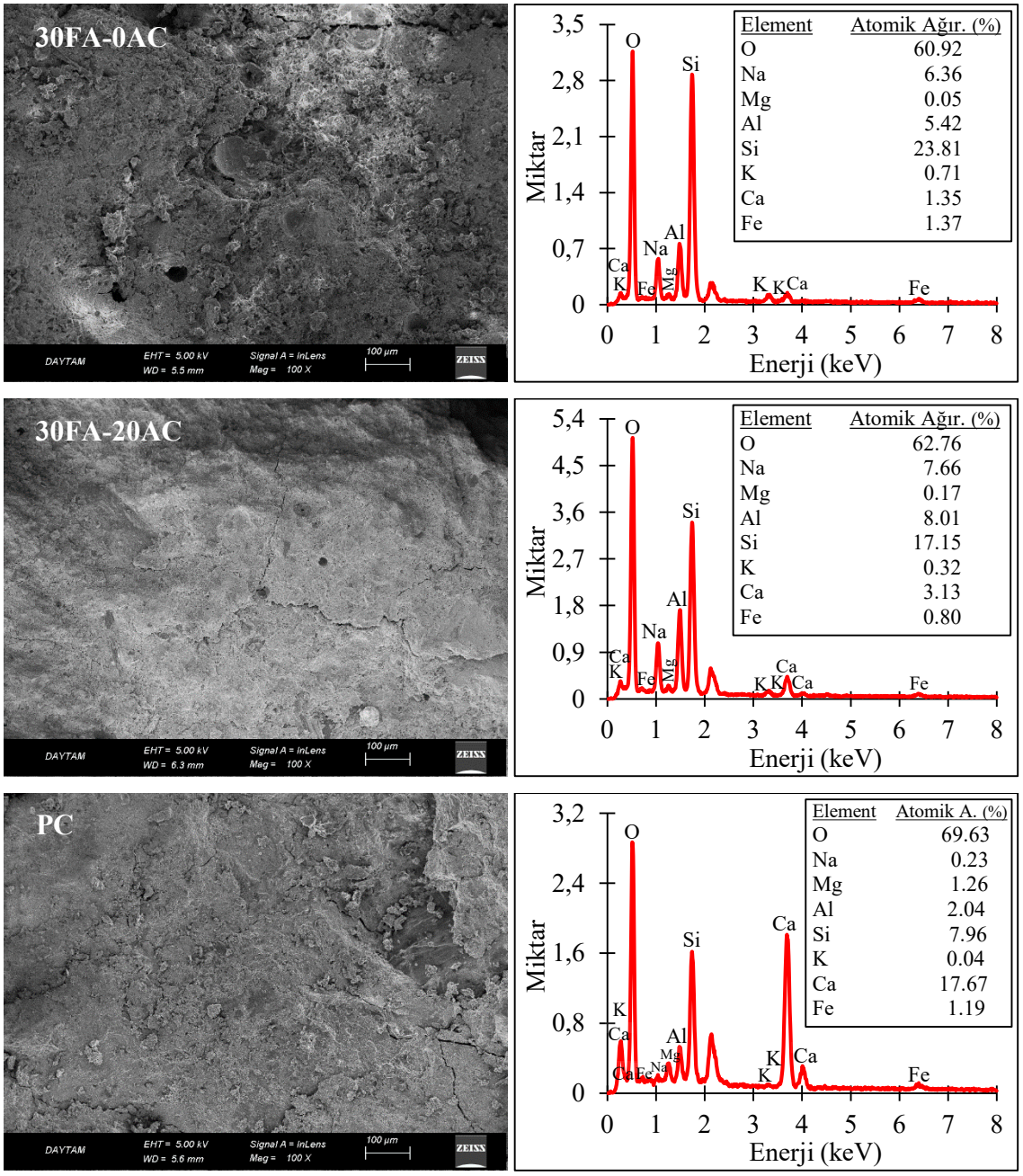
Karışım Adı	50 Döngü		100 Döngü	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Kaybı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Kaybı (%)
30FA-**0**AC	19.7	38.7	18.2	43.4
30FA-**10**AC	49.5	16.7	48.6	18.2
30FA-**20**AC	70.2	1.7	68.1	4.6
PC (Şahit Numune)	69.4	4.2	70.3	3.0

Basınç dayanımı kayıplarına bakıldığında, 30FA-0AC numunesinin, 50 ve 100 döngünün sonunda sırasıyla %38.7 ve %43.5 gibi oldukça büyük dayanım kayıpları yaşadığı görülmektedir. Burada dikkat çekici noktalardan biri, benzer orandaki dayanım kaybının, ıslanma-kuruma ve sülfürik asit gibi etkilerin sonunda da yaşanmasıdır. Daha önce ifade edildiği gibi 30FA-0AC numunesi için bu dayanım kayıplarının yaşanmasının,

donma-çözülme ve asit gibi etkilerin bir sonucu olmaktan çok sulu ortamın etkisi olabileceği kanaatini oluşturmaktadır. Örneğin, Lemougna ve ark., VK ile ürettikleri GP numuneleri 24 saat suda beklettikten sonra dayanım kayıplarının %50-89 aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir (Lemougna ve ark. 2014). Bu durum, su etkisinin, DP esaslı GP bağlayıcıların durabilitesi hakkında önemli bir fikir verebileceği göstermektedir.

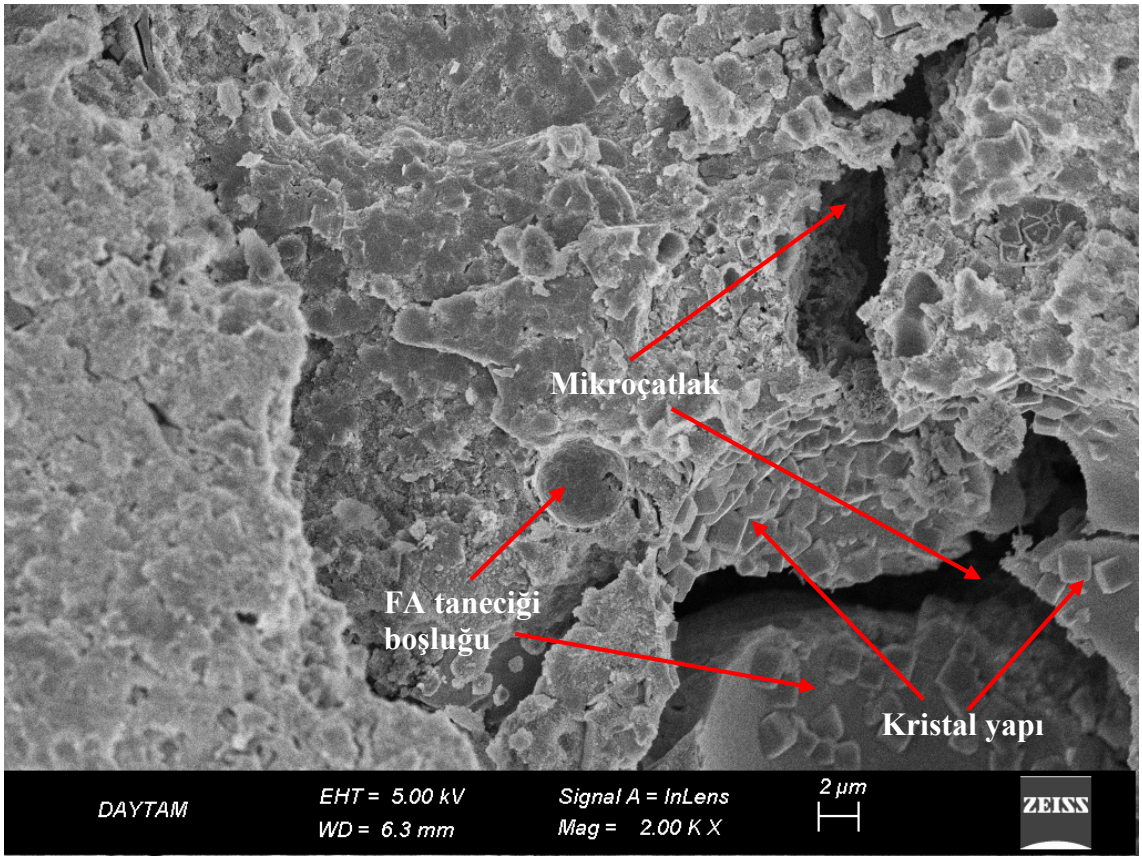
AC'nin ikame edildiği karışımlarda, yüksek reaktivitesinin etkisiyle geopolimerizasyon sürecini AC'nin kontrol ettiği düşünülmektedir. AC içeriği %10 olan 30FA-10AC numunesinin basınç dayanımı kaybı, 50 ve 100 donma-çözülme döngüleri için sırasıyla %16.7 ve 18.2 iken, AC içeriği %20 olan 30FA-20AC numunesi için bu değerler sırasıyla %1.7 ve 4.6 olmuştur. Özellikle 30FA-20AC numunesinin donma-çözülme tesirine karşı oldukça iyi bir durabiliteye sahip olduğu söylenebilir. Kalsiyum içeriği yüksek olan GP bağlayıcıların, C-S-H ve C-A-S-H jel miktarlarının fazla olup daha yoğun bir bağlayıcı hamur fazına ulaştıklarından donma-çözülme dirençlerinin daha iyi olduğu ifade edilmektedir (Zhao ve ark. 2019). Benzer bir durum bu çalışmada da görülmektedir: Kalsiyum içeriği fazla olan AC ikamesi ile PGP betonların donma-çözülme direnci artmıştır.

Beton numunelerden 100 donma-çözülme döngüsü sonrası elde edilen SEM görüntüleri ve EDX spektrumları, Şekil 4.46.'da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi donma-çözülme sonrası beton numunelerde bazı çatlaklar oluşmuştur. Beton numunelerde donma-çözülme etkisiyle oluşan dayanım kaybının önemli bir sebebinin, bu mikroçatlaklar olduğu söylenebilir. EDX spektrumlarına bakıldığında, dikkat çekici bir nokta şudur ki ıslanma-kuruma ve donma-çözülme etkisi sonrası PGP bağlayıcıların element içeriği birbirine çok yakın olmuştur. Bu durum, ıslanma-kuruma ve donma-çözülmenin, PGP bağlayıcının bağ yapısı üzerinde benzer bir etki yaptığı hakkında fikir vermektedir.



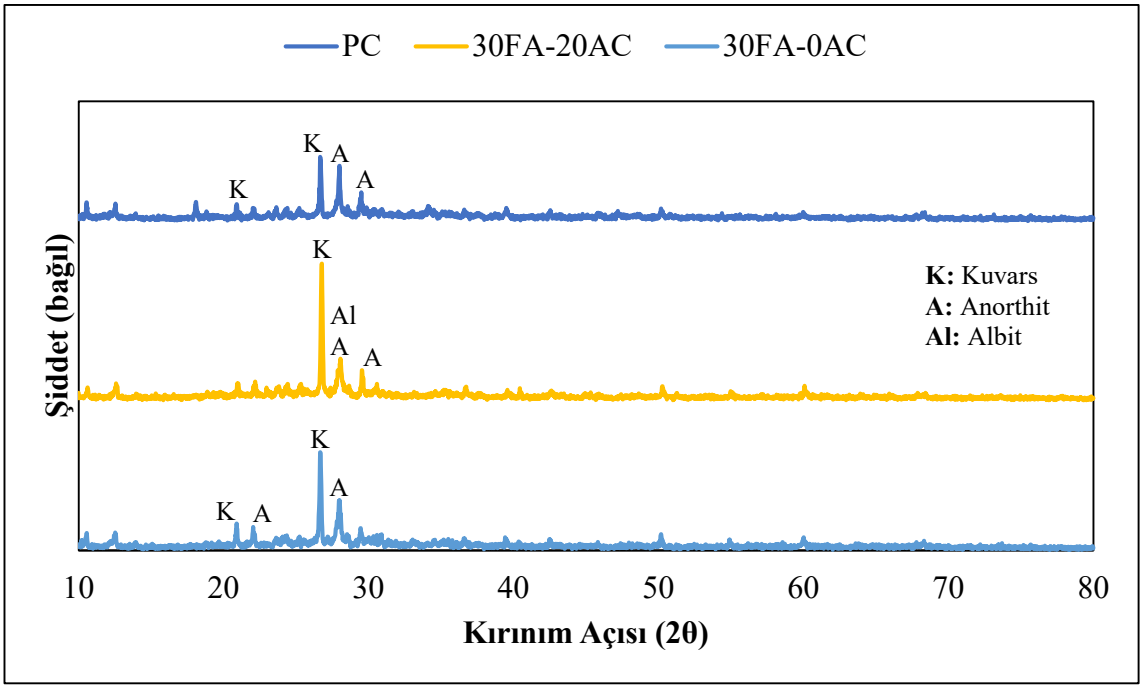
Şekil 4.46. Beton numunelerin donma-çözülme sonrası SEM görüntüleri ve EDX spektrumları

Şekil 4.47.'de, 30FA-20AC numunesinin 100 donma-çözülme döngüsü sonrası alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Bu SEM görüntüsünde, 30FA-20AC numunesinde donma-çözülme etkisiyle mikroçatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bu mikroçatlakların, sertleşmiş PGP bağlayıcı hamurun bünyesinde bulunan boşluklara dolan suyun, tekrarlı donma süreçlerinde hacim artışı yaşayarak boşluk çeperine basınç uygulaması sebebiyle oluştuğu tahmin edilmektedir. Bu görüntüde ayrıca reaksiyona giren küresel şekilli FA taneciğinin oluşturduğu boşlukta kristal yapılara rastlanmaktadır (Şekil 4.47.).



Şekil 4.47. 30FA-20AC beton numunesinin donma-çözülme sonrası SEM görüntüsü

100 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan beton numunelerin XRD analizleri, Şekil 4.48.'de sunulmuştur. EDX analizinde olduğu gibi PGP numunelerin ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngüleri sonrası XRD grafiklerinin de birbirine benzediği ifade edilebilir.



Şekil 4.48. Beton numunelerin donma-çözülme sonrası XRD analizleri

Bazı çalışmalarda, donma-çözülme dayanıklılığı açısından GP betonun PC betondan daha iyi olduğu ifade edilirken bazılarında ise tersi düşünce dile getirilmektedir (Pilehvar ve ark. 2019; Zhao ve ark. 2019). PC esaslı betonların bileşenleri ve bu bileşenlerin miktarları GP esaslı betonlara nispeten çok değişmemektedir. Bu yüzden PC ile üretilen betonların özellikleri, GP bağlayıcılarla üretilen betonlara oranla çok değişmemektedir. GP betonların özellikleri, alüminosilikat kaynağının türü ve reaktivitesi, alkali aktivatörün molaritesi, kür şartları ve su içeriği gibi faktörlerden dolayı çok değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden farklı çalışmalarda birbirinden çok farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Hatta bu çalışma için de bunu söylemek mümkündür. PGP betonların içerisinde, AC içeriği yüksek olan 30FA-20AC numunesinin donma-çözülme performansı, PC betonun donma-çözülme performansına yakın olmasına karşın, AC içermeyen 30FA-0AC numunesinin donma-çözülme dayanıklılığı, PC betona göre oldukça düşüktür.

4.3.7. PGP Betonların Basınç Altında Su İşleme Derinliği

Beton numunelerin basınç altında su işleme derinlikleri, Çizelge 4.18.'de verilmiştir. 30FA-0AC numunelerinin hepsi, deneyin başlatılmasından itibaren 1 saat içerisinde, yan yüzeylerinden su sızdırdıkları için ölçüm yapılamamıştır. Bu durum, 30FA-0AC karışımının suyun hareketini sağlayan çok fazla boşluk ve çatlaklar

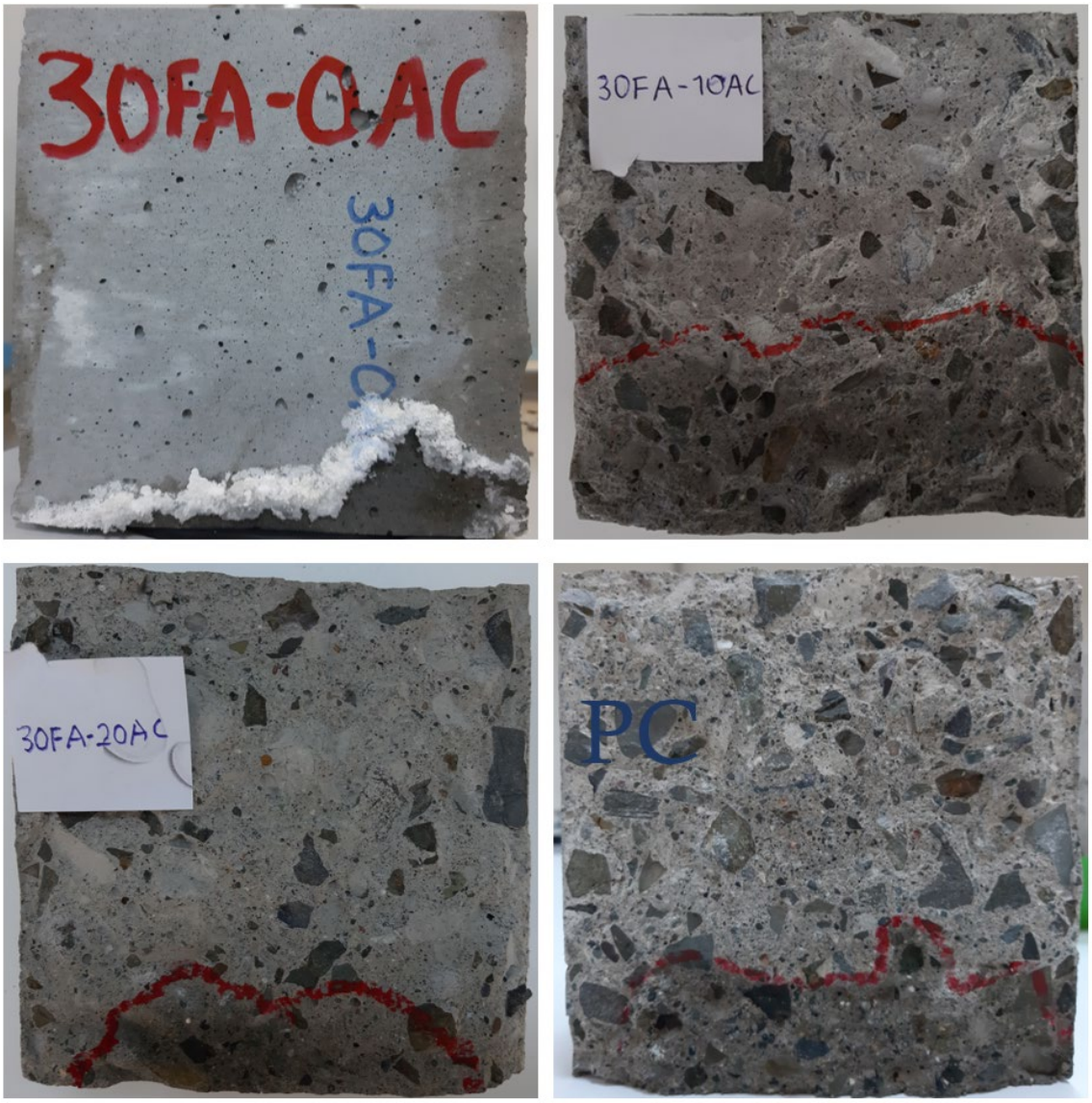
barındırdığını göstermektedir. Beton bünyesinde suyun hareketini sağlayan bu boşluk ve çatlaklar ile 30FA-0AC numunelerinin basınç dayanımlarının düşüklüğü arasında bağlantı kurulabilir. Aynı zamanda bu boşluk ve çatlaklar, asit ve GP jelindeki alkalilerin hareketini kolaylaştırdığı için 30FA-0AC numunelerinin durabilite özelliklerini de önemli oranda etkilemektedir.

Çizelge 4.18. Beton numunelerin basınç altında su işleme derinliği

Karışım Adı	Su İşleme Derinliği (mm)
30FA-**0**AC	-
30FA-**10**AC	66
30FA-**20**AC	33
PC (Şahit Numune)	40

AC içeriğinin %10'a çıkmasıyla suyun hareketi zorlaşmış ve su işleme derinliği, 66 mm olmuştur. AC içeriği %20 olan 30FA-20AC numunelerinde ise bu değer yarı yarıya inerek 33 mm olmuştur. Bu haliyle 30FA-20AC karışımına ait numunelerin basınç altında su işleme derinliği performansı, PC betondan daha iyidir. Beton numunelerinin su işleme derinlikleri, Şekil 4.49.'da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 30FA-0AC numunesi, yan yüzeylerden su sızdırdığı için ölçüm yapılamamıştır.

Su geçirimliliği, beton su yapıları için hayati bir öneme sahiptir. Su geçirgenliği fazla olan bir su yapısında, suyla beraber taşınan zararlı maddeler, betonun yıpranmasına ve su yapısının, servis ömrünü tamamlamadan hizmet vermez hale gelmesine sebep olabilmektedir. AC içermeyen PGP betonların sahip olduğu boşluk ve çatlaklar, su geçirimliliği açısından bu betonların su yapılarında kullanılmasını imkansız kılmaktadır. Ancak diğer durabilite problemlerinde olduğu gibi su geçirimliliği için de AC ikamesi ile en az PC beton kadar dayanıklı PGP beton üretilmesine, imkan sağlanmaktadır.



Şekil 4.49. Beton numunelerinin su işleme derinlikleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında su yapılarında pomza esaslı geopolimer betonların kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla PGP hamur, harç ve betonlar üretilerek taze ve sertleşmiş haldeki bazı özellikleri araştırılmıştır. PGP hamurlarla gerçekleştirilen çalışmada, kür koşulları, alkali aktivatör içeriği, mineral katkılar gibi parametrelerin PGP bağlayıcının özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. PGP harçlarla gerçekleştirilen çalışmada, PGP hamurlarla yapılan çalışmanın sonuçları dikkate alınarak FA ve AC'nin PGP harçların özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Son olarak PGP betonlar üretilerek, bu betonların su yapılarında karşılaşacağı durabilite problemlerine dayanıklılıkları araştırılmıştır. Ayrıca kür koşulları ve alkali aktivatör içeriğinin PGP hamur üzerindeki etkileri ve ıslanma-kuruma, sülfürik asit ve donma-çözülmenin PGP beton üzerindeki etkilerini gözlemlemek için XRD, FTIR, BET ve SEM-EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. SH molaritesinin artmasıyla PGP hamurların yoğunluğu artmaktadır. Ancak SS/SH oranının artmasıyla yoğunluk artışının miktarı azalmaktadır.

2. PGP hamur numunelerin basınç dayanımı, SS/SH oranının 2 olmasına kadar artmış ve bu değerin 3 olmasıyla hafif düşüş yaşamıştır.

3. Alkali aktivatör olarak yalnız SH kullanıldığında, PGP hamurlar, kabul edilebilir dayanım seviyelerine çıkmalarına rağmen su içerisinde dağılmaktadır. Ayrıca FTIR analizleri, SH'nin yanında SS'nin de AA olarak kullanılmasıyla GP matrisinde –OH'nin azaldığını, geopolimerizasyonun arttığını ve karbonatlaşmanın azaldığını göstermiştir. SEM görüntüleri, SH'nin yanında SS'nin de AA olarak kullanılması ile mikroçatlakların azaldığını ve daha yoğun bir GP matrisi oluştuğunu göstermektedir. Bütün bunlar, su yapılarında kullanılacak GPG bağlayıcılar için SH'nin yanında SS'nin de kullanımını zorunlu kılmaktadır.

4. FA katkılı PGP'lerin basınç dayanımı, 60-75 °C sıcaklıklarında, kür süresinin 7 güne kadar artmasıyla artmaya devam etmektedir. FTIR analizleri de 60 °C sıcaklıkta kür süresinin 168 saate kadar artmasıyla karbonatlaşmanın azaldığını ve geopolimerizasyonun ilerlediğini göstermektedir. Ancak 90-105 °C sıcaklıklarında, kür

süresinin belli bir değere kadar artmasıyla basınç dayanımı artmakta ve bunu üzerindeki kür sürelerinde düşmeye başlamaktadır.

5. FA katkılı PGP hamurlarda en yüksek basınç dayanımı, 82.8 MPa ile 7 gün 75 °C'de kür edilen numunelerden elde edilirken, ıslanma-kuruma etkisi sonrası en yüksek basınç dayanımı, 74.4 MPa ile 7 gün 60 °C'de kür edilen numunelerden elde edilmiştir.

6. FA katkılı PGP bağlayıcılar için oda sıcaklığında kür işlemi, dayanım ve dayanıklılık açısından yeterli olmamaktadır.

7. Klinker katkısı, PGP bağlayıcıların priz sürelerini, oda sıcaklığında önemli derece kısaltmaktadır. Alümin (Al_2O_3) ise PGP bağlayıcıların işlenebilirliğini iyileştirmektedir.

8. AC içermeyen PGP bağlayıcıların priz alması, oda sıcaklığında günler almaktadır. Sıcak kür ortamında (60 °C) ise priz başlangıç ve bitiş süresi sırasıyla 220-230 ve 257-270 dakika arası sürmektedir. Priz başlama ve bitiş süresi, %10 AC katkısı ile oda sıcaklığında sırasıyla 80 ile 195 dakika ve sıcak kür ortamında sırasıyla 65 ile 105 dakikaya kadar düşmektedir.

9. PGP çimentoları, 0.5 mm genleşme miktarı ile oldukça iyi bir hacim sabitliğine sahiptirler.

10. Sadece pomza ile hazırlanan taze haldeki PGP harçların yayılma miktarı, 104 mm ile yetersiz bir işlenebilirliğe sahip olmuştur. Ancak FA ve AC, pomzaya belli miktarlarda ikame edildiğinde PGP harçların yayılma miktarı, 119 mm yayılma değerine sahip standart harç numunesinden daha iyi olabilmektedir.

11. Oda sıcaklığında kür edilen PGP harç numunelerin yoğunlukları, 2.06 ile 2.13 g/cm^3 arasında değişirken, sıcak küre tabi olan PGP harç numunelerin yoğunlukları ise 2.03 ile 2.10 g/cm^3 arasında değişmektedir. Bu haliyle PGP harç numunelerin yoğunluğu, 2.17 g/cm^3 yoğunluk değerine sahip olan standart harç numunesinin yoğunluğundan düşüktür. PGP harç numunelerinin yoğunluğu, FA katkısı ile sürekli azalırken, AC katkısı ile bir miktar azaldıktan sonra artmaya başlamaktadır.

12. PGP harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı, %20 AC ikamesi ile 68.0 MPa değerine ulaşabilmektedir. PGP bağlayıcıların erken yüksek dayanıma ulaşması, depolama süresini kısaltacağından dolayı kanalizasyon borusu, menfez ve kanal elemanları gibi prefabrik yapı elemanlarında PGP betonların kullanımını, yararlı kılmaktadır.

13. AC ikamesi ile oda sıcaklığında kür edilen PGP harç numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değeri, 53.6 MPa değerine çıkmıştır. Bu haliyle PGP bağlayıcılar, masif yapılar ve barajlardaki betonlar gibi ilk zamanlarda yüksek bir dayanım gerektirmeyen yapılarda kullanılabilecektir.

14. PGP harç numuneler, ıslanma-kuruma etkisinden önemli derecede etkilenmektedirler. PGP harçların sulu ortamda bozulması, temelde, bazı Si-O-Si bağlarının zayıf Si-OH bağlarına dönüşmesiyle açıklanabilir. Ancak AC katkısı ile PGP harçların ıslanma-kuruma etkisiyle bozulması, önemli derecede telafi edilebilmektedir.

15. FA ve CA içeriği PGP harçların deniz suyu etkisine karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. AC içeriğine sahip olup oda sıcaklığında kür edilen PGP harçların neredeyse hepsi, deniz suyunda dayanım kazanmaya devam ederken, PC harç numuneleri, ufak da olsa bir dayanım kaybı yaşamışlardır.

16. Oda sıcaklığında kür edilmiş numunelerin hepsinde ve sıcak kür görmüş AC içermeyen numunelerde, çiçeklenmeyle karşılaşılmıştır. XRD analizleri, PGP harç numunelerde görülen çiçeklenme ürünlerinin aragonit ve sodalit olduğunu göstermiştir. GP bağlayıcılarda, reaksiyona girmeyen serbest alkalilerle ilgili olan çiçeklenme, sıcak kür ve AC içeriğiyle giderilebilmektedir.

17. PC harçlar, sülfürik asit etkisine karşı dayanıksızdırlar. PGP harçlar, asit etkisine karşı nispeten daha iyi performans göstermektedirler.

18. PGP betonların yoğunluğu 2.28 ile 2.31 kg/dm^3 arasında değişmektedir. PC betonun yoğunluğu ise 2.45 kg/dm^3 olarak ölçülmüştür. PGP betonların yoğunluğunun düşük olması, bu betonlarla üretilen prefabrik su yapılarının nakliye ve işçilik maliyetlerinde tasarruf sağlayacaktır.

19. PGP betonların bağlayıcı hamuru, genel olarak mezoboşluklara sahiptir. Ancak AC ikamesinin %10 olduğu numune, %42.09 oranında makroboşluk barındırmaktadır. Benzer şekilde PC betonu bağlayıcı hamuru, %33.61 makroboşluklara sahiptir. PC ve tüm PGP betonların adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri, IUPAC tarafından belirlenmiş 6 sınıf izoterm tipinden V. Tip izoterme benzemektedir.

20. PGP betonların 28 günlük basınç dayanımı, 70.0 MPa değerine ulaşırken, PC betonu, 58.4 MPa değerine ulaşabilmiştir.

21. AC katkısı ile PGP betonların ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımı kaybı, %1.4 gibi oldukça düşük değerlere indirilebilmektedir. FTIR analizleri, ıslanma-kuruma

etkisiyle PGP betonların bağlayıcı hamurunda, –OH ve H–O–H türü bağlar oluştuğunu göstermiştir.

22. Sülfürik asit etkisiyle PC betonların bağlayıcı hamuru çözünmekte ve beton bünyesinden yıkanarak ayrılmaktadır. 120 gün %5 sülfürik asit çözeltisi etkisinde kalan PC betonu, %16.6 ağırlık kaybı ve %72.6 dayanım kaybı yaşamıştır. AC içeriği %10 olan PGP betonu ise aynı ortamda %0.1 ağırlık kaybı ve % 31.7 dayanım kaybı yaşamıştır. PGP betonların sülfürik asit etkisine karşı performansının daha iyi olduğu ve kanalizasyon sistemi gibi sık sık sülfürik asit etkisine kalan su yapılarında PGP betonların kullanılmasının daha doğru bir tercih olacağı düşünülmektedir.

23. XRD ve SEM-EDX analizleri, sülfürik asit etkisiyle PC betonunda çözünen bağlayıcı hamurun alçıtaşına dönüştüğünü göstermiştir. Aynı zamanda bu analizler, sülfürik asit etkisiyle PGP betonun boşluklarında biriken reaksiyon ürünlerinin de alçıtaşı olduğunu göstermiştir.

24. PGP betonların aşınma dayanıklılığı, sahip olduğu dayanımdan bağımsız olarak, PC betonun aşınma dayanıklılığından daha iyidir. Su yapıları için çok önemli olan aşınma dayanıklılığı açısından PGP betonların, bu yapılarda kullanılmasıyla fayda sağlanacağı düşünülmektedir.

25. PC betonların donma-çözülme dayanıklılığının, genel anlamda PGP betonlardan daha iyi olduğu söylenebilir. Ancak %20 AC içeriğiyle PGP betonların donma-çözülme dayanıklılığının önemli ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir. PC betonu ve %20 AC içeriğine sahip PGP betonun 100 donma-çözülme döngüsü sonrası basınç dayanımı kaybı sırasıyla %4.6 ve %3.0 olmuştur.

26. FTIR analizleri, PGP betonların; ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve asit etkisi gibi sulu ortamlardan benzer şekilde etkilendiğini göstermektedir. SEM görüntüleri, hem PC hem de PGP betonlarda donma-çözülme döngülerinin sertleşmiş bağlayıcı hamurda mikroçatlaklar oluşturduğunu ve bu mikroçatlakların dayanımda düşüşlere sebep olduğunu göstermektedir.

27. AC içeriği, PGP betonun su geçirimliliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. PC betonu ve %20 AC içeriğine sahip PGP betonunun basınç altında su işleme derinlikleri, sırasıyla 40 ve 33 mm olarak ölçülmüştür. Birçok durabilite probleminin önemli bir kaynağı olan su geçirimliliğinin PGP betonda düşük olması, PGP betonların başka yıpratıcı etkilere karşı kalıcılıkları konusunda umut vermektedir.

Su yapılarında PGP betonların kullanılabileceği ve bazı durumlarda PC betonlardan daha yararlı olacağı düşünülmektedir. PGP bağlayıcılar, su yapılarında çevresel etkisi düşük, daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olabilecek potansiyele sahiptir. Gelecek çalışmalarda, PGP betonlar ile PC betonların çevresel etkilerinin karşılaştırılması, iyi bir araştırma konusu olacaktır.

Öğütülmüş pomzanın su ihtiyacının çok olmasından dolayı PGP bağlayıcıların işlenebilirliği problem olarak ortada durmaktadır. GP bağlayıcılara uygun su azaltıcı katkı maddelerinin araştırılması ve üretilmesi önem arz etmektedir.

6. KAYNAKLAR

ACI-211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Committee, United States, 2002.

Ahmari S, Zhang L, 2013. Durability and Leaching Behavior of Mine Tailings-Based Geopolymer Bricks. ***Construction and Building Materials***, 44743-750.

Aiken TA, Kwasny J, Sha W, Soutsos MN, 2018. Effect of Slag Content and Activator Dosage on the Resistance of Fly Ash Geopolymer Binders to Sulfuric Acid Attack. ***Cement and concrete research***, 11123-40.

Akman MS, 2003. Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi. ***Türkiye Mühendislik Haberleri***, 2003(4): 30-36.

Aküzüm T, Öztürk F, 1996. Topraksu Yapıları. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi. Yayın (1448).

Al-Mashhadani MM, Canpolat O, Aygörmez Y, Uysal M, Erdem S, 2018. Mechanical and Microstructural Characterization of Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer Composites. ***Construction and Building Materials***, 167505-513.

Alahverdi A, Mehrpour K, Najafikani E, 2008. Taftan Pozzolan-Based Geopolymer Cement.

Albitar M, Ali MM, Visintin P, Drechsler M, 2017. Durability Evaluation of Geopolymer and Conventional Concretes. ***Construction and Building Materials***, 136374-385.

Allahverdi A, Mehrpour K, Kani EN, 2008. Investigating the Possibility of Utilizing Pumice-Type Natural Pozzonal in Production of Geopolymer Cement. ***Ceramics Silikaty***, 52(1): 16.

Allouche E, Montes C 2013. "Geopolymer Mortar and Method." In.: Google Patents.

Almalkawi AT, Hamadna S, Soroushian P, 2017. One-Part Alkali Activated Cement Based Volcanic Pumice. ***Construction and Building Materials***, 152367-374.

Ariffin M, Bhutta M, Hussin M, Tahir MM, Aziah N, 2013. Sulfuric Acid Resistance of Blended Ash Geopolymer Concrete. ***Construction and Building Materials***, 4380-86.

Assis G, Parr C, Fryda H, Auvray J-M 2009. "The Impact of Different Additive Systems Upon the Properties of a High Purity Low Cement Castable." In *Refractories World Forum*, 58-62.

ASTM-C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM-C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

Atiş C, Görür E, Karahan O, Bilim C, İlkentapar S, Luga E, 2015. Very High Strength (120 Mpa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different Naoh Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration. ***Construction and Building Materials***, 96673-678.

Baco S, Arshad SE, Salleh S, Alias A, Yassin FM, 2015. Preparation and Characterization of Carbon Nanofibers/Metakaolin Geopolymer Based Nanocomposite. ***International Journal of Science Environment and Technology***, 4474-481.

Bakharev T, 2005. Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. ***Cement and concrete research***, 35(4): 658-670.

Balczár I, Korim T, Kovács A, Makó É, 2016. Mechanochemical and Thermal Activation of Kaolin for Manufacturing Geopolymer Mortars–Comparative Study. ***Ceramics International***, 42(14): 15367-15375.

Balun B, Karataş M, 2021. Influence of Curing Conditions on Pumice-Based Alkali Activated Composites Incorporating Portland Cement. ***Journal of Building Engineering***102605.

Baradan B, Yazici H, Ün H, 2010. Beton Ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). ***Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları***, İstanbul.

Barbosa VF, MacKenzie KJ, Thaumaturgo C, 2000. Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers. ***International journal of inorganic materials***, 2(4): 309-317.

Barsoum M, Ganguly A, Hug G, 2006. Microstructural Evidence of Reconstituted Limestone Blocks in the Great Pyramids of Egypt. ***Journal of the American Ceramic Society***, 89(12): 3788-3796.

Bernal SA, 2016. Microstructural Changes Induced by Co2 Exposure in Alkali-Activated Slag/Metakaolin Pastes. ***Frontiers in Materials***, 343.

Blanc P, Lach A, Lassin A, Falah M, Obenaus-Emler R, Guignot S, 2020. Modeling Hydration of Mine Tailings: Production of Hydraulic Binders from Alkali-Activated Materials. ***Cement and concrete research***, 137106216.

Bondar D, Lynsdale C, Milestone N, Hassani N, Ramezanianpour A, 2011a. Effect of Adding Mineral Additives to Alkali-Activated Natural Pozzolan Paste. ***Construction and Building Materials***, 25(6): 2906-2910.

Bondar D, Lynsdale C, Milestone N, Hassani N, Ramezanianpour A, 2011b. Effect of Heat Treatment on Reactivity-Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans. ***Construction and Building Materials***, 25(10): 4065-4071.

Bondar D, Lynsdale C, Milestone NB, Hassani N, Ramezanianpour AA, 2011c. Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans. ***Cement and concrete composites***, 33(2): 251-260.

Boonserm K, Sata V, Pimraksa K, Chindaprasirt P, 2012. Improved Geopolymerization of Bottom Ash by Incorporating Fly Ash and Using Waste Gypsum as Additive. ***Cement and concrete composites***, 34(7): 819-824.

Buchwald A, Vanooteghem M, Gruyaert E, Hilbig H, De Belie N, 2015. Purdocement: Application of Alkali-Activated Slag Cement in Belgium in the 1950s. ***Materials and Structures***, 48(1): 501-511.

Cao Y-F, Tao Z, Pan Z, Wuhrer R, 2018. Effect of Calcium Aluminate Cement on Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. ***Construction and Building Materials***, 191242-252.

Chang S-S, Clair B, Ruelle J, Beauchêne J, Di Renzo F, Quignard F, Zhao G-J, Yamamoto H, Gril J, 2009. Mesoporosity as a New Parameter for Understanding Tension Stress Generation in Trees. ***Journal of Experimental Botany***, 60(11): 3023-3030.

Cheng T-W, Chiu J, 2003. Fire-Resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag. ***Minerals engineering***, 16(3): 205-210.

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.

Criado M, Jiménez AF, Sobrados I, Palomo A, Sanz J, 2012. Effect of Relative Humidity on the Reaction Products of Alkali Activated Fly Ash. ***Journal of the European Ceramic Society***, 32(11): 2799-2807.

Criado M, Palomo A, Fernández-Jiménez A, 2005. Alkali Activation of Fly Ashes. Part 1: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products. ***Fuel***, 84(16): 2048-2054.

Davidovits J 1984. "Synthetic Mineral Polymer Compound of the Silicoaluminates Family and Preparation Process." In.: Google Patents.

Davidovits J, 1987. Ancient and Modern Concretes: What Is the Real Difference? ***Concrete International***, 9(12): 23-28.

Davidovits J 1994. "Properties of Geopolymer Cements." In *First international conference on alkaline cements and concretes*, 131-149. Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on ….

Davidovits J, 2002. Personal Communication on the Process of Making of Geopolymer Concrete.

Davidovits J 2008. Geopolymer Chemistry and Applications (Geopolymer Institute).

Davidovits J, 2015. Geopolymer Chemistry and Applications. 4-Th Edition. J. Davidovits.–Saint-Quentin, France.

Davidovits J, 2017. Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers. ***J. Ceram. Sci. Technol***, 8(3): 335-350.

Disu AA, Kolay PK, 2021. A Critical Appraisal of Soil Stabilization Using Geopolymers: The Past, Present and Future. ***International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering***, 7(2): 1-16.

Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2016a. Mechanical Activation of Volcanic Ash for Geopolymer Synthesis: Effect on Reaction Kinetics, Gel Characteristics, Physical and Mechanical Properties. ***RSC advances***, 6(45): 39106-39117.

Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2016b. Mechanical Properties and Durability of Volcanic Ash Based Geopolymer Mortars. ***Construction and Building Materials***, 124606-614.

Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2016c. Reactivity of Volcanic Ash in Alkaline Medium, Microstructural and Strength Characteristics of Resulting Geopolymers under Different Synthesis Conditions. ***Journal of materials science***, 51(22): 10301-10317.

Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2017. Volcanic Ash-Based Geopolymer Cements/Concretes: The Current State of the Art and Perspectives. ***Environmental Science and Pollution Research***, 24(5): 4433-4446.

Djobo Y, Elimbi A, Manga JD, Ndjock IDL, 2016. Partial Replacement of Volcanic Ash by Bauxite and Calcined Oyster Shell in the Synthesis of Volcanic Ash-Based Geopolymers. ***Construction and Building Materials***, 113673-681.

Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS, 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art. ***Journal of materials science***, 42(9): 2917-2933.

Duxson P, Provis JL, Lukey GC, Mallicoat SW, Kriven WM, Van Deventer JS, 2005. Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and

Mechanical Properties. ***Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects***, 269(1-3): 47-58.

Erdogan S, 2015. Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars. ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 27(7): 04014210.

Erdoğan ST, Erdoğan TY 2007a. Bağlayıcı Malzemelerin Ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.

Erdoğan ST, Erdoğan TY, 2007b. Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara, 263-275.

Erdoğan ST, Erdoğan TY, 2010. Portland Çimentosunun Joseph Aspdin Tarafından İcadı Ve Çimento Üretiminde Aspdin Ailesinin Rolü.

Erdoğan ST, Erdoğan TY 2020. Basic Materials of Construction. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.

Erdoğan TY 2016. Beton (METU Press, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.: Ankara).

Firdous R, Stephan D, Djobo JNY, 2018. Natural Pozzolan Based Geopolymers: A Review on Mechanical, Microstructural and Durability Characteristics. ***Construction and Building Materials***, 1901251-1263.

Garcia-Lodeiro I, Palomo A, Fernández-Jiménez A 2015. 'Crucial Insights on the Mix Design of Alkali-Activated Cement-Based Binders.' in, Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes (Elsevier).

Glukhovsky V, 1959. Soil Silicates (Gruntosilikaty). ***USSR Kiev: Budivelnik Publisher***.

Görhan G, Kürklü G, 2014. The Influence of the Naoh Solution on the Properties of the Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures. ***Composites part b: engineering***, 58371-377.

Graham JR, Creegan PJ, Hamilton WS, Hendrickson JG, Kaden RA, McDonald JE, Glen EN, Schrader EK, 1987. Erosion of Concrete in Hydraulic Structures. ***ACI Materials Journal***, 84(2): 136-156.

Guo X, Shi H, Dick WA, 2010. Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. ***Cement and concrete composites***, 32(2): 142-147.

Haddad RH, Alshbuol O, 2016. Production of Geopolymer Concrete Using Natural Pozzolan: A Parametric Study. ***Construction and Building Materials***, 114699-707.

Hamidi RM, Man Z, Azizli KA, 2016. Concentration of Naoh and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. ***Procedia Engineering***, 148189-193.

Hardjito D 2005. 'Studies of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete', Curtin University.

Hardjito D, Cheak CC, Ing CHL, 2008. Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. ***Modern applied science***, 2(4): 3-11.

Hardjito D, Rangan BV, 2005. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.

Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DM, Rangan BV, 2004. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ***Materials Journal***, 101(6): 467-472.

Heah CY, Kamarudin H, Al Bakri AM, Binhussain M, Luqman M, Nizar IK, Ruzaidi C, Liew Y, 2011. Effect of Curing Profile on Kaolin-Based Geopolymers. ***Physics Procedia***, 22305-311.

Hu S, Wang H, Zhang G, Ding Q, 2008. Bonding and Abrasion Resistance of Geopolymeric Repair Material Made with Steel Slag. ***Cement and concrete composites***, 30(3): 239-244.

Jansson H, Bernin D, Ramser K, 2015. Silicate Species of Water Glass and Insights for Alkali-Activated Green Cement. ***Aip Advances***, 5(6): 067167.

Jiang X, Xiao R, Zhang M, Hu W, Bai Y, Huang B, 2020. A Laboratory Investigation of Steel to Fly Ash-Based Geopolymer Paste Bonding Behavior after Exposure to Elevated Temperatures. ***Construction and Building Materials***, 254119267.

Jindal BB, 2019. Investigations on the Properties of Geopolymer Mortar and Concrete with Mineral Admixtures: A Review. ***Construction and Building Materials***, 227116644.

Kani EN, Allahverdi A, 2009a. Effect of Chemical Composition on Basic Engineering Properties of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan. ***Ceramics-Silikaty***, 53(3): 195-204.

Kani EN, Allahverdi A, 2009b. Effects of Curing Time and Temperature on Strength Development of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan. ***Journal of materials science***, 44(12): 3088–3097.

Kani EN, Allahverdi A, Provis JL, 2012. Efflorescence Control in Geopolymer Binders Based on Natural Pozzolan. ***Cement and concrete composites***, 34(1): 25-33.

Kantarcı 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.

Kantarcı F, Türkmen İ, Ekinci E, 2019. Optimization of Production Parameters of Geopolymer Mortar and Concrete: A Comprehensive Experimental Study. ***Construction and Building Materials***, 228116770.

Kaze CR, Lemougna PN, Alomayri T, Assaedi H, Adesina A, Das SK, Lecomte-Nana G-L, Kamseu E, Melo UC, Leonelli C, 2021. Characterization and Performance Evaluation of Laterite Based Geopolymer Binder Cured at Different Temperatures. ***Construction and Building Materials***, 270121443.

Kong DL, Sanjayan JG, 2010. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete. ***Cement and concrete research***, 40(2): 334-339.

Kouamo HT, Elimbi A, Mbey J, Sabouang CN, Njopwouo D, 2012. The Effect of Adding Alumina-Oxide to Metakaolin and Volcanic Ash on Geopolymer Products: A Comparative Study. ***Construction and Building Materials***, 35960-969.

Kouamo HT, Mbey J, Elimbi A, Diffo BK, Njopwouo D, 2013. Synthesis of Volcanic Ash-Based Geopolymer Mortars by Fusion Method: Effects of Adding Metakaolin to Fused Volcanic Ash. ***Ceramics International***, 39(2): 1613-1621.

Kovalchuk G, Fernández-Jiménez A, Palomo A, 2007. Alkali-Activated Fly Ash: Effect of Thermal Curing Conditions on Mechanical and Microstructural Development–Part Ii. ***Fuel***, 86(3): 315-322.

Król M, Minkiewicz J, Mozgawa W, 2016. Ir Spectroscopy Studies of Zeolites in Geopolymeric Materials Derived from Kaolinite. ***Journal of Molecular Structure***, 1126200-206.

Kuenzel C, Ranjbar N, 2019. Dissolution Mechanism of Fly Ash to Quantify the Reactive Aluminosilicates in Geopolymerisation. ***Resources, Conservation and Recycling***, 150104421.

Kuri JC, Khan MNN, Sarker PK, 2021. Fresh and Hardened Properties of Geopolymer Binder Using Ground High Magnesium Ferronickel Slag with Fly Ash. ***Construction and Building Materials***, 272121877.

Lau CK, Lee H, Vimonsatit V, Huen WY, Chindaprasirt P, 2019. Abrasion Resistance Behaviour of Fly Ash Based Geopolymer Using Nanoindentation and Artificial Neural Network. ***Construction and Building Materials***, 212635-644.

Lee N, Khalid HR, Lee H-K, 2016. Synthesis of Mesoporous Geopolymers Containing Zeolite Phases by a Hydrothermal Treatment. ***Microporous and Mesoporous Materials***, 22922-30.

Lemougna PN, Melo UC, Delplancke M-P, Rahier H, 2013. Influence of the Activating Solution Composition on the Stability and Thermo-Mechanical Properties of Inorganic Polymers (Geopolymers) from Volcanic Ash. ***Construction and Building Materials***, 48278-286.

Lemougna PN, Melo UC, Delplancke M-P, Rahier H, 2014. Influence of the Chemical and Mineralogical Composition on the Reactivity of Volcanic Ashes During Alkali Activation. ***Ceramics International***, 40(1): 811-820.

Leong HY, Ong DEL, Sanjayan JG, Nazari A, 2016. The Effect of Different Na2o and K2o Ratios of Alkali Activator on Compressive Strength of Fly Ash Based-Geopolymer. ***Construction and Building Materials***, 106500-511.

Li C, Sun H, Li L, 2010. A Review: The Comparison between Alkali-Activated Slag (Si+ Ca) and Metakaolin (Si+ Al) Cements. ***Cement and concrete research***, 40(9): 1341-1349.

Li Q, Xu H, Li F, Li P, Shen L, Zhai J, 2012. Synthesis of Geopolymer Composites from Blends of Cfbc Fly and Bottom Ashes. ***Fuel***, 97366-372.

Lizcano M, Kim HS, Basu S, Radovic M, 2012. Mechanical Properties of Sodium and Potassium Activated Metakaolin-Based Geopolymers. ***Journal of materials science***, 47(6): 2607-2616.

Luhar S, Khandelwal U, 2015. A Study on Water Absorption and Sorptivity of Geopolymer Concrete. ***SSRG Int. J. Civil Eng***, 2(8): 1-10.

Luhar S, Luhar I, 2020. Application of Seawater and Sea Sand to Develop Geopolymer Composites. ***Int. J. Recent Technol. Eng***, 8.

Malhotra V, 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. ***Concrete International***, 24(7).

Mehta A, Siddique R, 2016. An Overview of Geopolymers Derived from Industrial by-Products. ***Construction and Building Materials***, 127183-198.

Mehta A, Siddique R, 2017. Sulfuric Acid Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. ***Construction and Building Materials***, 146136-143.

Mehta PK, 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. ***Concrete International***, 24(7): 23-28.

Mehta PK, Monteiro PJ 2014. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (McGraw-Hill Education).

Menéndez E, Vega L, 2010. Analysis of the Behaviour of the Structural Concrete after the Fire at the Windsor Building in Madrid. ***Fire and Materials: An International Journal***, 34(2): 95-107.

Mijarsh M, Johari MM, Ahmad ZA, 2015. Compressive Strength of Treated Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar Containing Calcium Hydroxide, Aluminum Hydroxide and Silica Fume as Mineral Additives. ***Cement and concrete composites***, 6065-81.

Mindess S, Young F, Darwin D, 2003. Concrete 2nd Editio. ***Technical Documents***.

Mo B-h, Zhu H, Cui X-m, He Y, Gong S-y, 2014. Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-Based Geopolymers. ***Applied clay science***, 99144-148.

Mobasheri F, Javid AAS, Mirvalad S, Azizi S, Mowlaei R, 2021. Durability and Mechanical Properties of Pumice-Based Geopolymers: A Sustainable Material for Future. ***Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering***1-13.

Moon J, Bae S, Celik K, Yoon S, Kim K-H, Kim KS, Monteiro PJ, 2014. Characterization of Natural Pozzolan-Based Geopolymeric Binders. ***Cement and concrete composites***, 5397-104.

Morsy M, Alsayed S, Al-Salloum Y, Almusallam T, 2014. Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder. ***Arabian Journal for science and engineering***, 39(6): 4333-4339.

Mostavi E, Asadi S, Hassan MM, Alansari M, 2015. Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 27(12): 04015035.

Muñiz-Villarreal M, Manzano-Ramírez A, Sampieri-Bulbarela S, Gasca-Tirado JR, Reyes-Araiza JL, Rubio-Ávalos JC, Pérez-Bueno J, Apatiga L, Zaldivar-Cadena A, Amigó-Borrás V, 2011. The Effect of Temperature on the Geopolymerization Process of a Metakaolin-Based Geopolymer. ***Materials Letters***, 65(6): 995-998.

Nadoushan MJ, Ramezanianpour AA, 2016. The Effect of Type and Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag-Based Geopolymers. ***Construction and Building Materials***, 111337-347.

Nath P, Sarker PK, 2014. Effect of Ggbfs on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. ***Construction and Building Materials***, 66163-171.

Ndjock BDL, Elimbi A, Cyr M, 2017. Rational Utilization of Volcanic Ashes Based on Factors Affecting Their Alkaline Activation. ***Journal of Non-Crystalline Solids***, 46331-39.

Nematollahi B, Sanjayan J, 2014. Effect of Different Superplasticizers and Activator Combinations on Workability and Strength of Fly Ash Based Geopolymer. ***Materials & Design***, 57667-672.

Neville AM 1995. Properties of Concrete (Longman London).

North MR, Swaddle TW, 2000. Kinetics of Silicate Exchange in Alkaline Aluminosilicate Solutions. ***Inorganic chemistry***, 39(12): 2661-2665.

Nurruddin MF, Sani H, Mohammed BS, Shaaban I, 2018. Methods of Curing Geopolymer Concrete: A Review. ***International Journal of Advanced and Applied Sciences***, 5(1): 31-36.

Occhipinti R, Stroscio A, Finocchiaro C, Fugazzotto M, Leonelli C, Faro MJL, Megna B, Barone G, Mazzoleni P, 2020. Alkali Activated Materials Using Pumice from the Aeolian Islands (Sicily, Italy) and Their Potentiality for Cultural Heritage Applications: Preliminary Study. ***Construction and Building Materials***, 259120391.

Ouda AS, Gharieb M, 2021. Behavior of Alkali-Activated Pozzocrete-Fly Ash Paste Modified with Ceramic Tile Waste against Elevated Temperatures and Seawater Attacks. ***Construction and Building Materials***, 285122866.

Özodabaş A, Yılmaz K, 2013. Improvement of the Performance of Alkali Activated Blast Furnace Slag Mortars with Very Finely Ground Pumice. ***Construction and Building Materials***, 4826-34.

Palomo Á, Alonso S, Fernandez-Jiménez A, Sobrados I, Sanz J, 2004. Alkaline Activation of Fly Ashes: Nmr Study of the Reaction Products. ***Journal of the American Ceramic Society***, 87(6): 1141-1145.

Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo M, Puertas F, Vazquez T, Grutzeck M, 1999. Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin. ***Cement and concrete research***, 29(7): 997-1004.

Palomo Á, Fernández-Jiménez A, López-Hombrados C, Lleyda JL, 2011. Railway Sleepers Made of Alkali Activated Fly Ash Concrete. ***Revista Ingeniería de Construcción***, 22(2): 75-80.

Palomo A, Grutzeck M, Blanco M, 1999. Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. ***Cement and concrete research***, 29(8): 1323-1329.

Panagiotopoulou C, Tsivilis S, Kakali G, 2015. Application of the Taguchi Approach for the Composition Optimization of Alkali Activated Fly Ash Binders. ***Construction and Building Materials***, 9117-22.

Petrus HTBM, Adelizar AS, Widiyatmoko A, Olvianas M, Suprapta W, Perdana I, Prasetya A, Astuti W 2019. "Kinetics of Fly Ash Geopolymerization Using Semi Quantitative Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (Ftir); Corr Data." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012001. IOP Publishing.

Phoo-ngernkham T, Maegawa A, Mishima N, Hatanaka S, Chindaprasirt P, 2015. Effects of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Compressive and Shear Bond Strengths of Fa–Gbfs Geopolymer. ***Construction and Building Materials***, 911-8.

Pilehvar S, Szczotok AM, Rodríguez JF, Valentini L, Lanzón M, Pamies R, Kjøniksen A-L, 2019. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Mechanical Behavior of Geopolymer Concrete and Portland Cement Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials. ***Construction and Building Materials***, 20094-103.

Provis JL, 2018. Alkali-Activated Materials. ***Cement and concrete research***, 11440-48.

Provis JL, Van Deventer JSJ 2009. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications (Elsevier).

Puertas F, Amat T, Fernández-Jiménez A, Vázquez T, 2003. Mechanical and Durable Behaviour of Alkaline Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibres. ***Cement and concrete research***, 33(12): 2031-2036.

Puertas F, Martínez-Ramírez S, Alonso S, Vazquez T, 2000. Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products. ***Cement and concrete research***, 30(10): 1625-1632.

Ramujee K, Potharaju M, 2014. Abrasion Resistance of Geopolymer Composites. ***Procedia materials science***, 61961-1966.

Rattanasak U, Chindaprasirt P, 2009. Influence of Naoh Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. ***Minerals engineering***, 22(12): 1073-1078.

Risdanareni P, Karjanto A, Ekaputri JJ, Puspitasari P, Khakim F 2016. "Mechanical Properties of Volcanic Ash Based Geopolymer Concrete." In *Materials Science Forum*, 377-381. Trans Tech Publ.

Robayo-Salazar RA, de Gutiérrez RM, Puertas F, 2016. Effect of Metakaolin on Natural Volcanic Pozzolan-Based Geopolymer Cement. ***Applied clay science***, 132491-497.

Robayo R, De Gutiérrez RM, Gordillo M, 2016. Natural Pozzolan-and Granulated Blast Furnace Slag-Based Binary Geopolymers. ***Materiales de Construcción***, 66(321): 077.

Rovnaník P, 2010. Effect of Curing Temperature on the Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer. ***Construction and Building Materials***, 24(7): 1176-1183.

Roy DM, 1999. Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges. ***Cement and concrete research***, 29(2): 249-254.

Ruiz-Santaquiteria C, Skibsted J, Fernández-Jiménez A, Palomo A, 2012. Alkaline Solution/Binder Ratio as a Determining Factor in the Alkaline Activation of Aluminosilicates. ***Cement and concrete research***, 42(9): 1242-1251.

Safari Z, Kurda R, Al-Hadad B, Mahmood F, Tapan M, 2020. Mechanical Characteristics of Pumice-Based Geopolymer Paste. ***Resources, Conservation and Recycling***, 162105055.

Sarıdemir M, Bulut M, 2021. Effects of Ground Basaltic Pumice and High Temperatures on the Properties of Hsms. ***Journal of Building Engineering***102772.

Shi C, Roy D, Krivenko P 2003. Alkali-Activated Cements and Concretes (CRC press).

Sing KS, 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984). ***Pure and applied chemistry***, 57(4): 603-619.

Singh B, Ishwarya G, Gupta M, Bhattacharyya S, 2015. Geopolymer Concrete: A Review of Some Recent Developments. ***Construction and Building Materials***, 8578-90.

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.

Slavik R, Bednarik V, Vondruska M, Nemec A, 2008. Preparation of Geopolymer from Fluidized Bed Combustion Bottom Ash. ***Journal of materials processing technology***, 200(1-3): 265-270.

Snellings R, Mertens G, Elsen J, 2012. Supplementary Cementitious Materials. ***Reviews in Mineralogy and Geochemistry***, 74(1)211-278.

Syahyadi R, Fauzi A, Mahyar H 2020. "Characterization of Geopolymer Binder Using Sidoarjo Mud." In *Solid State Phenomena*, 91-96. Trans Tech Publ.

Takeda H, Hashimoto S, Kanie H, Honda S, Iwamoto Y, 2014. Fabrication and Characterization of Hardened Bodies from Japanese Volcanic Ash Using Geopolymerization. ***Ceramics International***, 40(3): 4071-4076.

Tchakoute H, Elimbi A, Yanne E, Djangang C, 2013. Utilization of Volcanic Ashes for the Production of Geopolymers Cured at Ambient Temperature. ***Cement and concrete composites***, 3875-81.

Teixeira-Pinto A, Fernandes P, Jalali S 2002. "Geopolymer Manufacture and Application-Main Problems When Using Concrete Technology." In *Geopolymers 2002 International Conference, Melbourne, Australia, Siloxo Pty. Ltd*.

Temuujin J, Williams R, Van Riessen A, 2009. Effect of Mechanical Activation of Fly Ash on the Properties of Geopolymer Cured at Ambient Temperature. ***Journal of materials processing technology***, 209(12-13): 5276-5280.

Temuujin Jv, Van Riessen A, 2009. Effect of Fly Ash Preliminary Calcination on the Properties of Geopolymer. ***Journal of hazardous materials***, 164(2-3): 634-639.

Temuujin Jv, Van Riessen A, Williams R, 2009. Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes. ***Journal of hazardous materials***, 167(1-3): 82-88.

Top S, Vapur H, 2018. Effect of Basaltic Pumice Aggregate Addition on the Material Properties of Fly Ash Based Lightweight Geopolymer Concrete. ***Journal of Molecular Structure***, 116310-17.

TS-802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları (Design of Concrete Mixes), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016.

TS-EN-196-1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini (Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.

TS-EN-196-3, Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz Süresi Ve Hacim Genleşme Tayini (Methods of Testing Cement-Part 3: Determination of Setting Time and Soundness), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2010.

TS-EN-197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri (Cement- Part 1: Compositions and Conformity Criteria for Common Cements), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

TS-EN-1015-3, Kagir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası Ile) (Methods of Test for Mortar for Masonry- Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

TS-EN-1339, Zemin Döşemesi Için Beton Kaplama Plâkları – Gerekler Ve Deney Metotları (Concrete Paving Flags – Requirements and Test Methods), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.

TS-EN-12390-2, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerininin Yapımı ve Küre Tâbi Tutulması (Testing Hardened Concrete - Part 2: Making and Curing Specimens for Strength Tests), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

TS-EN-12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini (Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.

TS-EN-12390-6, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini (Testing Hardened Concrete - Part 6: Tensile Splitting Strength Fo Test Specimens), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

TS-EN-12390-8, Basınç Altında Su Işleme Derinliğinin Tayini (Depth of Penetration of Water under Pressure), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

TÜRKÇİMENTO 2021. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Accessed 12.06.2021. https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/aylik-veriler.

Vafaei M, Allahverdi A, 2016. Influence of Calcium Aluminate Cement on Geopolymerization of Natural Pozzolan. ***Construction and Building Materials***, 114290-296.

Vafaei M, Allahverdi A, 2017. High Strength Geopolymer Binder Based on Waste-Glass Powder. ***Advanced Powder Technology***, 28(1): 215-222.

Vafaei M, Allahverdi A, 2018. Acid-Resistant Geopolymer Based on Fly Ash–Calcium Aluminate Cement. ***Journal of Materials in Civil Engineering***, 30(7): 04018143.

Vafaei M, Allahverdi A, Dong P, Bassim N, 2018. Acid Attack on Geopolymer Cement Mortar Based on Waste-Glass Powder and Calcium Aluminate Cement at Mild Concentration. ***Construction and Building Materials***, 193363-372.

Van Jaarsveld J, Van Deventer J, 1999. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. ***Industrial & engineering chemistry research***, 38(10): 3932-3941.

Van Jaarsveld J, Van Deventer J, Lorenzen L, 1998. Factors Affecting the Immobilization of Metals in Geopolymerized Flyash. ***Metallurgical and materials transactions B***, 29(1): 283-291.

Van Jaarsveld J, Van Deventer JS, Lukey G, 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.

Vaou V, Panias D, 2010. Thermal Insulating Foamy Geopolymers from Perlite. ***Minerals engineering***, 23(14): 1146-1151.

Villa C, Pecina ET, Torres R, Gómez L, 2010. Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite. ***Construction and Building Materials***, 24(11): 2084-2090.

Vora PR, Dave UV, 2013. Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete. ***Procedia Engineering***, 51210-219.

Werling N, Dehn F, Krause F, Steudel A, Schuhmann R, Emmerich K, 2020. Solubility of Precursors and Carbonation of Waterglass-Free Geopolymers. ***Clays and Clay Minerals***, 68(5): 524-531.

Wilde RE 2004. "Aci: A Century of Progress." In.: Supplament to Concrete International.

Wongsa A, Sata V, Nuaklong P, Chindaprasirt P, 2018. Use of Crushed Clay Brick and Pumice Aggregates in Lightweight Geopolymer Concrete. ***Construction and Building Materials***, 1881025-1034.

Wu Z, Li J, Gu C, Su H, 2007. Review on Hidden Trouble Detection and Health Diagnosis of Hydraulic Concrete Structures. ***Science in China Series E: Technological Sciences***, 50(1): 34-50.

Xu H, Van Deventer J, 2000. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. ***International journal of mineral processing***, 59(3): 247-266.

Xu H, Van Deventer JS, 2002. Geopolymerisation of Multiple Minerals. ***Minerals engineering***, 15(12): 1131-1139.

Yadollahi MM, Benli A, Demirboğa R, 2015. The Effects of Silica Modulus and Aging on Compressive Strength of Pumice-Based Geopolymer Composites. ***Construction and Building Materials***, 94767-774.

Yan B, Duan P, Ren D, 2017. Mechanical Strength, Surface Abrasion Resistance and Microstructure of Fly Ash-Metakaolin-Sepiolite Geopolymer Composites. ***Ceramics International***, 43(1): 1052-1060.

Yang K-H, Cho A-R, Song J-K, Nam S-H, 2012. Hydration Products and Strength Development of Calcium Hydroxide-Based Alkali-Activated Slag Mortars. ***Construction and Building Materials***, 29410-419.

Yang K-H, Song J-K, Lee K-S, Ashour AF, 2009. Flow and Compressive Strength of Alkali-Activated Mortars.

Zhang Z, Wang H, Provis JL, 2012. Quantitative Study of the Reactivity of Fly Ash in Geopolymerization by Ftir. ***Journal of Sustainable Cement-Based Materials***, 1(4): 154-166.

Zhao R, Sanjayan JG, 2011. Geopolymer and Portland Cement Concretes in Simulated Fire. ***Magazine of Concrete research***, 63(3): 163-173.

Zhao R, Yuan Y, Cheng Z, Wen T, Li J, Li F, Ma ZJ, 2019. Freeze-Thaw Resistance of Class F Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ***Construction and Building Materials***, 222474-483.

EKLER

EK 1. Alkali Aktivatör İçeriğinin GP Bağlayıcıların Özelliklerine Etkisinin Araştırıldığı Çalışmanın Tüm Sonuçları

SH Molarite (M)	SS/SH	Yoğunluk (g/cm^3)	Su Emme Oranı (%)	28 Günlük B. Dayanımı (MPa)	I-K sonrası B. Dayanımı (MPa)
8	0	1.81	9.1	42.0	-
8	1	1.78	8.4	55.9	32.0
8	2	1.88	5.3	74.8	40.5
8	3	1.89	4.7	66.0	38.1
10	0	1.96	4.9	38.7	-
10	1	1.89	5.8	62.0	34.6
10	2	1.89	5.6	67.4	38.0
10	3	1.90	5.3	65.8	30.4
12	0	2.00	3.7	30.8	-
12	1	1.93	3.2	51.1	28.7
12	2	1.94	4.2	59.6	34.3
12	3	1.91	4.5	52.7	37.1
14	0	2.01	3.4	43.6	-
14	1	1.95	2.0	46.9	28.9
14	2	1.95	3.6	55.5	29.1
14	3	1.94	4.0	53.1	30.6

EK 2. Kür Koşullarının GP Bağlayıcıların Özelliklerine Etkisinin Araştırıldığı Çalışmanın Tüm Sonuçları

Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (saat)	Yoğunluk (g/cm^3)	Su Emme Oranı (%)	28 Günlük B. Dayanımı (MPa)	I-K sonrası B. Dayanımı (MPa)
Oda Sıcaklığı (23 ± 1)		-	-	6.2	0.0
60	4	-	-	25.3	0.0
60	8	1.89	4.8	44.5	15.1
60	24	1.94	6.8	46.5	27.1
60	48	1.95	7.5	57.2	28.8
60	96	1.95	6.6	62.0	46.2
60	168	1.98	3.6	78.9	74.4
75	4	1.89	5.1	50.4	29.9
75	8	1.90	5.9	49.3	33.2
75	24	1.88	7.0	46.2	37.6
75	48	1.90	6.5	61.9	49.9
75	96	1.96	5.6	67.2	54.9
75	168	2.00	5.5	82.8	65.6
90	4	1.74	5.4	44.1	25.2
90	8	1.83	5.3	56.3	26.1
90	24	1.80	2.6	40.2	36.7
90	48	1.84	2.7	38.7	44.0
90	96	1.87	6.8	25.4	26.1
90	168	1.83	7.1	22.2	32.1
105	4	1.80	6.6	40.4	20.0
105	8	1.80	4.1	46.7	20.7
105	24	1.83	3.0	61.1	33.8
105	48	1.80	6.4	45.6	34.3
105	96	1.85	6.8	44.4	29.1
105	168	1.87	6.9	33.4	24.9

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Ad Soyad **:** Cemal KARAASLAN

Eğitim

Derece	**Alan**	**Kurum**	**Yıl**
Doktora	İnşaat Mühendisliği	Dicle Üniversitesi	2017-2021
Yüksek Lisans	İnşaat Mühendisliği	Dicle Üniversitesi	2012-2015
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	2005-2009

Akademik Unvanlar

Öğretim Görevlisi **:** Iğdır Üniversitesi Teknik Bilimler MYO İnşaat Bölümü İnşaat Teknolojisi PR (2018-)

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Cemal KARAASLAN
ÖĞRENCİ NO	17806502
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2020-2021
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	İnşaat Mühendisliği
PROGRAM	Doktora
TEZ KONUSU	Su Yapılarında Kullanılabilir Pomza Esaslı Geopolimer Betonların Geliştirilmesi
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	215
BENZERLİK ORANI	%14
RAPORLAMA TARİHİ	26/07/ 2021

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 215 sayfalık kısmına ilişkin, 26/07/ 2021 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 14 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esaslarını inceledim ve bu Uygulama Esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Öğrencinin
Adı ve Soyadı: Cemal KARAASLAN
Tarih: 26/07/2021
İmza:

Tez Danışmanı	Anabilim Dalı Başkanı
Adı ve Soyadı: Prof. Dr. Tamer BAĞATUR Tarih: 26/07/2021 İmza:	Adı ve Soyadı: Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK Tarih: 26/07/2021 İmza: