

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ENDÜSTRİYEL YAN ÜRÜNLERLE ÜRETİLMİŞ GEOPOLİMER
BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

SADIK YILDIZ

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ENDÜSTRİYEL YAN ÜRÜNLERLE ÜRETİLMİŞ GEOPOLİMER
BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

SADIK YILDIZ

Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ENGİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

Prof. Dr. Seval PINARBAŞI ÇUHADAROĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Alper CUMHUR
Jüri Üyesi, Yalova Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından FDK-2022-2468 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

(İmza)

Sadık YILDIZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

(İmza)

Sadık YILDIZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora öğrenimim boyunca büyük desteklerini gördüğüm, bilgi birikimlerinden faydalandığım, tecrübelerinden esin aldığım ve akademik anlamda gelişmeme önemli katkı sağlayan değerli hocam tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda değerli bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren ve tez çalışmama önemli katkılar sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi. Serkan ENGİN hocama ve Sayın Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Beton dökümü ve deneyleri konusunda yardımlarını esirgemeyen Dr. İnşaat Mühendisi Arif YILMAZOĞLU'na, deney çalışmam için gerekli kaynak malzemeleri temininde yardımcı olan Nuh Çimento San. A.Ş. Satış Sonrası Kalite İzleme Müdürü Emre FENERCİ Bey'e, deneylerimde bana olanak sağlayan Proteknik Yapı ve Zemin Laboratuvarı Şirketi'nin sahibi Yüksek İnşaat Mühendisi Fatih YAZICI Bey'e ve Proteknik Yapı ve Zemin Laboratuvarı Şirketi'nin tüm ekibine teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca betonda kullanılan agrega teminini sağlayan Kavanlar Beton Şirketi'nin genel müdürü İlhan YILMAZ ve Kavanlar Beton'un değerli çalışanlarına, beton numunelerin kesimi işleminde yardımcı olan Nuh Beton Şirketi'nin çalışanı İrfan EFE beye, kimyasal katkı malzemesini ücretsiz bir şekilde sağlayan Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve çalışanı Ömer KAYA beye, SEM analizinde teknik destek ve kolaylık sağlayan Öğr. Üyesi Prof. Dr. Fatih ÜSTEL hocama ve Semih YÜCEL Bey'e teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Ayrıca, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından sağlanan maddi ve manevi destekten dolayı derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Doktora sürecinde desteklerini esirgemeyen ve beni motive eden sevgili eşim Ahsen YILDIZ ve sevgili kızım Zeynep Asel YILDIZ'a, bana her zaman destek olan babam Hasan YILDIZ'a, sevgi ve sabırla yanımda olan annem Hava YILDIZ'a, manevi abim Sinan DEMİRCİ'ye ve değerli kardeşlerim Hamza Derda YILDIZ ve Muhammed Zer YILDIZ'a içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Sizin varlığınız, benim için her zaman güç ve ilham kaynağı olmuştur. Doktora sürecindeki zorluklarla başa çıkamamda ve başarılı olmamda sizin desteğiniz önemli bir role sahiptir. Size minnettarım ve sizinle gurur duyuyorum.

Haziran – 2023

Sadık YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Yüksek Fırın Cürufu	4
2.1.1. Yüksek Fırın Cürufunun Üretim Süreci	5
2.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	7
2.2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları	12
2.2. Uçucu Kül	18
2.2.1. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	19
2.1.2. Uçucu Külün Kullanım Alanları	23
2.3. Cam	25
2.3.1. Camın Yapısı.....	26
2.3.2. Camın Üretimi.....	28
2.3.3. Camın Fiziksel Özellikleri	29
2.3.4. Camın Kimyasal Özellikleri.....	31
2.3.4. Camın Mekanik Özellikleri.....	32
2.3.5. Atık Camların Geri Dönüşümü	33
2.3.6. Atık Camların Kullanım Alanları.....	35
2.4. Geopolimer	45
2.4.1. Geopolimer Kavramı.....	45
2.4.2. Geopolimer Kimyası ve Mekanizması	46
2.4.3. Geopolimerin Bileşenleri	50
2.4.4. Geopolimer Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler	51
2.4.3. Geopolimerin Uygulama Alanları	52
2.5. Geopolimer Beton.....	54
2.5.1. Geopolimer Betonun Sürdürülebilirliği.....	57
2.5.2. Geopolimer Betonun Özellikleri	58
2.5.3. Taze Geopolimer Betonun Özellikleri	59
2.5.3.1. İşlenebilirlik	59
2.5.3.2. Priz Süresi	60
2.5.4. Sertleşmiş Geopolimer Betonun Özellikleri	61
2.5.4.1. Basınç Dayanımı.....	61
2.5.4.2. Yarmada Çekme Dayanımı ve Eğilme Dayanımı	64
2.5.5. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri	66
2.5.5.1. Geçirgenlik ve Gözeneklilik	66
2.5.5.2. Klorür Penetrasyonu	69
2.5.5.3. Su Emme.....	71
2.5.5.4. Kılcal Su Emme	73

2.5.5.5. Asit Saldırısı Direnci.....	74
2.5.5.6. Sülfat Atağı Direnci	78
2.5.5.7. Karbonatlaşma Direnci	80
2.5.5.8. Donma Çözülme Direnci	84
2.5.5.9. Yüksek Sıcaklık Direnci	85
2.5.5.10. Çiçeklenme Direnci	89
2.5.5.11. Büzülme Davranışı.....	91
2.5.5.12. Alkali Silika Reaksiyonu	94
2.5.6. Geopolimer Beton Kullanım Alanları	95
3. LİTERATÜR TARAMASI	99
4. MALZEME VE YÖNTEM	124
4.1. Malzemeler	124
4.1.1. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu.....	124
4.1.2. Uçucu Kül	125
4.1.3. Atık Cam Tozu	126
4.1.4. Agregası	127
4.1.5. Alkali Çözeltiler	128
4.1.6. Su.....	130
4.1.7. Süper Akışkanlaştırıcı	130
4.2. Deney Tasarımı.....	132
4.3. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ve Analizi.....	132
4.3. Beton Karışım Oranları.....	139
4.4. Geopolimer Beton/Harç Karışımların Molar Oranları.....	144
4.5. Deney Yöntemi	145
4.5.1. Priz Deneyi.....	145
4.5.2. Çökme (Slump) Deneyi.....	146
4.5.3. Yoğunluk.....	146
4.5.4. Ultrases Geçiş Hızı.....	147
4.5.5. Basınç Deneyi	147
4.5.6. Yarmada Çekme Deneyi	148
4.5.7. Su Emme Deneyi.....	149
4.5.8. Kılcal Su Emme (Sorptivite)	150
4.5.9. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü Deneyleri.....	151
4.5.10. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci Deneyi.....	152
4.5.11. Rötire (Büzülme) Deneyi	153
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	155
5.1. Priz Süresi	155
5.1.1. Priz Süresine Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	156
5.2. Çökme (Slump) Deneyi	158
5.2.1. Slump Deneyine Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	159
5.3. Yoğunluk	161
5.3.1. Sertleşmiş Yoğunluk Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	162
5.4. Ultrases Geçiş Hızı	164
5.4.1. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	166

5.5. Basınç Dayanımı.....	167
5.5.1. Basınç Dayanım Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	171
5.6. Basınç Dayanımı İle Ultrases Geçiş Hızı Arasındaki ilişki	176
5.7. Basınç Dayanımı İle Ultrases Geçiş Hızı Arasındaki Doğrusal ilişki	177
5.7. Yarmada Çekme Dayanımı.....	177
5.7.1. Yarmada Çekme Dayanım Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	178
5.8. Geopolimer Betonun Deneysel ve Tahmin Edilen Yarmada Çekme Dayanımı Arasında Karşılaştırma.....	180
5.9. Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı İle Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki.....	182
5.10. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü	183
5.10.1. Dinamik ve Statik Elastisite Modülüne Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	184
5.11. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma.....	187
5.12.Deneysel ve Tahmin Edilen Dinamik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma.....	188
5.13.Deneysel ve Tahmin Edilen Statik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma.....	190
5.14. Su Emme Oranı.....	191
5.14.1. Su Emme Oranı Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	192
5.15. Kılcal Su Emme	194
5.15.1. Kılcal Su Emme Yüksekliği Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	197
5.16. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci	200
5.16.1. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci Sonuçlarına Ait performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	204
5.17. Rötire (Büzülme)	206
5.17.1. Rötire (Büzülme) Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	208
5.18. Maliyet Analizi	209
5.18.1. Maliyet Analizi Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	214
5.19. CO ₂ Emisyonu.....	215
5.19.1. CO ₂ Emisyonu Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği- Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları	219
5.20. SEM ve EDX Analizi	220
5.21. Genel Performans Değerlendirmesi.....	239
5.21.1. Optimum Beton Karışımına Ait Deney Sonuçları	242
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	248
KAYNAKLAR.....	255
EKLER	284
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	287
ÖZGEÇMİŞ.....	288

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	YFC ve pik demir üretim süreci.....	6
Şekil 2.2.	Farklı üretim süreçleri sonucu YFC'ler a) Genleştirilmiş YFC, b) Granüle YFC, c) Öğütülmüş YFC.	7
Şekil 2.3.	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ üç fazlı diyagramı.....	11
Şekil 2.4.	a) Camsı yüksek fırın cürufunun atomik yapılandırma görüntüsü, b) 3,5 Å içerisindeki Ca ve Mg görüntüsü, (Beyaz ve koyu gri sırasıyla SiO ₄ ve AlO ₄ birimlerini, siyah ve beyaz toplar ise sırasıyla Mg ve Ca atomlarını gösterir. *Atomik görselleştirme programı (VICS-II) ile çizilmiştir.)	12
Şekil 2.5.	UK SEM görüntüleri A) F sınıfı UK, B) Yüksek karbon içeren UK.....	20
Şekil 2.6.	a) Kristal yapı b) Amorf - düzensiz yapı c) Silis bazlı camın moleküler yapısı	26
Şekil 2.7.	Atık cam agregaları	36
Şekil 2.8.	Atık cam kırıkları ile üretilen dekoratif amaçlı harç uygulamaları.....	38
Şekil 2.9.	Atık cam tozları: a) Kullanılmış cam şişeler (ortalama tane boyutu 31,57 µm), b) Endüstriyel atık cam (ortalama tane boyutu 7,8 µm).....	38
Şekil 2.10.	Silika yüzey yapısının oluşum şeması (≡Si-OH silanol grupları)	43
Şekil 2.11.	Poly(sialate) moleküler ağ yapısı	46
Şekil 2.12.	Geopolimerizasyon işleminin şematik diyagramı	48
Şekil 2.13.	Geopolimerizasyon reaksiyonu grafik modeli	48
Şekil 2.14.	Fosfat bazlı geopolimer sürecinin ilk adımı	49
Şekil 2.15.	Silanol ve silisyum-fosfat bağların oluşum süreci	50
Şekil 2.16.	Si-O-P-O-Si bağların kondensasyon süreci.....	50
Şekil 2.17.	Fosfat bazlı metakaolin geopolimer çimento.	50
Şekil 2.18.	Geopolimer bağlayıcı ile üretilen dekoratif malzemeler.....	53
Şekil 2.19.	Geopolimer köpük paneller.....	53
Şekil 2.20.	Karbon-epoksi kompozit (solda) yanarken, karbon-geopolimer kompozit (sağda) 1200 °C'lik ateşe direnmekte	53
Şekil 2.21.	Portland ve geopolimer betonların hacimsel içeriği.....	55
Şekil 2.22.	Geopolimer beton üretim aşamaları	56
Şekil 2.23.	Geopolimer betonların özellikleri	59
Şekil 2.24.	Ortam ve ısıl kürlenme altında geopolimer betonların basınç dayanım gelişimleri.....	62
Şekil 2.25.	UK/ÖYFC (%100UK, %100UK%25ÖYFC ve %50UK%50ÖYFC) bazlı geopolimerler pastaların ve portland çimentolu pastaların basınç dayanım ve gözeneklilik sonuçları.....	69
Şekil 2.26.	Ağırlıkça farklı cüruf/uçucu kül oranlarında hazırlanan GPB'lerin ve PÇB'nin havuzlama klorür testi sonrasında betonlara AgNO ₃ uygulaması ile bulunan klorür penetrasyon sınırı: A) %100ÖYFC, B) %75ÖYFC/%25 UK, C) %50ÖYFC/%50UK ve D) PÇB.....	70
Şekil 2.27.	Ağırlıkça farklı cüruf/uçucu kül oranlarında hazırlanan GPB'lerin ve PÇB'nin hızlandırılmış klorür testi sonrasında betonlara AgNO ₃ uygulaması ile bulunan klorür penetrasyon sınırı: A) %100 ÖYFC, B) %75 ÖYFC/25 UK, C) 50 ÖYFC/50 UK ve D) PÇB.....	71
Şekil 2.28.	a) Su emme b) UK bazlı GPB'lerin geçirgen boşlukların görünen hacmi (GBGH).....	72

Şekil 2.29. a) GPB3 b) PCB'lerin 90 gün süre ile %2 sülfirik asit çözeltisine bırakılan betonların görünüşleri	75
Şekil 2.30. PCB numunesinin asit çözeltisine daldırılmadan önce (a) ve daldırıldıktan sonraki (b) arayüzey geçiş bölgesi değişimi.....	77
Şekil 2.31. GPB numunesinin asit çözeltisine daldırılmadan önce (a) ve daldırıldıktan sonraki (b) arayüzey geçiş bölgesi değişimi.....	77
Şekil 2.32. %1 CO2 ortamına 1000 saat maruz kalan GPC ve OPCC için fenolftalein indikatörü ile ölçülen karbonatlaşma derecesi)	81
Şekil 2.33. 14 ve 28 günlük GPB'nin karbonatlaşma derinliği	82
Şekil 2.34. GPB'nin karbonatlaşma öncesi (a) ve karbonatlaşma sonrası (b) SEM görüntüleri.....	83
Şekil 2.35. Mikro kapsül içeren ve içermeyen GPB ve PCB'lerin donma çözülme direnci	85
Şekil 2.36. 25 °C ila 1100 °C sıcaklıklara maruz bırakılan UK/ÖYFC bazlı GPB, UK/PC bazlı GPB ve PCB'nin basınç dayanım değişimleri.....	86
Şekil 2.37. Geopolimer çiçeklenme mekanizmasının şematize edilmiş oluşum mekanizması.....	90
Şekil 2.38. (a) 3D baskı yapılmış geopolimer ürün, (b) Geopolimer köpük, (c) GPB kanalizasyon boruları, (d) Queensland Üniversitesi'nin GPB ile yapılan "Global Change Institute" binası, (e) GPB'nin prekast yapı olarak kullanımı.....	96
Şekil 2.39. Geopolimer traversler A) döküm sonrası, B) buharla kürlenme.....	98
Şekil 4.1. a) Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin görünümü, b) SEM görüntüsü.....	125
Şekil 4.2. a) Çalışmada kullanılan UK'nin görünümü, b) SEM görüntüsü.....	126
Şekil 4.3. a) 1nolu ACT'nin görünümü b) 2 nolu ACT'nin görünümü c) 3 nolu ACT'nin görünümü d) 1 nolu ACT'nin SEM görüntüsü e) 2 nolu ACT'nin SEM görüntüsü f) 3 nolu ACT'nin SEM görüntüsü.....	127
Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan agregalar	128
Şekil 4.5. Çalışmada kullanılan karışık agreganın gradasyon eğrisi	128
Şekil 4.6. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler, a) Katı SH, b) Sıvı SS	129
Şekil 4.7. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı	131
Şekil 4.8. Çiçeklenme oluşumu gösteren geopolimer betonlar	138
Şekil 4.9. Donmuş sodyum hidroksit çözeltisi	138
Şekil 4.10. Beton karışım mikseri ve geopolimer beton görünümü	143
Şekil 4.11. Isıl kuru kürlenme işlemi	143
Şekil 4.12. Priz deneyi ve üretilen numuneler.....	145
Şekil 4.13. Taze geopolimer beton slump deneyi	146
Şekil 4.14. UPV (m/s) deneyi.....	147
Şekil 4.15. Basınç dayanımı deneyi	148
Şekil 4.16. Yarmada çekme dayanımı deneyi	149
Şekil 4.17. Kılcal su emme deneyi aşamaları.....	150
Şekil 4.18. Statik elastisite deneyi düzeneği	152
Şekil 4.19. Magnezyum sülfat deneyi yapılışı	153
Şekil 4.20. Rötire deneyi ve üretilen numuneler	154
Şekil 5.1. Geopolimer harçların priz süreleri (dk).....	155
Şekil 5.2. İlk priz süresi performans istatistiği-parametreler grafiği.....	157
Şekil 5.3. Geopolimer betonların slump değerleri	159
Şekil 5.4. Slump değerleri performans istatistiği-parametreler grafiği	160

Şekil 5.5.	Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün sertleşmiş yoğunlukları	162
Şekil 5.6.	90. gün sertleşmiş yoğunluk performans istatistiği-parametreler grafiği	163
Şekil 5.7.	Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün UPV (m/s) değerleri	165
Şekil 5.8.	90. gün UPV (m/s) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği	166
Şekil 5.9.	Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) değerleri	171
Şekil 5.10.	2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği	173
Şekil 5.11.	2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) ve UPV (m/s) sonuçları arasındaki ilişki	176
Şekil 5.12.	2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) ve UPV (m/s) sonuçları arasındaki doğrusal ilişki	177
Şekil 5.13.	Yarmada çekme dayanımı sonuçları	178
Şekil 5.14.	Yarmada çekme dayanımı performans istatistiği-parametreler grafiği	179
Şekil 5.15.	Geopolimer betonun deneysel ve tahmin edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları	181
Şekil 5.16.	Geopolimer betonların basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	182
Şekil 5.17.	Geopolimer betonun dinamik ve statik elastisite modülü değerleri	184
Şekil 5.18.	Dinamik ve statik elastisite modülü (MPa) performans istatistiği-parametreler grafiği	185
Şekil 5.19.	Geopolimer betonların dinamik elastisite sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini statik elastisite modülü sonuçları	188
Şekil 5.20.	Geopolimer betonların basınç dayanımı sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini dinamik elastisite modülü sonuçları	189
Şekil 5.21.	Geopolimer betonların basınç dayanımı sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini statik elastisite modülü sonuçları	191
Şekil 5.22.	Geopolimer betonların su emme (%) değerleri	192
Şekil 5.23.	Su emme oranı sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği	193
Şekil 5.24.	Geopolimer betonları zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği	195
Şekil 5.25.	8. Gün kılcal su emme yüksekliği (I=mm)	196
Şekil 5.26.	Kılcal su emme derinliği (I=mm) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği	199
Şekil 5.27.	Geopolimer betonların sülfat etkisi altında UPV (m/s) sonuçları	203
Şekil 5.28.	Geopolimer betonların sülfat etkisi altında ağırlık (gr) sonuçları	203
Şekil 5.29.	Geopolimer betonların sülfat etkisi altında aylara göre UPV (m/s) değişim grafiği	204
Şekil 5.30.	Geopolimer betonların sülfat etkisi altında basınç dayanım değişim grafiği	204
Şekil 5.31.	3. ay % UPV (m/s) değişim sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği	205
Şekil 5.32.	Geopolimer harçların zamana bağlı (%) boy kısalması grafiği	207
Şekil 5.33.	Geopolimer harçların zamana bağlı (%) ağırlık kaybı grafiği	207

Şekil 5.34.	112. gün % boy kısalması sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği.....	208
Şekil 5.35.	Atık cam tozunun ton başına maliyeti (\$).....	210
Şekil 5.36.	Geopolimer betonun üretim maliyeti (\$/m ³).....	211
Şekil 5.37.	1 nolu ve 2 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	211
Şekil 5.38.	3 nolu ve 4 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	211
Şekil 5.39.	5 nolu ve 6 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	212
Şekil 5.40.	7 nolu ve 8 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	212
Şekil 5.41.	9 nolu ve 10 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	212
Şekil 5.42.	11 nolu ve 12 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	213
Şekil 5.43.	13 nolu ve 14 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	213
Şekil 5.44.	15 nolu ve 16 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%).....	213
Şekil 5.45.	Maliyet hesapları performans istatistiği-parametreler grafiği.....	214
Şekil 5.46.	Geopolimer betonun üretimi için açığa çıkan kg CO ₂ /m ³ emisyonu	216
Şekil 5.47.	1 ve 2 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	216
Şekil 5.48.	3 ve 4 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	216
Şekil 5.49.	5 ve 6 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	217
Şekil 5.50.	7 ve 8 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	217
Şekil 5.51.	9 ve 10 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	217
Şekil 5.52.	11 ve 12 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	218
Şekil 5.53.	13 ve 14 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	218
Şekil 5.54.	15 ve 16 nolu karışımların bileşenlerinin CO ₂ /m ³ emisyonuna olan etkisi (%).....	218
Şekil 5.55.	CO ₂ emisyonu hesapları performans istatistiği-parametreler grafiği.....	219
Şekil 5.56.	Kaynak malzemelerin EDX analizleri a) ÖYFC, b) UK, c) ACT	222
Şekil 5.57.	1 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	223
Şekil 5.58.	2 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	224
Şekil 5.59.	3 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	225
Şekil 5.60.	4 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	226
Şekil 5.61.	5 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	227
Şekil 5.62.	6 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	228
Şekil 5.63.	7 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	229
Şekil 5.64.	8 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	230

Şekil 5.65. 9 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	231
Şekil 5.66. 10 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	232
Şekil 5.67. 11 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	233
Şekil 5.68. 12 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	234
Şekil 5.69. 13 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	235
Şekil 5.70. 14 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	236
Şekil 5.71. 15 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	237
Şekil 5.72. 16 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi	238
Şekil 5.73. Tüm deneyler incelendiğinde optimum geopolimer betona ait performans istatistiği-parametreler grafiği.....	242
Şekil 5.74. Optimum geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi.....	247



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Üretim şekillerine göre cürufların kimyasal bileşenleri ve üretim miktarı	4
Tablo 2.2. Granüle YFC, nehir kumu ve kırma taşın fiziksel özellikleri	7
Tablo 2.3. ÖYFC'nin hidrolik aktivitesi için önerilen formüller	8
Tablo 2.4. Farklı bölgelerde üretilen YFC'nin ana bileşenleri.....	10
Tablo 2.5. Yüksek fırın cürufu içeren çimentolar ve bileşimleri (kütlece % olarak)	14
Tablo 2.6. Süper sülfat çimentosu bileşimleri (kütlece %)	15
Tablo 2.7. Dünyada uçucu kül üretimi	19
Tablo 2.8. Farklı kömür türlerinden üretilen UK'nin kimyasal bileşimi	21
Tablo 2.9. ASTM C 618-19'a göre UK'nin özellikleri	22
Tablo 2.10. Türkiye termik santrallerinde elde edilen UK'ların kimyasal bileşenleri, TSE ve ASTM standartlarına göre sınıflandırılması verilmiştir	23
Tablo 2.11. Cam üretiminde kullanılan oksit türleri	26
Tablo 2.12. Camın standart noktaları	29
Tablo 2.13. Farklı cam türlerinin kimyasal bileşimleri	31
Tablo 2.14. Atık cam agregasının fiziksel özellikleri.....	36
Tablo 2.15. Çimentonun ve cam tozlarının kimyasal içerikleri	39
Tablo 2.16. Farklı tane boyutlarına sahip atık cam tozu ile yapılan puzolanik aktivite indeksi çalışmaları.....	39
Tablo 2.17. Atık cam tozu ile yapılan çalışmalar, atık camın fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği	44
Tablo 2.18. Portland çimentosu ve geopolimer kaynak malzeme için gereken enerji miktarı ve CO ₂ emisyonları.....	58
Tablo 2.19. Geopolimer betonlar için alkali aktivatör miktarı, kritik molar oranları ve su/katı oranları.	63
Tablo 2.20. GGPB'nin toplam boşluk oranı ve su geçirgenlik katsayısı	67
Tablo 2.21. Sülfat ortamında basınç dayanımı değişimi özeti (%)	79
Tablo 2.22. PÇB ve OGPB için karbonatlaşma derinliği	81
Tablo 2.23. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası betonların basınç dayanımları	87
Tablo 3.1. Geopolimer beton karışımları için kullanılan parametre ve seviyeler	110
Tablo 3.2. Geopolimer karışımların molar oranları ve priz süreleri.....	122
Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	124
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri	125
Tablo 4.3. Çalışmada kullanılan üç farklı inceliğe sahip atık cam tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	126
Tablo 4.4. Çalışmada kullanılan agregalara ait özgül ağırlık, su emme ve incelik modülü değerleri	127
Tablo 4.5. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin ağırlıkça yüzdesi (%)	129
Tablo 4.6. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) analiz değerleri	130
Tablo 4.7. Çalışmada kullanılan sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃) analiz değerleri	130
Tablo 4.8. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik bilgiler.....	131
Tablo 4.9. Taguchi metodu ile hazırlanan deney modeli	133

Tablo 4.10. Taguchi metodu ile hazırlanan deney planı	133
Tablo 4.11. Geopolimer beton karışım değerleri (kg)	141
Tablo 4.12. Geopolimer harç karışım değerleri (kg)	142
Tablo 4.13. Karışımların molar oranları	144
Tablo 5.1. İlk priz süresi varyans analizi	158
Tablo 5.2. Slump değeri sonuçları varyans analizi	160
Tablo 5.3. Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün sertleşmiş yoğunlukları (gr/cm^3)	161
Tablo 5.4. 90. sertleşmiş yoğunluk varyans analizi	164
Tablo 5.5. Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün UPV(m/s) sonuçları	165
Tablo 5.6. 90. gün UPV (m/s) sonuçları varyans analizi	167
Tablo 5.7. Geopolimer betonun 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım sonuçları	170
Tablo 5.8. Geopolimer beton karışımların 2., 7., 27. ve 90. basınç dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları	175
Tablo 5.9. Geopolimer beton karışımların yarmada çekme dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları	180
Tablo 5.10. Geopolimer betonun dinamik ve statik elastisite modülü değerleri	183
Tablo 5.11. Dinamik elastisite modülü (MPa) varyans analizi	186
Tablo 5.12. Su emme oranı (%) değerleri varyans analizi	194
Tablo 5.13. 1. ve 2. kılcal su emme katsayıları	196
Tablo 5.14. Kılcal su emme ($I=\text{mm}$) değerleri varyans analizi	199
Tablo 5.15. 3. ay değişim UPV (m/s) değerleri varyans analizi	206
Tablo 5.16. 112. gün % boy kısalması değerleri varyans analizi	209
Tablo 5.17. Maliyet hesapları varyans analizi	215
Tablo 5.18. CO ₂ emisyonu varyans analizi	220
Tablo 5.19. Genel performans değerlendirmesi ve genel sinyal/gürültü oranı (S/G) oranı	239
Tablo 5.20. İdeal geopolimer betonun deney sonuçları	245
Tablo 5.21. İdeal geopolimer betonun çalışmada üretimi gerçekleştiren geopolimer betonlar ile karşılaştırmalı sonuçları	245
Tablo A.1. Magnezyum sülfat heptahidratın ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) teknik analiz sonuçları	285
Tablo B.1. Geopolimer betonların kılcal su emme ($I=\text{mm}$) değerleri	286

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

M	: Molarite
MJ	: Megajoule

Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ACT	: Atık Cam Tozu
Alkaliçöz	: Alkali Çözelti
A-S-H	: Alümina-Silikat-Hidrat
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
C-(A)-S-H	: Kalsiyum-(Alümina)-Silikat-Hidrat
C-A-S-H	: Kalsiyum-Alümina-Silikat-Hidrat
C-N-A-S-H	: Kalsiyum-Sodyum-Alümina-Silikat-Hidrat
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını)
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscop (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
GPB	: Geopolimer Beton
K-A-S-H	: Potasyum-Alümina-Silikat-Hidrat
KO	: Kareler Ortalaması
KT	: Kareler Toplamı
M-A-S-H	: Magnezyum-Alümina-Silikat-Hidrat
M-C-A-S-H	: Magnezyum-Kalsiyum-Alümina-Silikat-Hidrat
M-N-A-S-H	: Magnezyum-Sodyum-Alümina-Silikat-Hidrat
N-A-S-H	: Sodyum-Alümina-Silikat-Hidrat
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
PÇB	: Portland Çimentolu Beton
SD	: Serbestlik Derecesi
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SH	: Sodyum Hidroksit
SS	: Sodyum Silikat
Su/Geokatı	: Su/Geopolimerkatı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrases Geçiş Hızı)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Difraksiyon)
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ENDÜSTRİYEL YAN ÜRÜNLERLE ÜRETİLMİŞ GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu araştırma, tamamen endüstriyel yan ürünler kullanılarak üretilen ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer betona odaklanmaktadır. Çalışmada, Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak geopolimer betonda kullanılan her bir bileşenin etkisi ayrı ayrı incelenmiş ve bu sayede geopolimer beton literatürüne önemli bilgiler sunulmuştur. Araştırma, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), uçucu kül (UK) ve atık pencere camı tozu (ACT) gibi endüstriyel yan ürünler kullanılarak üretilen geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemeyi hedeflemektedir. Bu amaçla; yüksek fırın cürufu ve uçucu kül alüminosilikat kaynak malzemeleri kullanılarak farklı oranlarda hazırlanan bağlayıcı karışımlar, atık cam tozuyla birleştirilmiştir. Ayrıca dört farklı oranda, atık cam tozu (%40, %30, %20, %10), sodyum hidroksit molaritesi (6M, 8M, 10M, 12M) ve ısıtıl kuru kürleme sıcaklığı (45°C, 60°C, 75°C ve 90°C) kullanılarak geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen beton numuneleri üzerinde slump (çökme), basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, yoğunluk, su emme, kılcal su emme, magnezyum sülfat atağı direnci, dinamik elastisite ve statik elastisite deneyleri gerçekleştirilmiş, mikroyapı analizi için Scanning Electron Microscope (SEM) ve Energy Dispersive X-Ray (EDX) kullanılmıştır. Ayrıca, maliyet analizi ve CO₂ emisyonu analizi yapılarak geopolimer betonların çevresel ve ekonomik etkileri değerlendirilmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle, elde edilen deney sonuçları üzerinden her bir deney için ayrı ayrı optimum parametreler belirlenmiştir. Bulunan optimum değerler ile genel performans değerlendirmesi yapılarak optimum beton karışımı belirlenmiş ve üretilmiştir. Üretilen optimum geopolimer beton üzerinde deneyler tekrarlanarak sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, karışımlarda ÖYFC içeriğinin artmasıyla mekanik özelliklerin, UK içeriğinin artmasıyla işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, belirli oranlarda ACT içeriğinin kullanılmasıyla mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Ek olarak, kür sıcaklığının da mekanik sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Genel olarak, elde edilen sonuçlar, geopolimer betonun geleneksel betona önemli bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık Pencere Camı Tozu, Geopolimer Beton, Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu, Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi, Uçucu Kül.

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETES PRODUCED WITH INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

ABSTRACT

This study focuses on geopolymer concrete, a sustainable type of concrete produced entirely using industrial by-products. The research investigates the individual effects of various components used in geopolymer concrete by employing the Taguchi experimental design method, thereby providing significant contributions to the geopolymer concrete literature. The study aims to examine the mechanical and durability properties of geopolymer concrete produced using industrial by-products such as blast furnace slag, fly ash, and waste glass powder from windows. With this aim, binder contents prepared with different proportions of blast furnace slag and fly ash as aluminosilicate source materials were combined with waste glass powder. Additionally, geopolymer concrete specimens were produced using four different percentages of waste glass powder (40%, 30%, 20%, 10%), sodium hydroxide molarity (6M, 8M, 10M, 12M), and thermal curing temperatures (45°C, 60°C, 75°C, 90°C). The produced concrete samples were subjected to various tests including slump, compressive strength, split tensile strength, density, water absorption, capillary water absorption, resistance to magnesium sulfate attack, dynamic elasticity, and static elasticity. Microstructure analysis was conducted using SEM and EDX techniques. Furthermore, cost analysis and CO₂ emission analysis were performed to assess the environmental and economic impacts of geopolymer concrete. Through the Taguchi experimental design method, optimal parameters were determined for each experiment based on the obtained results. The overall performance evaluation and determination of the optimum concrete mixture were conducted using these optimal values, resulting in the production of optimized geopolymer concrete. The experiments were repeated on the produced optimized geopolymer concrete to validate the results. The findings indicate that increasing the content of blast furnace slag improves the mechanical properties, while increasing the content of fly ash enhances workability properties in the mixtures. Moreover, it was found that specific proportions of waste glass powder can improve the mechanical properties. Additionally, the curing temperature is identified as a significant factor influencing the mechanical results. Overall, the obtained results demonstrate the significant potential of geopolymer concrete as an alternative to conventional concrete.

Keywords: Waste Window Glass Powder, Geopolymer Concrete, Ground Granulated Blast Furnace Slag, Taguchi Experimental Design Method, Fly Ash.

1. GİRİŞ

İnşaat endüstrisi, her ekonominin ayrılmaz bir parçasıdır. Bunun sonucunda, inşaat endüstrisi yüksek hacimli atıkların oluşumundan ve çevreye önemli miktarda sera gazı salınımından sorumludur. İnşaat endüstrisinde, beton gibi çimento esaslı kompozitler, dünya genelinde çeşitli yapıların üretimi için kullanılan başlıca yapı malzemeleridir. Çimento üretiminin, küresel ısınmadan sorumlu yüksek miktarda sera gazı oluşmasına neden olduğu ve büyük miktarda hammadde tüketimine yol açtığı bilinmektedir. Bir ton çimento üretimi için yaklaşık iki ton hammadde (kireçtaşı ve şeyl) tüketildiği, yaklaşık bir ton karbondioksit (CO₂) ve nitrojen oksit (NO) gazlarının salındığı tahmin edilmektedir (0,87 ton CO₂ ve 3 kg NO) (Almutairi ve diğ., 2021).

Dünya çapında yıllık 2,3 milyar ton sera gazı salınımıyla, çimento üretimi dünya genelindeki insan kaynaklı sera gazı emisyonunun yaklaşık %7'sinden sorumludur (Hamada ve diğ., 2020). Çimento üretimi ayrıca su ve havanın kirlenmesine neden olabilmektedir. Çimento üretimi için büyük miktarda hammadde kullanımı, doğal kaynakların aşırı kullanımına, çevrenin estetik açıdan bozulmasına ve ekosistemlerin değişmesine yol açmaktadır (Almutairi ve diğ., 2021). Çimento üretiminden kaynaklanan yüksek sera gazı emisyonlarına ek olarak, bu süreç yoğun enerji de gerektirmektedir (Hassan ve diğ., 2020).

İnşaat sektöründe son yıllarda önemli gelişmeler yaşanmakta ve gelecekte de bu alanda önemli miktarda inşaat malzemesi gereksinimi olacağı öngörülmektedir. Bu malzemeler arasında en yaygın kullanılanı betondur. Bu nedenle çevrenin sürdürülebilirliğini korumak için, çimento yerine sürdürülebilir alternatiflerin inşaat uygulamalarında kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir (Hamada ve diğ., 2020 ; Zeyad ve diğ., 2021).

Betona olan talebin ve kullanımın sürekli artması, çimento üretim ve kullanımına bağlı olan olumsuz etkilerin artmasına sebep olmuştur. Beton üretimi ve kullanımıyla ilişkili zararlı etkilerin azaltılması için, beton üretiminde kullanılan geleneksel malzemelerin yerine sürdürülebilir alternatiflerin kullanılması gerekmektedir. Farklı endüstriler tarafından üretilen çeşitli atık malzemeler, çimentonun üretiminde kullanılan geleneksel malzemelerin yerine sürdürülebilir alternatifler olarak kullanılabilir. Çimento üretiminde sürdürülebilir bu tür atıkların kullanımı, çimentoya bağlı sera gazı emisyonları, maliyet

ve doğal hammadde tüketiminde önemli bir azalma sağlayacaktır (Almutairi ve diğ., 2021 ; Mikulčić ve diğ., 2016).

Alüminosilikat kaynak malzemelerin alkali aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimer, çimento yerine tamamen kullanılabilecek umut vaat eden bir alternatiftir. Geopolimer ismi ilk kez 1970'lerin sonunda yılında Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır. Geopolimer çimentonun bağlayıcı bileşimi, alüminosilikat öncüllerinden ve alkali aktivatörlerden oluşmaktadır (Thomas ve diğ., 2022). Bununla birlikte, geopolimer ham maddeleri (alüminosilikat malzemeler) genellikle diğer endüstriyel işlemlerden gelen atık yan ürünlerden (uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi) oluştuğundan, maliyet (%30'a kadar azalma) ve sera gazı emisyonları (%80'e kadar azalma) açısından daha sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir (Nawaz ve diğ., 2020). Ayrıca, yapılan kapsamlı yaşam döngüsü değerlendirmeleri sonucunda, geopolimer betonunun geleneksel portland çimentolu betona alternatif olarak kullanımı, küresel ısınma etkisi ve sürdürülebilirlik potansiyeli açısından portland çimentolu betondan daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, alternatif aktivatörlerin ve yerel olarak temin edilebilen alüminosilikat öncülerin kullanımıyla daha önemli sürdürülebilirlik iyileştirmeleri sağlanabileceği ortaya çıkmıştır (Almutairi ve diğ., 2021).

Geopolimer beton, geleneksel portland çimentolu betona kıyasla inşaat sektöründe nispeten yeni bir malzemedir ve davranışı hakkında oldukça sınırlı bilgi mevcuttur. Karışımı ve yapısal tasarımı için belirlenmiş bir kılavuz yoktur. Bunun nedeni, geopolimer betonun performansına ilişkin gerçekçi ve işlevsel bir veri tabanının henüz oluşturulmamış olması ve tasarım yönergelerinin hazırlanabileceği temelin olmamasıdır. Son zamanlarda geopolimer betonu keşfetmek için kapsamlı araştırmalar yapılmış olsa da bu araştırmalar henüz geopolimer betonu laboratuvar malzemesinden endüstriyel bir malzemeye dönüşümü için yeterli değildir. Bununla birlikte, geçmişte çoğu araştırmacı, malzemenin pratik uygulamada kullanımı için önemli bir etken olan yapısal davranışını göz ardı ederek, geopolimer kompozitlerin mikro ölçekli mekanik özelliklerine odaklanmıştır (Asghar ve diğ., 2023). Bu nedenle, bu çalışmanın geopolimer beton üzerine odaklanmış olup, tamamen endüstriyel yan ürünler kullanarak geopolimer beton üretmeyi amaçlamıştır. Bu şekilde geliştirilecek sürdürülebilir bir beton türüyle, atık bertarafı konusunda etkin bir çalışma ve çimento üretimi esnasında çevreye verilen

zararın azaltılması yönünde bir adım atılması hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda, farklı alanlardan gelen çeşitli atık malzemelerin betonda kullanılması ile daha çevreci, ekonomik, dayanıklı ve dayanımına erken ulaşan bir beton üretimi planlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın bir diğer hedefide, literatürde hakkında çok az bilgi bulunan, atık cam tozunun geopolimer betonda kaynak malzeme olarak kullanımı hakkında bilgi sağlamaktır. Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak geopolimer betonda kullanılan her parametrenin etkisi ayrı ayrı incelenerek, böylece geopolimer beton literatürüne önemli bilgiler sağlanmıştır.

Bu tezin amacı, endüstriyel yan ürün olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), uçucu kül (UK) ve atık pencere camı tozu (ACT) ile üretilmiş geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesidir. Bu amaçla, yüksek fırın cürufu, uçucu kül alüminosilikat kaynak malzemeleri ile %80:%20 ÖYFC/UK oranından %50:%50 ÖYFC/UK oranına değişen K1(%80ÖYFC%20UK), K2(%70ÖYFC%30UK), K3(%60ÖYFC%40UK) ve K4(%50ÖYFC%50UK) bağlayıcı karışımları hazırlanmıştır. Sonrasında Taguchi deneysel tasarım metoduna göre; K1, K2, K3 ve K4 bağlayıcı karışımları olmak üzere 4 farklı bağlayıcı karışım, %40ACT, %30ACT, %20ACT, %10ACT olmak üzere 4 farklı atık cam tozu oranı, 1 nolu (6294 cm²/gr), 2 nolu (1 ve 3 nolu cam tozu eşit oranda karışımı), 3 nolu (2616 cm²/gr) ve 4 nolu (1001 cm²/gr) olmak üzere dört farklı inceliğe sahip atık cam tozu, 6M, 8M, 10M ve 12M olmak üzere dört farklı sodyum hidroksit molaritesi ve 45°C, 60°C, 75°C ve 90°C olmak üzere dört farklı ısı kuru kürleme ile 5 farklı parametrede 4 farklı seviye (level^{parametre}:4⁵) ile çalışarak optimum değerler bulunmuştur. Daha sonra, Taguchi deneysel tasarım analizi sonucu elde edilen optimum değerler kullanılarak genel performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucu tasarlanan optimum beton karışımı üretilip ve deneyler tekrarlanarak optimum karışımın doğruluğu kontrol edilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneler üzerinde slump (çökme), basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, yoğunluk (gr/cm³), su emme, kılcal su emme (sorptivite), magnezyum sülfat atağı (MgSO₄) direnci, dinamik elastisite ve statik elastisite deneyleri; geopolimer harç numuneler üzerinde ise priz süresi tayini ve rötre deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, Scanning Electron Microscope (SEM) ve Energy Dispersive X-Ray (EDX) analizleri ile geopolimer beton numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Ek olarak, tüm geopolimer betonlar için maliyet ve CO₂ emisyonu analizleri de gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yüksek Fırın Cürufu

Günümüzde çelik sanayisinin en büyük sorunlarından birisi küresel ısınmaya ve doğal afetlere neden olabilecek CO₂ emisyonudur (Fernández-Duque ve diğ., 2017). Çelik endüstrisinden kaynaklı CO₂ emisyonu yıllık yaklaşık 3,0 GT ile toplam küresel CO₂ emisyonların yaklaşık % 7-9'unu oluşturmaktadır. Bir ton çelik başına yaklaşık 2200 kg CO₂ emisyonu açığa çıkmaktadır. Bu nedenle CO₂ emisyonlarını azaltmak için yeni teknolojilere, farklı üretim proseslerine ihtiyaç vardır (Chen ve diğ., 2023).

Metal imalat endüstrisinde kullanılan farklı fırınlarda üretilen cürufların kimyasal bileşenleri ve üretim hızları çeşitlilik göstermektedir. Tablo 2.1 metal cüruflarının kimyasal bileşimlerini ve üretim hızlarını vermektedir (Barati ve diğ., 2011).

Tablo 2.1. Üretim şekillerine göre cürufların kimyasal bileşenleri ve üretim miktarı (Barati ve diğ., 2011)

Üretim prosesi	Cüruf Kimyasal bileşenleri						Cüruf sıcaklığı (°C)	Cüruf miktarı/ham çelik (t/t)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeOx		
Yüksek Fırın	30-56	28-38	8-24	1-18	0,5-2	0,5-1	1450	0,275
Basit oksijen fırını	45-60	8-22	1-7	5-17	2-14	10-35	1300	0,126
Elektrik ark ocağı	35-60	9-20	2-9	5-15	1-8	15-30	1550	0,169
Pota ocağı	30-60	2-35	5-35	1-10	0-5	0,1-15	1300	0,030

Metal üretim sektöründeki bir diğer önemli husus ise yüksek termal sıcaklıklara sahip şekilde açığa çıkan cüruftan enerji geri kazanımıdır. Ancak eriyik cüruf, çimento sanayisinde hammadde olabilmesi için hızla soğutularak amorf granüler yapıya hale getirilmektedir. Yüksek kalsiyum ve silikat içerikleri ile cürufların, özellikle yüksek fırın cüruflarının çimentolu malzeme olarak kullanımları artmaktadır. Beton üretiminde çimento yerine ikame edilen cürufun, sonradan betonun genleşmesini önlemek için camsı (amorf) olması gerekmektedir. Bu nedenle granülasyon süreci, katılaşma esnasında cürufun yavaş soğumasını ve kristalleşmesini önleme amacıyla, ıslak (soğutma) granülasyon veya kuru (soğutma) granülasyon olarak uygulanır (Barati ve diğ., 2011).

Yeterince güçlü hidrolik özelliklerine sahip amorf cüruf elde edebilmek için 10 °C/sn soğutma hızı gereklidir (Liu ve diğ., 2010).

Küresel çelik üretimi 2021 yılında 1,95 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Her bir ton dökme demir başına yaklaşık 0,3 ton yüksek fırın cürufu açığa çıkmaktadır. Atık YFC'nin depolanması arazilerin işgal edilmesine yol açmakta, ayrıca atık cüruf içerisindeki zararlı içerikler yağmur suyu ile toprağa karışması halinde YFC'yi çevreye ve insan sağlığına zararlı hale getirecektir. Sürdürülebilir kalkınma açısından YFC'nin işlenmesi çelik endüstri için önemli bir yer tutmaktadır. Kimyasal içeriği ve özellikleri bakımından YFC temel olarak inşaat alanında beton ve alkali aktifleştirilmiş çimentomsu malzeme olarak kullanılır (Chen ve diğ., 2023).

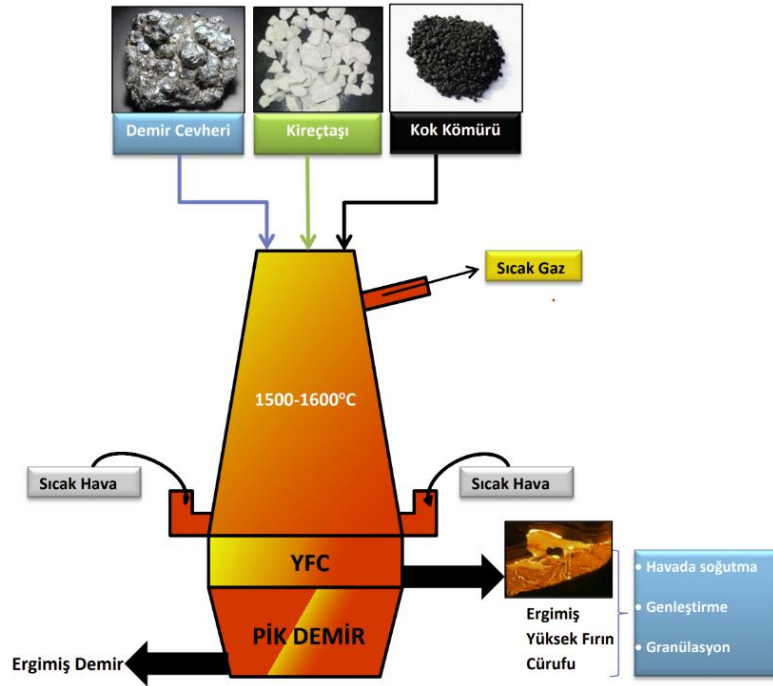
YFC, yüksek fırında demir üretim sürecinin ana yan ürünlerinden biridir, fırınlarda magmatik haldeki metal eriğinden ayrılan yüksek fırın cürufu esas olarak CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO içerir (Chen ve diğ., 2023). Eriyik halde toplanan YFC hızlı şekilde bir su havuzunda veya güçlü su jetleri ile soğutulduğunda gizli hidrolik özelliklere sahip, granüler, amorf ve camsı bir forma dönüşür (Pal ve diğ., 2003). Granüle cüruf ince öğütüldüğünde alkali aktifleştiriciler veya portland çimentosuyla birlikte kullanımı mükemmel çimentomsu özellikler vermektedir (Özbay ve diğ., 2016).

YFC'nin hidrasyon süreci çimentodan farklıdır. YFC su ile temas ettiğinde, yüzeyde hızla kalsiyum bakımından yetersiz bir alümino-silikat koruyucu film tabakası oluşup, sadece az miktarda kalsiyum ve alüminyum iyonları suda çözülecektir. Bu nedenle YFC'nin ilk hidrasyonu alkali aktifleştiriciler kullanılmadan çok zayıftır (Özbay ve diğ., 2016). YFC'nin hidrasyon reaksiyonunu hızlandırmak için aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na₂SiO₃), sodyum sülfat (Na₂SO₄) gibi alkaliler veya silikatlı çimento kullanılmaktadır (Yang ve diğ., 2022 ; Jin ve diğ., 2020 ; Zhao ve diğ., 2023).

2.1.1. Yüksek Fırın Cürufunun Üretim Süreci

Yüksek fırın cürufu, yani demir cürufu, yüksek fırınlarda demir ile eş zamanlı üretilir. Sıvı demir elde etmek için demir içerikli hammaddeler (demir oksit, demir cevheri gibi) oksit içerikli hammaddeler (kireçtaşı veya dolomit), yakıt ve indirgeyici hammaddeler

(kömür, kok gibi) yüksek fırının üstünden verilerek birlikte yakılır. Yüksek fırındaki bu işlem sonucu metalden daha hafif olan ve sıcaklığı 1400 ile 1600 °C arasında olan eriyik haldeki cüruf pik demirin üstünde kalır ve cüruf alma deliğinden dışarı alınır (Piatak ve diğ., 2015 ; Yıldız, 2019 ; Bailera, 2023). Şekil 2.1’de YFC’nin ve pik demirin üretim süreci verilmiştir (URL-1).



Şekil 2.1. YFC ve pik demir üretim süreci (URL-1)

Erimiş demir cürufu (YFC) atmosferik koşullarda hava soğutmalı (yavaş soğutma), kontrollü su ile ılımlı soğutma (genleştirme), havada hızlı soğutma (pelet) veya yüksek basınçlı su ile hızlı soğutma (granüle) yolları soğutulabilir. Soğutma hızı ve yöntemi YFC’nin özelliklerini etkileyerek kullanım şeklini değiştirir. Hava soğutmalı YFC yoğun ve sert yapısı ile inşaat agregası, asfalt agregası ve stabilizasyon malzemesi olarak, genleştirilmiş YFC düşük yoğunluğu sebebiyle hafif agrega olarak, granüle YFC amorf yapısı, güçlü çimentomsu özellikleri ile beton ve çimento üretiminde kullanılabilir (Piatak ve diğ., 2015 ; Tokyay ve Erdoğan, 2011).

Hızlı soğutma ile granül hale getirilen YFC bağlayıcı olarak kullanılmadan önce kurutulmalı ve öğütülmelidir. Mıknatıslama işlemi öğütmeden önce ve sonra cüruf içerisindeki kalan demiri almak için yapılır. YFC erken yaşlarda yüksek çimentolu aktivite göstermesi için portland çimentosuna kıyasla daha ince öğütülür (Özbay ve diğ.,

2016). Öğütülmüş YFC'nin inceliği, YFC'nin beton kompozitlerde erken dayanım gelişimini ve su ihtiyacını etkileyen çok önemli bir parametredir (Pal ve diğ., 2003). Bilindiği gibi çimentoya benzer şekilde puzolanlarında inceliği arttıkça reaksiyon aktivitesi artmaktadır (Özbay ve diğ., 2016).

2.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri soğutma proseslerine göre farklılık göstermektedir. Şekil 2.2'de farklı soğutma işlemleri sonucu üretilen yüksek fırın cürufları verilmiştir (URL-1).



Şekil 2.2. Farklı üretim süreçleri sonucu YFC'ler a) Genleştirilmiş YFC, b) Granüle YFC, c) Öğütülmüş YFC (URL-1).

Eriyik haldeki YFC'nin çimentoya, betona ve alkali aktivasyon ürünlerine uygun değerli hammaddelere dönüştürmek için granülasyon ve öğütme işlemi gereklidir (Yüksel, 2018 ; Saedi ve diğ., 2019). Granül YFC amorf kaba kum boyutlarında olup tanecik boyutu değişkenlik gösterse de ortalama 1 ile 1,5 mm arasındadır (Yüksel, 2018). Tablo 2.2'de Türkiye Ereğli Demir Çelik işletmelerinden alınan granüle YFC, nehir kumu ve kırma taş agregasının fiziksel özellikleri verilmiştir (Yüksel ve diğ., 2007 ; Özkan ve diğ., 2007).

Tablo 2.2. Granüle YFC, nehir kumu ve kırma taşın fiziksel özellikleri (Yüksel ve diğ., 2007 ; Özkan ve diğ., 2007)

Özellik	Granüle YFC	Nehir kumu (0-7mm)	Kırma taş
Gevşek birim ağırlık (kg/m ³)	1052	1930	1850
Kompakt birim ağırlık (kg/m ³)	1236	1950	1910
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,08	2,60	2,78
Su emme (%)	8,30	2,30	1,80
Kil miktarı(%)	1	4	0,24
Kızdırma kaybı (%)	1,8	5,00	5,20
Hafif parçacıklar (%)	3,00	4,00	2,00

Öğütülmüş YFC (ÖYFC) beyaza yakın veya kirli beyaz bir renge sahiptir özgül ağırlığı yaklaşık 2,9 (g/cm³), birim hacim ağırlığı 1200 ile 1300 kg/m³ arasındadır. Öğütülmüş YFC'nin inceliği çok önemli bir parametredir, reaktiviteyi kontrol eden incelik spesifik yüzey alanı ile ölçülmektedir. Genel olarak artan incelikle birlikte daha iyi mukavemet gelişimleri görülür fakat ekonomik ve performans durumlar incelendiğinde belirli sınırlandırmalar getirilmiştir. ÖYFC spesifik yüzey alanı ülkeden ülkeye değişmekle beraber ABD'de 450-550 kg/m², Kanada'da yaklaşık 450 kg/m², Birleşik krallık'ta 375-425 kg/m² ve Hindistan'da 350-450 kg/m² olarak kullanılmaktadır (Pal ve diğ., 2003 ; Yüksel, 2018).

Hidrolik aktivite (HA) yüksek fırın cürufunun bir diğer önemli değişkenidir. Tablo 2.3'de cürufun hidrolik aktivitesinin tahmin edebilmek için çeşitli formüller verilmiştir. Ancak hidratasyon reaksiyonlarının çok daha karmaşık olması nedeniyle cürufun dayanım performansını belirlemede bu formüllerin yeterli olmadığı görülmüştür. Cürufun reaktivitesini camısı içeriği, kimyasal bileşim, mineralojik bileşim, incelik ve aktivasyon türü gibi etkenlerin etkilediği görülmüştür (Pal ve diğ.,2003).

Tablo 2.3. ÖYFC'nin hidrolik aktivitesi için önerilen formüller (Pal ve diğ.,2003)

Seri numarası	Formül	İyi performans için gerekli oran	Tercih edilen
1	CaO/SiO ₂	1,3-1,4	1
2	(CaO+MgO)/SiO ₂	>1,4	1
3	(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	1,0-1,3	1
4	(CaO+0,56 Al ₂ O ₃ +1,4 MgO)/SiO ₂	≥1,65	2
5	(CaO+MgO+Al ₂ O ₃)/SiO ₂	≥1,0	3

YFC'nin kimyasal kompozisyonu esas olarak CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve MgO olmak üzere 4 farklı bileşenden oluşmaktadır. Cürufunların hidrolik aktivitesi CaO, Al₂O₃ ve MgO içeriğinin artması ile artarken SiO₂ içeriğinin artması ile azalmaktadır. Bu bağlamda YFC'nin hidrolik aktivitesinin (HA) tahmin edilebilmesi için çeşitli formüller üretilmiştir. En yaygın kullanılan (CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂ oranıdır. Bu formül için her

ülke farklı oranları kabul etmiştir. Örneğin Almanya 1,0 oranı kabul edilirken, Japonya da bu oran 1,4 kabul edilmiştir (Yüksel, 2018). Avrupa standardı ENV 197-1:1992 ve British standardı (CaO+MgO)/SiO₂ formülünü esas almış kütlece oranın 1,0'ı geçmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu oran cürufta yüksek alkalinite sağlar ve bu oran sağlanmadığı durumlarda cüruf hidrolik olarak inaktif olacaktır (Pal ve diğ., 2003).

Cürufun kimyasal bileşimi hidrolik aktivite üzerinde kilit bir rol oynar, kimyasal açıdan cüruflar baziklik indekslerine göre iki gruba ayrılmıştır. Araştırmacılar farklı baziklik indeksleri tanımlamıştır, bunlardan en basit olanı CaO/SiO₂ oranıdır. Metalurji uzmanları cürufu bazik ve asidik olarak iki sınıfa ayırmıştır; cüruf ne kadar bazikse alkali aktivatörlerle hidrolik aktivitesi o kadar fazladır, sabit baziklikte Al₂O₃ oranı artmasıyla dayanım artar ve CaO içeriğindeki eksiklik daha fazla miktarda MgO ile telafi edilebilir. CaO'ın yerini alan MgO'ın etkisi hem cürufun bazikliğine hem de MgO içeriğine bağlı olarak değişmektedir. %8-10 MgO içeriği güç gelişimine küçük etkiler yaparken daha yüksek içerik miktarı olumsuz etkiler yapmaktadır. Yapılan farklı çalışmalarda CaO/SiO₂ oranının artması ile hidrolik aktivitenin arttığı bulunmuştur (Pal ve diğ., 2003).

YFC'nin yaklaşık %35-50 CaO, %30-35 SiO₂, %8-15 Al₂O₃ ve kayda değer miktarlarda FeO, MgO ve TiO kimyasal bileşenlere sahip olması YFC'nin alkali aktif çimento olarak kullanımına olanak vermiştir (Marvila ve diğ., 2023). Bununla birlikte alkali aktif çimento için CaO/(SiO₂+Al₂O₃) oranının 1'den büyük olması gerekmektedir (Provis, 2014 ; Marvila ve diğ., 2021). Bu parametre (CaO/(SiO₂+ Al₂O₃)) hidrolik modül olarak adlandırılmış, araştırmacılar en tatmin edici sonuçları hidrolik modül oranı 1'in üzerindeyken bulmuştur. Ayrıca CaO/SiO₂ oranının yükselmesiyle (genellikle 1,5 üzeri) alkali aktivasyonun düştüğünü açıklanmıştır (Marvila ve diğ., 2023).

Cürufun camsı içeriği hidrolik aktivite için en önemli ve en kritik değişken olarak kabul edilir. Söndürme sırasında vitrifikasyon derecesini birkaç faktör etkilese de cürufun doğasını etkileyen en önemli değişken fırından boşaltıldığı sıcaklıktır. Camsı içeriğini belirleyen söndürme hızı cürufu çimentolarının dayanım özelliklerini etkileyen etkili faktördür. Reaktivite için camsı bir yapı gerekli olmasına rağmen camsı içeriği ile hidrolik aktivite arasında kesin bir korelasyon bulunamamıştır. Araştırmalar %30 ile %65 arası camsı içeriğe sahip cürufların hala uygun olduğunu ve minimum camsı içeriğinin belirlenemediğini göstermektedir. Bu belirsizlikler nedeniyle, çoğu standart cürufun

aktivitesini camısı içeriği yerine mukavemet özelliklerini esas alınarak değerdendirmiştir (Pal ve diğ.,2003).

YFC'nin camısı içeriği BS 6699:1992'e göre %67'den az olmamalıdır (Gutt, 1992). BS 6699:1992'nin yerini alan Avrupa standardı BS EN 15167-1'e göre cürufun minimum camısı içeriği 3'te 2 olmalıdır (BSI, 2006). Genel olarak cürufun tatmin edici özellikler göstermesi için minimum camısı içeriğinin %90 olması gerekmektedir (Siddique ve Kaur, 2012).

YFC'nin kimyasal kompozisyonu üretilirken kullanılan hammaddelerin kompozisyonuna bağılıdır. YFC nin ana bileşenleri, kompozisyonun %95'ini oluşturan CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve MgO bileşikleridir (Yüksel, 2018). Tablo 2.4'te farklı bölgelerde üretilen YFC'lerin bileşik kompozisyonunu vermiştir.

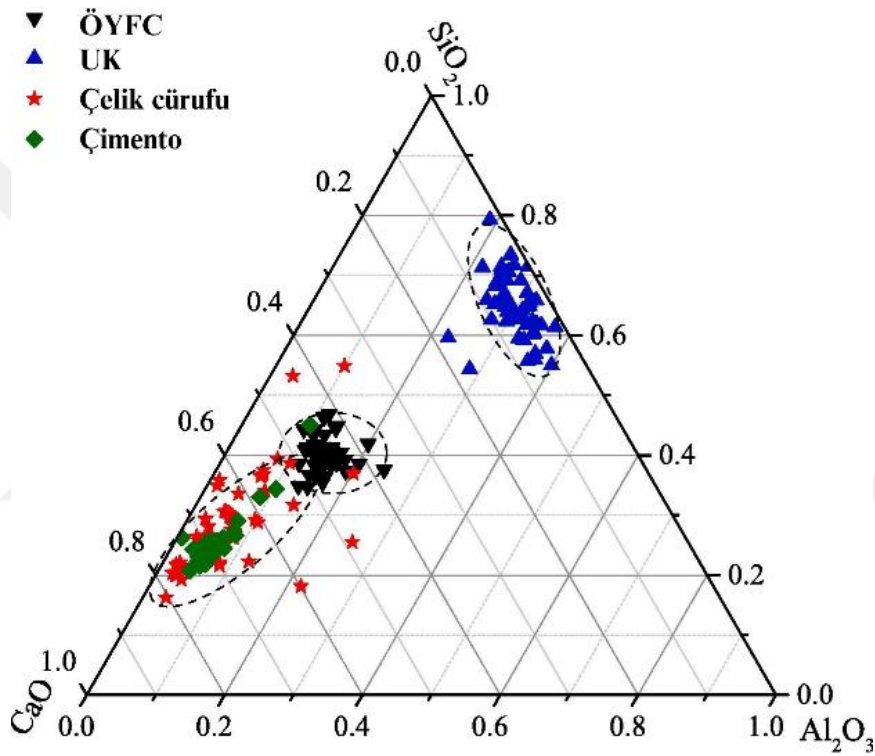
Tablo 2.4. Farklı bölgelerde üretilen YFC'nin ana bileşenleri (Wu ve diğ., 2022)

Bölgeler	Ana kompozisyon (%)				CaO/SiO ₂
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	
Çin	32,0-35,0	35,0-39,0	11,6-14,4	9,0-10,6	1,0-1,2
Kuzey Amerika	34,6-39,9	35,5-42,8	6,6-11,5	7,0-13,1	0,9-1,2
Orta ve güney Amerika	33,5-34,8	39,1-43,8	10,0-13,0	5,9-9,9	1,1-1,3
Batı Avrupa	32,0-39,4	34,9-44,3	9,5-12,5	5,5-12,4	1,0-1,3
Doğu Avrupa	33,5-41,5	36,9-47,5	5,5-12,4	2,5-11,2	0,9-1,3
Hindistan, Japonya, GAC*, Avustralya	32,6-36,9	33,0-43,0	10,2-19,3	4,9-13,8	0,9-1,3
Küresel	32,0-41,5	33,0-47,5	5,5-19,3	2,5-13,8	0,9-1,3

*GAC: Güney Afrika Cumhuriyeti

Tablo 2.4'te görüldüğü gibi YFC'nin kimyasal bileşimleri değişmekte fakat bazlılık oranı (CaO/SiO_2) 0,9 ile 1,3 aralığında değişmektedir. Dünya genelinde CaO oranı %33 ile %47,5 arasında, SiO_2 oranı ise %32 ile %41,5 arasında değişmektedir. Bölgeden bölgeye kimyasal kompozisyon değişse de bazlılık oranı önemli oranda değişmemektedir (Wu ve diğ., 2022).

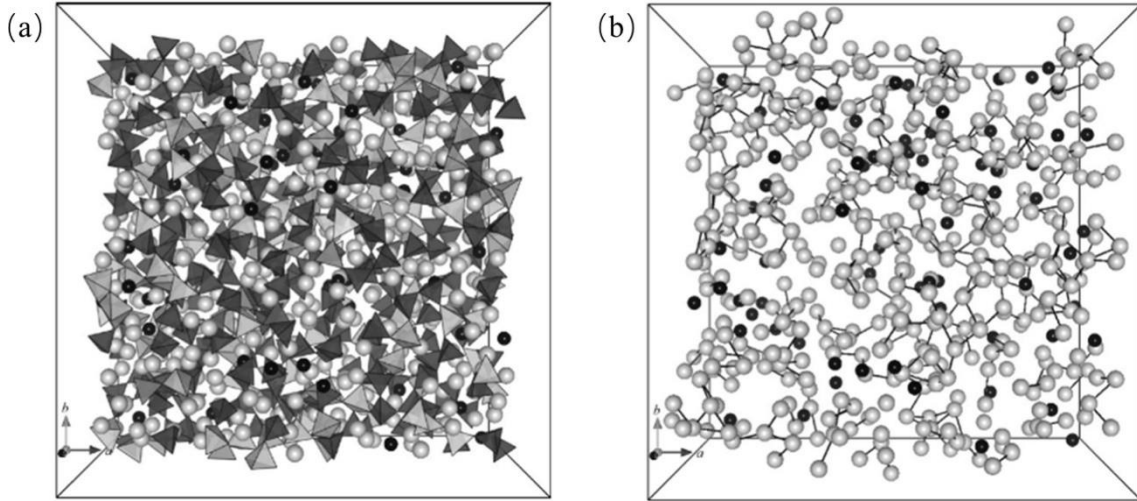
Şekil 2.3'te çelik cürufu, çimento, ÖYFC ve UK'nin $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ üç fazlı diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3. $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ üç fazlı diyagramı (Zhao ve diğ., 2023)

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi ÖYFC ve çimento genel olarak aynı alanda bulunmaktadır. Ancak ÖYFC'nin su ile karıştırıldığında ilk reaksiyonu çimento'ya kıyasla çok daha yavaştır. ÖYFC'nin çimento ile birlikte reaksiyonu ise çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidroksil iyonlarına ve çimento içeriğindeki alkali iyonların amorf cüruf yapısını çözmesine bağlı olarak değişmektedir. Araştırmacılar, çimento ile ÖYFC'nin birlikte kullanıldığı durumlarda iki aşamada hidratasyonun gerçekleştiğini açıklamıştır. Buna göre hidratasyon sırasında baskın reaksiyon alkali hidroksit ile olurken daha sonraki reaksiyonlar kalsiyum hidroksit ile gerçekleşmektedir (Pal ve diğ., 2003 ; Özbay ve diğ., 2016).

Shimoda ve Saito (2007) kompleks yapılı $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ dörtlü bileşimlerine sahip YFC'lerin mikro yapısını moleküler dinamik simülasyonu ile incelemiştir. İnceleme sonucunda YFC'nin depolimerize SiO_3 ve AlO_4 tetrahedra ağları ile Ca^{2+} ve Mg^{2+} katyonlarına sahip olduğunu gösterilmiştir. şekil 2.4'te YFC içerisindeki ara yer Ca ve Mg atomları ile depolimerize SiO_3 ve AlO_4 tetrahedra ağını temsil eden bir atomik yapılandırma görüntüsü verilmiştir.



şekil 2.4. a) Camsı yüksek fırın cürufunun atomik yapılandırma görüntüsü, b) 3,5 Å içerisindeki Ca ve Mg görüntüsü, (Beyaz ve koyu gri sırasıyla SiO_4 ve AlO_4 birimlerini, siyah ve beyaz toplar ise sırasıyla Mg ve Ca atomlarını gösterir. *Atomik görselleştirme programı (VICS-II) ile çizilmiştir.) (Shimoda ve Saito, 2007).

Ayrıntılı moleküler dinamik simülasyon YFC'nin mikro yapılarını araştırmak ve fizikokimyasal özelliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca yapısal özelliklerinin yanında difüzyon, termal genleşme gibi dinamik özellikler hakkında da atomistik bir bakış açısıyla eşsiz bilgiler sunmaktadır (Shimoda ve Saito, 2007). Moleküler dinamik simülasyon, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi gibi diğer mikro yapı inceleme sonuçları ile uyumu sonuçlar vermektedir (Liu ve diğ., 2022)

2.2.2. Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları

YFC insan yaşamı için sağlık riski oluşturmayan tehlikeli olmayan malzeme olarak tanımlanır. Cüruftaki metal konsantrasyonları topraktaki konsantrasyonlara kıyasla yüksek olmasına rağmen, cüruftaki metaller cüruf matrisine sıkı bir şekilde bağlıdır ve kolaylıkla yıkanmamaktadır (Proctor ve diğ., 2000). Avrupa cüruf derneği YFC'yi çok

yönlü kullanımı sebebiyle atık veya yan ürün yerine pik demirin yan ürünü olarak tanımlanmıştır. YFC'nin inşaat mühendisliği alanındaki uygulamaları cürufun nasıl işlendiği, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile yakından ilgilidir (Wu ve diğ., 2022).

Cüruf araştırmaları genel olarak yeniden kullanım ve çevresel etkiler olmaz üzere iki kategoriye ayrılabilir. Cürufun yeniden kullanımı ilgili çalışmalar ise cürufun inşaat malzemesi olarak kullanımı, cüruftan metal geri kazanımı ve cürufun çevresel iyileştirme uygulamalarında kullanımı olmak üzere üç ana alana ayrılır. Bununla birlikte, cüruf üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla demir cürufları üzerine yapılmış olup, cürufun geoteknik özelliklerini mühendislik ve inşaat perspektifinden tanımlamakta ve test etmektedir (Piatak ve diğ., 2015).

Soğutulmuş YFC'nin çimento ikamesi, beton agregası, yol temel malzemesi gibi sayısız kullanım alanı ve uygulaması vardır. Genellikle YFC'nin çimento ve beton için kullanılmaktadır. Örneğin Avrupa'da YFC'nin %85'i çimento ve beton üretiminde kullanılmıştır (Wu ve diğ., 2022). Yüksek camsı içeriği ile YFC, portland ve yüksek fırın cürufu çimentolarında kullanılmaya uygundur. YFC'nin çimento üretiminde kullanımı CO₂ emisyonunu düşürmek için büyük potansiyele sahip olması YFC kullanımına olan ilgiyi giderek arttırmaktadır, %40 çimento klinkeri ile yer değiştirilen yüksek fırın cürufu CO₂ emisyonunu %22 oranında düşürmektedir (Flower ve diğ., 2007). YFC'nin çimento üretiminde kullanılmasıyla doğal hammadde tüketimini oldukça düşürmekte daha düşük enerji gerekmektedir (Grubeša ve diğ., 2016). 1 ton portland çimentosu üretmek için 5000 MJ enerji gerekirken, 1 ton ÖYFC üretimi için 1300 MJ enerji gerekmektedir. Ayrıca 1 ton portland çimentosu üretiminde 1 ton CO₂ emisyonu açığa çıkarken, ÖYFC üretiminde ise 0,07 ton CO₂ emisyonu açığa çıkmaktadır (Cabeza ve diğ., 2013). Bununla beraber granüle (su ile soğutma) YFC yerine peletlenmiş (hava ile soğutma) kullanılması durumunda gerekli enerji miktarı düşmektedir (Grubeša ve diğ., 2016). Çevresel ve ekonomik katkıları nedeniyle YFC ile çimento üretimine olan talebin giderek artması beklenmektedir (Wu ve diğ., 2022).

Çimento endüstrisinde yüksek fırın cürufu kullanımı cürufu çimento olarak isimlendirilmiştir. Avrupa çimento standartlarında (EN 197-1:2011) çimento kütlesine göre farklı oranlarda cüruf içerebilir. Tüm bu çimentolar öğütülmüş çimento klinkeri ve YFC karışımlarından oluşmaktadır. Granüle YFC, kütlege en az 3'te 2 oranında kalsiyum

oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO₂) içermelidir. Ayrıca (CaO + MgO)/SiO oranı 1'i geçmelidir. Yüksek fırın cürufu çimentosu üretilmesindeki amaç portland çimentosuna (CEM I) eşit ve aynı gereksinimleri karşılaması beklenir (Grubeša ve diğ., 2016). Çimentodaki cüruf miktarına bağlı olarak YFC çimentosu ile üretilen beton daha geç priz alır ve daha uzun süre dayanım artışına sahiptir. Ayrıca soğuk derzleri önlemeyi kolaylaştıran düşük hidratasyon ısısına ve daha düşük ısı artışlarına sahiptir. Bu durum hızlı sertleşmenin istendiği durumlarda olumsuz etkiler yapabilir (Nandagawali ve Dhamge, 2014). Yapılan çalışmalar YFC'li çimentoların mukavemeti arttırdığı, geçirgenliği azalttığı, kimyasal saldırılara karşı direnci arttırdığı, inşaat demiri korozyonunu önlediğini göstermiştir. Ayrıca donma çözülme ve deniz suyuna karşı yüksek dirence sahiptir (Grubeša ve diğ., 2016). EN 197-1:2011 ve EN14216:2004'e göre yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen çimento türleri ve bileşimleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Yüksek fırın cürufu içeren çimentolar ve bileşimleri (kütlece % olarak) (Grubeša ve diğ., 2016 ; Yeğınobalı ve Ertün 2011)

Başlıca türler	Ortak çimento türleri		Ana bileşenler (kütlece %)			
			Klinker	Yüksek fırın cürufu	Diğer bileşenler	Ek bileşenler
CEM II	Portland-cüruf çimentosu	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	0-5
CEM III	Yüksek fırın cürufu çimentosu	CEM III/A	35-64	36-65	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	0-5
	Sülfata dayanıklı yüksek fırın çimentosu	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	0-5
		CEM III/C-SR	5-19	81-95	-	0-5
CEM V	Kompozit çimento	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	31-49	0-5
VLH III	Çok düşük ısı yüksek fırın cürufu çimentosu	VLH III/B	20-34	66-80	-	0-5
		VLH III/C	5-19	81-95	-	0-5
VLH V	Çok düşük ısıda kompozit çimento	VLH V/A	40-64	18-30	18-30	0-5
		VLH III/B	20-38	31-50	31-50	0-5

EN 197-1:2011'e göre çimentonun aşırı derecede sülfat direncine sahip olabilmesi için yüksek fırın cürufu içermesi gerekmektedir. Sülfat dirençli çimentolar topraktaki sülfat varlığı nedeniyle temel yapılarında kullanılmaktadır (Bhatt ve diğ., 2014). YFC kullanılarak üretilen çok düşük ısılı çimentolar nükleer atıkların kapsüllenmesi için üretilen harçlar gibi dayanımından ziyade ısı açığa çıkmasının önemli olduğu uygulamalarda kullanılır (Grubešave diğ., 2016).

Süper sülfat çimentosu YFC'nin bir diğer kullanım alanı olup granüle YFC, hidrate olabilen kalsiyum sülfat alçısı (dehidrate:CaSO₄.H₂O, yarımhidrat:CaSO₄.1,5H₂O ve anhidrat:CaSO₄) ve az miktarda portland çimentosu klinkeri ile karışımından oluşur. Tablo 2.6'da EN15743'göre süper sülfat çimentosu içeriği verilmiştir (Grubeša ve diğ., 2016).

Tablo 2.6. Süper sülfat çimentosu bileşimleri (kütlece %) (Grubeša ve diğ., 2016)

Başlıca türler		Ana bileşenler (kütlece %)		Ek bileşenler (kütlece %)	
		Yüksek fırın cürufu	Kalsiyum sülfat	Klinker	Diğer
SSÇ	Süper sülfat çimentosu	≥75	≥5; ≤20	>0; ≤5	≥0; ≤5

Süper sülfat çimentosu agresif maddelere (sülfatlar, klorürler, alkali hidroksitler, deniz suyu ve zayıf asitler gibi) karşı mükemmel direnç gösterir ve düşük hidratasyon ısısına sahiptir. Yüksek mukavemet gösteren bu çimento deniz yapılarında, yeraltı sularına maruz kalan betonlarda ve kimya tesislerinde kullanılmaktadır. Ancak portland çimentosuna kıyasla karbonatlaşmaya karşı daha hassastır, bu nedenle ilk kürleme işlemi daha dikkatli yapılmalıdır (Grubešave diğ., 2016).

Yüksek fırın cürufu betonda bağlayıcı veya agrega olarak kullanılabilir. Bir bağlayıcı olarak çimento ile kütlece yaklaşık %70-80 oranında yer değiştirebilir ve her %10 çimento ikamesinde beton üretimi kaynaklı CO₂ emisyonlarında %9-10'luk bir azalma sağlayabilir (Tsai ve diğ., 2014).

Betonda ÖYFC kullanımı taze ve sertleşmiş özellikleri etkilemektedir. Çimentonun ÖYFC ile yer değiştirmesi betonda daha fazla işlenebilirlik sağlar ve vibrasyona olan ihtiyacı azaltır. Eşdeğer işlenebilirlik için %10 daha az su gereklidir (Yüksel, 2018).

ÖYFC içeren taze beton hareket için daha az enerjiye gerek duymakta, böylece pompalama, kalıplama, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri daha kolay olmaktadır. Ayrıca ÖYFC'li betonlar daha uzun süre işlenebilirliğini korumaktadır (Vaclavic ve diğ., 2012). ÖYFC'nin kısmen çimento yerine ikame edilmesi beton priz sürelerini uzatmaktadır. 23 °C altındaki sıcaklıklar beton priz sürelerinde önemli gecikmeler beklenebilir. Priz süresinin uzama oranı beton başlangıç, sıcaklığı ortam sıcaklığı, kullanılan karışım oranları, s/ç oranı, kullanılan çimentonun özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır (Berndt, 2009 ; Yüksel, 2018). Beton durabilite özellikleri cürufun hidrolik özelliklerinden etkilenmektedir. ÖYFC'nin ikincil hidratasyon yaparak kılcal gözenekleri kapatması, sıradan çimentolu betona kıyasla daha düşük geçirgenlik ve difüzyon katsayısı sahip olmasını sağlarken, beton mikro yapısını daha yoğun hale getirerek klorür iyonlarının geçişini zorlaştırır. Ayrıca YFC'li betonların düşük hidratasyon ısısı kütle betonlarda termal çatlamayı azaltabilir. ÖYFC ile dayanımı geliştirilen betonların su geçirmez yapılar, barajlar, deniz yapıları, köprüler gibi özel uygulama sahalarında kullanımı kolaylaştırır (Grubešave diğ., 2016 ; Song ve Saraswathy, 2006).

Cürufli betonunun dayanımları cürufsuz betona kıyasla 3 veya 7 gün gibi erken yaşlarda dezavantajlı olsa da 28 gün ve sonrasında avantajlıdır, çünkü cürufli beton dayanım kazanmaya devam etmektedir. Cürufli beton 7 ile 28 gün arasında cürufsuz betonun dayanımına yaklaşmakta, sonrasındaki yaşlarda daha yüksek dayanımlar vermektedir. Cüruf ikame oranının %70 olduğu özel betonlar dışında hazır beton üretiminde %50 ye kadar çimento ikamesi yerine cüruf kullanılabilir. ÖYFC içeren betonların mikro yapıları dayanım özellikleri ile uyumlu gelmiş, cürufli betonların mikro yapıları daha az geçirimli, daha küçük gözeneklere sahip, daha yoğun yapıdır (Yüksel, 2018).

Betonda agrega olarak kullanılan YFC, genellikle ince agreganın yerini alır ve betonun özelliklerini iyileştirebilir. Betonda iri agrega yerine kullanılan YFC beton basınç dayanımını artırır, betonun işlenebilirliğini azaltır. Bununla birlikte, iri cüruf agregalı beton yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır (Grubešave diğ., 2016).

Beton üretimine benzer şekilde YFC harç üretiminde de kullanılmakta ve olumlu etkilere sahiptir. Yapılan çalışmada harçta optimum cüruf ikamesi %40 olarak bulunmuş, bu oranda portland çimentolu harç ile yapılan kıyaslamaya göre 180 gün sonunda %19 daha

yüksek basınç dayanımı ve %25 daha yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir (Islam ve diğ., 2011).

YFC'nin, çimento ve beton uygulamalarının yanı sıra bağımsız bağlayıcı olarak kullanımı araştırılmıştır. YFC'nin bağlayıcı özellikleri alkali aktifleştiriciler ile arttırılmaya çalışılmıştır. Bu durumda yeni üretilen cürufli malzeme alkali aktifleştirilmiş cüruf ya da alkali ile aktifleştirilmiş cüruf çimentosu olarak isimlendirilmiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş çimento, bir alkali aktivatörün doğal veya yapay bir malzemede bir veya daha fazla reaksiyonu başlatarak malzemeye çimentomsu özellikler kazandırmasına denilmektedir (Grubešave diğ., 2016). Betonda üretimindeki CO₂ emisyonuna karşı 1960'lerden beri bilinen alkali aktif çimentolar yeşil beton için adaylardan biridir (Provis, 2014). Ayrıca alkali aktif çimento kullanılarak beton üretilmesi durumunda CO₂ emisyonlarında genellikle %55 ila %75 oranında azalma sağlanabileceği gösterilmiştir (Yang ve diğ., 2013).

Alkali ile aktive edilen ÖYFC'lerin özellikleri, işlenebilirliği, priz süresi, dayanıklılığı ve mukavemeti, alkali aktivatörün türü, alkali aktivatörün konsantrasyonu, çözelti oranı, cüruf türü ve inceliği, su/kaynak malzeme oranı, kütleme koşulları, alkali aktifleştirici çözelti/cüruf oranı ve lif kullanım durumu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Alkali aktif çimentolu kompozitlerde kür sıcaklığı alkali çözelti türü ve miktarı, su/katı oranı, mukavemet gelişimi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Portland çimentolu kompozitlere kıyasla alkali aktif çimentolu kompozitlerin hızlı mukavemet gelişimi, düşük ısı salınımı, sülfata ve asit saldırısına karşı yüksek direnç, kimyasal direnç, düşük su emme gibi birçok avantajı olması alkali ile aktifleştirilmiş cüruf üzerinde yapılan çalışmaları önemli oranda attırmıştır (Grubešave diğ., 2016 ; Marvilla ve diğ., 2023 ; Zhu ve diğ., 2018).

Tüm avantajlarına rağmen alkali aktif çimentolu kompozitlerin yüksek büzülme, hızlı priz alma, yüksek karbonatlaşma, alkali aktivatörlerin pahalı olması, alkali aktivatörlerin CO₂ emisyonları gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Zhu ve diğ., 2018 ; Abdalqaderve Al-Tabbaa, 2016). Bununla beraber çevreci, sürdürülebilir ve daha düşük maliyetlerde alkali aktif çimento üretebilmek için alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat yerine daha ucuz ve doğal olan sodyum karbonat (Na₂CO₃) kullanılarak tatmin edici sonuçlar bulunmuştur (Abdalqaderve Al-Tabbaa, 2016).

Tüm bu uygulamaların yanında YFC, gaz beton üretimi, tarımsal uygulama ürünleri, toprak stabilizasyonu, yol yapımı (asfalt agregası, beton yol agregası, temel agregası gibi), CO₂ tutucu adsorban, çok işlevli kompozitler, yeni yapı malzemeleri (cam seramik, cüruf yünü), çeşitli katalizörlerin üretimi gibi çok farklı alanlarda kullanılmıştır (Abdalqaderve Al-Tabbaa, 2016; Duan ve diğ., 2022 ; Chen ve diğ., 2023).

2.2. Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde kömür tozlarının yanmasıyla açığa çıkan, baca gazları ile taşınan, mekanik ve elektrostatik ayırıcılar tarafından toplanan bir yan üründür (Toniolo ve Boccaccini, 2017). Çok ince (0,5 ila 150 mikron) ve küresel şekilli kül tanecikleri baca gazları ile taşınabilmeleri nedeniyle uçucu kül olarak isimlendirilmiştir (Türker ve diğ., 2009).

Kömür artan enerji tüketimine bağlı olarak %38 ile küresel enerji üretiminin en büyük yakıt kaynağıdır (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023). Amerika enerji bilgi idaresi raporunda küresel enerjinin yaklaşık %40'ının kömürden üretildiğini ayrıca Çin ve Hindistan gibi ülkelerde kurulan yeni termik santraller ile bu oranın giderek artacağını ifade etmiştir (Gollakota ve diğ., 2019). Kömür külünün ana bileşeni olarak açığa çıkan uçucu kül, tüm dünyada ciddi miktarlarda üretilmektedir (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023). Her geçen yıl katlanarak artan, önemli miktarda uçucu kül birikmesi çevre üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir, bu nedenle geri kullanım miktarının iyileştirilmesi gerekmektedir (Zhang ve diğ., 2023).

Artan enerji ihtiyacına paralel olarak yüksek miktarda kömürün kullanımı 2005 yılında 500 milyon ton olan uçucu kül üretimini 2015 yılında 750 milyon tona çıkartmıştır. Artan üretime rağmen küresel uçucu kül kullanımı toplam üretimin 4'te 1'ine tekabül etmektedir. Avrupa %47 ile ilk sırada yer alırken, ABD %39 ile ikinci sırada yer almaktadır (Gollakota ve diğ., 2019). Kullanılmayan fazla uçucu kül depolama alanlarında, çöplüklerde, havuzlarda biriktirilmektedir. Büyük UK yığınları sadece yer kaplamakla kalmaz alkali ve tuz içeriği ile arazilerin tuzlanmasına neden olur. Uygun olmayan şekillerle bertaraf edilen uçucu kül ağır metal zehirlenmesi ve eser elementlerin sızıntısı gibi sebeplerle su ve toprak kirliliğine sebep olmaktadır. Ayrıca rüzgâra maruz kalan uçucu küller havaya yayılarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Sürdürülebilir

kalkınma ve geri dönüşüm ekonomi için uçucu külün geri dönüşümde kullanılması çok önemlidir (Huang ve diğ., 2023 ; He ve diğ., 2021).

Türkiye’de yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 24 milyon tondur. Üretilen uçucu külün yaklaşık %10’u geri dönüşümde kullanılmış, %90’ı uygun veya uygun olmayan koşullarda bertaraf edilmiştir. Tablo 2.7’de Türkiye’de ve dünyada uçucu kül üretimi ve kullanım miktarları verilmiştir (Kaya, 2016).

Tablo 2.7. Dünyada uçucu kül üretimi (Kaya, 2016)

ÜLKE	UK üretimi (Milyon ton)	UK kullanımı (Milyon ton)	Kullanım Oranı (%)
Türkiye	24,0	2,4	10,0
Avustralya	13,1	6,0	45,8
Amerika	118,0	49,7	42,1
Kanada	6,8	2,3	33,8
Çin	395,0	265	67,1
Avrupa birliği	52,6	47,8	90,9
Hindistan	105,0	14,5	13,8
Japonya	11,1	10,7	96,4
Orta doğu/Afrika	32,2	3,4	10,6
Asya	16,7	11,1	66,5
Rusya	26,6	5,0	18,8
Toplam	800,1	417,9	52,2

2.2.1. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

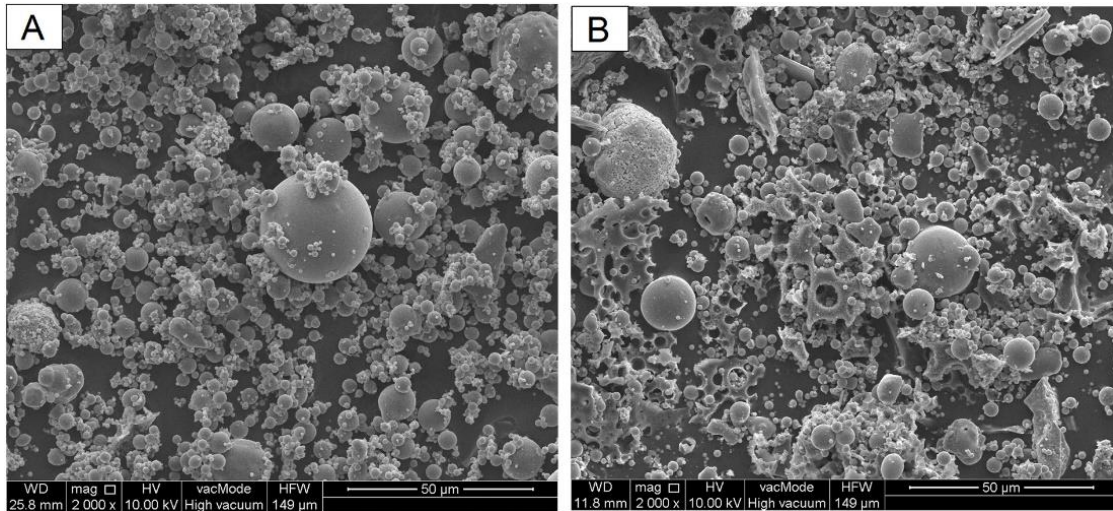
Uçucu külün fiziksel ve kimyasal bileşimleri yakılan kömür tipine, yanma koşullarına, soğutma koşullarına, UK toplama cihazlarının konfigürasyonuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Ayrıca uçucu külün metal oksit içeriği kullanılan kömür türüne göre değişmektedir. Bununla birlikte tüm uçucu küllerin zengin SiO₂ ve Al₂O₃ kaynakları olduğu bilinmektedir (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023).

Uçucu külün fiziksel görünümü (renk) yanma işleminden sonra içerisindeki yanmamış karbon yüzdesine bağlı olarak koyu kahverengiden açık griye kadar değişmektedir. UK’nin rengi ne kadar açıksa karbon içeriği o kadar düşük, renk ne kadar koyu ise karbon

içeriği o kadar yüksek demektir. Düşük karbon ve eser miktarda kalsiyum içeren linyit ve alt bitümlü kömürlerden üretilen UK daha grimsi iken, yüksek karbon içeren antrasit ve bitümlü kömürlerden üretilen UK daha koyu renklidir. Ayrıca linyit ve alt bitümlü kömürlerden elde edilen UK'nin daha büyük partiküllü ($>0,075$ mm), bitümlü ve antrasit kömürlerden elde edilen UK'nin daha küçük partiküllü ($<0,075$ mm) olduğu görülmüştür (Gollakota ve diğ., 2019).

Morfolojik olarak UK parçacıkları katı veya içi boş, genellikle amorf (camsı) yapı ve çoğunlukla küresel şekillidir. İçi boş küreler cenospheres (senosfer) olarak isimlendirilir ve senosferler içerisinde plerospheres olarak isimlendirilen daha küçük küreler bulundurabilir. UK'lar içerisindeki karbon derecesine bağlı olarak şekilsiz partiküller içermektedir. Uçucu kül genellikle 2,1 ila 3,0 arasında değişen özgül ağırlığa ve 170 ila 1000 m²/kg arasında değişen özgül yüzey alanına sahiptir (Ahmaruzzaman, 2010 ; Grabias-Blicharz ve Franus, 2023).

Camsı küresel partiküllerin ve yanmamış kömür parçacıklarını gösteren UK'nin taramalı elektron mikroskobu (SEM) Şekil 2.5'te görülmektedir. UK içeriğindeki yanmamış karbon miktarına bağlı olarak bej, gri ve siyah renklerinde olabilmektedir (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023).



Şekil 2.5. UK SEM görüntüleri A) F sınıfı UK, B) Yüksek karbon içeren UK (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023)

UK'nin kimyasal özelliklerini önemli oranda etkileyen kimyasal kompozisyon, farklı ısıtma değerleri, kül miktarı ve jeolojik köken bakımından dört farklı sınıf (antrasit,

bitümlü, alt bitümlü ve linyit) kömür vardır. Tüm kömür türlerinde ana bileşen olarak farklı miktarlarda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO 'dur Tablo 2.8'de farklı kömür türlerinden üretilen UK'nin kimyasal bileşimi verilmiştir (Gollakota ve diğ., 2019 ; Ahmaruzzaman, 2010).

Tablo 2.8. Farklı kömür türlerinden üretilen UK'nin kimyasal bileşimi (Gollakota ve diğ., 2019)

Kimyasal bileşik (kütlece%)	Bitümlü	Alt bitümlü	Linyit	Antrasit
SiO_2	20-60	40-60	15-5	43,5-47,3
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25	25,1-29,2
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15	3,8-4,7
CaO	1-12	5-30	15-40	0,5-0,9
MgO	0-5	1-6	3-10	0,7-0,9
Na_2O	0-4	0-2	0-6	0,2-0,3
K_2O	0-3	0-4	0-4	3,3-3,9
SO_3	0-4	0-2	0-10	-
TiO_2	0,5	1,1-1,2	0,23-1,68	1,5-1,6
P_2O_5	0,02	0,3-0,5	-	0,2
MnO	0,02	0,1	0,04-0,21	0,1
S	0,08-0,67	0,7	-	0,1
Kızdırma kaybı	0-15	1,8-2,7	0-5	8,2

Tablo 2.8'de gösterildiği gibi linyit ve alt bitümlü kömürlerden elde edilen UK'lar bitümlü ve antrasit kömürlere kıyasla daha yüksek CaO içeriğine ve daha düşük kızdırma kaybına sahiptir (Gollakota ve diğ., 2019).

ASTM C618-19'a göre uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Bunlar ağırlıkça %70'den fazla $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeren ve %5'in altında CaO içeren UK'ler F sınıfı, ağırlıkça %50 ile 70 arasında $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeren sahip ve %20'den yüksek CaO içeren UK'ler C sınıfı olarak tanımlanır. F sınıfı uçucu kül antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilir, alkali malzemelerle kimyasal olarak yüksek oranda

reaktifdir ve puzolanik özellikler gösterir. C sınıfı UK is linyit veya alt bitümlü kömürlerden üretilir ve çimentomsu özelliklere sahiptir. Her iki sınıf uçucu külde belirgin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin farklı olması sebebiyle farklı şekillerde kullanılmaktadır. Tablo 2.9’da ASTM C618-19’a göre UK’nin sınıflandırılması verilmiştir (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023).

Tablo 2.9. ASTM C 618-19’a göre UK’nin özellikleri (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023)

Uçucu kül özellikleri	Kimyasal özellikler					Fiziksel özellikler	
	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ + SiO ₂ (%)	CaO (%)	SO ₃ (maksimum %)	Nem içeriği (maksimum %)	Kızdırma kaybı (maksimum %)	İncelik (45 µm elekte kalan maksimum %)	Su gereksinimi (maksimum %)
F Sınıfı	>70	<5	5	3	6	34	105
C sınıfı	50–70	>20	5	3	6		

UK’nin ASTM C618-19 sınıflandırmasının yanı sıra, BM, Kanada, Rusya ve EN450 standardına uygun AB sınıflandırmaları mevcuttur. Ayrıca blaine’e göre (özellik yüzey alanı) sınıflandırma, granülometreye göre sınıflandırma, serbest CaO içeriğine göre, kimyasal içeriğe göre sınıflandırma gibi farklı sınıflandırma metotları da geliştirilmiştir (Grabias-Blicharz ve Franus, 2023 ; Vassilev ve Vassileva, 2007).

UK için sınıflandırma şekilleri ülkeye göre değişmektedir. Uçucu küller için Çin ve ABD’nde birinci önemli husus CaO içeriği, Japonya da performans ve Avrupa standartlarında ise incelik ve kızdırma kaybı dikkate alınır (Jin ve diğ., 2021).

TS EN 197-1’e göre uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılmıştır. Reaktif silis miktarı %25’ten fazla, CaO miktarı %10’dan az UK’ler V sınıfı, reaktif silis miktarı %25’ten fazla, CaO miktarı %10’dan fazla olan UK’ler W sınıfı olarak tanımlanır. V sınıfı uçucu küller küresel tanecikli ince bir toz halinde olup, esas olarak SiO₂ ve Al₂O₃’ten oluşan ve kalan kısmını demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenlerin oluşturduğu puzolanik özelliklere sahip UK’lerdir. W sınıfı ise ince bir toz halinde olup, esas olarak CaO, reaktif SiO₂ ve Al₂O₃’ten oluşan ve kalan kısmını demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenlerin oluşturduğu hidrolik veya puzolanik UK’lerdir (Türker ve diğ., 2009).

Tablo 2.10. Türkiye termik santrallerinde elde edilen UK'ların kimyasal bileşenleri, TSE ve ASTM standartlarına göre sınıflandırılması verilmiştir (Kaya, 2016)

Termik Santral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	TSE	ASTM
Su gözü	18,69	5,61	2,52	62,68	2,63	0,77	2,73	0,13	W	C
Çatalağzı	58,75	25,24	5,76	1,46	2,22	4,05	0,08	0,6	V	F
Soma	42,82	20,82	4,57	23,45	1,74	1,31	1,47	0,32	W	C
Çayırhan	49,13	15,14	8,25	13,2	4,76	1,76	3,84	2,2	V	F
Seyitömer	54,49	20,58	9,27	4,26	4,48	2,01	0,52	0,65	V	F
Tunçbilek	59,06	17,27	12,44	1,68	4,54	1,15	0,6	0,3	V	F
Orhaneli	48,53	24,61	7,59	9,48	2,28	2,51	2,48	0,35	V	F
Kemerköy	25,2	12,58	5,98	38,49	1,27	1,18	13,88	0,41	W	C
Kangal	34,29	14,94	4,25	30,82	2,08	0,97	7,02	0,61	W	C
Afşin-Elbistan A	18,27	9,16	3,26	53,44	1,75	0,38	11,42	0,19	W	C
Yatağan	59,06	17,27	12,44	1,68	4,54	1,15	0,6	0,3	V	F
Yatağan	51,5	23,08	6,07	10,53	2,42	2,54	1,32	0,77	W	F

2.1.2. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Uçucu külün geri dönüşümde kullanılması birçok nedenden dolayı gereklidir. Bunlar, bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi, bertaraf için gerekli izin gereksinimlerine ve depolama alanlarına olan ihtiyacın azaltılması, yan ürün satışından elde edilecek finansal gelirler ve yan ürün olarak kullanılabilecek uçucu küllerin az bulunan veya pahalı olan hammadde yerine kullanılabilir olmasıdır (Ahmaruzzaman, 2010).

Uçucu kül başka bir endüstriyel kaynak yerine, sürece veya uygulamaya dahil edilerek kullanılabilir. Bunlarla sınırlı olmamak üzere; çimento üretiminde, beton üretiminde, yapısal dolgu ve enjeksiyon, kaplama malzemesi, yol inşaatlarında dolgu ve alt temel malzemesi, hafif agrega üretimi, sızdırmazlık bariyeri ve yer altı boşluk doldurma malzemesi, maden ıslahlarında, baca gazı temizliğinde adsorban olarak, cıva emisyonunda, tuğla üretiminde, toprak stabilizasyonu, gübre üretimi, su ve çevresel iyileştirmelerde, PVC üretimi, geopolimer üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Ahmaruzzaman, 2010 ; Kaya, 2016).

Vassilev ve Vasileva, uçucu külleri kökenlerine, mineral ve kimyasal bileşimlerine, özelliklerine ve davranışlarına göre farklı sınıflandırma yöntemleri geliştirmiş, sınıflandırmış uçucu küllerin uygun ve potansiyel kullanım alanlarını açıklamıştır. Buna göre, farklı sınıflarda UK'ler asit madeni ıslahı, aside dayanıklı malzeme üretimi, asit ve alkali dirençli malzeme üretimi, portland çimento üretiminde hammadde, radyoaktif malzemeleri korumak için yüksek yoğunluklu beton üretimi, bağlayıcı, tuğla üretimi, Al'nin geri kazanımı, asidik suyun nötralizasyonu, zeolitlerin sentezi, mullit sentezi, harç üretimi, kendiliğinden yayılan harç üretimi, alkali aktivasyon, geopolimerlerin sentezi gibi potansiyel kullanım alanları gösterilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, temel ve uygulamalı bir sistem ile detaylı şekilde sınıflandırılan uçucu küllerin kullanım açısından daha başarılı olacağını ifade etmiştir (Vassilev ve Vasileva, 2007).

Uçucu kül puzolanik ve çimentomsu özellikleri ile betonda portland çimentosunun yerini alabilecek bir çimento katkısı olarak yaygın olarak kullanılır (Dikmen ve diğ., 2019)

Dünya çapında yaklaşık 780 milyon ton yıllık üretimi, işlenebilirliği arttıran yapısı, yüksek düzeyde amorf silisyum ve alüminyum içeriği nedeniyle geopolimerizasyona uygun ve en çok kullanılan atık malzemedir (Toniolo ve Boccaccini, 2017 ; Feng ve diğ., 2015).

İnşaat sektörü açısından uçucu kül kullanımı atık bertarafı ve CO₂ emisyonu azaltması gibi çevresel faydalarının yanı sıra betonda işlenebilirliği arttıran, hidrasyon ısını ve erken dönem termal çatlamayı azaltan, ilerleyen yaşlarda mekanik ve dayanıklılık özelliklerini arttırıcı yönde etkiler yapmaktadır (Ukwattage ve diğerleri, 2015 ; Şahmaran ve Li, 2009). Betonda UK kullanımı ile olumlu özellikler elde edilmesine rağmen, çeşitli sebeplerle betonda UK kullanımı %100 oranında olamamaktadır (Vargas ve Halog, 2015).

Uçucu küldeki serbest kireç içeriği, betonda erken priz ve daha yüksek erken yaş dayanımını sağlamaktadır. Ancak, UK'deki yüksek oranlı serbest kireç ile basınç dayanımındaki gelişmenin önemi azalmaktadır. Çünkü, UK'deki yüksek alkalinite beton içerisinde genişleyen (jel ürünlerinin şişmesiyle) bir alkali silika reaksiyonunu beraberinde getirir (Nayak ve diğ., 2022).

F sınıfı UK, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan CH (portlandit) ile reaksiyona girerek ortamdaki mevcut CH'yi bitirmek suretiyle sülfat direncini artırır. UK ile reaksiyona giren CH'ler sülfatlarla reaksiyona giremez hale gelir ve alüminosilikat hidrat bileşiklerinin oluşumu engellenmiş olur. Fakat C sınıfı (kireç bakımından zengin) uçucu kül kendi CH'sini üretebilir bu şekilde sülfat saldırısına maruz kalma ihtimali artar. Buradan düşük kalsiyumlu UK içeren betonların yüksek kalsiyumlu UK içeren betonlara kıyasla sülfat saldırısına daha dirençlidir sonucu çıkartılabilir. Sülfat atağına benzer şekilde beton dayanıklılığını etkileyen bir diğer etken de alkali silika reaksiyonudur (ASR) (Hemalatha ve Ramaswamy, 2017).

Daha önceki çalışmalar düşük kalsiyumlu UK'nin yüksek kalsiyumlu UK'ye göre daha etkili olduğunu açıklamıştır (Ali Akbar Ramezaniyanpour, 2014). Daha önceki çalışmalar, yüksek CaO içeren UK'nin, genellikle F sınıfı veya düşük kireç içeren UK ile karşılaştırıldığında alkali silika reaktivitesini (ASR) ve sülfat saldırısını kontrol etmede daha az etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek kalsiyumlu uçucu külün %60 oranına kadar kullanımıyla, ASR'yi kontrol altında tutmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Ayrıca yüksek kalsiyumlu UK kullanımlarında ASR ve sülfat direncindeki dezavantajın silis dumanı ikamesi ile giderilebileceği bildirilmiştir (Thomas ve diğ., 1999).

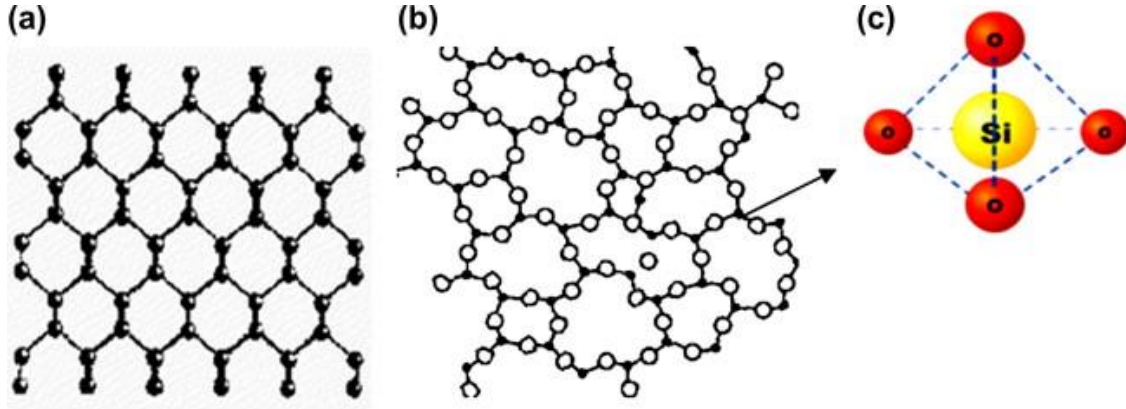
2.3. Cam

Cam önemli bir inorganik malzemedir. Yüksek optik şeffaflık, üstün mekanik performans, kimyasal ve termal direnç, düşük geçirgenlik gibi mükemmel özellikleri ile cam; optik, seramik, biyolojik, fotonik ve optoelektronik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam dünyada çok yönlü kullanılan malzemelerden biridir (Xin ve diğ., 2023 ; Axinte, 2011 ; Lu ve diğ., 2017).

Camın kullanımı eski mısıra kadar uzanmaktadır. Bununla birlikte birinci sanayi devrimi ile üfleme ve döküm mekanizasyonu gelişene kadar camın hem üretimi hem de kalitesi önemli ölçüde iyileştirilememiştir. Günümüzde cam endüstrisinde enjeksiyon döküm, şerit döküm ve tel çekme gibi ileri imalat teknikleri kullanılmaktadır. 2021 yılında küresel cam imalat sanayisinin büyüklüğü 120,3 milyar ABD doları ve pazar talebi 195.989,5 kilotona (kt) ulaşmıştır (Xin ve diğ., 2023).

2.3.1. Camın Yapısı

Katı maddeler (metaller) genel olarak üç boyutlu periyodik (kristal) yapıya sahiptir. Bununla birlikte, rastgele üç boyutlu yapılara sahip katılarda mevcuttur, bu katı maddelere amorf veya camsı yapılı denir (Axinte ,2011). Şekil 2.6'da katı maddelerin yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. a) Kristal yapı b) Amorf - düzensiz yapı c) Silis bazlı camın moleküler yapısı (Axinte, 2011)

Metal alaşımları ve organik polimerler gibi birçok malzeme özel koşullar altında amorf yapılı olabilmektedir. İnorganik amorf ve camsı katılar, sıvıların kristalleşmeyi engelleyecek kadar hızla soğutulması (yüksek hızla soğutma) ile elde edilmektedir (Axinte ,2011).

Oksit bileşiğin oksijeni (anyon) ile katyonu arasındaki ilişki cam oluşturma kabiliyetini etkilemektedir (Axinte, 2011). Cam imalatında kullanılan oksitler 3 grupta incelenir. Tablo 2.11'de cam üretiminde kullanılan oksit türleri verilmiştir.

Tablo 2.11. Cam üretiminde kullanılan oksit türleri (Güzel, 2020 ; Özgüden, 2019 ; Axinte, 2011)

Oksit türleri		
Cam oluşturuıcı oksitler	Ara oksitler	Ağ değiştirici oksitler
SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
B ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	Li ₂ O
GeO ₂	ZrO ₂	BaO
P ₂ O ₅	TiO ₂	CaO
V ₂ O ₅	PbO	SrO
As ₂ O ₃	BeO	Na ₂ O

Amorf iç yapının oluşmasını sağlayan oksitlere cam yapıcı, (cam oluşturucu, ağ oluşturan) oksitler denir (Özgüden, 2019). Cam oluşturucu oksitler camın oluşumu için gerekli ağ yapısını oluşturmaktadır ve cam oluşturmalar olmadan camın üretilmesi mümkün değildir (Güzel, 2020).

Yaygın olarak bilinen cam oluşturucu (SiO_2) silisyum dioksittir. Silis (SiO_2) bileşiği normalde kristalize yapılıdır. Soğutulmayla birlikte silis diğer cam oluşturucu oksitler gibi amorf yapılı hale gelir. Soğutulan silis rijit hale gelir ve katı bir madde gibi davranır. Fakat aslında soğutulmuş bir sıvıdır (Jiang ve Zhang, 2014). Oluşan bu yapıya camsı silis (cam gibi silis) denmektedir. Bir diğer cam oluşturucu oksit, B_2O_3 (bor oksit)'tir. Bor oksit'in tek başına kullanımı nadirdir. Bor oksit ve silisyum dioksit birlikte kullanıldığında camın ışığı kırma özelliği ve camın genişmesi azalmakta, ayrıca camın kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Fosfor oksit (P_2O_5), arsenik (As_2O_3), germanyum oksit (GeO_2) cam yapıcı sınıfına girmektedir, fakat yüksek hacimli ticari camların üretimlerinde yaygın kullanımları yoktur (MEB, 2013).

Ağ değiştirici oksitler yüksek ergime sıcaklıklarına sahip silisin ergime noktasını düşürerek cam oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ağ yapısını değiştiren bu oksitleri literatürde modifiye edici, tadil edici, ağ değiştirici gibi isimlerle görmek mümkündür (Güzel, 2020 ; Özgüden, 2019 ; Axinte, 2011 ; MEB, 2013).

Silis camına soda (Na_2O) ilave edilmesi camın ergime sıcaklığının düşürülmesini sağlayarak, silisin daha düşük sıcaklıklarda akıcı hale gelmesine olanak vermektedir. Yaygın kullanılan bir diğer ağ değiştirici oksit ise kireç (CaO)'tir. Cama CaO ilavesi ile camın kimyasal direnci arttırılmakta bu şekilde cama bozulmazlık kazandırılmaktadır. MgO 'te CaO gibi camın dayanıklılığı arttırmaktadır, fakat CaO kadar etkili değildir. Diğer ağ değiştirici oksitlerden K_2O ve Li_2O , Na_2O 'e benzer şekilde ergitici özellikler göstermekte ve Na_2O yerine kullanılabilir. ZnO ise CaO ve MgO gibi cama kararlılık kazandırmaktadır (MEB, 2013). Ağ yapısını değiştiren bu oksitler, camın vizkozitesini düşürmekte ayrıca kimyasal, optik ve ekonomik olarak avantajlar sağlamaktadır (Özgüden, 2019).

Ara oksitler kısmen cam oluşturucu kısmende ağ değiştirici oksitler gibi davranmaktadır. Ara oksitlerin görevi daha kolay bir şekilde camın işlenebilir hale getirilmesi,

kristallenme (devitrifikasyon) eğiliminin azalması ve sağlamlığın artması olarak ifade edilebilir. Ara oksitler, cam oluşturun ve ağ değıştirici oksitlerin görevini birlikte üstlenerek hem camın özelliklerini değıştirmekte hem de camın atomik ağ yağısını zenginleştirmektedir. Ara oksitler atomik yapıda yeni ağlar oluşturmayıp var olan yapılara katılmaktadır (MEB, 2013).

2.3.2. Camın Üretimi

Cam üretimi için gerekli olan şeyler hammaddeler (kuvars kumu, soda, kireç, feldspat, dolomit, boraks, borik asit, kurşun gibi) ve yüksek miktarda ısıdır. Arıtılmış kum (SiO_2) ve bazik oksitler (CaO , Na_2O , K_2O gibi) karıştırılarak gaz veya elektrik fırınlarında 1200 °C'nin üstünde bir sıcaklıkta ısıtılır. Esasen saf kuvarsın yumuşama noktası 1500 °C veya daha yüksek bir malzeme olmasına rağmen ilave oksitler (ağ değıştirici) ile çalışma sıcaklığı düşürölmektedir. Eritilen kompozisyon üfleme, kalıplama, döküm, enjeksiyon, ekstrüzyon ve tel çekme gibi tekniklerle cam parçaları olarak üretilmektedir (Axinte ,2011; Özgüden, 2019).

Hammaddelerin karıştırılmasından sonra eritme işlemi başlamadan atık cam kırıkları karışıma ilave edilmektedir. Atık camların yeni cam üretiminde kullanılması ekonomik ve çevresel olarak önemli faydaları sağlamaktadır (Özgüden, 2019).

Camın vizkozitesi cama şekilde vermek için oldukça önemlidir. Camlar oda sıcaklığında 10^{18} Pa.s ile çok yüksek vizkoziteye sahiptir (20 °C'su, 1 Pa.s vizkoziteye sahiptir). Öyleki oda sıcaklığında kristalleşme için gerekli olan atom hareketleri imkânsız hale gelmektedir. Fakat artan sıcaklıkla birlikte cam vizkozitesi azalır ve cam yeniden kristalleşebilir. Camın vizkozitesinin azalması ile birlikte özgül hacmi artar ve özgül yoğunluk azalır (Axinte ,2011 ; MEB, 2013).

Cam üretim sürecinde vizkozitesiyle ilgili 5 çok önemli sıcaklık noktası (standart noktalar) vardır ve bunlar nihai ürünün kalitesinde doğrudan rol oynamaktadır. (Axinte, 2011 ; Xin ve diğ., 2023).

Tablo 2.12'de Camın vizkozitesiyle ilgili standart noktaları ve bazı cam türlerinin bu noktalara karşılık gelen sıcaklıkları verilmiştir

Tablo 2.12. Camın standart noktaları (Axinte ,2011; Xin ve diğ., 2023)

Standard Noktası	Viskozite (Pa.s)	Kuvars Camı (°C)	Borosilikat Camı (°C)	Soda kireç camı (°C)	Özellikler
Çalışma noktası	10^3	~2100	~1270	~1030	Bu sıcaklık vizkozitenin cam şekillendirme için alt sınırıdır. Döküm işlemleri 10^3 Pa.s vizkozitenin altında yapılmaktadır.
Yumuşama noktası	$10^{6.6}$	~1730	~820	~725	Bu sıcaklıkta vizkozite camın kendi ağırlığını taşıyabilecek seviyededir. Bu sıcaklığın altında cam serttir ancak akış için biraz çaba yeterlidir.
Camlaşmaya geçiş noktası (cam geçiş sıcaklığı)	10^{12}	~1200	~525	~530	Camın elastik halinden katı hale (aşırı soğutulmuş sıvı) geçiş yaptığı sıcaklık aralığı
Tavlama noktası	$10^{13.4}$	~1140	~560	~550	İç gerilmeler dakikalar içerisinde giderilir
Katılaşma noktası	$10^{13.6}$	~1054	~518	~506	İç gerilmeler saatler içerisinde giderilir.

Cam oluşturulduktan hemen sonra şeklini koruyacağı, akmaya karşı koyabileceği bir sıcaklığın hemen üstüne kadar soğutulur. Bu noktada iç gerilmeleri azaltmak için tavlama işlemi yapılır. Eğer tavlama işlemi yanlış yapılırsa ortam sıcaklığına gelen cam kırılır veya çatlaklar (Axinte, 2011).

Ticari camlar ilave oksitler içeren silis camlarıdır. Karışımında bir veya daha çok bulunan oksit, oksitin türü ve oksitin miktarı cam tipini belirler. Ayrıca camın özellikleri ve kullanımı üzerinde büyük etkilere sahiptir. Örneğin karışıma metalik oksit ilave edilmesi camın rengini belirler. Demir oksit yeşil cam için, kobalt oksit mavi cam elde etmek için kullanılır. Erimiş cama titanyum oksit eklenmesiyle kristal cam seramik elde edilir. Titanyum oksit kristalleşmeyi başlatır ve elde edilen malzeme yaklaşık %96 oranında kristaldir (Axinte, 2011).

2.3.3. Camın Fiziksel Özellikleri

Camlar doğada çözünmeyen, yakılamayan inorganik ve metalik olmayan bir malzemedir. Camların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri farklı üretim süreçlerine ve kullanılan bileşimlerine bağlı olarak değişmekle birlikte genel bir görünüm verilebilir (Mehta ve Ashish 2020 ; Axinte, 2011).

- Camlar oda sıcaklığında çok yüksek vizkoziteye sahiptir.
- Camlar metallere göre daha serttir.
- Yüksek aşınma direnci ile oldukça dayanıklı bir malzemedir.
- Doğası gereği kırılmandır ve süneklikleri düşüktür.
- Pürüzsüz yüzey dokusuna sahiptir, hidrofobiktir.
- Düşük su emme oranı (%0,3-0,4) ile neme karşı dayanıklıdır.
- Termal genleşme katsayısı düşüktür.
- Isı (termal) iletkenlik katsayısı düşüktür
- Çok iyi elektrik yalıtkanlarıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek sünekliğe sahiptir.
- Yüksek saydamlığa sahiptir (Mehta ve Ashish 2020 ; Axinte, 2011 ; Güzel, 2020 ; Özgüden, 2019).

Camın yoğunluğu üretildiği bileşimlere göre değişmekle birlikte genel olarak 2,2-3,0 g/cm³ arasında değişmektedir. Bazı özel cam türlerinin yoğunluğu 8 g/cm³'e kadar ulaşabilmektedir. Yaygın kullanılan pencere camlarında ise yoğunluk ~2,5 g/cm³'tür. Benzer şekilde camların kırılma indisleri de camın yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kristal camların kırılma indisi 1,6 iken pencere camlarında kırılma indisi 1,5'tir. Ayrıca camlar %80 ila %98 arasında bir geçirgenliğe sahip olup çok yüksek saydamlığa sahiptir. Yüksek aşınma direnci gösteren camların genel olarak mohs sertliği 6-7 arasındadır, pencere camlarının ise mohs sertliği yaklaşık 5,5'tir. Camın aşınma dayanımı bileşimdeki SiO₂ ve B₂O₃ içeriğiyle artarken, Na₂O, CaO, PbO içeriğiyle düşmektedir. (Güzel, 2020 ; Özgüden, 2019).

Camların yüksek optik özellikleri, onları lens, mercek, gözlük camı, pencere camı, vitrin camı gibi camların üretilmesinde tercih sebebidir. Yüksek silisli camların çok düşük termal genleşme katsayılı olması, camları termal şoklara karşı yüksek derecede dirençli hale getirir, böylece laboratuvar cam aletleri (tüpler, imbikler), ampuller gibi cam türlerinin üretiminde tercih edilmektedir (Axinte, 2011). Camın ısı iletkenliği bileşimindeki potasyum, soda ve kurşun oksit içeriğiyle birlikte artmaktadır. Camın sıcaklığı ile birlikte ısı kapasiteside (ısı sığası) artmaktadır. Farklı cam türlerinin farklı sıcaklıklarda ısı kapasiteleri değişmekte, camların ısı kapasiteleri sıcaklık değişimleri ile değişmektedir (Özgüden 2019 ; Kılıçoğlu, 2013).

2.3.4. Camın Kimyasal Özellikleri

Cam kimyasal içeriği camın üretildiği oksitler ve kullanım alanlarına göre farklılık göstermektedir. Ticari olarak üretilen en önemli oksit camlar ve kullanım alanları:

- Soda-kireç cam (soda kireç silikat); içecek şişeleri, plaka camlar (pencere camı gibi), lamba camları, züccaciye camları
- Borosilikat cam; laboratuvar cam eşyaları, yalıtım, ısıya dayanıklı camlar, nükleer ve zehirli atık saklanması, LCD cam
- Kurşun cam (kurşun alkali cam); optik cam, kristal cam eşyalar, süs eşyaları, cam dolgu macunları, x-ışınlarından (radyasyondan) korunma
- Silikat cam (Vitrifiye silis); laboratuvar gereçleri, lazer reflektörü
- Alümina silikat cam; projeksiyon ampulleri, elektronik tüp, deşarj lambalarında, cam fiber üretiminde
- Vycor borosilikat camı; özel laboratuvar aletleri, uzay araçları, roketler, pişirme kapları, kurutma kapları
- Pyrex borosilikat cam (Borcam); laboratuvar camları, mutfak gereçleri, teleskop camları (Güzel, 2020 ; Tatar, 2006 ; Zimmer ve Bragança 2019)

Tablo 2.13’de farklı cam türlerinin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Tablo 2.13. Farklı cam türlerinin kimyasal bileşimleri (Harrison ve diğ., 2020)

Kimyasal Bileşimleri (%)	Soda-kireç camı			Borosilikat Cam	Kurşun Cam
	Şeffaf	Amber	Yeşil		
SiO ₂	73,2-73,5	71,9-72,4	71,3	70-80	54-65
Na ₂ O + K ₂ O	13,6-14,1	13,8-14,4	13,1	4-8	13-15
Al ₂ O ₃	1,7-1,9	1,7-1,8	2,2	7	-
MgO + CaO	10,7-10,8	11,6	12,2	-	-
SO ₃	0,20-0,24	0,12-0,14	0,05	-	-
Fe ₂ O ₃	0,04-0,05	0,30	0,56	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,01	0,43	-	-
B ₂ O ₃	-	-	-	7-15	-
PbO	-	-	-	-	25-30

Bir malzemenin dış etkenlere karşı gösterdiği direnç malzemenin kimyasal dayanıklılığı olarak tanımlanabilir. Camların çoğu kimyasal olarak dayanıklıdır. Kimyasal olarak dayanıklı olan camlar, yiyecekleri, içecekleri, ilaçları, kimyasal maddeleri korumak için kullanılmaktadır. Şişeler ve pencere camları uzun sürelerle hava etkilerine dayanabilmektedir (Kılıçoğlu, 2013).

Genellikle cam içeriğindeki alkali miktarının artması kimyasal dayanıklılığı azaltırken, boroksit, alüminyum oksit, zirkonyum oksit ve çinko oksit içeriğinin artması ile kimyasal dayanıklılık artmaktadır. Camların üretiminde ana bileşen olan silisin, su ve asit içerisindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Ancak tüm sıcaklıklarda dehidroflorik asit, yüksek sıcaklıklarda ise fosforik asit ve alkalın karışımlar tarafından hasar görebilir. Camın sadece silis ve alkali oksitler (Na_2O ve K_2O) ile kullanılarak üretilmesi durumunda ticari ismi cam suyu (sodyum silikat) olan suda çözünabilen alkali silikat camları elde edilir. Alkali silikat camlarının mühendislik uygulamalarında kullanımı kısıtlıdır. Bu tip camlar asitler ve alkali oksitler tarafından hasar görebilir (Özgüden, 2019 ; Tatar, 2006).

2.3.4. Camın Mekanik Özellikleri

Cam yapı gereği kırılğan ve mekanik tokluğu oldukça düşük bir malzemedir. Camın mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri camın üretimi için kullanılan kimyasal bileşimleridir. Camın kimyasal bileşimlerini değiştirerek mekanik özelliklerin iyileştirilmesi konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Camların mekanik özelliklerini etkilen bir diğer önemli husus ise cam yüzeyindeki çatlak ve kusurların derinliği yoğunluğu, geometrisi ve dağılımları olduğu görülmüştür. Cam yüzündeki kusur ve çatlaklar ne kadar fazla ise camın mukavemeti paralel olarak düşmektedir. Bu nedenle camın mekanik özelliklerini arttırmak için yüzey modifikasyon çalışmaları (ısı temperleme, kimyasal temperleme, yüzeyin kristalleştirilmesi gibi) yapılarak cam yüzeyde çatlak oluşumu ve yayılımı önlenmektedir. Ayrıca, cam mukavemeti camın kalınlığı ve camın çapı ile değişmektedir. Camların incilmesiyle mukavemeti düşmekte, çapı küçüldüğünde ise mukavemet artmaktadır. Örnek vermek gerekirse küçük çaplı numuneler ile dayanımın 50 MPa'dan 690 MPa'ya kadar yükseldiği, çok küçük çaplı cam fiberlerde ise dayanımın 3330 MPa'ya kadar yükseldiği görülmüştür. Yapılan özel çalışmalarla cam dayanımı 9810 MPa'ya kadar arttırılabilmektedir (Tatar, 2006 ; Güzel, 2020) .

Bir başka dikkat çeken husus, cam basınç yükü altında iken kırılma gerilmenin çekme bileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu durumda camın dış yükler altındaki davranışı çekme dayanımı ile açıklanmaktadır. Camların mekanik dayanımları içinde özellikle çekme dayanımları oldukça önemlidir. Teorik olarak camların çekme dayanımı hatasız olarak üretilen cam lifleri ile test edildiğinde 3000 MPa'ya ulaşabilmektedir. Pratikte ise camların çekme dayanımları eğilme testleri ile bulunmaktadır. Camın yüzeyine bağlı olarak eğilme testleri sonuçları 20 ile 200 MPa arasında gelmektedir. Dayanım, cam üretildikten hemen sonra en yüksek seviyesinde olup, artan yaş ile birlikte camın kimyasal etkiler ve aşınmaya bağlı olarak yüzey kusurları artmakta böylece dayanımı düşmektedir (Özgünden, 2019 ; Kılıçoğlu, 2013) .

Camın basınç veya darbeye karşı dayanımları bir başka mekanik özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Camlar gevrek yapılı olup, darbe ve şekil değişikliklerine dayanıklı değildir. Camların çekme dayanımı 20 ila 90 MPa, basınç dayanımı 500 ila 900 MPa, elastisite modülü 500 ila 900 MPa arasında gelmektedir. Poisson oranı ise 0,22'dir (Ertürk, 2019).

2.3.5. Atık Camların Geri Dönüşümü

Camın ana kullanım alanlarından biri olan içecek şişeleri gibi uygulamalarda tek kullanımlık olması camla ilgili büyük bir problemdir. 2016 yılında küresel kentsel katı atığının %5'inin atık camdan oluştuğu tahmin edilmektedir, küresel ve bölgesel olarak geri dönüşüm oranı değişiklik göstermektedir (Kaza ve diğ., 2018). 2017 yılında Avrupa %71,48, Slovenya ve Belçika %98, Türkiye %9, ABD %26,63 cam geri dönüşüm oranına sahiptir. Ayrıca ABD üretilen cam kapların %52,9'unu çöp sahasına atmıştır (Harrison ve diğ., 2020).

Cam teorik olarak tamamen geri dönüştürülebilir. Fakat camın yeniden üretimi ile ilgili bazı sınırlandırmalar vardır. Bu nedenle geri dönüştürülemeyen kısım genellikle depolama sahalarına atılarak bertaraf edilir. Dünya çapında depolama sahalarına atılan cam atıkların hacmi yılda yaklaşık 200 milyon tondur ve çok düşük geri dönüşüm oranına sahiptir (Mirzahosseini ve Riding, 2015 ; Jiang ve diğ., 2019). Cam atıkların biyolojik olarak çözünmez olması depolama sahalarındaki alanları kalıcı olarak işgal ederek, büyük çevre sorunlarına sebep olmaktadır (Mahmud ve Kashani, 2022). Yetersiz geri dönüşüm uygulamaları ile camın çöpe atılması, doğal kaynaklara olan ihtiyacı arttırmakta ve hızla

tükenmesine sebep olmaktadır (Harrison ve diğ., 2020). Atık camın geri dönüştürülmesi doğal kaynakların korumasının ve depolama yükünün azaltmasının yanı sıra CO₂ emisyonlarının düşmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Jiang ve diğ., 2019). Ayrıca atık camların geri dönüşümü için farklı yöntemler bulmak, doğal kaynakların ve depolama sahalarının uzun ömürlü olmasını sağlarken atık cam bertaraf maliyetlerini de azaltmaktadır (Harrison ve diğ., 2020).

Depolama alanlarına alternatif olarak atık cam iki sistemle yeniden kullanılabilir: Kapalı döngü veya açık döngü sistemi.

Kapalı döngü sistemi, camın bir iade planı oluşturularak cam kapların (ambalajların) yeniden kullanımı ya da geri dönüştürülmüş cam kırıntıları kullanarak yeni cam ürünlerinin üretimidir. Cam üretiminde kullanılan cam kırıntısının ağırlıkça her %10'u için CO₂ emisyonları %5, enerji tüketimi %3 oranında azalmaktadır. Gıda atığı kontaminasyonu (kirliliği) ve renk kontaminasyonu olmak üzere kontaminasyonlardan kaçınılması şartıyla cam süresiz olarak geri dönüştürülebildiğinden, ideal cam dönüşüm şeklidir. Yeni cam üretiminde nihai ürünün kalitesini belirleyebilmek için cam kırıntılarında kabul edilebilir kontaminasyon limitleri belirlenebilir. Yeşil ve amber rengi ambalaj kapları renksiz ambalaj kaplarının kalitesini düşürebilecek rengini değiştirebilecek bazı katkı maddeleri içerebilmektedir. Bu nedenle farklı renkteki camların karıştırılmaması gerekmektedir (Harrison ve diğ., 2020 ; Dyer, 2014).

Açık döngü sistemi, atık camın alternatif ürünlere dönüştürmesidir. Cam kullanım sonunda başka ürünlere dönüştürülmek amacıyla bertaraf edilir (Harrison ve diğ., 2020). Bu tür malzemelere en yaygın örnek tavan yalıtımlarında kullanılan cam elyaflardır (Christensen, 2011). Açık döngü sistemi devam eden dönüşüm sistemini sona erdirdiği için geri dönüşümün en kalitesiz şeklidir. Bununla birlikte depolanan cam atığında renk ayrımı yapılmamışsa veya kaliteden ödün verilmişse geri dönüşüm süreci devam edemez (Harrison ve diğ., 2020).

Cam atıkları için bir diğer açık döngü sistemi, inşaat sektöründe kullanımıdır. Atık cam çimento üretiminde klinker olarak, harç ve beton üretiminde ince veya iri agrega olarak, puzolanik aktivite gösteren atık cam tozu çimento yerine ikamelerde kullanılabilir (Harrison ve diğ., 2020 ; Peng ve diğ., 2023 ; Ye ve diğ., 2022).

2.3.6. Atık Camların Kullanım Alanları

Atık cam, cam üretimi dışında cam elyafı, seramik üretimi, köpük cam üretimi, beyaz eşya üretimi (hammadde), tuğla üretimi, beton üretimi, çimento üretimi, yansıtıcı boya üretimi, bitümlü yol kaplaması üretimi, su filtreleme, zeolit üretimi, çeşitli silikat ürünlerinin üretimi, taşlama malzemesi üretimi alanlarında; golf sahaları için kum, boru yataklama kumu, kanalizasyon dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Dumitru ve Song, 2018 ; Bahadur ve Parashar 2023; Zheng, 2013 ; Zimmer ve Bragança, 2019 ; Dyer, 2014). Büyük hammadde tüketimi, çok yüksek kalite talep edilmemesi, yüksek iş kapasitesi ve geniş sahalarda yapı ihtiyacı ile inşaat sektörü atık camın çevresel etkilerini çözmek için en cazip seçenekler arasındadır. Son günlerdeki çalışmalar çeşitli endüstriyel ürünlerle birlikte beton endüstrisinin ana tüketicilerden biri haline geldiğini göstermektedir (Zheng, 2013 ; Hamada ve diğ., 2022).

Atık camı betonda kullanmanın iki farklı yolu vardır. Bunlar, agrega veya ince öğütülmüş şekilde puzolan olarak kullanımlardır. Atık cam aynı zamanda çimento üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır (Zheng, 2013). Atık cam agregaları geri dönüşüm sırasındaki mekanik işlemler sonucu ağırlıklı olarak köşeli şekillere sahiptir. Ayrıca atık camın incelik modülü istenilen seviyeye getirilebildiğinden fiziksel özellikler önemli ölçüde değişmektedir. Atık cam agregasının önemli bir özelliğide çok düşük su emme göstermesidir. Tablo 2.14'te çeşitli çalışmalarda kullanılan atık cam agregasının fiziksel özellikleri verilmiştir (Mahmood ve Kashani, 2022).

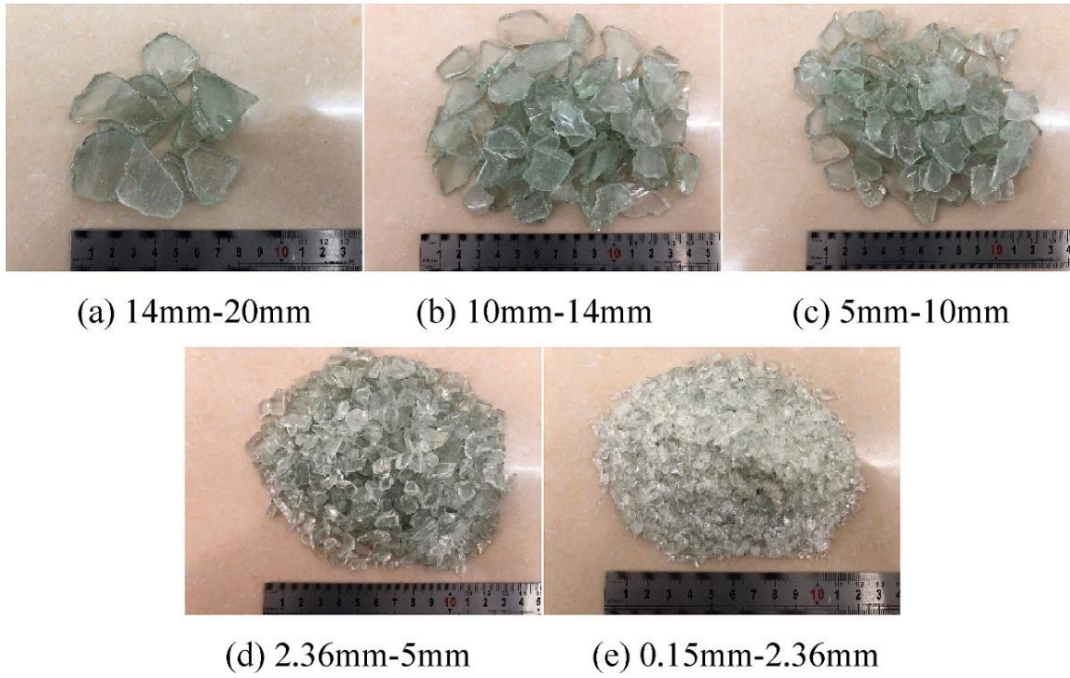
Atık camın harç ve betonda agrega olarak kullanılmasının işlenebilirlik açısından farklı etkileri vardır. Bazı araştırmacılar atık cam agrega yüzdesinin artması ile harç/betonun slump değerlerinin düştüğü bulmuştur. Çalışmalarda farklı türlerde (soda-kireç camı, borosilikat cam) atık camlar kullanılmasına rağmen sonuçlar benzer gelmiştir. Atık camın daha keskin ve köşeli tane şekilleri ile çimento akışına engel olduğu düşünülmektedir. Ayrıca atık cam agregaları sarmak için fazladan çimento pastasına ihtiyaç duyulmuş, böylece akışkanlık için gerekli çimento pastasının olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte atık cam agregaların renkleri çökmeyi önemli ölçüde etkilememiştir (Ismail ve Al-Hashmi, 2009 ; Wang, 2009 ; Park ve diğ., 2004). Bazı araştırmacılar ise harç/beton karışımlarında atık cam agrega oranının artması ile işlenebilirliği arttığını bulmuştur. Atık camların su emmeyen yapısı, pürüzsüz yüzeyi ve cam yüzeyi ile çimento hamuru arasında

zayıf kohezyon sonucu işlenebilirliği arttırdığını açıklanmıştır (Terro, 2006 ; Ling ve diğ., 2011 ; Zhao ve diğ., 2013). Ayrıca %100 atık cam agregası ilave edilen karışımlarda ciddi slump artışı ve segregasyonlar görülmüştür (Terro, 2006 ; Taha ve Nounu, 2008). Atık cam agregalarının boyutları işlenebilirlik üzerinde farklı etkiler yapmaktadır (Terro, 2006 ; De Castro ve De Brito, 2013).

Tablo 2.14. Atık cam agregasının fiziksel özellikleri

İncelik modülü	Özgül ağırlık	Su emme oranı (%)	Kaynak
-	2,42	0,03	Afshinnia ve Rangaraju, (2016)
0,43-3,29	-	0,3-0,48	Lee ve diğ., (2013)
2,36	2,19	0,39	Ismail ve Al-Hashmi, (2009)
-	2,48	0,42	Htet ve diğ., (2022)
3,54	2,54	0,13	Lu ve diğ., (2017)
5,51	2,46	-	Meraz ve diğ., (2023)
3,48-3,49	2,50-2,52	0,40-0,43	Park ve diğ., (2004)
1,30-2,86	-	0,06-0,04	Song ve diğ., (2019)
3,04	2,47	0,04	Chindaprasirt ve diğ., (2022)
-	2,48	0,42	Htet ve diğ., (2022)

Atık camın mekanik işlemler sonucu elde edilen atık cam agregası Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Atık cam agregaları (Zeng ve diğ., 2020)

Atık cam agregası mekanik özelliklere etkisi işlenebilirlik etkileri ile benzer olup çalışmalara göre farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalarda atık cam agregası miktarı arttıkça basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımların düşmeler görülmektedir. Bunun sebebi olarak cam agregalar içerisinde mikro çatlakların bulunması ve cam agregaların pürüzsüz yüzeyi ile çimento pastası arasındaki zayıf aderans ile açıklanmıştır (Wang ve diğ., 2009 ; De Castro ve De Brito, 2013). Ayrıca atık cam agregasının zayıf geometrisi nedeniyle homojen bir agregası dağılımı elde edilememiştir (Topçu ve Canbaz, 2004).

Bununla birlikte atık cam agregası ikamesinin basınç ve eğilme dayanımlarında önemli bir etkisi olmadığını açıklayan çalışmalarda mevcuttur (Taha ve Nounu, 2008 ; Wang ve Huang, 2010). Bazı çalışmalarda ise atık cam agregası ikamesi basınç ve eğilme dayanımlarını arttırmıştır. Bu durum ise kum yerine ikame edilen cam agregaların gradasyonunu iyileştirdiği ve filler etkisi gösteren atık camın çimento hidratasyonunu hızlandırdığı düşünülmektedir. (Zhao ve diğ., 2013). Atık cam agregasının, şekli, boyutları, cam türü, kontaminasyonu, kullanım koşulları ve karışımdaki diğer katkı maddeleri ile etkileşimi harç/betonun mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

Atık cam agregalarının beton karışımlara dahil edilmesi sülfat atağına karşı direnci ve elektrik direncini, kimyasal (asit) direncini önemli ölçüde arttırmakta, klorür iyonu geçişini, kuruma büzülmesini (rötre), ısı (termal) iletkenliği ve su emme oranı azalmaktadır (Wang, 2009 ; Kou ve Poon, 2009, Wang ve Huang, 2010 ; Ling ve diğ., 2011 ; Guo ve diğ., 2020).

Bununla birlikte yüksek silika (silis) içeren atık camın alkali silis reaksiyonu (ASR) ile genleşmeye neden olduğu bilinmektedir. Atık cam agregası beton veya harçta ASR genleşmesi dikkate alınmadan kullanılamaz. Araştırmacılar atık camın uçucu kül, öğütölmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, atık cam tozu, çelik lif, lityum nitrat gibi katkı maddeleri ile birlikte kullanımının ASR genleşmesinin önlenebileceğini göstermiştir (Lu ve Poon, 2019).

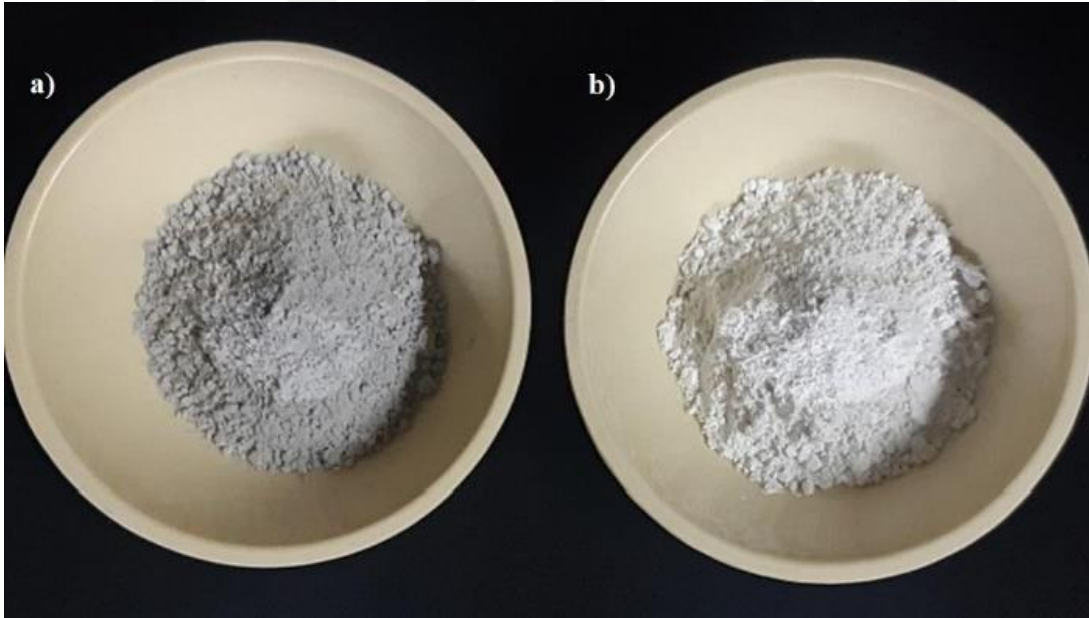
Farklı renkleri ile estetik görünüm veren karışık camların dekoratif uygulama amaçlı malzemelerde kullanımı mümkündür. Şekilde 2.8’de beyaz çimento ile dekoratif amaçlı üretilen harç örnekleri gösterilmiştir. Amorf yapısı nispeten yüksek miktarda silisyum ve kalsiyum içeriği ile atık cam, çok ince öğütöldüğünde teorik olarak puzolanik ve hatta

çimentomsu bir yapıya sahiptir. Ayrıca atık camın düzensiz şekil özellikleri ile dayanım üzerindeki olumsuz etkileri camın öğütülmesi ile iyileştirilebilir. Cam tozunun bu puzolanik reaksiyonu camın içeriğine, camın rengi ve türüne, parçacık boyutuna, kütleme yaşına ve kütleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir (Khan ve diğ., 2020).



Şekil 2.8. Atık cam kırıkları ile üretilen dekoratif amaçlı harç uygulamaları (Lu ve Poon, 2019 ; Ling ve diğ., 2011)

Şekil 2.9’da farklı kaynaklardan elde edilen atık cam tozu örnekleri gösterilmiştir. Farklı kaynaklardan elde edilen atık cam tozlarının kimyasal içeriği ve fiziksel görünüşleri (Şekil 2.9) değişmektedir. Tablo 2.15’de çimento ve farklı kaynaklardan gelen atık cam tozlarının kimyasal içeriği verilmiştir.



Şekil 2.9. Atık cam tozları: a) Kullanılmış cam şişeler (ortalama tane boyutu 31,57 µm), b) Endüstriyel atık cam (ortalama tane boyutu 7,8 µm) (Paul ve diğ., 2022)

Araştırmalar atık cam tozu inceliğinin artması ile puzolanik reaktivitesinin arttığını doğrulamıştır. Basınç dayanımı sonuçlarına göre camın ilk puzolanik aktivitesi ortalama 300 µm’nin altında partiküllere sahip atık cam tozunda görülmektedir (Zheng, 2013 ;

Federico ve Chidiac, 2009). Bununla birlikte tane boyutu 100 μm 'nin üstünde olan atık cam tozu daha düşük puzolanik aktivite göstermektedir. Ancak tane boyutu 80 μm 'nin altında olan atık cam tozunda puzolanik özellikler artmakta, tane boyutu 40 μm 'nin altına indiğinde ise puzolanik özellikler daha fazla artmaktadır. Atık cam tozunun farklı çalışmalarda bulunan puzolanik aktivitesi Tablo 2.16'da verilmiştir (Calmon ve diğ., 2014).

Tablo 2.15. Çimentonun ve cam tozlarının kimyasal içerikleri (Paul ve diğ., 2022)

Malzemeler	Kimyasal içerik (% kütlece)									Yoğunluk
Oksitler	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	K.K	(kg/m ³)
Çimento	21,9	64,5	3,66	0,3	3,67	0,78	1,47	4,06	2,8	3150
Cam tozu ^a	77,2	7,65	0	9,39	1,2	2,21	0	0	1,80	2730
Cam tozu ^b	72,6	9,98	-	13,57	1,02	3,83	-	-	1,00	2700

^a:Kullanılmış cam şişeler, ^b:Endüstriyel atık cam, K.K: Kızdırma kaybı

Tablo 2.16. Farklı tane boyutlarına sahip atık cam tozu ile yapılan puzolanik aktivite indeksi çalışmaları (Calmon ve diğ., 2014)

Araştırmacılar	Atık cam tozu boyutları	28. gün puzolanik aktivite indeksi (%)
Paiva ve diğ.	5 μm	104
Khmiri ve diğ.	$\leq 40 \mu\text{m}$	85
Matos ve Souza-Coutinho	$\leq 75 \mu\text{m}$	90
Pereira-de-Oliveira ve diğ.	$\leq 75 \mu\text{m}$	85
Idir ve diğ.	$\leq 80 \mu\text{m}$ ve $\leq 41 \mu\text{m}$	>90

Bir başka çalışmada blaine inceliği 264 m²/kg olan atık camın puzolanik dayanım aktivite

indeksi 7. gün %82, 28 günde %92 bulunmuştur. Atık cam tozunun daha ince öğütülmesiyle elde edilen 467 m²/kg ve 582 m²/kg blaine inceliğine sahip cam tozları çok yüksek puzolanik aktivite göstererek 28. gün puzolanik aktivite indeksi yaklaşık %110'a ulaşmıştır. Puzolanik malzemeler için ASTM C618'de belirtilen minimum değer %75'tir. Çok ince öğütülmüş bu iki cam tozu %20 oranında çimento yerine ikame edildiğinde 28. günde referans (%100 çimentolu) harç numunesinden daha yüksek dayanım sonuçları vermektedir. Atık cam tozu mukavemet açısından iyi bir puzolanik malzeme olarak kabul edilebilir. Ayrıca bulunan sonuçlar uçucu kül ile kıyaslandığında atık cam tozu benzer ya da daha iyi sonuçlar vermiştir (Shi ve diğ., 2005).

Bununla birlikte her ne kadar atık cam yüksek reaktif silis puzolan için reaktif kimyasal içeriği versede yüksek Na₂O içeriği ile puzolan alkali içeriği şartını karşılamamaktadır. Ayrıca atık cam tozu, alkali reaktif agrega ile birlikte kullanıldığında potansiyel alkali agrega reaksiyonu endişesi barındırmaktadır. (Calmon ve diğ., 2014 ; Shi ve diğ., 2005).

Atık camın ASR etkilerinin, camın alkali silika reaksiyonunu pasifleştirecek ve puzolanik davranışı etkinleştirecek kadar ince (<300 µm) öğütülmesi ile giderilebilmektedir. Farklı çalışmalar ince öğütülmüş cam tozunun ASR etkisini azalttığını bulmuştur. 150 µm, 75 µm ve 38 µm boyutlarında atık cam tozları ile yapılan çalışmada %30 çimento yerine ikame edilen cam tozu referans numunesinden daha düşük alkali silika genişmesi göstermektedir. 38 µm cam tozu ile hazırlanan harç numune referans numunesine kıyasla yarı yarıya daha az genişme göstermiştir (Shao ve diğ., 2000). Benzer şekilde %20 atık cam tozu ikamesinde ASR genişmesi kontrol numunesine kıyasla çok daha düşük gelmiştir (Shi ve diğ., 2005 ; Schwarz ve diğ., 2008). Atık cam tozu içeren karışımlarda alkali hidroksitlerde bir azalma olmayacağı açıktır. Ancak SiO₂ içeriğinin artması, CaO içeriğinin azalması ASR üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Shehata ve Thomas, 2000). Cam tozunun yüksek SiO₂ içeriği, düşük CaO içeriği ile genişmeyi azalttığı düşünülmektedir (Schwarz ve diğ., 2008).

Başka bir çalışmada çimentonun %30 kuvars kumu ikamesi ile hazırlanan referans harç numunesi ile, aynı ikame oranlarında ince cam tozu (<50 µm) ve iri cam tozu (125–200 µm) ile hazırlanan numuneleri kıyaslanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre 180 günde en düşük ASR genişmesi ince cam tozunda yaklaşık % 0,1 ile görülürken, iri cam tozunda yaklaşık % 0,2, referans numunesinde bu oran %0,6 bulunmuştur. 200 µm'dan

daha ince öğütülmüş atık cam tozlarının ASR genleşmesine olumlu etkisi görülmektedir. Cam tozları ile yapılan karışımlarda yüksek oranda portlandit azalmaktadır. Bu da camın puzolanik reaksiyon ile CSH yapılar ürettiğini göstermektedir. Ayrıca camın puzolanik reaksiyonu gözenek çözeltisindeki Na, Si, Al ve S konsantrasyonlarını arttırmakta, Ca konsantrasyonunu azaltmaktadır. Gözenek çözeltisindeki Al konsantrasyonundaki atışın reaktif silisin çözünmesini azalttığı böylece ASR'ye hafifletici etki yaptığı düşünülmektedir (Zheng, 2016). Ayrıca farklı çalışmalarda cam tozunun ASR'yi nasıl azaltıldığıyla ilgili bazı hipotezler öne sürülmüştür: Yüksek Na/Si oranları ile jel vizkozitesinin ve şişme basıncının düştüğü, çok yüksek alkali içeriğinde silisyumun polimerleşmediği açıklanmıştır (Idir ve diğ., 2010). Cam tozunun ASR'yi nasıl azalttığı tam olarak belirlenemesede bu davranışın camın puzolanik reaksiyonu, cam tozunun gözenek çözeltisi ve hidratasyon ürünleri üzerindeki etkileri ile ilgili olduğu kesindir (Zheng, 2016).

Farklı renk ve tiplerde atık cam tozunun harç/beton karışımlarında kullanılması mekanik özellikleri farklı etkilemektedir. %10 oranında ikame edilen renksiz cam tozu basınç dayanımını %27, yeşil renkli cam tozu basınç dayanımını %20 ve amber renkli cam tozu basınç dayanımını %2 oranında arttırmaktadır. Camları renklendirmek için kullanılan oksitler ile Ca(OH)_2 reaksiyonlarının değişmesi mukavemeti gelişimini etkilemektedir (Khan ve diğ., 2020). Benzer şekilde ASR genişlemesinde cam tipi ile değişmektedir. Aynı partikül boyutlarında en fazla genleşmeyi renksiz cam tozu vermiştir, bunu amber renkli cam takip etmiştir. En düşük ASR genleşmesini ise yeşil cam tozu vermiştir. Bunu sebebi yeşil camın en yüksek Cr_2O_3 içeriğine sahip olmasıdır. Çünkü ASR genleşmesi Cr_2O_3 içeriğinin artması ile azalmaktadır (Duo ve diğ., 2020).

Cam tozunun karışımlardaki ikame oranı arttıkça genel olarak dayanımlarda artışlar meydana gelmektedir. Özellikle ince partiküllü ($<45 \mu\text{m}$) atık cam tozlarının kullanılması ile dayanımlardaki artış %30 oranına kadar yer değiştirmeye izin vermektedir. Kürlenme yaşı arttıkça karışımlar daha yüksek dayanım vermektedir. Bu durum cam tozunun ileriki yaşlarda belirgin puzolanik aktivitesi ile açıklanmaktadır. Ayrıca kürlenme sıcaklığı atık cam tozunun puzolanik aktivitesini hızlandırarak basınç dayanımlarının artmasını sağlamaktadır (Khan ve diğ., 2020). Bununla birlikte atık camın betonda kullanılması çelik korozyonuna karşı direnci önemli ölçüde arttırmaktadır. Araştırmacılar cam tozunun

öğütülmesi ile açığa çıkan Na^+ nedeniyle gözenek çözeltisinin artan alkaliliği ve daha düşük bir Ca/Si oranına sahip ikincil C-(N)-S-H jellerinin oluşumuyla iyileştirilmiş gözenek yapısı betonu daha dirençli hale getirdiğini açıklamıştır. Ayrıca ikincil C-(N)-S-H oluşumu basınç dayanımlarına olumlu etkiler yapmaktadır (Peng ve diğ., 2023).

Atık camın ve çimentonun kimyasal bileşenleri incelendiğinde atık camın çimento üretiminde hammadde veya klinker olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Atık camın çimento üretiminde kullanılması üretilen çimentonun alkali içeriğini arttırmaktadır. Ancak alkali içeriğini izin verilen sınırlar içerisinde tutabilmektedir. Bununla birlikte atık cam klinkeri çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmemiş, basınç dayanımlarında belirgin bir düşme olmamıştır. Ayrıca atık cam besleme ve işlenmesi esnasında döner fırın tesisinin çalışması üzerinde olumsuz bir etki göstermemiştir (Chen ve diğ., 2002).

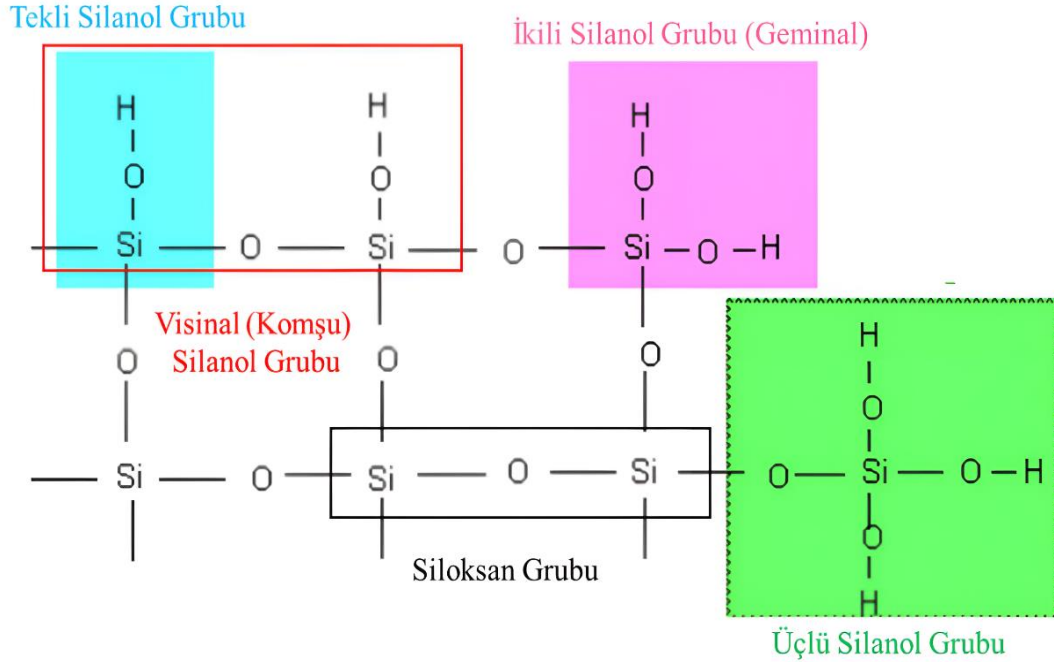
Yüksek silis ve amorf yapısıyla atık cam inorganik polimerlerin yapısı için uygun bir malzemedir. Atık camın geopolimer kaynak malzeme olarak kullanılması için öğütülmesi yeterli olmaktadır. Atık cam amorf yapısıyla alkalın ortamda çözünebilir ve yoğunlaşabilir silanol (Si-OH) grupların oluşturma eğilimindedir. Böylece nihai ürünün niteliklerini etkileyen silis bakımından zengin jellerin oluşmasına öncülük etmektedir (Luhar ve diğ., 2019). Şekil 2.10 'da silika yüzey yapısının oluşum şeması gösterilmiştir.

Atık camın yüksek silis içeriği nispeten düşük alümina içeriğine sebep olmaktadır. Geopolimer gelişimini güçlendirmek için reaktif alümina açısından zengin olan malzemeler ile birleştirilmesi ve reaktif içeriğin bileşime adapte edilmesi gerekmektedir (Luhar ve diğ., 2019). Oluşan ilk ürünlerin (hidroksil iyonlarına (OH^-) bağlı Si-O-Si , Al-O-Al ve Si-O-Al) sonraki aşamalarda polikondenzasyonu ile alüminosilikat jeller oluşmaktadır (Adesina, 2022).

Atık cam ile hazırlanan geopolimerlerin istenilen mekanik dayanımları vermesi için sıcaklık kürlemesi yapılması gereklidir. Oda sıcaklığında atık camdan gelen silisin çözünmesi yeterli değildir (Luhar ve diğ., 2019).

Atık cam tozu ile hazırlanan geopolimerlerde, sodyum silikat jellerinin hidrolitik stabilitesinin olmaması nedeniyle sulu kürleme ile basınç dayanımlarında düşmeler

görülmektedir. Ayrıca alkali silikat jelleri suya alkali iyonları sızdırabilmektedir (Redden ve Neithalath, 2014).



Şekil 2.10. Silika yüzey yapısının oluşum şeması ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$ silanol grupları) (Yermeydan, 2020)

Birçok araştırmacı tarafından atık cam tozu çimento ikamesi veya geopolimer öncü malzemesi olarak kullanılmıştır. Tablo 2.17’de atık cam tozu ile yapılan çalışmalar, atık camın fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği verilmiştir.

Atık camın öğütülerek geopolimerlerde kaynak malzeme olarak kullanılmasının yanında geopolimer agregası olarak kullanımı da mümkündür. Agregası olarak kullanılan atık cam agregasının yüzeyi (reaktif silis) reaksiyona girerek geopolimer jel oluşturabilir. Böylece geopolimer pasta agregası arayüzeyi bağlanma kalitesi artabilir. Normal çimentolu betonlarda atık cam agregası kaynaklı ASR sorunu geopolimer betonlarda ortadan kalkmaktadır (Luhar ve diğ., 2019 ; Adesina, 2022).

Ayrıca atık camın içeriğindeki yüksek alkali miktarı geopolimer oluşumuna yardımcı olmaktadır (Cyr ve diğ., 2012). Bununla birlikte atık cam tozu alkali çözelti üretiminde kullanılmaktadır (Vinai ve Soutsos, 2019 ; Tchakouté ve diğ., 2016 ; Torres-Carrasco ve Puertas, 2015 ; Puertas ve Torres-Carrasco, 2014).

Tablo 2.17. Atık cam tozu ile yapılan çalışmalar, atık camın fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği

Kullanım amacı	Ortalama Boyut (µm)	Yüzeyalanı (m ² /kg)	Özgül ağırlık	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kaynak
Geopolimer öncüsü	7,5	1890	-	56,27	20,42	0,10	0,82	9,00	-	1,63	14,2	Si ve diğ,, (2020)
Geopolimer öncüsü	25	260	2,52	74,3	0,03	0,11	2,4	10,2	-	0,33	12,6	Shoaei ve diğ,, (2020)
Geopolimer öncüsü	4	1020	2,4	69,6	2,2	0,9	0,1	11,6	-	0,4	12,03	Rashidian-Dezfoli ve Rangaraju, (2017)
Geopolimer öncüsü	13	440	2,56	72,66	1,57	0,39	1,24	11,41	0,07	0,54	12,89	Pascual ve diğ,, (2014)
Geopolimer öncüsü	-	382	2,45	73,08	2,13	0,36	1,24	11,02	-	0,68	13,21	Dadsetan ve diğ,, (2021)
Çimento ikamesi	20	445	2,44	72	8	<1	1	10,5	-	<1	11,5	Nassar ve diğ,, (2021)
Çimento ikamesi	13	1310	2,46	68	7	<1	1	11	-	<1	12	Nassar ve Soroushian, (2012)
Çimento ikamesi	<45	380	2,6	68,34	3,684	0,208	3,666	9,899	0,313	0,297	13,56	Yin ve diğ,, (2021)
Çimento ikamesi	8	358	2,8	59,47	3,87	0,66	-	24,79	1,06	-	~ 10,99	Hwang ve Cortes, (2021)
Çimento ikamesi	8,08	991,8	2,51	68,328	1,93	0,364	1,298	11,904	0,086	0,702	14,651	Liu ve diğ,, (2019)

2.4. Geopolimer

2.4.1. Geopolimer Kavramı

"Geopolimer" terimi 1979'da Fransız bilim insanı Prof. Joseph Davidovits tarafından öncü alüminosilikat tozları ve alkali çözeltilerin reaksiyonu sonucu sentezlenen amorf tan yarı kristale doğru yapılara sahip alüminosilikat malzemeleri tanımlamak için icat edilmiştir (Provis ve Van Deventer, 2009 ; Arıöz, 2015 ; Davidovits, 2002).

"Geo" terimi uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kabuk külü gibi doğal veya endüstriyel alüminosilikat malzemeleri ifade ederken, "polimer" terimi aynı birimden üretilmiş molekül zinciri anlamına gelir (Thomas ve diğ., 2022 ; Younis ve diğerleri, 2020).

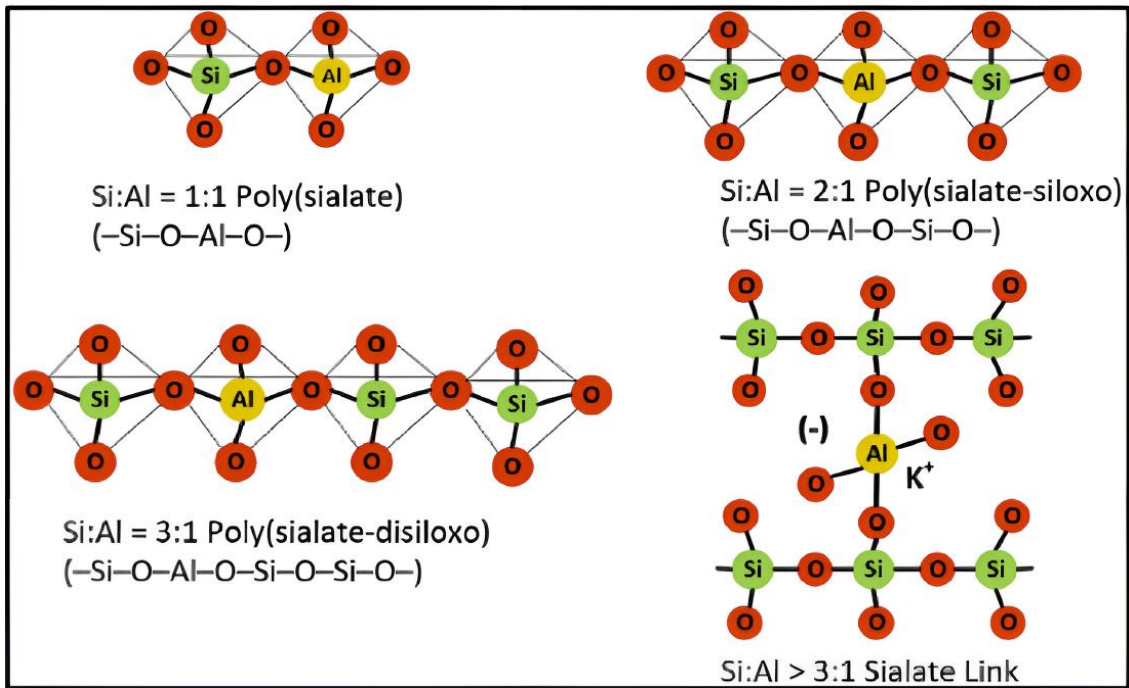
Geopolimerler literatürde inorganik polimerler, mineral polimerler, inorganik polimer camlar, hidro seramikler, alkali bağı seramikler, alkali kül malzemesi gibi birçok farklı isimle anılmıştır. Temel olarak aynı malzeme için bu kadar farklı isimlerin verilmesinin başlıca sebebi konu ile ilgili yapılmış önemli araştırmalara ulaşamaması ve konuya yakından aşina olmayan araştırmacıların hangi terimin hangi spesifik malzeme için olduğunu bilememeleridir. Bununla birlikte "geopolimer" ve "inorganik polimer" terimleri akademik araştırmalarda giderek yaygınlaşmaktadır (Provis ve Van Deventer, 2009).

Bir diğ er dikkat edilmesi gereken husus literatürde geopolimer ile karıştırılan bir başka terim olan "alkali aktivasyon"dur. Genellikle yüksek kalsiyumlu metalurjik cürufların alkali aktivasyonu ile elde edilen çimentomsu malzemeler ilk olarak 1940 yılında Purdon tarafından gösterilmiştir. Alkali ile aktiveleştirilen bağlayıcılar üzerinde birçok araştırma yapılmıştır ve bunların birçoğu yüksek fırın cüruflarının alkali aktivasyonu ile ilgilidir. Geopolimer ve alkali aktivasyon arasında yapılması gereken temel ayırım, cürufların alkali aktivasyonunda amaç esas olarak kalsiyum silikat hidrat bazlı jel üretilmesidir, ayrıca silisyum tek boyutlu zincirlerde bulunur ve alüminyum silisyum yerine, magnezyum kalsiyum yerine ikame edilebilmektedir. Geopolimer jeller ise üç boyutlu bir alkali alüminosilikat çerçeve yapısındadır. Bununla birlikte geopolimer yapılarda kalsiyumun rolü araştırılmakta olan bir konudur (Provis ve Van Deventer, 2009).

2.4.2. Geopolimer Kimyası ve Mekanizması

Geopolimerler üç boyutlu amorf mikro yapılara sahip alümino-silikatlardan oluşmaktadır. Geopolimer sentezlemek için alkali (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Li^+ , Cs^+ gibi) veya asidik (fosforik asit, humik asit) ortam kullanılmaktadır (Ng ve diğ., 2018 ; Tchakouté ve Rüscher, 2017)

Geopolimerizasyon işlemi, genellikle sodyum veya potasyum su camı kullanılarak hazırlanan alkali ortamda silisyum ve alüminyum minerallerinin veya alüminosilikat oksitlerinin polimerik bir Si-O-Al ve Si-O-Si ağları oluşturmak üzere alkali çözelti ile reaksiyona girmesi ile gerçekleştirir. Bunlar; poly(siloxo) Si-O-Si-O- , poly(sialate) -Si-O-Al-O- , poly(sialate-siloxo) -Si-O-Al-O-Si-O- , poly(sialate-disiloxo) $\text{-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}$ gibi tekrar eden birimlerden oluşan kimyasal bileşiklerdir. Sialate, silisyum-oksijen-alüminat'ı temsil etmek için kullanılan bir kısaltmadır (Ng ve diğ., 2018 ; Demir, 2019). Alüminosilikatların çözünme ve çökelme hızı sıcaklık, derişim, pH ve çözünür Si/Al oranına bağlı olarak değişmektedir. Jel içerisindeki Si/Al oranı geopolimerizasyon sonucu oluşan bileşikleri (silikat ve alüminat birimleri) değiştirmektedir (Arıöz, 2015). Şekil 2.11'de farklı Si/Al oranında poly(sialate) moleküler ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Poly(sialate) moleküler ağ yapısı (Çetin ve diğ., 2021)

Bu yapılar, silikat (SiO_4) ve alüminat (AlO_4) yapılarının oksijen atomunu paylaşarak tetrahedral (dörtüzlü) şekilde kovalent bağlaması ile oluşmaktadır. Burada alüminyum iyonunun negatif yükünü dengelemek için çerçeve boşluklarında pozitif iyonlar (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} gibi) gereklidir. Katyonlar yapının nötrlüğünün korumak için oldukça önemlidir. Ayrıca yük dengelemenin yanı sıra nihai ürünün bütünlüğünü korumak için çok önemlidir. Poly(sialate)'in ampirik formülü Denklem 2.1'de verilmiştir (Ng ve diğ., 2018 ; Arıöz, 2015).

$$M_n \{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

Burada;

M: (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} gibi) katyonları,

n: polikondenzasyon derecesini,

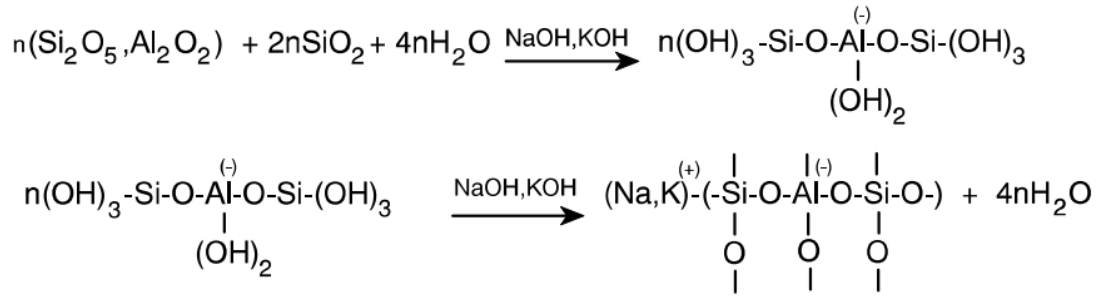
Z: 1,2,3, 1,2,3, veya 32'ye kadar daha yüksek bir sayıyı,

W: su moleküllerinin sayısını “-” bağın varlığını ifade etmektedir (Ng ve diğ., 2018 ; Demir, 2019 ; Yılmazoğlu, 2022).

Geopolimerizasyon reaksiyonu, yarı amorf veya tamamen amorf alüminosilikat kaynaklarının hızlı bir şekilde üç boyutlu polimerik ağlara dönüşmesi sürecidir. Alkalileşmenin kimyası hem kullanılan alüminosilikat kaynağına hem de kullanılan alkalilerin doğasına bağlıdır. Bununla birlikte geopolimer sentezi kullanılan ilk malzemelerden bağımsız olarak aynı mekanizmaya dayanmaktadır. Geopolimer reaksiyonu konusunda bir kesinlik yoktur, fakat birçok araştırmacı geopolimer oluşumunun şunları içerdiği hakkında hem fikirdir: Al ve Si elementlerinin alüminosilikatların yüzeyinden çözünmesini, aktif yüzey grupların ve çözünür türlerin jel oluşturmak için polimerizasyonu ve son olarak jelin sertleşmesi katı bir yapı oluşturması (Liew ve diğ., 2016).

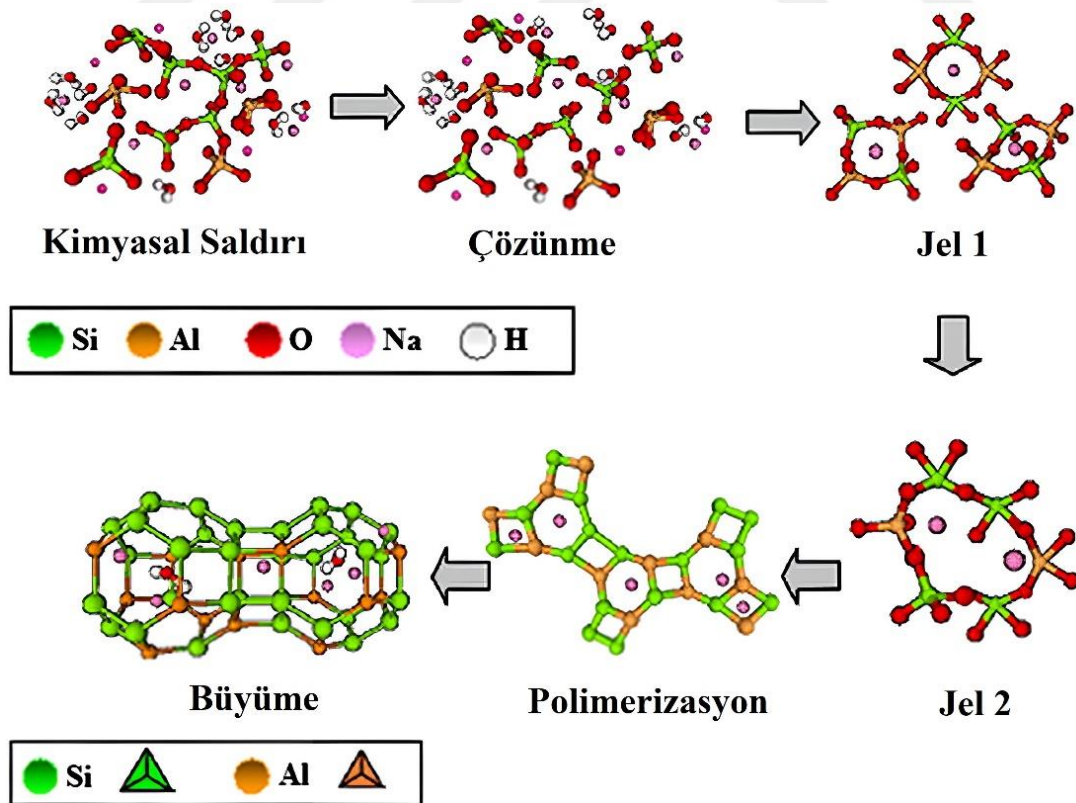
Geopolimerizasyon ekzotermik bir reaksiyondur ve sentezin oligomerler (dimer, trimer) yoluyla gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu oligomerler üçboyutlu makro yapıların gerçek birim yapılarını oluşturmaktadır. Reaksiyonda alüminosilikat hidratların ısınması ile hidroksil iyonları su (H_2O) açığa çıkaracak şekilde ayrışır böylece polimerik Si-O-Al bağları oluşur. Şekil 2.12'de Davidovits tarafından önerilen geopolimer oluşumu denklemleri gösterilmiştir. Burada, (Si_2O_5 , Al_2O_2) alümino silikat öncüsü, SiO_2 silikat

solüsyonunu ifade etmektedir. Nihai ürün Si–O–Al omurga yapısıdır (Liew ve diğ., 2016 ; Davidovits, 1994).



Şekil 2.12. Geopolimerizasyon işleminin şematik diyagramı (Davidovits, 1994)

Şekil 2.13’de geopolimerizasyon reaksiyonu grafik modeli verilmiştir. Reaksiyon sırasında, alkali çözelti ile temas eden Si–O–Si ve Si–O–Al kovalent bağları kolloid faza dönüşür. Çözünmüş ürünler etkileşime girerek pıhtılaşmış bir yapı oluşturur. Reaksiyon devam ettikçe yüksek Al içeriğine sahip ara jel (Jel1) daha çok Si içeren jele (Jel2)’ye dönüşür. Sonunda jeller büyüyerek üç boyutlu çerçeveler oluşturur (Duxson ve diğ., 2007 ; Liew ve diğ., 2016).



Şekil 2.13. Geopolimerizasyon reaksiyonu grafik modeli (Liew ve diğ., 2016)

Geopolimerizasyon oluşum reaksiyonu çok hızlıdır. Şekil 2.13 te gösterilen mekanizma neredeyse aynı anda gerçekleşir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda bu adımları birbirinden ayırmak neredeyse imkansızdır (Liew ve diğ., 2016).

Geopolimerizasyon işlemi, asit ortamında (Fosforik asit) gerçekleştiğinde ise, farklı tipte jel yapıları oluşturmaktadır. Bu bağlayıcı jel alkali ortamda oluşturulan jel ile benzerlik göstermekte, amorfıtan yarı kristale 2 veya 3 boyutlu inorganik ağlardan oluşmaktadır. Literatürde bildirilen alkalın ortamında geopolimerler sialate yapılardan oluşurken fosforik asit ortamında geopolimerler 3 boyutlu Si–O–P ve AlPO₄ (Al–O–P) ağlarına sahip poly(phospho-siloxo) –Si–O–P–O–Si–O–, phospho-sialate –Si–O–Al–O–P–O– birimleri oluşmaktadır. Bu yapılar kovalent bağlıdır. Alkali ortam geopolimerin aksine phospho-siloxo yoğunlaşmış jelleri herhangi bir ağ değiştirici (alkali katyonlar) içermez. Geçmiş araştırmalarda açıklanan reaksiyon adımları, alüminosilikat öncü malzemelerinin fosforik asit içerisinde çözünmesi ile açığa çıkan Al⁺³ iyonlarının ve fosfat birimlerinin reaksiyonu ile AlPO₄ fazlarını oluşmaktadır. Ayrıca Alüminyum fosfatın (AlPO₄)’ün kristal polimorflarının yanı sıra Al’nin P ile yer değişmesi ile Si–O–P bağları oluşmaktadır (Tchakouté ve Rüscher, 2017 ; Vanitha ve diğ., 2022 ; Cui ve diğ., 2011)

Bu yeni teknolojinin asıl amacı fosfat (PO₄) birimlerini bir siloxo (Si–O–Si) zincire dahil olması ile phospho-siloxo (Si–O–P–O–Si) ağları stabilize etmektir. Fosforik asit ortamında hazırlanan geopolimerizasyonun kimyasal mekanizması 3 aşamalı siloxane/siloxo bağlarının depolimerizasyonunu ve polikondenzasyonunu ifade etmektedir (Tchakouté ve diğ., 2017).

- 1) Protonun (pozitif yük) Siloxane oksijenin sadece elektron çiftine bağlanması



Şekil 2.14. Fosfat bazlı geopolimer sürecinin ilk adımı (Tchakouté ve diğ., 2017)

- 2) Siloxane bağların bölünmesi ve yeniden düzenlenmesine yol açan sonraki reaksiyonlar; Silanol (Si–OH) birimin ve silisyum-fosfat (Si–O–PO(OH)₂) bağlarının oluşması ile oksonyum kompleksinin dekompozisyonu.



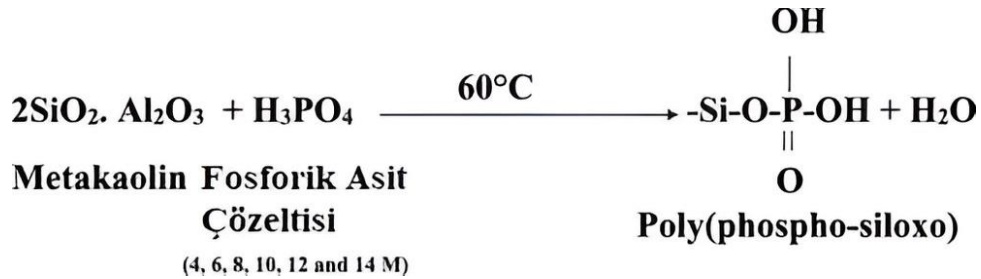
Şekil 2.15 Silanol ve silisyum-fosfat bağların oluşum süreci (Tchakouté ve diğ., 2017)

3) Asidik ortamda, makromoleküler (büyük molekül) bir poly(siloxo) zincirinin oluşmasını destekleyen bir enerji gradyanı vardır, ardından yeni 2 ve/veya 3 boyutlu Si-O-P-O-Si ağlarının oluşturarak lineer zincirin bölünmesini tersine çeviren kondensasyon (yoğunlaşma) reaksiyonları gelmektedir.



Şekil 2.16. Si-O-P-O-Si bağların kondensasyon süreci (Tchakouté ve diğ., 2017)

Şekil 2.17’de Tchakoutée diğ. (2017) tarafından farklı molaritelerde fosforik asit (4, 6, 8, 10, 12 ve 14 M) ve metakaolin kullanarak hazırlanan fosfat bazlı geopolimer çimento oluşum şeması verilmiştir.



Şekil 2.17. Fosfat bazlı metakaolin geopolimer çimento (Tchakouté ve diğ., 2017).

Literatürde alkali ortamda sentezlenen geopolimerler kapsamlı şekilde incelenirken, asidik ortamda sentezlenen geopolimerler hakkında daha az bilgi bulunmaktadır (Tchakouté ve diğ., 2017)

2.4.3. Geopolimerin Bileşenleri

Geopolimer malzeme, genellikle katı toz halindeki alüminosilikat kaynaklarına (kaynak malzeme) alkali veya asit çözeltilerinin eklenmesi ile elde edilmektedir (Tchakouté ve diğ., 2017).

Alümino silikat kaynakları doğal hammaddeler ve endüstriyel atıklar olmak üzere 2 gruba ayrılır.

- 1) Doğal hammaddeler; metakaolin, kaolin, kil, pişmiş kil, kaya tozu, pomza, volkanik tuf, diatomit, kireçtaşı gibi
- 2) Endüstriyel atıklar: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metalik cüruflar, kırmızı çamur, maden atıkları, pirinç kabuğu külü, atık cam tozu, tuğla tozu gibi

Geopolimer üretimin en yaygın kullanılan kaynak malzemeler ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolindir (Ng ve diğ., 2018 ; Lıban, 2022 ; Demir, 2019 ; Ekinci, 2022).

Geopolimer üretiminde kullanılan alkali çözelti için yaygın olarak sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), lityum hidroksit (LiOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3) kullanılmaktadır. Ayrıca bu alkali aktivatörler geopolimer üretiminde tek başına ve farklı karışım oranları ile birlikte kullanılmaktadır (Ekinci, 2022 ; Provis, 2009). Asit çözeltisi için, yaygın olarak fosforik asit (H_3PO_4) ve humik asit kullanılmaktadır (Tchakouté ve diğ., 2017).

2.4.4. Geopolimer Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler

Geopolimer reaksiyonu ve reaksiyon sonucu nihai ürün özellikleri, kullanılan alüminosilikat kaynağına, kimyasal bileşimlerine, hazırlanma prosedürüne, kür sıcaklığı ve süresine, aktifleştirici türüne ve yoğunluğuna, su içeriğine ve nem koşulları ile değişmektedir. Buna göre geopolimerizasyon sürecini etkileyen faktörler;

- Alüminosilikat öncü kaynağın türü, inceliği, amorf içerik oranı,
- Kür sıcaklığı ve süresi,
- Kürleme şekli,
- Alkali türü ve yoğunluğu (molaritesi)
- Su/katı oranı
- Karışımların molar oranlarına ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Si/Al , Na/Al , Si/P , Al/P gibi)
- N-A-S-H , C-A-S-H, C-S-H faz etkileri

şeklinde listelenebilir (Gültekin, 2022 ; Vanitha ve diğ., 2022 ; Güneş, 2023).

2.4.3. Geopolimerin Uygulama Alanları

Geopolimerler ilk olarak Davidovits tarafından 1970-1973 yılları arasında Fransa'da meydana gelen bir dizi yangının ardından ateşe dayanıklı, yanıcı olmayan malzemeler olarak üretilmiştir. İlk çalışmalardan günümüze geopolimerlerin kullanım alanları;

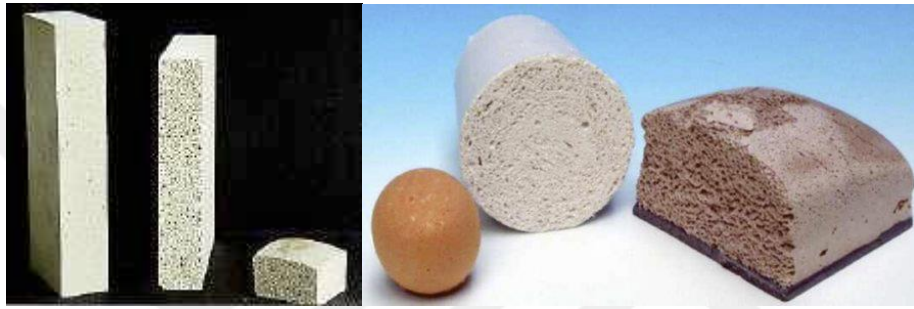
- Yangına dayanıklı ahşap paneller,
- Yalıtımlı panel ve duvarlar,
- Isıya dayanıklı yapıştırıcı,
- Ahşap yapıların ısı korunması,
- Refrakter (ateşe dayanıklı) malzeme,
- Termal şoka dayanıklı malzeme,
- Alüminyum döküm uygulamaları,
- Isı yalıtımı için genişletilmiş (köpüklü) paneller,
- Seramik uygulamaları,
- Dekoratif ürünler,
- Yüksek mukavemetli geopolimer çimento ve beton,
- Yanmaz yüksek teknoloji uygulamaları,
- Nükleer sanayi uygulamaları,
- Yüksek teknolojili reçine sistemleri,
- Sivil ve askeri gemiler için yangından koruma kaplamaları,
- Havacılık uygulamaları (uçak kabin malzemeleri, tavan ve zemin panelleri, 2500-3000 kg kapasiteli kargo astarları, bölmeler ve yan duvarlar, tel yalıtım, istif kutuları, yangına dayanıklı malzemeler),
- Otomotiv uygulamaları (titanyumun yerini alan titreşime ve 700 °C'nin üstünde sıcaklıklara dayanan özel egzoz kaplamaları),
- İnşaat uygulamaları (onarım, güçlendirmek ve yangından korumak amacıyla kolon ve kirişlerin sarılması)

şeklinde listelenebilir (Davidovits, 2002 ; Provis ve Van Deventer, 2009).

Şekil 2.18'de geopolimerin dekoratif alan uygulamaları, Şekil 2.19'da geopolimer köpük paneller, Şekilde 2.20'de yangına dayanıklı geopolimer kompozit gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Geopolimer bağlayıcı ile üretilen dekoratif malzemeler (Davidovits, 2002)



Şekil 2.19. Geopolimer köpük paneller (Davidovits, 2002)



Şekil 2.20. Karbon-epoksi kompozit (solda) yanarken, karbon-geopolimer kompozit (sağda) 1200 °C'lik ateşe direnmekte (Davidovits, 2002)

Geopolimer malzemelerin potansiyel uygulamaları, özellikle oluşan polisialatta Si/Al atom oranına bağlıdır. Genel olarak, inşaat mühendisliği uygulamaları için daha düşük bir Si:Al mol oranı tercih edilir. Si:Al oranı 1, 2 ve 3 olan düşük oranlarda oluşan polimerler sert bir ağ yapısı gösterirken, daha yüksek Si:Al oranları (>15), geopolimer malzemelerin polimerik oluşumunu teşvik etmektedir (Shehata ve diğ., 2022).

Bununla birlikte yüksek mukavemet, aşınma direnci, hızlı sertleşme, üstün sıcaklık direnci, korozyon direnci (yüksek PH ve düşük klorür geçirgenliği), kimyasal direnç, düşük su emme kapasitesi, farklı malzemelere yüksek yapışma mukavemeti (taze ve eski beton yüzeyler, çelik, seramik, cam gibi), düşük büzülme ve ısı iletkenlik özellikleri gibi üstün özellikleri ile geopolimerler özellikle inşaat sektöründe oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir (Duxson ve diğ., 2007).

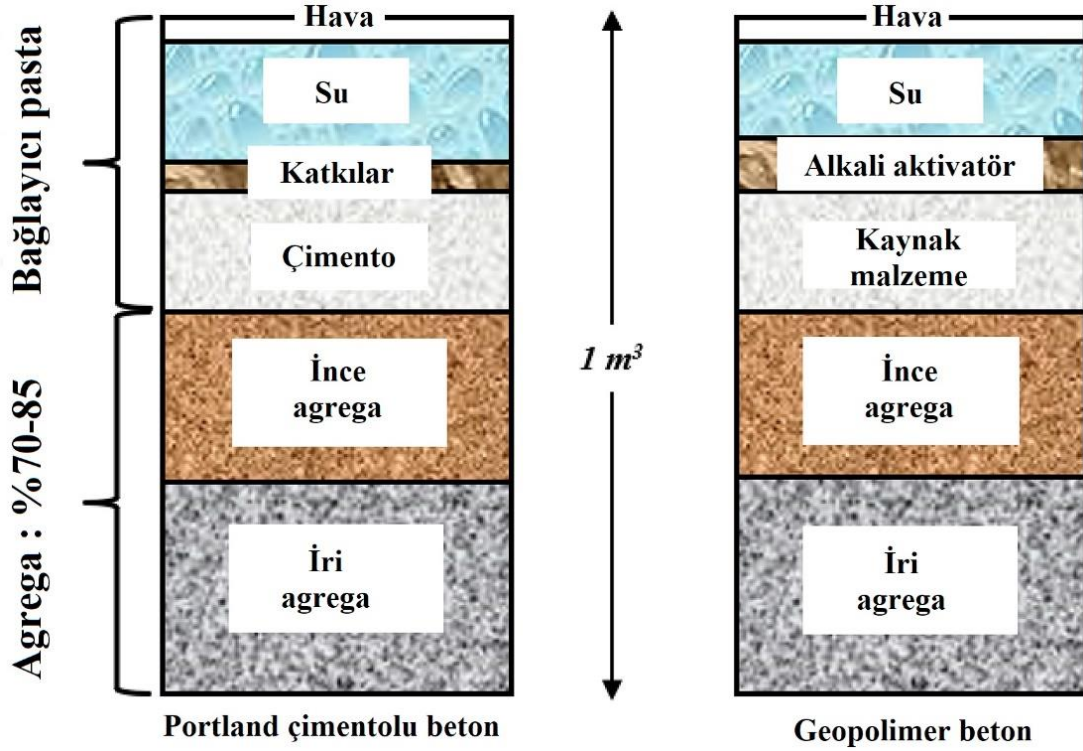
2.5. Geopolimer Beton

Geopolimer, kireç ve normal portland çimentosundan sonra 3. nesil bağlayıcı olarak kabul edilmektedir. Geopolimer kaynak malzemeleri çimentonun aksine su ile reaksiyona girmezler, bu nedenle reaksiyon oluşabilmesi için alkali ortam gereklidir. Geopolimer bağlayıcı, alkali aktivatörlerle (alkali hidroksit, alkali silikat) alüminosilikat malzemelerin (uçucu kül, cüruf, kaolinit, feldspat, mermer tozu, maden ve endüstriyel atıklar gibi) reaksiyona girmesi ile hazırlanmaktadır. Alkali ortamda reaksiyona giren kaynak malzemeler yük taşıma kabiliyetine sahip üç boyutlu polimerik bir yapı oluşturur. Yük taşıyabilme kapasitesi, oluşan geopolimerin alüminosilikat malzemeye kıyasla daha yüksek amorf yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca oluşan polimerik macun, betonu oluşturmak için iri agregaları, ince agregaları ve diğer reaksiyona girmemiş malzemeleri birbirine bağlayarak geopolimer betonu oluşturur. (Almutairi ve diğ., 2021 ; Farooq ve diğ., 2021 ; Vangan, 2008).

Geopolimerin bağlayıcı özellikleri, çimento esaslı bağlayıcı malzemelerden polimerizasyon (kondensasyon) işlemi ile ayrılmaktadır. Çimento hidrasyonunun aksine polimerizasyon (kondensasyon) su açığa çıkarmaktadır. Böylece işlenebilirlik açısından daha verimli olmaktadır (Zhang ve diğ., 2018 ; Singh ve diğ., 2015).

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

mekanik özelliklerini belirlemektedir. (Li ve diğ., 2019 ; Danish ve diğ., 2022 ; Garcia-Lodeiro ve diğ., 2012). Şekil 2.21’de 1 m^3 portland ve geopolimer betonların hacimsel içeriği gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Portland ve geopolimer betonların hacimsel içeriği (Li ve diğ., 2019)

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi geopolimer beton, agregalar, kaynak malzeme (endüstriyel atık veya doğal hammaddeler), alkali aktivatör (sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat gibi) ve kimyasal katkılardan (her zaman değil) oluşmaktadır.

Portland çimentolu ve geopolimer betonları bu benzerlikleri ele alındığında, geopolimer betonun portland çimentolu beton üretiminde kullanılan geleneksel yöntemler kullanılarak üretilmesinin mümkün olduğu görülmektedir. Buna göre, geopolimer beton üretimi için; alüminosilikat öncü (kaynak) malzeme (UK, ÖYFC gibi), ince ve iri agregalar 3 dakika boyunca kuru şekilde karıştırılır. Daha sonra alkali sıvı, süper akışkanlaştırıcı, varsa ek su karıştırılır. Karışım kuru karışıma ilave edilerek ve 4 dakika daha karıştırılır. Karışım da kullanılan agregaların doygun kuru yüzey olması gerekmektedir (Vangan, 2008). Ayrıca karışım da kullanılan alkali çözelti sıvısı, süperakışkanlaştırıcı ve ek su karıştırılarak veya ayrı ayrı kuru karışıma ilave edilebilir (Yılmazoğlu, 2022). Şekil 2.22’de geopolimer betonun üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Geopolimer beton üretim aşamaları

Normal portland çimentolu beton üretiminde olduğu gibi geopolimer beton üretiminde de işlenebilirlik ve basınç dayanımı esas alınmaktadır. Bununla birlikte normal beton için dünya çapında kabul gören tasarlama yöntemleri (su/bağlayıcı oranı gibi parametreler) geopolimer betonda kolayca kopyalanamaz. Geopolimer betonun taze ve sertleşmiş özellikleri, karışımda kullanılan alüminosilikat kaynak malzemenin silisyum ve alüminyum içeriği, kaynak malzemenin amorf miktarı, alkaliçöz/kaynakmalzeme oranı, su/katı oranı, kullanılan alkalilerin türü ve molaritesi (derişimi), alkali çözelti karışım oranları, karışımın $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranları, kür süresi ve sıcaklığı, dinlenme süresi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Li ve diğ., 2019 ; Dehghani ve diğ., 2021 ; Yılmazoğlu, 2022).

Aynı şartlarda üretilen F sınıfı ve C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer betonlar farklı mekanik özellikler göstermektedir. Bu da geopolimer üretiminde istenilen özellikleri elde etmeyi zorlaştırmaktadır (Yılmazoğlu, 2022).

Geopolimer beton için kabul edilen kürleme işlemi, onu normal çimentolu betondan ayırmaktadır. Geopolimer betonda genellikle su kürü yerine ısı kürü (buhar kürü ve hava kürü) kullanılmaktadır. Isı ile kürleme işlemi geopolimer betonda polimerizasyon reaksiyonunu aktive etmek için kullanılmaktadır. Araştırmalar, ortam sıcaklığında kürlenen geopolimer betonların istenilen dayanımları vermediğini göstermiştir. Bu nedenle geopolimer beton araştırmaların birçoğunda sıcaklık kürü (genellikle 60 °C ile 100 °C arasında) uygulanmıştır. Isıl kürleme sonucu geopolimer betonlar istenilen mekanik özellikleri vermektedir. Isı ile kürleme işlemi, uygun maliyetli olmayan ve inşaat uygulamalarında geopolimer betonun kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu yüzden araştırmacılar, genel inşaat alanında geopolimer betonun kullanım alanlarını çoğaltmak,

uygun maliyetli ve uygulama kolaylığı olan ortam sıcaklığında kürlenmiş geopolimer beton üretmeye odaklanmıştır (Jindal, 2019).

Her ne kadar son yıllarda geopolimer beton üzerine çalışmalar artsa da geopolimer beton üzerinde yapılan çalışmalar yeterli seviyede değildir. Bu yüzden geopolimer beton üretim yönteminin herkes tarafından kabul edilmiş bir standardı bulunmamaktadır. Bu yüzden, geopolimer üzerine yapılan çalışmalar farklı üretim parametreleri ve koşulları ile literatürde yerini almaktadır. Örneğin bir çalışma molar oranları esas alarak karışımları hazırlarken, başka bir çalışma su/katı oranına göre, bir diğer çalışma alkaliçözelti/kaynakmalzeme oranına göre karışım oranlaması yapmaktadır.

2.5.1. Geopolimer Betonun Sürdürülebilirliği

Sürdürülebilirliğin esas amacı çevresel dengeyi bozmadan, zarara uğratmadan sonraki nesillerinde ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak mevcut ihtiyaçları karşılamaktır. Sürdürülebilirlik üç ana bileşene dayanmaktadır: çevre, ekonomi ve toplum. Sürdürülebilirlik kalkınma, ekosistemdeki biyolojik çeşitlilik ve dengenin bozulmaması için bu üç ana bileşeni korumalıdır. Sanayi devrimi döneminde, mühendisler ve mimarlar çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek için sürdürülebilirlik ilkesini ustalıkla kullanmıştır. Böylece inşaat malzemeleri bağlamında çevreye duyarlı, çevre dostu ve yeşil kelimeleri ile eşanlamlı sürdürülebilirlik kelimesi ortaya çıkmıştır (Huseien ve diğ., 2017).

Her yıl dünya çapında üretimi giderek artan milyonlarca atık malzeme, sürdürülebilirlik konusunu giderek zorlaştırmaktadır. Çevreye ve ekonomiye zararlı hale gelen bu atıkların (uçucu kül, cüruf, yakıt külü gibi), geopolimer betonda bağlayıcı olarak etkin kullanımları mevcuttur (Ken ve diğ., 2016 ; Hardjito ve Rangan, 2005). Ayrıca ,geopolimer betonda cüruf gibi endüstriyel atıkların ve beton, seramik gibi geri dönüştürülmüş atıkların agrega olarak kullanımları da mümkündür (Mahmood ve diğ., 2020 ; Naenudon ve diğ., 2023 ; Gopalakrishna ve Dinakar, 2023). Büyük ölçekli geopolimer beton üretimi, normal portland çimentolu betona kıyasla sadece çimentonun işlenmesi (ısıtma ve öğütme) sırasında harcanan enerjiyi korumakla kalmayıp çevresel kirliliği ve çimento üretimlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını da azaltmaktadır. Geopolimer betonların kullanımı atık depolama ve bertaraf sorunlarını en aza indirirken doğal kaynakların

kullanımını da azaltacaktır (Huseien ve diğ., 2017). Tablo 2.18’de bir ton çimento ve geopolimer kaynak (alüminosilikat öncüsü bağlayıcı) malzeme için gereken enerji ve CO₂ emisyonları verilmiştir.

Tablo 2.18. Portland çimentosu ve geopolimer kaynak malzeme için gereken enerji miktarı ve CO₂ emisyonları (Yılmazoğlu, 2022)

Ürünler	Gereken Enerji (MJ/ton)	CO ₂ Emisyonu (ton/ton)
Portland Çimentosu	3630	1
Geopolimer Kaynak Malzeme	990	0,15-0,20

Tabloda 2.18’de görüldüğü gibi çimento üretimi geopolimer kaynak malzemesine kıyasla yaklaşık 3,6 kat daha fazla enerji gerektirmekte ve 5-6 kat daha fazla CO₂ emisyonuna sebep olmaktadır. Uçucu kül esaslı geopolimerler kullanılarak çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını %80 ila %90 azaltabileceği ifade edilmiştir (Davidovits, 2005). Ayrıca, geopolimer bağlayıcılarda çimento üretimi için kullanılan kil ve kalker gibi doğal hammaddelerin hızla tüketilmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Çevreci özellikleri ile dikkat çeken geopolimer beton, birçok araştırmacı tarafından yeşil beton için bir alternatif olarak gösterilmiştir (Yılmazoğlu, 2022).

2.5.2. Geopolimer Betonun Özellikleri

Literatür taraması yapıldığında geopolimer betonların mükemmel mekanik ve durabilite özellikleri gösterdiği görülmektedir. Bu özelliklerin arasında erken yüksek dayanım, yüksek sıcaklık direnci, asit ve sülfat direnci, korozyon direnci, düşük klorür geçirimsizliği, düşük gözeneklilik, alkali agrega reaksiyonu göstermeme, düşük rötre ve düşük termal iletkenlik gibi ayırt edici özelliklere sahiptir. Bununla birlikte geopolimer beton portland çimentosuna alternatif çevresel, yeşil beton olarak karşımıza çıkmaktadır (Faruk ve diğ., 2021 ; Duxson ve diğ., 2007 ; Almutairi ve diğ., 2021). Şekil 2.23’te geopolimer betonun özellikleri gösterilmiştir. Olumsuz özellikleri incelendiğinde ise, kısa priz süresinden kaynaklı uygulama zorlukları, düşük süneklik, düşük elastisite modülü, uzun süreli davranış hakkında yeterli bilgi olmaması ve geçmişe dayalı verilerin eksikliği olarak sıralanabilir.



Şekil 2.23. Geopolimer betonların özellikleri

2.5.3. Taze Geopolimer Betonun Özellikleri

2.5.3.1. İşlenebilirlik

Geopolimer beton üretiminde sıvı bileşen olarak alkali çözelti kullanılmaktadır. Yüksek viskoziteye sahip su camı (Na_2SiO_3) gibi alkali çözeltiler kullanıldığında geopolimer beton karışımı yapışkan yapılı olmaktadır. Bu nedenle, bir geopolimer beton karışımının reolojisi normal portland çimentolu beton karışımından farklıdır (Zhang ve diğ., 2020). Taze geopolimer beton karışımların reolojisi, pratik uygulamalarını etkileyen önemli bir parametredir. Reoloji, öncü alüminosilikat kaynakların türüne ve aktive edici ortamın bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, metakaolin bazlı geopolimer pastaların, kalsiyumun parçacıklar arası ve reaksiyon kinetiği üzerindeki etkisinden dolayı çimento bazlı pastalardan farklı reolojik özellikler göstermektedir. Ayrıca uçucu kül bazlı geopolimer beton, doğası gereği tiksotropik davranış göstermektedir. Bununla birlikte su camı ve kullanılan aktivatörün molaritesi reolojik özellikleri değiştirmektedir (Nath ve Sarker, 2015). Farklı reolojiye sahip geopolimer beton için yapılan geleneksel slump, akışkanlık gibi deney sonuçları normal portland çimentolu betondaki ile aynı işlenebilirlik düzeyini göstermemektedir. Ancak bu deneyler geopolimer betonun işlenebilirliği hakkında yeterli bilgileri vermektedir (Nath ve Sarker, 2014).

Geopolimer betonda bağlayıcı olarak kullanılan kaynak malzemeler, su miktarı, alkali türü ve molaritesi gibi faktörler ayrı ayrı incelenmelidir. Genel olarak karışımlarda su/bağlayıcı miktarı, uçucu kül miktarı, çözelti miktarı (alkaliçöz/kaynakmalzeme), sodyum silikatın molaritesi (modülü) arttıkça işlenebilirlik artmakta; karışımlarda yüksek fırın cürufu içeriği, sodyumsilikat/sodyumhidroksit oranı, sodyum hidroksit konsantrasyonu arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır (Nath ve Sarker, 2014 ; Nath ve Sarker, 2015 ; Li ve diğ., 2018 ; Nuaklong ve diğ., 2016 ; Malkawi ve diğ., 2016). Sodyum hidroksit molaritesinin artması ile işlenebilirliğin azalması yüksek molariteli sodyum hidroksitin daha fazla SiO_2 ve Al_2O_3 çözünmesini sağlayarak karışımın polimerizasyon sürecini ve sistemin sertliğini hızlandırmasına bağlıdır (Nuaklong ve diğ., 2016 ; Laskar ve Talukdar, 2017). Benzer şekilde yüksek fırın cürufunun işlenebilirliği azaltması ise yüksek kalsiyum içeriğine sahip yüksek fırın cürufunun amorf Ca–Al–Si jelleri oluşturarak polimerizasyon sürecini hızlandırmasıdır (Hadi ve diğ., 2017). Bununla birlikte, karışımların işlenebilirliğini arttırmak için süperakışkanlaştırıcı veya ek su eklenebilir. Ancak mekanik özelliklerin değişebileceği unutulmamalıdır (Jang ve diğ., 2014). İşlenebilirlik hakkında dikkat edilmesi gereken husus, işlenebilirliği arttırıcı yönde morfolojiye sahip uçucu kül gibi kaynak malzemelerin, yüksek viskoziteye sahip alkali çözeltilerin ve priz sürecini hızlandıran yüksek fırın cürufu ve yüksek molariteli alkali çözeltilerin kullanım koşullarıdır.

2.5.3.2 Priz Süresi

Geopolimer betonun priz süresi inşaat alanındaki kullanımları için çok önemli bir parametredir. İnşaat sektöründe çok önemli rol oynayan priz süresi ilk ve son priz süresi olmak üzere ikiye ayrılır. İlk priz süresinin çok kısa olmaması son priz süresinin de çok uzun olmaması istenir (Zhang ve diğ., 2020). Bununla birlikte, geopolimer betonun priz süresi etkileyen parametreler kesin olmamakla birlikte genel olarak işlenebilirlik ile paralel sonuçlar vermektedir. Bir başka ifade ile işlenebilirliği arttıran parametreler priz süresini de uzatmaktadır.

Geopolimer beton karışımlarda priz süresini en ciddi etkileyen parametre yüksek fırın cürufu olarak görülmektedir. Karışımlarda yüksek fırın cürufu içeriğinin artması ile ilk ve son priz süreleri önemli oranda azalmaktadır. Geopolimer beton için kullanılan kaynak malzemelerden uçucu kül, metakaolin, silis dumanına kıyasla yüksek fırın cürufunun priz

süresi daha kısadır (Nath ve Sarker, 2014 ; Hadi ve diğ., 2017). Bununla birlikte, karışımlarda uçucu kül miktarı, su/bağlayıcı oranı, süperakışkanlaştırıcı miktarı arttıkça priz süresi uzamaktadır (Nath ve Sarker, 2014 ; Li ve diğ., 2018 ; Jang ve diğ., 2014). Uçucu kül ortam sıcaklığında yavaş sertleşir, bu nedenle daha uzun priz süresi gerektirmektedir (Zhang ve diğ., 2020).

Priz süresini etkileyen birçok faktör vardır ve işlenebilirliğe göre daha karmaşık sonuçlar vermektedir. Örneğin, yüksek kalsiyumlu uçucu kül (C sınıfı) ile yapılan çalışmalarda sodyum hidroksit (NaOH) molaritesi arttıkça priz süresi uzamaktadır. Bu durum, yüksek NaOH konsantrasyonunun silisyum ve alüminyumun çözünmesini arttırarak kalsiyum çözünmesini sınırladığı böylece priz süresinin uzadığı ile açıklanmaktadır (Hanjitsuwan ve diğ., 2014 ; Malkawi ve diğ., 2016).

Bununla birlikte, düşük kalsiyumlu uçucu kül (F sınıfı) ile yapılan çalışmada NaOH molaritesi arttıkça priz süresi kısalmaktadır (Saloma ve diğ., 2016). Ancak her iki çalışmada da NaOH molaritesinin artmasıyla işlenebilirlik azalmaktadır (Saloma ve diğ., 2016 ; Malkawi ve diğ., 2016). Bir diğer çalışmada C sınıfı uçucu kül bazlı geopolimerde sodyumsilikat/sodyum hidroksit oranı arttıkça, priz süresi artmakta; UK/ÖYFC bazlı geopolimerde sodyumsilikat/sodyum hidroksit oranı arttıkça, priz süreleri kısalmaktadır. Benzer şekilde her iki çalışmada da sodyumsilikat/sodyumhidroksit oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır (Malkawi ve diğ., 2016 ; Nath ve Sarker, 2014).

Geopolimer beton priz süresi, geopolimer reaksiyonun bir sonucu olduğu için kaynak malzeme, ortam sıcaklığı, alkali çözelti gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle priz süresini ile etkileyen parametreler arasındaki ilişkinin daha detaylı şekilde araştırılması gerekmektedir.

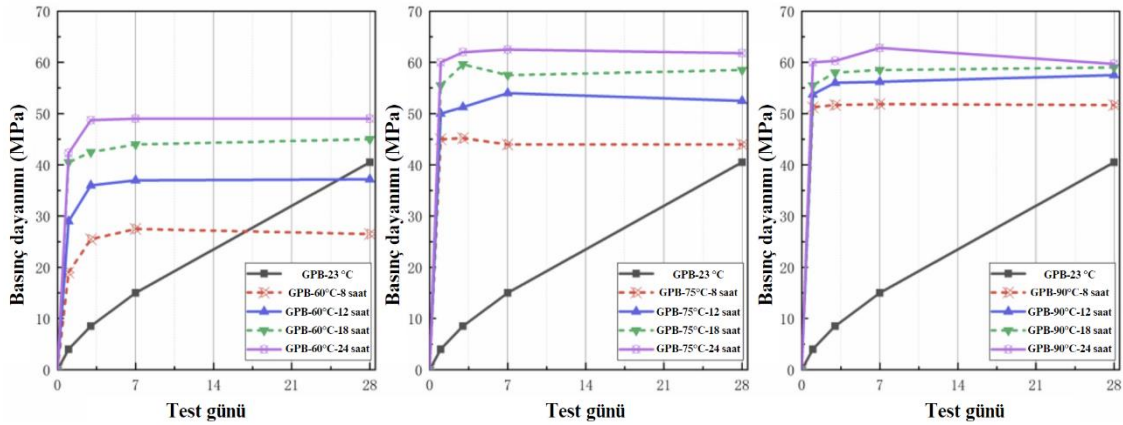
2.5.4. Sertleşmiş Geopolimer Betonun Özellikleri

2.5.4.1. Basınç Dayanımı

Geopolimer betonun basınç dayanımı yapısal stabilite ve güvenlik için en önemli özelliktir. Çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü gibi diğer mekanik özellikler ilk olarak basınç dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Geopolimer beton basınç dayanımı geopolimer beton bileşimlerine, karışım parametrelerine ve kürlenme

durumlarına göre değişmektedir. Bununla birlikte ısıl kürleme uygulanan geopolimer betonlar erken yüksek dayanım verirken ortam kürlemesi yapılan geopolimer betonlar normal portland çimentolu betona benzer şekilde zamanla dayanım kazanmaktadır (Lıban, 2022 ; Zhang ve diğ., 2020).

Noushini ve diğ. UK bazlı geopolimer betonlar hazırlayarak 12 farklı kürleme yöntemi uygulamıştır. Ortam kürlemesi (23°C) ile birlikte 60°C, 75°C, 90°C ısıl kürleme sıcaklıkları 8, 12, 18 ve 24 saat olmak üzere farklı sürelerde uygulanmıştır. Kürleme rejimine bağlı olarak 27,4 ila 62,3 MPa arasında geniş bir basınç dayanım aralığı elde edilmiştir. Bununla birlikte kürleme sıcaklıklarının 60 °C'den 90 °C'ye çıkması ile basınç dayanımları artmıştır, bununla birlikte optimum basınç dayanımları 18 ve 24 saat için 75°C'de gelmiştir. Bunun nedeni, uzun sürelerde daha yüksek kürleme sıcaklıklarının daha fazla reaksiyon ürünü oluşmasıdır. Geopolimer betonların 90 °C'de uzun süreli kürlenmesi mikro yapıları zayıflatarak basınç dayanımında düşmelere yol açmıştır. Şekil 2.24'te ortam kürlemesi ve ısıl kürleme uygulanan geopolimer beton numunelerin 28 güne kadar basınç dayanımları gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Ortam ve ısıl kürleme altında geopolimer betonların basınç dayanım gelişimleri (Noushini ve diğ., 2020)

Isıl kürleme uygulanan numunelerin dayanım geliştirme oranı ortam kürlemesine kıyasla yaklaşık 20 kat daha yüksektir. Isıl kürleme uygulanmış numuneler arasında ısıl kürleme süresinin ve sıcaklığının artması ile erken dayanım hızı artmıştır. 75 °C ve 90 °C'de kürlenen numuneler 28. gün basınç dayanımlarını ısıl kürlemenin hemen ardından elde etmişlerdir (Noushini ve diğ., 2020).

Ortam sıcaklığında (20-23 °C) kürlenen uçucu kül bazlı geopolimer betonlara yüksek

fırın cürufunun ikamesi ile basınç dayanımlarında her yaşta artışlar meydana gelmiştir. 28 günde UK bazlı geopolimer betona %10, %20 ve %30 ÖYFC ikamesi ile basınç dayanımları sırasıyla %33, %74 ve %110 artmıştır. Ayrıca karışımlardaki su/katı oranının artması ile dayanımlar düşmektedir. Geopolimer beton karışımların alkali aktivatör miktarı, molar oranları ve su/ katı oranları verilmiştir (Nath ve Sarker, 2014).

Tablo 2.19. Geopolimer betonlar için alkali aktivatör miktarı, kritik molar oranları ve su/katı oranları (Nath ve Sarker, 2014).

Karışımlar	Alkali aktivatör miktarı(%)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Molar oran			su/katı
			Na ₂ O/SiO	H ₂ O/Na ₂ O	Si/Al	
A35	35	2,5	0,11	11,67	1,77	0,18
A40, R2,5	40	2,5	0,12	11,75	1,80	0,2
A45	45	2,5	0,13	11,80	1,84	0,22
R1,5	40	1,5	0,14	10,63	1,76	0,20
R2,0	40	2,0	0,13	11,25	1,78	0,20

Karışımlardaki farklı alkali çözelti miktarı, SS/SH oranının basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelendiğinde; karışımların SS/SH oranının düşmesine bağlı olarak Na₂O/SiO₂ oranı artmakta, daha yüksek Na₂O/SiO₂ oranı ile daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Karışımlarda alkali çözelti miktarının (%35 ten %45'e) artması ile basınç dayanımları düşmektedir. Artan çözelti artmasıyla artan Si/Al oranına rağmen çözelti ile karışımın yükselen su/katı oranı ile dayanımın düştüğü, su/katı oranının burada anahtar faktör olduğu düşünülmektedir. Bulgulara göre, geopolimer karışımlardaki ÖYFC miktarı, alkali çözelti miktarı, SS/SH oranı, su/katı oranı gibi parametreler basınç dayanımlarını etkilemektedir (Nath ve Sarker, 2014).

Bernal ve diğ., alkali silikat ile aktifleştirilen farklı yüksek fırın cürufu içeriklerine sahip geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Bunun için 300, 400 ve 500 kg/m³ yüksek fırın cürufu içeriğine sahip geopolimer beton üretilmiş ve benzer şekilde üretilmiş (300, 400 ve 500 kg/m³ çimento içeriğine sahip) portland çimentolu betonlarla kıyaslanmıştır. Üretilen geopolimer betonlar test gününe kadar 25 ± 5 °C'de % 90 bağıl nem koşullarında hava kürlmesine bırakılırken, portland çimentolu betonlar 25 °C'de su

havuzunda kürlenmiştir. Her iki beton türünde de bağlayıcı içeriği arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca bağlayıcı içeriğinden bağımsız olarak geopolimer betonlar portland çimentolu betonlara kıyasla daha yüksek dayanımlar vermiştir. Başka bir dikkat çekici durum, bağlayıcı içeriği ne olursa olsun geopolimer betonların 90 günde 60MPa dan yüksek sonuçlar vermesi bu malzemelerin yüksek performanslı betonlar olarak sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Betonların mikro yapısı incelendiğinde; PÇB’de hidrasyon ürünlerinden gelen kalsiyum silikat hidrat (C–S–H), etrenjit ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) görülürken, geopolimer betonda ise geopolimer jeller (alüminosilikatlar) ve kalsiyum silikat hidrat (C–S–H) jelleri görülmektedir. GPB’nin mikro yapısı PÇB’ye kıyasla daha yoğun bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte ara yüzey geçiş bölgesi GPB betonlarda oldukça muntazam ve yoğun yapılı iken PÇB betonlarda gözenekli bir yapı hakimdir. Bu durum GPB betonların neden daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğunu açıklamaktadır (Bernal ve diğ., 2011).

Geopolimer betonun mekanik özelliklerini geliştirmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Geopolimer karışımlara nano silika, silis dumanı gibi yüksek amorf içeriğe sahip malzemeler ikame edildiğinde basınç dayanımları önemli oranlarda artmaktadır. Nano silika ve silis dumanı ikamesi ile basınç dayanımlarında yaklaşık % 100 lük artışlar elde edilmektedir (Okoye ve diğ., 2016 ; İbrahim ve diğ., 2018). Ayrıca, farklı kaynak malzemeler (cüruf, metakaolin, cam tozu, zeolit gibi), farklı aktivatörler (sodyum karbonat, sodyum metasilikat gibi) ve farklı kürlenme koşulları (buhar kürü, fırın kürü ve su kürü) kullanarak geopolimer betonun mekanik özelliklerini geliştirmek mümkündür (Manikandan ve Vasugi, 2022 ; Erfanimanesh ve Sharbatdar, 2020 ; Neupane, 2022 ; Kaplan ve diğ., 2023). Bununla birlikte geopolimer beton karışımlara bazalt lif, çelik lif eklenmesiyle basınç dayanımları artırılabilir. Geopolimer beton karışımlardaki lif oranının sürekli artması dayanımı belirli bir seviyeye kadar (genellikle %1,5-2,0) arttırmaktadır (Song ve Hwang, 2004 ; Ronad ve diğ., 2016).

2.5.4.2. Yarmada Çekme Dayanımı ve Eğilme Dayanımı

Geopolimer betonun yarmada çekme ve eğilme dayanımları önemli mekanik özellikleridir. Yarmada çekme dayanımı, beton yapıda çatlak oluşumu ve ilerlemesi, kesme mukavemeti ve donatı çeliğinin doğru yerleştirilmesi gibi diğer beton yapı fenomenleri ile ilişkilidir. Eğilme mukavemeti, beton kirişlerin eğilmeye (bükülmeye) ve

tahribata karşı dayanımıdır. Genel olarak, geleneksel betonun yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı farklı ampirik formüllerle basınç dayanımından tahmin edilebilir. Ancak geopolimer betonun yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımını tahmin etmek için geleneksel beton için üretilen ampirik formüller kullanıldığında deneysel çekme sonuçlarından daha yüksek bulunmaktadır. Geopolimer betonun yüksek basınç dayanımına kıyasla çekme dayanımları daha düşük gelmektedir (Fang ve diğ., 2018). Bununla birlikte, eğilme dayanımını tahmin etmek için, geleneksel beton için üretilen ampirik formüller kullanıldığında deneysel sonuçlardan daha düşük olduğu görülmüştür (Nath ve Sarker, 2017). Geopolimer beton çekme dayanımlarını tahmin etmek için farklı ampirik formüller üretilmiştir (Nath ve Sarker, 2017 ; Lee ve Lee, 2013 ; Sofi ve diğ., 2007).

Uçucu kül bazlı geopolimer betonlara yüksek fırın cürufu ikamesi basınç dayanımlarına benzer şekilde yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Bunun nedeni olarak karışımlara ikame edilen ÖYFC'nin yüksek reaksiyon aktivitesi, reaksiyon sürecini hızlandırması, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin oluşmasına öncülük etmesi ile açıklanmaktadır. Bununla birlikte sodyum hidroksit (SH) molaritesinin 10 molden 12 mole çıkmasıyla, SH/SS oranının 1,5'ten 2,5'e çıkmasıyla yarmada çekme ve eğilme dayanımları önemli şekilde artmaktadır. (Fang ve diğ., 2018).

Ortam sıcaklığında (27 °C) kürlenmiş uçucu kül-alccofine bazlı geopolimer betonların sodyum hidroksit molaritesi (M) ve uçucu kül içeriğinin (dozajının) artması ile yarmada çekme ve eğilme dayanımları artmaktadır. Bununla birlikte geopolimer betonların basınç, yarmada çekme ve eğilme mukavemetleri benzer eğilimleri takip etmektedir. En iyi sonuçlar 16 M ve 400 kg/m³ uçucu kül içeren numunelerde görülmüştür (Singhal ve diğ., 2018).

Wongsa ve diğ., farklı SS/SH oranlarında (0,5, 1, 1,5) ve farklı alkaliçözelti/uçucukül oranlarında (0,70, 0,75, 0,80) uçucu kül bazlı geopolimer betonlar üretmiştir. Geopolimer betonların üretiminde agrega olarak ince ve iri agrega olarak taban külü kullanılmıştır. Ayrıca referans numunesi için doğal ince ve iri agrega ile numuneler hazırlanmıştır. Üretilen betonlar plastik örtüler içerisinde 60 °C'de 48 saat süreyle kürlenmiştir. Geopolimer beton karışımların SS/SH oranı artması ve taban külü agregasının kullanılması yarmada çekme dayanımlarını düşürmüştür. Ayrıca alkaliçözelti/UK

oranının artması yarmada çekme dayanımlarına olumsuz etkiler yapmaktadır. En iyi yarmada çekme dayanımı 0,5 SS/SH oranında, 0,70 alkaliçözelti/UK ve doğal agrega ile elde edilmiştir (Wongsa ve diğ., 2016).

2.5.5. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri

Beton yapılar, hizmet ömürleri boyunca, dayanıklılıkla ilgili ciddi sorunlarla karşılaşmaktadır. Betonda geçirgenlik, büzülme, ısı iletkenlik, ısı direnç, donma çözülme, sülfat atağı, alkali silika reaksiyonu, asit saldırısı, karbonatlaşma ve klorür penetrasyonu gibi birçok faktör, betonun dayanıklılığını etkileyen önemli özelliklerdir. Geçirgenlik, beton yapıların uzun vadeli dayanıklılığına etki edebilecek önemli bir beton parametresi olarak kabul edilmektedir. Daha yüksek geçirgenlik, sıvı ortamın daha hızlı nüfuz etmesine ve betonun hızlı bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca, beton matrisindeki gözeneklerin daha yaygın olması, zararlı asidik iyonların daha fazla nüfuz etmesine ve betonun daha fazla bozulmasına yol açmaktadır. Öte yandan, betonda büzülme, daha büyük çatlakların veya küçük mikro çatlakların oluşmasına neden olan bir etken olarak öncelikle hesaba katılmalıdır. Sıcaklık gradyanının (ısı değişimi) meydana gelmesi, beton yapıda çatlaklara neden olabilir, bu nedenle termal iletkenlik ve termal direnç değerlendirilmesi de dikkate alınması gereken kritik bir dayanıklılık özelliğidir. Yüksek sıcaklık gradyanlarında beton yüzey tabakası iç kısımdan ayrılmaya ve parçalanmaya eğilimli hale gelmektedir. Bu nedenle, beton yapıların ısı direnci de değerlendirilmesi gereken kritik bir dayanıklılık özelliğidir. Donma çözülme dayanıklılığı, özellikle soğuk bölgelerde inşa edilen beton yapılar için önemlidir. Alkali silika reaksiyonu, dış nem koşullarına maruz kalan beton yapıların genleşme ve çatlama nedeniyle dayanıklılığını etkileyebilecek bir başka faktördür (Amran ve diğ., 2021).

2.5.5.1. Geçirgenlik ve Gözeneklilik

Geçirgenlik, klorür iyon saldırısına, korozyona, karbonatlaşmaya neden olabilecek suyun ve diğer agresif elementlerin beton yapılara nüfuz etme derecesini göstermektedir. Geçirgenliğin azalması, GPB matrisine asidik iyonların penetrasyonunu azaltarak betonun asit saldırısına karşı direnci, klorür iyonu penetrasyon direncini ve sülfat direncini arttırmaktadır. Bununla birlikte, beton gözenekliliğinin kontrolü çok önemlidir, çünkü, iyonların çevreden beton yapısına difüzyonu, esas olarak yapıların

zayıflamasından sorumludur (Amran ve diğ., 2021). IUPAC tanımına göre gözenekler üç farklı boyutta sınıflandırılır: makro gözenekler (50 ile 200 nm arasında), mezo gözenekler (3,6 ile 50 nm arasında) ve mikro gözenekler (3,6 nm'nin altında). Makro gözenekler, reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıkları arasındaki boşlukları, mezo gözenekler geopolimer fazlar arasındaki tipik boşlukları (matris jelindeki boşluklar), mikro gözenekler esas olarak jel ağı içerisindeki boşlukları göstermektedir. Genel olarak geopolimerizasyon sürecinin devam etmesi matriste boşlukların kapanmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte Na/UK oranının artması ile artan reaksiyon sonucu oluşan jellerin boşlukları azalttığı, Si/Al oranının artması ile geopolimer jel miktarının azalması sonucu boşlukların arttığı bildirilmiştir. Ek olarak, gözenek yapısı ve miktarı basınç dayanımını etkilemektedir (Zheng ve diğ., 2010). Mehta ve Siddique, basınç dayanımı ile porozite arasında zıt bir ilişki olduğunu bildirmiştir (Mehta ve Siddique, 2017).

Tho-in ve diğ. (2012) yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile hazırlanan geçirimli geopolimer beton (GGPB) özelliklerini incelemiştir. Çalışmada karışımlar için 0,5 sabit SS/SH oranı, 0,35, 0,40 ve 0,45 alkaliçöz/UK oranı kabul edilmiş, ayrıca 3 farklı (10M, 15M ve 20M) SH kullanılmıştır. Bulunan sonuçlara göre PCB, boşluk içeriği ve su geçirgenlik katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.20. GGPB'nin toplam boşluk oranı ve su geçirgenlik katsayısı (Tho-in ve diğ. 2012)

Karışımlar	Boşluk oranı (%)	Su geçirgenlik katsayısı (cm/s)
35GGPB10	30,5	2,22
35GGPB15	30,9	3,61
35GGPB20	34,4	5,96
40GGPB10	30,7	2,66
40GGPB15	28,8	2,91
40GGPB20	31,8	3,96
45GGPB10	28,7	3,64
45GGPB15	28,7	1,92
45GGPB20	29,9	2,39

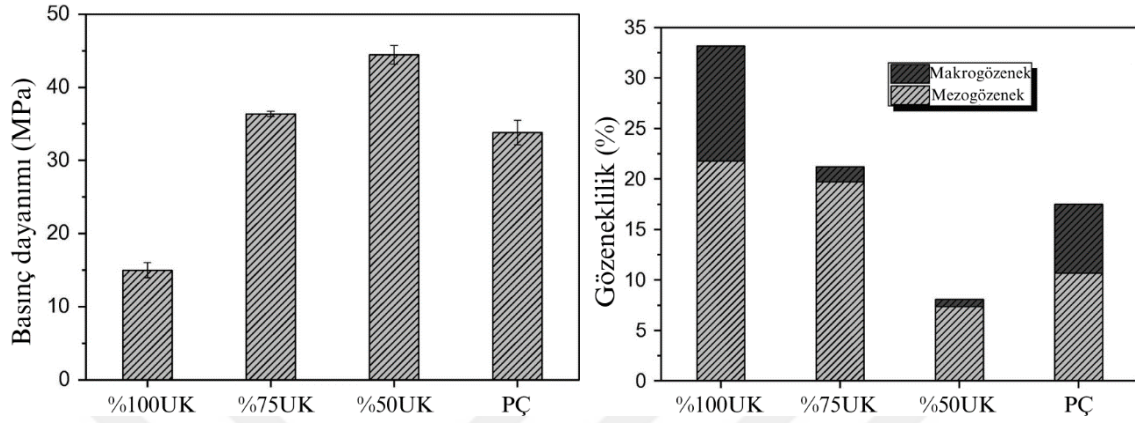
Tablo 2.20’de görüldüğü gibi en iyi sonuçlar boşluk oranı için 0,45 alkaliçöz/UK oranında 10 mol ve 15 mol de görülürken, su geçirgenlik katsayısı için 0,45 alkaliçöz/UK oranında 15 mol görülmüştür. Aynı alkaliçöz/UK oranında NaOH molaritesinin artması ile boşluk miktarı ve su geçirgenliği artmaktadır, ancak alkaliçöz/UK oranı 0,45 olduğunda bu durum değişmiştir. Bununla birlikte genel olarak sabit molarite de alkaliçöz/UK oranının artması ile karışımlarda geopolimer pasta içeriği artmış, böylece boşluk oranı ve su geçirgenliği azalmıştır. Ancak 10 M NaOH kullanıldığında tersinir bir durum oluşmuştur (Tho-in ve diğ. 2012).

Gunasekara ve diğ., dört farklı uçucu kül kullanılarak hazırlanan geopolimer betonların 1 yıl süreyle geçirgenlik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada hazırlanan tüm geopolimer beton numunelerde artan süreyle birlikte su ve hava geçirgenlikleri azalmış, dayanıklılık özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. Bunun sebebi, devam eden geopolimerizasyon sonucu oluşan jel yapıların, mezo ve makro gözeneklerin azalmasını ve daha yoğun yapıları mikro yapıyı oluşturması ile ifade edilmiştir. Matris jelinin artmasıyla meydana gelen mezo-gözeneklerdeki artış su emiliminin artmasına neden olurken, makro-gözeneklerdeki artış GPB’nin su ve hava geçirgenliğinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, uçucu küldeki iri partiküller gözenek doldurma kabiliyetini azalmakta ve homojen olmayan bir jel dağılımına neden olmaktadır. Bununla birlikte GPB üretiminde kullanılan farklı uçucu kül kaynak malzemeleri geçirgenlik özelliklerini önemli oranda değiştirmektedir. Genel olarak, düşük su ve hava geçirgenliği düşük klorür penetrasyonu ve yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanmaktadır (Gunasekara ve diğ., 2016).

Şekil 2.25’te UK/ÖYFC (%100UK, %100UK%25ÖYFC ve %50UK%50ÖYFC) bazlı geopolimerler pastaların ve PÇ pastaların gözenek hacmi ve basınç dayanım sonuçları verilmiştir. Buna göre karışımlarda cüruf içeriğinin artması gözenekli yapı hacmini önemli oranda düşürürken basınç dayanımlarında iyileşmeler sağlamaktadır. Cüruf içeriğinin %25 olduğunda kılcal gözenekler oldukça azalmakta; %50 olduğunda ise hem maksimum gözenek çapları hem de boşluk hacimleri belirgin şekilde rafine edilmiştir. Gözenekli yapı hacminin azalması artan cüruf içeriği ile oluşan C–A–S–H jellerinin, UK aktivasyonu sonucu oluşan N–A–S–H jellere kıyasla daha iyi boşluk doldurma özelliğine sahiptir (Yang ve diğ., 2014).

Bununla birlikte düşük gözenekli yapı düşük su emme ve düşük klorür difüzyonu ile

sonuçlanmaktadır. Örneğin aynı çalışmada yapılan su emme ve klorür difüzyonu deneylerine göre en düşük su emme ve en düşük klorür difüzyonu %50UK%50ÖYFC bazlı GP pastalarda görülmektedir (Yang ve diğ., 2014).



Şekil 2.25. UK/ÖYFC (%100UK, %100UK%25ÖYFC ve %50UK%50ÖYFC) bazlı geopolimerler pastaların ve portland çimentolu pastaların basınç dayanım ve gözeneklilik sonuçları (Yang ve diğ., 2014)

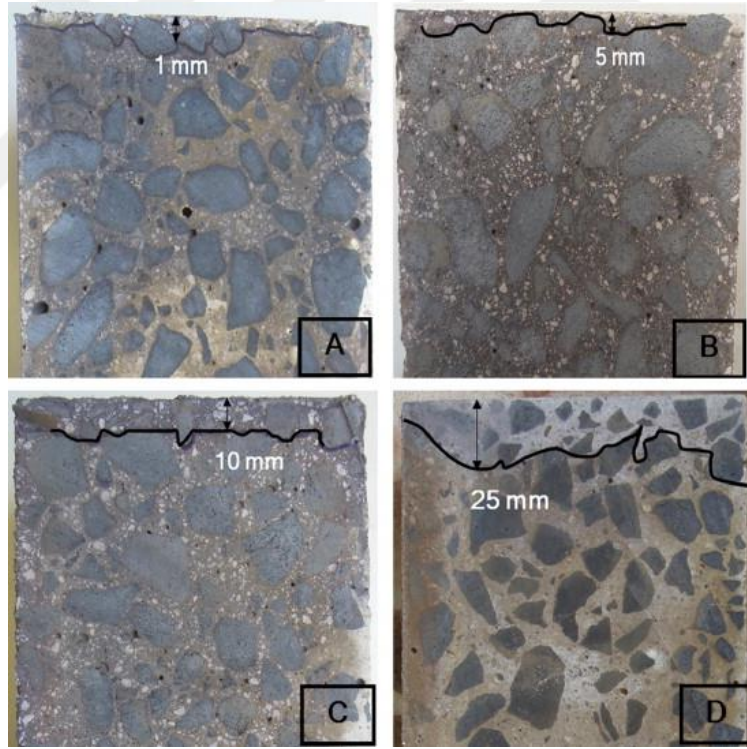
2.5.5.2. Klorür Penetrasyonu

Klorür iyonun penetrasyonu, liman, açık deniz, köprü ve kaldırımlar gibi alanlarda bulunan betonarme yapıların uzun süreli bozulmasının ana nedenlerinden biridir. Klorür hidrostatik basınç ve iyonların difüzyonu yoluyla, UK bazlı geopolimerlere nüfuz etmektedir. Ayrıca geopolimer beton için takviye çelik çubuklar kullanıldığında klorür penetrasyonu çelik çubukların korozyonuna yol açmaktadır (Amran ve diğ., 2021).

Chindaprasirt ve Chalee, sodyum hidroksit (NaOH) molaritesinin deniz ortamında bırakılan C sınıfı UK bazlı GPB'lerin klorür penetrasyonunu ve çelik korozyonu üzerine etkilerini incelemiştir. Buna göre, NaOH molaritesinin artması ile klorür penetrasyonunun ve beton içerisindeki çeliğin korozyonunun azaldığı bulunmuştur. Nispeten yüksek sodyum hidroksit molaritesi geopolimerizasyon sürecinde UK'dan daha fazla Si ve Al çözünmesini sağlayarak daha iyi bir polikondenzasyon derecesi üretmiş, böylece geopolimer beton yapının gözenekliliğinin azalmıştır. Önceki çalışmalarla uyumlu şekilde, daha düşük geçirgenlik daha düşük klorür girişi ve daha yüksek mukavemet sağlamıştır (Chindaprasirt ve Chalee 2014).

İsmail ve diğ., F sınıfı UK/ÖYFC bazlı geopolimer, ÖYFC bazlı geopolimer ve PÇB'nin

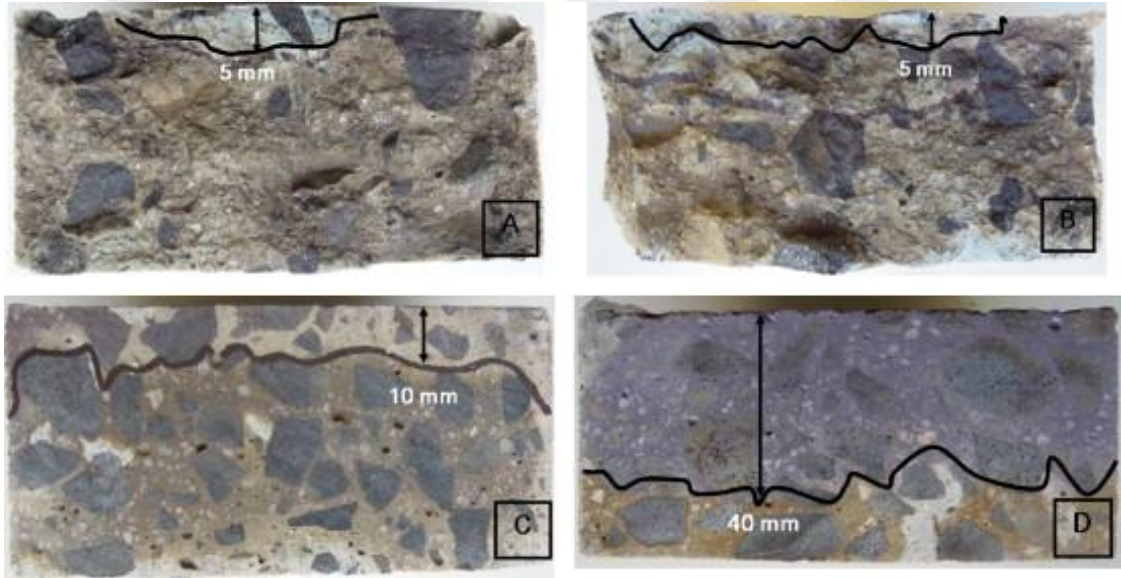
klorür geçirgenliklerini incelemiştir. Bunun için hızlandırılmış klorür geçirgenliği (NordTest NT Build 492) ve havuzlama yoluyla klorür geçirgenliği (ASTM C1543) testleri uygulanmıştır. Ayrıca her iki standartta da belirtildiği gibi klorür penetrasyon derinliğini belirleme için bölünmüş numunelere gümüş nitrat (AgNO_3) uygulanmıştır. Ağırlıkça farklı cüruf/uçucu kül oranlarında hazırlanan geopolimer betonlar ve referans portland çimentolu beton için havuzlama ve hızlandırılmış klorür geçirgenliği test sonuçlarını sırasıyla Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Klorür penetrasyon derinliği, klorür iyonu mevcudiyetinde gümüş klorürün (AgCl) beyaz çökmesi ile gözenek çözeltisindeki OH ile kahverengi gümüş oksit (Ag_2O) çökeltmesi arasındaki görünür sınır olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, takviyeli yapılarda çelik korozyonunun klorür ile ilk temas noktasında başlayabileceği göz önüne alınarak ortalama değerlerden yerine maksimum penetrasyon derinlikleri gösterilmiştir (İsmail ve diğ., 2013).



Şekil 2.26. Ağırlıkça farklı cüruf/uçucu kül oranlarında hazırlanan GPB’lerin ve PÇB’nin havuzlama klorür testi sonrasında betonlara AgNO_3 uygulaması ile bulunan klorür penetrasyon sınırı: A) %100ÖYFC, B) %75ÖYFC/%25 UK, C) %50ÖYFC/%50UK ve D) PÇB (İsmail ve diğ., 2013)

Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de görüldüğü gibi en iyi sonuçlar %100 ÖYFC ile hazırlanan GPB’lerde gelmiştir. Bununla birlikte karışıma UK ikamesi klorür penetrasyonunu

arttırmış, en yüksek klorür penetrasyonu ise PÇB’lerde gelmiştir. Genel olarak GPB’lerdeki bu düşük penetrasyon derinlikleri matriste oluşan ve klorür penetrasyonunu engelleyen yoğun C–N–A–S–H bağlayıcı jellerden kaynaklanmaktadır. Ağırlıkça %75 ve %50 ÖYFC içeren karışımlarda ana reaksiyon ürünü C–A–S–H iken ÖYFC’nin azalması ile (N–C)–A–S–H bağlayıcı jelleri oluşmaktadır. C–A–S–H jellerine kıyasla daha gözenekli yapıya sahip N–A–S–H jellerinin ağırlıklı olarak oluşması klorür penetrasyonuna karşı direnci azaltmaktadır, bu durum karışımlardaki UK içeriğinin artması ile penetrasyon derinliğinin artmasını açıklamaktadır. Ayrıca çalışmada üretilen karşılaştırılabilir dayanıma sahip PÇB numuneler daha az gözeneklilik göstermesine rağmen GPB numunelere kıyasla daha düşük klorür penetrasyonu direnci göstermiştir (İsmail ve diğ., 2013).



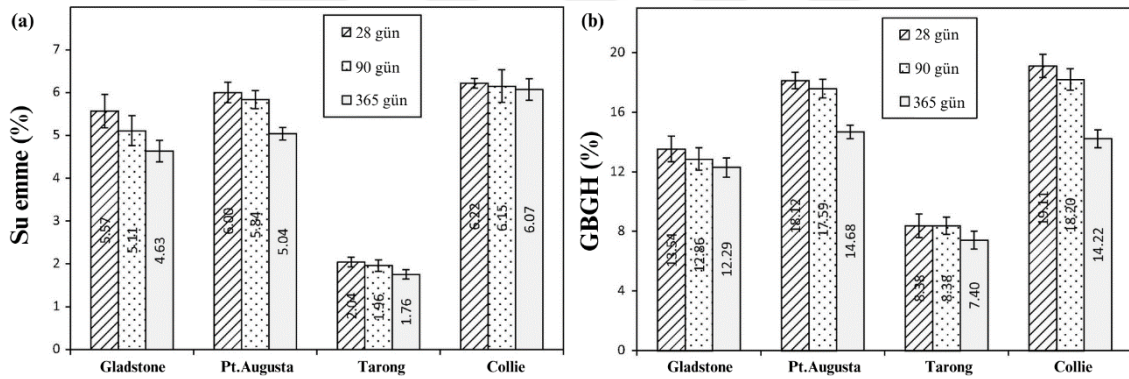
Şekil 2.27. Ağırlıkça farklı cüruf/uçucu kül oranlarında hazırlanan GPB’lerin ve PÇB’nin hızlandırılmış klorür testi sonrasında betonlara AgNO_3 uygulaması ile bulunan klorür penetrasyon sınırı: A) %100 ÖYFC, B) %75 ÖYFC/25 UK, C) 50 ÖYFC/50 UK ve D) PÇB (İsmail ve diğ., 2013)

2.5.5.3. Su Emme

Su emme, uygulanan yüksek bir hidrolik yük olmaksızın suyun beton gözeneklerinden hareket etmesidir. Literatürde su emme ile basınç dayanımı arasında ters bir ilişki, karbonatlaşma ve klorür difüzyonu ile doğrusal bir ilişki olduğu vurgulanmaktadır. Bu sebeple, betonun su emme değerleri, betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin ilk göstergesi olarak kabul edilebilir (Pradhan ve diğ., 2022).

UK bazlı GPB'nin su emmesi kürlenme yaşına bakılmaksızın genel olarak PÇB'den daha düşüktür. Bunun başlıca sebebi, UK-GPB'de parçacıklar arası çok güçlü bağlar sağlayan yüksek konsantrasyonlu alüminosilikat jeli oluşumundan kaynaklanmaktadır (Amran ve diğ., 2021). Ayrıca UK bazlı GPB'lere ÖYFC ikame edilmesi su emmeyi düşürmektedir. Cüruf bakımından zengin karışımlar ağırlıklı olarak ciddi bağlı su içeriğine sahip C–(A)–S–H jeli oluştururken, UK zengin karışımlar daha düşük balı su içeriğine sahip N–A–S–(H) jeli oluşturmaktadır. Ayrıca cüruf, düşük su emme ile sonuçlanabilecek gözenekleri doldurabilen çok daha ince parçacık boyutuna sahiptir (Chi ve Huang, 2013).

Su emme oranı ile gözeneklilik arasında güçlü bir ilişki vardır. Genel olarak betonda gözenekliliğin artması su emme oranını arttırmaktadır (Albitar ve diğ., 2017 ; Gunesakara ve diğ., 2016 ; Mehta ve Siddique, 2017). Şekil 2.28'de Gunasekara ve diğ., tarafından dört farklı uçucu kül ile hazırlanan GBP'lerin su emme ve geçirgen boşlukların görünen hacmi (GBGH) sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.28. a) Su emme b) UK bazlı GPB'lerin geçirgen boşlukların görünen hacmi (GBGH) (Gunasekara ve diğ., 2016)

Şekil 2.28'de görüldüğü gibi tüm beton numunelerde zamanla su emmelerinde azalmalar görülmüştür. PÇ beton yüksek geçirimli beton (%5'ten fazla su emen) ve düşük geçirimli betonda (%3'ten daha az su emen) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Buna göre, üretilen Tarong UK'sı ile hazırlanan GBP'ler düşük geçirimli beton sınıfına girmektedir. Bununla birlikte, çalışmada su emme değerlerinin basınç dayanımı için geçerli olmadığını gösterilmiştir. Spesifik olarak 365 günde su emme değerleri düşükten yükseğe sırasıyla Tarong, Gladstone, Pt. Augusta ve Collie şeklinde gelirken; basınç dayanımları yüksekten düşüğe sırasıyla Gladstone (60,7MPa), Pt. Augusta (47,9 MPa), Tarong (43,9 MPa) ve Collie (26,9 MPa) şeklinde gelmiştir (Gunasekara ve diğ., 2016).

Jindal ve diğ., pirinç kabuğu külü ve ultra ince cüruf ile üretilen GPB'lerin su emme özelliklerini incelemiştir. Bunun için, farklı dozajlarda (350 kg/m^3 , 370 kg/m^3 , 400 kg/m^3) pirinç kabuğu külü esaslı GPB'lere farklı oranlarda (%5, %10) ultra ince cüruf ikame edilmiştir. Su emme sonuçlarına göre pirinç kabuğu külü dozajı ve ultra ince cüruf ikame oranı arttıkça su emme oranı düşmüştür. Bununla birlikte, su emme değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında oldukça uyumlu ters bir ilişki gözlemlenmiştir. Daha düşük su emme oranı, artan bağlanma özelliklerini, sınırlı gözenek bağlantısını ve azaltılmış gözenekliliği göstermektedir (Jindal ve diğ., 2020).

2.5.5.4. Kılcal Su Emme

Kılcal su emme (sorptivite), doymamış bir betonun nem taşımamasının bir göstergesidir ve son zamanlarda beton dayanıklılığının önemli bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Sorptivite işlemi sırasında, betona su girişi için itici güç betonun gözenek boşlukları içindeki kılcal emmedir. Bu durum, matris içerisindeki gözeneklerin birbirine bağlı olduğunu göstermektedir (Shaikh, 2016). Bu nedenle, beton matrisi içerisine klorür ve sülfat iyonlarının giriş hızını azaltmak için düşük sorptivite değerleri istenir (Evangelista ve De Brito, 2010). Bununla birlikte, genellikle artan sorptivite ile basınç dayanımı ters orantılıdır. Yani basınç dayanımı ne kadar yüksekse kılcal su emme o kadar düşük olacaktır (Mehta ve Siddique, 2017).

Geopolimer karışımlara ÖYFC ikame edilmesi kılcal su emme düşmektedir. Geopolimerin düşük sorptivitesi, karışımlara ÖYFC dahil edilmesiyle matris yapısının artan kompaktlığına atfedilir. Bunun başlıca nedeni, aktive edilen ÖYFC'nin C-(A)-S-H ve C-N-A-S-H jelleri meydana getirmesidir. C-(A)-S-H jelleri boşluk doldurmada mükemmeldir (Zhu ve diğ., 2023). Ayrıca başka bir çalışmada, yüksek kalsiyumlu UK bazlı geopolimerlere çelik cürufu ikamesi %20 oranına kadar sorptiviteyi düşürürken, daha yüksek oranlarda ikame sorptiviteyi arttırdığı bildirilmiştir. Bununla birlikte çalışmada bulunan basınç dayanımları sonuçları ile sorptivite sonuçları arasında güçlü bir korelasyon gözlemlenmiştir (Song ve diğ., 2019). Ek olarak, geopolimer karışımlarda yüksek molariteye sahip sodyum hidroksit kullanımının sorptiviteyi azalttığı açıklanmıştır. Bu durum daha yüksek NaOH molar konsantrasyonu ve sodyum silikat içeriği ile oluşan yoğun yapıli alümino-silikat jel varlığına atfedilir (Kanagaraj ve diğ., 2022).

Lavanya ve Jegan, kaynak malzeme olarak C sınıfı uçucu kül ile üretilen GPB’de, PÇB’ye kıyasla daha düşük sorptivite katsayısı bildirmiştir. Bulgulara göre, karışımlarda UK dozajının artması ile soptivitenin arttığı gösterilmiştir (Lavanya ve Jegan, 2015). Ganesan ve diğ., çelik lif katkılı ve katkısız F sınıfı UK bazlı GPB lerin kılcal su emme özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, çelik katkılı ve katkısız PÇB üreterek sonuçları kıyaslamıştır. Buna göre, GPB betonlar PÇB betonlara göre daha düşük kılcal su emme vermiştir. Bununla birlikte her iki beton türünde de çelik lif ilavesi ile kılcal su emme düşmüştür. En düşük kılcal su emme %1 çelik lif (en yüksek oran) ilavesinde GPB’lerde görülmüştür. Bunun nedeni, liflerin mikro çatlaklar boyunca köprü oluşturarak birbirine bağlanan boşlukları azaltması ile daha yoğun bir beton yapı oluşması olabilir (Ganesan ve diğ., 2015).

Babu ve diğ., Beton dört bağlayıcı malzemeden oluşur: uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS), pirinç kabuğu külü ve Metakaolin kullanarak ikili, üçlü ve dörtlü karışımlarla geopolimerler üretmiş dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar incelendiğinde en düşük sorptivite üçlü karışımlarda (UK:ÖYFC:MK = 40:40:20) bulunmuştur. Bununla birlikte karışımlara ÖYFC ve MK ikamesi sorptiviteyi düşürürken, gözenekli yapıya sahip pirinç kabuğu külü ikamesi sorptiviteyi arttırmıştır. Ayrıca, çalışmada en düşük sorptivite değeri veren numuneler aynı zamanda en yüksek mekanik sonuçları vermiştir (Babu ve diğ., 2023).

2.5.5.5. Asit Saldırısı Direnci

Genellikle asit saldırısına maruz kalan çimentolu bağlayıcının hasarı esas olarak kalsiyum bileşiklerinin asit çözeltisi ile reaksiyonu sebebiyle oluşmaktadır. Böylece matriste oluşan çekme gerilimleri çimentolu bağlayıcının çatlamasına neden olmaktadır. Bununla birlikte UK/ÖYFC bazlı geopolimer betonlar mükemmel asit direnci göstermektedir. Bunun sebebi olarak düşük su emme oranları ve düşük kalsiyum içeriği sebebiyle daha az çözünür bileşikler üretmesi ile açıklanmaktadır (Fernando ve Said, 2011).

Manjunath ve diğ., ÖYFC bazlı geopolimer betonun %5 sülfirik asit (H_2SO_4) çözeltisinde uzun süreli durabilitesini incelemiş sonuçlar portland çimentolu referans betonlar ile kıyaslamıştır. Asit saldırısına maruz kalan portland çimentolu beton 56 günde yaklaşık %75 ağırlık kaybı, 90 günde %95 ağırlık kaybı görülürken, 103 günde ağırlık kaybı %100’e ulaşmıştır. Geopolimer betonda ise 365 günlük maruziyetten sonra bile ağırlık

kaybı %10'dan az olmuştur. Normal betonun dayanım kaybı 90 günde yaklaşık %90 gelirken, geopolimer betonda 365 gün sonunda basınç kayıpları %36,4–%39,1 aralığında olmak üzere çok daha düşük gelmiştir. Bu sonuçlara göre tüm geopolimer betonların çimentolu betonlara kıyasla çok daha iyi korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir. Geopolimer betonun mükemmel asit direnci, matristeki C–A–S–H jelinin de kalsifikasyonuna (kalsiyumsuzlaştırma) bağlanabilir. Geopolimer betondaki dayanım kayıplarının ve ağırlık kayıplarındaki önemli azalmalar, asit çözeltisinin geopolimer betona daha az nüfuz etmesine ve daha az reaksiyona yol açan yoğun mikro yapı ve mükemmel gözenek yapısına bağlanabilir. Bununla birlikte geopolimer betonun agregasında herhangi bir bozulma görülmemiş, asidik ortamlara uzun sürelerle maruz kalma durumlarında kararlı bir yapı sergilemiştir (Manjunath ve diğ., 2019).

Okeye ve diğ., %2 sülfirik asit (H_2SO_4) çözeltisine maruz bırakılan uçucu kül ve silis dumanı bazlı GPB'lerin dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Bunun için farklı oranlarda (GPB1: %100UK, GPB2: %100UK-%10SD, GPB3: %100UK-%20SD) uçucu kül ve silis dumanı karıştırılarak GPB numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca sonuçlar PÇB numuneleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 2.29'da 90gün süreyle %2 sülfirik asit çözeltisine maruz bırakılan GPB ve PÇB'lerin dış görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.29. a) GPB3 b) PÇB'lerin 90 gün süre ile %2 sülfirik asit çözeltisine bırakılan betonların görünüşleri (Okeye ve diğ., 2017)

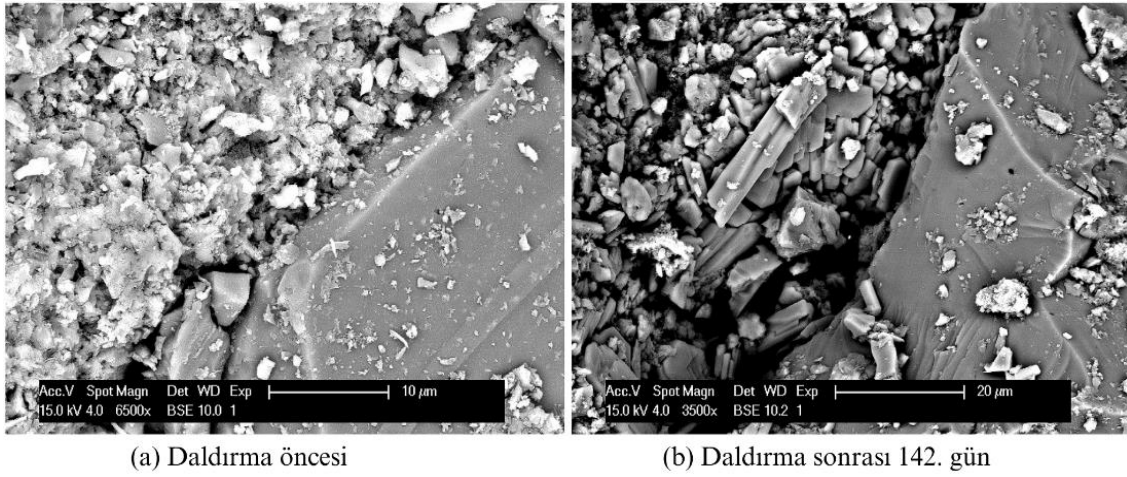
Numunelerin dış görünüşleri incelendiğinde, %20 silis dumanı içeren GPB'lerin dış yüzeylerinin bozulmadığı ve aşınmadığı görülmektedir. PÇB da ise yüzey korozyonu ve kenar kırılmaları görülmektedir. Ağırlık testleri sonucu tüm yaşlarda en yüksek ağırlık

kayıpları PÇB betonlarda görülürken, en düşük ağırlık kayıpları GPB3'te görülmektedir. Diğer sonuçlarla uyumlu şekilde, en yüksek basınç dayanım kaybı PÇB betonda en düşük basınç dayanım kaybı ise GPB3'te görülmüştür. PÇB'nin düşük performansı hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve C-S-H jellerin asit çözeltisiyle reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. GPB'de geopolimerizasyon sonucu oluşan N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri GPB'yi asit direncine karşı dirençli hale getirmektedir. Ayrıca GPB karışımlarda silis dumanı içeriğinin artması ile asit çözeltisine karşı direncin arttığı bulunmuştur. Artan dayanıklılık, geopolimerizasyon artması ve gözenek boyutunun küçülmesi ile açıklanmaktadır. Geopolimer betonların asidik ortamda portland çimentolu betondan daha iyi performans göstermesi geopolimer betonun kireç kullanmaması, dolayısıyla daha düşük kalsiyum içeriğine sahip olmasına bağlanabilir. Ayrıca geopolimer betonun geçiş bölgesi olmadığı için sülfirik asit geçişine izin vermemektedir. Bu faktörler aynı zamanda geopolimer betonun daha yüksek durabilite özellikleri göstermesini de açıklamaktadır (Okeye ve diğ., 2017).

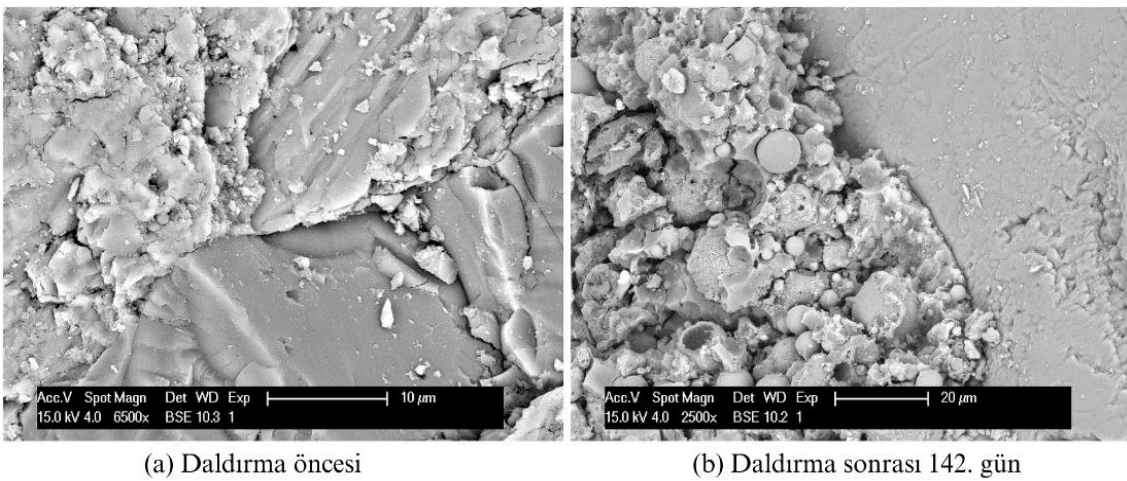
Gu ve diğ., UK bazlı geopolimer beton ve normal çimentolu betonun sülfirik asit çözeltisinde mikro yapı değişimini incelemiştir. PÇB ve GPB betonlar üzerinde yapılan asit çözeltisi deneyi öncesi ve farklı sürelerde (6 ve 14 hafta) asit çözeltisine daldırılan numuneler üzerinde yapılan XRD analizlerine göre; PÇB numunelerde deney öncesi kuvars (kumun ana bileşeni), portlandit ve kalsit fazları tespit edilmiştir. 6 haftalık XRD'de jipsler görülmeye başlanmış, 14 haftalık XRD'de jipsin baskın olduğu, kalsit ve portlandit fazlarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte SEM görüntülerine göre PÇB'nin asit saldırısından önce arayüzeyi agrega ile çok sağlam bir bağlantı kurarken, 142 gün asit çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra arayüzey bölgesinde jips (alçı taşı) kristalleri oluşmaktadır. Arayüzey bölgesinde oluşan bu jips kristallerinin gözenekli ve yumuşak yapısı arayüzey bölgesini zayıflatarak numunelerin mukavemetinde önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Şekil 2.30'da PÇB'lerin asit çözeltisine daldırmadan önce ve sonrasındaki arayüzey bölgesi SEM görüntüleri verilmiştir (Gu ve diğ., 2018).

GPB numuneler üzerinde yapılan XRD deneyine göre; test öncesi kuvars ve mullit tespit edilmiştir. 6 haftalık daldırmadan sonra XRD deneyi bozulmamış bir yapıyı göstermektedir. Bu da GPB bozulma sürecinin çok yavaş ilerlediğini göstermektedir. 14 haftalık

daldırmadan sonra kristal jips tespit edilmiştir. F sınıfı uçucu küldeki çok düşük kalsiyum miktarı nedeniyle oluşan jipsin büyük ihtimalle kireç taşı agregasından gelen kalsiyum karbonat (CaCO_3) ile sülfirik asit reaksiyonu sonucu oluştuğu tahmin edilmektedir. Bununla birlikte yapılan SEM analizine göre geopolimer beton numuneler asit çözeltisine daldırılmadan önce agrega ile pasta arasında çok sağlam bir bağlantı görülmektedir. GPB numunelerin 142 gün asit çözeltisine daldırıldıktan sonraki arayüzey geçiş bölgesinin, asit çözeltisine daldırılmadan öncekine göre morfolojisinde önemli bir fark görülmemektedir. Bu durum GPB'lerin PÇB ye kıyasla çok daha iyi asit direncine sahip olduğunu göstermektedir (Gu ve diğ., 2018). Şekil 2.31'de GPB'lerin asit çözeltisine daldırmadan önce ve sonrasındaki arayüzey bölgesi SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.30. PÇB numunesinin asit çözeltisine daldırılmadan önce (a) ve daldırıldıktan sonraki (b) arayüzey geçiş bölgesi değişimi (Gu ve diğ., 2018)



Şekil 2.31. GPB numunesinin asit çözeltisine daldırılmadan önce (a) ve daldırıldıktan sonraki (b) arayüzey geçiş bölgesi değişimi (Gu ve diğ., 2018)

2.5.5.6. Sülfat Atağı Direnci

Geleneksel katkılı çimentolarda sülfat saldırısı, sülfat iyonlarının (SO_4) betona sızdığında gerçekleşmektedir. Sülfat saldırısı, kalsiyum alüminat reaksiyonlarını, sülfat tuzu (sodyum sülfat, sodyum karbonat veya magnezyum sülfat gibi) tezahürünü ve taumasit oluşumunu kapsamaktadır. Spesifik olarak, PÇB'un genleşmesi, çatlaması, yumuşaması, mukavemet kaybı ve pullanması gibi zararlı etkileri olan etrenjit, jips ve taumasit oluşumuna katkıda bulunur. Reaksiyon sonucu oluşan çatlaklar genleşme ile büyüyerek betonun yıkımına neden olmaktadır (Amran ve diğ., 2021 Santhanam ve diğ.). Geopolimer betonun bozulması esas olarak Na^+ iyonlarının geopolimerden sülfat çözeltisine geçmesi dikey çatlaklara neden olmakta, böylece mukavemetin kaybı meydana gelmektedir. Ek olarak, sülfat çözeltisi genellikle geopolimer jeldeki Si-O-Si bağlarının kırılmasına ve Si'nin dışarı sızmasına neden olmaktadır (Zhuang ve diğ., 2016).

Bakraev, NaOH, KOH veya Na_2SiO_3 alkali aktivatörlerini kullanarak hazırladığı F sınıfı UK bazlı geopolimer pastalar 5 ay süreyle sülfat ortamlarına (5% MgSO_4 çözeltisi, 5% Na_2SO_4 çözeltisi ve 5% MgSO_4 + 5% Na_2SO_4 çözeltisi) maruz bırakmıştır. Çalışmada ayrıca PÇ ve PÇ/UK bazlı pastalar üretilerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, sülfat çözeltilerine maruz bırakılan geopolimer pastalarda görsel bir bozulma görülmemiş, numunelerin yüzeylerinde tortu kalmamış ve testten hemen önceki kadar pürüzsüz bir yüzey görülmüştür. Ancak PÇ ve PÇ/UK numunelerinde görünümünde değişimler görülmüştür: Magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin üzerinde 1mm kalınlığında beyaz bir kaplanırken, Sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin köşelerinde çatlaklar oluşmuştur. Magnezyum + Sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan PÇ pastalar en yüksek bozulmayı göstermiş ve ağırlıkları artmıştır. Numuneler farklı basınç dayanım sonuçları göstermiştir. Tablo 2.21'de farklı sülfat ortamlarına maruz bırakılan numunelerin dayanım değişimi verilmiştir. Burada UKSH: sodyumhidroksit ile aktive edilmiş UK, UKSH-KH: sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile aktive edilmiş UK, UKSH-SS, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilmiş UK temsil etmektedir (Bakharev, 2005).

Basınç dayanım değişim sonuçları incelendiğinde UKSH numuneleri diğer geopolimer

numunelerden ve portland çimentolu numunelerden daha iyi sonuçlar göstermiştir. Numunelerinde mikro yapı analizine göre, basınç dayanımı artan numunelerde daha yoğun bir mikro yapı görülürken, basınç dayanımı düşen numunelerde açık renkli çökelmeler görülmüştür. Ayrıca görsel incelemesinde herhangi bir bozulma belirtisi görülmemesine rağmen UKSH-KH numunelerin mikroskobik incelemesinde yüzeyden 10-15 mm derinliğine uzanan dikey çatlaklar görülmüştür. UKSH ve UKSH-SS numunelerde bu tür çatlaklar görülmemiştir (Bakharev, 2005).

Tablo 2.21. Sülfat ortamında basınç dayanımı değişimi özeti (%) (Bakharev, 2005)

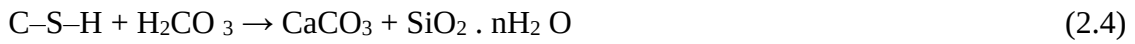
Numuneler	Na ₂ SO ₄ çözeltisi	MgSO ₄ çözeltisi	Na ₂ SO ₄ + MgSO ₄ çözeltisi
UKSH	+4	+12	+12
UKSH-KH	-65	+35	+10
UKSH-SS	-18	-24	-4,5
PÇ	-30	-21	-35
PÇ+UK	-14	-4,8	-19

Bununla birlikte, literatürde birçok çalışmada sülfat atağına maruz bırakılan geopolimer betonların farklı dayanıklılık özellikleri gösterdiği bildirilmiştir. Örneğin, Mithun ve Narasimhan, ÖYFC bazlı geopolimer betonların NaSO₄ etkisi altında 12 aya kadar sürekli basınç dayanım artışı, MgSO₄ etkisi altında ise 3 aya kadar basınç artışı 12 aya kadar basınç düşmeleri gösterdiğini açıklamıştır. Heikal ve diğ., ÖYFC bazlı geopolimer betonlarda 6 aya kadar sürekli basınç artışı olduğunu bildirmiştir (Mithun ve Narasimhan, 2016 ; Heikal ve diğ., 2014). Ancak genel olarak kabul edilen görüş, sülfat atağı maruziyetinde, GBP'lerin PÇB'lere kıyasla daha dayanıklı olduğudur. Bu durum, sülfat etkisinde PÇB'lerde etrenjit ve jips oluşması, GPB'lerde düşük gözenekli yapı ve oluşan ek reaksiyon ürünlerin mikro yapıyı yoğunlaştırması ile açıklanmaktadır. Ek olarak, sülfat etkisine bırakılmış geopolimer betonlarda, yüksek kalsiyumlu sistemlerin düşük kalsiyumlu sistemlere kıyasla daha çok etkilendiği gösterilmiştir. Bunun sebebi, kalsiyum varlığında jips ve etrenjit oluşumuyla meydana gelen beton yapısındaki değişikliklerdir (Zhang ve diğ., 2017 ; Long ve diğ., 2017 ; Bakharev, 2005).

2.5.5.7. Karbonatlaşma Direnci

Karbondioksitin (CO₂) betona nüfus etmesi ile başlayan karbonatlaşma süreci betonarme yapıların bozulmasının ana faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Beton içerisindeki çeliğin dış yüzeyi onu korozyona karşı koruyan çok ince bir demir oksit pasivasyon tabakası ile kaplanmıştır. Bu oksit tabakası betonun yüksek alkali ortamda (pH yaklaşık 13) oluşmaktadır. Ancak karbonatlaşma reaksiyonu matrisin pH'ını yaklaşık 9'a kadar düşürerek bu tabakayı yok etmektedir. Böylece donatının korozyona uğramasına sebep olmaktadır (Torgal ve diğ., 2012 ; Behfarnia ve Rostami, 2017).

Karbonatlaşma süreci ilk olarak CO₂'in su ile reaksiyona girerek H₂CO₃ (karbonik asit) oluşturması ile başlar, bu zayıf asit daha sonra çimentonun hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve su oluşturmakta, böylece betonun alkaliliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Karbonatlaşma reaksiyonu aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.



Betonda alkali korucu tabakanın ortadan kalkmasıyla donatı korozyon sürecini başlatan iki ana faktör karbonatlaşma ve klorür penetrasyonudur (Behfarnia ve Rostami, 2017).

Geopolimer betonun karbonatlaşma süreci normal betondan farklı ilerlemektedir. Yüksek kalsiyumlu GPB'lerin geopolimerizasyon sonucu ürünlerinde Ca(OH)₂ bulunmaması nedeniyle, CO₂ doğrudan C-A-S-H jeli ile reaksiyona girerek CaCO₃ üretmektedir. Düşük kalsiyumlu GPB'lerde kireç bulundurmayan N-A-S-H jeli olduğundan, birincil karbonatlaşma süreci gözenek çözeltisinin yüksek alkalilikten yüksek Na₂CO₃ konsantrasyonuna dönüşmesidir. Böylece matrisin mikro yapısı biraz değişmektedir (Zhang ve diğ., 2020).

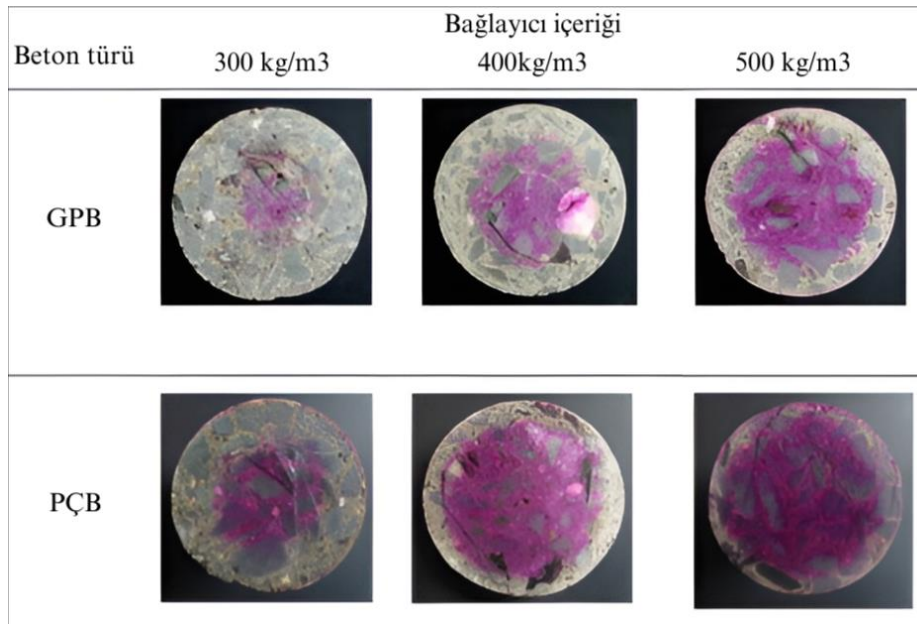
Tablo 2.22 ve Şekil 2.32'de GPB'un karbonatlaşmasını inceleyen iki farklı çalışma sonuçları gösterilmiştir (Bernal ve diğ., 2011 ; Behfarnia ve Rostami, 2017). Buna göre yüksek fırın cürufu ile hazırlanan GPB'lerde alkaliçözelti/cüruf oranı arttıkça karışımın

alkaliliği artmış, böylece GPB'un karbonatlaşma derinliğinin azalmasına yol açmıştır (Bernal ve diğ., 2011). Ancak sadece bağlayıcı içeriği arttırıldığında karbonatlaşma hem GPB hem de PÇB'lerde azalmakta, daha küçük bir karbonatlaşma derinliği göstermektedir. Bununla birlikte PÇB betonlar cüruf içerikli GPB betonlara kıyasla daha düşük karbonatlaşma göstermektedir. GPB betonların CO₂ maruziyeti sonucu oluşan ana reaksiyonu ürünü, alkali gözenek çözeltilerinin ve C-A-S-H jellerinin karbonatlaşmasından türetilen karbonat (özellikle kalsit ve trona) bileşikleridir (Bernal ve diğ., 2011).

Tablo 2.22. PÇB ve OGPB için karbonatlaşma derinliği (Behfarnia ve Rostami, 2017)

Karışımlar	Karbonatlaşma derinliği (mm) (14 gün)	Karbonatlaşma derinliği (mm) (28 gün)	d _{GPB} /d _{PÇB} (14 gün)	d _{GPB} /d _{PÇB} (28 gün)
PÇB	4,93	6,12	1	1
YFC40	7,34	8,93	1,49	1,46
YFC45	7,09	8,71	1,44	1,42
YFC50	6,87	8,13	1,39	1,33
YFC55	6,8	7,78	1,38	1,27

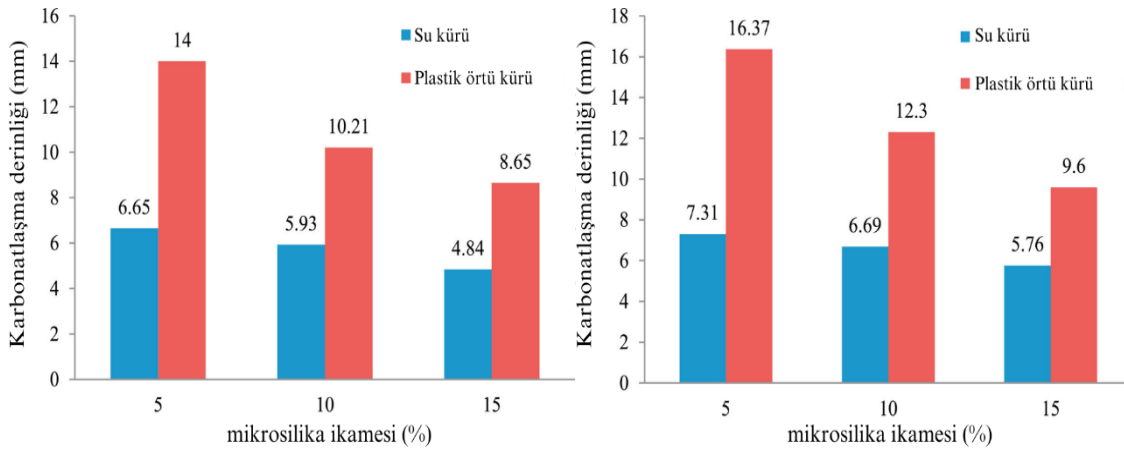
Not: YFC40 = alkaliçözelti/cüruf = 0,40



Şekil 2.32. %1 CO₂ ortamına 1000 saat maruz kalan GPC ve OPCC için fenolftalein indikatörü ile ölçülen karbonatlaşma derecesi (Bernal ve diğerleri, 2011)

Şekil 2.32’de görüldüğü gibi numunelerin hala yüksek alkali olduğu karbonatlaşma olmayan kısımlarında mor-kırmızı bir renk elde edilir. Beton alkaliliğinin düştüğü karbonatlaşma olan kısımda ise renklenme olmamaktadır (Torgal ve diğ., 2012).

Şekil 2.33, GPB’ların farklı kürlenme koşullarında ve cüruf ile hazırlanan geopolimer betonlara mikro silika ikamesinin karbonatlaşma reaksiyonu üzerindeki etkilerini göstermektedir. Buna göre su ile kürlen numunelerin karbonatlaşma direnci plastik örtüye sarılarak kürlen numunelere kıyasla çok daha iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte karışımlarda mikro silika ikamesinin karbonatlaşma direncini arttırdığı bulunmuştur (Behfarnia ve Rostami, 2017).



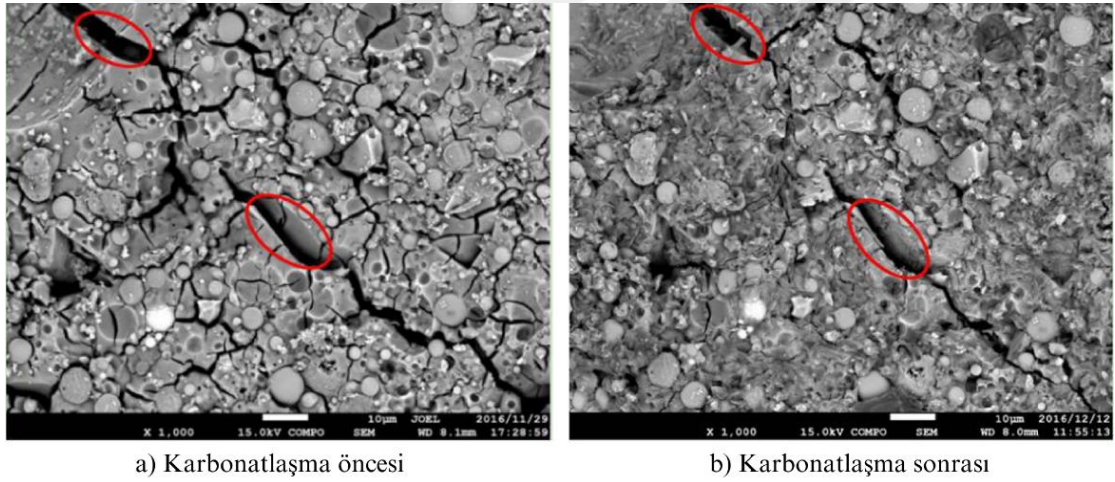
Şekil 2.33. 14 ve 28 günlük GPB’nin karbonatlaşma derinliği (Behfarnia ve Rostami, 2017)

Badar ve diğ., kütlece %1,97, %5,00 ve %12,93 CaO içeriğine sahip 3 farklı uçucu kül ile üretilen geopolimer betonların karbonatlaşma direncini incelemiştir. Düşük kalsiyum içeriğine sahip F sınıfı uçucu kül ile hazırlanan GPB’lerde yüksek alkali ortamın korunduğu (pH seviyeleri 12’nin üzerinde) ve karbonatlaşma direncinin daha iyi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte yüksek kalsiyum içeren uçucu kül betonların pH seviyelerinin düştüğü böylece karbonatlaşmaya daha yatkın olduğu görülmüştür (Badar ve diğ., 2014).

Li ve Li, UK/ÖYFC bazlı ortam sıcaklığında kürlen numunelerin normal betonlardan daha düşük karbonatlaşma direncine sahip olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte GPB’lerde karbonatlaşma sonucu oluşan CaCO_3 mikro çatlakları doldurmada basınç dayanımlarında iyileştirmeler yapmaktadır. Karbonatlaşma öncesi GPB’nin basınç

dayanımı 29,7 MPa iken karbonatlaşma sonrası 34,2 MPa olmuştur. Şekil 2.34'te GPB'nin karbonatlaşma öncesi ve sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.

Çalışmada ayrıca karbonatlaşma direncini etkileyen faktörler incelenmiştir. Buna göre ÖYFC nin inceliğinin artması, sıcaklık küremesi yapılması, karışımlara geciktirici eklenmesi, sodyumsilikat ve sodyumhidroksit karışımından oluşan alkali aktivatördeki sodyumsilikat miktarının azalması, alkaliçözelti/bağlayıcı miktarının artması, YFC içeriğinin artması, basınç dayanımının artması, Na/Si oranının artması ile karbonatlaşma direncinin artacağı bildirilmiştir. Ayrıca sodyum hidroksit ile hazırlanan GPB lerin sodyum silikat ile hazırlanan GPB'lerden daha yüksek karbonatlaşma direnci gösterdiği açıklanmıştır. Bununla birlikte karışımlardaki YFC'nin basınç dayanımını arttırıcı etkisiyle karbonatlaşma direncini iyileştirdiği düşünülmektedir (Li ve Li 2018).



Şekil 2.34. GPB'nin karbonatlaşma öncesi (a) ve karbonatlaşma sonrası (b) SEM görüntüleri (Li ve Li, 2018)

Bernal ve diğ., UK/ÖYFC bazlı geopolimerlerin mikro yapısını incelemiştir. Buna göre, N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri geopolimerizasyon sonucu oluşan iki ana üründür. Bu jellerin karbonatlaşma direnci incelendiğinde, N-A-S-H jelleri daha gözenekli, kolayca karbonatlaşabilen bir yapıya sahiptir. Ancak N-A-S-H jellerinin mikro yapısı karbonatlaşmaya karşı neredeyse hiç değişmeyen yüksek oranda alkalın gözenek solüsyonu içerir. Diğer yandan, C-A-S-H jelleri daha az gözenekli, daha az karbonatlaşabilen bir yapıya sahiptir. Ancak C-A-S-H jelleri de kalsifikasyon nedeniyle önemli oranda yapısal değişiklik gösterebilir. Hem hızlandırılmış hem de doğal karbonatlaşma, cüruf içeren sistemlerde çapraz bağlı C-A-S-H jelinin de kalsifikasyonu

sonucu kalıntı silikat fazı bırakırken; uçucu külün aktivasyonu sonucu oluşan N–A–S–H jelleri ise önemli oranda değişmeden kalmaktadır. (Bernal ve diğ., 2013).

Bütün sonuçlar incelendiğinde doğru parametreler kullanılarak karbonatlaşma direnci yüksek GPB üretilebilir. Örneğin yüksek oranda uçucu kül, daha ince partiküllere sahip kaynak malzeme, yüksek miktarda alkali çözelti ve ısıtma kütlesi ile karbonatlaşma direnci yüksek GPB üretilebilir.

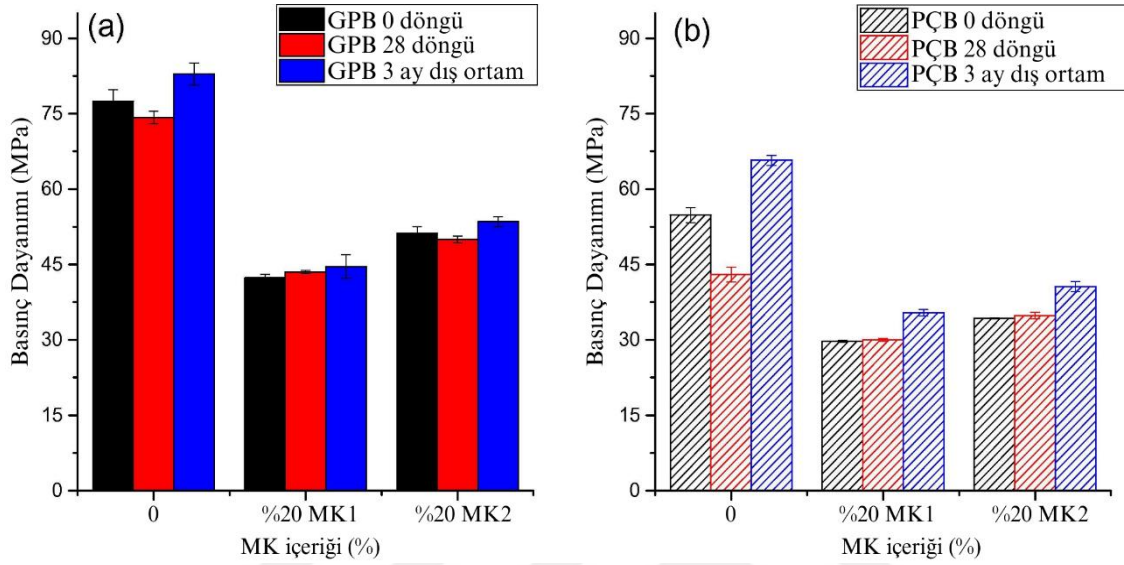
2.5.5.8. Donma Çözülme Direnci

Donma çözülme döngüleri beton ve matrisin genişlemesine, iç çatlamaya ve kütle kaybına neden olmaktadır. Donma çözülme döngülerine betonun direnci, soğuma hızı, matris yapısı, kütlenme koşulları, donma önleyici tuzların kullanımı ve uygun gözenekli yapı oluşumuna bağlı olarak değişmektedir. Donma nedeniyle oluşan hasarlar GPB'lerin performansını önemli ölçüde etkileyerek, GPB yapıların güvenliği ve dayanıklılığı üzerinde bir tehdit oluşturmaktadır. Literatürde birçok çalışma UK bazlı geopolimer kompozitlerin çimentolu kompozitlerden daha iyi donma çözülme direnci verdiğini göstermektedir (Amran ve diğ., 2021 ; Zhang ve diğ., 2020).

Cai ve diğ., ÖYFC bazlı geopolimer betonların fraktal teori ile incelemiştir. Mikroskobik ve makroskobik çatlak yüzeyi düz olmayan, istikrarsız olan beton agrega arayüz şekli çok düzensizdir. Oluşan çatlak yolu düzensizdir ve fraktal özellikler göstermektedir. Bu nedenle fraktal teori, donma çözülme altındaki GPB'lerin kırılma davranışlarını analiz etmek için çok uygun bir yöntemdir. Donma çözülme süreleri arttıkça betonun kırılma tokluğu düşmekte ve fraktal boyutu artmaktadır. Ayrıca, kırılma tokluğu ile fraktal boyutu iyi bir doğrusal ilişkiye sahiptir. Bununla birlikte, GPB karışımlarında cüruf içeriğinin ve sabit cüruf içeriğinde alkaliçözelti/cüruf oranının artması fraktal çatlak boyutunu düşürmektedir (Cai ve diğ., 2017)

Şekil 2.35'te iki farklı mikro kapsül (MK1-MK2) içeren ve mikro kapsül içermeyen PÇB ve UK/ÖYFC bazlı GPB'lerin donma çözülme performansı verilmiştir. Buna göre GPB'lerin PÇB'lerden daha iyi bir donma çözülme direncine sahip olduğu görülmektedir. Mikro kapsüllerin yumuşak yapısı ve beton matrisle zayıf bağlantısı sebebiyle betonların mekanik özelliklerine olumsuz etkileri olurken, donma çözülme direncini arttırmaktadır.

Çalışmada ayrıca donma çözülme direncine ek olarak 3 ay süreyle dış ortamda (Norveç, Fredrikstad’da) bırakılan beton numunelerin mekanik performansı incelenmiştir. 3 ay açık havada bırakılan tüm beton numunelerinde basınç dayanımı artmıştır (Pilehvar ve diğ., 2019).



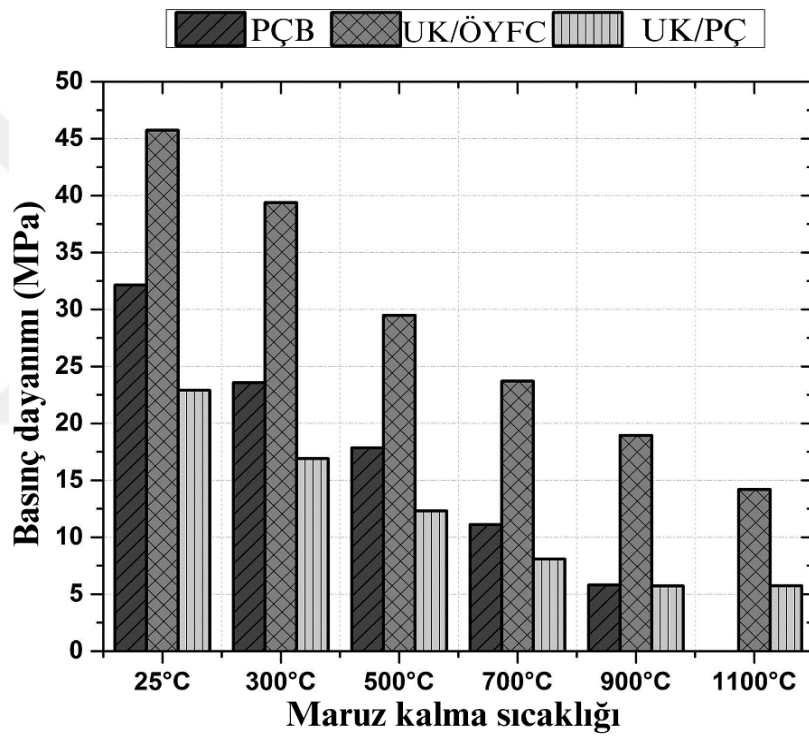
Şekil 2.35. Mikro kapsül içeren ve içermeyen GPB ve PÇB’lerin donma çözülme direnci (Pilehvar ve diğ., 2019)

YFC bazlı GPB karışımlarına nano silika, nano alümina ve nano kil ikame edilmesiyle donma çözülme direnci artmaktadır. Buna göre donma çözülme döngü sayısının artması GPB’lerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. GPB karışımlara %3 oranına kadar nano silika ikame edilmesiyle basınç dayanımları artmakta, donma çözülme koşullarında basınç dayanımı ve kütle kaybı daha az olmaktadır. GPB karışımlara % 2 oranına kadar nano alümina ve nano kil ikame edilmesi basınç dayanımlarını ve donma çözülme direncini artırırken, %3 oranına gelindiğinde olumsuz etkiler görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, nano alümina ve nano kil için optimum oranın %2 olduğu anlaşılmaktadır (Shahrajabian ve Behfarnia, 2018).

2.5.5.9. Yüksek Sıcaklık Direnci

Geopolimer, tahribata uğraması için sertleşmiş çimentoya kıyasla daha yüksek sıcaklık gerektiren üç boyutlu zeolite benzeri ağ yapısına sahiptir. Üç boyutlu ağ yapısına sahip geopolimer betonlar mükemmel bir sıcaklık direnci göstermektedir. Literatürde GPB’nin en az 800-1000 °C yüksek sıcaklıklara dayanabildiği bildirilmiştir (Zhang ve diğ., 2020).

Şekil 3.36’da 25 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklara maruz kalan UK/YFC bazlı GPB, UK/Çimento bazlı GPB ve referans PÇB’nin basınç dayanım değişimleri gösterilmiştir. Buna göre tüm numuneler için sıcaklık arttıkça basınç dayanımları düşmektedir. Bununla birlikte daha yüksek sıcaklık direnci gösteren GPB’lerin basınç dayanımlarındaki düşme oranı PÇB’ye kıyasla daha az gelmiştir. PÇB’nin 1100 °C sıcaklığa ulaştığında mukavemetinin %100’ünü kaybederken, UK/ÖYFC bazlı GBP 15MPa, UK/PÇ bazlı GPB 5,5 MPa basınç dayanımı vermiştir. Sonuçlar incelendiğinde önceki çalışmalarla uyumlu şekilde, GPB’lerin PÇB’lere kıyasla çok daha iyi yüksek sıcaklık direncine sahip olduğu görülmektedir (Saavedra ve Gutiérrez, 2017).



Şekil 2.36. 25 °C ila 1100 °C sıcaklıklara maruz bırakılan UK/ÖYFC bazlı GPB, UK/PÇ bazlı GPB ve PÇB’nin basınç dayanım değişimleri (Saavedra ve Gutiérrez, 2017)

Sarker ve diğ., uçucu kül bazlı GPB ve PÇB’lerin 400 °C, 650 °C, 800 °C, 1000 °C maruz kaldıktan sonra mekanik özelliklerini incelemiştir. Bunun için döküm işlemi gerçekleştirilen GPB’ler dökümden hemen sonra 60 °C buhar kürü (GPB1) ve dökümden üç gün sonra 80 °C buhar kürü (GPB2) olmak üzere 2 farklı kürleme rejimi ile hazırlanmıştır.

Tablo 2.23’te GBP ve PÇB betonların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 2.23. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası betonların basınç dayanımları (Sarker ve diğ., 2014)

	GPB1		GPB2		PÇB	
Sıcaklık (°C)	Basınç dayanımı (MPa)	Kalan güç (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Kalan güç (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Kalan güç (%)
23	39	100	58	100	42	100
400	42	107	54	93	38	90
650	32	83	34	59	22	51
800	11	27	17	29	9	21
1000	6	16	11	18	5	12

Tablo 2.23'te görüldüğü gibi 400 °C ye maruz kalan GPB1 basınç dayanımında artış olmaktadır. 400 °C'den daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan her üç beton tipinde de basınç dayanımlarında düşmeler görülmektedir. 800 °C'ye gelindiğinde yüksek sıcaklık öncesine kıyasla GPB'lerde %27 ve %29 kalan basınç dayanımları görülürken, PÇB'da %21 kalan basınç dayanımı görülmektedir. 1000 °C'ye gelindiğinde her üç beton tipinde de gerçekleşen ciddi çatlamlar nedeniyle basınç dayanım ciddi düşmeler görülmüştür. Ayrıca PÇB numunelerde gerçekleşen dehidrasyon sonucu pasta ve agregalar arasındaki bağın daha fazla kaybı nedeniyle parçalanmaya maruz kalmıştır. Bununla birlikte 1000 °C'ye maruz kalan GPB numunelerin kütle kayıpları beton numunelerin %4,3 (GPB1) ve %4,8 (GPB2) olurken PÇB betonların parçalanması sebebiyle kütle kaybı değerleri tam olarak belirlenememiştir. Bunun sebebi yüksek sıcaklığa maruz kalan GPB numunelerde ısı PÇB numunelere kıyasla daha hızlı hareket eder, böylece GPB içinde PÇB betona kıyasla daha az sıcaklık gradyanının oluşması ile açıklanmıştır. Genel olarak, daha az çatlama ve dökülme gösteren UK bazlı GPB'lerin PÇB'lere kıyasla daha yüksek sıcaklık direnci performansı gösterdiği görülmektedir (Sarker ve diğ., 2014).

UK bazlı GPB'lerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, 300 °C'ye kadar stabil, 300 °C nin üstünde ise basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ana bağlayıcı olarak N–A–S–H tipi jelleri içeren UK esaslı GPB'lerin mikro yapısı incelendiğinde 300 °C'de yapısal kararlılık gösterdiği, 600 °C'de ise N–A–S–H jelindeki Si içeriğinin arttığı görülmektedir. Bu durum UK partiküllerinin ilerleyici reaksiyonunu göstermektedir,

ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalma N–A–S–H jeli oluşumunu desteklemektedir. İlerleyen reaksiyon boşluların doldurulmasına, matrisin daha yoğun yapıya hale gelmesine, böylece 300 ila 600 °C arasında basınç dayanımlarının artmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte UK esaslı numunelere ÖYFC ikamesi yüksek sıcaklık direncini düşürmektedir. Karışımlara ilave edilen ÖYFC sonucu oluşan N–(C)–ASH tipi bir jelleri sıcaklık direncine daha az dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklarda Na'nın Ca ile yer değiştirmesi zeolit tipi malzemelerin termal stabilitesini düşürmektedir (Pan ve diğ., 2018). Ayrıca uçucu külde bulunan demir oksitler (Fe_2O_3) termal genleşmeyi etkileyerek, çeşitli faz dönüşümlerine ve yüksek sıcaklık sonrası morfoloji değiştirerek GPB lerin termal direnci düşürmektedir (Rickard ve diğ., 2010). Düşük Fe ve Ca içeriğine sahip UK esaslı GPB'lerde 1000 °C sıcaklık sonrası basınç dayanımları artarken daha yüksek Fe ve Ca içeriğine sahip GPB'lerde düşmektedir. Ayrıca Si/Al (2'den 3'e) oranının artması yüksek sıcaklık direncini arttırmaktadır. Basınç dayanımlarındaki artışlar, geopolimerin alüminosilikatlarının ve reaksiyona girmemiş uçucu külün sinterlenmesi sonucu parçacıklar arası daha fazla bağlantının oluşması ile açıklanmıştır. Bununla birlikte yüksek sıcaklığa maruz kalan GPB'lerin daha kırılgan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür (Rickard ve diğ., 2011).

UK bazlı GPB'lerin bir diğer yüksek sıcaklık direncini etkileyen parametre alkali aktivatör seçimidir. Bakharev, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanarak hazırladığı UK esaslı geopolimerleri 800°C, 1000°C ve 1200 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Deneysel sonuçlara göre Na ve K içeren alkali aktivatörlerin yüksek sıcaklık sonrası farklı davranışlar göstermiştir. NaOH ile hazırlanan GPB'lerin 800 °C'de dayanım artışı gösterirken, 800 °C üstünde sıcaklıklarda çok yüksek mukavemet kaybı, ortalama gözenek boyutunda ve büzülme çatlağında önemli artışlar göstermiştir. Bunun aksine, KOH ile hazırlanan geopolimerler 1000 °C'ye kadar dayanım artışı gösterirken, 1200 °C'de dayanımlarda düşmeler görülmüştür. Ancak 800, 1000 ve 1200 °C yüksek sıcaklıklarda bile gözenek boyutu ve gözeneklilik oranı düşmektedir. Malzemelerin mikro yapıları incelendiğinde, 800 °C'de Na içeren aktivatörler ile hazırlanan geopolimerler mukavemetin bozulmasına sebep olan önemli miktarda kristalleşmiş Na feldspat yapılar gösterirken, K içeren aktivatörler 1200 °C'ye kadar çoğunlukla amorf yapılar göstermektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıkla beraber Na ve K feldspatların görülmesi, başlangıçtaki alüminosilikat jelin ayrışmasını ve serbest Na,

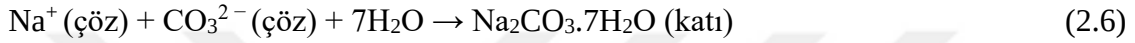
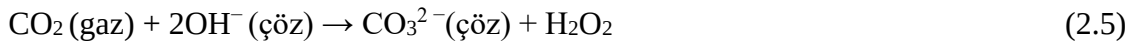
K, Si ve Al nin varlığını ifade etmektedir. Na içeren aktivatör ile hazırlanan geopolimer malzemelerdeki ayrışmanın daha kolay olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sıcaklıkla beraber matriste Na^+ 'un, K^+ dan daha yüksek difüzyon kat sayısına sahip olması olabilir (Bakharev, 2006).

2.5.5.10. Çiçeklenme Direnci

Çiçeklenmenin oluşması önemli bir sorun olmayabilir, fakat yapısal GPB'yi tehlikeye atabilecek nem girişinin bir göstergesidir. Yüksek alkali içeriğine ve düşük kalsiyum içeriğine sahip geopolimer, sulu solüsyonların gözeneklerde hapsolmasına bağlı olarak gözenekli ve açık bir mikro yapıya sahip olma eğilimindedir. Gözenek ağındaki fazla sodyum oksit (NaO) hareketlidir ve atmosferik CO_2 ile temas ettiğinde beyaz kristal (çiçeklenme) oluşturmaya eğilimlidir, böylece geopolimer yapının bozulmasına neden olmaktadır (Amran ve diğ., 2021 ; Zhuang ve diğ., 2016).

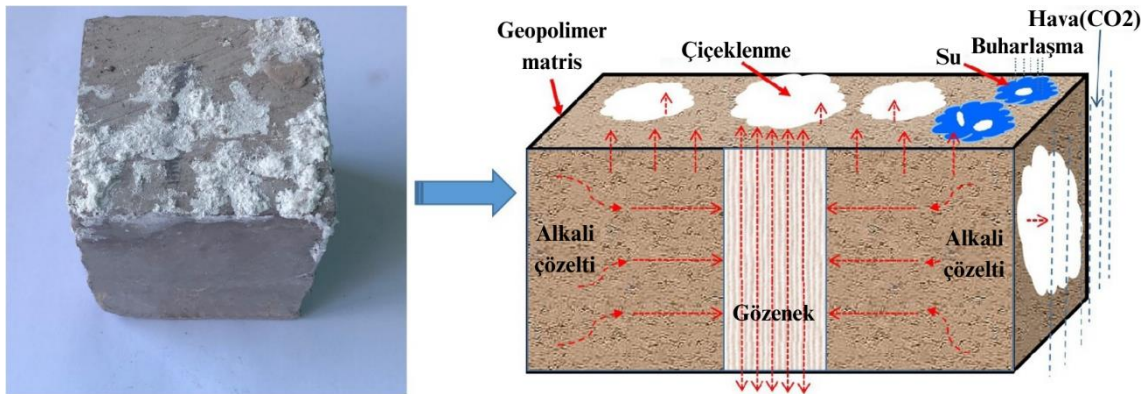
UK bazlı geopolimerlerin çiçeklenme davranışı büyük ölçüde alkali aktivatör çözeltisi tipine, kürleme sıcaklığı gibi aktivasyon koşullarına bağlıdır. Örneğin, sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş geopolimerler sodyum silikatla aktifleştirilmiş geopolimerlere kıyasla daha az ve daha yavaş çiçeklenme gösterir. Yüksek sıcaklıkta hidrotermal kürlenmiş geopolimerler düşük sıcaklıkta hidrotermal kürlenmiş geopolimerlere kıyasla çok daha düşük çiçeklenme gösterir. Bununla birlikte karışımlara cüruf ve kalsiyum alüminat çimentosu ikame edilmesi çiçeklenmeyi azaltmaktadır. Ayrıca su ile temas eden geopolimerler daha hızlı çiçeklenme göstermektedir. Tüm bu faktörlerin içerisinde çiçeklenme potansiyeli azaltmak için en etkili yöntem yüksek sıcaklıkta kürlemedir (Zhang ve diğ., 2014 ; Xue ve diğ., 2018 ; Kani ve diğ., 2012). Ek olarak sodyum hidroksit yerine potasyum hidroksit kullanımı çiçeklenmeyi azaltmaktadır. Gözenek çözeltisindeki yüksek alkali içeriği ve geopolimer yapısındaki Na^+ zayıf bağlı olması gözenek çözeltisindeki Na^+ 'nın daha hareketli olmasının sebepleridir, böylece geopolimerin daha şiddetli çiçeklenmesine yol açmaktadır. K^+ ise alüminosilikat jel çerçevesine daha güçlü bir şekilde bağlıdır ve genellikle potasyum karbonat kristalleri, sodyum muadillerinden görsel olarak daha az belirgindir. Ayrıca UK bazlı geopolimerlerde kalsiyum içeriği, C-S-H jeli ve alkali difüzyonunu önleyen daha düşük geçirimsiliğe sahip düşük gözenekli yapıların oluşmasına yardımcı olmaktadır (Zhuang ve diğ., 2016).

Zhang ve diğ., çiçeklenme mekanizmasını anlamak için geopolimer beton üzerinde gelişen beyaz kristalleri toplamış ve XRD ile incelemiştir. Sonuçlar, çiçeklenme ürününün sulu bir alkali karbonat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) olduğunu göstermiştir. Sıcaklık ve neme bağlı olarak oluşan sodyum karbonatların farklı miktarlarda yapısal H_2O içerebileceği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, karbona gözeneklerin içinden dışarıya doğru büyüme gösterdiği için gözeneklerdeki ve yüzeydeki ürünler arasında çok büyük farklılıklar olmayacağı açıklanmıştır (Zhang ve diğ., 2014). Bu gözlemlere dayanarak çiçeklenme oluşum mekanizması aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:



Burada, çözülmüş CO_2 bir asit görevi gördüğünden ve hidroksitler tükettiğinden dolayı doğal karbonasyon koşulları altında alkali geopolimerler için kısmi bir nötralizasyon işlemidir. Geopolimer bağlayıcılarda hareketli Na^+ ve OH^- 'nin bulunması, çiçeklenmenin ana nedenidir. Bu nedenle liç sızıntı analiz deneyi geopolimer çiçeklenme potansiyeli hakkında daha doğru ve nicel bilgiler verebilir (Zhang ve diğ., 2014).

Wang ve diğ., geopolimer çiçeklenmesinin sadece kendi yapısı ile ilgili değil hazırlanma koşulları ve dış ortamla ilgili olduğunu bildirmiştir. Spesifik olarak çiçeklenme oluşum koşulları geopolimerin gözenek yapısı, Si/Al oranı, sıvı/katı oranı, alkali aktivatör içeriği, kütleme işlemi, kütleme işlemi sırasında geopolimerin dış koşullarından etkilenmektedir. Şekil 2.37'de çiçeklenme ve şematize edilmiş oluşum mekanizması verilmiştir (Wang ve diğ., 2020).



Şekil 2.37. Geopolimer çiçeklenme mekanizmasının şematize edilmiş oluşum mekanizması (Wang ve diğ., 2020)

Buna göre geopolimerin çiçeklenmesini engellemek için dört etkili yol sayılabilir.

1. İyi bir gözenek yapısına sahip geopolimerler, çiçeklenme derecesini etkin şekilde azaltabilir. Eğer reaksiyon ürünlerinin gözenekliliği düşük, gözenek boyutları küçük ve reaksiyon derecesi yeterli ise bu durum alkali sızmasını önemli oranda azaltarak çiçeklenme olasılığını büyük ölçüde azaltabilir.
2. Geopolimer reaksiyonu esnasında uygun Si/Al oranı, sıvı/katı oranı ve alkali aktivatör içeriği çiçeklenme derecesini önemli ölçüde azaltabilir. Uygun olmayan oranların ve alkali aktivatörün seçilmesi geopolimerin düşük dereceli reaksiyonuna böylece matriste bağlanmamış alkalilerin yüzeye sızması ile çiçeklenmenin artmasına sebep olacaktır.
3. Kürleme sıcaklığı ve kürleme sırasında geopolimer dış koşulları çiçeklenmeyi önemli oranda etkilemektedir. Örneğin yüksek nem geopolimerden buharlaşan su için iyidir ancak geopolimerin çiçeklenmesini hızlandırmaktadır. Bu yüzden uygun kür koşulları gereklidir.
4. Geopolimerin gözenek yapısını ve özelliklerini iyileştiren uygun katkı maddeleri kullanılabilir. Böylece geopolimer sıkıştırılabilirliği artırılabilir, suyun müdahaleciliğini ve hareketliliği kısıtlanarak çiçeklenmeyi azaltılabilir (Wang ve diğ., 2020).

2.5.5.11. Büzülme Davranışı

Genellikle, beton malzemelerin rötresi (büzülmesi) agregaların yüksek boyutsal stabiliteye sahip olduğundan çoğunlukla pasta matrisinin büzülmesinden kaynaklanır. Büzülmenin geliştiği mekanizmaya bağlı olarak malzemelerin büzülmesi plastik büzülme, otojen veya kimyasal büzülme, kuruma büzülmesi ve karbonatlaşma büzülmesi olmak üzere dört tür büzülme vardır. Plastik büzülme, karışımın kalıba dökülmesiyle taze haldeyken gerçekleşir ve suyun buharlaşması ile meydana gelmektedir (Zhang ve diğ., 2022). Otojen büzülme, kompozitlerin kendi kendine kuruması ile oluşan kaçınılmaz bir hacim azalmasıdır. Kimyasal büzülmenin birincil etkisi, hidratasyon reaksiyonları için gerekli suyu sağlamak için suyun gözenekler arasında yer değiştirmesidir, yer değiştirilen suyun yeri doldurulmazsa içi boşalan gözenekler iç kılcal gerilmelere neden olur (Thomas ve diğ., 2012). Geçmişte, normal beton için otojen büzülme kuruma büzülmesinin basın olması nedeniyle önemsiz kabul edilmiş veya göz ardı edilmiştir. Ancak yüksek

performanslı betonlarda otojen büzülmenin önemi artmaktadır ve bu betonlarda su/çimento oranının düşmesi otojen büzülmenin kuruma büzülmesine kıyasla daha yüksek oranda gerçekleşmesi beklenir (Amin ve diğ., 2010). Kuruma büzülmesi, jel gözeneklerinden suyun buharlaşması ile meydana gelen hacim değişikliğidir ve esas olarak sistemin sertleşme sürecinden oluşmaktadır. Karbonatlaşma büzülmesi havadaki CO₂'nin numunelerin dış yüzeyinden difüzyonu ile hidrasyonu ürünü olan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek CaCO₃ ve su açığa çıkarmasıyla meydana gelmektedir (Zhang ve diğ., 2022).

Çimentolu sistemlerle ilişkilendirilen bu dört tür büzülme, aynı zamanda geopolimer sistemlerde de geçerlidir. Geopolimer sistemlerde toplam büzülme esas olarak kuruma ve otojen büzülme kaynaklıdır, karbonatlaşma büzülmesi ise toplam büzülme deformasyonuna önemli ölçüde katkıda bulunmaz (Ye ve Radlińska, 2017). Otojen büzülme ile kıyaslandığında, kuruma büzülmesi alkali konsantrasyonuna ve dış ortamlara karşı daha hassastır (Zhang ve diğ., 2022). Bununla birlikte, alkali ile aktifleştirilmiş olan bağlayıcılar birçok kimyasal işlemde yer aldığından, geopolimer sistemlerde büzülme davranışını anlamak çimentolu sistemlere kıyasla daha karmaşıktır. Bu nedenle, alkali aktifleştirilmiş bağlayıcılarda kuruma büzülmesi üzerindeki etkili parametreleri belirlemek için farklı araştırmalar yapılmıştır. (Mastali ve diğ., 2018 ; Abdollahnejad ve diğ., 2020).

Genel olarak geopolimerler, çimento esaslı karışımlara kıyasla çok daha yüksek büzülmeye sahiptir. Bunun başlıca nedeni çimento hidratasyon sisteminden farklı olarak suyun alüminosilikat jel üretimine doğrudan katılmaması ve az miktarda suyun geçiş suyu olarak kalmasıdır. Sonuç olarak, geopolimer sistemlerde kimyasal olarak bağlanmayan ve buharlaşmaya yatkın nispeten büyük oranda su vardır. Yaygın bulguların aksine, literatürde çimentolu karışımlardan daha düşük büzülme oranı veren geopolimer karışımlarda mevcuttur (Mastali ve diğ., 2018).

Neto ve diğ., 24 °C sabit sıcaklıkta ve %50 bağıl nemde kürlenmiş farklı alkali oranları ile hazırlanan alkali aktifleştirilmiş ÖYFC'nin otojen ve kuruma büzülmesini incelemiştir. Buna göre karışımlarda silikat modülü (SiO₂/Na₂O) 1,7 olan sodyum silikat, cürufun kütlelerine göre %2,5, %3,5 ve %4,5 Na₂O olacak şekilde kullanılmıştır. Sonuçlara göre, toplam kuruma ve otojen büzülmenin çoğu erken yaşlarda gerçekleşmiş, sodyum silikat

içeriğinin artmasıyla kuruma ve otojen büzülmeleri artmıştır. Ancak, artan alkali içeriğine göre kuruma büzülmesi yaklaşık 4,5 kat artarken otojen büzülme ise yaklaşık 1,7 kat artmıştır. Bununla birlikte sonuçlar, otojen büzülmenin toplam boyutsal değişiklerin önemli bir parçası olduğunu göstermiştir (Neto ve diğ., 2008).

Deb ve diğ., oda sıcaklığında kürlenene farklı SS/SH (2,5 ve 1,5) oranlarında ve farklı UK/ÖYFC (%10 ve %20 ÖYFC) oranlarında hazırlanan 4 tip geopolimer betonun ve referans PÇB'nin kuruma büzülmesini incelemiştir. Çalışmada hazırlanan beton numuneler basınç dayanımları açısından kıyaslanabilir olup 180 günlük basınç dayanımı sonuçları GPB'lerde 49 ila 70 MPa arasında PÇB'de ise 65 MPa gelmiştir. Kuruma büzülmesi sonuçlarına göre, GPB'lerin 180 günlük kuruma büzülmesi 482 ile 722 mikrostrain gelirken PÇB'da 562 mikrostrain gelmiştir. Buna göre, 1 tip GPB hariç diğer GPB'ler PÇB'ye kıyasla daha yüksek kuruma büzülmesi göstermiştir. Ayrıca, karışımlarda cüruv içeriğinin %10'dan %20'ye artmasının ve SS/SH oranının 2,5'tan 1,5'e düşürülmesinin betonun basınç dayanımını arttırdığını, kuruma büzülmesini azalttığını göstermiştir. Genel olarak basınç dayanımı ile kuruma büzülmesi arasında zıt bir ilişki gözlemlenmiştir (Deb ve diğ., 2015).

Ma ve Ye, 40 °C'de 7 gün kürlenene, farklı SiO₂:Na₂O molar oranlara (1:1, 1:1,5 ve 1,5:1,5) sahip UK bazlı geopolimer pastaların otojen ve kuruma büzülmesini incelemiştir. Buna göre SiO₂:Na₂O molar oranları otojen ve kuruma büzülmesini önemli oranda değiştirmektedir. En iyi sonuçlar 1:1 SiO₂:Na₂O molar oranlarında gelmiştir. Hem SiO₂ hem de Na₂O'nin yüksek içeriği daha büyük otojen ve kuruma büzülmesi ile sonuçlanmıştır. Deney sonuçları, geopolimer pastaların otojen büzülmesinin çimento lu pastalarda meydana gelen kendi kendine kuruma sürecinden kaynaklanmadığını, alüminosilikat jel yapısının sürekli olarak yeniden düzenlenmesi ve polimerizasyonu ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Ek olarak, otojen büzülmenin büyük bir oranı ilk 3 gün içerisinde gerçekleşmiş, 7 günden sonra oluşan büzülme esas olarak kuruma büzülmesinden kaynaklanmıştır. Bununla birlikte daha büyük kuruma büzülmesi gösteren geopolimer karışımlar daha yüksek ağırlık kaybı göstermiştir. Çalışmada ayrıca çimento bazlı pastalar (su/çimento=0,4) üretilmiş, 20 °C'de 7 gün kürlenmiştir. 180 gün sonunda geopolimer ve çimento esaslı pastaların kuruma büzülmeleri kıyaslandığında 1:1 ve 1:1,5 SiO₂:Na₂O molar oranlara sahip geopolimerler daha düşük kuruma büzülmesi

gösterirken, 1,5:1,5 $\text{SiO}_2\text{:Na}_2\text{O}$ molar orana sahip geopolimer daha yüksek kuruma büzülmesi göstermiştir (Ma ve Ye, 2015).

Geopolimer karışımlarda su içeriği, kaynak malzeme, kürlenme koşulları, ortam bağıl nemi, aktivatör kimyası ve oranı, karışımlara lif takviyesi, büzülmeyi önleyici katkı kullanımı (nano- TiO_2 , ticari olarak reaktif MgO , genleşen katkı maddeleri gibi) büzülmeyi önemli oranda etkileyen faktörlerdir. Örneğin, yüksek su içeriği büzülmeyi artırırken, kürlenme sıcaklığının ve ortam bağıl nemin artması büzülmeyi düşürmektedir. Ayrıca karışımlara elyaf, çelik, hibrit lif takviye edilmesi ve katkı kullanımı büzülmeyi oldukça düşürmektedir. Aktivatör kimyası ve oranı ise reaksiyon ürünlerini karmaşık bir şekilde değiştirerek büzülmeyi artırıcı ya da azaltıcı yönde etkileyebilir (Mastali ve diğ., 2018).

2.5.5.12. Alkali Silika Reaksiyonu

Alkali silika reaksiyonu (ASR), çoğunlukla "beton kanseri" olarak adlandırılan, GPC matrisindeki gözenekli sudaki hidroksil iyonları (OH^-) ile bazı silis formları arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşmaktadır (Kupwade-Patil ve Allouche, 2013). Bu reaksiyon genişleme, çatlama, dayanım kaybı gibi sorunlara yol açmaktadır. Geopolimer kompozitlerinde alkali aktivasyon için genellikle yüksek alkali çözeltilerinin (NaOH , KOH gibi) kullanılması alkali-silika reaksiyonu için önemli bir endişe olmaktadır (Williamson ve Juenger, 2016).

Kupwade-Patil ve Allouche, kireçtaşı, kumtaşı ve kuvars kumu agregaları ile C sınıfı ve F sınıfı bazlı UK GPB'ler ve referans PÇB üretmiş ve ardından 90 gün boyunca 1 M NaOH çözeltisine maruz bırakarak sonuçları incelemiştir. Bulgular, UK-GPC numunelerinin ASR'ye bağlı genleşme için ASTM C1260'de belirtilen eşiği aşmadığını, PÇB'nin ise izin verilen seviyenin üzerine çıktığını göstermiştir. Ayrıca, görsel gözlemler sonucunda UK-GPB'de çatlaklar ve aşınma tespit edilmezken PÇB betonda bu belirtiler görülmüştür. Bununla birlikte, ASR deneyi sonrası PÇB numunelerin basınç dayanımlarında azalma, porozitelerinde artış görülürken, PÇB numunelerin ise basınç dayanımlarında artış, porozitelerin azalma görülmüştür. Spesifik olarak, en yüksek basınç dayanım artışı ve en fazla porozite azalması gösteren kumtaşı agregası içeren F sınıfı bazlı UK GPB'de, basınç dayanımı 65 MPa'dan 103 MPa ya (yaklaşık %58), porozite azalması

ise %6,8'den %1,9'a (yaklaşık %72) düşmüştür. Bu durum, yüksek sıcaklıkta NaOH çözeltisinde bekletilen GPB'lerde reaksiyona girmemiş UK'lerin reaksiyona girmesi ile oluşan geopolimer jellere atfedilmiştir. Ek olarak çalışmada F sınıfı UK bazlı GPB'ler C sınıfı UK bazlı GPB'lere kıyasla daha iyi sonuçlar göstermiştir (Kupwade-Patil ve Allouche, 2013).

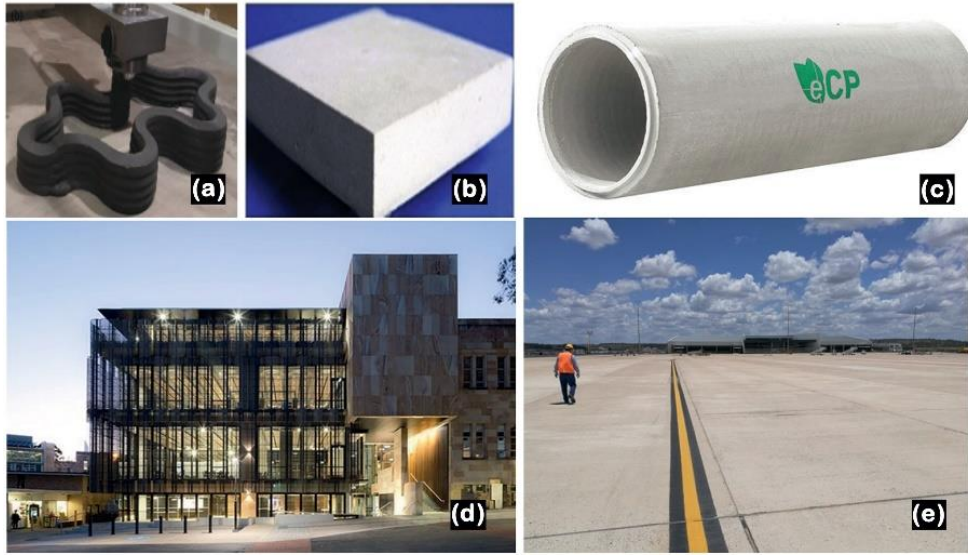
Williamson ve Juenger, farklı konsantrasyonlarda NaOH kullanılarak üretilen UK GPB prizmalarda ASR etkisini incelemiştir. Ayrıca PÇB referans beton numuneleri hazırlanarak sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre, GPB'ler ASTM C1293'ün bir yıllık genişleme sınırı olan %0,04'ün altında kalırken, PÇB'ler ise sadece 6 günde bu su sınırını 10 katı genişlemiştir. Bununla birlikte 8 mol NaOH ile aktive edilmiş GPB'ler ilk 12 ayda genişleme göstermemiş, 24 ay sonunda %0,006 genişleme göstermiştir. 10 mol NaOH ile aktive edilmiş GPB'ler ise 24 ay sonunda % 0,02 genişleme göstermiştir (Williamson ve Juenger, 2016).

2.5.6. Geopolimer Beton Kullanım Alanları

Geleneksel betonun dezavantajları ve geopolimerlerin birçok özgün avantajları nedeniyle, inşaat sektörü tarafından yapı malzemeleri olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu beton, yüksek hacimli uçucu kül betonu, katkı maddeleri içeren ultra yüksek performanslı beton, hafif beton vb. çeşitli formlarda kullanılmaktadır. Geopolimer beton, geleneksel çimento esaslı betona göre yüksek mukavemet ve dayanıklılık, iyileştirilmiş işlenebilirlik, azaltılmış geçirgenlik ve plastik büzülme çatlamasının azaltılması gibi farklı avantajlar sunmaktadır (Nawaz ve diğ., 2020).

Mükemmel özellikleri nedeniyle GPB, çimento ve beton gibi yapı malzemelerinin yanı sıra, havacılık ve plastik endüstrilerinde, tehlikeli atıkların dondurulmasından kimya ve nükleer endüstrilere kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Ayrıca GPB, 3D baskı malzemeleri, biyolojik malzemeler, refrakter malzemeler, kaplama malzemeleri, düşük enerjili fayanslar, fiber takviyeli kompozitler, onarım malzemeleri, iç ve dış dekorasyon ve diğer yeni nesil geopolimer verimli malzemeler gibi çeşitli alanlarda büyük potansiyele sahiptir (Shetata ve diğ., 2022).

Şekil 2.38'de geopolimer ile üretilmiş çeşitli uygulamalar verilmiştir.



Şekil 2.38. (a) 3D baskı yapılmış geopolimer ürün, (b) Geopolimer köpük, (c) GPB kanalizasyon boruları, (d) Queensland Üniversitesi'nin GPB ile yapılan "Global Change Institute" binası, (e) GPB'nin prekast yapı olarak kullanımı (Shehata ve diğ., 2022)

Laskar ve Talukdar, beton tamir malzemesi olarak ultra ince yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer geliştirmeyi amaçlamıştır. Bunun için çeşitli katkı (süper akışkanlaştırıcı) maddelerine sahip, farklı molaritelerde NaOH ile 21 farklı ultra ince ÖYFC kullanılmış, dökümü gerçekleşen numuneler test gününe kadar 20 ± 2 °C'de su tankında tutularak kürlenmiştir. Sonuçlara göre, ultra ince yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonun 1 günlük dayanımı, 28 günlük dayanımın yaklaşık %60'ını vermiştir. Karışımlara belirli bir miktar uçucu külün ilave edilmesi, geopolimer betonun işlenebilirliği, basınç ve bağlanma dayanımının yeterli seviyelere ulaşmasına katkıda bulunmuştur. Benzer şekilde, düşük dozda süper akışkanlaştırıcı ilavesi de taze ve sertleşmiş hal özelliklerinde iyileştirme sağlamıştır. Ayrıca, yüksek alkali aktivatör (NaOH) konsantrasyonu, geopolimer betonun işlenebilirliğini ve dayanımını azaltmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, ultra ince yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonun tamir malzemesi olarak kullanılmak üzere güçlü bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir (Laskar ve Talukdar, 2017).

Mahmood ve diğ., sahil koruma yapıları için ortam sıcaklığında (23 ± 2 °C) kürlenmiş UK/ÖYFC ve çelik fırın cürufu agregası bazlı yüksek yoğunluklu geopolimer beton kullanımını incelemiştir. 37,4 MPa'ya kadar basınç dayanımları elde edilmiş ve malzemenin yapısal performansını sabit tutarak dalgakıran zırh birimi boyutunda önemli ölçüde azaltma potansiyeli olduğu gösterilmiştir. Buna göre, yoğunluğu 2500 kg/m³ için

%30'a kadar, 2600 kg/m³ için ise %40'a kadar boyut azaltması sağlanabilir. Bu sayede, azaltılmış malzeme ihtiyacı, yerleştirme maliyeti ve toplam yer gereksinimi ile yeni kıyı yapılarının inşası mümkündür. Bununla birlikte, geopolimer betonda çimento kullanımının olmaması ve azaltılmış malzeme ihtiyacı, üretilen dalga kırıcı beton zırh birimleriyle ilişkili karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir (Mahmood ve diğ., 2020). Lyu ve diğ., deniz suyuna batırılmış UK/ÖYFC geopolimer harçların muadili olan ortam kürü ile kıyaslandığında basınç dayanımlarının daha hızlı arttığını ve nihai dayanımlarının aynı geldiğini göstermiştir (Lyu ve diğ., 2022).

Zailan ve diğ., kendini temizleyen geopolimer betonun özelliklerini gözden geçirmiş, titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi fotokatalitik malzemelerin etkili olduğunu açıklamıştır. Fotokataliklere sahip kendini temizleyen geopolimer beton, ultraviyole (UV) radyasyonu ile birleştğinde organik parçacıkları ayrıştırabilmektedir. Ayrıca, fotokatalik malzemelerin eklenmesi, daha güçlü geopolimer ağları oluşturarak betonun basınç dayanımını arttırmaktadır (Zailan ve diğ., 2016). Strini ve diğ., aynı oranda titanyum dioksit (TiO₂) içeren geopolimerler kompozitlerden UK bazlı geopolimerlerin metakaolin bazlı geopolimerlere kıyasla daha yüksek fotokatalik aktivite gösterdiğini (kendini temizlemede daha başarılı), ayrıca kütleme durumunun fotokatalitik aktiviteyi önemli oranda değiştirdiğini göstermiştir (Strini ve diğ., 2016). Ayrıca, geopolimer betonun yüksek alkalinite değerleri (pH 10-12) yüzeyde mikrobiyal aktiviteyi engeller. Ancak, geopolimer betonun ilerleyen yaşlarda, pH değeri azalır ve 9'un altındaki seviyelere düşerse, mikrobiyal saldırı nedeniyle yüzeyde bozulma başlayabilir (Nawaz ve diğ., 2020).

Jiang ve diğ., geopolimer ve çimento macun numunelerinin yüksek ısı dayanıklılığına ilişkin karşılaştırmalı bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. C sınıfı uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilmiş, hazırlanan numuneler 1200 °C'ye kadar sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, PCB numunelerinin 800 °C'yi aşan sıcaklıklarda ciddi çatlaklar gösterdiğini, geopolimer beton numunelerinin ise bu yüksek sıcaklıklarda bile çok az görünür çatlak ve pullanma göstermediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, geopolimer numunelerinin kalan basınç dayanımının çimentolu numunelerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yangın direnci ve yapısal performansın kritik olduğu uygulamalarda, örneğin binalarda, geopolimer

betonun daha iyi bir seçenek olduğunu göstermektedir (Jiang ve diğ., 2020).

Tahir ve diğ., sert beton kaplama uygulaması için geopolimer betonun özelliklerini gözden geçirmiş, yüksek mukavemetin yanı sıra sert zemin kaplama beton malzemesi için hızlı sertleşme süresi, iyi işlenebilirlik ve yüksek dayanıklılık gibi gereksinimlerin de karşılanması gerektiğini açıklamıştır. Derleme, geopolimer malzemenin mükemmel dayanıklılık, durabilite ve işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğunu, GPB'nin sert zemin kaplama uygulamaları için uygun olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, geopolimerler hem uygun maliyetli hem de çevre dostu olma konusunda çok fazla potansiyele sahip görünmektedir (Tahir ve diğ., 2022).

Shojaei ve diğ., ön gerilmeli beton demiryolu traverslerinin imalatında cüruf bazlı geopolimer beton uygulaması deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin konsantrasyonu, sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı, alkali çözelti/cüruf oranı ve agrega içeriği gibi dört etkili faktör dikkate alınarak, deney tasarımı yöntemi olan Taguchi metoduyla maksimum basınç dayanımını sağlayan en uygun karışım tasarımı belirlenmiştir. Avrupa standardı EN 13230 gereksinimlerine göre ön gerilmeli beton traversleri üretilmiş ve test edilmiştir (Shojaei ve diğ., 2015). Şekil 2.39'da üretilen geopolimer beton traversler gösterilmiştir.



Şekil 2.39. Geopolimer traversler A) Döküm sonrası, B) Buharla kürleme (Shojaei ve diğ., 2015)

Sonuçlar, geopolimer betonundan üretilen ön gerilmeli beton traverslerinin demiryolu standartlarının gerekliliklerini karşılayabileceğini göstermiştir. Ayrıca, eko mekanik gösterge yoluyla GPB ve PÇB beton verimliliği arasındaki karşılaştırmada GPB'nun eko mekanik performansının daha iyi olduğunu bulunmuştur (Shojaei ve diğ., 2015).

3. LİTERATÜR TARAMASI

Manikandan ve Vasugi (2022) yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve sabit oranda (%10) metakaolin (MK) karışımlarına değişen oranlarda (%25, %30, %35, %40) atık cam tozu (ACT) ikamesi ile üretilen geopolimer betonların işlenebilirlik, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Karışımlarda alkali aktivatör olarak sodyum silikat (SS) ve farklı molaritelerde (2M, 4M, 6M, 10M, 12M) sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır. Tüm karışımlarda gerekli işlenebilirliği sağlamak için alkalinin bağlayıcıya oranı (a/b) 0,55 ve sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine oranı (SS/SH) 2,5 kabul edilmiştir. Üretilen geopolimer beton karışımlar basınç dayanımı için 50 x 150 x 150 mm kübik kalıplara, yarmada çekme dayanımı için 150 x 300 mm silindirik kalıplara, eğilme dayanımı için 100 × 100 × 500 mm boyutlarındaki prizma kalıplara dökülerek 28 gün boyunca ortam kürlemesine bırakılmıştır. İşlenebilirlik sonuçlarına göre karışımlardaki ACT oranının artması, SH molaritesinin azalması ile slump çökme değerleri artmıştır. En yüksek slump sonucu 216mm ile 2M SH, %40 ACT, %50 ÖYFC ve %10 MK karışımında görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarına göre karışımlarda SH molaritesinin artışı ve ACT ikamesinin %35'e kadar artışı dayanımları arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımı 62,17 MPa ile 12M, %55 ÖYFC, %35 ACT ve %10 MK karışımında görülmüştür. Karışımlarda yüksek SH molaritesinin silika ve alümina kaynak malzemelerinin geopolimerizasyon sürecini kolaylaştırarak daha fazla jel oluşumunu sağladığı böylece dayanımları arttırdığı ifade edilmiştir. Yarmada çekme ve eğilme dayanımları basınç dayanım sonuçları ile paralel gelmiş SH molaritesinin 12M'ye kadar, ACT ikamesi %35'e kadar artması ile dayanımlar artmıştır. En yüksek yarmada çekme ve eğilme dayanımı 6,07 MPa ve 7,26 MPa ile 12M, %55 ÖYFC, %35 ACT ve %10 MK karışımında bulunmuştur. Çalışmada yapılan SEM görüntüleri mekanik özellikleri destekler nitelikte olup ACT % 40'a ulaştığında geopolimer matrisin daha az yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. EDS analizi geopolimer numunelerin tümünde Al–O–Si bağları, sodyum alüminosilikat hidrat (NASH) ve kalsiyum alüminosilikat hidrat oluşumu için gerekli olan oksijen, silisyum, kalsiyum, sodyum ve alüminyum elementlerini göstermiştir. 2 M SH ile aktifleştirilmiş farklı oranlardaki ÖYFC/ACT/MK kullanılarak yapılan XRD analizi kuvars, kalsit, gismodine ve kalsiyum silikat hidrat varlığını göstermiştir. Önceki çalışmalarda kuvars ve kalsit piklerin varlığı polimerizasyona katılmayan kristal bileşenler ile gismodine piklerin varlığı ise sodyum alüminosilikat

hidrat (NASH) jellerinin açığa çıkması ile ifade edilmiştir. Kaynak malzemeler üzerinde yapılan EDX analizi geopolimer karışımların $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının 3,53-4,61 arasında ve SiO_2/CaO oranının 1,84-2,46 arasında değiştiği bulunmuştur. Karışımlarda ACT oranı arttıkça $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve SiO_2/CaO oranlarının arttığı, en yüksek basınç (62,17MPa), yarmada çekme (6,07MPa), eğilme (7,26MPa) dayanımlarının $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=4,02$ ve $\text{SiO}_2/\text{CaO}=2,24$ iken elde edildiği ifade edilmiştir. Çalışmada bulunan taze ve sertleşmiş deney sonuçları kullanılarak yapay sinir ağı (YSA) tasarlanmıştır. YSA ile tahmin edilen sonuçlar gerçek sonuçlar ile yüksek oranda benzer gelmiş, tüm durumlarda kolerasyon kat sayısı (R) 0,9'dan büyük gelmiştir.

Ulugöl ve diğ. (2021) geopolimer üretiminde kullanımı yaygın olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu yerine inşaat ve yıkım artıkları olan delikli tuğla, kırmızı kil tuğla, kiremit ve cam malzemelerini kullanarak geopolimer pastanın mekanik özelliklerini incelemiştir. 0,35 su/bağlayıcı oranında %10, %12 ve %15 olmak üzere farklı Na^+ konsantrasyonları ile üretilen geopolimer numuneler 50, 65, 75, 85, 95, 105, 115, ve 125 °C kür sıcaklıklarına 24, 48 ve 72 saat kür sürelerinde tabi tutulmuştur. 50 mm'lik kalıplara dökülen geopolimer pastalar kalıplamadan hemen sonra kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Basınç sonuçlarına göre kil bazlı kaynak malzemeler (delikli tuğla, kiremit ve kırmızı kil tuğla) ile üretilen geopolimer betonların sonuçları birbirine yakın ve 30 MPa'nın üzerine kolaylıkla çıkabildiği görülmüştür. Atık cam ile üretilen geopolimer numunelerde %10 Na^+ konsantrasyonunda, düşük kürlenme sıcaklıklarında ve uzun süreli kürlenmelerde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kürlenme sıcaklığının numuneler üzerine olan etkisi araştırıldığında 50 °C haricindeki tüm sıcaklıklarda dayanım artışı görülmüştür. Kil bazlı atık malzemeler incelendiğinde genel olarak en yüksek dayanım sonuçları 115 °C'de görülmüştür. Atık camda ise 75 °C ile 105 °C aralığında görülmüştür. Uzun kürlenme süreleri genellikle ortalama basınç dayanım sonuçlarında olumlu yönde etkili olmuştur. Basınç dayanımlarında 48 saatten sonraki kürlenmelerde ise büyük değişimler olmadığı açıklanmıştır. 115 °C'de 24 saat kürlenmiş delikli tuğla %10, %12 ve %15 olmak üzere farklı Na^+ konsantrasyonlarında sırasıyla 43,7, 45,7 ve 38,9 MPa sonuçlarını vermiştir bu durum göz önüne alındığında Na^+ konsantrasyonlarının optimum bir değere sahip olduğu görülmüştür. Na^+ konsantrasyonundaki artışın belirli bir seviyeden sonra hızlı sertleşmeye sebep olarak homojen olmayan bir karışım meydana geldiği bu durumun dayanımlarda düşüşe sebep olduğu açıklanmıştır. Atık cam tozunun

kil bazlı atık malzemelere göre daha düşük sonuçlar göstermesinin sebebi cam tozunun daha büyük partiküllere sahip olduğu şeklinde açıklanmıştır. Genel olarak bu çalışmada, inşaat ve yıkım atıkları ile geopolimer bazlı malzemeler üretiminin mümkün olduğu gösterilmiştir.

Dadsetan ve diğ. (2021) metakaolin (MK) ve cam tozu (CT) kaynak malzemeleri ile sodyum silikat ve sodyum hidroksit (12mol) alkali çözeltilerini kullanarak üretilen geopolimer pastaların mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırmıştır. Geopolimer pastaların üretiminde 3 farklı (%100MK, %75MK + %25CT ve %50MK + %50CT) kombinasyon grubu ve farklı kimyasal oranlar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) kullanılarak toplamda 44 geopolimer karışım üretilmiştir. Her karışım için $50 \times 50 \times 50$ mm boyutlu toplam 9 kübik numune hazırlanmış ve test gününe (7, 28, 90 gün) kadar ortam sıcaklığında plastik poşetlerde saklanmıştır. Üretilen 44 geopolimer karışımı üç farklı kombinasyonda incelenmiştir: birinci grupta %100MK, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,8, 3,2, 3,6, 4,0, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,22, 0,24, 0,26, 0,28, 0,30, olan 20 farklı karışım, ikinci grupta %75MK+%25CT, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3,6, 4,0, 4,4, 4,8, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,22, 0,26, 0,30 olan 12 farklı karışım, üçüncü grupta %50MK+%50CT, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 5,8, 6,2, 6,6, 7,0, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,22, 0,26, 0,30 olan 12 farklı karışım tasarlanmıştır. Kaynak malzemelerin silika çözünürlüğü belirlemek amacıyla 50 ml 12 mol NaOH çözeltisine 5 gr kaynak malzeme (cam tozu-metakaolin) ilave edilmiş ve silikanın çözünmesini sağlamak için 300 rpm'lik bir termo-manyetik karıştırıcı ile 200 °C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Çözünür silis miktarı farklı zamanlarda (5dk-240dk) MC500 kalorimetresi ile ölçülmüştür. Çözünür silis miktarı 4 saat sonunda cam tozunda 18mg/l metakaolinde ise 12mg/l olarak bulunmuştur. Bununla birlikte sodyum silikat çözeltisinde ise bu oran 38mg/l olarak bulunmuştur. MK'deki düşük silis çözünürlüğü, MK'deki safsızlık (%38,07 Al_2O_3) miktarının CT'deki kümülatif safsızlık (%11,02 CaO + %2,43 Al_2O_3) miktarına kıyasla daha yüksek olması ile açıklanmıştır. Safsızlık birimlerinin hidroksil birimlerini hızla tüketerek silikanın çözünme hızını düşürdüğü düşünülmektedir. Basınç dayanımı sonuçları; %100 MK ile üretilen geopolimer pastalarda $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,8 iken tüm yaşlarda 10 MPa'nın altında kalmış, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,8'den 3,2'ye yükselmesiyle basınç dayanımları 7 günde 30-40 MPa, 28 günde 35-46 MPa, 90 günde 40-51 MPa vermiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının 3,6'dan 4,0'a yükselmesiyle basınç dayanımlarında düşmeler meydana gelmiştir. Basınç dayanımındaki düşmeler

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,8$ iken sistemdeki silika miktarının, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,0$ iken sistemdeki alümina miktarının yetersiz olması ile ifade edilmiştir. Ayrıca, %100 MK karışımlarındaki $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranının yükselmesi belirgin sonuçlar vermemiş, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,8 ve 3,2 iken genel olarak basınç dayanımında olumlu $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3,2 ve 3,6 iken genel olarak olumsuz etkiler göstermiştir. $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranının belirli bir seviyenin üstüne çıkmasıyla ortama katılan fazla Na^+ atomlarının geopolimer sistemde çiçeklenme fenomenine neden olabileceği ve çiçeklenme sonucu iç çekme gerilimleri oluşarak dayanım sonuçlarının olumsuz etkileneceği açıklanmıştır. %75MK%25CT ile üretilen geopolimer pastalarda $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3,6 ve 4,0 iken tüm yaş ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranlarında 3 MPa'nın altında gelmiştir, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 4,4 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,22 olduğunda 55,4 MPa gelmiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 4,4 iken $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı arttığında basınç dayanımları belirgin şekilde düşmektedir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 4,4'ten 4,8'e geldiğinde ise basınç dayanımları düşmektedir. %50MK%50CT ile üretilen geopolimer pastalarda $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 5,8'den 6,6'ya yükselmesiyle dayanım sonuçları artmış 6,6'dan 7,0'a yükselmesiyle düşmüştür. Optimum basınç sonucu $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 6,6, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı 0,26 iken 7günlük 32,4 MPa olarak bulunmuştur ancak bu sonuç 28. ve 90. Günlerde 27,4 MPa ve 24,9 MPa'ya düşmüştür. CT'nun %25'ten %50'ye yükselmesiyle basınç dayanımındaki belirgin düşüşler karışımdaki Ca^+ gibi safsızlıkların artması ile ifade edilmiştir. Mikro yapı analizlerinde SEM görüntüleri basınç dayanım sonuçlarını destekler niteliktedir. Optimum $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarına sahip numunelerde homojen dağılmış polimerik yüzeyler ve yeterli miktarda çözünür silika ve alümina olduğunu görülürken, düşük oranlı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ numunelerde ise birçok reaksiyona girmemiş parçacık ve düzensiz bağlantısız reaksiyon yapıları görülmüştür.

Dehghani ve diğ. (2021) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar oranının ortam sıcaklığında kürlenene öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve F sınıfı uçucu kül (UK) bazlı geopolimerler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu bağlamda geopolimer harç karışımlarında kullanılan UK birincil alüminosilikat öncüsü ve akışkanlığı arttırmak için, ÖYFC ise ortam kürlenme koşullarında mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılmıştır. Geopolimer harç karışımları 2 gruba ayrılmıştır, birinci grup $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (3,25-3,37-3,50-3,75) etkisini görebilmek için sabit $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2$ oranları ile hazırlanmıştır. İkinci grupta ise ÖYFC ve UK ikamesinin etkisini görebilmek için suyun bağlayıcıya (S/B) oranı 0,35, sodyum silikatın sodyum hidroksite (SS/SH) oranı 2,5, Alkali çözeltinin bağlayıcıya oranı

(A/B) 0,40 olarak alınmıştır. Her iki grupta da sodyum hidroksit (NaOH) 14 mol olarak alınmıştır, ayrıca su/bağlayıcı oranı hesabında çözültiden gelen ve ilave eklenen su hesaba dahil edilmiştir. Hazırlanan numuneler 50 mm'lik kübik kalıplara dökülmüş ardından test gününe kadar 23 ± 1 °C ve $\%92 \pm 2$ bağıl neme sahip kütleme odasında bekletilmiştir. Geopolimer karışımlar üzerinde yapılan priz süresi deneyine göre; ilk grupta $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının artması ile, ikinci grupta ise ÖYFC miktarının artması ile ilk ve son priz sürelerini kısaltmıştır. ÖYFC miktarının artması sistemdeki çözünebilir kalsiyum varlığına bağlı olarak polimerizasyonu hızlandıran kalsiyum silikat hidratların oluşması ile açıklanmıştır. Ayrıca ikinci grupta ÖYFC miktarının artması $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranını düşürmüştür, böylece birinci ve ikinci gruptaki sonuçlar birbiri ile uyumlu geldiği ifade edilmiştir. Yapılan yayılma deneylerinde $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının ve karışımdaki ÖYFC miktarının artması ile akışkanlığın düştüğü görülmüştür. Yayılma çapının düşmesi ÖYFC'nin partikül şekli ve karışımların reaktivitesi ile açıklanmıştır. Yayılma deneyleri karışıma alkali çözelti eklendikten 10 dk sonra yapıldığı için hızlı reaktif olan geopolimer ağların harçlarda vizkoziteyi arttırarak akışkanlığı azaltabileceği ifade edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı ve ÖYFC miktarının değişmesi ile basınç dayanımlarının ciddi şekilde değiştiğini göstermiştir. Tüm karışımlarda ve tüm yaşlarda $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının ve ÖYFC miktarının artması ile dayanım sonuçları artmıştır. Ayrıca tüm karışımların basınç dayanımları 28 güne kadar hızla artarken 28 gün ile 90 gün arasında dayanım artışının yavaşladığı görülmüştür. Karışımlarda ÖYFC miktarının artması ile sistemdeki kalsiyum iyonlarının arttığı, kalsiyumun iyonlarının silika ve alümina ile reaksiyona girerek geopolimer yapıların yanında kalsiyum silikat hidrat yapılarında oluşturduğu böylece basıncı dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca bu reaksiyon su tüketerek uçucu kül partiküllerinin çözünürlüğünü ve ortamın alkalinitesini arttırarak polikondenzasyon oranının artmasını sağlamıştır. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri UK'nin küresel ve pürüzsüz yüzeyli, ÖYFC'nin ise düzensiz köşeli parçacıkları göstermiştir. Numunelerin morfolojisi incelendiğinde XRD, FTIR ve SEM analizleri basınç dayanımı ve birbiri ile uyumlu gelmiştir. Tüm geopolimer numunelerde entegre bir geopolimer matris yapısı görülmüştür. Yüksek basınç dayanımı veren numunelerde geopolimer ağların çok daha iyi ve yoğun yapıldığı görülmüştür. FTIR analizi ortam sıcaklığında kürlenmiş düşük ÖYFC içeriğine düşük dayanıma sahip numunelerde güçlü geopolimer ağ yapılarının

oluşmadığını göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu olarak ortamdaki $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının ve ÖYFC içeriğinin artması ile BET yüzey alanı azalmıştır.

Shahmansouri ve diğ. (2021) farklı molaritelerde (4M, 6M ve 8M) sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ile aktive edilen ÖYFC bazlı geopolimer betonlarda (GPB) silis dumanı (SD) ve doğal zeolit (DZ) ikamesinin (%5'lik artışla %0-30 oranlarında) etkisini araştırmıştır. Ayrıca çalışmada ÖYFC bazlı geopolimer beton basınç dayanımını tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) yöntemi kullanılmıştır. GPB karışımların su/katı oranı 0,48, (NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltilerini hazırlamak için kullanılan su / ÖYFC, SD, DZ ve NaOH ve Na_2SiO_3 katı kısımları), alkali çözeltinin kaynak malzemeye oranı 0,45, agrega miktarı %77 kabul edilmiştir. Karışımı tamamlanan GBP beton işlenebilirliğini ölçmek için slump testi yapılmıştır. Basınç dayanımı için 100 x 100 x 100 mm boyutlarında kübik kalıplar kullanılmış 23 ± 2 °C derecede bir gün bekletildikten sonra kalıptan çıkartılan numuneler su havuzunda test gününe kadar (7, 28 ve 90 gün) bekletilmiştir. Yapılan slump testi sonuçlarına göre tüm karışımlarda SD ve DZ ilavesi ile çökme miktarı düşmüştür. 4 M NaOH ile aktive edilen GPB'ler 6 M ve 8 M GPB'lere göre daha iyi işlenebilirlik ve daha uzun priz sürelerine vermiştir. GPB aktivasyonunda kullanılan sodyum hidroksit konsantrasyonunun artışı ile slumpta büyük ölçüde azalmalar meydana geldiği ifade edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre çoğu karışımda sodyum hidroksit molaritesi 4 M'den 8 M'e çıktığında dayanım düşmüştür. Karışımlara SD ikamesi DZ ikamesine göre daha olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Basınç dayanımı değerlerine göre optimum sonuçlar 7. günde 6M NaOH %30 SD ikamesi ve 4M NaOH %10 DZ ikamesinde; 28.günde 4M NaOH %30 SD ikamesinde ve 4M NaOH %10 DZ ikamesi; 90.günde 4M NaOH %30 SD ikamesinde ve 6M NaOH %15 DZ ikamesi karışım tasarımlarında görülmüştür. GPC basınç dayanımlarını tahmin etmek için numune yaşı, sodyum hidroksit konsantrasyonu, ÖYFC, SD ve DZ içeriği, basınç dayanım sonuçları kullanılarak YSA modeli tasarlanmıştır. Modelin doğruluğunu ispat için ortalama hata karesi ve kolerasyon katsayısı hesaplamaları yapılmıştır. YSA sonucu tahmin edilen basınç dayanım sonuçları ile basınç deneyi sonuçları birbirine çok yakın gelmiştir. Böylece, tasarlanan YSA modelin doğruluğu ve yüksek tahmin kabiliyeti ortaya konmuştur.

Neupane ve Hadigheh (2021) öngermeli beton kiriş gibi yapısal beton uygulamaları için

sodyum hidroksit içermeyen ortam sıcaklığında kürlenene geopolimer beton (GPB) üretmeyi amaçlamıştır. Ticari olarak genellikle 40 ile 65 MPa dayanımlı betonlar önerilmeli beton olarak kullanıldığı ifade edilmiştir. Bu amaçla 50 MPa sınıfı GPB üretilerek mekanik ve kullanılabilirlik özellikleri araştırılmış ve aynı sınıfta PÇ betonlar ile kıyaslanmıştır. Farklı boyutlarda ve uzunluklarda önermeli kiriş numuneleri hazırlanarak betonun çekme dayanımının yük-sehim davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca kısa ve uzun vadeli süreler için yük sehim davranışı sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Geopolimer beton ağırlıkça %50 uçucu kül, %32 ÖYFC, %9 sodyum silikat ve %9 sodyum karbonat kullanılarak üretilmiş, referans beton ise %20 uçucu kül ve portland çimentosu ile üretilmiştir. 100mm x 200mm silindir, 100mm x 100mm x 350mm eğilme kirişleri ve 75mm x 75mm x 280 mm rötre prizmaları kullanılarak beton numuneler dökülmüş, basınç ve rötre deneyleri için numuneler ortam sıcaklığında (23 ± 2 °C) 24 saat, eğilme dayanımı deneyleri için ortam sıcaklığında 48 saat bekletilmiştir. Geopolimer betonun önerilmeli betona uygunluğunu araştırmak için üretilen numunelere ısı kürü (70°C’de 6 saat) uygulanarak erken yaş dayanım mukavemeti incelenmiştir. Üretilen GP ve PÇ betonların dayanımı bir yıla kadar sürekli artmış, her iki beton türünde de erken ve uzun süreli dayanım mukavemeti gelişimi benzer gelmiştir. 28 günlük GPB’nin basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımları sırasıyla 61 MPa, 5,1MPa, 7,1MPa olup aynı derecedeki PÇ betonun dayanımları 59 MPa, 4,0MPa, 5,6MPa gelmiştir. Kütleme ile hızlandırılmış numunelerde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımları GP betonlarda 6 saatte 33,5 MPa ve 3,8 MPa, 28 günde 56,5 MPa ve 5,0 MPa gelmiş, PÇ betonlarda ise 6 saatte 24,0 MPa ve 2,5 MPa, 28 günde 54,5 MPa 3,8 MPa gelmiştir. Kür ile hızlandırılan numunelerde GP beton %54’ünü 6 saatte verirken, 28 günlük dayanımın PÇ beton %40’ını 6 saatte vermiştir. Ayrıca her iki betonda (GP ve PÇ) ısı kürü ile gelen sonuçlar ortam sıcaklığında gelen sonuçlara kıyasla yaklaşık 6MPa daha düşük gelmiştir. Benzer sonuçlar ortam sıcaklığında sertleşen beton numunelerin yoğunluğu (BHA) daha yüksek gelmiş, sonuçlar GP ve PÇ betonlarda sırasıyla 2480 kg/m³ ve 2450 kg/m³ gelirken ısı kürü uygulanan numunelerde GP ve PÇ betonlarda sırasıyla 2390 kg/m³ ve 2370kg/m³ bulunmuştur. Çalışmada PÇ betonların elastisite modülü ve poisson oranı birbirine yakın gelmiş GP ve PÇ betonların elastisite modülü sırasıyla 34.2 GPa ve 35.3 GPa gelirken GP ve PÇ betonların poisson oranı sırasıyla 0,207 ve 0,203 gelmiştir. 1 yıllık kuruma büzülmesi

sonuçlarına göre GP betonlar (450 mikron) PÇ betonlara (585 mikron) kıyasla %30 daha iyi sonuçlar vermiştir. 1 yıl süreyle GP betonun ölçülen sünme kat sayısı (1,87) PÇ betonun ölçülen sünme katsayısından (2,79) %49 daha iyi gelmiştir. Daha yüksek eğilme dayanımına sahip GP beton kirişler aynı ölçülerde PÇ beton kirişleri ile kıyaslandığında %15 daha fazla ön gerilme yüküne, %20 daha fazla ilk çatlak yüküne ve %14 daha fazla nihai yüke dayanmıştır. 1 yıl sonra 10m ve 15m boyutlarında GB beton kirişlerde %7 ve %9 ilk çatlak yük kapasitesi kaybı görülürken 10m ve 15m boyutlarında PÇ beton kirişlerde %9 ve %12 lik ilk çatlak yük kapasitesi kaybı görülmüştür. Ön gerilme kaybı nedeniyle nihai yük taşıma kapasite kaybı GB beton kirişlerde %3,3 PÇ beton kirişlerde %4,6 bulunmuştur. Araştırmacılar yüksek yük taşıma kapasitesi, yüksek hizmet ömrü ve çevresel olarak sürdürülebilir olması nedeniyle GB betonun PÇ betona göre daha iyi bir alternatif olabileceğini açıklamıştır.

Top ve diğ. (2020) atık malzemeler ile geopolimer yapı malzemesi üretimini incelemiştir. Box Behnken test dizaynı kullanılarak hazırlanan geopolimer karışımların kaynak malzemeleri, su gözü ve Afşin termik santrallerinden gelen 2 farklı uçucu kül, soda sanayisinden gelen solvay prosesi atıkları ve YFC ve UK içeriği yüksek olan CEM V/A kompoze çimento olarak belirlenmiştir. Karışımlar için alkali aktivatör olarak çözelti haline getirilmiş 5 mol konsantrasyonundaki sodyum meta silikat kullanılmıştır. Hazırlanan taze harç karışımları 5cm boyutlarındaki kübik numunelere dökülerek kalıpla birlikte 24 saat süreyle kürlenmek üzere 70 °C'deki etüve yerleştirilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numuneler etüvden çıkartılarak test gününe kadar ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Üretilen geopolimer harçlar üzerinde basınç dayanımı 1. ve 28. Günde yapılırken shore sertliği, birim hacim ağırlık, UPV(m/s) ve su emme deneyleri ise 28. günde yapılmıştır. Test sonuçlarına göre karışımdaki Elbistan uçucu külü ve soda sanayi artıklarının artması basınç dayanımını düşürürken karışımdaki CEM V/A kompoze çimentonun artması basınç dayanımını arttırmıştır. Elbistan uçucu külü eklenmesiyle basınç dayanımındaki düşüş uçucu kül içerisindeki anhidritin suyla temasında jipse dönüşmesi ile açıklanmıştır. Ayrıca Elbistan uçucu külü içerisindeki ilit kil mineralinin su ile teması sonucu hacimsel olarak şişmesinin de dayanıma olumsuz etki yaptığı ifade edilmiştir. Birim hacim ağırlıklarına göre soda sanayi atığı yoğunluğu düşürmüştür, Elbistan uçucu külü ise arttırmıştır. Su emme, deney sonuçlarına göre Elbistan uçucu külü ve soda sanayi atığı su emmeyi arttırmış, CEM V/A çimento su emmeyi düşürmüştür. UPV (m/s)

deneyinde Elbistan uçucu külü ve soda sanayi atığı UPV (m/s) değerlerini düşürürken CEM V/A çimento UPV hızlarını arttırmıştır. Shore sertlik deneyinde en yüksek sonuçlar en çok CEM V/A çimento, en düşük sonuçlar ise en çok Elbistan uçucu külü içeren numunelerde görülmüştür. Çalışmada, 1570-1725 kg/m³ birim hacim ağırlıklarına sahip geopolimer harçlardan elde edilen dayanımlar 7-24 MPa arasında elde edilmiştir. Böylece elde edilen tüm geopolimer harçlar 1570-1725 kg/m³ birim hacim ağırlıkları ve 7-24 MPa dayanım gücü ile hafif beton sınıfında yer almaktadır. Ayrıca çalışmada, üretilen geopolimerlerin hafif yapılarda ve yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği açıklanmıştır.

Jiang ve diğ. (2020) ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan atık cam tozu (ACT) ilave edilmiş uçucu kül (UK) bazlı geopolimer pastaların özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla UK-ACT bazlı geopolimer pastalar (%100UK, %90UK-%10ACT, %80UK-%20ACT ve %70UK-%30ACT) üretilmiştir. Üretilen numunelerin işlenebilirlik, priz süresi, basınç dayanımı ve aderans dayanımı deneyleri yapılmıştır. Geopolimer pastaların üretiminde kullanılan kaynak malzemeler %10'dan fazla CaO içeriğine sahip olan C sınıfı UK ve atık cam şişelerinin öğütülmesiyle elde edilen atık cam tozu olarak seçilmiştir. Kaynak malzemeler üzerinde yapılan SEM ve XRD sonuçlarına göre: UK mikro küresel parçacıklar, mullit ve kuvarsın kristal fazlarını gösterirken; ATC ise düzensiz şekillerde kenarları olan camsı yapılar ve 12,5° ila 40° (2θ) arasında amorf bir yapı göstermiştir. Alkali aktivasyon için sodyum silikat (Na₂SiO₃) ve 10 mol NaOH çözeltisi 1:2 oranında ve alkali/katı 0,45 oranında olarak seçilmiştir. Hazırlanan taze numuneler 2x1 inç silindir kalıplar dökülerek 1 gün süreyle 60 ± 2 °C fırında kürlenmiştir. Fırından alınan numuneler kalıptan çıkartılmadan 28 gün süreyle 20°C sabit sıcaklık ve %95 nem oranına sahip kür odasında bekletilmiştir. İşlenebilirlik priz süresi deneylerine göre: ATC %0'dan %30'a yükseldiğinde akış değeri %14 artmışken; priz süresinde ise %26,56 azalmaktadır. Pürüzsüz ve su emmeyen yüzeyi ile akış değerini arttıran ACT reaktif silisyum içeriği ile polikondenzasyon sürecini hızlandırarak alüminosilikat yapıların daha hızlı oluşmasını sağlamıştır. Basınç dayanımının sonuçları UK bazlı (%0 ACT) numunelere kıyasla ATC'nin %10 ve %20 oranlarında ilavesiyle basınç dayanımı artarken %30 oranında %2 düşmüştür. ATC oranının %30 oranına gelmesiyle yükselen Si/Al oranı dayanımda olumsuz etkiler göstermiştir. Yüksek Si/Al oranının düşük çapraz bağlı alüminosilikat yapıların oluşmasına böylece dayanımın olumsuz etkilenmesine sebep olduğu ifade

edilmiştir. Aderans (yapışma) gücü deneyinde %0, %10, %20 ve %30 ACT içeren numuneler sırasıyla 3,31 MPa, 3,48 MPa, 3,67 MPa ve 3,18 MPa aderans mukavemeti vermiştir. Basınç dayanımı ve aderans dayanımı sonuçlarının birbiri ile uyumlu geldiği görülmüştür. 20 °C’de kürlenene numune referans alındığında 800°C, 1000°C, 1200°C dereceye maruz bırakılan numunelerde ACT ikamesi %0, %10, %20 ve %30 iken basınç dayanımları %37, %41, %46 ve %38 şeklinde gelmiştir. En iyi sonuç %20 ACT ikamesinde görülürken, %30 ACT ikamesinde dahi %0 ACT ikamesine kıyasla daha iyi sonuçlar bulunmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası aderans gücü deneylerinde bulunan sonuçlarla paralellik göstererek en iyi sonuçlar %20 ACT ikamesinde görülmüştür. Mikro yapı analizi sonuçlarına göre geopolimer karışımlarda ACT ikamesinin artması ile reaksiyona girmeyen parçacık miktarı azalmış, geopolimer pastalar daha homojen bir görüntü vermiştir. Bununla birlikte ACT ikamesi ile mikro çatlakların arttığı ACT %30 ikamesinde bu çatlakların daha görünür hale geldiği ifade edilmiştir. EDS sonuçlarına göre ACT içeriği %0, %10, %20 ve %30 iken Si/Al oranı 2,62, 3,17, 3,77 ve 5,49 olarak değişmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde SEM sonuçlar ACT’nin 800 °C sonrasında eriyerek geopolimer matrisi doldurduğu böylece mekanik özelliklere olumlu etki yaptığını göstermiştir. 1200 °C sıcaklığa gelindiğinde ise eriyen ACT’nin artan gözenekli yapılar üzerindeki etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Araştırmacılar 800 °C ve 1000 °C’de ACT’nin eriyerek matrisi doldurduğu 1200 °C’de ise etkisinin olmadığı açıklanmıştır. XRD sonuçlarına göre karışıma ACT eklenmesi ile daha çok alüminyumun polimerizasyona katıldığı böylece mukavemetin olumlu etkilendiği görülmüştür. Araştırmacılar, UK bazlı geopolimer pastalara ACT ikamesinin mekanik özelliklerin ve yüksek sıcaklık direncinin artacağını göstermiştir.

Xiao ve diğ. (2020) atık cam şişelerin öğütülmesi ($d_{50}=15,4\mu\text{m}$) ile elde edilen cam tozunun geopolimer üretiminde kaynak malzeme olarak kullanımını incelemiştir. Bu bağlamda atık cam tozu (CT) tozu ve C sınıfı uçucu kül (UK) farklı oranlarda (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100) karıştırılarak farklı sodyum hidroksit konsantrasyonlarında hazırlanan (0M, 2,5M, 5M, 7,5M, 10M) çözeltiler ile aktive edilmiştir. Bulunan sonuçlar kireç taşı tozu (KT) ve UK ile farklı oranlarda (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100) ve farklı sodyum hidroksit konsantrasyonları (0M, 2,5M, 5M, 7,5M, 10M) ile aktiveleştirilen geopolimer pasta sonuçları ile kıyaslanmıştır. Hazırlanan taze geopolimer numuneler 2,5x5 cm boyutlarında plastik kalıplara dökülmüş plastik poşetler içerisinde oda

sıcaklığında (20 °C) kürlenene numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılan numuneler test gününe kadar aynı ortamda kürlenmiştir. Sonuçlara göre CT düşük reaksiyon hızından dolayı ilk günlerde inert bir dolgu malzemesi gibi davranmıştır, bununla birlikte 14 günlük kürlenme sonrası mukavemete etkisinin önemli oranda arttığı görülmüştür. Basınç dayanım sonuçlarına göre tüm geopolimer numunelerde artan yaşla birlikte dayanımlar artmış, dayanım sonuçlarının alkali çözelti mol oranı ve karışım oranı ile yüksek oranda ilişkili olduğu görülmüştür. %100FC içeriğinde (100:0) NaOH oranının 2,5 molden 10 mole yükselmesiyle basınç dayanımı 60. günde 5 MPa'dan 33,5 MPa'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, cam tozu ilave edilen geopolimer karışımlarda en yüksek dayanımların daha düşük mol oranlarında geldiği görülmüştür. 5 mol NaOH ve 7,5 mol NaOH ile aktive edilmiş CT:UK (75:25) geopolimer numunelerde 60. günde 34,6MPa ve 29,4 MPa olarak bulunmuştur. Basınç dayanımı sonuçları, artan yaşla birlikte CT'nun geopolimerizasyona dahil olduğunu ve CT'nun geopolimerlerin üretilmesinde katma değerli bir bileşen olduğunu göstermiştir. Ayrıca CT kullanımı, basınç dayanımından ödün vermeden sodyum hidroksit kullanımını azaltabileceği ifade edilmiştir. 5 mol NaOH alkali çözelti ile aktive edilen KT:UK karışımında ise karışıma KT ilavesinin tüm yaşlarda dayanımı olumsuz etkilediği CaCO₃'ün düşük çözünürlüklü yapısı nedeniyle geopolimer jel yapısını seyrelttiği görülmüştür. SEM görüntü analizinde karışımdaki UK yüzdesi arttıkça geopolimer mikro yapısının daha yoğun yapıya hale geldiği ve en kompakt yapıya numunenin ise 25KT:75UK olduğu görülmüştür. Uygun miktarda cam tozu ile birleştirilen uçucu kül, alüminosilikat jellerin oluşumuna katkı sağlamıştır. Atık cam tozu ve uçucu kül üzerinde yapılan XRD difraktogramlarına göre; CT'nun XRD paterni 18° ile 38° (2θ) arasında net bir tümsek göstermiş, bu durum geopolimer hazırlamak için CT'nun yüksek miktarda amorf faz içeriğiyle güvenilir bir ana malzeme olduğunu doğrulamıştır. UK ise beklenildiği üzere kuvars, kireç ve mullit gibi kristal içeriklerle alakalı birkaç tepe göstermiştir. Aktivasyon sonrası geopolimerlerin XRD paterninde 20° ile 36° (2θ) arasında 27–29° (2θ) yüksek tepeler gözlenmiştir. Sonuçların diğer çalışmalardaki geopolimer XRD karakteristik özelliklerine benzer şekilde geldiği ifade edilmiştir. 60 günlük numuneler üzerinde yapılan sızıntı testlerine göre, karışımda UK miktarı arttıkça sızıntı miktarı azalmış, sodyum hidroksit oranı ve CT oranı arttıkça sızıntı miktarı artmıştır. Buna göre, inşaat endüstrisindeki uygulamalar için yüksek konsantrasyonda sodyum hidroksit ile aktive edilen CT bazlı geopolimerler yüzey

kaplaması gerektirebilir. Sürdürülebilirlik açısından geopolimer karışımlar içerisinde en iyi sonuçları 5 mol NaOH ile aktifleştirilmiş 25KT:75UK karışımı vermiştir. Çalışmada üretilen geopolimerlerin normal portland çimentosuna kıyasla daha düşük üretim enerjisine ve karbon emisyonuna sahip olduğu ifade edilmiştir. Çalışmadaki tüm bulgular incelendiğinde, geopolimer hazırlamada atık cam tozu kullanımı mekanik dayanımdan ödün vermeden ekonomik ve sürdürülebilir sonuçlar ortaya konulmuştur.

Prusty ve Pradhan (2020) uçucu kül (UK) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) bazlı geopolimer beton üretiminde; öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, su/geopolimer katı oranı, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin molarite, bağlayıcı miktarı, sodyum silikat/sodyum hidroksit ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranı parametrelerinin etkisi araştırmak ve optimum karışımı bulmak için Taguchi-Grey ilişkisel analiz yöntemi ile araştırılmıştır. Geopolimer beton karışımı için level^{parametre}:4⁵ olarak seçilmiş toplamda 16 döküm gerçekleştirilmiştir. Karışımlarının üretimi için Taguchi tasarım yönteminde kullanılan parametre ve seviyeleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Geopolimer beton karışımları için kullanılan parametre ve seviyeler

Parametreler	Seviyeler			
	1	2	3	4
YFC oranı (%)	15	30	45	60
Su/geopolimerkatı oranı	0,28	0,29	0,3	0,31
NaOH çözeltisinin molaritesi	8	10	12	14
Bağlayıcı miktarı (kg/m^3)	375	400	425	450
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (SS/SH) oranı	1,5	1,75	2	2,25

Üretilen geopolimer beton numuneleri üzerinde priz süresi, slump deneyi ve basınç dayanımı deneylerinden gelen sonuçlar taguchi yönteminde daha büyük-daha iyidir prensibi ile analiz edilmiş ayrıca ANOVA analizi ile etkin parametre bulunmuştur. Bulunan optimum karışımı doğrulamak amacıyla priz süresi, slump, basınç dayanımı deneyleri ayrıca optimum karışım üzerinde yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Mikroyapısal inceleme 16 karışım içinden daha iyi sonuçlar veren

4 karışım ve optimum karışım üzerinde yapılmıştır. İlk ve nihai priz süresi en düşük 50-90dk en yüksek 590-960dk olan sonuçlara göre ÖYFC miktarı ve SS/SH oranı azaldığında, su/geopolimerkatı oranı ve NaOH molaritesi yükseldiğinde, ilk ve nihai priz sürelerinin uzadığı görülmüştür. Ayrıca, karışımlardaki bağlayıcı içeriğinin artması ile priz süresi arasında sistematik bir varyasyon olmadığı gösterilmiştir. Priz süresi için yapılan ANOVA analizinde ise ilk priz ve nihai priz süresine en büyük etkiyi sırasıyla %86,71 ve %75,76 ile ÖYFC'nin yaptığı görülmüştür. 25-170mm arasında gelen slump sonuçlarına göre karışımdaki su/geopolimerkatı oranı, mol oranı ve bağlayıcı miktarının artması slump değerlerini arttırmıştır. ÖYFC miktarı %45'e kadar yükseldiğinde slump artarken %45 ten %60 gelindiğinde ise slump değerlerinde ani bir düşüş görülmüştür. Slump deneyinde ANOVA analizi sonuçlarına göre en yüksek etkiyi %63,84 ile su/geopolimerkatı olduğu görülmüştür. 7 ve 28 günlük ortam kürlenmesinde basınç dayanımları sonuçları 23,11-67,7 N/mm² ve 40,89-79,26 N/mm² olarak bulunmuştur. ANOVA analizi sonuçlarına göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına en büyük etkiyi %96,15 ve %88,95 ile ÖYFC yapmıştır. 7 günlük dayanım sonuçlarına göre karışımlarda ÖYFC miktarı %45'e kadar dayanımı arttırırken, %60'a gelindiğinde dayanımlarda düşmeler görülmüştür. 28 günlük dayanım sonuçlarında ise ÖYFC miktarı arttıkça dayanımda artışlar meydana gelmiştir. UK-ÖYFC bazlı geopolimer beton ilk ve nihai priz, slump, 7 ve 28 gün basınç dayanımı sonuçlarından elde edilen optimum parametreler Taguchi-Grey analiz yöntemi ile analiz edildiğinde optimum beton parametreleri ÖYFC seviye-3 (%45), su/geokati oranı seviye-4 (0,31), NaOH çözeltisi seviye-4 (14mol), bağlayıcı miktarı seviye-4 (450 kg/m³), SS/SH oranı seviye -1 (1,5) olarak elde edilmiştir. Optimum beton sonuçları yeterli priz süresi ve diğer deneylerde ise en yüksek sonuçları vermiştir. Buna göre 210-360dk ilk-son priz süresi, 200mm slump değeri, 56,15-79,70 N/mm² basınç dayanımı gelmiştir. Ayrıca yapılan 7 ve 28 günlük yarmada çekme sonuçları 2,34 ve 3,34 N/mm²; 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları 3,3 ve 5,85 N/mm² olarak gelmiştir. Geopolimer beton numuneleri üzerinde yapılan mikroyapı analizleri basınç dayanım sonuçlarını destekler nitelikte olup ÖYFC içeriğinin artması C-S-H ve C-A-S-H tipi jellerin oluştuğu böylece daha yoğun mikro yapılı geopolimer pastaların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca 28 günlük numunelerin 7 günlük numunelere kıyasla daha yoğun yapılı olduğu ve ortamdaki UK'nin erken yaş geopolimer oluşumunu yavaşlattığı ifade edilmiştir.

Ghosh ve diğ. (2018) geopolimer beton basınç dayanımı ile ultrasonik darbe hızı (UPV) arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu amaçla üç farklı F sınıfı uçucu kül (UK1, UK2, UK3), yüksek fırın cürufu (ÖYFC) kaynak malzemeleri, ince agrega olarak taban kütü (TK) iri agrega olarak kırmataş agregası kullanılmıştır. Karışımlarda alkali aktivatör olarak farklı molaritelerde (6M, 8M, 10M) sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Ayrıca karışımlardaki optimum sıvı/katı oranı 0,34 ve alkali oranı 1:1 (SH:SS) bulunmuştur. Üretim koşulları belirlenen geopolimer beton (GPB) numuneler üç farklı seride üretilmiştir bunlar; 6MUK1, 6MUK2, 6MUK3, 8MUK1, 8MUK2, 8MUK3, 10MUK1, 10MUK2, 10MUK3 olarak isimlendirilmiştir. Üretilen GPB'ler test gününe kadar (1, 7, 28 ve 90 gün) $27^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 'de ortam kütümesine bırakılmıştır. Her üç seride de kütüleme süresi ile birlikte basınç dayanımları artmıştır. En yüksek basınç dayanımları sırasıyla UK3 ardından UK2 ve UK1 olarak bulunmuştur. GPB betonda UK3'ün daha yüksek dayanım göstermesi daha ince partiküllü olması ile açıklanmıştır. Alkali çözelti konsantrasyonu UK değişiminden bağımsız olarak incelendiğinde 6M SH ile üretilen GPB'ler daha iyi dayanım sonuçları vermiştir. Ancak düşük molarite sebebiyle erken dayanımda (1. ve 7.gün) mukavemet gelişiminin yavaş olduğu görülmüştür. 90 günde en yüksek basınç dayanımları 6MUK3 GB'de görülmüştür. UPV (m/s) sonuçları basınç dayanımları ile aşırı uyumlu gelmiş, artan kütüleme süresi ile birlikte UPV (m/s) artmıştır. UK'den bağımsız olarak 6M SH ile üretilen GPB'ler daha iyi UPV (m/s) sonuçları göstermiştir. 90. Gün basınç dayanımı ve UPV (m/s) sonuçları birlikte analiz edildiğinde molarite arttıkça basınç ve UPV (m/s)'nin düştüğü görülmüştür. UPV (m/s) ve basınç dayanımı ilişkisini kurmak için UK1, UK2 ve UK3 ile üretilen GB'lerin 1., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanımı ile UPV (m/s) sonuçları arasında doğrusal bir ilişki eğrisi çizilmiştir. Buna göre bulunan kolerasyon faktörü (R^2) UK1, UK2 ve UK3 betonlarında sırasıyla 0,914; 0,882; 0,956 bulunmuştur, ayrıca UPV (m/s)'den basınç dayanımı tahmini 1,6 MPa ile 2,34 MPa arasında bir standart hata ile bulunmuştur. Mukavemet ile UPV (m/s) arasındaki farklılık agrega şekli, agrega-pasta arayüzey gelişiminden ve kütülenme süresi ile değişen matris yapısından kaynaklı olduğu ifade edilmiştir.

Tho-In ve diğ. (2018) yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve atık cam tozu kullanarak üretilen geopolimer pastaların basınç dayanımları ve mikro yapıları incelemiştir. Geopolimer pastalar %100UK ve UK yerine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında öğütölmüş floresan lambası tozu (FLT) ve atık kap camı tozu (KCT) ikamesi ile üretilmiştir. Karışımda alkali

çözelti olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Ayrıca karışımlarda sodyum hidroksitin (NaOH) sodyum silikata (Na_2SiO_3) oranı 1, alkali/bağlayıcı oranı 0,6 olarak alınmıştır. $25 \times 25 \times 25$ mm boyutlarında hazırlanan küp numuneler 60 ± 2 °C’de 48 saat kürlenmiş ve test gününe kadar 23 ± 2 °C’de laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre optimum performanslar %100 UK 45,7 MPa, %90UK-%10FLT 41,1MPa, %80UK-%20KCT 47,6 MPa, olarak bulunmuştur. Basınç sonuçlarında FLT ile yer değiştirmede sürekli azalma, KCT ile yer değiştirmede ise %20 oranına kadar artış sonra azalma görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu azalma yüksek silikat içeriğinden dolayı yüksek silisyum/alüminyum oranı ile açıklanmıştır. KCT ikamesi ile artan basınç dayanımı ise KCT’deki CaO içeriğinin (%12,80) FLT’dekinden (%7,43) daha yüksek olması ile açıklanmıştır. Karışımda geopolimer ürünlerine ek kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminosilikat hidrat fazlarının da oluştuğu düşünülmektedir. Geopolimer pastaların SEM, EDS ve gözenek boyutu dağılımını ölçmek için kullanılan MIP analizi sonuçları da basınç dayanım sonuçları ile benzerlik göstermiştir. SEM analizi sonuçlarına göre %100UK içeren geopolimer numuneye kıyasla %40 atık cam tozu içeren geopolimer pastalar daha fazla sayıda çatlak içerirken ve referans numuneden daha düşük yoğunluklar göstermiştir. Bununla birlikte %20 KCT ve %20 FLT numuneleri ise daha az çatlak içerdiği görülmüştür. EDS analiz sonuçlarına göre %20 KCT geopolimer pastalarda silis, alüminyum içeriği %18,74 ve %5, iken %20 FLT geopolimer pastalarda %12,65 ve %3,01 olarak bulunmuştur. Yüksek silis ve alüminyum içeriği N–A–S–H ve C–A–S–H geopolimer jellerin oluşmasını arttırmıştır. Ayrıca yüksek oranda atık cam tozu ilavesinin geopolimer sistemin polikondenzasyon oranını düşürdüğü açıklanmıştır. MIP analizinde ise %10-20 oranlarında atık cam tozu kullanmak boşluk oranını %15 oranına kadar azaltırken, %30-40 oranlarında ise boşluk oranı arttığı görülmüştür. Bulunan sonuçlar göre hem FLT hem de KCT’nin ikamelerinin geopolimer pastaların mekanik dayanımları üzerinde önemli etkilere sahip olduğu gösterilmiştir.

Vafai ve Allahverdi (2017) farklı oranlarda Na_2O içeren sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile atık cam tozunun alkali aktivasyonu sonucu ürettikleri geopolimer harçlar üzerinde çalışma yapmıştır. Ayrıca kaynak malzemelerin kimyasal bileşimleri değiştirmek için üç tip kalsiyum alüminat çimentosu ağırlıkça %8, %16, %24 oranlarında cam tozu ile yer değiştirilerek yeni geopolimer harçlar üretilmiştir. Kaynak malzemeler

öğütülmüş atık cam tozu (d_{max} 70 μ m), 3 tip kalsiyum alüminat çimentosu (Fondu, Secar 71 ve Secar 80) ve ince agrega olarak DIN 1164 standart kum kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlar üzerinde işlenebilirlik, priz süresi, basınç dayanımı, çiçeklenme oluşumu ve SEM analizleri yapılmıştır. İşlenebilirlik sonuçlarına göre referans (%100 Cam tozu) numunesine kıyasla fondu ve secar71 çimentoları %24 oranına kadar işlenebilirlik sürekli artarken, secar80 çimentosunda %24 oranına kadar sürekli düşüş görülmüştür. Bu durum secar80 çimentosunun çok yüksek özgül yüzey alanına sahip olması ile açıklanmıştır. Priz sürelerinde ise %24 oranına kadar her 3 tip çimentoda da benzer sonuç vererek priz süreleri önemli ölçüde kısalmıştır. Priz sürelerindeki kısalma yüksekten düşüğe sırasıyla fondu, secar71 ve secar80 olarak görülmüştür. Fondu çimentosunun %24 ikamesi ile referans numunesine kıyasla priz süresinde yaklaşık %90 azalma görülmüştür. Çimentolardaki CaO içeriği fondu %38,5, secar71 %28,3, secar80 %17,5 olarak bulunmuştur. Çimentolar arasındaki priz farklılığının da CaO içeriklerindeki farklılıktan kaynaklandığı görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarına göre, karışıma çimento ilavesi çok yüksek oranlarda basınç dayanımını arttırmış, en yüksek dayanım sonuçları fondu, secar71 ve secar80 olmak üzere sırasıyla 48MPa, 87MPa, 51 MPa olarak bulunmuştur. Üç tip çimento karışımında da benzer olarak karışımdaki çimento oranı arttıkça dayanım sonuçları sürekli artmıştır. Karışımdaki Na₂O mol oranı ise %8'den %10'a kadar artış %12 oranında ise düşme meydana gelmiştir. Tüm karışımlarda optimum oranlar %24 çimento, %10 Na₂O olarak bulunmuştur. Serbest alkali içeriği ve çiçeklenme potansiyeli sonuçları da basınç dayanım sonuçlarına paralel gelerek en iyi sonuçlar %24 secar71 ikamesinde gelmiştir. Sonuçlar, tüm çimento tiplerinin eklenmesi ile serbest alkali içeriğinin ve çiçeklenme oluşumunun azaldığını göstermiştir. SEM sonuçları incelendiğinde, secar71 eklenmesi ile mikro yapının iyileştiği, mikro boşlukların ve çatlakların azaldığı görülmüştür.

Wang ve diğ. (2016) yüksek fırın cürufu ve atık LCD cam kumu kullanarak geopolimer harç üretmeyi amaçlamış, bu amaçla farklı sıvı/katı (0,5, 0,55, 0,6), farklı alkali çözelti (%0,5, %0,75, %1) ve %10, %20 oranlarında atık LCD camı kumu oranlarını kullanmıştır. Bu bağlamda üretilen geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan cam kumu ÖYFC yerine ikame edilmek üzere kullanılmıştır, ÖYFC'nin incelik modülü 4000 cm²/g, atık LCD cam tozunun incelik modülü 2009 cm²/g olarak verilmiştir. Alkali aktivasyon için farklı oranlarda (%0,5,

%0,75, %1) sodyum silikat ve sodyum hidroksit birlikte kullanılmıştır. Slump sonuçlarına göre, sıvı-katı oranı arttıkça slump artmakta, sabit sıvı-katı oranlarında ise alkali çözelti oranı arttıkça slump değeri artmaktadır. Sabit alkali çözelti oranlarında cam kumu oranı arttıkça slump değeri yükselmektedir. Benzer şekilde sabit sıvı katı oranlarında cam kumu oranı arttıkça slump değeri yükselmektedir. Bu sonuçlara göre sıvı-katı oranı, alkali çözelti oranı ve cam kumu oranı arttıkça slump değeri yükselmektedir. Priz süresi deneylerinde alkali çözelti %0,5 iken sıvı-katı oranı 0,5’den 0,55’e yükseldiğinde ilk priz süresi ve son priz süresi 87 dk ve 131 dk uzamışken 0,6’a yükseldiğinde ise ilk priz süresi ve son priz süresi 159 dk ve 227 dk uzamıştır. Yüksek sıvı-katı oranı ile priz süresinin uzaması karışımdaki alkali çözeltilerin seyrelmesi ile açıklanmıştır. Sıvı-katı oranı 0,55, alkali çözelti %0,5 iken ilk priz süresi ve son priz süresi 300 dk ve 595 dk bulunmuştur. Sıvı-katı oranı 0,55 alkali çözelti %1’e yükseltildiğinde ise ilk priz süresi ve son priz süresi 45dk ve 100 dk kısalmıştır. Alkali içeriğinin yükseltilmesi priz süresini kısaltmıştır. 50 × 50 × 50 mm boyutlarında hazırlanan numuneler ile yapılan basınç dayanımı sonuçlarına göre sıvı-katı oranı 0,5, cam kumu ikamesi %0, %10, %20 olduğunda 28. gün dayanım sonuçları sırasıyla 51,52 MPa, 52,63 MPa ve 53,22 MPa olarak bulunmuştur. Artan basınç dayanımı cam kumunun daha fazla alüminyum ve silisyum çözerek geopolimer jellerin eksiksiz oluşması ile açıklanmıştır. Ayrıca, cam kumu ikamesi ile geopolimer jel reaksiyonu yavaşlamış, bu nedenle basınç dayanımı 7. günde referans numunesine kıyasla daha düşük, 28. günde daha yüksek sonuçlar vermiştir. Benzer şekilde karışımdaki alkali çözelti oranı yükseldikçe basınç dayanımı artmıştır. Yüksek alkali çözelti oranının çözünme hızını ve çözünme oranını arttırdığı görülmüştür. UPV (m/s) deney sonuçları basınç dayanım sonuçları ile paralellik göstermiş karışımdaki cam kumu ve alkali çözelti oranı arttıkça numunelerin ultrasonik atım hızları artmıştır. Sülfat saldırısı sonucu ağırlık kaybı sıvı-katı oranı artmasıyla artmış, cam kumu ve alkali çözelti oranı arttıkça azalmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, karışımdaki atık cam kumu miktarının artması sonuçlara olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Noushini ve Kalesi (2016) farklı koşullarda kürlen F sınıfı UK kül bazlı geopolimer betonun (GPB) mekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, üretilen GPB’lerin mekanik özellikleri aynı koşullarda üretilen referans portland çimentolu beton (PÇB) ile kıyaslanmıştır. Her iki beton türü de aynı miktarda (388 kg/m³) bağlayıcı ile üretilmiştir. Geopolimer beton karışımlarda kaynak malzeme olarak ağırlıkça %70 F sınıfı UK, %20

çok ince partiküllü UK ve %10 cüruf kullanılırken, alkali aktifleştirici olarak kütlece 2,5/1 oranında (SS/SH : 2,5/1) ticari olarak elde edilebilen sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve 12 M konsantrasyona sahip sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Geopolimer beton üretiminde kullanılan ince ve iri agregalar 105 °C'de 48 saat süreyle etüvlenmiş, karışımdan önce doymuş kuru yüzey haline getirilmiştir. Üretilen beton numuneler için farklı sıcaklıklarda (ortam kürü, 60, 75 ve 90 °C) ve farklı sürelerde (8, 12, 18 ve 24 saat) olmak üzere 12 farklı kürlenme yöntemi seçilmiş, PÇB numuneler için ayrıca suda kürleme yöntemi eklenmiştir. 28 günlük sonuçlarına göre GB numuneler 27,4 ile 62,3 MPa arasında basınç dayanımı ve 13,5 ile 25,9 GPa arasında elastisite modülü, 3210 ile 3930 m/s arasında UPV değeri vermiş; PÇ betonlarda ise 42,6 ile 64,5 MPa arasında basınç dayanımı, 28,9 ile 35,0 GPa elastisite modülü, 3720 ile 4350 m/s arasında UPV değeri vermiştir. GPB numunelerde optimum basınç dayanımı ve elastisite modülü 75°C'de 24 saat kürleme ile 62,3 MPa ve 25,9GPa olarak bulunmuş, PÇ numunelerde ise optimum basınç dayanımı ve elastisite modülü suda kürleme ile 64,5MPa ve 35 GPa olarak bulunmuştur. PÇB numunelerde ısı kürleme koşullarının önemli bir etkisi olmadığı en yüksek ve en düşük basınç dayanımı arasındaki fark yaklaşık %16 olduğu ifade edilmiştir. Elastisite modülü (EM) sonuçlarına göre tüm kürleme koşullarında GPB'lerin PÇB'lere kıyasla daha düşük EM'ye sahip olduğu görülmüştür. Su emme, porozite ve kılcal su emme sonuçlarına göre, ortam ve ısı kürlemede GB'lerin PÇB'lere kıyasla daha iyi olduğu, fakat suda kürlenen PÇB'nin en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. GPB ve PÇB numuneler üzerinde yapılan öz direnç deneyine göre tüm kürleme koşullarında GPB'lerin çok daha düşük öz direnç değerleri verdiği görülmüştür. GPB numunelerin düşük öz dirençli olması yapısında serbest metalik iyon (Na^+) varlığı ile açıklanmıştır. Ayrıca, betonda düşük öz direncin anodik ve katodik bölgeler arasındaki iyonik akımı kolaylaştırarak betonda korozyon oranını arttırdığı bildirilmiştir.

Torres-Carrasco ve Puertas (2015) Atık cam tozunun alkali aktivatör olarak kullanımını araştırmıştır. Bu bağlamda, 8 mol NaOH, 10 mol NaOH, 10 mol NaOH + %15 sodyum silikat (SS) ve 10 mol NaOH + 10, 15, 25 gr atık cam tozu olmak üzere dört farklı çözelti ile uçucu kül bazlı üretilen geopolimerlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Parçacık boyutu 45 μm 'dan küçük olan cam tozları 10 gr, 15 gr ve 25 gr olmak üzere 10 mol NaOH çözeltisi içerisine koyularak 80 ± 2 °C'de 6 saat süreyle karıştırılmış ve çözelti süzülerek hazır hale getirilmiştir. Aktifleştirilmiş uçucu kül

numuneleri 1 x 1 x 6 cm boyutlarında sıvı/katı oranı 0,3 olacak şekilde hazırlanmış ve buharlaşmayı önlemek için kapalı kalıplarla 85 °C’de 20 saatlik fırın kürüne bırakılmıştır. Kürden alınan numuneler test tarihine (1, 2, 7, 28 gün) kadar %99 bağıl nem ve 20 ± 2 °C’de bir odada kürlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre 8mol NaOH yerine 10 mol NaOH çözelti ile hazırlanan numuneler daha yüksek sonuçlar vermiştir. 10 mol NaOH çözeltisine %15 sodyum silikat eklenmesiyle sonuçlar önemli oranda artış göstermiştir. 1 günlük sonuçlar 30 MPa ya yükselirken 28 günlük sonuçlar ise 37 MPa ya yükselmiştir. 10 mol NaOH + 10, 15, 25 gr atık cam tozu ile hazırlanan çözeltide ise 10 gr ve 15 gr ile hazırlanan çözeltiler 1. ve 2. günlerde 8 mol NaOH ve 10 mol NaOH ile benzer sonuçlar vermiş 25 gr ile hazırlanan çözelti ise en düşük sonuçları vermiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre 1. ve 2. günlerde en yüksek sonuçlar 10 mol NaOH + %15 sodyum silikat çözeltisi ile hazırlanan numunelerde görülürken 7 ve 28 günlerde ise 10 mol NaOH + 15 gr cam tozu ile hazırlanan numunelerde görülmüştür. 10, 15 ve 25 gr cam tozu ile hazırlanan çözeltilerde 15 gr cam tozu optimum olarak görülmüştür. Çalışmada 10 mol NaOH + 15% SS ve 10 mol NaOH + 15 gr atık cam deneysel çözeltileri ile hazırlanan 7 günlük aktifleştirilmiş uçucu kül pastaları üzerinde mikroyapısal analiz yapılmıştır. Mikroyapısal analiz sonuçlarına göre 10 mol NaOH + 15% SS ve NaOH 10 M + 15 g ile hazırlanan geopolimer numuneler benzer reaksiyon derecesi ve reaksiyon ürünleri ortaya koymuştur. Sonuç olarak araştırmacılar atık camın yüksek amorf yapısı ve yüksek silika içeriği ile uçucu külün aktivasyonunda sodyum silikatın yerini alabilecek bir silika kaynağı olabileceğini ortaya koymuştur.

Bobirica ve diğ. (2015) atık floresan lambalardan elde edilen atık cam tozu ilavesinin uçucu kül ve uçucu kül/yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer pastalar üzerindeki etkisini incelemiştir. Atık cam kullanılmış floresan lambalarından elde edilmiştir. Floresan lamba içerisindeki buhar halindeki cıva kontaminasyonunu önlemek için özel olarak hazırlanmış cihazda kırım işlemi yapılmıştır. Uç kapakların ayrılmasından sonra atık cam 74 µm’den küçük parçacık boyutuna gelene kadar öğütülmüştür. Lamba içerisindeki floresan tozu (fosfor) için herhangi bir ayırma işlemi yapılmamış, karışımlara dahil olmasına izin verilmiştir. Karışımlarda sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş UK bazlı geopolimer, sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş UK/ÖYFC bazlı geopolimer ve Sodyum silikat ile aktifleştirilmiş UK bazlı geopolimer kullanılmıştır. Her karışımda referans (%0 CT) numunesinden sonra %10, %20 ve %30 oranlarında cam tozu UK yerine ikame edilerek

4 farklı karışım, toplamda 12 farklı karışım elde edilmiştir. Hazırlanan geopolimer pastalar 5x10 boyutlarında silindirik kalıplara koyulmuştur. Kalıplamadan hemen sonra kalıplar plastik poşetler içerisine konularak 24 saat süreyle 60 °C’de kürlenmiştir. Soğuduktan sonra kalıptan çıkartılan numuneler tekrar plastik poşetlere içerisine konularak 26 gün süreyle 20 °C’de kürlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre her karışımda cam tozu miktarı arttıkça, dayanımlar azalma eğiliminde olmuştur. Sodyum silikat ile aktive edilen karışımlar, sodyum hidroksit ile aktive edilen karışımlara kıyasla çok daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir. Dayanım farkı cam tozu içermeyen numunelerde daha belirgin görülmüştür. Ayrıca ÖYFC ilavesinin karışımların basınç dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Cam tozu ilavesi ile basınç dayanımındaki düşmeler $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar oranındaki artış ile açıklanmıştır. En iyi sonuçlar sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen numunelerde gelmiştir. Bunun sebebi olarak aktivasyon solüsyonunda reaksiyon derecesini arttıran çözünür oligo-siloksanatların varlığıyla açıklanmıştır. ÖYFC ilavesi ile artan mukavemet ise polimerizasyon derecesini arttıran Ca^+ bazlı reaksiyon ürünlerinin oluşumu ile açıklanmıştır.

Balçıkınlı ve diğ. (2015) alkaliler ile aktive edilmiş öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) harçların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci ve çekip çıkarma dayanımı özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada %100 ÖYFC ile aktive edilmiş harçlara ek olarak %100 çimento ve %50 çimento %50 ÖYFC karışımı yeni tip harçlar üretilmiş, sonuçlar kıyaslanmıştır. Yarı yarıya çimento ve ÖYFC ihtiva eden karışımlarda alkali aktivatörler kullanılan ÖYFC miktarını aktive edecek oranda karışıma eklenmiştir. Belirlenen oranlarda hazırlanan harç karışımları eğilme ve basınç dayanımı ve aşınma direnci için 40x40x160 mm boyutlarında kalıplara, çekip çıkarma dayanımı için 100x200 silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıptan çıkartılan harçların bir grubu suya konularak kürlenirken, diğer gruplar farklı sıcaklıklar (40, 60, 80°C) ve farklı sürelerde (6, 12 ve 24 saat) etüv içerisinde kürlenmiştir. Etüvden alınan numuneler test gününe (28gün) su içerisinde bekletilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre su içerisinde kürlenen harçlar incelendiğinde %100 çimento ile üretilmiş harçlarda daha yüksek dayanım verirken sıcaklık kürü uygulanan harçlarda %100 ÖYFC ile üretilmiş harçlar daha yüksek dayanımlar vermiştir. %50 ÖYFC %50 çimento içeren harçlar genel olarak en düşük dayanımları vermiştir. Yüksek kütleme sıcaklığı (80 °C) ve uzun kütleme süresinin (24saat) %100 ÖYFC ve %100 çimento ile hazırlanan karışımlarda olumsuz etki yaptığı

görülmüştür. Optimum dayanım 60°C’de 6 saat kürlen en %100 ÖYFC’li harçlarda gelmiştir. Eğilme dayanımları basınç dayanımları ile paralellik göstermemiş en yüksek dayanımlar %100 çimentolu harçlarda görülmüştür. Yüksek basınç dayanımı veren %100ÖYFC harçların eğilme dayanımı %100 çimentolu harçların eğilme dayanımına kıyasla yaklaşık %50 daha az olduğu, %50 ÖYFC %50 çimentolu harçlarda ise bu oranın yaklaşık %70 olduğu görülmüştür. Bu durum, ÖYFC’li harçlardaki mikro boşluk sayısının çok olması, büzölmeye bağılı mikro çatlakların oluşması ve elastisitenin daha düşük elastisite modöülü ile açıklanmıştır. ÖYFC ile hazırlanan harçların eğilme dayanımının yetersiz olduğu ifade edilmiştir. Aşınma direnci deneyine göre genel olarak %100 çimentolu harçların %100 ÖYFC’li harçlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür. Araştırma kapsamındaki çekip çıkarma deneyi basınç deneyi ile uyumlu sonuçlar vermiş, basınç dayanımı arttıkça çekip çıkarma dayanımı da artmıştır. Alkali aktive edilmiş %100 ÖYFC’li harçların aderans özelliklerinin %100 çimentolu harçlara kıyasla daha iyi olduğu açıklanmıştır.

Cyr ve diğ. (2012) geopolimer üretiminde yaygın kullanılan malzemelerin (uçucu küll, metakaolin gibi) yerine atık cam tozunun kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla çeşitli parametrelerin etkisini ve önemini değerlendirmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışılan parametreler arasında sertleşme süresi, camın inceliğı, harçların sertleşme sıcaklığı ve alkalın aktivatörün yapısı ve konsantrasyonu yer almaktadır. Atık şişe camlarından farklı boyutlarda (blaine yüzey alanı = 1080, 2070 ve 4170 cm²/g) elde edilen cam tozları farklı molariteye (1M, 5M, 10M) sahip alkaliler (NaOH, KOH) ile aktifleştirilerek geopolimer pasta ve harçlar hazırlanmıştır. Karışımlarda alkali çözeltinin cam tozuna oranı 0,5 olarak alınmıştır. Dökümü gerçekleşen numuneler 4 x 4 x 16 cm boyutlarında kalıplara konmuş, kalıplar plastik torbalar içerisinde test gününe kadar farklı sıcaklıklarda (20 °C, 40 °C, 60 °C) ve %100 bağıl nemde kürlenmiştir. Basınç dayanımı için 7, 28 ve 56 gün, eğilme dayanımı için 7 ve 28 gün, rötre büzölmesi ve ağırlık değişimi için 5 hafta süre ile kürlenme yapılmıştır. Sonuçlar literatürdeki yaygın kullanımın aksine sodyum silikat kullanılmadan da önemli basınç dayanımları (7 günde 50MPa’ya kadar) elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak 6 MPa dan yüksek sonuçlar elde etmek için 40 °C, 60°C kürlenme sıcaklıklarına ulaşmak gerektiğı belirtilmiştir. Kürlenme süresi 7 günden sonrası için önemli bir etki yapmamıştır. Bununla birlikte artan kürlenme süreleri ile basınç dayanımlarında yer yer düşmeler görölmüştür. Basınç dayanımlarındaki bu düşüşler faz

değişimleri ile açıklanmıştır. Karışımlardaki cam tozunun incelmesi basınç dayanımlarında önemli artışlara neden olmuştur. Cam tozu inceliğinin 2070 cm²/g'den 4170 cm²/g'e yükselmesine paralel basınç dayanım artışları yaklaşık %50 oranında olmuştur, iri partiküller ile reaksiyonlarının tam oluşmadığı, oluşan reaksiyon ürünlerinin taneleri tam olarak kaplayamadığı ve kohezyonu sağlayamadığı ifade edilmiştir. Sonuçlar kürlleme sıcaklığının, alkali çözeltinin (NaOH, KOH) ve alkali molaritenin (1M, 5M, 10M) harçların reaksiyon kinetiği ve mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğu göstermiştir. Basınç dayanımı sonuçları parametrelerin optimum değerleri olduğunu göstermiştir buna göre; uzun vadede (56gün) 40°C'de elde edilen basınç dayanımlarının 20°C ve 60°C kürlenene göre daha yüksek gelirken NaOH ve KOH alkali çözeltileri orta konsantrasyonda (5 mol) daha iyi mukavemet gelişimi göstermiştir. Düşük sıcaklıkta (20°C) ve düşük molaritede (1M) reaksiyonun tam olarak gelişmediği, yüksek molaritede (10M) ve yüksek sıcaklıkta (60°C) reaksiyonun tersine dönerek yavaşladığı belirtilmiştir. NaOH ve KOH bazlı çözeltilerin mekanik açıdan farklı geopolimerlerin oluşmasını sağlamıştır. KOH bazlı çözeltilerin daha yüksek basınç dayanımı verdiği görülmüştür. Daha yüksek silikat çözünmesi sağlayan K⁺ alkali iyonları olduğu ifade edilmiştir. Basınç dayanımları 4,6 - 55,7 MPa arasında iken bunlara karşılık gelen eğilme dayanımları 3,5 - 6,1 MPa arasında gelmiştir. Büyük basınç dayanımlarında nispeten düşük, düşük basınç dayanımlarında ise büyük eğilme mukavemeti gelmiştir. Düşük basınç dayanımlarında yüksek gelen eğilme mukavemeti geopolimer pastanın agrega yüksek aderansı ile açıklanırken, düşük eğilme mukavemeti ise geopolimer harçların gevrek yapısı ile açıklanmıştır. Yüksek dayanımlı geopolimer pastalar üzerinde yapılan durabilite deneylerinde; harçların havada kuruma büzülmesi ve ağırlık kaybı sonuçlarının çok iyi geldiği, demineralize su içerisine koyulan numunelerde ağırlık ve dayanım kaybı olduğu gösterilmiştir. Cam bazlı geopolimerlerin su içerisindeki dayanıklılığının düşmesi alüminyum eksikliğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Rattanasak ve Chindapasirt (2009) sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve uçucu külün (UK) farklı yöntem ve sürelerde karıştırılmasına ilişkin çalışma yürütmüştür. Sızıntı analizi için 5 M, 10 M ve 15 M sodyum hidroksit ve UK, ağırlıkça 3/1 uçucu kül/sodyumhidroksit oranlarında alınarak 5, 10, 15, 20 ve 30 dk süreyle karıştırılmış, ardından membran filtreden toplanan geopolimer macun Si ve Al iyonları için analiz edilmiştir. Geopolimer harç ve geopolimer macunların üretimi için ayrı ve normal

karıştırma olmak üzere iki farklı karıştırma yöntemi belirlenmiştir. Ayrı karıştırma (A) için UK ve 10 M NaOH 10dk süre ile karıştırılmış sonrasında karışıma sodyum silikat çözeltisi ilave edilmiş 1 dk daha karıştırılmıştır, Normal karıştırma (N) için UK, 10 M NaOH ve sodyum silikat 1 dk süreyle karıştırılmıştır. Ayrıca alkali çözelti etkisini görebilmek için karışımlarda sodyum silikat ve sodyum hidroksit (10M) oranı (SS/SH= 0,5, 1, 1,5, 2) sistematik olarak değiştirilmiştir. Üretilen geopolimer pastalar mikro yapı analizi için 25mmx25mm boyutlarında kalıplara konmuş, kalıplar streç film ile sarılarak 65 °C’de 48 saat süre ile kürlenmiştir. İki farklı yöntemle hazırlanan geopolimer pastalara ağırlıkça 2,75 kum/UK oranında kum ilave edilerek geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Geopolimer harç numuneleri mekanik testler için 50mm x 50mm boyutlarında kalıplara konmuş, ardından kalıplar streç film ile sarılarak 65 °C de 48 saat süre ile kürlenmiştir. Sızıntı analizi ne göre 10 M SH ile üretilen numuneden ortalama 600ppm Si^{4+} konsantrasyonu elde edilirken 5M ve 15 M ile hazırlanan numunelerde ortalama 200ppm ve 260ppm elde edilmiştir. Çözünmenin daha düşük gelmesi 5 M SH ile hazırlanan numunede düşük baz konsantrasyonu, 15 M SH ile hazırlanan macunlarda ise silikanın pıhtılaşmasındaki artış ile açıklanmıştır. Al^{3+} iyon konsantrasyonu Si^{4+} kıyasla çok daha düşük gelmiştir. 10 M ve 15 M NaOH ile hazırlanan macunlarda maksimum Al^{3+} iyon konsantrasyonu (130ppm ve 100ppm) 10 dakika karıştırma ile gelmiş, karıştırma süresi arttıkça Al^{3+} iyon konsantrasyonu düşmüştür. 5 M NaOH ile hazırlanan macunlarda ise 20 dakikada karıştırma ile 35ppm maksimum iyon konsantrasyonu gelmiştir. Sonuçlar 5-10 dakikalık karıştırma süresinin yeterli olduğunu, ortamda yeterli miktarda iyon olmasıyla alüminosilikat jellerinin oluştuğunu ve buna bağlı olarak 20, 30 dk’lık sürelerle karıştırmanın Si^{4+} ve Al^{3+} konsantrasyonunu arttırmadığını göstermiştir. Geopolimer pastaların SEM görüntüleri reaksiyona kısmen girmiş veya girmemiş UK tanelerini, yoğun alümino silikat jellerini göstermiş, EDX analizinde Si, Al (Si/Al oranı yaklaşık 3,0) Na ve UK’dan gelen Ca varlığını göstermiştir. XRD analizi de SEM görüntülerini destekler şekilde ağırlıklı olarak kuvars ve amorf alüminosilikat ürünleri göstermiştir. Basınç dayanımı sonuçları 10M ve 15M NaOH ile ayrı karıştırma yöntemi ile hazırlanan numunelerin daha yüksek dayanım verdiğini göstermiştir. Sızıntı testine uyumlu şekilde 5M NaOH ile hazırlanan geopolimer harçlar en düşük sonuçları vermiştir. Ayrıca SS/SH oranı 10M ve 15M NaOH ile hazırlanan

harçlar için önemli bir etkiye sahip değilken, 5M NaOH ile hazırlanan harçlarda dayanımı önemli ölçüde etkilemiştir.

Silva ve diğ. (2007) metakaolin öncü malzemesi, sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkali aktivatörleri ile hazırlanan geopolimer macunların priz alma, erken dayanım ve mikroyapısal faz değişimlerini incelemiştir. Bu amaçla farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarında iki farklı seri tasarlanmıştır. Tasarlanan numuneler ve priz süreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Geopolimer karışımların molar oranları ve priz süreleri

Numune	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	Nihai priz süresi (dk)
Si38	3,81	1,0	3,8	13,6	155
Si34	3,41	1,0	3,4	13,6	70
Si30	3,00	1,0	3,0	13,6	46
Si25	2,50	1,0	2,5	13,6	30
Al06	5,01	0,6	3,0	13,6	220
Al07	4,28	0,7	3,0	13,6	180
Al08	3,76	0,8	3,0	13,6	58
Al10	3,00	1,0	3,0	13,6	46
Al12	2,50	1,2	3,0	13,6	30

Hazırlanan geopolimer macunlar 30mm x 50mm silindir kalıplara dökülmüş, kalıplar plastik örtü ile sarıldıktan sonra 40 °C’de, %95 bağıl nem ve farklı sürelerde (0.5, 1, 2, 4, 8, 24 ve 72 saat) kürlenmiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarının karışımların priz süreleri ve basınç dayanım sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Yüksek Si/Al oranlarında priz ve sertleşme sürelerinin uzadığı görülmüştür. Tüm karışımlar ilk 8 saatte ölçülebilir mukavemet vermiştir. Bununla birlikte 24 saat sonunda dayanım gelişimleri $\text{Si38} > \text{Si34} > \text{Si30} > \text{Si25}$ aynı zamanda $\text{Al08} > \text{Al10} > \text{Al06} > \text{Al12}$ olarak bulunmuştur. Kürlenme süresinin 24 saatten 72 saate gelmesi durumunda basınç dayanımlarında belirgin bir değişim olmamıştır. İncelenen mukavemet değişimlerine göre optimum $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3,4 – 3,8 aralığında iken $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ oranı ise 0,8–1,0 aralığında bulunmuştur. Priz

süreleri için daha fazla araştırma yapılması önerilmekle beraber $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ arttıkça priz sürelerinin arttığı ifade edilmiştir. Ancak yakın $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarına sahip Al08 ve Si38 karışımlarında Al08'in priz süresinin çok daha kısa olduğu görülmüştür. Araştırmacılar Al içeriğinin $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ geopolimer sistemlerinde priz alma özelliklerini kontrol etmede önemli bir etken olmasına rağmen, ilerleyen yaş mukavemet özellikleri sistemdeki Si içeriğine daha çok bağlı olduğu ifade etmiştir. Numuneler üzerinde yapılan SEM görüntüleri basınç dayanımları destekler nitelikte olup en düşük dayanımları gösteren Al12 ve Si25'in mikro yapıları homojen olmayan jel yapıları ve farkı boyutlarda düşük bağlı taneler görülürken yüksek mukavemet gösteren numunelerde ise jel yapıları daha yoğun ve homojen yapıları görülmüştür. Geopolimer jel üzerinde yapılan EDAX ölçümleri $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarının numunelerin başlangıç karışımlarına yakın değerlerde bulunurken, Na^+ konsantrasyonlarının ise başlangıç karışımına göre daha çok düşük olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar %100'e yakın reaktivite gösteren metakaolin ile yapılan denemelerde Si ve Al miktarlarındaki küçük değişimlerin sonuçlara etkisinin büyük ölçüde olabileceğini göstermiştir. Ayrıca kaynak malzemelerin bileşimine ve reaktivitesine bağlı olarak geopolimer sentezinde Si ve Al miktarlarının çok farklı olabileceği, istenilen özelliklerde geopolimer sentezi yapabilmek için başlangıç bileşimlerine ek olarak kaynak malzemelerin alkali ortamdaki reaktivitesinin de tam olarak anlaşılması gerektiği ifade edilmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzemeler

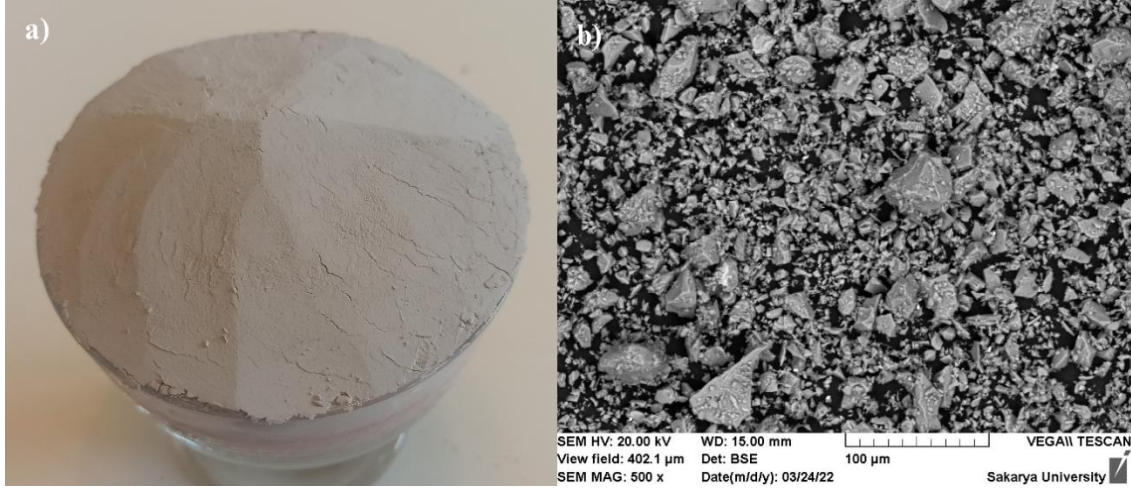
Bu çalışmada geopolimer beton (GPB) üretiminde, alüminosilikat kaynak malzeme olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), F sınıfı uçucu kül (UK) ve öğütülmüş atık pencere camı tozu (ACT), alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) kullanıldı. Ayrıca, akışkanlaştırıcı olarak Sikament RMC 3588 süper akışkanlaştırıcıdan (SA) yararlanılmıştır. Bölümün devamında bu malzemeler detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

4.1.1. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Kullanılan ÖYFC, Karabük Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş. menşeli olup, Nuh Çimento A.Ş. firmasından temin edilmiştir. ÖYFC'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de, ÖYFC'nin görünümü ve SEM görüntüsü Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal içerik (%)	
SiO ₂	39,2
Al ₂ O ₃	13,2
Fe ₂ O ₃	1,52
CaO	29,2
MgO	8,09
SO ₃	1,64
Na ₂ O	0,52
K ₂ O	0,90
MnO	2,60
TiO ₂	1,43
BaO	1,26
Diğer	0,24
Kızdırma kaybı	0,24
Fiziksel Özellikler	
İncelik (32 µm altı) (%)	93,5
İncelik (45 µm altı) (%)	99,3
İncelik (63 µm altı) (%)	100
Ortalama partikül boyutu (µm)	12,3
Özgül yüzey alanı (Blaine) (cm ² /g)	5342,9
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,07



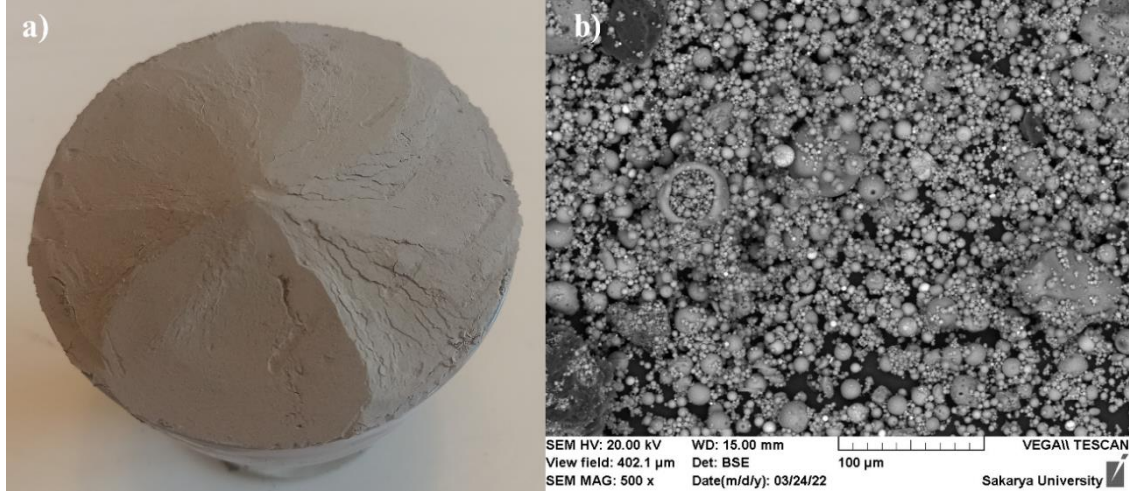
Şekil 4.1. a) Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin görünümü, b) SEM görüntüsü

4.1.2. Uçucu Kül

İskenderun Su gözü termik santralinde üretilmiş olan UK, Ekton İnşaat A.Ş.'den temin edildi. UK, toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı %70'ten daha yüksek olduğu için ASTM C 618-19'a göre F sınıfı UK kategorisine girmektedir. UK'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2'de, görünümü ve SEM görüntüsü Şekil 4.2'de verildi.

Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal içerik (%)	
SiO_2	55,2
Al_2O_3	23,9
Fe_2O_3	7,11
CaO	5,54
MgO	-
SO_3	0,17
Na_2O	1,72
K_2O	-
MnO	-
TiO_2	-
BaO	-
Kızdırma kaybı	1,05
Fiziksel Özellikler	
İncelik (32 µm altı) (%)	82,2
İncelik (45 µm altı) (%)	88,9
İncelik (63 µm altı) (%)	93,2
İncelik (90 µm altı) (%)	98,7
Ortalama partikül boyutu (µm)	19,5
Özgül yüzey alanı (Blaine) (cm^2/g)	4552,6
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,34



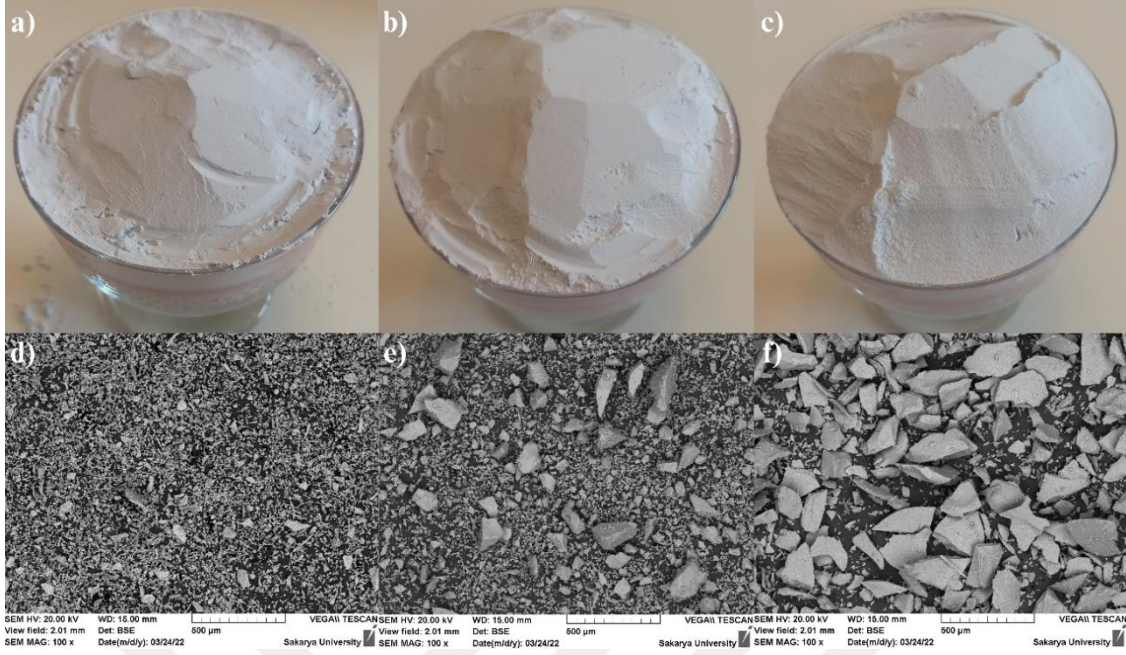
Şekil 4.2. a) Çalışmada kullanılan UK'nin görünümü, b) SEM görüntüsü

4.1.3. Atık Cam Tozu

Çalışmada kullanılan ACT, atık pencere camlarının öğütülmesi ile elde edilmiştir. Öğütülmüş ACT, Akcihan Cam San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edildi. Bu bağlamda firmadan 3 farklı inceliğe sahip ACT alınarak cam tozu inceliğinin geopolimer beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. ACT'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.3'de, ACT'nin görünümü ve SEM görüntüsü Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Çalışmada kullanılan üç farklı inceliğe sahip atık cam tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal içerik (%)			
SiO ₂	71,1		
Al ₂ O ₃	0,71		
Fe ₂ O ₃	0,34		
CaO	8,85		
MgO	4,15		
SO ₃	0,25		
Na ₂ O	14,1		
K ₂ O	0,21		
Mn3O4	0,01		
TiO ₂	0,12		
Toplam alkali	14,3		
Kızdırma kaybı	0,20		
Fiziksel Özellikler			
Cam tozları	1 nolu	3 nolu	4 nolu
İncelik (32 µm altı) (%)	89,5	41,4	20,5
İncelik (45 µm altı) (%)	94,1	50,8	29,5
İncelik (63 µm altı) (%)	96,8	62,0	41,8
İncelik (90 µm altı) (%)	99,2	76,2	58,9
Ortalama partikül boyutu (µm)	14,7	55,5	82,1
Özgül yüzey alanı (Blaine) (cm ² /g)	6294,4	2616,8	1001,1
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,53	2,53	2,53



Şekil 4.3. a) 1nolu ACT'nin görünümü b) 2 nolu ACT'nin görünümü c) 3 nolu ACT'nin görünümü d) 1 nolu ACT'nin SEM görüntüsü e) 2 nolu ACT'nin SEM görüntüsü f) 3 nolu ACT'nin SEM görüntüsü

4.1.4. Agregası

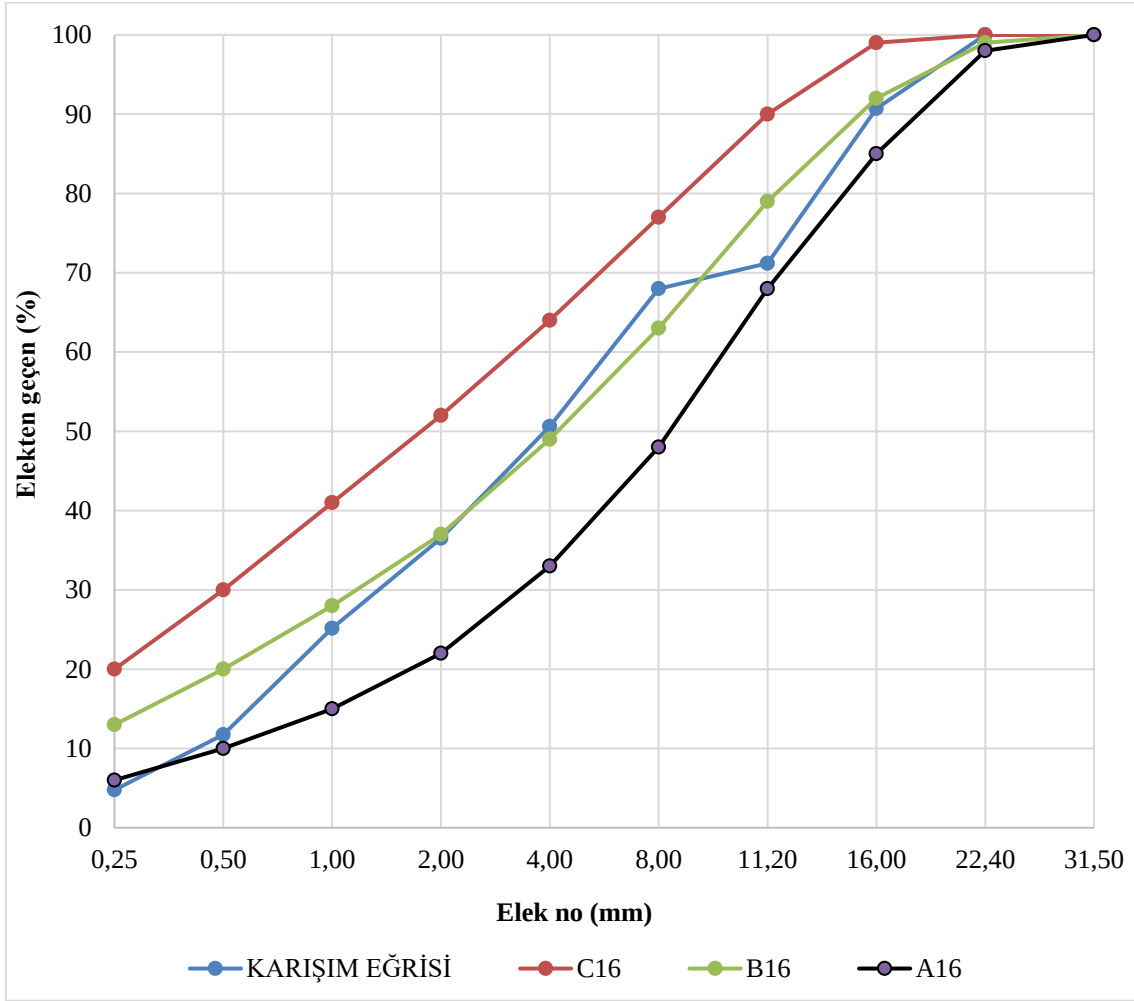
Çalışmada, Kavanlar Beton A.Ş.'den temin edilen 4 farklı agrega tipi kullanıldı. İri agrega olarak, 22 mm (11-22 mm) ve 11 mm (5-11 mm) boyutlu kırmataş agregaları kullanılırken; ince agrega olarak, 0-4 mm boyutlu doğal kum ve kırmataş tozu kullanılmıştır. Bu agregaların özgül ağırlıkları, su emme ve incelik modülleri değerleri Tablo 4.4'te, görünimleri Şekil 4.4'te verildi. Ayrıca, bu agregaların karışımından elde edilen karışık agreganın gradasyon eğrisi ve TS 802 standartlarına göre en büyük agrega tane büyüklüğü esas alınarak belirlenen sınırlar Şekil 4.5'te gösterildi.

Tablo 4.4. Çalışmada kullanılan agregalara ait özgül ağırlık, su emme ve incelik modülü değerleri

Agregası	İncelik modülü	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme oranı (%)
İri agrega (11-22mm)	7,41	2,68	0,6
İri agrega (5-11mm)	4,52	2,68	0,7
Doğal kum	2,54	2,58	2
Kırmataş tozu	2,62	2,60	1,8



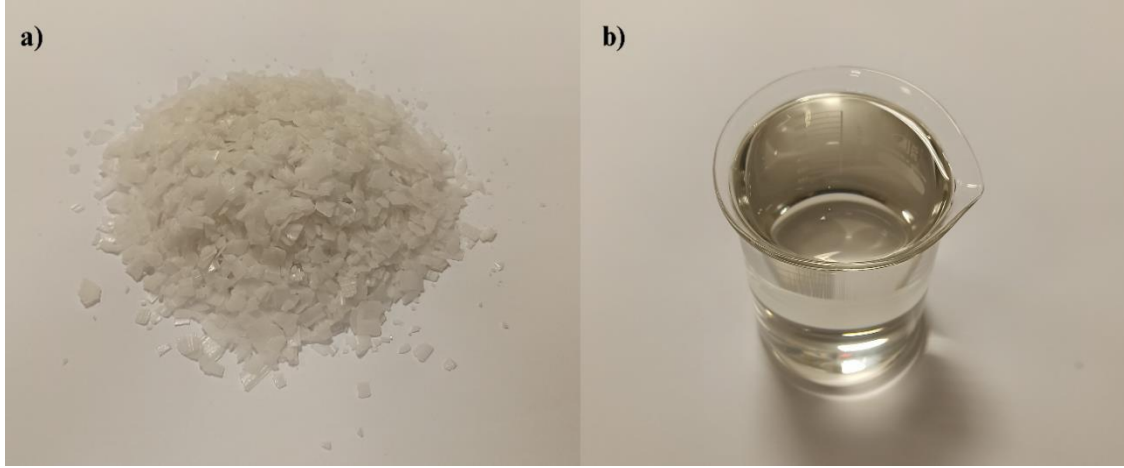
Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan agregalar



Şekil 4.5. Çalışmada kullanılan karışık agreganın gradasyon eğrisi

4.1.5. Alkali Çözeltiler

Çalışmada alkali çözeltisi olarak, sodyum hidroksit (SH) (NaOH) ve sodyum silikat (SS) (Na_2SiO_3) çözeltileri kullanıldı. Sodyum hidroksit ~%99 saflıkta katı pul şeklinde temin edildi ve laboratuvar ortamında çözelti haline getirildi. Şekil 4.6'da katı (pelet) ve sıvı SS gösterildi.



Şekil 4.6. Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler, a) Katı SH, b) Sıvı SS

Literatür çalışmalarından elde edilen bilgilere dayanarak, 6M, 8M, 10M ve 12M olmak üzere 4 farklı molaritede (mol/lit) sodyum hidroksit çözeltileri hazırlandı. Bu durumda, farklı molariteler için farklı ağırlıkta katı SH cam behere konuldu, daha sonra cam behere saf su eklenerek hacimce 1 lt çözelti elde edildi. Daha sonra 1 lt çözelti tartılarak ağırlıkça (%) oranlar belirlendi. Örneğin; 1 lt 10 molar SH çözeltisi için 400 gr katı NaOH, 924 gr saf su gereklidir, toplam çözelti ağırlığı 1324 gr olarak elde edilir. Silikat modülü 2 olan sodyum silikat ise, 30 kg’lık bidonlarda çözelti halinde tedarik edildi. Tablo 4.5’te farklı molaritelerde hazırlanan sodyum hidroksitin ve sodyum silikatın su ve katı oranları verildi. Merck laboratuvar el kitabında benzer sonuçlar gösterilmiştir (Anonim, 2011).

Tablo 4.5. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin ağırlıkça yüzdesi (%)

Alkali çözeltiler	Su	Katı
6 M SH	% 80,26	% 19,74
8 M SH	% 74,90	% 25,10
10 M SH	% 69,79	% 30,21
12 M SH	% 65,00	% 35,00
SS	% 61,79	% 38,21

Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de çalışmada kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikata ait analiz değerleri verildi.

Tablo 4.6. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) analiz değerleri

Analizler	Sonuç	Birim
Renk	Beyaz	-
Sodyum hidroksit (NaOH) saflığı	98,6	Ağırlıkça yüzde (%w/w)
Karbonat (Na_2CO_3)	0,1	Ağırlıkça yüzde (%w/w)
Klorür (NaCl)	<0,002	Ağırlıkça yüzde (%w/w)
Sülfat (Na_2SO_4)	<0,005	Ağırlıkça yüzde (%w/w)
Toplam cıva	<0,00005	Ağırlıkça yüzde (%w/w)
Suda çözünmeyen	0	Ağırlıkça yüzde (%w/w)

Tablo 4.7. Çalışmada kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) analiz değerleri

Parametre	Sonuç	Birim
Görünüş	Renksiz, berrak sıvı	-
Sodyum oksit (Na_2O)	12,792	%
Silis (SiO_2)	25,42	%
Bome (20°C)	43,40	°Be
Modül	2,03	-
Dansimetre (20°C)	1,427	g/cm^3

4.1.6. Su

Karışımlarda, Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri laboratuvarındaki şebeke suyu kullanıldı.

4.1.7. Süper Akışkanlaştırıcı

Karışımlarda yeterli işlenebilirliği sağlamak için Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilen Naftalin Sülfonat-Vinil kopolimer esaslı yüksek etkili süperakışkanlaştırıcı Sikament RMC 3588 kullanıldı. Bu süperakışkanlaştırıcıya ait detaylı bilgiler Tablo 4.8’de verildi, ayrıca kullanılan ürün Şekil 4.7’de gösterildi.

Tablo 4.8. Çalışmada kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik bilgiler

Ürün bilgileri	
Görünüm / renk	Kahverengi likit
Teknik bilgi	
Kimyasal yapısı	Naftalin Sülfonat-Vinil kopolimer esaslı sıvı
Yoğunluk değeri	20°C’de 1,19 -1,23 kg/l
pH değeri	5,5–9,5
Donma noktası	-4 °C
Standartlar	TS EN 934–2 standardına uygun olarak üretilmiştir.
Uygulama detayları	
Sarfiyat/Dozaj	Tavsiye edilen kullanım toplam bağlayıcı ağırlığının %0,5 ila %2 arasındadır. Aşırı dozlama etkisinde priz sürelerini oldukça uzatmaktadır.
Eklenmesi	Beton karışım suyuna ilave edilerek kullanılır, doğrudan betona ilavesi durumunda homojenliği sağlamak için hızlı devirde en az 3 dk daha karıştırılması gerekir.



Şekil 4.7. Karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı

4.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada deneysel program şu şekildedir:

1. Parametrelerin seçimi ve karşılık gelen seviyeleri
2. Taguchi ile uygun ortogonal dizinin seçilmesi ve düzenlenmesi
3. Taguchi yöntemine göre seçilen deneylerin yapılması
4. Deneysel sonuçların S/G oranlarının hesaplanması ve ANOVA tekniği kullanılarak analiz edilmesi
5. Birden çok özelliği aynı anda optimize etmek için genel performans değerlendirmesi yapılması
6. Optimize edilmiş GPB karışımı üzerinde doğrulama deneyleri yapılması

Bu bağlamda, farklı parametrelerin GPB üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla göz önüne alınarak, ÖYFC/UK değiştirme oranı (%), cam tozu değiştirme oranı (%), cam tozu partikül boyutu, kuru kürleme sıcaklığı ve NaOH (SH) çözeltisinin molaritesi (M) olmak üzere 5 farklı deney parametresi seçildi. Ayrıca, her parametre için dört seviye seçildi. Tam faktöriyel tasarım yöntemine göre, her parametrenin etkisini incelemek için toplam 1024 (yani, $\text{Seviye}^{\text{Parametre}}:4^5$) deneysel kombinasyon gerekmekte olup, bu kesinlikle zaman alıcı bir süreçtir ve ekonomik olmadığı fark edilebilir. Bu nedenle, araştırmada daha az sayıda deney ile karışım parametrelerinin farklı seviyelerinin GPB özellikleri üzerindeki etkisini incelemek ve optimum sonucu elde etmek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanıldı.

4.3. Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ve Analizi

Kaynak malzemeler yüksek fırın cürufu, uçucu kül ağırlıkça %80ÖYFC:%20UK (K1), %70ÖYFC:%30UK (K2), %60ÖYFC:%40UK (K3), %50ÖYFC:%50UK (K4) olacak şekilde dört farklı bağlayıcı karışım hazırlandı. Benzer tasarım Dave ve Bhogayata tarafından kullanılmıştır (Dave ve Bhogayata, 2020).

Bununla birlikte, 1 ve 3 nolu cam tozları ağırlıkça %50:%50 oranlarında karıştırılarak 2 nolu cam tozu hazırlandı. Böylece 4 farklı inceliğe sahip cam tozları elde edilmiştir.

Hazırlanan ÖYFC:UK karışımları ve atık cam tozu oranları ağırlıkça K1:%40ACT,

K2:%30ACT, K3:%20ACT, K4:%10ACT oranlarında, dört farklı (1nolu, 2 nolu, 3 nolu ve 4 nolu) boyutta cam tozu, dört farklı molaritede sodyumhidroksit (6M, 8M, 10M, 12M) ve dört farklı ısı kuru kürleme (45°C, 60°C, 75°C ve 90°C) olmak üzere; 5 farklı parametrede 4 farklı seviye ile Taguchi tasarım metodu hazırlandı.

Tablo 4.9’da Taguchi metodu ile hazırlanan deney modeli (4⁵) ve Tablo 4.10’da Taguchi L₁₆ kombinasyonuna göre hazırlanan deney planı verildi.

Tablo 4.9. Taguchi metodu ile hazırlanan deney modeli

Parametreler	Seviyeler			
	1	2	3	4
Bağlayıcı Karışım	K1*	K2*	K3*	K4*
% ACT	40	30	20	10
Cam boyutu	1	2	3	4
Kuru kürleme sıcaklığı (°C)	45	60	75	90
Mol Oranı (SH)	6	8	10	12

*K1=%80ÖYFC%20UK, *K2=%70ÖYFC %30UK, *K3=%60ÖYFC %40YFC, *K4=%50ÖYFC%50UK.

Çalışmada, Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile belirlenen karışımların deney sonuçları kullanılarak her bir deney için geopolimer betonların sinyal/gürültü (S/G) oranının istatistiksel analizi hesaplandı ve elde edilen S/G oranı kullanılarak her bir faktör ve seviye için S/G oranı ortalaması alınarak performans istatistiği belirlendi. Bu çerçevede, her bir deney için faktörlerin optimum değerleri belirlendi.

Taguchi metodunda, S/G oranının hesaplanması için üç temel performans yaklaşımı kullanılmaktadır: "daha büyük olan daha iyidir", "daha küçük olan daha iyidir" ve "nominal olan daha iyidir" (Yıldırım, 2019).

Tablo 4.10. Taguchi metodu ile hazırlanan deney planı

Deney no	Bağlayıcı Karışım	%ACT	Cam Tozu Boyutu	Kuru kütleme sıcaklığı (°C)	Mol Oranı (SH)
N1	K1(%80ÖYFC%20UK)	40	1	45	6
N2	K1(%80ÖYFC%20UK)	30	2	60	8
N3	K1(%80ÖYFC%20UK)	20	3	75	10
N4	K1(%80ÖYFC%20UK)	10	4	90	12
N5	K2(%70ÖYFC%30UK)	40	2	75	12
N6	K2(%70ÖYFC%30UK)	30	1	90	10
N7	K2(%70ÖYFC%30UK)	20	4	45	8
N8	K2(%70ÖYFC%30UK)	10	3	60	6
N9	K3(%60ÖYFC%40UK)	40	3	90	8
N10	K3(%60ÖYFC%40UK)	30	4	75	6
N11	K3(%60ÖYFC%40UK)	20	1	60	12
N12	K3(%60ÖYFC%40UK)	10	2	45	10
N13	K4(%50ÖYFC%50UK)	40	4	60	10
N14	K4(%50ÖYFC%50UK)	30	3	45	12
N15	K4(%50ÖYFC%50UK)	20	2	90	6
N16	K4(%50ÖYFC%50UK)	10	1	75	8

Not : Burada N1: K1(%80ÖYFC%20UK) - %40ACT - 1 nolu ACT - 45 °C – 6M SH karışımını ifade etmektedir.

Buna göre, geopolimer beton numuneler üzerinde yapılan deneylerden:

Priz süresi, ultrases geçiş hızı, yoğunluk, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, dinamik elastisite modülü, statik elastisite modülü ve sülfat atağı direnci sonuçlarının yüksek çıkması istendi. Bu durumda, sinyal/gürültü (S/G) performans yaklaşımı için “daha büyük daha iyidir” prensibi ile (S/G) hesaplarında aşağıda verilen Denklem 4.1’deki formül kullanılmıştır (Yıldırım, 2019):

$$SN_i = -10 \log x \left[\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (4.1)$$

Rötre (büzülme), kılcal su emme yüksekliği, su emme oranı, beton üretim maliyeti ve beton üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonu sonuçlarının düşük çıkması istendi. Bu durumda, sinyal/gürültü (S/G) oranları için “daha küçük daha iyidir” prensibi ile S/G hesaplarında aşağıda verilen Denklem 4.2’deki formül kullanılmıştır (Yıldırım, 2019):

$$SN_i = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right] \quad (4.2)$$

Optimum slump değerleri için ise deneysel çalışmalarda gözlemsel değerlendirme sonucu bir nominal değer kabul edildi. Bu durumda, sinyal/gürültü (S/G) oranları için “nominal olan daha iyidir” prensibi ile S/G hesaplarında aşağıda verilen Denklem 4.3’deki formül kullanılmıştır (Yıldırım, 2019):

$$SN_i = -10 \log x \left[\sum_{u=1}^{N_i} \frac{(y_u - \bar{y})^2}{N_i - 1} \right] \quad (4.3)$$

Burada:

SN_i (Signal-to-noise ratio) : “i” deneyin sinyal/gürültü oranını,

N_i : “i” deneyin gözlem sayısını,

y_u : her bir deneyin gözlem sonucu elde edilen değerini,

$\bar{y}$: istenilen nominal değeri,

u : deneyin gözlem numarasını

temsil etmektedir (Yıldırım, 2019).

Bununla birlikte çalışmada, taguchi metodu ile parametrelerin optimum seviyeleri bulunduğundan sonra parametrelerin birbiriyle ve deney sonucuyla ilişkisini anlamak için, Minitab19 programı ile parametreler analiz edilerek varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Aşırı uyumlu tasarım nedeniyle F-değeri hesaplanamadığı için (hata serbestliği sıfır), her bir parametrenin etkisinin yoğunluk, UPV, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emme, kılcal su emme, rötire, dinamik ve statik elastisite modülü deney sonuçlarına, maliyet ve CO₂ emisyonu analizi sonuçlarına etkisi incelenen parametrenin kareler toplamının tüm parametrelerin kareler toplamına yüzdesi bulunarak hesaplanmıştır (Prusty ve Pradhan, 2020). Ancak, priz süresi ve slump deneylerinde kütleme parametresinin bir etkisi olmadığı için ANOVA tasarımı değişmektedir (hata serbestliği : 3). Burada ise ilgili parametrenin deney üzerindeki etkisinin anlamlı olup olmadığı ve ilgili parametrenin etki yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak yokluk hipotezi H_0 ve alternatif hipotezi H_1 tanımlanır.

H_0 : Ortalamalar arasında fark yoktur (faktörün anlamlı bir etkisi yoktur).

H_1 : En az iki ortalama arasında anlamlı bir farklılık vardır (faktörün anlamlı bir etkisi vardır).

Yapılan varyans analizi sonucunda, elde edilen P değeri 0,05'ten büyük çıkarsa, ilgili faktörün ilgili deney sonucu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenir ve dolayısıyla H_0 hipotezi kabul edilir. Aynı şekilde, P değeri 0,05'ten küçükse, ilgili faktörün ilgili deney sonucu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilir ve H_0 hipotezi reddedilir, yerine H_1 hipotezi kabul edilir. Ayrıca, P değeri 0,001 ile 0,01 arasında ise yüksek düzeyde anlamlı bir fark olduğu, P değeri 0,001'den daha küçükse ise çok yüksek düzeyde anlamlı bir fark olduğu ifade edilir. Varyans analizi tablosunda her bir deney için serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), etki yüzdesi, F değeri ve P değeri gibi istatistiksel değerler yer almaktadır (Yılmazoğlu, 2022).

Bu sonuçlara dayanarak, ilgili faktörün deney sonuçları üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı değerlendirilir. P değeri, bu değerlendirmede önemli bir rol oynar ve kabul edilebilir bir anlamlılık düzeyi (genellikle 0,05) belirlenir. Bu değerden büyük bir P değeri, faktörün deney sonuçları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi

olmadığını gösterirken, küçük bir P değeri, faktörün deney sonuçları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğunu gösterir. P değeri ne kadar küçükse, etki o kadar anlamlı kabul edilir. Burada istatistiksel olarak anlamlı, anlamlı değil ifadesi parametreleri arasındaki değişimin deney sonuçlarına etkisinin anlamlı olup olmadığını ifade etmektedir. Yani parametredeki değişimin gerçek bir ilişki oluşturup oluşturmadığını gösterir.

Tüm ANOVA analizleri %95 güven düzeyinde yapılmıştır. Böylece ÖYFC/UK değiştirme oranı (%), cam tozu değiştirme oranı (%), cam tozu partikül boyutu, kuru kürlleme sıcaklığı ve NaOH çözeltisinin molaritesi (M) parametrelerinin GPB'un üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bununla birlikte, geopolimer beton Taguchi tasarımını belirlemek için yapılan deneme dökümleri işlenebilirlik, priz durumu, dayanım ve çiçeklenme durumu sonuçlarına göre incelendi. İşlenebilirlik için incelemeler yapıldığında, hazırlanan bağlayıcı karışımda ÖYFC/UK oranının %80:%20'den %20:%80 oranına kadar değişmesi durumunda, özellikle UK içeriğinin nispeten fazla olduğu karışımlarda önemli segregasyonlar gözlemlendi. Bu durumda, bağlayıcı karışımda ÖYFC/UK oranı %80:%20'den %50:%50'ye şeklinde yeniden dizayn edildi. Priz durumu açısından, 0,30 su/geokatı oranının altına düşülmesi haline dökülebilir bir betonun elde edilemediği gözlemlendi.

Kürleme açısından bakıldığında ise, hava kürü yapılan numunelerde çiçeklenme reaksiyonunun olduğu görüldü. Şekilde 4.8'de çiçeklenme gösteren geopolimer betonlar gösterildi. Bu durumda, gerekli literatür incelemesi yapıldığında çiçeklenme için en etkili çözümün sıcaklık kürlmesi olduğu anlaşıldığı için kürlleme sıcaklıkları uygulanmaya başlandı. Bu durumla ilgili detaylı bilgi çalışmada Bölüm 2'de verildi. Ayrıca ısı kürlmesinin dayanıma olumlu etki yaptığı gözlemlendi.

Sodyumsilikat/Sodyumhidroksit oranı için literatürde farklı oranlarda çalışmalar olduğu fark edilmiştir. Bu nedenle farklı SS/SH oranlarında karışımlar hazırlanarak incelendi. Buna göre, SS/SH oranının 1:1'den karışımlarda prizin çok hızlı gerçekleştiği gözlemlendi ve diğer oranlar içerisinde en yüksek dayanım ve uygun priz gösteren SS/SH oranının 2:1 olduğu görüldü. Benzer durum alkali çözelti/bağlayıcı oranı için yapıldığında 0,35, 0,40, 0,45, 0,50, 0,55 oranlarında hazırlanan karışımlardan en yüksek

dayanımın 0,45 alkaliçözelti/bağlayıcı oranına sahip karışımda olduğu tespit edildi.



Şekil 4.8. Çiçeklenme oluşumu gösteren geopolimer betonlar

SH molaritesini belirlemek için yapılan dökümlerde, mol oranının artması ile dayanımların kısmen düştüğü görüldü. Ayrıca, hazırlanan yüksek molariteli (10 M'den sonrası) sodyum hidroksit çözeltisinin soğuk havalarda donma yaptığı ve kullanılamadığı görüldü. Bu durum üretilen geopolimer betonların sürdürülebilirliğini etkilediği sonucuna varıldı. Yapılan literatür incelemesinde ÖYFC ve UK için SH molaritesinin belli bir seviyenin üstüne çıkmasının dayanımı olumsuz etkilediği, ACT'nin ise düşük molaritelerde daha iyi dayanım verdiğinin tespit edilmesi sebebiyle, çalışmada nispeten yüksek SH molaritesinden kaçınıldı. Şekil 4.9'da donmuş sodyum hidroksit çözeltisi gösterildi. Ayrıca, cam tozu boyutunun dökümlere engel olacak bir etki yapmadığı, cam tozu boyutunun artmasının basınç dayanımlarının olumsuz etkilenmediği görüldü.



Şekil 4.9. Donmuş sodyum hidroksit çözeltisi

Bu sonuçlar göre, karışımlar için en uygun oranlar olan alkaliçözelti/bağlayıcı 0,45, Sodyumsilikat/Sodyumhidroksit oranı için 2:1, su/geokatı oranı için 0,3 sabit oran olmak

üzere ($\text{su/geokatı} = (\text{çözeltilisuyu+eksu}) / (\text{çözeltilikatıkısmı+kaynakmalzeme})$); ÖYFC/UK 80:20-50:50, kütleme sıcaklığı için 45-90 °C, SH molaritesi için ise 6-12 mol olduğu belirlendi.

4.3. Beton Karışım Oranları

Deneysel çalışmada, Taguchi metodu deney planına göre 16 farklı beton karışımı hazırlandı. Karışımlarda literatürdeki bilgiler esas alınarak 1 m³ geopolimer betonun kütlelerinin 2400 kg olarak kabul edildi ve karışımlar kg cinsinden hesaplandı. 2400 kg toplam karışımın %75'inin toplam agrega (1800kg), %25'inin toplam bağlayıcı (600kg) olduğu kabul edildi. Toplam agrega gradasyon eğrisinden; agrega dağılımının %28'i iri agrega (11-22mm), %27'i iri agrega (5-11mm), %40'ı doğal kum ve %5'i taş tozu olarak hesaplandı. Agregalar doygun kuru yüzey (DYK) olarak kabul edildi.

Kaynak malzeme ve alkali çözeltiden oluşan toplam bağlayıcı kısım alkaliçöz/kaynakmalzeme oranına 0,45 (yaklaşık 186 kg alkali çözelti, 414 kg kaynak malzeme) olacak şekilde hesaplandı. Ayrıca, bulunan toplam alkaliçözelti miktarı SS/SH=2 (yaklaşık SS 124 kg, SH 62 kg) oranına sahip olacak şekilde hesaplandı. Kaynak malzemeler ise, Taguchi metodunda belirlenen oranlarda hesaplandı. Tüm karışımlarda SA oranı toplam kaynak malzemenin %1'i olacak şekilde hesaplandı. Bununla birlikte karışımlardaki ek su SH molaritesine göre değişen çözelti suyu miktarı göz önünde bulundurularak $\text{su/geokatı} = 0,3$ olacak şekilde düzenlendi. Tablo 4.11'de geopolimer beton karışım değerleri verildi.

Bununla birlikte, çalışmada priz süresi ve rötre deneyleri için sırasıyla, standart kum ve DYK doğal kum ile geopolimer harçlar üretildi. Geopolimer harç beton üretimiyle benzer bir mantıkla üretilmekte olup, 1 m³ geopolimer harç kütlesi 2200 kg olarak kabul edildi ve karışımlar buna göre hesaplandı.

Buna göre, harç numuneler %75'i kum (1650kg), %25'i toplam bağlayıcı (550) olarak kabul edildi. Alkaliçöz/kaynakmalzeme = 0,45 (yaklaşık 171 kg alkali çözelti, 379 kg kaynak malzeme), bulunan toplam alkaliçözelti miktarı SS/SH=2 (yaklaşık SS 114 kg, SH 57 kg) olacak şekilde hesaplandı. Kaynak malzemeler ise Taguchi metodunda belirlenen şekilde, SA oranı toplam kaynak malzemenin %1'i olacak şekilde hesaplandı.

Tablo 4.12’de geopolimer harç karışım değerleri verildi. Rangan, Wallah ve Rangan benzer geopolimer beton ve harç karışım tasarımlarını bildirmiştir (Rangan, 2008 ; Wallah ve Rangan, 2006).

Geopolimer beton karışım hazırlığı şu şekilde yapıldı:

1. Alkali çözeltilerin hazırlanması, öncelikle sodyum hidroksit çözeltisi belirlenen molaritelerde dökümden 24 saat önce hazırlandı. Isıya dayanıklı plastik bir kaptaki karıştırılan sodyum hidroksit ısındığı için buharlaşmaması amacıyla kabın kapağı kapatıldı. Ayrıca deneme dökümlerinden ve tedarikçi firmadan elde edilen bilgiye göre, 10 mol üzeri sodyum hidroksitin donarak kullanılmaz hale geldiği bilinmektedir. Bu sebeple, kapların ağzı kapatılarak sodyum hidroksitin ortam ile temasının kesilmesi ve buharlaşan su ile molaritesinin artmaması hedeflendi. 24 saat laboratuvar ortamında bekletilen sodyum hidroksit, hazır olarak alınan sodyum silikat ile belirlenen oranlarda karıştırıldı. Böylece alkali çözelti sıvısı hazırlandı.
2. Süper akışkanlaştırıcı ve ek su karıştırılarak hazırlanan alkali çözelti sıvısına ilave edildi.
3. Karışımlarda belirlenen bağlayıcı karışım ve 2 nolu atık cam tozu hazırlandı.

Geopolimer beton karışımı için; hazırlanan agregalar laboratuvar tipi mikserde 1 dk karıştırıldı, daha sonra kaynak malzemeler ilave edilerek 2 dk daha karıştırıldı. Sonrasında hazırlanan alkali çözelti + ek su + SA karışımı ilave edilerek 2 dk daha karıştırıldı. Şekil 4.10’da beton karışım mikseri ve geopolimer beton gösterildi. Üretilen geopolimer betonlar, TS EN 12350 standardında belirtildiği gibi kalıplara 2 seferde dolduruldu ve her seferinde betonun tamamen kalıba yerleştiğinden ve yüzeyindeki hava boşluklarının en aza indirildiğinden emin oluncaya kadar vibratör işlemine devam edildi (yaklaşık 20-30sn).

Kalıplanan geopolimer beton numuneleri 24 saat sonra kalıplardan çıkartılarak fırın poşeti ile mühürlendi. Sonrasında, belirlenen sıcaklıklarda önceden hazırlanmış fırında 24 saat süre ile ısıtılıp kuru küremeye tabi tutuldu. 24 saat sonunda etüvden alınan numuneler soğuması beklenildi, soğuyan numuneler poşetlerden çıkartılarak test gününe kadar laboratuvar ortamında bekletildi.

Tablo 4.11. Geopolimer beton karışım değerleri (kg)

NO	İri agrega (11-22mm)	İri agrega (5-11mm)	Doğal kum	Taş tozu	Bağlayıcı Karışım		Atık cam tozu		Sodyum hidroksit (SH)		Sodyum silikat (SS)	Süperakışkanlaştırıcı (SA)	Ek su	Kür sıcaklığı (°C)
1	504,00	486,00	120,00	90,00	K1	248,28	1 nolu ACT	165,52	6 M	62,07	124,14	4,14	15,53	45
2	504,00	486,00	120,00	90,00	K1	289,66	2 nolu ACT	124,14	8 M	62,07	124,14	4,14	19,85	60
3	504,00	486,00	120,00	90,00	K1	331,03	3 nolu ACT	82,76	10 M	62,07	124,14	4,14	23,97	75
4	504,00	486,00	120,00	90,00	K1	372,41	4 nolu ACT	41,38	12 M	62,07	124,14	4,14	27,84	90
5	504,00	486,00	120,00	90,00	K2	248,28	2 nolu ACT	165,52	12 M	62,07	124,14	4,14	27,84	75
6	504,00	486,00	120,00	90,00	K2	289,66	1 nolu ACT	124,14	10 M	62,07	124,14	4,14	23,97	90
7	504,00	486,00	120,00	90,00	K2	331,03	4 nolu ACT	82,76	8 M	62,07	124,14	4,14	19,85	45
8	504,00	486,00	120,00	90,00	K2	372,41	3 nolu ACT	41,38	6 M	62,07	124,14	4,14	15,53	60
9	504,00	486,00	120,00	90,00	K3	248,28	3 nolu ACT	165,52	8 M	62,07	124,14	4,14	19,85	90
10	504,00	486,00	120,00	90,00	K3	289,66	4 nolu ACT	124,14	6 M	62,07	124,14	4,14	15,53	75
11	504,00	486,00	120,00	90,00	K3	331,03	1 nolu ACT	82,76	12 M	62,07	124,14	4,14	27,84	60
12	504,00	486,00	120,00	90,00	K3	372,41	2 nolu ACT	41,38	10 M	62,07	124,14	4,14	23,97	45
13	504,00	486,00	120,00	90,00	K4	248,28	4 nolu ACT	165,52	10 M	62,07	124,14	4,14	23,97	60
14	504,00	486,00	120,00	90,00	K4	289,66	3 nolu ACT	124,14	12 M	62,07	124,14	4,14	27,84	45
15	504,00	486,00	120,00	90,00	K4	331,03	2 nolu ACT	82,76	6 M	62,07	124,14	4,14	15,53	90
16	504,00	486,00	120,00	90,00	K4	372,41	1 nolu ACT	41,38	8 M	62,07	124,14	4,14	19,85	75

Tablo 4.12. Geopolimer harç karışım değerleri (kg)

NO	Doğal/standart kum	Bağlayıcı Karışım		Atık cam tozu		Sodyum hidroksit (SH)		Sodyum silikat (SS)	Süperakışkanlaştırıcı (SA)	Ek su	Rötre için kür sıcaklığı (°C)
1	550,00	K1	227,59	1 nolu ACT	151,72	6 M	56,9	113,8	3,79	14,23	45
2	550,00	K1	265,62	2 nolu ACT	113,79	8 M	56,9	113,8	3,79	18,20	60
3	550,00	K1	303,45	3 nolu ACT	75,86	10 M	56,9	113,8	3,79	21,97	75
4	550,00	K1	341,38	4 nolu ACT	37,93	12 M	56,9	113,8	3,79	25,52	90
5	550,00	K2	227,59	2 nolu ACT	151,72	12 M	56,9	113,8	3,79	25,52	75
6	550,00	K2	265,62	1 nolu ACT	113,79	10 M	56,9	113,8	3,79	21,97	90
7	550,00	K2	303,45	4 nolu ACT	75,86	8 M	56,9	113,8	3,79	18,20	45
8	550,00	K2	341,38	3 nolu ACT	37,93	6 M	56,9	113,8	3,79	14,23	60
9	550,00	K3	227,59	3 nolu ACT	151,72	8 M	56,9	113,8	3,79	18,20	90
10	550,00	K3	265,62	4 nolu ACT	113,79	6 M	56,9	113,8	3,79	14,23	75
11	550,00	K3	303,45	1 nolu ACT	75,86	12 M	56,9	113,8	3,79	25,52	60
12	550,00	K3	341,38	2 nolu ACT	37,93	10 M	56,9	113,8	3,79	21,97	45
13	550,00	K4	227,59	4 nolu ACT	151,72	10 M	56,9	113,8	3,79	21,97	60
14	550,00	K4	265,62	3 nolu ACT	113,79	12 M	56,9	113,8	3,79	25,52	45
15	550,00	K4	303,45	2 nolu ACT	75,86	6 M	56,9	113,8	3,79	14,23	90
16	550,00	K4	341,38	1 nolu ACT	37,93	8 M	56,9	113,8	3,79	18,20	75



Şekil 4.10. Beton karışım mikseri ve geopolimer beton görünümü

Şekil 4.11’de kürlleme işlemi gösterildi. Burada, etüvden alınan numunelerin su kaybının dengelenmesi, hızlı bir şekilde su kaybına bağlı iç gerilmeler oluşmaması için numune sıcaklığı ortam sıcaklığına gelinceye kadar numuneler fırın poşetlerinde tutuldu.



Şekil 4.11. Isıl kuru kürlleme işlemi

Geopolimer harç karışımlarında ise, kum ile kaynak malzemeler laboratuvar tipi mikserde (Hobart mikseri) 2 dk kuru olarak karıştırıldı, sonrasında hazırlanan alkali çözelti + ek su + SA karışımı ilave edilerek 2 dk daha karıştırıldı. Üretilen harç numuneler priz deneyi için direk deneye tabi tutulurken, rötre deneyi için fırın poşeti ile mühürlendi. Daha sonra bu numuneler Taguchi’de belirlenen kuru kürlleme sıcaklıklarında 24 saat süre ile kürlenmek üzere etüve konuldu. 24 saat sonunda etüvden alınarak soğuması beklenildi ve poşetlerinden çıkartılarak rötre deneyine başlandı.

Geopolimer beton/harç deneylerinde dikkat edilmesi gereken husus; priz ve slump deneyleri dışındaki deneyler için hazırlanan geopolimer harç/beton numuneler kuru kütleme işlemine tabi tutuldu.

4.4. Geopolimer Beton/Harç Karışımların Molar Oranları

Geopolimer beton ve harç karışımlarının molar oranları, kaynak malzemeler üzerinde yapılan XRF analizi sonucu elde edilen kimyasal içerik değerleri üzerinden hesaplandı ve bulunan molar oranlar Tablo 4.13'te verildi. Buna göre karışımların Si/Al oranları 2,66 ile 5,08 arasında, Si/Ca oranları 1,97 ile 3,99 arasında, Ca/Al arasında 0,89 ile 1,74 arasında, Ca/Si oranları 0,25 ile 0,51 arasında, Na/Si oranları 0,09 ile 0,23 arasında bulundu. Karışımların molar oranlarının, başta Davidovits ve birçok araştırmacı tarafından belirlenen uygun değerler arasında yer aldığı görüldü (Davidovits, 2002 ; Davidovits, 2005 ; Xiao ve diğ., 2020 ; Shehata ve diğ., 2022).

Tablo 4.13. Karışımların molar oranları

NO	Si/Al	Si/Ca	Ca/Al	Ca/Si	Na/Si
1	5,08	2,91	1,74	0,34	0,29
2	4,18	2,55	1,64	0,39	0,25
3	3,49	2,24	1,56	0,45	0,21
4	2,95	1,97	1,50	0,51	0,16
5	4,84	3,21	1,51	0,31	0,28
6	4,00	2,84	1,41	0,35	0,25
7	3,35	2,52	1,33	0,40	0,20
8	2,84	2,23	1,27	0,45	0,16
9	4,63	3,57	1,30	0,28	0,28
10	3,83	3,19	1,20	0,31	0,24
11	3,22	2,85	1,13	0,35	0,20
12	2,74	2,56	1,07	0,39	0,16
13	4,44	3,99	1,11	0,25	0,28
14	3,69	3,61	1,02	0,28	0,24
15	3,11	3,28	0,95	0,31	0,20
16	2,66	2,97	0,89	0,34	0,16

4.5. Deney Yöntemi

4.5.1. Priz Deneyi

Geopolimer beton priz deneyi için, TS EN 480-2'e uygun şekilde standart kum ile geopolimer harç numuneleri üretilerek ilk ve son priz süreleri belirlendi. Geopolimer harç numuneleri kuru olarak karıştırıldıktan sonra, hazırlanan alkali çözelti + ek su + SA karışımı ilave kuru karışıma eklenerek 90 sn süre ile laboratuvar tipi mikserde düşük hızda karıştırıldı, 15 sn dinlendirildi, ıspatula yardımı ile kenarlarda kalan harçlar toplanarak tekrar düşük hızda 90 sn süre ile karıştırıldı. Hazırlanan harç numunesi derinliği $(40,0 \pm 0,2)$ mm, üst iç çapı (75 ± 5) mm, üst iç çapı (80 ± 5) olan önceden hafifçe yağlanmış, cam plaka üzerindeki sert kauçuk kalıba taşana kadar dolduruldu. Sonrasında kalıbın üst yüzeyinden taşan kısım ıspatula ile düzeltilerek kalıp üst yüzeyi ile harç üst yüzeyi aynı seviyeye getirildi. Daha sonra hareketli platform ağırlığı 1000 ± 2 gr olan Vicat cihazında priz süresi tayini yapıldı. Harcın üzerine kenarlardan ve birbirinden en az 10 mm mesafe olacak şekilde düşürülen Vicat iğnesinin cam plaka ile 4 mm olduğu an ilk priz süresi (priz başlangıcı) kabul edildi. İlk priz süresi tayininin hemen ardından numune ters çevrildi ve iğne ucunun en çok 2.5 mm battığı an son priz süresi (priz sonu) kabul edildi. Şekil 4.12'de priz yapım aşamaları ve üretilen numuneler gösterildi.



Şekil 4.12. Priz deneyi ve üretilen numuneler

4.5.2. Çökme (Slump) Deneyi

Üretilen geopolimer betonların işlenebilirliğini belirlemek için TS EN 12350-2 standardına uygun olarak slump deneyi gerçekleştirildi. Taze geopolimer beton Abraham hunisi olarak bilinen 10 cm üst çapa, 20 cm alt çapa ve 30 cm yüksekliğe sahip olan huniye 3 kademede dolduruldu. Her kademede, 16 mm çapında çelik çubuk ile 25 kez şişlenerek sıkıştırma işlemi gerçekleştirildi. Sıkıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra huninin üst kısmı çelik mala ile düzeltildi ve huni yavaş şekilde yukarı doğru çekilerek çöken betonun yanına konuldu. Huni çıkarıldıktan sonra, çöken betonun en üst noktası ile huni üst seviyesi arasındaki mesafe ölçülerek çökme (slump) değeri kaydedildi. Şekil 4.13'te 200 mm slump değeri veren iki farklı geopolimer betonun çökme deneyi sonucu gösterildi.



Şekil 4.13. Taze geopolimer beton slump deneyi

4.5.3. Yoğunluk

Geopolimer beton numunelerin taze ve sertleşmiş yoğunluğu, sırasıyla TS EN 12350-6 ve TS EN 12390-7 standartlarına göre belirlendi. Taze beton, 10 cm çapında 20 cm yüksekliğe sahip silindir kalıplara doldurulduktan sonra silindir kalıbının üst yüzeyi, çelik mala ile düzeltildikten sonra kalıp temizlenerek ağırlık ölçümü yapıldı. Geopolimer betonun taze yoğunluğu: taze betonla dolu silindirin ağırlığından silindir kabının darası çıkartıldı, çıkan sonuç numune hacmine bölünerek bulundu. Bu işlem üç numuneye

yapılarak üç numunenin ortalaması taze geopolimer beton yoğunluğu olarak kaydedildi.

Geopolimer betonların sertleşmiş yoğunluğu; beton numunelerin 2., 7., 28., ve 90. günlerde tartıldı ve numune hacmine bölünerek bulundu.

4.5.4. Ultrases Geçiş Hızı

Geopolimer betonların ultrases geçiş hızı (UPV) (m/s) 2., 7., 28., ve 90. günlerde 10x20cm boyutlarında silindir numuneler üzerinde ölçüldü. UPV tespiti için, Ultrasonik Tester Qust-120+ marka ultrasonik ses cihazı kullanıldı. Her iki probunda silindir numunelerinin yüzeylerine tam temas ettiğinden emin olmak için, her bir prob önce gres yağı ile yağlandı ve ardından UPV (m/s) ölçümü gerçekleştirildi. UPV (m/s) ölçümü Şekil 4.14'te gösterildi. UPV (m/s) ölçümü her test yaşı için üç numune üzerinde gerçekleştirildi ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak UPV (m/s) sonuçları kaydedildi.



Şekil 4.14. UPV (m/s) deneyi

4.5.5. Basınç Deneyi

Geopolimer betonların basınç dayanımı, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak 10x20 cm boyutundaki silindir numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Basınç dayanımı testleri 2., 7., 28. ve 90. Günlerde gerçekleştirildi. Numuneneler tek eksenli basınç dayanım cihazı

ile 0,5 MPa/s yükleme hızında test edildi. Numunenin kırılma anında ulaştığı en büyük yük, yükün uygulandığı kesit alanına bölünerek basınç dayanımı hesaplandı. Bu hesaplama için Denklem 4.4'te verilen formülle hesaplandı. Bu işlem her test yaşı için üç numune üzerinde gerçekleştirildi ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak basınç dayanım sonuçları kaydedildi. Şekil 4.15'te basınç dayanım deneyinin yapılışı verildi.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.4)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²),

F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N),

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı (mm²)

'dir



Şekil 4.15. Basınç dayanımı deneyi

4.5.6. Yarmada Çekme Deneyi

Geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı, TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 10x20 cm boyutundaki silindirik numuneler üzerinde 28. günde gerçekleştirildi. Yarmada çekme dayanımı için numuneler sabitleme cihazına yatay olarak yerleştirildi.

Sabitlenme cihazı ise makineye merkezlendi ve makinenin alt ve üst başlıklarının paralel olması sağlandı. Yarmada çekme dayanım sonuçları için numunenin kırılma anında ulaştığı en büyük yük sonuçları Denklem 4.5'te verilen formülle hesaplandı. Bu işlem üç numune üzerinde gerçekleştirildi ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak yarmada çekme dayanım sonuçları kaydedildi. Şekil 4.16'da yarmada çekme dayanımı deneyinin yapılışı verildi.

$$f_{ct} = \frac{(2 \times F)}{\pi \times L \times d} \quad (4.5)$$

Burada;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı MPa (N/mm²),

F : En büyük yük (N),

L : Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu (mm),

d : Numunenin seçilen en kesit boyutu (mm)

'dir.



Şekil 4.16. Yarmada çekme dayanımı deneyi

4.5.7. Su Emme Deneyi

Geopolimer betonun su emme değeri için üç 10x20cm silindirik numune kullanıldı. Buna göre 28 günlük numuneler önce 24 saat süreyle suda bekletildi, sudan çıkartıldıktan sonra yüzeyi kurularak tartıldı. Bu değer doymun kuru yüzey ağırlığı olarak kaydedildi. Sonrasında numuneler 24 saat süre ile 105 °C'de etüve konuldu ve etüvden çıkartılan numuneler tartıldı. Bu değer ise etüv kurusu ağırlığı olarak kaydedildi. Su emme oranı (%) Denklem 4.6'da gösterildiği gibi hesaplandı.

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{(W_{DYK} - W_{EK})}{W_{EK}} \times 100 \quad (4.6)$$

Buna göre:

W_{DYK} : numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı

W_{EK} : numunenin etüv kurusu ağırlığı

'dır.

4.5.8. Kılcal Su Emme (Sorptivite)

Geopolimer betonlar üzerinde kılcal su emme deneyi ASTM C1585-04 standardına uygun şekilde gerçekleştirildi. Bunun için 28 günlük 100x200 mm silindirik geopolimer beton numuneler 50 ± 3 yüksekliğinde kesildi. Hazırlanan numuneler kapalı kap içerisinde üç gün süreyle 50 ± 2 °C'de etüvde bekletildi. Üç gün sonra etüvden çıkartılan numuneler ayrı ayrı olmak üzere 15 gün süreyle polietilen torbalarda bekletildi. 15 gün sonunda numuneler torbalardan çıkartıldı ve yan yüzeyleri su geçirmeyen boya ile kaplandı. Bununla birlikte, numunelerin üstleri plastik streç film ile kaplanarak üst yüzeylerinden nem alış-verişi yapması engellendi. Numuneler hazırlandıktan sonra 0,1 g hassasiyete sahip tartı ile ilk ölçüm (kuru) yapıldı. İlk ölçümü yapılan numuneler iki destek üzerinde 2 ± 1 mm olacak şekilde suya değdirilerek deney başlatıldı. Suyu bırakılan numunelerin 60sn, 5.dk, 10.dk, 20.dk, 30.dk, 1.saat, 2. saat, 3. saat, 4. saat, 5. saat, 6. saat ve 1.gün, 2.gün, 3.gün, 4.gün, 5.gün, 6.gün, 7.gün, 8.gün'de sudan alındı ve alt yüzeyleri hafifçe kurulandıktan sonra tartımları yapıldı. Her karışım için 3 numunenin tartımı yapıldıktan sonra ortalamaları alınarak değerler kaydedildi. Şekil 4.17'de kılcal su emme deneyi aşamaları gösterildi.



Şekil 4.17. Kılcal su emme deneyi aşamaları

Tartım işlemi gerçekleştirilen numunelerden elde edilen bilgiler ile kılcal su emme yüksekliğini bulabilmek için Denklem 4.7’de verilen formül kullanıldı.

$$I = \frac{m_t}{(a \times d)} \quad (4.7)$$

Burada;

I = Kılcal su emme yüksekliği (mm)

m_t = t süredeki değişen ağırlık farkı (g)

a = Numunenin suya temas alanı (mm²)

d = Suyun yoğunluğu (g/mm³)

dur.

ASTM C1585-04 standardına göre, kılcal su emiliminin başlangıç hızı (mm/s^{1/2}), I ’nın zamanın kareköküne (s^{1/2}) karşı çizilen en uyumlu doğrunun eğimine denk gelmektedir. Bu durumda, I ’nın 1. dakikadan 6 Saate kadar olan sürenin kareköküne karşı çizilen eğiminden elde edilen regresyon analizi ile 1. Kılcallık katsayısı (başlangıç kılcal su emme hızı), 1 gün ile 7 gün arasındaki sürenin kareköküne karşı çizilen eğimin regresyon analizi ile 2. Kılcallık katsayısı (ikincil kılcal su emme hızı) bulunmaktadır. Ancak, 1dk ile 6 saat arasında ve 1 gün ile 7 gün arasında olan veriler doğrusal bir ilişki göstermez (korelasyon katsayısı 0.98’den daha az) ve sistematik bir eğrilik gösterirse, başlangıç kılcal su emme hızı ve ikincil kılcal su emme hızı belirlenemez. Bu sebeple, çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda veriler arasında doğrusal bir ilişki görülmediği için başlangıç kılcal su emme hızı ve ikincil kılcal su emme hızı Taguchi deneysel metodu analizinde kullanılmadı.

4.5.9. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü Deneyleri

Dinamik ve statik elastisite modülü deneyleri 28 günlük 100 x 200 mm silindirik geopolimer beton numuneler üzerinde gerçekleştirildi.

Dinamik elastisite modülü, ASTM C597-16 standardında önerilen denklem (Denklem 4.8) kullanılarak bulundu. Buna göre, tüm geopolimer beton numunelerin Poisson oranı, literatür çalışmaları temel alınarak 0,20 olarak kabul edildi.

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\rho V^2}{(1-\nu)} \quad (4.8)$$

Burada:

E_d = Dinamik elastisite modülü (MPa)

ρ = Beton Yoğunluğu (kg/m^3)

V = Ultrases geçiş hızı (km/s)

ν = Poisson Oranı

'dır.

Statik elastisite modülü deneyi ise, TS ISO 1920-10 standardına uygun olarak yapıldı ve Şekil 4.18'de kurulan test düzeneği gösterildi.



Şekil 4.18. Statik elastisite deneyi düzeneği

Deney, 0,25 MPa/s sabit yükleme hızıyla gerçekleştirildi ve yükleme sırasında meydana gelen deformasyon, 0,01 mm hassasiyetli bir komparatör saati kullanılarak ölçüldü. Bununla birlikte, gerilme değerleri ile deformasyon değerleri arasındaki ilişki video ile kayda alındı. Deformasyon değerleri, her 2 MPa basınç gerilmesindeki artışa karşılık gelen komparatör saati okuması ile belirlendi. Buna göre statik elastisite modülü (MPa) değeri, oluşturulan gerilme-birim deformasyon eğrisinin düz kısmının eğiminden hesaplandı. Spesifik olarak deformasyon eğrisinin düz kısmındaki gerilme değişiminin, buna bağlı yer değiştirme mesafesine bölünmesi ile bulundu.

4.5.10. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci Deneyi

Geopolimer beton numunelerin magnezyum sülfat direncini belirlemek için ASTM

C1012-09 standardı referans alınarak %5 derişikliğe sahip $MgSO_4$ çözeltisi hazırlandı (Çalışmada C1012-09 standardında kullanılan Na_2SO_4 çözeltisi yerine $MgSO_4$ çözeltisi kullanıldı).

Magnezyum sülfat deneyi şu şekilde gerçekteşti: Öncelikle üretilen 100x200 mm silindirik geopolimer beton numuneleri 28 günlük oluncaya kadar laboratuvar ortamında bekletildi, 28 günlük numuneler 48 saat süre ile su havuzuna bırakıldı. Sonrasında havuzdan çıkartılan numunelerin yüzeyi kurularak DYK ağırlıkları ve UPV değerleri belirlendi. Daha sonra, numuneler hazırlanmış magnezyum sülfat çözeltisine daldırılarak aylık ölçümleri yapılmak üzere toplamda 3 ay süre ile sülfat atağına maruz bırakıldı. Numuneler çözelti tankının içine dik bir biçimde ve çözelti numunelerin üst yüzeyini minimum 4 cm geçecek şekilde konuldu. İlk değerleri belirlendikten sonra $MgSO_4$ çözeltisine bırakılan numuneler 30 gün arayla çözeltiden çıkartıldı ve yüzeyleri kurularak DYK ve UPV (m/s) değerleri belirlendi. Bununla birlikte, 3 ay sonunda numunelerin basınç dayanım değerleri belirlendi. Ayrıca, deney sırasında homojen bir çözelti sağlamak ve çözeltinin etkisinin devam etmesi için hazırlanan magnezyum sülfat çözeltisi aylık olarak değiştirildi.

Çalışmada temin edilen Magnezyum sülfat heptahidratın ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) 20°C'de % 5'lik bir çözeltide elde edilen pH değeri 6,19 olarak belirlendi. EK A.1'de Magnezyum sülfat heptahidratın ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) özellikleri gösterildi. şekil 4.19'da Magnezyum sülfat deneyi yapılışı gösterildi.



şekil 4.19. Magnezyum sülfat deneyi yapılışı

4.5.11. Rötire (Büzölme) Deneyi

Geopolimer betonların büzölmesi hakkında bilgi sahibi olabilmek için, ASTM C490

standardına uygun şekilde 25x25x285mm boyutlarında harç numuneleri üzerinde rötre deneyi gerçekleştirildi. Buna göre, her bir karışım için beş adet numune üretildi. Ancak numuneler kalıptan çıkartırken veya başka bir sebeple kırılmasına karşılık, her bir karışım için en az üç numune kalacak şekilde dökümler tamamlandı. Her bir karışım için en az üç numune elde edilememesi durumunda dökümler yenilendi. Üretilen harç numuneleri 1 gün sonra kalıptan çıkartılarak fırın poşeti ile mühürlendi ve 24 saat süre ile ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Kürden çıkartılan numuneler poşet içerisinde laboratuvar sıcaklığına gelinceye kadar bekletildi ve poşetlerden çıkartıldı. Poşetten çıkartılan numuneler 15 dk su içerisinde bekletildi. Sonrasında kurularak ilk ağırlık ölçümü ve 0,001 mm hassasiyete sahip dijital komparatör ile ilk komparatör okuması yapıldı. Daha sonra numuneler test gününe kadar (1, 4, 7, 14, 28, 56, 90 ve 112 Gün) laboratuvar ortamında bir dolaba alınarak saklandı. Geopolimer harçların boy değişimi Denklem 4.9'da verilen formül ile hesaplandı.

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (4.9)$$

Burada:

L = x yaşındaki numunenin uzunluk değişimi (%),

L_x = x yaşındaki numunenin komparatör okuması (mm),

L_i = numunenin ilk komparatör (mm)

G = numunenin nominal ölçüm uzunluğu (mm)

'dur.



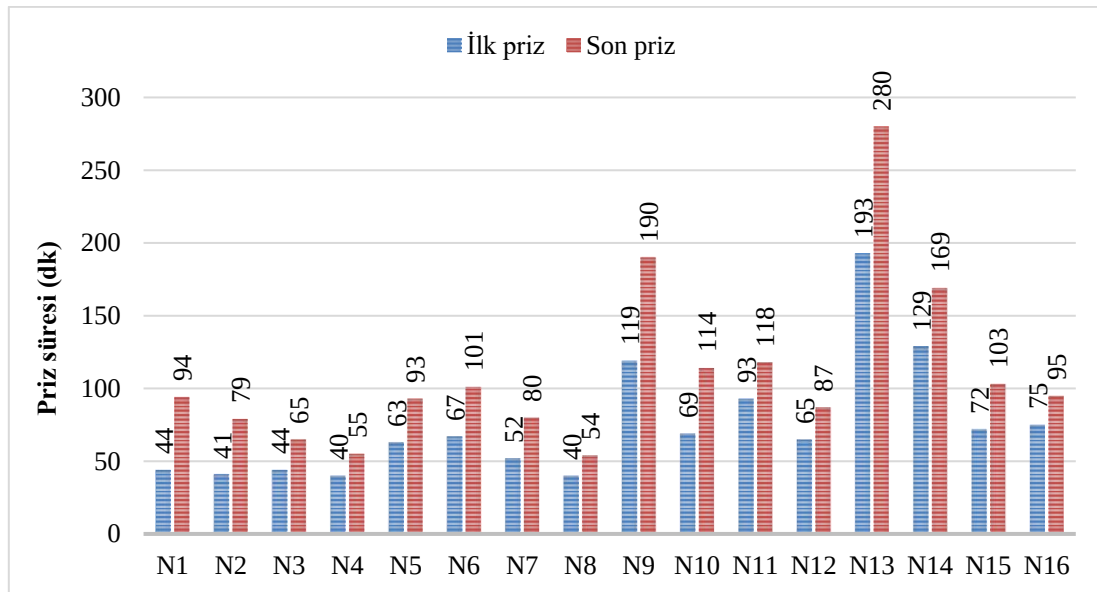
Şekil 4.20. Rötre deneyi ve üretilen numuneler

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde deney sonuçları incelendi ve bulunan sonuçlar literatür bilgisi ile karşılaştırıldı.

5.1. Priz Süresi

Bulunan ilk ve son priz süresi sonuçları Şekil 5.1’de verildi. Çalışmada yapılan priz süresi deneylerinde; ilk priz süresinin 40 ila 193 dk son priz süresi için 54 ila 280 dk arasında olduğu görüldü. Spesifik olarak, en düşük ilk priz süresi 4 ve 8 no’lu dökümlerde 40 dk ile görülürken en yüksek ilk priz süresi 13 no’lu dökümde 193 dk ile görüldü. Bununla birlikte, en düşük son priz süresi 8 no’lu dökümde görülürken en yüksek son priz süresi 13 no’lu dökümde 280 dk ile görüldü. Ek olarak, ilk ve son priz süreleri arasında genel olarak bir uyum olmadığı gözlemlendi. Örneğin 8 no’lu dökümde ilk ve son priz süresinin arası (40-54dk) 14 dk iken yakın ilk priz süresi gösteren 1 no’lu dökümde ilk ve son priz süresinin arası (44-94dk) 50 dk olarak bulundu. Buna karşın, 9 no’lu dökümde ilk ve son priz süresinin arası (119-190dk) 71 dk iken, 14 no’lu dökümde ilk ve son priz süresinin arası (129-169dk) 40 dk olarak bulundu. Genel olarak bulunun sonuçlar, normal portland çimentolu kompozitler ile kıyaslandığında geopolimer kompozitlerin çok kısa priz sürelerine sahip olduğunu ve çok hızlı bir kullanım olanağı sunduğunu gösterdi (Pilehvar ve diğ., 2019 ; Serinoğlu, 2011).



Şekil 5.1. Geopolimer harçların priz süreleri (dk)

5.1.1. Priz Süresine Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

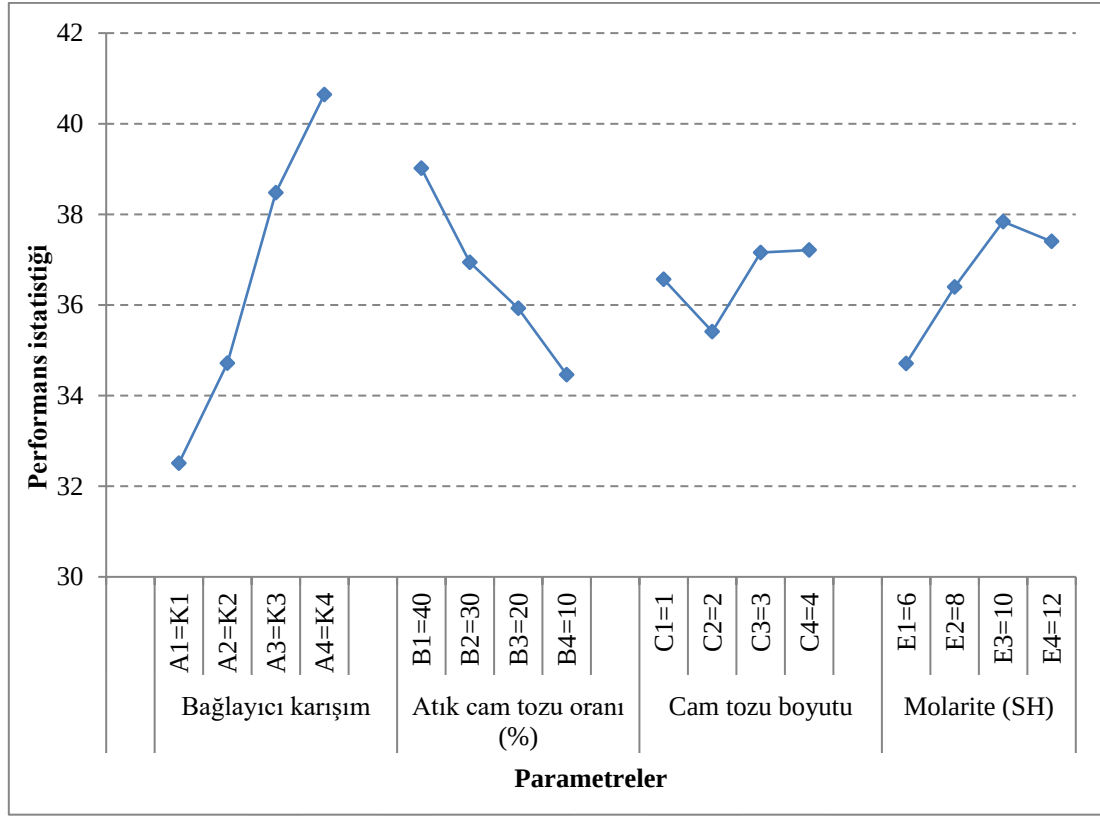
Çalışmada bulunan ilk priz süresi sonuçları Taguchi metodu ile “daha büyük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.2’de verildi. Ayrıca, kür sıcaklığının priz süresine bir etkisi olmadığı için Taguchi hesaplamasında dahil edilmedi. Buna göre, optimum parametreler $A4=K4$, $B1=40$, $C4=4$, $E3=10$ olarak bulundu.

Parametrelerin etkisi incelendiğinde, K1 karışımından K4 karışımına gelindiğinde priz süresinin uzadığı görüldü. Spesifik olarak karışımlarda ÖYFC oranının azalması, UK oranının artması ile priz sürelerinin uzadığı bulundu. ÖYFC oranındaki azalma ve UK oranındaki artış ile priz sürelerinin uzaması literatürdeki diğer çalışmalar ile oldukça uyumlu gelmiştir (Nath ve Sarker, 2014 ; Hadi ve diğ., 2017 ; Prusty ve Pradhan, 2020).

Bununla birlikte, karışımlarda cam tozu oranının artması ve genel olarak cam tozu boyunun artması priz süresini arttırdı. Tahwia ve diğ. (2023), yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bazlı karışımlara cam tozu ilavesinin priz süresini uzattığını açıklarken, Varma ve Singh (2023), cüruf bazlı geopolimer karışımlara cam tozu ilavesinin priz süresini kısalttığını açıklamıştır. Bu durum, cam tozunun geopolimer reaksiyon aktivitesini ne yönde etkilediğine bağlı olarak değişmektedir.

Çalışmada, ACT’nin ÖYFC’ye kıyasla daha az reaktivite göstermesinden dolayı, artan ACT oranı priz süresini uzatmaktadır. Sodyum hidroksit molaritesinin 10 mol’e kadar priz süresini arttırdığı, 10 molden 12 mol’e gelindiğinde ise priz süresini azalttığı görüldü. Benzer sonuçlar Hanjitsuwan ve diğ. (2014), Malkawi ve diğ. (2016), tarafından gösterilmiştir. Karışımdaki artan NaOH konsantrasyonu ile silisyum ve alüminyumun çözünmesinin artması kalsiyum çözünmesini sınırladığı, böylece priz süresi uzattığı düşünülmektedir.

Tablo 5.1’de geopolimer harç karışımların priz süresi sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, bağlayıcı karışım, %ACT, Molarite (SH), Cam tozu boyutu olarak bulundu.



Şekil 5.2. İlk priz süresi performans istatistiği-parametreler grafiği

Buna göre ilk priz süresini en yüksek oranda etkileyen parametre %52,84 ile bağlayıcı karışım, %21,67 ile ACT oranı olduğu gözlemlendi. Bununla birlikte, ÖYFC ve UK nispeten az oranda (80:20-50:50) değişmesinin priz süresi sonuçlarını ciddi oranda etkilediği görüldü.

Benzer şekilde Prusty ve Pradhan, ilk ve son priz sürelerine en yüksek etkiyi ÖYFC'nin yaptığını göstermiştir (Prusty ve Pradhan, 2020). Ayrıca, ACT oranının priz üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ek olarak, Şekil 5.2 ve Tablo 3.4 birlikte incelendiğinde %6,85 ile en düşük etkiyi gösteren cam tozu boyutu parametresinin belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlendi.

Bununla birlikte, tüm parametrelerin P değerleri 0,05 değerinden daha büyük olduğundan H_0 hipotezi kabul edilir. Yani ilk priz süresi üzerinde; bağlayıcı karışımın, ACT oranının, ACT tozu boyutunun ve SH molaritesinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu gözlem ile parametrelerin ilk priz süresine olan etkilerinin daha net görülebilmesi için parametre değişimlerinin daha büyük oranlarda yapılması gerektiği söylenebilir.

Tablo 5.1. İlk priz süresi varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	13478	4492,7	52,84%	7,72	0,064
% ACT	3	5527	1842,4	21,67%	3,17	0,185
Cam Tozu Boyutu	3	1963	654,4	7,70%	1,12	0,463
Molarite (SH)	3	2793	930,9	10,95%	1,60	0,355
Hata	3	1746	582,1	6,85%		
Toplam	15	25508		100,00%		

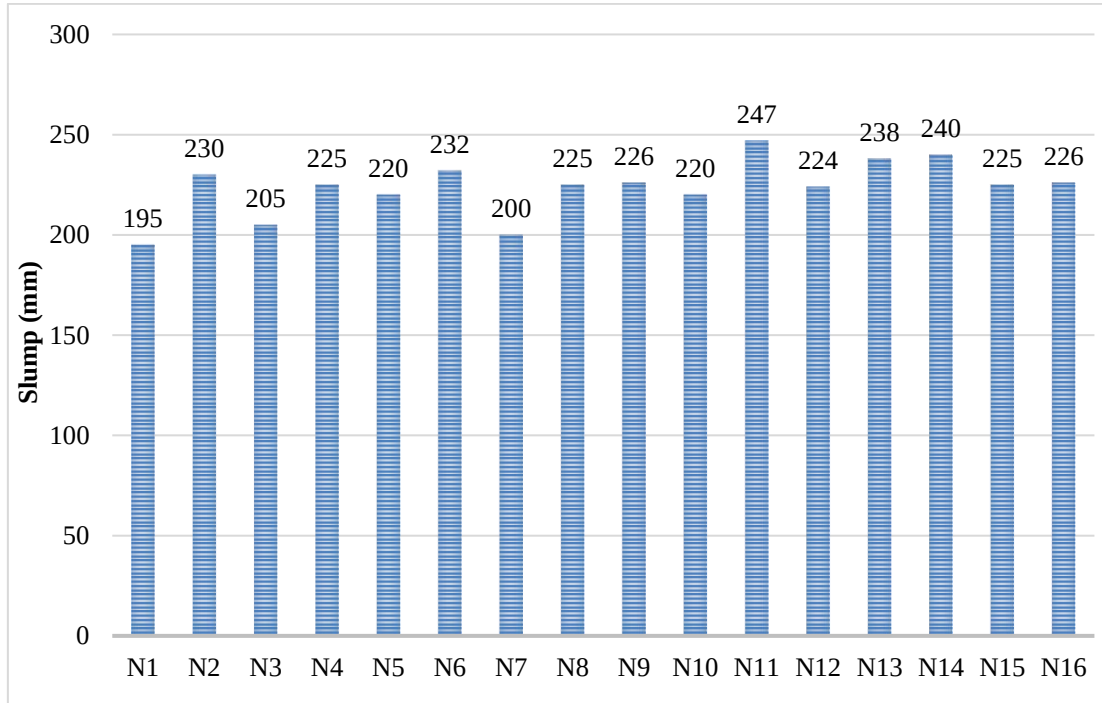
SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO kareler ortalaması

5.2. Çökme (Slump) Deneyi

Geopolimer betonların Slump deneyi sonuçları Şekil 5.3'te gösterildi. Buna göre, slump değerleri 195 mm ile 247 mm arasında geldi. Ancak, bu yüksek slump değerlerine rağmen geopolimer betonların oldukça yüksek kohezyonlu betonlar olduğu gözlemlendi. İşlenebilirlik açısından geopolimer betonların normal portland çimentolu betonlara kıyasla sadece slump değerlerinin kesin bir sonuç vermediği, yüksek slump değerlerinin işlenebilirliği tam olarak yansıtmadığı görüldü. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Zhang ve diğ., 2020 ; Nath ve Sarker, 2014). Bu durumda, slump değerleri için laboratuvar ortamında optimum bir slump değeri (215mm) deneysel gözlemlere dayanarak belirlendi. Bu gözlem sırasında betonun işlenebilir, yüksek kohezyonlu ve segregasyon eğilimi göstermemesine dikkat edildi.

Bununla birlikte, slump değerleri ile priz süreleri arasında belirgin bir uyum olmadığı görüldü. Örneğin en düşük priz sürelerini gösteren 4 ve 8 nolu karışımlar 225 mm ile ortalama slump değerleri gösterirken, en yüksek yüksek slump değerini gösteren 11 nolu karışım ise ortalama bir priz süresi gösterdi. Bu durum kullanılan kaynak malzemelerin reolojisinden, kullanılan yüksek viskoziteli kimyasalların priz sürelerini ve slump değerlerini farklı şekillerde etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

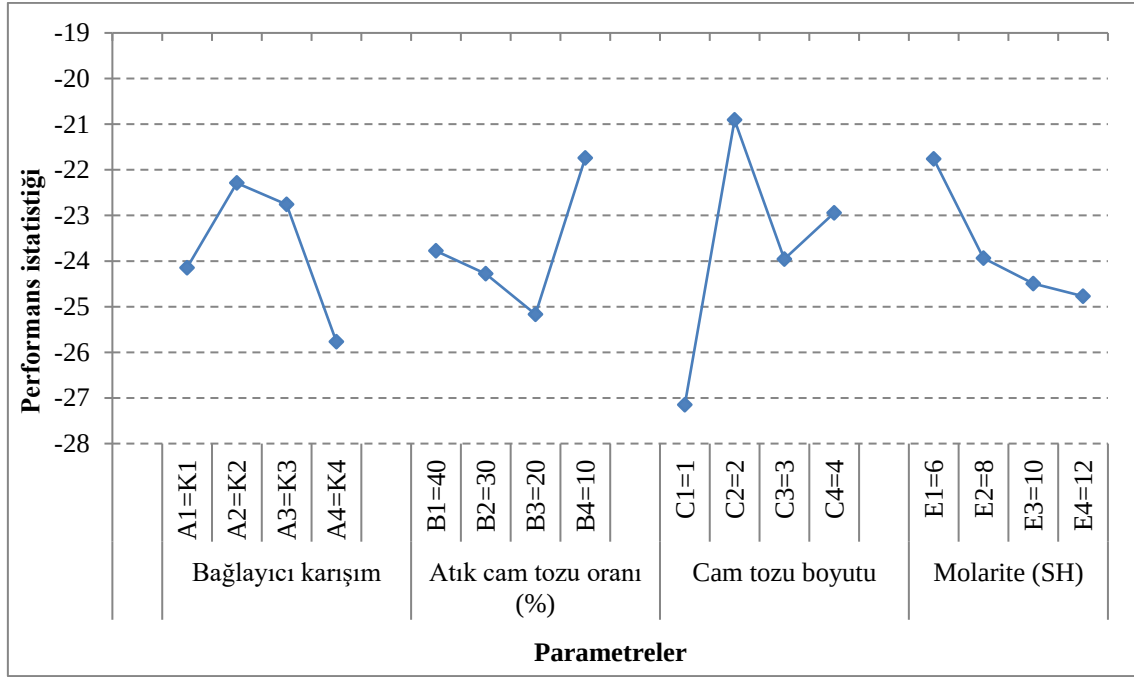
Ek olarak, parametrelerin etkisini farklı bir açıdan incelemek için Taguchi metodu ile “daha büyük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edilen slump sonuçlarına göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması, cam tozu boyutu ve molaritenin (SH) artmasının slump değerlerini arttırdığı, atık cam tozu oranının ise belli bir etkisinin olmadığı görüldü. Literatürde birçok çalışma karışımlardaki ÖYFC/UK oranının artması ile slump değerlerinin düştüğünü bildirmiştir (Deb ve diğ., 2014 ; Nath ve Sarker, 2014 ; Hadi ve diğ., 2017). Bununla birlikte, Prusty ve Pradhan karışımlardaki ÖYFC içeriğinin artması ve SH molaritesinin artması ile slump değerlerinin arttığını göstermiştir (Prusty ve Pradhan, 2020).



Şekil 5.3. Geopolimer betonların slump değerleri

5.2.1. Slump Deneyine Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonun slump değerleri sonuçları Taguchi metodu ile “nominal olan daha iyidir” prensibine göre 215 mm slump değeri nominal değer kabul edilerek optimum parametreler belirlendi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.4’te verildi. Ayrıca, kür sıcaklığının slump sonuçlarına bir etkisi olmadığı için Taguchi tasarım hesaplamasına dahil edilmedi. Taguchi sonuçlarına göre, optimum parametreler A2=K2, B4=10, C2=2, E1=6 olarak bulundu.



Şekil 5.4. Slump değerleri performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.2’de geopolimer beton karışımların slump sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Tablo 5.2 incelendiğinde slump değerlerine etki sırasının yüksekten düşüğe bağlayıcı karışım, (SH) molaritesi, % ACT ve cam tozu boyutu olduğu görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde karışımlarda % 30,72 ile en yüksek etkiyi yapan bağlayıcı karışımın ve % 21,15 ile en yüksek ikinci etkiyi yapan mol oranının değişmesinin slump sonuçlarını önemli oranda değiştirdiği gözlemlendi. Bununla birlikte, tüm parametrelerin P değerleri 0,05 değerinden daha büyük gelmiştir ve bu durumda H_0 hipotezi kabul edilir. Buradan slump deneyi üzerinde; bağlayıcı karışımın, ACT oranının, ACT tozu boyutunun ve SH molaritesinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Tablo 5.2. Slump değeri sonuçları varyans analizi

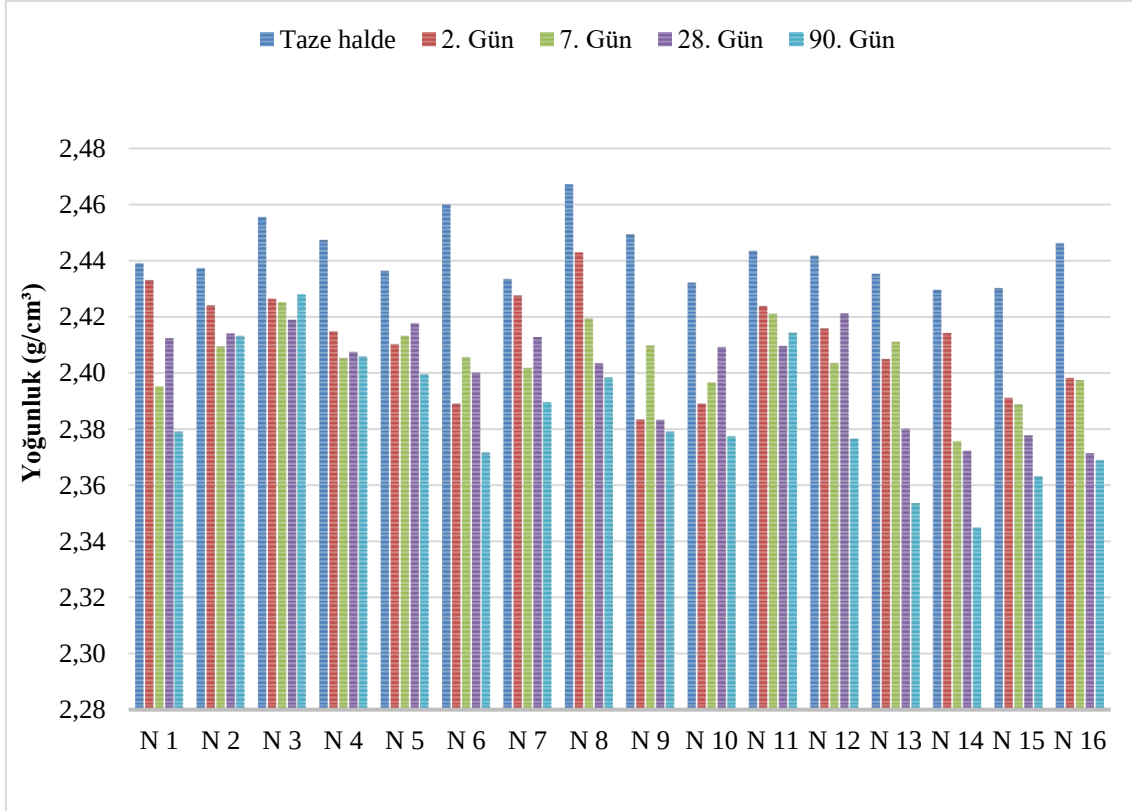
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	890,75	296,92	30,72%	0,88	0,542
% ACT	3	333,25	111,08	11,49%	0,33	0,808
Cam Tozu Boyutu	3	46,25	15,42	1,59%	0,05	0,985
Molarite (SH)	3	613,25	204,42	21,15%	0,60	0,656
Hata	3	1016,25	338,75	35,05%		
Toplam	15	2899,75		100,00%		

5.3. Yoğunluk

Geopolimer betonların taze ve 2., 7., 28. ve 90. gün sertleşmiş yoğunlukları Tablo 5.3'te ve Şekil 5.5'te gösterildi. Buna göre, geopolimer betonların taze haldeki yoğunlukları 2,43 ile 2,47 gr/cm³ arasında olduğu görüldü. Tüm karışımlarda geopolimer betonların kütleme sonrası taze yoğunluğa kıyasla yoğunluklarının düştüğü görüldü. Bununla birlikte, kür sonrası artan yaşla birlikte geopolimer betonların yoğunluklarının genel olarak düştüğü gözlemlendi. Ancak artan yaşla birlikte yoğunlukların arttığı karışımlarda görüldü. Geopolimer reaksiyon sonucu su açığa çıktığı çalışmada daha gösterilmişti. Bu durumda, kütleme sırasında açığa çıkan su miktarı ve artan yaşla birlikte devam eden reaksiyonlar ile su açığa çıkmasının yoğunluğu düşürdüğü düşünülmektedir. Bununla birlikte, devam eden reaksiyonlar sonucu mikro yapının değişmesine bağlı olarak yoğunluklarda artmalar olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, devam eden reaksiyonlar sonucu açığa çıkan suyun ortamı terk edememesi kısmı artışların sebebi olabilir.

Tablo 5.3. Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün sertleşmiş yoğunlukları (gr/cm³)

Deney No	Taze halde	2. Gün	7. Gün	28. Gün	90. Gün
N 1	2,44	2,43	2,40	2,41	2,38
N 2	2,44	2,42	2,41	2,41	2,41
N 3	2,46	2,43	2,43	2,42	2,43
N 4	2,45	2,41	2,41	2,41	2,41
N 5	2,44	2,41	2,41	2,42	2,40
N 6	2,46	2,39	2,41	2,40	2,37
N 7	2,43	2,43	2,40	2,41	2,39
N 8	2,47	2,44	2,42	2,40	2,40
N 9	2,45	2,38	2,41	2,38	2,38
N 10	2,43	2,39	2,40	2,41	2,38
N 11	2,44	2,42	2,42	2,41	2,41
N 12	2,44	2,42	2,40	2,42	2,38
N 13	2,44	2,40	2,41	2,38	2,35
N 14	2,43	2,41	2,38	2,37	2,34
N 15	2,43	2,39	2,39	2,38	2,36
N 16	2,45	2,40	2,40	2,37	2,37

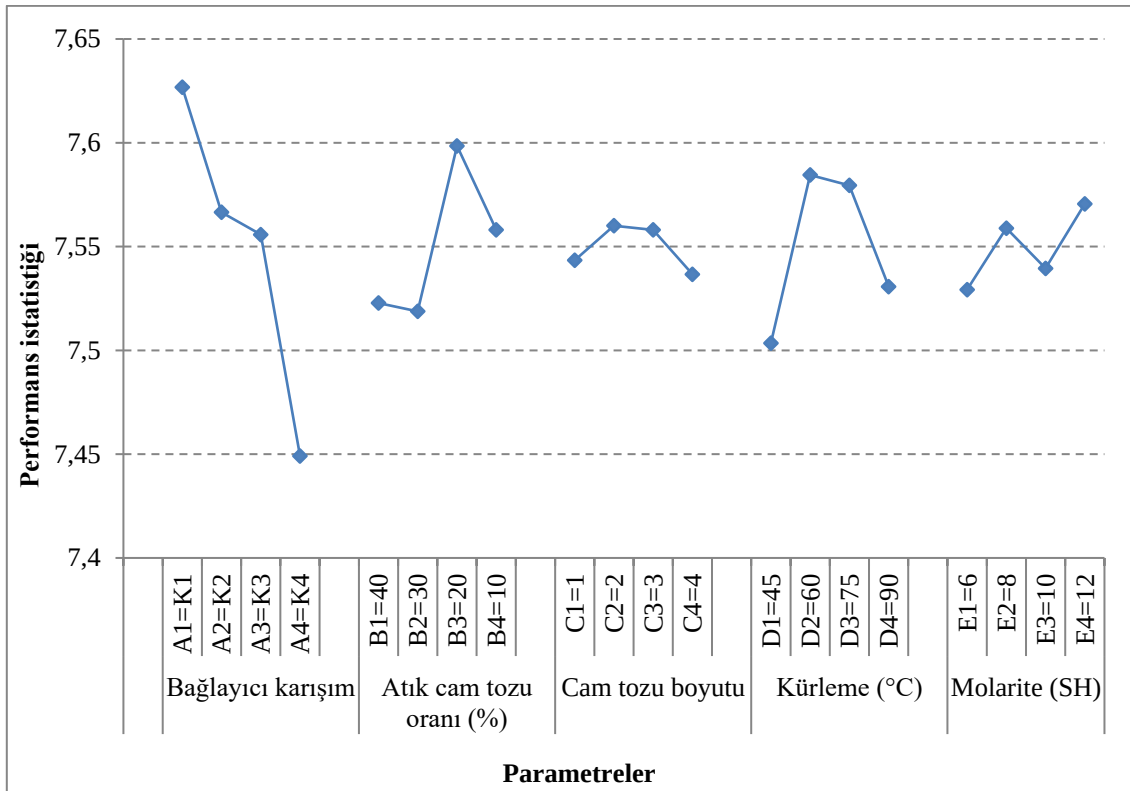


Şekil 5.5. Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün sertleşmiş yoğunlukları

5.3.1. Sertleşmiş Yoğunluk Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların bulunan 90. Gün sertleşmiş yoğunluk değerleri Taguchi metodu ile “daha büyük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.6’da verildi. Karışımlarda optimum parametreler A1=K1, B3=20, C2=2, D3=60, E4=12 olarak bulundu. Buna göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının artması sürekli olarak yoğunluğu arttırırken, diğer parametreler sürekli bir etki göstermedi. SH molaritesinin artması genel olarak yoğunluğu arttırdı. Bununla birlikte, ACT oranı, cam tozu boyutu ve kütleme parametreleri optimum değerler gösterdi. Kütleme sıcaklığının 60 °C’den 75 °C’ye gelmesi kısmı bir düşüş gösterdi, ancak 90 °C’ye gelindiğinde düşme miktarının arttığı görüldü. Çalışmada daha önce geopolimer reaksiyonda Ca^{+} ve Na^{+} iyonlarının bir miktar iç su tuttuğu açıklanmıştı. Buradan reaksiyon için gerekli olan az miktardaki suyu yüksek sıcaklık etkisi ile açığa çıkarttı düşünülebilir. Bununla birlikte bir miktar geopolimer jelin yüksek sıcaklık etkisiyle eridiği söylenebilir. Düşük sıcaklıklarda ise geopolimer reaksiyonun tam olarak

gerçekleşmediği böylece yoğunluğun düştüğü tahmin edilmektedir. Buradan, kürlenme sıcaklığının optimum bir değere sahip olduğu düşük ve yüksek kürlenme sıcaklıklarının geopolimer beton yoğunluğu üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bulunan sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile kıyaslandığında benzer sonuçlarla karşılaşıldı. Annakoa, ÖYFC, UK ve CT ile yaptığı çalışmada CT/ÖYFC oranının artmasıyla yoğunluğun genel olarak arttığını, en yüksek yoğunluk sonuçlarının %10 CT oranında geldiğini bildirmiştir (Annakoa, 2019). Şinik, geopolimer beton üzerine yapmış olduğu çalışmada en yüksek yoğunluk sonuçlarını 70 °C kürlenme sıcaklığında bulmuştur (Şinik, 2019).



Şekil 5.6. 90. gün sertleşmiş yoğunluk performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.4'te geopolimer beton karışımların 90. Sertleşmiş yoğunluk sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, bağlayıcı karışım, Kürlenme sıcaklığı, %ACT, Molarite (SH), Cam tozu boyutu olarak bulundu. En yüksek etkiyi %61,47 ile bağlayıcı karışımın yaptığı görüldü. Bu etkinin bağlayıcı karışım içerisindeki ÖYFC ve UK malzemelerinin özgül ağırlıklarından kaynaklandığı düşünüldü. En yüksek ikinci etkiyi ise %17,39 ile kürlenme sıcaklığının yaptığı görüldü. Kürlenme sıcaklığının reaksiyonu ve su çıkışını doğrudan

etkilemesi bu parametrenin önemini göstermektedir. En yüksek üçüncü etkiyi % 15,61 ile ACT oranı yapmakta, bu durum diğer kaynak malzemelere benzer şekilde özgül ağırlık ile açıklanabilir. Ayrıca, yoğunluk sonuçlarına cam tozu boyutunun ve mol oranı değişimlerinin önemli bir etki yapmadığı görüldü.

Tablo 5.4. 90. Sertleşmiş yoğunluk varyans Analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	0,004937	0,001646	61,47%	*	*
% ACT	3	0,001254	0,000418	15,61%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	0,000119	0,000040	1,48%	*	*
Kürleme (°C)	3	0,001397	0,000466	17,39%	*	*
Mol Oranı (SH)	3	0,000324	0,000108	4,04%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	0,008031		100,00%		

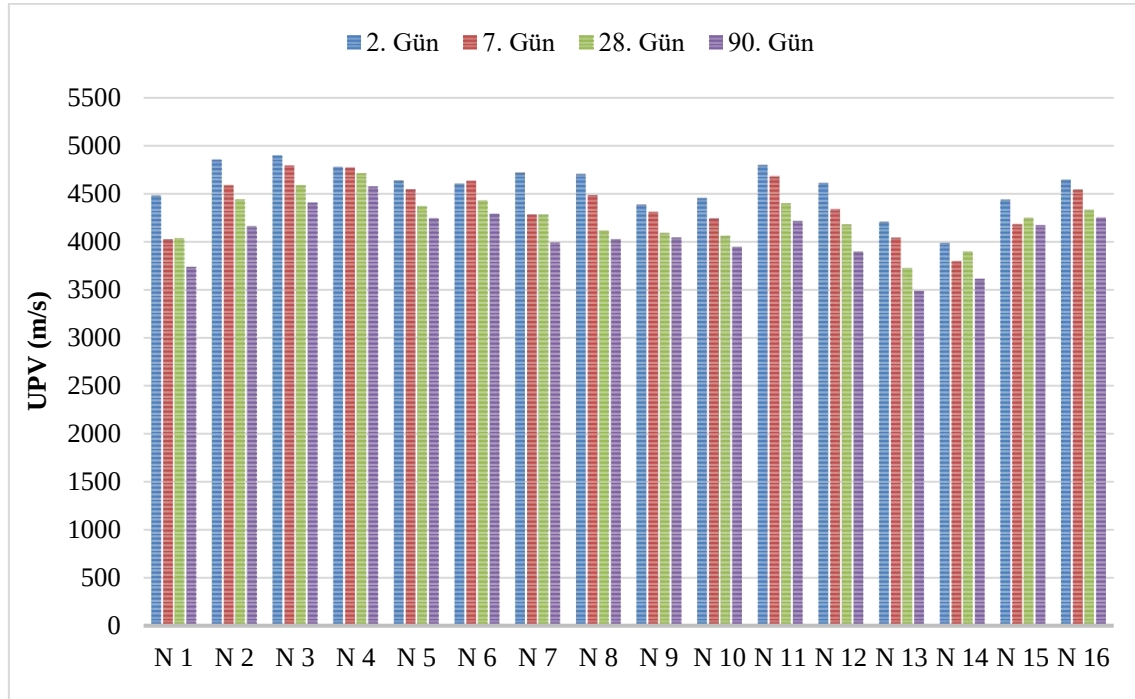
5.4. Ultrases Geçiş Hızı

Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün UPV(m/s) Tablo 5.5’te ve Şekil 5.7’de gösterildi. Buna göre, 2. Gün UPV (m/s) sonuçları 3986,7 ile 4893,9 arasında, 7. Gün UPV (m/s) sonuçları 3795,4 ile 4788,8 arasında, 28. Gün UPV(m/s) sonuçları 3727,4 ile 4713,9 arasında, 90. Gün UPV (m/s) sonuçları 3487,9 ile 4574,8 arasında bulundu. Bununla birlikte, artan yaşla birlikte genel olarak UPV (m/s) değerlerinin düştüğü gözlemlendi. Ancak artan yaşla birlikte UPV (m/s) değerlerinin arttığı karışımlarda gözlemlendi. Geopolimer betonun UPV (m/s) değerleri ile yoğunluk değerlerinin benzer eğilimleri gösterdiği gözlemlendi.

Ek olarak, geopolimer betonun ultrasonik darbe hızına dayalı beton sınıflandırmasına göre, 2 günde 14 nolu karışım “tartışmalı” sınıfında yer alırken diğer 15 karışımın “iyi-mükemmel” sınıfında yer aldığı görüldü. Ayrıca artan yaşla birlikte geopolimer betonların büyük oranının “iyi” sınıfında yer aldığı gözlemlendi. Spesifik olarak, 90. günde 13 ve 14 nolu karışımlar “tartışmalı” sınıfına girerken, diğer tüm karışımlar “iyi” sınıfında yer aldığı gözlemlendi (Solis-Carcaño ve Moreno, 2008).

Tablo 5.5. Geopolimer betonların taze halde ve 2., 7., 28. ve 90. gün UPV(m/s) sonuçları

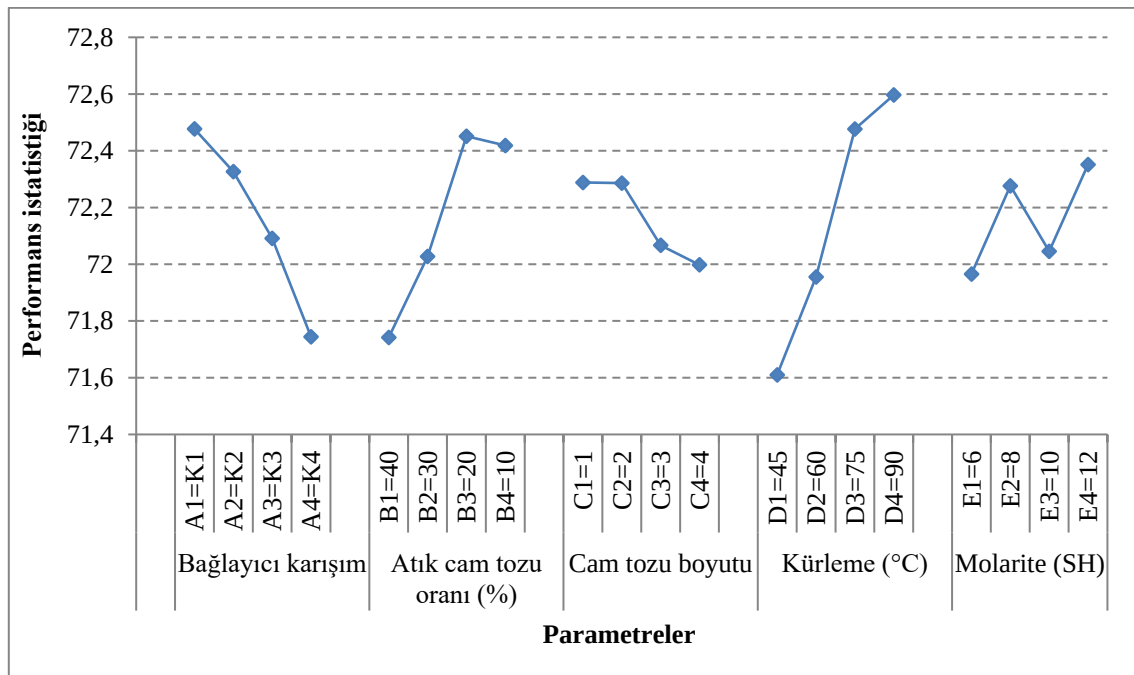
Deney No	2. Gün UPV(m/s)	7. Gün UPV(m/s)	28. Gün UPV(m/s)	90. Gün UPV(m/s)
N 1	4478,1	4021,6	4037,8	3737,5
N 2	4851,8	4583,8	4441,6	4161,5
N 3	4893,9	4788,8	4588,1	4406,2
N 4	4773,8	4767,9	4713,9	4574,8
N 5	4634,2	4542,7	4370,6	4244,0
N 6	4601,5	4629,8	4430,5	4290,0
N 7	4717,1	4280,4	4284,8	3992,4
N 8	4702,3	4481,4	4119,0	4024,5
N 9	4383,0	4307,6	4093,7	4043,2
N 10	4451,5	4238,1	4062,7	3945,2
N 11	4796,2	4677,5	4402,1	4216,8
N 12	4608,9	4335,7	4181,5	3896,1
N 13	4204,8	4040,4	3727,4	3487,9
N 14	3986,7	3795,4	3902,4	3614,6
N 15	4434,7	4177,8	4250,6	4171,3
N 16	4640,4	4538,9	4335,5	4250,8



Şekil 5.7. Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün UPV (m/s) değerleri

5.4.1. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların bulunan 90. Gün UPV (m/s) değerleri Taguchi metodu ile “daha olan büyük daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.8’de verildi. Karışımlarda optimum parametreler A1=K1, B3=20, C1=1, D4=90, E4=12 olarak bulundu. Buna göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının ve kürlleme sıcaklığının artması ile UPV değerlerinin arttığı, cam tozu boyutunun büyümesi ile UPV (m/s) değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Ek olarak, ACT oranının düşmesi UPV (m/s) değerlerini arttırmakta, ancak %20 ACT oranının %10 ACT oranına göre daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Bununla birlikte, SH molaritesinin artması genel olarak UPV (m/s) değerlerini arttırmakta, ancak molaritenin değişmesi ile belirgin bir değişiklik görülmedi. Spesifik olarak, 6 molden 8 mole gelindiğinde UPV (m/s)’nin arttığı, 8 molden 10 mole gelindiğinde UPV’nin azaldığı, 10 molden 12 mole gelindiğinde UPV (m/s)’nin tekrar arttığı görüldü. Ayrıca, karışımlara etki eden parametrelerin fiziksel özelliklerine kıyasla parametrelerin geopolimer reaksiyon sürecine etkileri, UPV (m/s) sonuçları üzerinde daha belirgin bir rol oynadığı gözlemlendi. Örneğin yüksek yoğunluğa sahip ÖYFC’nin karışımlardaki içeriğinin artması ile UPV (m/s) değerleri artmış, fakat etki yüzdesi açısından kürlleme sıcaklığının gerisinde kalmıştır.



Şekil 5.8. 90. gün UPV (m/s) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.6’da geopolimer beton karışımların 90. UPV (m/s) sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, Kırılma sıcaklığı, %ACT, bağlayıcı karışım, Mol oranı (SH), Cam tozu boyutu olarak bulundu. Spesifik olarak, UPV sonuçlarına en yüksek etkiyi sırasıyla %44,50 ile kırılma, %23,04 ile ACT oranı, %21,02 ile bağlayıcı karışım parametresi olarak görüldü.

Bu parametrelerin UPV sonuçlarına etkisi geopolimer reaksiyon oluşumu üzerine etkisi ile açıklanabilir. Artan kırılma sıcaklıklarının, artan ÖYFC/UK oranının ve azalan ACT oranının genel olarak geopolimer reaksiyonu oluşumunu olumlu yönde etkilediği görüldü. Yoğunluk değerlerinin aksine bağlayıcı karışımın etkisi önemli oranda düşmekte, kaynak malzemelerin fiziksel özelliklerinin etkisinden daha çok geopolimer reaksiyon oluşumunun etkisi daha net bir şekilde gözlemlendi.

Tablo 5.6. 90. gün UPV (m/s) sonuçları varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	258695	86232	21,02%	*	*
% ACT	3	283557	94519	23,04%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	49335	16445	4,01%	*	*
Kırılma (°C)	3	547592	182531	44,50%	*	*
Mol Oranı (SH)	3	91308	30436	7,42%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1230487		100,00%		

5.5. Basınç Dayanımı

Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım deneyi sonuçları Tablo 5.7’de ve Şekil 5.9’da gösterildi. Buna göre, 2. Gün basınç dayanım sonuçları 14,1 MPa ile 48,2 MPa arasında, 7. Gün basınç dayanım sonuçları 18,4 MPa ile 53,7 MPa arasında, 28. Gün basınç dayanım sonuçları 21,0 MPa ile 51,3 MPa arasında, 90. Gün basınç dayanım sonuçları 18,9 MPa ile 49,4 MPa arasında bulundu. Artan yaşla birlikte 28. güne kadar basınç dayanım değerlerinin arttığı 90. güne gelindiğinde ise basınç dayanımlarında

düşmeler olduğu gözlemlendi. 90. Gün basınç dayanım sonuçları genellikle 2. Gün basınç dayanımına yakın geldiği gözlemlendi. Buradan 7. ve 28. günlerde reaksiyonun devam ederek basınç dayanımını arttırdığı sonraki günlerde ise geopolimer reaksiyon ürünlerinde faz değişimlerine bağlı olarak basınç dayanımlarında düşmeler meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat kullanımı, kürlenme sıcaklığı uygulaması ve farklı kaynak malzemelerin kullanımı basınç dayanımındaki bu değişimleri etkileyen parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde artan yaşla beraber basınç dayanımındaki değişimler mikro yapı yönünden incelenmiş ve farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Dehghani ve diğ., geopolimer beton numunelerinin mikro yapısı incelemiş, numunelerin XRD desenlerinin benzer olduğunu, fakat amorf bölgelerdeki atomların arasındaki kimyasal bağların farklı olabileceğini ve bu durumun malzemenin özelliklerini değiştirebileceğini bildirilmiştir. Ayrıca çalışmada yapılan XRD ve FTIR analizleri sonucunda, en yüksek dayanımı veren geopolimer beton numunenin yapısının yaklaşık %82'sinin amorf olduğunu ve alüminyum iyonlarının silisyum iyonlarıyla bağlanarak güçlü bir geopolimer jel oluşturduğunu gösterilmiştir (Dehghani ve diğ., 2021).

Ma ve diğ., UK ve UK/ÖYFC bazlı geopolimerlerin mikroyapı değişimlerinin basınç dayanımlarına olan etkisini incelemiş, özellikle sodyum silikat ile aktive edilen geopolimer numunelerin basınç dayanım gelişimlerinin daha karmaşık olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, geopolimer reaksiyon sonucu oluşan amorf jellerin düzenli yapılara veya kristalin zeolitlere geçişinin mikroyapısal değişikliğe ve iç gerilmeye neden olduğunu, böylece geopolimer numunelerde dayanım kayıpları görüldüğünü bildirmiştir. Ayrıca, kapalı kapta kürlenmiş numunelerin kuruma büzülmesinin çok düşük olduğu, büzülme kaynaklı dayanım kaybının olmayacağını, gözenek boyutu değişiminin mukavemeti önemli oranda etkilemediği ve dayanım kaybının olası nedeninin faz geçişi olduğunu açıklanmıştır. Bununla birlikte çalışmada, mikroyapıdaki kristalleşmenin, NaOH ile aktive edilmiş geopolimerlerde sodyum silikat ile aktive edilmiş geopolimerlere kıyasla mukavemet kararlılığı üzerinde zararlı bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir (Ma ve diğ., 2016). Bunun yanı sıra, geopolimer jeldeki amorf reaksiyon ürünlerinin daha sağlam yapılı olduğu, kristal yapıların ise oldukça kırılgan olduğu bildirilmiştir (Ozer ve Soyer-Uzun, 2015 ; Mo ve diğ., 2018).

Bu sonuçların aksine literatürde, geopolimer mikroyapısındaki kristalleşmenin dayanıma çok az negatif etkisi olduğu, hatta dayanım üzerinde olumlu etkileri olduğunu bildiren çalışmalarda mevcuttur (Llyod, 2009 ; Álvarez-Ayuso ve diğ., 2008 ; Topçu ve diğ., 2014 ; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

Lloyd, metakaolin bazlı geopolimerlerde amorf yapının kristalleşmesi ile bağlayıcı yapının yoğunlaşarak büyük gözenekli yapıların oluştuğunu böylece kristalleşmenin dayanım üzerine olumsuz etkilerinin oldukça yüksek olduğunu, UK bazlı geopolimerlerde ise kristalleşmenin dayanım üzerine çok az veya hiç etkisinin olmadığını bildirmiştir. Bu durum uçucu külün yavaş reaksiyonu ile açıklanmıştır. Reaksiyon hızındaki bu yavaşlık birincil jel oluşumu ile zeolit kristalleşmesi arasında önemli bir uyuma yol açarak kristalleşmenin olumsuz etkilerinin engellediği ifade edilmiştir (Llyod, 2009).

Ayrıca, UK bazlı geopolimerlerin gözenekli yapısının faz geçişinin daha serbest bir şekilde gerçekleşmesine izin verdiği belirtilmiştir. Gözenekli yapı, matrisin faz geçişine uyum sağlamasını kolaylaştırabilir ve daha iyi bir dayanım sonucu elde edilmesini sağlayabilir (Ma ve diğ., 2016)

Ek olarak, geopolimer betonun basınç dayanım gelişimi üzerine literatür incelemesi geliştirildiğinde, kürlleme yapılan geopolimer betonların ortam sıcaklığında bırakılan betonlara kıyasla, basınç dayanım gelişimlerinin daha karmaşık olduğu, genellikle kürlleme yapılan betonlarda artan yaşla birlikte basınç dayanımlarında bir miktar düşmeler olduğu görülmüştür. Bu durum ortam sıcaklığında kürlenmiş geopolimer beton numunelerde reaksiyonun daha yavaş ve stabil ilerlemesinin bir sonucu olabilir (Lloyd, 2009 ; Noushini ve diğ., 2020 ; Mo ve diğ., 2018)

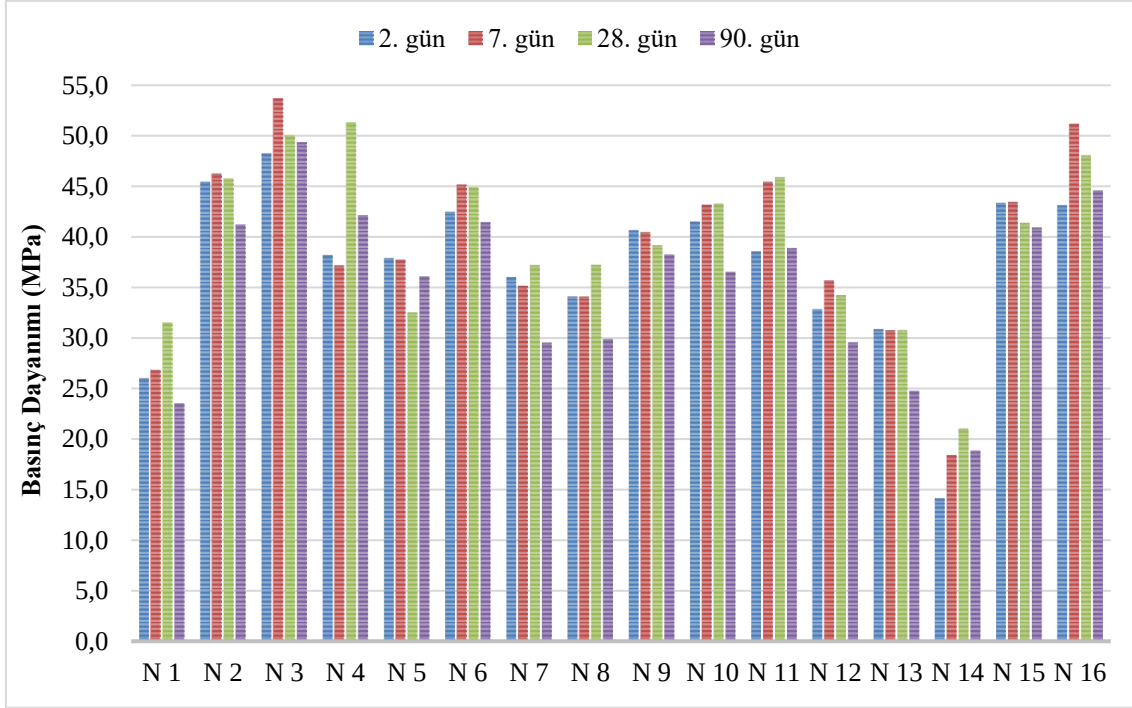
Buna göre, tüm geopolimerler reaksiyonlarda belirli seviyelerde faz geçişi olacağı açıktır. Faz geçişinin ne kadar ve ne hızda gerçekleşeceği, bunun performans kaybına etkisinin ne yönde olacağı kesin olarak bilinmemektedir.

Geopolimer beton dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımları 3 nolu karışımda 2., 7. ve 90. günlerde sırasıyla 48,2, 53,7 ve 49,4 MPa olarak, 28. günde ise en yüksek dayanım 4 nolu karışımda 51,29 MPa olarak bulundu. En düşük basınç

dayanımları 2., 7., 28. ve 90. günlerde 14 nolu karışımda sırasıyla 14,1, 18,4, 21,0 ve 18,9 MPa olarak bulundu.

Tablo 5.7. Geopolimer betonun 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım sonuçları

Deney No	2. gün (MPa)	7. gün (MPa)	28. gün (MPa)	90. gün (MPa)
N 1	26,0	26,8	31,5	23,5
N 2	45,4	46,3	45,8	41,2
N 3	48,2	53,7	50,0	49,4
N 4	38,2	37,2	51,3	42,1
N 5	37,9	37,8	32,5	36,1
N 6	42,5	45,2	44,9	41,4
N 7	36,0	35,1	37,2	29,5
N 8	34,1	34,1	37,2	29,9
N 9	40,7	40,5	39,1	38,2
N 10	41,5	43,2	43,3	36,5
N 11	38,5	45,4	45,9	38,9
N 12	32,8	35,7	34,2	29,5
N 13	30,9	30,7	30,8	24,8
N 14	14,1	18,4	21,0	18,9
N 15	43,3	43,4	41,4	40,9
N 16	43,1	51,2	48,1	44,6



Şekil 5.9. Geopolimer betonların 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) değerleri

5.5.1. Basınç Dayanım Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların bulunan 2., 7., 28. ve 90. Gün basınç dayanım (MPa) değerleri Taguchi metodu ile “daha büyük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.10’da verildi. Karışımlarda optimum parametreler 2. Gün için A1=K1, B3=20, C2=2, D3=75, E2=8, 7. Gün için A3=K3, B3=20, C1=1, D3=75, E2=8, 28. Gün için A1=K1, B3=20, C1=1, D4=90, E2=8, 90. Gün için A1=K1, B3=20, C2=2, D3=75, E2=8 şeklinde bulundu. Buna göre, karışımlarda genel olarak ÖYFC/UK oranının artması ile basınç dayanımlarının arttırdığı, cam tozu oranının %20 oranına kadar artmasının basınç dayanımını arttırdığı, genel olarak cam tozu boyutu küçülmesi basınç dayanımlarını arttırdığı gözlemlendi.

Bununla birlikte kürlleme ve SH molarite parametrelerinin daha net sonuçlar gösterdiği, kürlleme sıcaklığının 75 °C’ye kadar dayanımı arttırdığı, SH molaritesinin ise 8 mole kadar dayanımı arttırdığı gözlemlendi.

Karışımlardaki ÖYFC oranının artması ile artan basınç dayanımı literatürdeki diğer çalışmalarda da gösterilmiştir (Nath ve Sarker, 2014). Bu durum, ÖYFC’nin yüksek

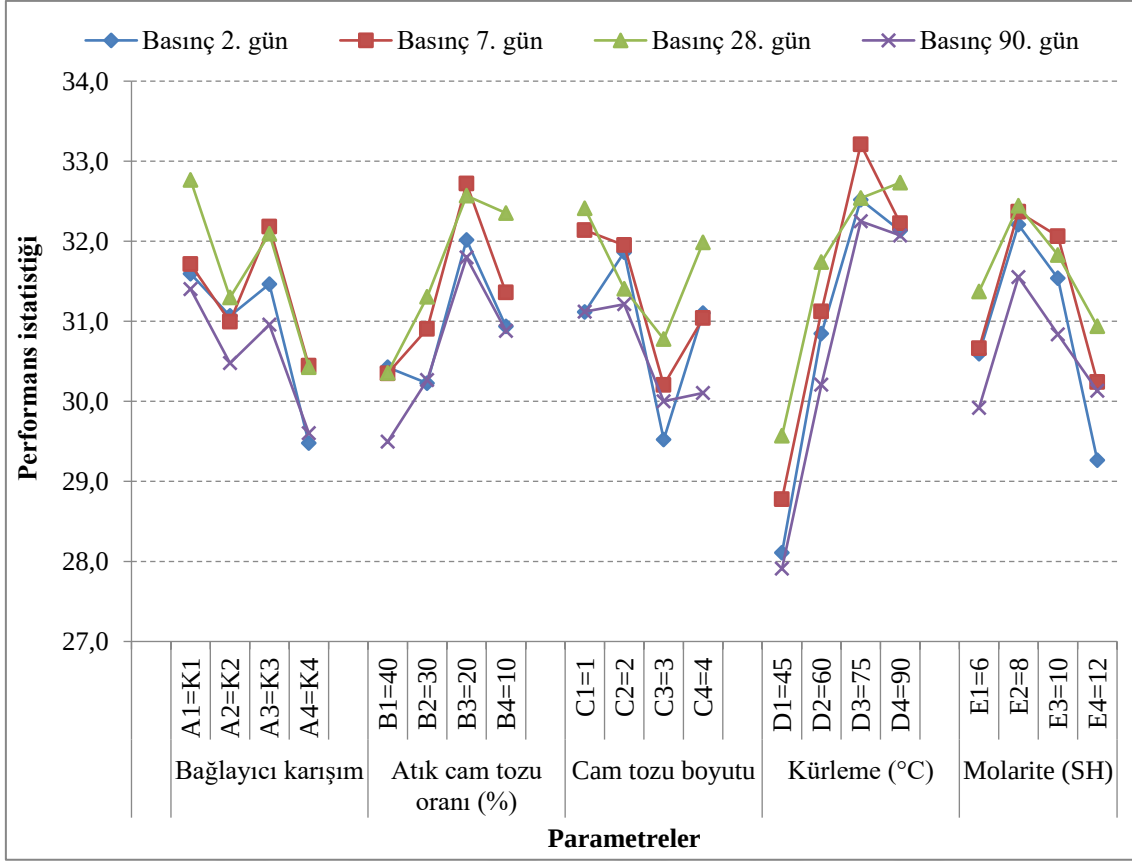
reaksiyon aktivitesi ve geopolimer reaksiyonun derecesini arttıran Ca^+ bazlı reaksiyon ürünlerinin (C-A-S-H) oluşumunu sağlaması ile açıklanmıştır (Fang ve diğ., 2018; Bobirica ve diğ., 2015).

Karışımlardaki ACT ve SH molaritesinin bir optimum değer göstermesi, belirli bir seviyeden sonra geopolimer reaksiyon oluşumuna olumsuz etki yaptığı görülmektedir. Özellikle molaritenin belirli bir seviyenin üstüne çıkması ile basınç dayanımlarına meydana gelen düşmeler, geopolimer sistemdeki yüksek alkalinin reaksiyon oluşumunu engellediği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca ACT içerisindeki nispeten yüksek oranda bulunan Na^+ ve Ca^+ elementlerinin de sisteme dahil olması ile bu durum daha belirgin hale gelmektedir. Benzer sonuçlar ve yorumlamalar literatürdeki diğer çalışmalarda bildirilmiştir (Dadsetan ve diğ., 2021 ; Xiao ve diğ., 2020). Bunun yanı sıra, atık cam tozu içeriğindeki yüksek miktardaki silisyumun geopolimer sistemin Si/Al oranını arttırdığı, böylece basınç dayanımlarını düşürdüğü bildirilmiştir (Tho-In ve diğ., 2018 ; Bobirica ve diğ. 2015).

Kürleme sıcaklıklarının belirli bir seviyeye kadar artması ile basınç dayanımlarındaki meydana gelen artışlar, yüksek sıcaklıkların geopolimer reaksiyon oluşumunu arttırması ile açıklanabilir. Kürleme sıcaklığının $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den sonra basınç dayanımına olan olumsuz etkisi ise yüksek sıcaklıklarda uzun süre kürlenmenin geopolimer mikroyapısını zayıflatarak basınç dayanım düşmesine sebep olması ile açıklanmıştır (Noushini ve diğ., 2020 ; Noushini ve Castel, 2016). 28. Gün basınç dayanım sonuçlarına göre kürleme sıcaklığının $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ çıkması kısmi bir artışla sonuçlandı.

Farklı bir yaklaşım olarak, tüm basınç deneyleri birlikte incelendiğinde, tüm yaşlar için, basınç dayanım optimum parametrelerinin $A1=K1$, $B3=20$, $C2=2$, $D3=75$, $E4=8$ şeklinde olabileceği söylenebilir.

Tablo 5.8'de geopolimer beton karışımların 2., 7., 27. ve 90. Basınç dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçları optimum parametrelerdeki karışıklığa bir açıklık getirebilir. Örneğin, optimum parametrelerdeki daha net sonuçlar veren kürleme sıcaklığı, ACT oranı ve SH molaritesi parametrelerinin diğer parametrelere kıyasla daha yüksek etki yaptığı gözlemlendi.



Şekil 5.10. 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Bununla birlikte, molar oranların değişmesine bağlı olarak geopolimerizasyonun olumsuz etkilendiği, basınç dayanımlarında böyle bir durum gerçekleştiği düşünülebilir. Ancak bu durum, karışımların molar oranlarından net olarak anlaşılamamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir önemli konu, literatür ve deneme dökümlerinde net şekilde görülen basınç dayanım gelişimine önemli katkısı olan ÖYFC/UK oranının buradaki az etkisidir. Bunun nedeni, çalışmadaki ÖYFC/UK oranının %80:%20'den %50:%50 oranına kadar nispeten küçük oranlarda değişmesidir.

2. gün basınç dayanımlarına en yüksek etki yüksekten düşüğe sırasıyla kürlenme sıcaklığı, SH molaritesi, ACT oranı, bağlayıcı karışım, cam tozu boyutu şeklinde bulundu. En yüksek etkiyi %55,15 ile kürlenme sıcaklığı, en yüksek ikinci etkisi ise %17,04 ile mol oranında görüldü. Ayrıca, optimum parametreler grafiğinde nispeten daha karmaşık sonuçlar gösteren bağlayıcı karışım ve cam tozu boyutunun etkileri sırasıyla %9,68 ve %6,09 ile en düşük değerleri gösterdi. Bununla birlikte kürlenme sıcaklığındaki küçük değişimlerin önemli basınç dayanım değişimine neden olduğu gözlemlendi.

7. gün basınç dayanımlarına en yüksek etki yüksekten düşüğe sırasıyla kütleme sıcaklığı, ACT oranı, SH molaritesi, cam tozu boyutu ve bağlayıcı karışım şeklinde bulundu. En yüksek etkiyi %52,55 ile kütleme sıcaklığı, en yüksek ikinci etkisi ise %18,17 ile ACT oranının yaptığı görüldü. Basınç dayanımlarında 7. Güne gelindiğinde molaritenin etkisinin kısmı oranda azaldığı, ACT oranının ise arttığı görüldü. Kütleme sıcaklığının ise en yüksek etkiyi yapmaya devam ettiği görüldü.

28.gün basınç dayanımlarına en yüksek etki yüksekten düşüğe sırasıyla kütleme sıcaklığı, ACT oranı, bağlayıcı karışım, cam tozu boyutu, SH molaritesi şeklinde bulundu. En yüksek etkiyi %43,28 ile kütleme sıcaklığı, en yüksek ikinci etkisi ise %25,10 ile ACT oranının yaptığı görüldü. Basınç dayanımlarında 28. Güne gelindiğinde SH molaritesinin nispeten önemsiz bir etki yüzdesine düştüğü, ACT oranının ve bağlayıcı karışımın önemli etki yüzdelere yükseldiği gözlemlendi. Kütleme sıcaklığının etki yüzdesinin düşmesi ile optimum sıcaklığın 90 °C gelmesi arasında bir ilişki kurulabilir.

90. gün basınç dayanımlarına en yüksek etki yüksekten düşüğe sırasıyla kütleme sıcaklığı, ACT oranı, bağlayıcı karışım, SH molaritesi, cam tozu boyutu şeklinde bulundu. En yüksek etkiyi % 63,50 ile kütleme sıcaklığı, en yüksek ikinci etkisi ise % 18,17 ile ACT oranının yaptığı görüldü. bağlayıcı karışım, cam tozu boyutu ve SH molaritesinin önemsiz etki yüzdeleri (%10'un altında) gösterdiği görüldü. 7 ve 28. Güne kıyasla mol oranındaki kısmi artışa rağmen SH molaritesinin erken dayanım için daha önemli olduğu sonucuna varılabilir.

Ayrıca, basınç dayanım sonuçlarına göre birbirine daha yakın sonuçlar veren 2. Gün ve 90. Gün, 7. ve 28. gün basınç dayanımlarının varyans analizi sonuçlarının yakın gelmesi, basınç dayanım sonuçlarını etkileyen mikro yapı faz değişimlerinin varyans analizlerini de etkilediği düşünülebilir.

Literatürdeki genel bilginin aksine, karışımların Si/Al oranı ile basınç dayanım sonuçları arasında bir uyum görülmedi. Örneğin en yüksek dayanım sonuçlarını veren 3 nolu karışımın Si/Al oranı 3,49, en düşük basınç dayanım sonuçlarını veren 14 nolu karışımın ise Si/Al oranı 3,69 olarak birbirine yakın değerler şeklinde bulundu. Bu durum karışımlarda kullanılan kaynak malzemelerin basınç dayanımına olan toplam etki yüzdelere diğer parametrelere kıyasla daha düşük gelmesi ile açıklanabilir.

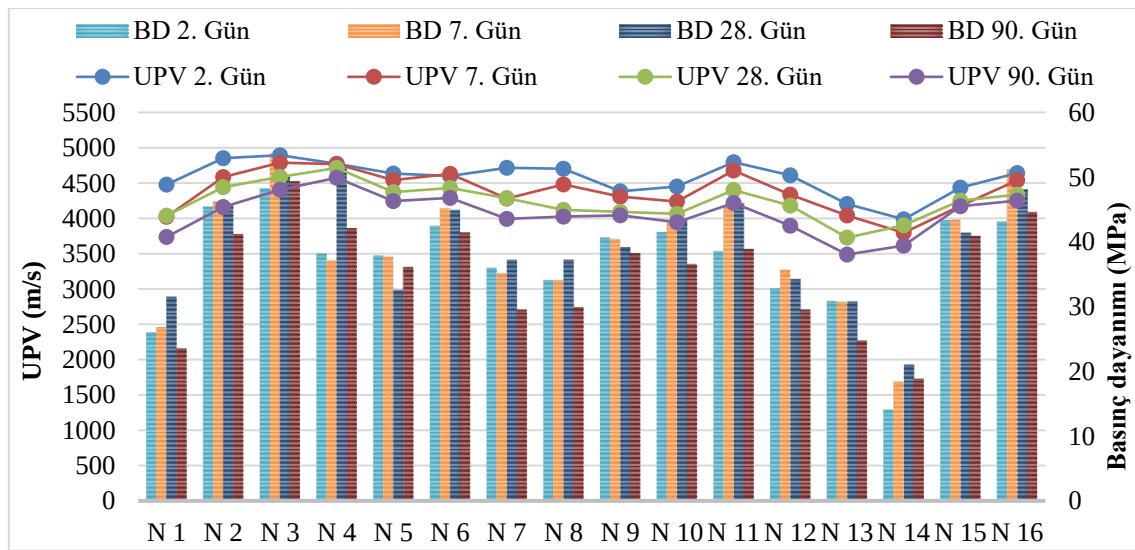
Tablo 5.8. Geopolimer beton karışımların 2., 7., 27. ve 90. basınç dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları

2. Gün Basınç Değerleri Varyans Analizi						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	101,74	33,91	9,68%	*	*
% ACT	3	126,56	42,19	12,04%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	64,01	21,34	6,09%	*	*
Kürleme (°C)	3	579,84	193,28	55,15%	*	*
Molarite (SH)	3	179,19	59,73	17,04%	*	*
Hata	0	*	*	*	*	
Toplam	15	1051,34		100,00%		
7. Gün Basınç Değerleri Varyans Analizi						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	75,89	25,30	6,17%	*	*
% ACT	3	223,62	74,54	18,17%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	98,16	32,72	7,97%	*	*
Kürleme (°C)	3	646,86	215,62	52,55%	*	*
Molarite (SH)	3	186,33	62,11	15,14%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1230,85		100,00%		
28. Gün Basınç Değerleri Varyans Analizi						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	190,66	63,55	18,73%	*	*
% ACT	3	255,50	85,17	25,10%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	75,03	25,01	7,37%	*	*
Kürleme (°C)	3	440,61	146,87	43,28%	*	*
Molarite (SH)	3	56,18	18,73	5,52%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1017,99		100,00%		
90. Gün Basınç Değerleri Varyans Analizi						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	98,45	32,82	9,17%	*	*
% ACT	3	171,18	57,06	15,95%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	46,74	15,58	4,35%	*	*
Kürleme (°C)	3	681,69	227,23	63,50%	*	*
Molarite (SH)	3	75,50	25,17	7,03%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1073,56		100,00%		

5.6. Basınç Dayanımı İle Ultrases Geçiş Hızı Arasındaki İlişki

Geopolimer betonların basınç dayanımları ile UPV (m/s) arasındaki ilişki Şekil 5.11’de gösterildi. Buna göre, basınç dayanımı ile UPV (m/s) arasında bir ilişki olduğu söylenebilir. 2. ve 7. Günlerde en yüksek basınç dayanımını gösteren 3 nolu karışım aynı zamanda en yüksek UPV (m/s) değerini gösterdi. Benzer şekilde en düşük basınç dayanımını gösteren 14 nolu karışım en düşük UPV (m/s) değerini gösterdi. 28. Günde en yüksek ve en düşük basınç dayanımı ve UPV (m/s) değerini gösteren karışımlar sırasıyla 4 nolu ve 14 nolu karışımlar olarak gözlemlendi. 90. Güne gelindiğinde ise en yüksek basınç dayanımı 3 nolu karışımında görülmesine rağmen en yüksek UPV (m/s) değeri az bir farkla 4 nolu karışımında görüldü. 90. Gün en düşük basınç dayanım ve UPV (m/s) değeri yine 14 nolu karışımında görüldü.

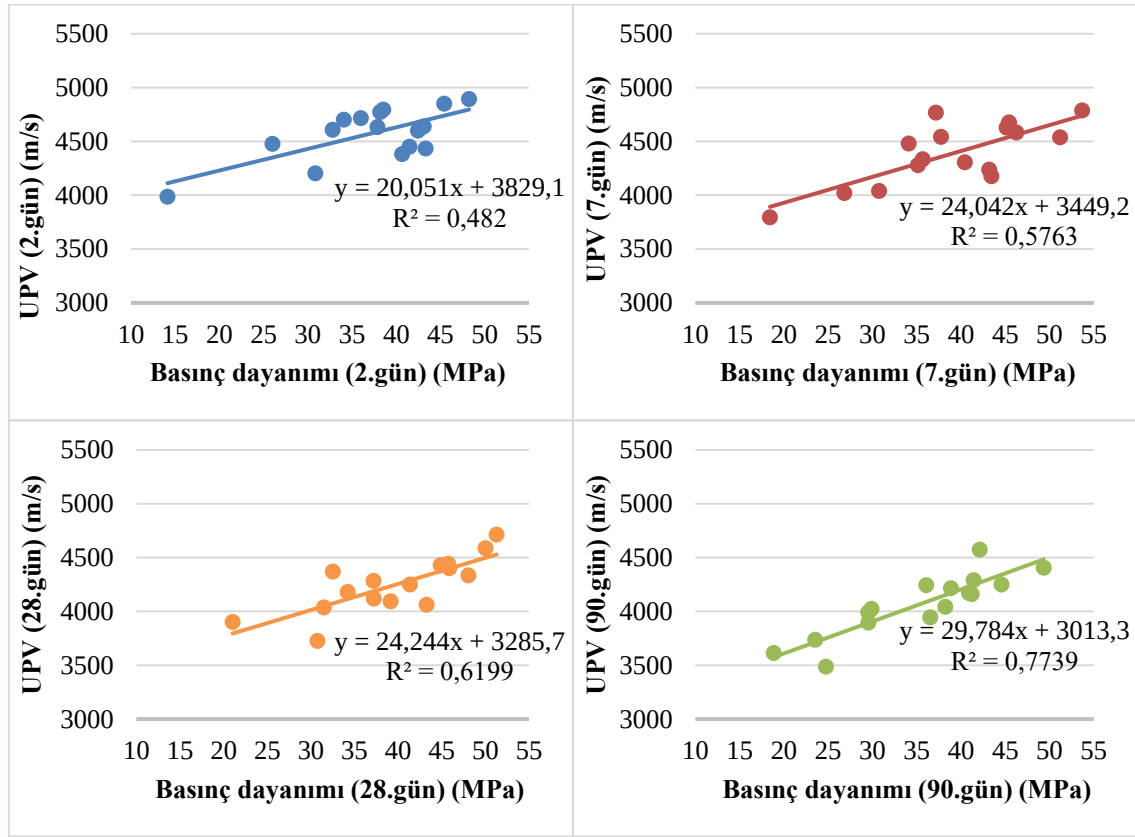
Bununla birlikte, basınç dayanımlarındaki artışlar UPV (m/s) değerlerinde de gözlemlendi. Örneğin 1, 7 ve 14 nolu karışımlardaki 7. günden 28. güne gelindiğindeki basınç dayanımlarında ve UPV (m/s) değerlerinde eş zamanlı artışlar görüldü. Ancak bu durum her zaman geçerli değildir. Çünkü, genel olarak artan yaşla birlikte UPV değerlerin düştüğü, buna karşın özellikle 7. ve 28. Günlerde basınç dayanımlarında artışların olduğu gözlemlendi. Bu durum, kuru sıcaklık küremesi ve geopolimerizasyon sonucu açığa çıkan su sonucu geopolimer betonlardaki oluşan gözenekli yapının UPV (m/s) değerlerini basınç dayanım değerlerine kıyasla daha çok etkilediği yönünde yorumlanabilir.



Şekil 5.11. 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) ve UPV (m/s) sonuçları arasındaki ilişki

5.7. Basınç Dayanımı İle Ultrases Geçiş Hızı Arasındaki Doğrusal ilişki

Geopolimer betonların basınç dayanımları ile UPV (m/s) arasındaki doğrusal ilişki Şekil 5.12’de gösterildi. Buna göre, geopolimer betonların basınç dayanımı ve UPV (m/s) arasındaki doğrusal ilişkinin genel olarak düşük regregasyon ilişkisine sahip olduğu gözlemlendi. Bu durum geopolimer reaksiyonunda etkili olan kürlenme parametresinin basınç dayanımı ve UPV (m/s) sonuçları üzerinde farklı oranlarda etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

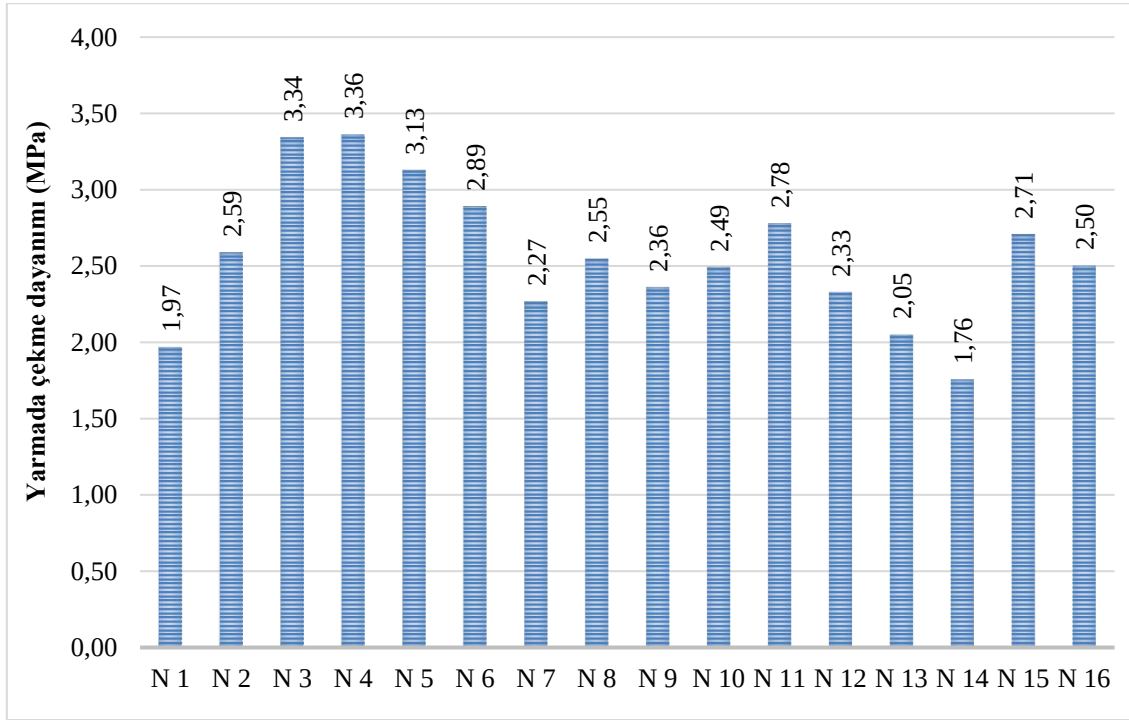


Şekil 5.12. 2., 7., 28. ve 90. gün basınç dayanım (MPa) ve UPV (m/s) sonuçları arasındaki doğrusal ilişki

5.7. Yarmada Çekme Dayanımı

Geopolimer betonların 28. gün yarmada çekme dayanım deneyi sonuçları Şekil 5.13’te gösterildi. Buna göre, en yüksek yarmada çekme dayanımı 4 nolu karışımda 3,36 MPa, en düşük yarmada çekme dayanımı ise 14 nolu karışımda 1,76 MPa olarak bulundu. Bununla birlikte yarmada çekme dayanımı sonuçları basınç dayanımları ile uyumlu olduğu görüldü. Ancak yüksek basınç dayanımı gösteren geopolimer betonların nispeten

daha düşük yarmada çekme dayanımı sonuçları verdiği gözlemlendi. Bu durum, genel olarak kürleme sıcaklığı ile meydana gelen mikro çatlaklardan kaynaklanmaktadır. Oluşan bu mikro çatlaklar betonda çekme sırasında hızlı bir şekilde büyüyerek betonun çekme dayanımlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Buradan, kürleme sıcaklıklarının yarmada çekme dayanımını basınç dayanımına kıyasla çok daha fazla etkilediği sonucuna varılabilir.



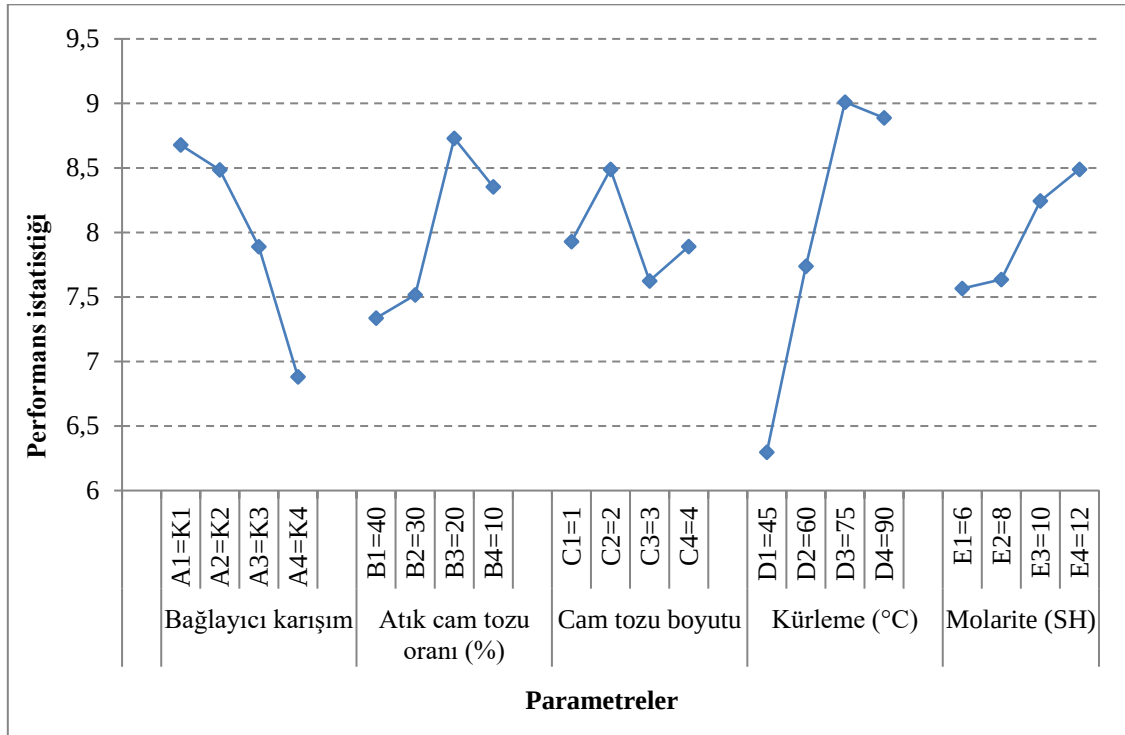
Şekil 5.13. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

5.7.1. Yarmada Çekme Dayanım Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların bulunan yarmada çekme dayanım (MPa) değerleri Taguchi metodu ile “daha büyük daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.14’te verildi. Karışımlarda optimum parametreler A1=K1, B3=20, C2=2, D3=75, E4=8 şeklinde bulundu.

Buna göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının ve molaritenin artması yarmada çekme dayanımlarını arttırdığı, ACT oranının %20 ye kadar, kürleme sıcaklığının ise 75 °C’ye kadar artması dayanımları arttırdığı görüldü. Cam tozu boyutunun net bir optimum değer verdiği gözlemlendi. Yarmada çekme dayanımı için bulunan optimum parametre

sonuçlarının net sonuçlar verdiği ve genel itibariyle basınç dayanım sonuçları ile benzerlik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.14. Yarmada çekme dayanımı performans istatistiği-parametreler grafiği

Karışımlardaki ÖYFC/UK oranının ve SH molaritesinin artması ile yarmada çekme dayanımında meydana gelen sürekli artış daha önceki çalışmalarda da bildirilmiştir (Fang ve diğ., 2018 ; Singhal ve diğ., 2018). Bununla birlikte, ACT, cam tozu boyutu ve kırılma sıcaklığı sonuçlarının basınç dayanımı ile çok benzer gelmesi geopolimerizasyon aktivitesi ile açıklanabilir.

Tablo 5.9’da geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, kırılma sıcaklığı, bağlayıcı karışım, ACT oranı, SH molaritesi ve cam tozu boyutu şeklinde bulundu.

Basınç dayanımlarında olduğu gibi yarmada çekme dayanımlarında da en yüksek etki %50,26 ile kırılma tarafından sağlandı. En yüksek ikinci etkiyi %23,17 ile bağlayıcı karışım yaparken, diğer parametrelerin etkilerinin daha az olduğu, özellikle cam tozu boyutunun etkisinin önemsiz olduğu görüldü.

Tablo 5.9. Geopolimer beton karışımların yarmada çekme dayanımı sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	0,74095	0,24698	23,17%	*	*
% ACT	3	0,44338	0,14779	13,86%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	0,08261	0,02754	2,58%	*	*
Kürleme (°C)	3	1,60746	0,53582	50,26%	*	*
Molarite (SH)	3	0,32377	0,10792	10,12%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	3,19817		100,00%		

5.8. Geopolimer Betonun Deneysel ve Tahmin Edilen Yarmada Çekme Dayanımı Arasında Karşılaştırma

Genel olarak betonun yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımına bağlı olarak tahmin edilebilir. Bu bağlamda ACI 318-05 (5.1), Eurocode 2 (5.2) ve AS 3600-09 (5.3) standartlarında geleneksel portland çimentolu beton için önerilen denklemler, Lee ve Lee (5.4), ve Sofi ve diğ., (5.5) tarafından geopolimer beton için önerilen denklemleri kullanılarak yarmada çekme dayanım sonuçları tahmin edildi. Buna göre, ACI 318-05 ve Eurocode 2 standartlarında önerilen denklemler kullanıldığında elde edilen tahmini sonuçlar deneysel sonuçlara kıyasla daha yüksek bulunurken, AS 3600-09 (5.3) standardında verilen denklem kullanıldığında ise daha düşük bulundu. Bununla birlikte, deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak yeni bir tahmin denklemi (5.6) önerildi (Fang ve diğ., 2018 ; Deb ve diğ., 2014 ; Lee ve Lee, 2013 ; Sofi ve diğ., 2007).

$$f_{ct} = 0,56 \sqrt{f_c} \text{ GPa} \quad (5.1)$$

$$f_{ct} = \left(\frac{1}{3}\right) (f_c)^{\frac{2}{3}} \text{ GPa, } f_{ct} < 50 \text{ MPa ise} \quad (5.2)$$

$$f_{ct} = 0,36 \sqrt{f_c} \quad (5.3)$$

$$f_{ct} = 0,45 \sqrt{f_c} \quad (5.4)$$

$$f_{ct} = 0,48 \sqrt{f_c} \quad (5.5)$$

$$f_{ct} = 0,0418 f_c + 0,9103 \quad (5.6)$$

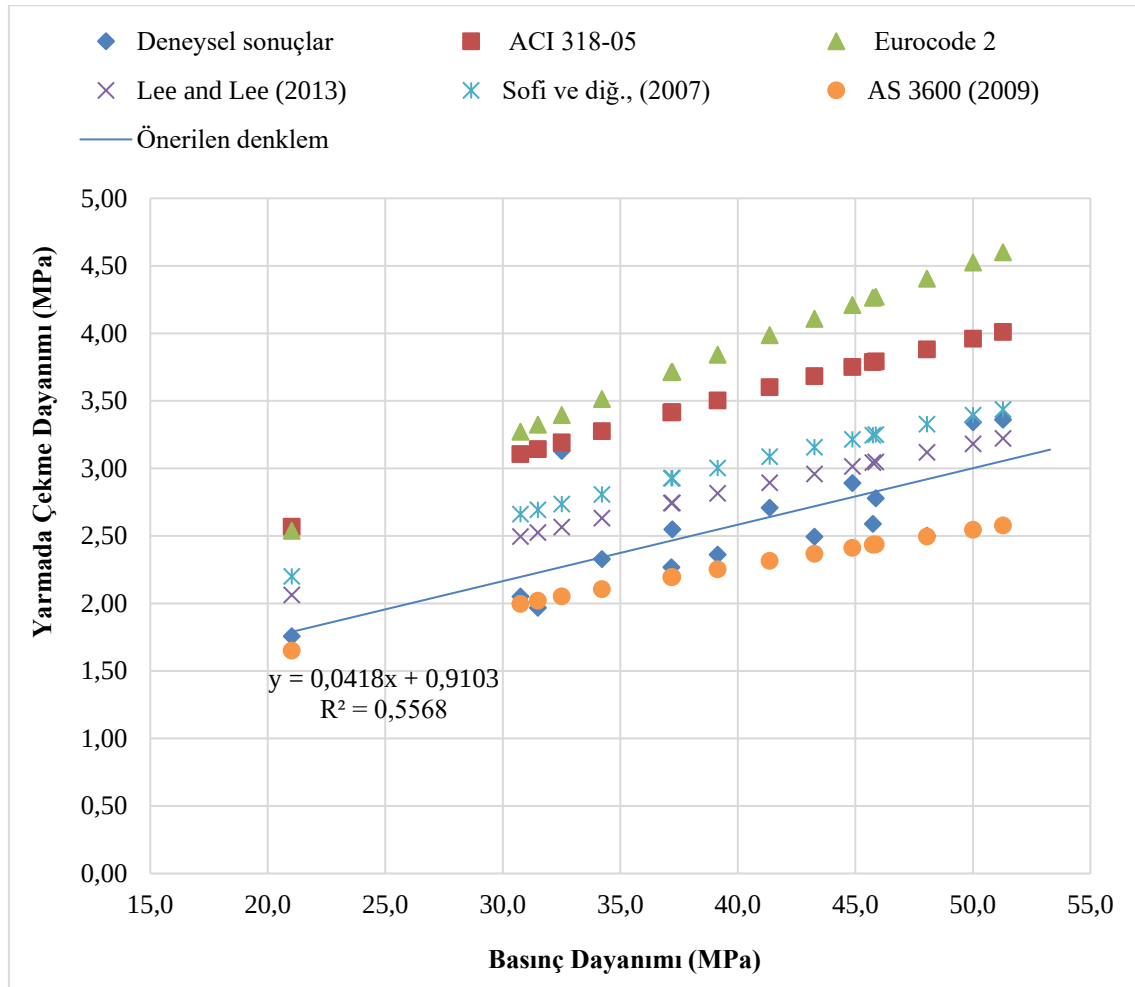
Burada;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı,

f_c : Belirtilen basınç dayanımı

'dır.

Geopolimer beton için deneysel ve tahmin edilen yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 5.15'te verildi.

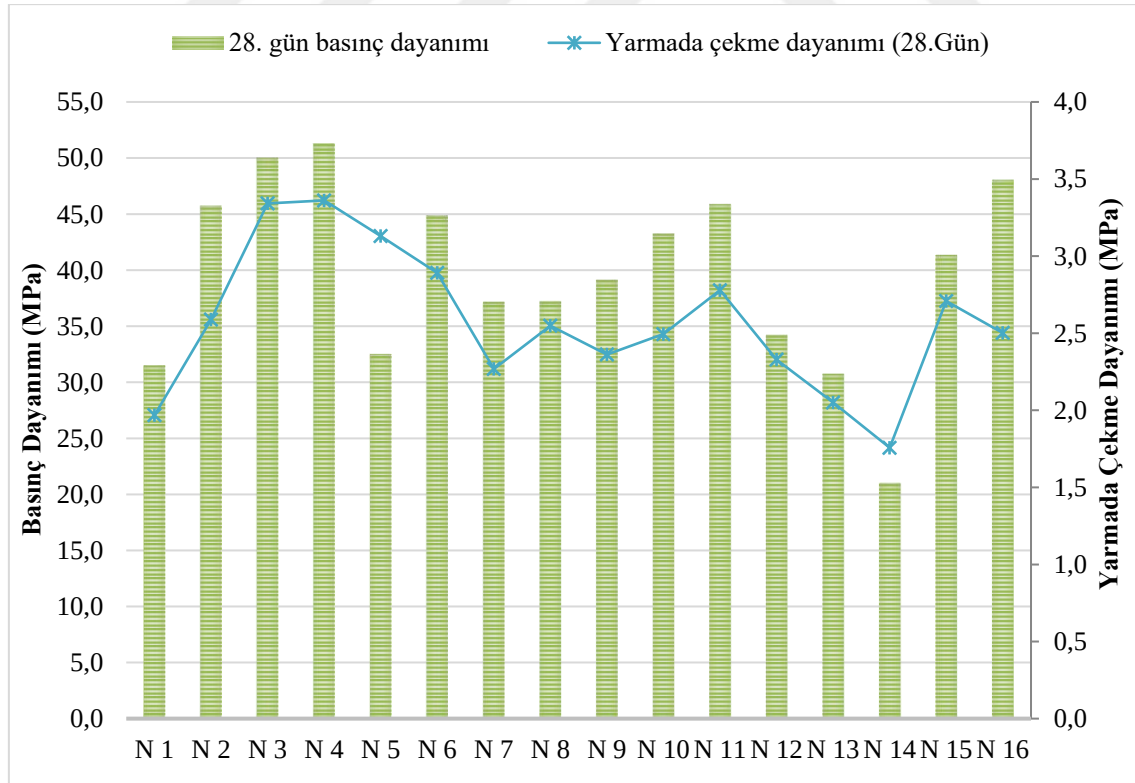


Şekil 5.15. Geopolimer betonun deneysel ve tahmin edilen yarmada çekme dayanımı sonuçları

Doğrusal bir tahmin denklemi önerilmesine rağmen deneysel sonuçların kesin bir doğrusal ilişkiye sahip olmadığı gözlemlendi. Geopolimer betonunun yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki tahmini ilişkinin, kaynak malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, alkali aktivatör tipi, kürleme rejimi gibi birçok faktörden güçlü bir şekilde etkilendiği gözlemlendi.

5.9. Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı İle Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

Geopolimer betonların basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 5.16’da gösterildi. Buna göre, genel olarak basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasında bir uyum gözlemlendi. Ancak bu durum, tüm karışımlar için geçerli değildi. Bu durum, basınç dayanımı elde etmek için kullanılan kürlleme sıcaklıklarının, beton yapıda mikro çatlaklar oluşturması ve geopolimer beton sistemine katılan malzemeler arasındaki aderansı etkilediği şeklinde açıklanabilir. Mikro çatlakların ve düşük aderansın (bağlanma gücünün) yarmada çekme dayanımını basınç dayanımına kıyasla daha fazla etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca, geopolimer betonda gerçekleşen faz değişimi sonucu meydana gelen mikro gerilmeler yarmada çekme dayanımını daha fazla etkileyebilir. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanım sonuçları spesifik olarak incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı veren 4 nolu karışımın en yüksek, en düşük basınç dayanım sonucunu veren 14 nolu karışımın ise en düşük yarmada çekme dayanımı verdiği gözlemlendi.



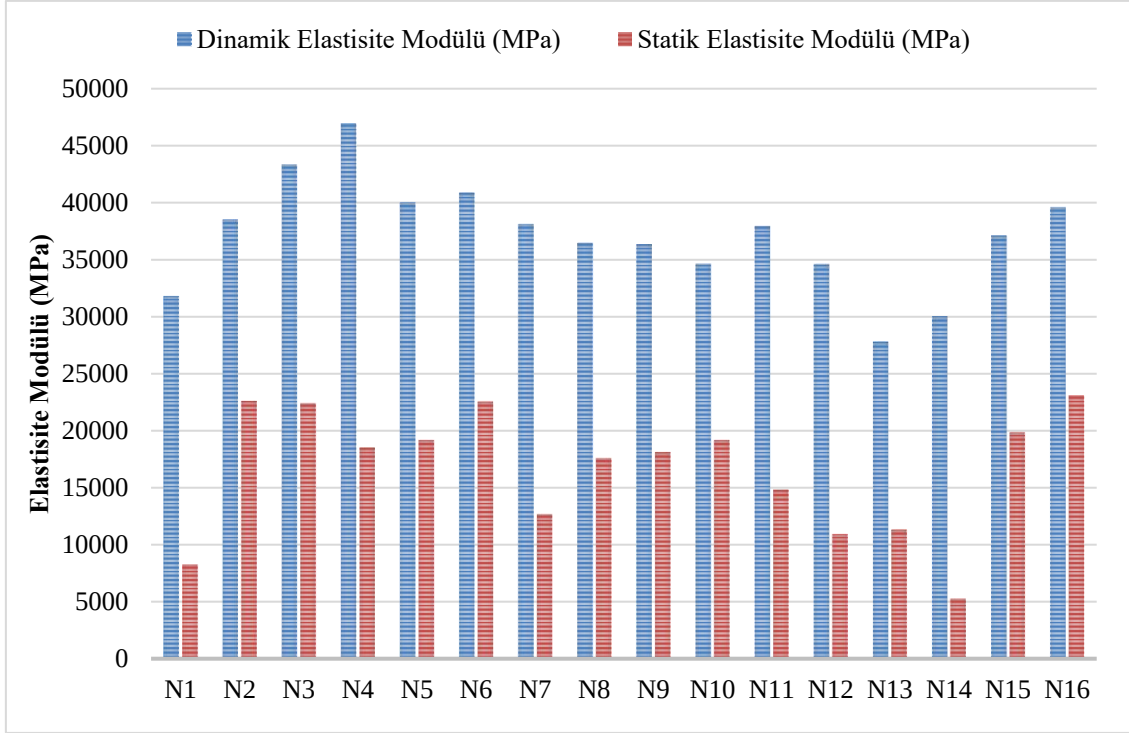
Şekil 5.16. Geopolimer betonların basınç dayanımları ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

5.10. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü

Geopolimer betonların dinamik ve statik elastisite modülü değerleri Tablo 5.10 ve Şekil 5.17’de gösterildi. Buna göre dinamik elastisite modülü değerleri 27825,4 ile 46974,7 MPa arasında, Statik elastisite modülü değerleri ise 5262,6 ile 23083,4 MPa arasında bulundu. Genel olarak dinamik ve statik arasındaki ilişki birbiri ile uyumlu görülse de en yüksek dinamik elastisiteyi veren 4 nolu karışımın en yüksek statik elastisite değerini vermediği, benzer şekilde en düşük dinamik elastisiteyi veren 13 nolu karışımın ise en düşük statik elastisite değerini vermediği görüldü. Bu durumun yüksek sıcaklık kürlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatür incelemesi yapıldığında benzer dayanımlara sahip geopolimer ve portland çimentolu betonlarda, geopolimer betonların daha düşük statik elastisite modülü sonuçları gösterdiği görülmüştür (Nath ve Sarker 2017 ; Olivia ve Nikraz, 2012).

Tablo 5.10. Geopolimer betonun dinamik ve statik elastisite modülü değerleri

Deney No	Dinamik Elastisite Modülü (MPa)	Statik Elastisite Modülü (MPa)
N1	31815,0	8277,7
N2	38525,0	22609,3
N3	43351,5	22395,5
N4	46974,7	18516,8
N5	40029,7	19166,1
N6	40884,7	22542,7
N7	38142,8	12681,7
N8	36489,2	17590,2
N9	36372,5	18113,3
N10	34659,2	19163,6
N11	37954,4	14811,9
N12	34643,6	10927,9
N13	27825,4	11324,3
N14	30048,1	5262,6
N15	37124,1	19850,1
N16	39604,1	23083,4



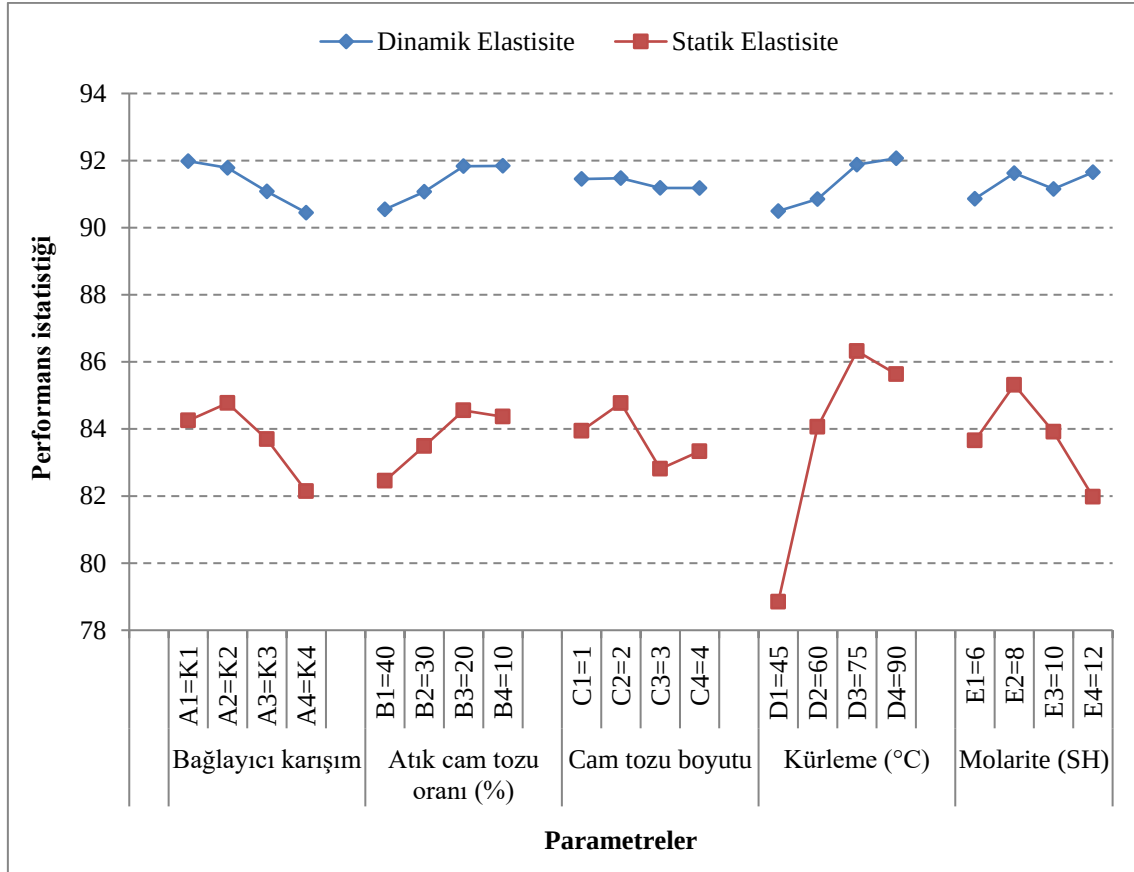
Şekil 5.17. Geopolimer betonun dinamik ve statik elastisite modülü değerleri

5.10.1. Dinamik ve Statik Elastisite Modülüne Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların bulunan dinamik ve statik elastisite modülü değerleri Taguchi metodu ile “daha büyük daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.18’de verildi. Karışımlarda optimum parametreler dinamik elastisite modülü için A1=K1, B4=10, C2=2, D4=90, E4=12 şeklinde, statik elastisite modülü için A2=K2, B3=20, C2=2, D3=75, E2=8 şeklinde bulundu. Buna göre,

Dinamik elastisite’nin ÖYFC/UK oranının artması ile, ACT oranının azalması ile, cam tozu boyutunun küçülmesi ile, kürleme sıcaklığının artması ile arttığı bulundu. SH molaritesinin 8 mol ile optimum değer verdiği bulundu. Ayrıca, 1 ve 2 nolu cam tozları arasında çok küçük bir fark olduğu gözlemlendi.

Statik elastisite’nin genel olarak optimum değerler gösterdiği, bununla birlikte, genel olarak karışımlarda ÖYFC oranının artması, ACT oranının azalması ile statik elastisitenin arttığı söylenebilir. Cam tozu cam tozu boyutu, kürleme sıcaklığı ve SH molarite parametrelerinin basınç dayanımına benzer şekilde 2 nolu cam tozu, 75 °C ve 8 mol ile optimum değerler verdiği görüldü.



Şekil 5.18. Dinamik ve statik elastisite modülü (MPa) performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.11’de geopolimer beton karışımların dinamik ve statik elastisite modülü değerlerine ait varyans analizi sonuçları verildi. Buna göre,

Dinamik elastisite modülü için, etki sırasının yüksekten düşüğe kırılma sıcaklığı, bağlayıcı karışım, % ACT, SH molaritesi ve cam tozu boyutu olduğu görüldü. Bu durumda dinamik elastisite sonuçlarının geopolimer betonun hem UPV (m/s) hemde basınç dayanım sonuçlarına benzer şekilde geldiği gözlemlendi. UPV tahribatsız yöntemi ile bulunan dinamik elastisite modülü sonuçlarının karışımlardaki kaynak malzemelerden bu denli etkilenmesinin olağan olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçların UPV (m/s) deneyinde de geldiği görülmüştü.

Statik elastisite modülü için, için, etki sırasının yüksekten düşüğe kırılma sıcaklığı, SH molaritesi, % ACT, bağlayıcı karışım ve cam tozu boyutu olduğu görüldü. Buradan, kırılma sıcaklıklarının statik elastisite modülü üzerinde oldukça yüksek bir öneme sahip olduğu sonucuna varılabilir. Kırılma dışındaki parametrelerin önemli bir etkisinin

olmadığı görüldü. Bununla birlikte statik elastisite modülü sonuçlarının basınç dayanımı sonuçlarına optimum parametre ve etki yüzdeleri bakımından benzer geldiği gözlemlendi.

Tablo 5.11. Dinamik elastisite modülü (MPa) varyans analizi

Dinamik elastisite modülü						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	103624281	34541427	29,94%	*	*
% ACT	3	81093071	27031024	23,43%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	3045165	1015055	0,88%	*	*
Kürleme (°C)	3	125017147	41672382	36,12%	*	*
Mol Oranı (SH)	3	33364577	11121526	9,64%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	346144241		100,00%		
Statik elastisite modülü						
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	29736008	9912003	6,55%	*	*
% ACT	3	31387586	10462529	6,91%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	18636641	6212214	4,10%	*	*
Kürleme (°C)	3	329460202	109820067	72,56%	*	*
Mol Oranı (SH)	3	44814029	14938010	9,87%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	454034466		100,00%		

5.11. Dinamik ve Statik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma

Çalışmada elde edilen dinamik ve statik elastisite modülleri arasında önemli bir fark bulundu. Genellikle dinamik elastisite modülü değerlerinin statik elastisite modülü değerlerinden daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlendi. Dinamik elastisite modülü, UPV testleri sırasında yalnızca ihmal edilebilir bir gerilim uygulandığından, standart testte sıfır gerilimde belirlenen başlangıç tanjant modülü olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, dinamik ve statik elastisite modülleri arasında farkın betonun homojen olmayan özelliklerinin iki modülü farklı şekillerde etkilemesinden kaynaklandığı açıklanmıştır. Ayrıca beton basınç dayanımının artması ile iki modül arasındaki farkın kapandığı bildirilmiştir (Lee ve diğ., 2017). Geleneksel Portland çimentolu betonda dinamik elastisite yolu ile statik elastisite sonuçlarına ulaşmak için, BS8100 bölüm 2 (5.1), Lydon ve Balendran (5.2), Thomaz ve diğ., (5.3), Sabbağ ve Uyanık (5.4), Han ve Kim (5.5) Zhou ve diğ., tarafından farklı ampirik formüller önerilmiştir.

Bu ampirik formüller kullanılarak bulunan tahmini statik elastisite modülleri Şekil 5.19'da verildi.

Buna göre, deneysel verilerden elde edilen bulguların daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlendi. Bu durum geopolimer betonun geopolimerizasyon süreci, kürlleme durumu ve mikro yapısından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Lee ve diğ., 2017 ; Lydon ve Balendran, 1986 ; Thomaz ve diğ., 2021 ; Sabbağ ve Uyanık, 2018 ; Han ve Kim, 2004 ; Zhou ve diğ., 2015) .

Çalışmada ayrıca, deneysel sonuçlar incelenerek yeni bir deneysel denklem (5.13) önerildi.

$$E_s = 1,25 E_d - 19 \quad (5.7)$$

$$E_s = 0,83 E_d \quad (5.8)$$

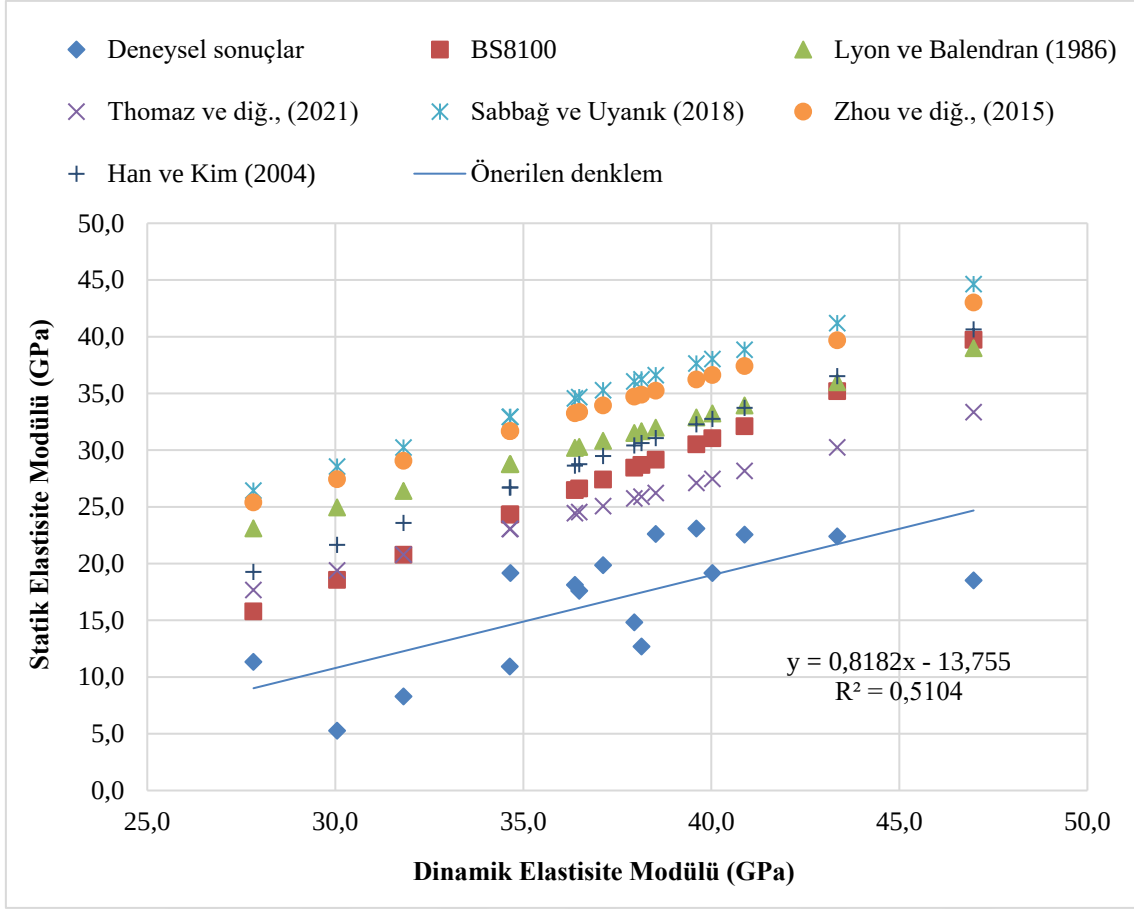
$$E_s = 0,3128 E_d^{1,2128} \quad (5.9)$$

$$E_s = 0,95 E_d \quad (5.10)$$

$$E_s = E_d (1 - 1,021e^{-0,0431E_d}) \quad (5.11)$$

$$E_s = 0,92061E_d - 0,23807 \quad (5.12)$$

$$E_s = 0,8182 E_d - 13,755 \quad (5.13)$$



Şekil 5.19. Geopolimer betonların dinamik elastisite sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini statik elastisite modülü sonuçları

5.12. Deneysel ve Tahmin Edilen Dinamik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma

Çalışmada dinamik elastisite modülü için elde edilen deneysel sonuçlar tahmin edilen değerlerle karşılaştırıldı ve bulunan sonuçlar Şekil 5.20’de verildi. Tahmini değerleri bulmak için, CEB-FIP & BS8100 (5.14)&(5.15) ve Zhou ve diğ., (5.16),(5.17) tarafından portland çimentolu beton için önerilen, Fang ve diğ., (5.18) ve Nohuchi ve diğ., (5.19) tarafından geopolimer beton için önerilen denklemler kullanıldı (Fang ve diğ., 2018 ; Zhou ve diğ., 2015 ; Noguchi ve diğ., 2009).

Buna göre, CEB-FIP & BS8100 ve Zhou ve diğ., (5.16) tarafından önerilen denklem ile bulunan tahmini sonuçların deneysel sonuçlara göre yüksek, Fang ve diğ., Nohuchi ve diğ., ve Zhou ve diğ., (5.17) tarafından önerilen denklemler ile bulunan sonuçların daha düşük olduğu gözlemlendi.

Bununla birlikte, 5.17 ve 5.19 denklemleri kullanılarak deneysel sonuçlara en yakın tahminlerin yapılabildiği gözlemlendi. Çalışmada, deneysel sonuçlardan yola çıkılarak farklı bir Denklem 5.20 önerildi.

$$E_s = 22 (f_c/10)^{0,3} \text{ GPa} \quad (5.14)$$

$$E_d = (E_s + 19)/1,25 \quad (5.15)$$

$$E_d = 20,02 f_c^{0,3} - 11,17 \text{ GPa} \quad (5.16)$$

$$E_d = 14,72 f_c^{0,299} - 9,56 \text{ GPa} \quad (5.17)$$

$$E_d = 7,64 f_c^{0,35} - 3,75 \text{ GPa} \quad (5.18)$$

$$E_d = 12,66 f_c^{0,27} \text{ GPa} \quad (5.19)$$

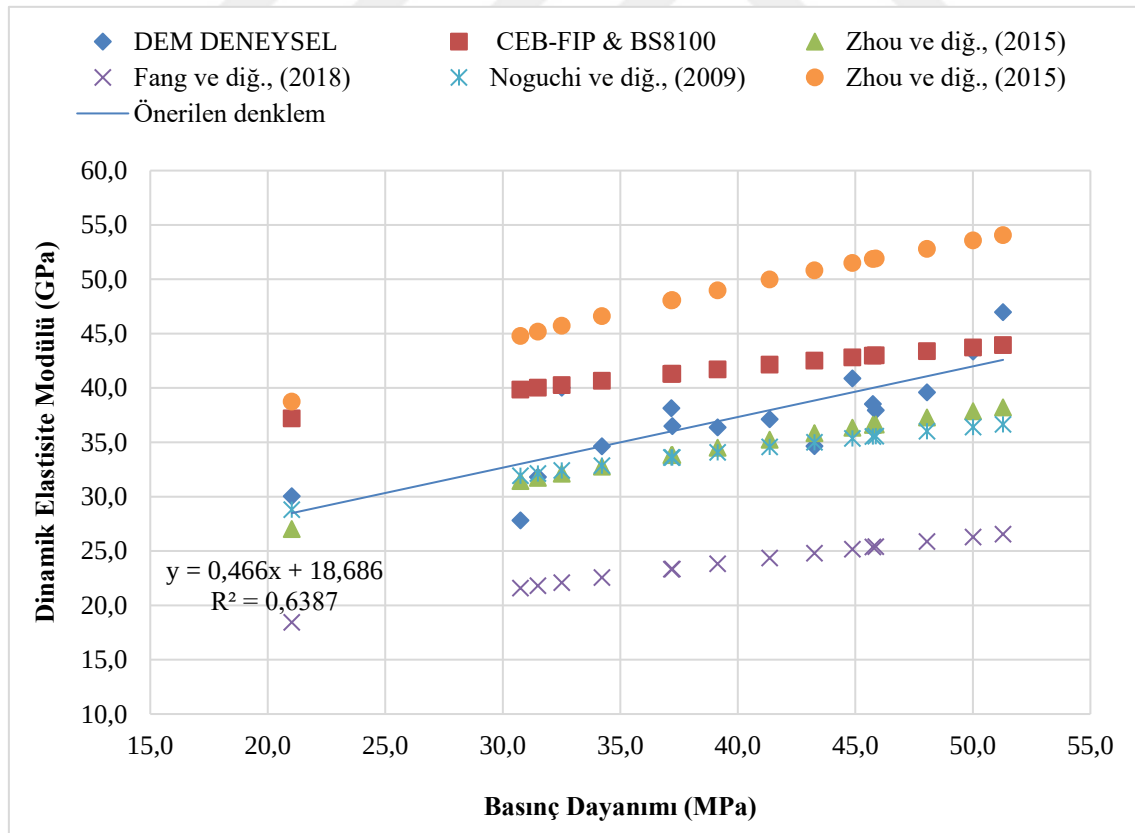
$$E_d = 0,466 f_c + 18,686 \text{ GPa} \quad (5.20)$$

Burada;

E_d : Dinamik elastisite modülü,

f_c : Belirtilen basınç dayanımı

'dır.



Şekil 5.20. Geopolimer betonların basınç dayanımı sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini dinamik elastisite modülü sonuçları

5.13. Deneysel ve Tahmin Edilen Statik Elastisite Modülü Arasındaki Karşılaştırma

Çalışmada statik elastisite modülü için elde edilen deneysel sonuçlar tahmin edilen değerlerle karşılaştırıldı ve bulunan sonuçlar Şekil 5.21’de verildi.

Tahmini değerleri bulmak için CEB-FIP 1990 (5.21) ve CEB-FIP 1995 (5.14) modelleri, ACI 318-14 (5.22) ve CSA A23.3 (5.23) standartlarında normal portland çimentolu beton için verilen denklemler; Lee ve Lee (5.24), Bellum ve diğ., (5.25) ve Yılmazoğlu (5.26) tarafından geopolimer beton için önerilen denklemler kullanıldı (Lee ve Lee, 2013 ; Fang ve diğ., 2018 ; Yağmur, 2019 ; Zhou ve diğ., 2015 ; Bellum ve diğ., 2020 ; Yılmazoğlu, 2022).

Buna göre, CEB-FIB, ACI-318 ve CSA A23.3’te önerilen denklemler ile bulunan tahmini sonuçların deneysel sonuçlara kıyasla oldukça yüksek olduğu gözlemlendi.

Bununla birlikte, Lee ve Lee, Bellum ve diğ., Yılmazoğlu araştırmacıların önerdiği denklemler ile bulunan sonuçlarla deneysel sonuçların yakın geldiği, en yakın sonuçların ise Yılmazoğlu’nun önerdiği denklem ile geldiği gözlemlendi.

Bu durumda, deneysel bulgulardan yola çıkılarak Denklem 5.27 önerildi.

$$E_s = 0,85 \times 2,15 \times 10^4 (f_c/10)^{1/3} \text{ GPa} \quad (5.21)$$

$$E_s = 4700 \sqrt{f_c} \text{ MPa} \quad (5.22)$$

$$E_s = 4500 \sqrt{f_c} \text{ MPa} \quad (5.23)$$

$$E_s = 5300 \sqrt[3]{f_c} \text{ MPa} \quad (5.24)$$

$$E_s = 3282 \sqrt{f_c} \text{ MPa} \quad (5.25)$$

$$E_s = 552,77 f_c^{0,95} \text{ MPa} \quad (5.26)$$

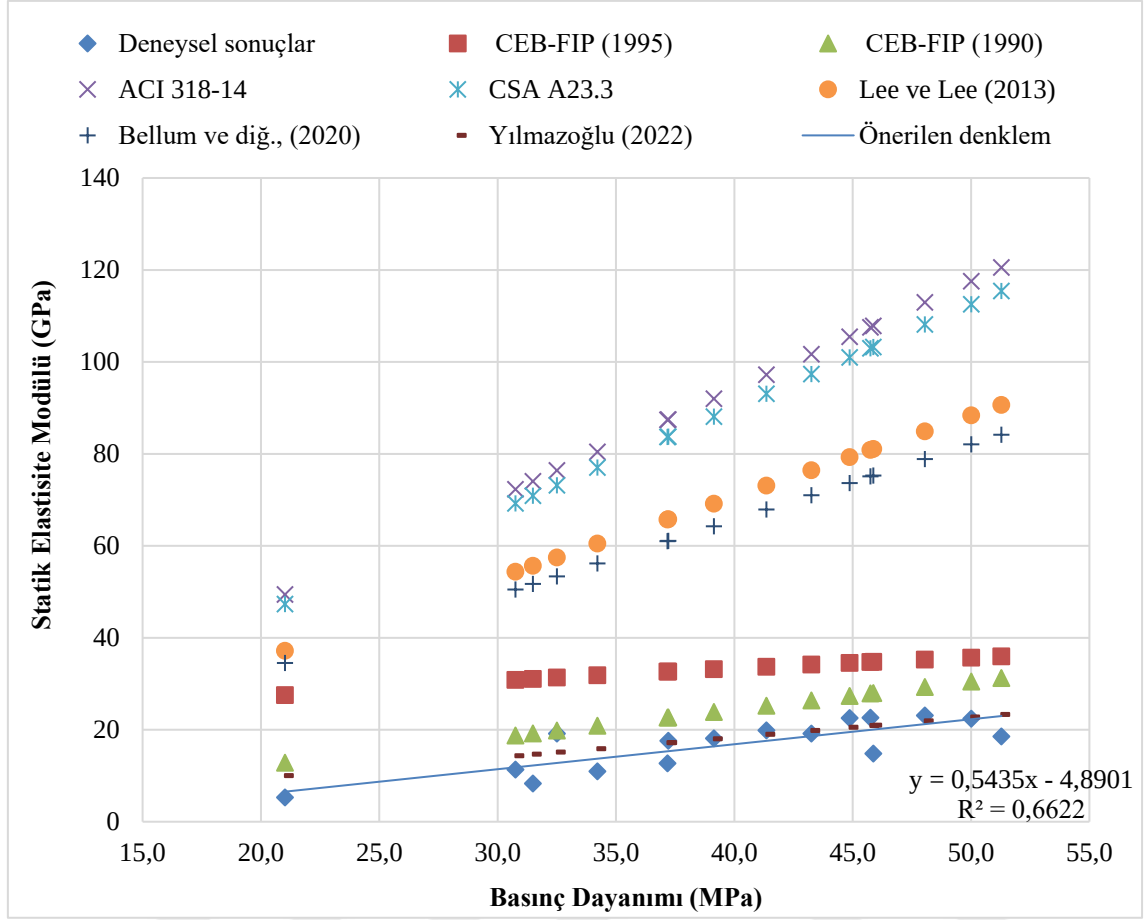
$$E_s = 0,5435 f_c - 4,8901 \text{ GPa} \quad (5.27)$$

Burada;

E_s : Statik elastisite modülü,

f_c : Belirtilen basınç dayanımı

‘dır.

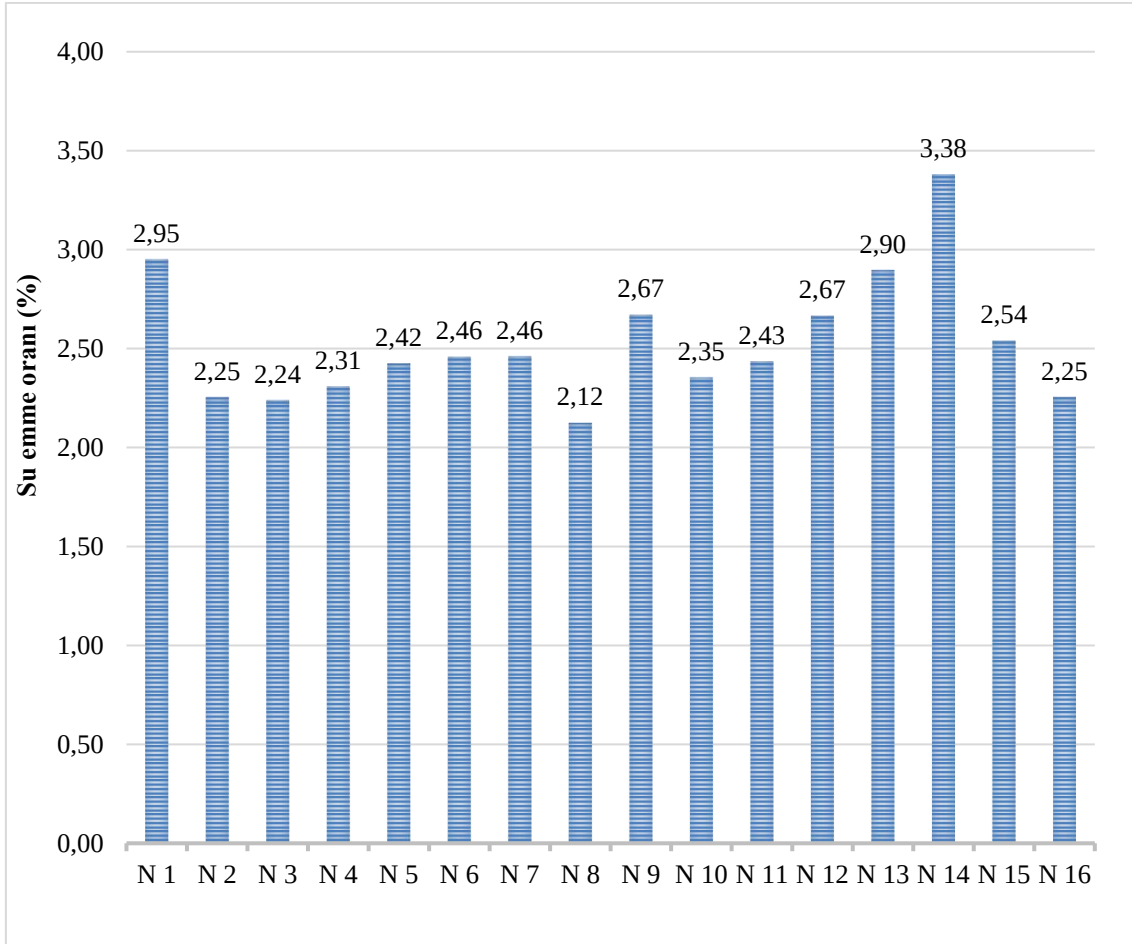


Şekil 5.21. Geopolimer betonların basınç dayanımı sonuçları üzerinden elde edilen deneysel ve tahmini statik elastisite modülü sonuçları

5.14. Su Emme Oranı

Geopolimer betonların 28. gün yarmada çekme dayanım deneyi sonuçları Şekil 5.22’de gösterildi. Buna göre, en düşük su emme oranı % 2,12 ile 8 no’lu karışımda en yüksek su emme oranı % 3,38 ile 14 nolu karışımda görüldü. Buradan su emme oranı ile basınç dayanımı arasında genel bir uyum olduğu söylenebilir. Bu durum daha önceki çalışmalarda da bildirilmiştir (Pradhan ve diğ., 2022). Ancak, en düşük su emme oranını gösteren 8 nolu karışımın en yüksek basınç dayanımı göstermediği gözlemlendi. Bu durum ise, su emme için yapılan varyans analizi sonuçlarında gözlemlenen bağılayıcı karışım ve ACT oranının nispeten yüksek etkisi ile açıklanabilir.

Bununla birlikte, geopolimer betonların % 3’ten daha az su emme oranı gösterdiği (14 nolu karışım hariç), böylece düşük geçirimli beton sınıfına girdiği görüldü (Gunasekara ve diğ., 2016).



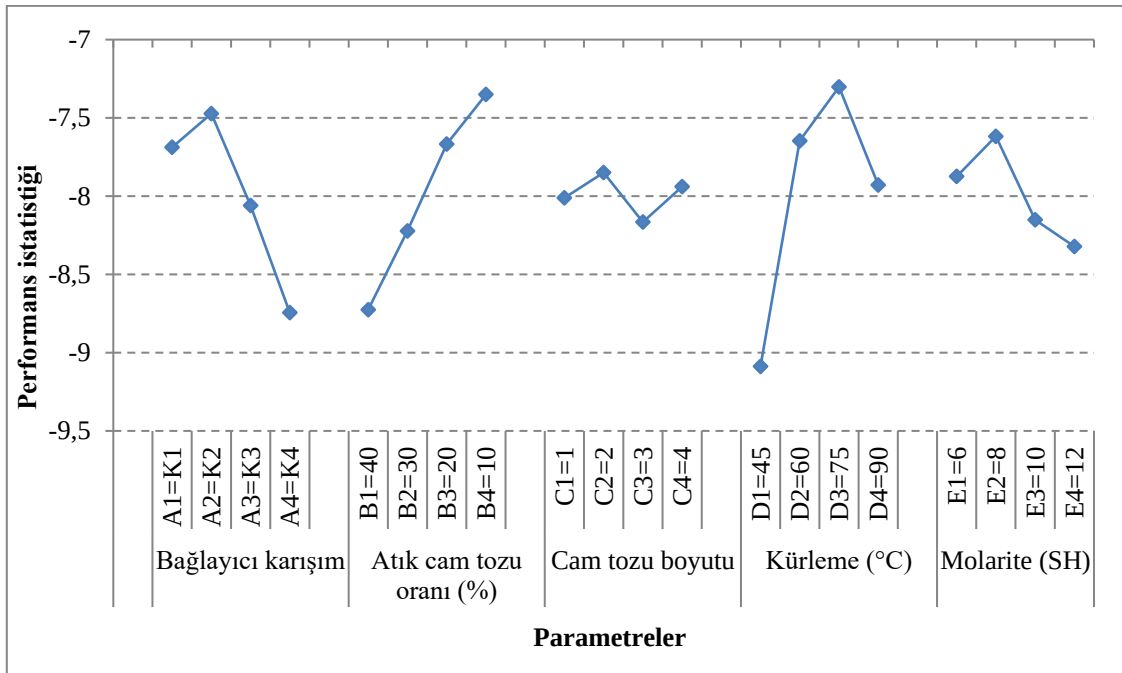
Şekil 5.22. Geopolimer betonların su emme (%) değerleri

5.14.1. Su Emme Oranı Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların (%) su emme değerleri Taguchi metodu ile “daha küçük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.23’te verildi. Karışımlarda optimum parametreler A2=K2, B4=10, C2=2, D3=75, E2=8 şeklinde bulundu. Buna göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının atması, kütleme sıcaklığının ve SH molaritesinin belirli bir seviyeye kadar arması ile su emme oranını azaldığı, ACT oranının azalması ile su emme oranının azaldığı gözlemlendi. Cam tozu boyutunun optimum bir değer gösterdiği gözlemlendi. Karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması, ÖYFC’nin reaksiyonu sonucu oluşan C-A-S-H jellerinin UK’nin reaksiyonu sonucu oluşan N-A-S-H jellerine kıyasla daha az gözenekli bir yapı meydana getirmesi ile açıklanmıştır (Chi ve Huang, 2013). Ayrıca, ÖYFC’nin yüksek reaksiyon aktivitesi ile artan polimerizasyonun su emme oranını düşürdüğü düşünülmektedir. Benzer şekilde

artan cam tozu oranı ile su emme oranının düşmesi; cam tozu boyutu, kürleme sıcaklığı ve SH molaritesi parametrelerinin davranışı basınç dayanımı ile benzer sonuçlar vermesi su emme oranının geopolimer reaksiyonu ile doğrudan ilişkili olduğunun bir göstergesidir. Bu durum, geopolimerizasyon sonucu yüksek konsantrasyonlu alüminosilikat jellerin oluşumu ile ifade edilmiştir (Amran ve diğ., 2021). Bununla birlikte, ACT oranının sürekli olarak artması ile artan su emme oranı, reaksiyona girmemiş ACT partiküllerinin beton yapıdaki gözenekliliği arttırarak su emme oranını arttırmasına bağlı olabilir. Khan ve diğ., (2021) UK bazlı geopolimer harç karışımlarına ACT %40'kadar ilavesi ile gözenekliliğin sürekli olarak arttığını, ÖYFC %20'ye kadar ilavesi ile gözenekliliğin azaldığını %20'den sonra arttığını bildirmiştir. Ek olarak, çalışmada yüksek kürleme sıcaklıklarına çıkılmasının geopolimer beton numunelerde mikro çatlakların arttırdığı ve bu durumun su emme özelliklerine olumsuz yönde etki yaptığı düşünülmektedir.

Tablo 5.12'de geopolimer beton karışımların (%) su emme değeri sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre, parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, kürleme sıcaklığı, %ACT, bağlayıcı karışım, molarite (SH), Cam tozu boyutu olarak bulundu. Su emme oranı için bulunan sonuçların, basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu geldiğini söylemek mümkündür.



Şekil 5.23. su emme oranı sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Bununla birlikte, bağlayıcı karışım ve ACT oranındaki farklılıkların ise, geopolimer beton yapısında artan gözenekliliğin su emme özelliklerini basınç dayanımına kıyasla daha çok etkilediği şeklinde açıklanabilir. Ek olarak, cam tozu boyutu ve molarite (SH) parametrelerinin su emme oranı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlendi.

Tablo 5.12. Su emme oranı (%) değerleri varyans analizi

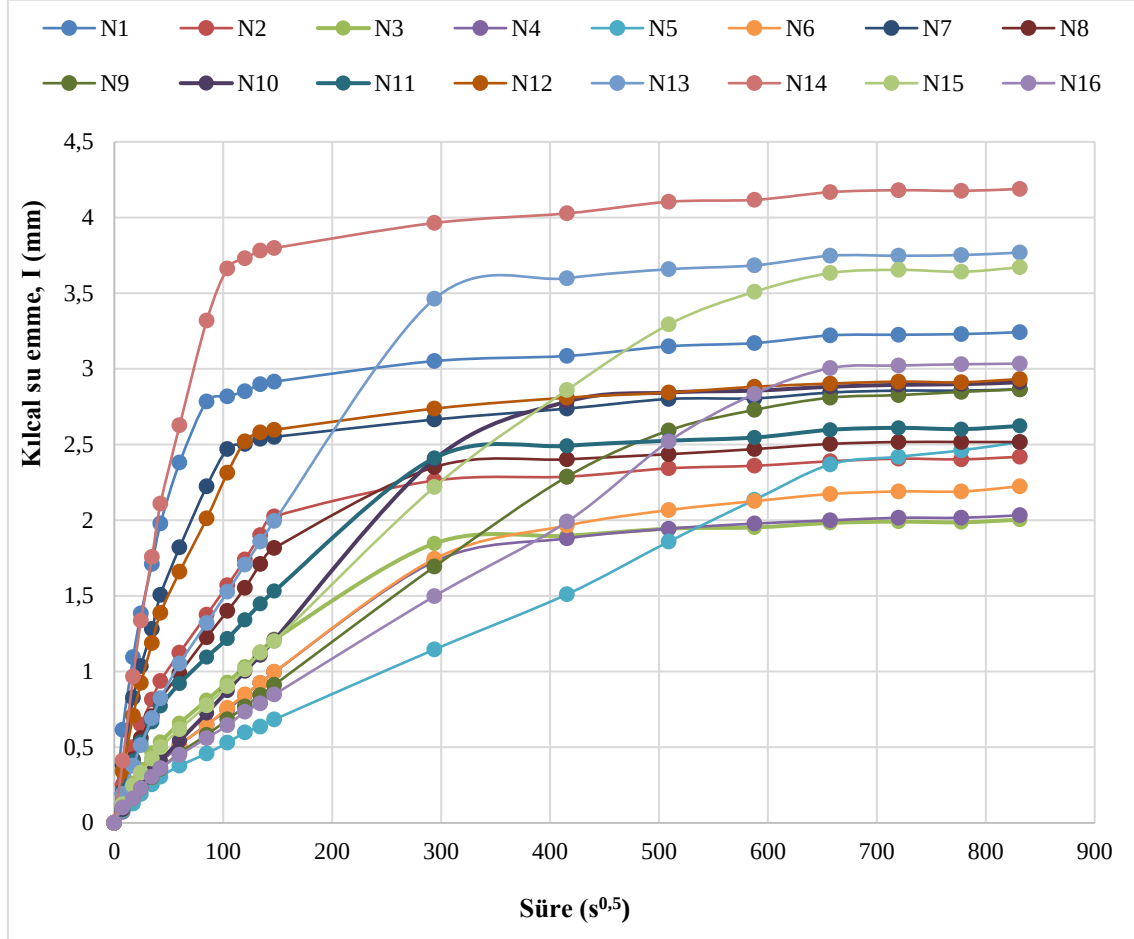
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	0,36641	0,12214	23,15%	*	*
% ACT	3	0,39202	0,13067	24,77%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	0,03780	0,01260	2,39%	*	*
Kürleme (°C)	3	0,67325	0,22442	42,54%	*	*
Molarite (SH)	3	0,11332	0,03777	7,16%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1,58281		100,00%		

5.15. Kılcal Su Emme

Geopolimer betonların zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği (mm) Tablo B.1 ve Şekil 5.24’te verildi. Buna göre, üç aşamaya ayrılarak incelendi. Geopolimer betonun kümülatif kılcal su emme süreci zamanın karekökü ile doğrusal olmayan bir şekilde artmakta; erken aşamada ($s^{0,5} = 0-147$ s) hızlı bir şekilde artmakta, orta aşamada ($s^{0,5} = 147-657$ s) yavaşlamakta ve daha sonra dengede olana kadar yavaşça artmakta ($s^{0,5} = 657-831$ s) olduğu gözlemlendi. Üç aşamada, kümülatif kılcal su emme doğrusal olarak artarken kılcal su emme hızı giderek azalmakta olduğu, başlangıçta kılcal su emme hızının daha hızlı olduğu, orta kılcal su emme hızının daha yavaş olduğu ve daha sonra kılcal su emme hızının temel olarak değişmediği gözlemlendi.

Bu durum, betonun başlangıçtaki kılcal su emmesinden kaynaklanmakta, betonun alt yüzeyinin ile su temas etmesi ile yüzeydeki boşlukların suyu hızla emmesine ve suyun hızla betonun iç bağlantı boşluğunu doldurması ile sonuçlanır. Kılcal su emme süresi

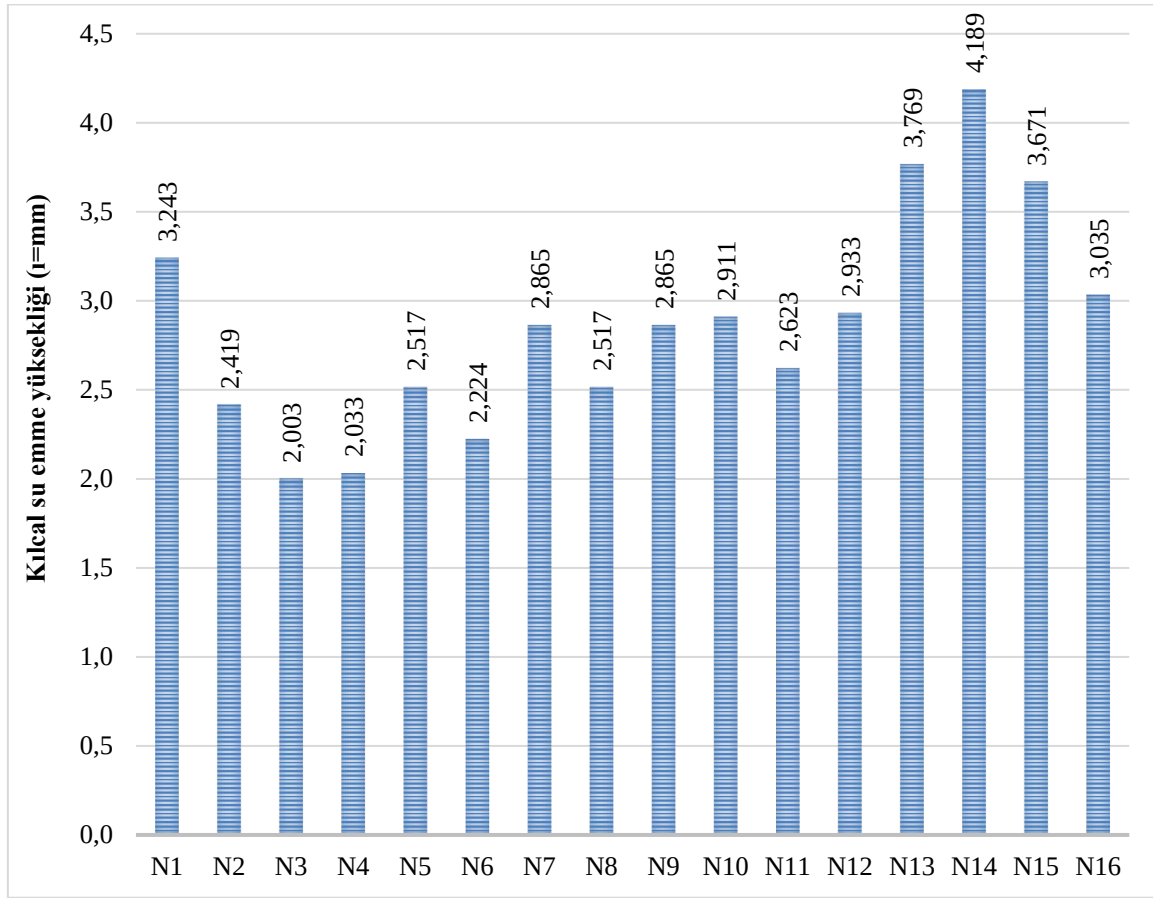
uzadıkça, su emme derinliği artar, betonun yüzeyi yavaş yavaş su doygunluğuna ulaşır, iç kısımda kuru kalan beton iç ve dış nem gradyanı sonucu sürekli şekilde su emmeye devam eder, ancak kılcal su emme kuvveti giderek azalır ve kılcal su emme hızı yavaşlar (Xiao ve diğ., 2020).



Şekil 5.24. Geopolimer betonların zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği

Çalışmada daha sonra ASTM C1585-04 standardına uygun şekilde geopolimer betonun zamana bağlı kılcal su emme yüksekliği grafiği incelenerek kılcal su emme katsayıları belirlendi ve 1. ve 2. kılcal su emme katsayıları Tablo 5.13'te gösterildi. Buna göre, en düşük 1. kılcal su emme kat sayısı değeri 0,0042 ile 5 nolu karışımda en yüksek kılcal su emme katsayısı ise 0,0240 ile 14 nolu karışımda; en düşük 2. Kılcal su emme katsayısı değeri 0,0003 ile 2, 3, 8 ve 12 nolu karışımlarda, en yüksek 2. Kılcal su emme katsayısı 0,003 ile 16 nolu karışımda görüldü. Bununla birlikte, kılcal su emme hızı ile kümülatif kılcal su emme değerinin birbiriyle kesin olarak uyumlu olmadığı gözlemlendi. Örneğin en düşük kılcal su emme katsayısını gösteren 5 nolu karışımın en düşük kümülatif kılcal

su emme değerini (kılcal su emme yüksekliğini) göstermediği görüldü. Ancak, 14 nolu karışımda en yüksek kılcal su emme ve en yüksek kılcal su emme katsayısı şeklinde gözlemlendi. Buradan, geopolimer betonların 1. Kılcal su emme (0-147s) değeri ile birlikte 2. kılcal su emme (294-831s) değerinin de önemli olduğu sonucuna varılabilir. Spesifik olarak, 5 nolu karışımın 2. Kılcal su emme değerinin nispeten daha yüksek gelmesi kılcal su emme yüksekliğinin artmasına sonuç olarak daha fazla kümülatif kılcal su emmesi ile sonuçlandı.



Şekil 5.25. 8. gün kılcal su emme yüksekliği (I=mm)

Bu durumda, çalışmada geopolimer betonların kümülatif kılcal su emme yüksekliğinin bir göstergesi olan 8. Gün kılcal su emme yüksekliği (mm) Şekil 5.25'te verildi. Buna göre, en düşük kılcal su emme yüksekliği 2,003 mm ile 3 nolu karışımda, en yüksek kılcal su emme derinliği ise 4,189 ile 14 nolu karışımda görüldü. Bununla birlikte, kılcal su emme yüksekliği değerlerinin basınç dayanım ve su emme sonuçları ile uyumlu geldiği gözlemlendi. Basınç ve kılcal su emme arasındaki bu ters ilişki daha önce bildirilmiştir (Mehta ve Siddique, 2017).

Tablo 5.13. 1. ve 2. kılcal su emme katsayıları

No	1. Kılcal su emme katsayısı	1. kılcal su emme katsayısı denklemi (mm/s ^{0,5})	2. Kılcal su emme katsayısı	2. kılcal su emme katsayısı denklemi (mm/s ^{0,5})
N1	0,0153	$y = 0,0153x + 1,0508 \quad R^2 = 0,85$	0,0004	$y = 0,0004x + 2,9443 \quad R^2 = 0,95$
N2	0,0119	$y = 0,0119x + 0,3345 \quad R^2 = 0,98$	0,0003	$y = 0,0003x + 2,1748 \quad R^2 = 0,96$
N3	0,0073	$y = 0,0073x + 0,1675 \quad R^2 = 0,99$	0,0003	$y = 0,0003x + 1,7808 \quad R^2 = 0,93$
N4	0,0063	$y = 0,0063x + 0,0933 \quad R^2 = 0,99$	0,0005	$y = 0,0005x + 1,6409 \quad R^2 = 0,86$
N5	0,0042	$y = 0,0042x + 0,089 \quad R^2 = 0,98$	0,0027	$y = 0,0027x + 0,4564 \quad R^2 = 0,95$
N6	0,0061	$y = 0,0061x + 0,1225 \quad R^2 = 0,99$	0,0008	$y = 0,0008x + 1,5934 \quad R^2 = 0,89$
N7	0,0150	$y = 0,015x + 0,6836 \quad R^2 = 0,91$	0,0004	$y = 0,0004x + 2,5859 \quad R^2 = 0,92$
N8	0,0109	$y = 0,0109x + 0,2672 \quad R^2 = 0,98$	0,0003	$y = 0,0003x + 2,2671 \quad R^2 = 0,95$
N9	0,0057	$y = 0,0057x + 0,0852 \quad R^2 = 0,99$	0,0020	$y = 0,002x + 1,3812 \quad R^2 = 0,83$
N10	0,0079	$y = 0,0079x + 0,0561 \quad R^2 = 1,00$	0,0008	$y = 0,0008x + 2,3589 \quad R^2 = 0,67$
N11	0,0087	$y = 0,0087x + 0,3053 \quad R^2 = 0,97$	0,0004	$y = 0,0004x + 2,3206 \quad R^2 = 0,94$
N12	0,0158	$y = 0,0158x + 0,5402 \quad R^2 = 0,95$	0,0003	$y = 0,0003x + 2,6582 \quad R^2 = 0,94$
N13	0,0125	$y = 0,0125x + 0,2129 \quad R^2 = 0,99$	0,0005	$y = 0,0005x + 3,3553 \quad R^2 = 0,91$
N14	0,0240	$y = 0,024x + 0,8032 \quad R^2 = 0,91$	0,0004	$y = 0,0004x + 3,8595 \quad R^2 = 0,93$
N15	0,0074	$y = 0,0074x + 0,1398 \quad R^2 = 0,99$	0,0026	$y = 0,0026x + 1,7604 \quad R^2 = 0,84$
N16	0,0052	$y = 0,0052x + 0,1025 \quad R^2 = 0,99$	0,0030	$y = 0,003x + 0,849 \quad R^2 = 0,88$

5.15.1. Kılcal Su Emme Yüksekliği Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların kılcal su emme derinliği (I=mm) sonuçları Taguchi metodu ile “daha küçük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum

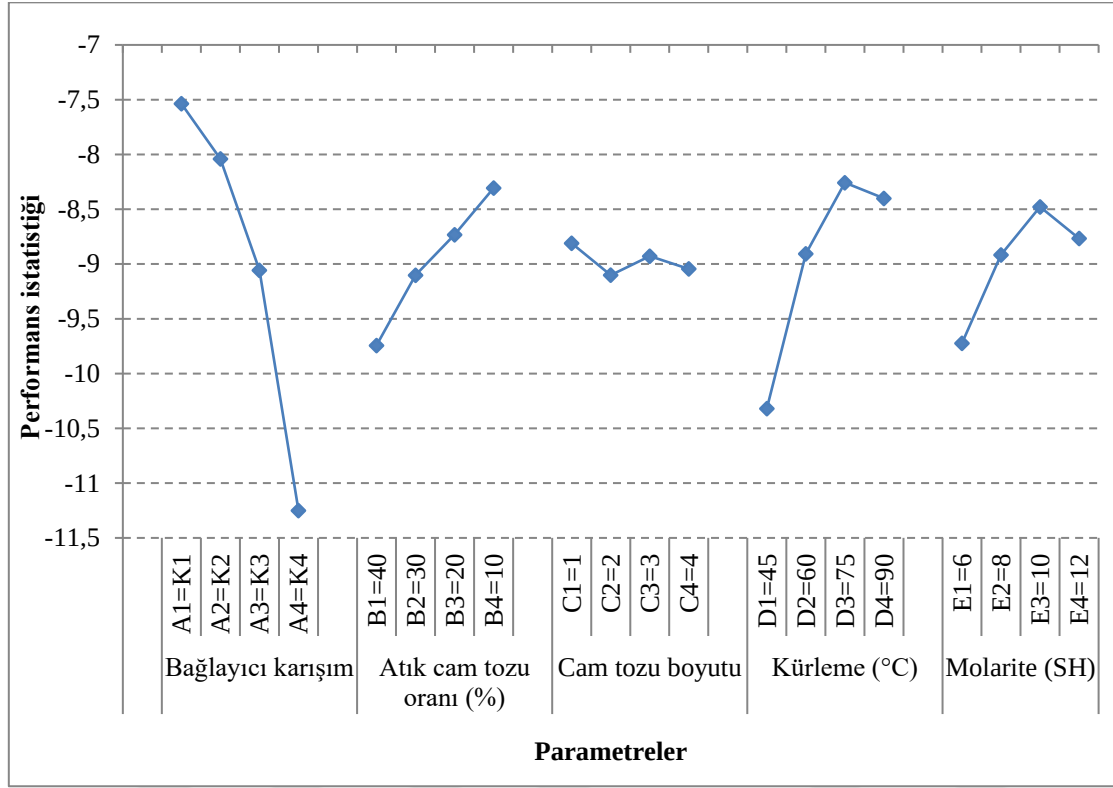
parametreler Şekil 5.26’da verildi. Karışımlarda optimum parametreler $A1=K1$, $B4=10$, $C1=1$, $D3=75$, $E3=10$ şeklinde bulundu. Buna göre, karışımlarda ÖYFC/UK oranının artması ve ACT oranının azalması ile kılcal su emme oranının azaldığı görüldü. Benzer sonuçlar daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir. Bu durum, karışımlardaki ÖYFC içeriğinin artması ile kılcal su emme oranının düşmesi boşluk doldurmada mükemmel olan C-(A)-S-H ve C-N-A-S-H jellerinin meydana gelmesi ile açıklanmıştır (Khan ve diğ., 2021; Zhu ve diğ., 2023). Bununla birlikte, karışımlarda UK içeriğinin artması ile kılcal su emme oranının arttığını bildiren çalışmalarda mevcuttur (Lavanya ve Jegan, 2015). Bu durum ise, UK’nin geopolimerizasyonu sonucu oluşan N-A-S-H jellerinin gözenekli yapısı ile açıklanmıştır (Yang ve diğ., 2014).

Kürleme sıcaklığının 75 °C kadar su emme oranını düşürdüğü 75 °C den sonra su emme oranının arttığı görüldü. Bu durum kürleme sıcaklığının belirli bir seviyeye kadar geopolimerizasyon sürecine olumlu, daha yüksek sıcaklıklarda ise olumsuz etkisine atfedilmiştir. Ayrıca yüksek kürleme sıcaklıklarında oluşan mikro çatlakların kılcal su emme oranını olumsuz etkilediği düşünülmektedir. SH molaritesinin artması da benzer bir durum göstermekte, belirli bir seviyeye kadar artması ile geopolimerizasyon süreci olumlu etkilerken, daha yüksek molaritelerde ise bu durumun tersine döndüğü görüldü. Bu durum, diğer parametrelerde olduğu gibi geopolimerizasyon süreci ile ilgilidir. Artan, geopolimerizasyon reaktivitesi sonucu oluşan yoğun yapılı alüminosilikat jellerin matris yapısını doldurduğu, böylece kılcal su emme oranının azaldığı daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Kanagaraj ve diğ., 2022).

Cam tozu boyutunun genel olarak küçülmesi ile kılcal su emme oranının düşmesi, daha ince cam tozu partiküllerin kısmen daha yüksek reaktiviteye sahip olması ile açıklanabilir. Ancak bu durum net bir şekilde gözlemlenemedi, bu da cam tozu boyutu parametresinin deneye olan etki yüzdesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.14’te geopolimer betonların kılcal su emme derinliği sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, bağlayıcı karışım, kürleme sıcaklığı, % ACT, SH molaritesi ve cam tozu boyutu şeklinde bulundu. Buna göre, en yüksek etkiye sahip olan bağlayıcı karışım değişiminin en yüksek etkiyi yaptığı, basınç dayanımına en yüksek etkiyi yapan kürleme sıcaklığının en yüksek ikinci etkiyi yaptığı açıkça gözlemlendi. Daha önceki çalışmalarda

da bildirilen geopolimer reaksiyonu sonucu oluşan C-A-S-H ve N-A-S-H jellerin gözenek yapısının kılcal su emme oranını daha yüksek oranda etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5.26. Kılcal su emme derinliği (I=mm) sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.14. Kılcal su emme (I=mm) değerleri varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	3,79332	1,26444	66,05%	*	*
% ACT	3	0,48214	0,16071	8,39%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	0,03652	0,01217	0,64%	*	*
Kırılma (°C)	3	1,14492	0,38164	19,93%	*	*
Molarite (SH)	3	0,28657	0,09552	4,99%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	5,74347		100,00%		

5.16. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci

Geopolimer malzemelerdeki alüminosilikat jelin doğası nedeniyle sülfat çözeltileriyle etkileşimi, portland çimentolu malzemelere göre önemli ölçüde farklı olabilir. Çalışmada deney sonuçları, test edilen geopolimer betonların sülfat çözeltilerine maruz kaldıklarında çok farklı dayanıklılıklara sahip olduklarını gösterdi. Literatür incelemesi sonucunda sülfat etkisine maruz bırakılan geopolimer malzemelerin farklı davranışlar sergilediği görüldü. Buna göre, bazı çalışmalarda sülfat etkisi altındaki geopolimer betonların mukavemet ve UPV (m/s) değerlerinde düşmeler olduğu bildirilirken (Özcan, 2018; Uğurlu 2020 ; Elyamany ve diğ., 2018); bazı çalışmalarda mukavemet ve UPV (m/s) değerlerinde artışlar olduğu bildirilmiştir (Yılmazoğlu, 2022 ; Bakharev, 2005, Chakkor ve diğ., 2020 ; Saavedra ve diğ., 2016). Bu çalışmaların ortak bulgusu ise sülfat atağı sonunda geopolimer malzemelerde herhangi bir görsel bozulma olmadığıdır.

Bakharev, (2005) Geopolimer yapıdaki alüminosilikat jelin yapısından dolayı içerisinde Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarını ağ değiştirici katyonlar olarak barındırabildiği ve bu iyonların alüminosilikat jele migrasyonu ile geopolimer numunelerin mukavemetinin arttırdığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, etrenjit oluşumuna bağlı basınç dayanımları düşen numunelerin olduğu da gösterilmiştir. Ayrıca, sülfat atağı sonucu geopolimer betonlarda görsel bir bozulma görülmediği, ancak mikro yapı analizinde, basınç dayanımı artan numunelerde yoğun bir mikro yapı, basınç dayanımı düşen numunelerde ise açık renkli çökelmeler görüldüğünü bildirmiştir. Sonuç olarak, NaOH ve NaOH&KOH ile hazırlanan F sınıfı UK bazlı geopolimer betonların sülfat çözeltisine karşı daha dirençli olduğu ve dayanımlarının arttığı açıklanmıştır.

Magnezyum sülfatın GBP'ler üzerindeki etkisi incelendiğinde, geopolimerizasyon sonucu oluşan N-A-S-H ve C-A-S-H jellerinin düşük mukavemetli M-A-S-H (magnezyum alüminyum silikat hidrat) jellerine dönüşmesiyle GPB'lerin bozulmaya ve dayanım kaybına uğradığı görülmüştür (Long ve diğ., 2017 ; Yang ve diğ., 2022). Ancak, yüksek magnezyum içeren kaynak malzemeler (nikel cürufu, ferrokrom külü/cürufu gibi) ile üretilen geopolimer betonlarda ise N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri ile birlikte magnezyum içeren C-M-A-S-H, N-M-A-S-H ve M-A-S-H jellerinin oluştuğu ve oluşan bu yeni jel fazların jel mikro yapısını yoğunlaştırarak daha kompakt hale getirdiği,

böylece basınç dayanımlarını arttırdığı görülmüştür (Yang ve diğ., 2014 ; Mishra ve diğ., 2022 ; Nath, 2018).

Bu sonuçlara göre, geopolimer beton numunelerin magnezyum sülfat çözeltisi ile etkileşimleri sonucu farklı reaksiyon ürünleri oluştuğu ve bunun sonucu olarak geopolimer malzemelerin farklı davranışlar gösterdiği yorumu yapılabilir.

Geopolimer betonda kimyasal atağa maruziyetin bir sonucu olarak, mikro yapının yoğunlaşması ve basınç dayanımının artması çalışmada daha öncede gösterilmişti. Spesifik olarak, Li ve Li, geopolimer betonda karbonatlaşma sonucu mikro yapının yoğunlaştığını ve basınç dayanımının arttığını bildirmiştir. Kupwade-Patil ve Allouche, 1 M NaOH çözeltisine maruz bırakılan geopolimer betonda yaklaşık %58 lik basınç dayanım artışı olduğunu göstermiştir (Li ve Li, 2018 ; Kupwade-Patil ve Allouche, 2013). Buna göre, GBP'lerin kimyasal maruziyet etkisinde PCB'ye kıyasla farklı davranışlar sergileyebileceği görülmektedir. Bununla birlikte, kimyasal maruziyet sonucu GPB'lerin genellikle görsel bir bozulma göstermemesi, GPB'lerde, PCB'lerde oluşan arayüzey bölgesinin oluşmaması ile ilgili olabilir.

Geopolimer betonların sülfat atağı direnci için yapılan UPV (m/s) ve ağırlık değerleri Şekil 5.27'de ve Şekil 5.28'de gösterildi. Ayrıca, 1., 2. ve 3. Aylardaki UPV (m/s) değişim yüzdesi Şekil 5.29'da verildi. Bununla birlikte, sülfat atağına maruz kaldıktan sonraki basınç dayanım değişimi sonuçları Şekil 5.30'da verildi. Bu sonuçlara göre:

Sülfat çözeltisine bırakılan tüm geopolimer betonlarda UPV (m/s) artışı gözlemlendi. UPV (m/s) artışlarının beton gözeneklerini dolduran magnezyum sülfat çözeltisi ve geopolimer betonların artan geopolimerizasyon veya farklı reaksiyonların aktivitesi sonucu oluşan yoğun yapılı jellerden kaynaklı olabileceği tahmin edilmektedir. UPV (m/s) değişim yüzdesi ve basınç dayanım değişimi sonuçları birlikte incelendiğinde, en yüksek UPV (m/s) artışını gösteren numunelerdeki pozitif basınç dayanım değişiminin, geopolimer betondaki devam eden polimerizasyonun bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Ancak çalışmada, bu durum tek başına açıklayıcı değildir. Örneğin, UPV (m/s) artışı göstermesine rağmen basınç dayanımlarını negatif yönde değişen numunelerde vardır. Bu durum, sülfat çözeltisinin tüm numunelerin içine nüfuz etmesi ile açıklanabilir.

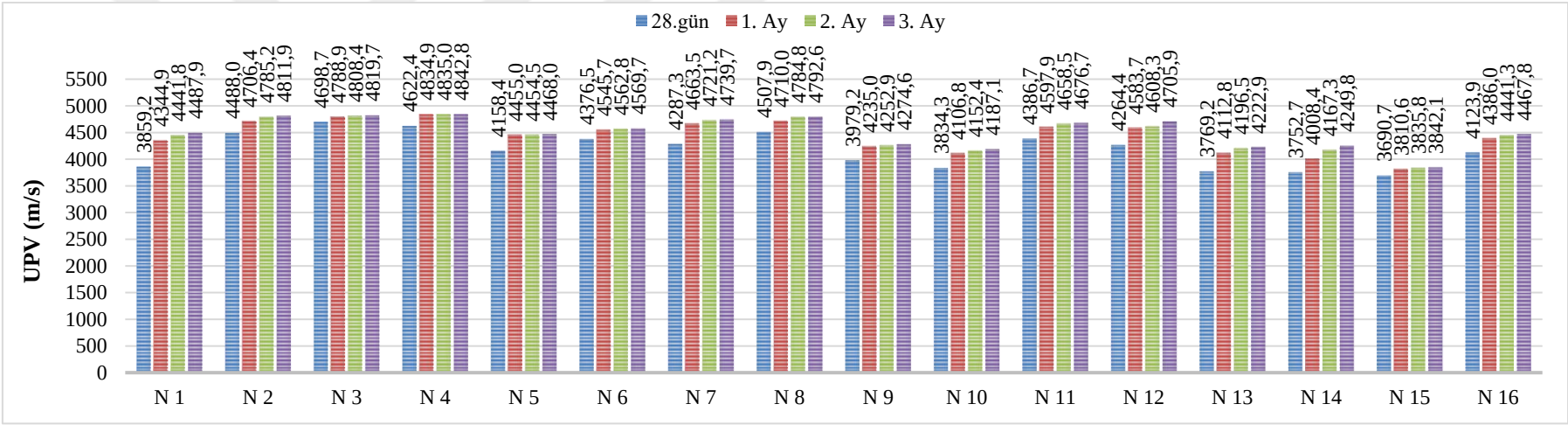
Güneyli ve diğ., (2017) betondaki su içeriğinin UPV (m/s) değerlerini lineer olarak arttırdığını bildirmiştir. Bununla birlikte, sülfat atağı sonucu geopolimer betonlar üzerinde yapılan görsel inceleme sonucu herhangi bir bozulma, renk değiştirme, pullanma veya çatlama görülmedi. Geopolimer betonların henüz görsel bir bozulmaya neden olmayacak kadar sülfat atağına maruz kalması UPV (m/s) sonuçlarını bir miktar arttırmış olsa da mikro yapılardaki değişimin beton basınç dayanımını negatif yönde değiştirdiği söylenebilir.

Ayrıca, basınç dayanım değişimleri incelendiğinde, negatif değişim gösteren numunelerin tamamının nispeten daha yüksek sıcaklıkta (75 ve 90 °C) kürlenmiş olması tesadüf değildir. Buradan, yüksek sıcaklıklarda kürlenme ile geopolimerizasyon sürecinin nispeten tamamlandığı, sülfat çözeltisine bırakılan numunelerde yeni reaksiyonların oluşmadığı ve oluşmuş jel yapıların sülfat etkisiyle değiştiği yorumu yapılabilir. Daha önceki çalışmalarda dayanımdaki negatif değişimler, sülfat çözeltisine maruz bırakılan geopolimer betonlarda Na^+ iyonlarının yer değiştirmesine bağlı olarak dikey çatlaklar meydana gelmesi ve geopolimer jeldeki Si-O-Si bağların zayıflaması ile açıklanmıştır (Zhuang ve diğ., 2016 ; Bakharev 2005).

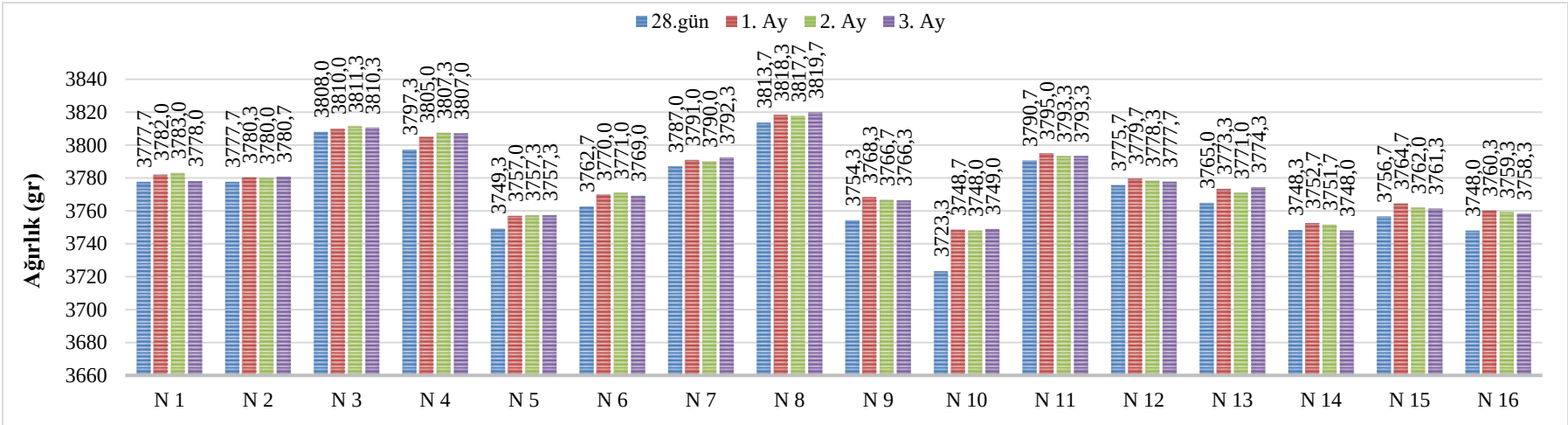
Çalışmada, geopolimer betonların ağırlık artışları incelendiğinde, genel olarak 1. Ay'a kadar ağırlık artışları görülürken, daha sonra kısmi düşmeler gözlemlendi. 3. Ayın sonunda, en fazla ağırlık artışı 10 nolu karışımda görülürken, en düşük ağırlık artışı ise 14 nolu karışımda görüldü. Sülfat çözeltisine daldırılan geopolimer betonlarda gerçekleşen durum şu olabilir: daldırmayla beraber sülfat çözeltisi beton numunelerin gözeneklerini doldurmuş ve farklı reaksiyonların oluşmasına yol açarak ağırlık artışına sebep olmuş olabilir.

Ayrıca, ağırlık artışlarındaki kısmi düşmeler için, geopolimerizasyon sonucunda oluşan yoğun yapılı jellerin matris yapısını doldurarak, sülfat çözeltisinin geopolimer betondan dışarı atılmasına sebep olduğu söylenebilir.

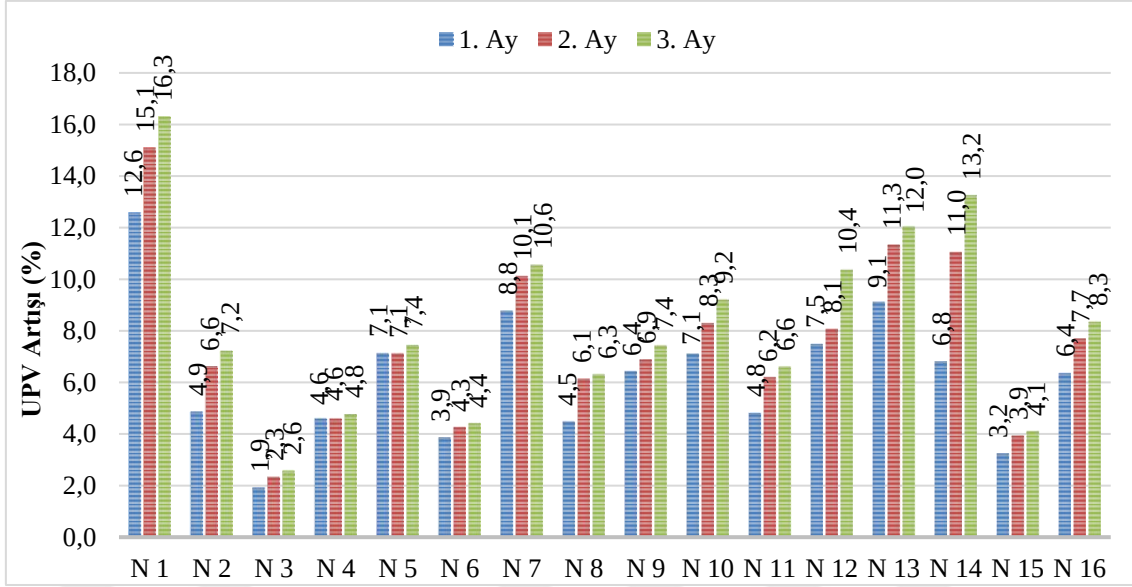
Ağırlık değişimi, UPV (m/s) değişimi ve basınç dayanım değişimleri incelendiğinde, yüksek oranda ağırlık değişimleri gösteren numunelerde daha düşük UPV (m/s) artışı ve negatif basınç dayanım değişimleri görülürken; düşük oranda ağırlık değişimleri gösteren numunelerde daha yüksek UPV (m/s) artışları ve pozitif dayanım değişimleri görüldü.



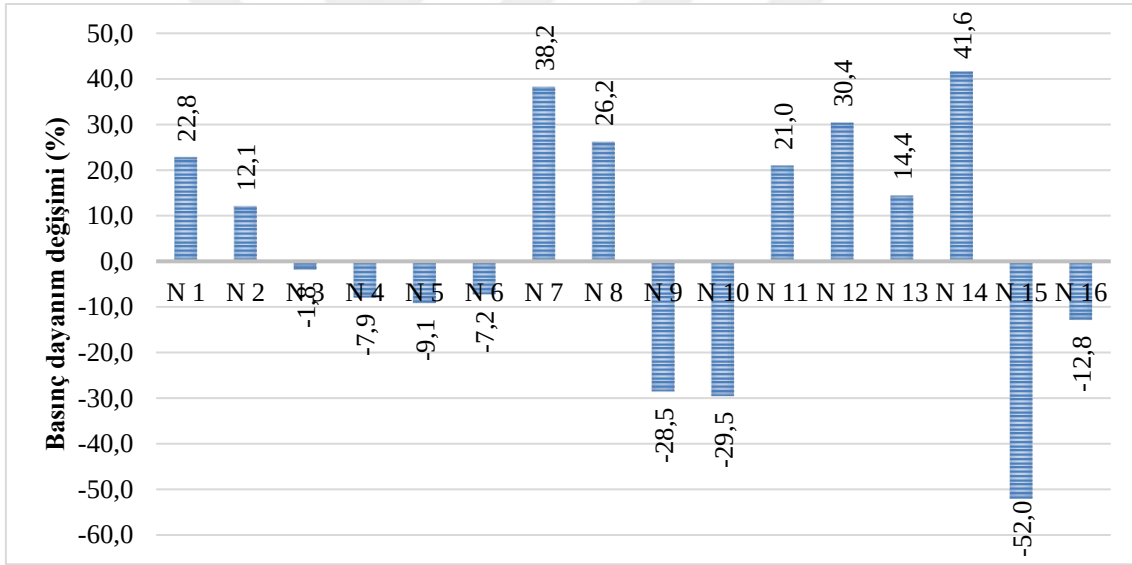
Şekil 5.27. Geopolimer betonların sülfat etkisi altında UPV (m/s) sonuçları



Şekil 5.28. Geopolimer betonların sülfat etkisi altında ağırlık (gr) sonuçları



Şekil 5.29. Geopolimer betonların sülfat etkisi altında aylara göre UPV (m/s) değişim grafiği

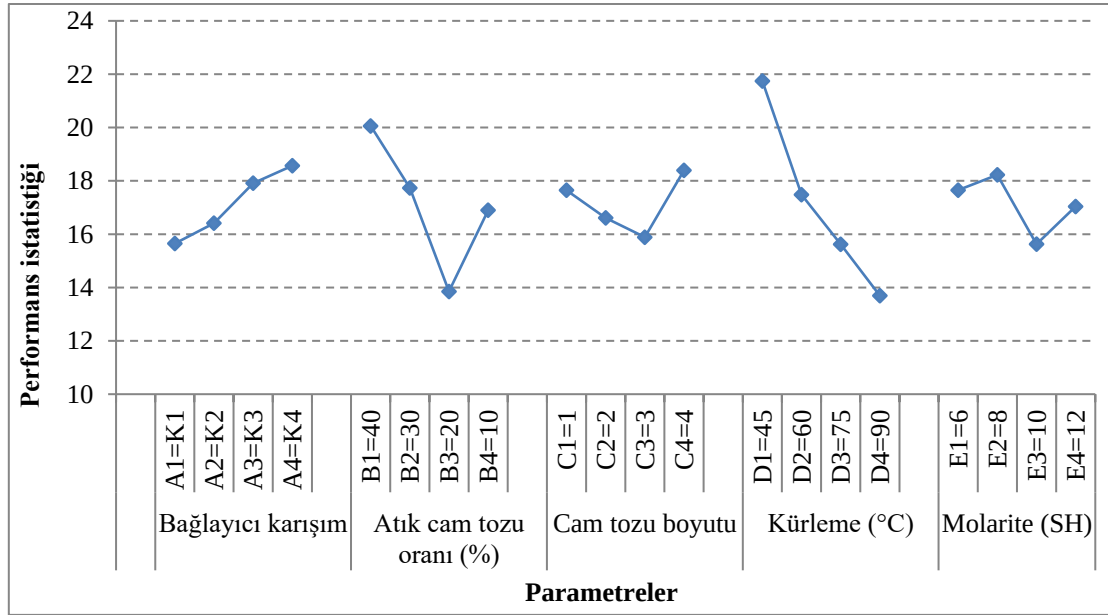


Şekil 5.30. Geopolimer betonların sülfat etkisi altında basınç dayanım değişim grafiği

5.16.1. Magnezyum Sülfat Atağı Direnci Sonuçlarına Ait performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların 3. Ay %UPV (m/s) değişimi değerleri Taguchi metodu ile “daha büyük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.31’de verildi. Karışımlarda optimum parametreler A4=K4, B1=40, C4=4, D1=45, E2=8 olarak bulundu. Bununla birlikte, geopolimer beton karışımların 3. Ay Değişim UPV (m/s) değerlerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 5.15’te verildi. Varyans analizi

sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekten düşüğe, kürlenme sıcaklığı, ACT oranı, cam tozu boyutu, bağlayıcı karışım ve SH molaritesi şeklinde bulundu. Buna göre, en yüksek etkiyi yapan kürlenme sıcaklığının azalması sürekli şekilde magnezyum sülfat direncini arttırdığı, en yüksek ikinci etkiyi yapan ACT oranının artması genel olarak magnezyum sülfat direncini arttırdığı gözlemlendi.



Şekil 5.31. 3. ay % UPV (m/s) değişim sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması (UK içeriğinin artması) ile oluşan geopolimer reaksiyon ürünlerinin C-A-S-H jellerden daha çok N-A-S-H jellerine kaydığı daha önce açıklanmıştı. Bu durumda, N-A-S-H jellerinin kalsiyum içeren C-A-S-H jellerine kıyasla sülfat atağına karşı daha dirençli olduğu ve UK varlığında yeni geopolimer reaksiyonların oluşmasının sülfat etkisine karşı direnci arttırdığı tahmin edilmektedir. Daha önceki bir çalışmada sülfat çözeltisindeki SO_4^{2-} iyonu ile C-A-S-H jeli arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda etrenjit oluşumunun meydana geldiği, N-A-S-H'in yapısı daha kararlı bir yapı gösterdiği bildirilmiştir (Yi ve diğ., 2023). Benzer yorum ACT oranının artması ile karışımlarda artan silisyum, azalan kalsiyum içeriği içinde yapılabilir (İdir ve diğ., 2020).

Bununla birlikte, ÖYFC'ye göre daha düşük reaktivite gösteren UK'nin sülfat çözeltisi içerisinde reaksiyon sürecinin devam ettiği düşünülmektedir. Ayrıca varyans analizi tablosuna göre, en yüksek birinci ve ikinci etkiyi yapan kürlenme sıcaklığı ve ACT oranı

parametrelerinin basınç dayanım sonuçlarına kıyasla zıt bir görüntü vermesi, basınç dayanım sonuçları düşük gelen geopolimer betonların, sülfat maruziyeti sonrası basınç dayanımlarındaki pozitif değişim bu düşüncüyü güçlendirmektedir. Bu durumda, nispeten reaksiyonunu tamamlamış geopolimer betonların sülfat çözeltisinden olumsuz, reaksiyonunu tamamlamamış geopolimer betonların ise sülfat çözeltisinden olumlu etkilendiği yorumu yapılabilir. Ancak bu durum her zaman geçerli olmayabilir.

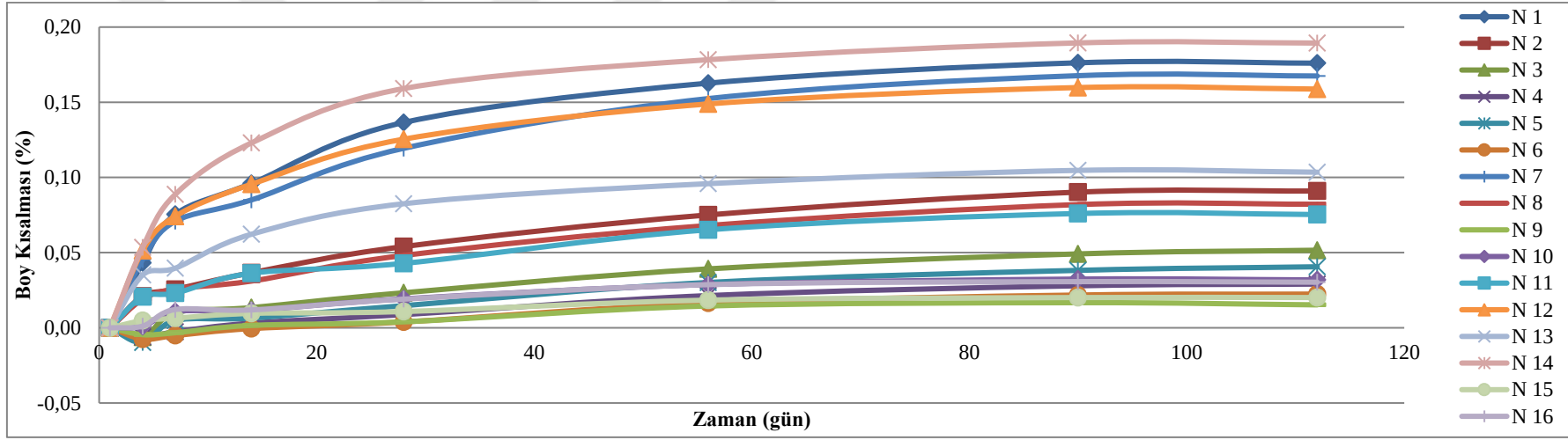
Tablo 5.15. 3. ay değişim UPV (m/s) değerleri varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	11,240	3,747	5,62%	*	*
% ACT	3	49,607	16,536	24,83%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	11,730	3,910	5,87%	*	*
Kürleme (°C)	3	121,599	40,533	60,85%	*	*
Molarite (SH)	3	5,649	1,883	2,83%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	199,825		100,00%		

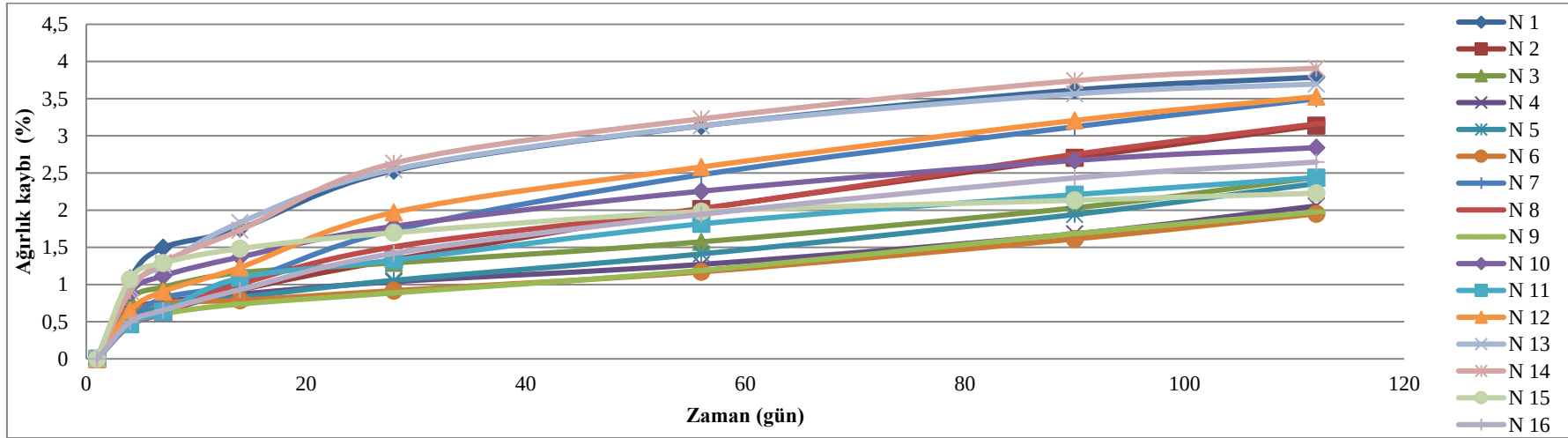
5.17. Rötire (Büzülme)

Geopolimer harçların zamana bağlı rötire (büzülme) ve zamana bağlı ağırlık değişimi sonuçları sırasıyla Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te gösterildi. 112. Gün değerlerine göre, en düşük boy kısalması %0,015 (41 mikrostrain) 9 nolu karışımda görülürken en yüksek boy kısalması %0,189 (504 mikrostrain) ile 14 nolu karışımda görüldü. Genel olarak rötire sonuçlarının, Deb ve diğ, (2015) 180 günlük rötirede GBP'ler için belirttiği 482 ila 722 mikrostrain, PÇB'ler için belirttiği 562 mikrostraine göre çok daha düşük geldiği söylenebilir. Bununla birlikte, ilk günlerde 3, 4, 5, 6 ve 9 nolu karışımlarda kısmi genleşmeler gözlemlendi. Bu karışımların yüksek sıcaklıkta kürlenmesi, bu durumun sıcaklıkla meydana gelen büzülmenin bir miktar genleşme gösterdiği, sonrasında yerini otojen ve kuruma büzülmesine bıraktığı şeklinde yorumlanabilir. Genel olarak tüm karışımların 90 günde boy kısalmalarının tamamlandığı, 90 günden sonra önemli bir değişimin olmadığı gözlemlendi.

Zamana bağlı ağırlık değişimi grafiği incelendiğinde genel bir ağırlık kaybı gözlemlendi. Spesifik olarak, ilk yaşlarda ağırlık hızlı bir ağırlık kaybı görülürken ilerleyen yaşla ağırlık kaybının azaldığı görüldü. Buna göre, rötire sonuçları ile uyumlu bir şekilde, en düşük ağırlık kaybı %1,98 ile 9 nolu karışımda, en yüksek ağırlık kaybı %3,91 ile 14 nolu karışımda görüldü.



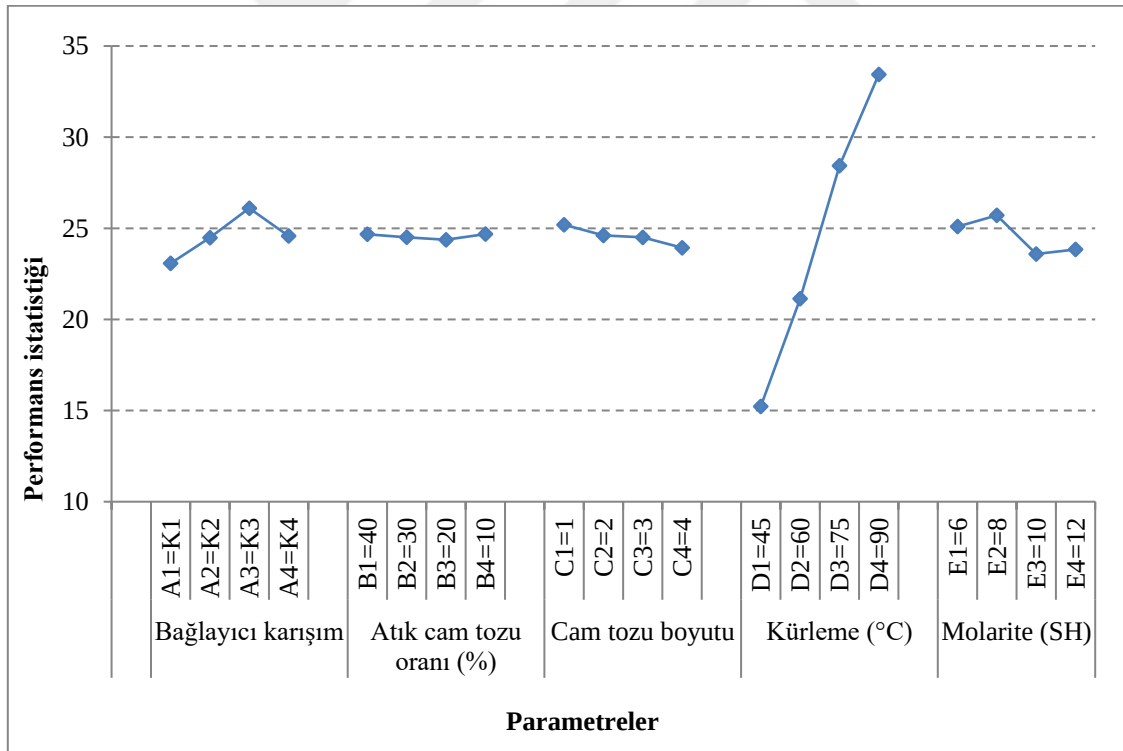
Şekil 5.32. Geopolimer harçların zamana bağlı (%) boy kısalması grafiği



Şekil 5.33. Geopolimer harçların zamana bağlı (%) ağırlık kaybı grafiği

5.17.1. Rötire (Büzölme) Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer harçların 112. Gün rötire değerleri Taguchi metodu ile “daha küçük daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.34’te verildi. Karışımlarda optimum parametreler A3=K3, B4=10, C1=1, D4=90, E2=8 olarak bulundu. Bununla birlikte, geopolimer beton karışımların 112. Gün rötire sonuçlarına ait varyans analizi sonuçları Tablo 5.16’da verildi. Varyans analizi sonuçlarına göre parametrelerin etki sırası yüksekte düşüğe, kürlenme sıcaklığı, %ACT, Cam tozu boyutu, bağlayıcı karışım ve molarite (SH) olarak bulundu. Varyans analizi sonuçları incelendiğinde, en yüksek etkiyi %97,63 ile kürlenme sıcaklığının yaptığı, diğer parametrelerin ise önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlendi. Literatür bulgularının aksine karışımlarda UK içeriğinin artması ile rötire değerlerinin azalması bu düşük etkiden kaynaklanıyor olabilir.



Şekil 5.34. 112. gün % boy kısalması sonuçları performans istatistiği-parametreler grafiği

Karışımların optimum parametreler ve varyans analizi sonuçlarının etkileri zamana bağlı boy değişimi grafiğinde açıkça görülmektedir. Buna göre, zamana bağlı boy kısalması grafiği incelendiğinde, 45 °C kürlen, 60 °C kürlen ve 75&90 °C kürlen karışımlar

olarak açık bir şekilde ayrıldığı gözlemlendi. En düşük rötre sonuçlarının 75&90 °C’de kürlenmiş karışımlarda geldiği, 90 °C’den 75 °C’ye sıcaklığın düşmesi ile sonuçların çok değişmediği, ancak daha düşük sıcaklıklara gelindiğinde sonuçların bariz şekilde değiştiği görüldü. Benzer durum zamana bağlı ağırlık değişimi grafiğinde gözlemlendi. Burada da sıcaklığın düşmesi ile ağırlık kaybı değerlerinin yükseldiği görüldü.

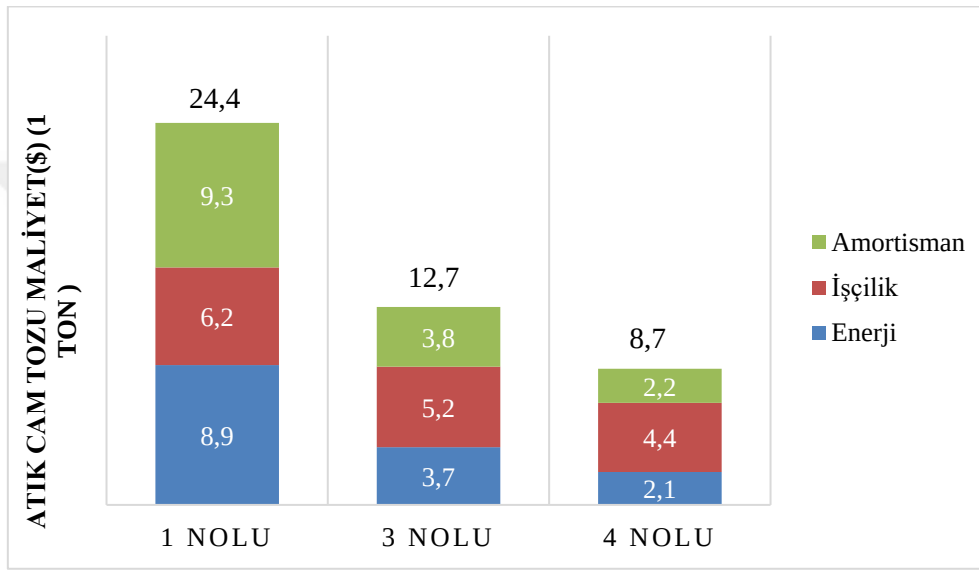
Tablo 5.16. 112. gün % boy kısalması değerleri varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	0,07219	0,02406	1,28%	*	*
% ACT	3	0,02187	0,00729	0,39%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	0,02018	0,00673	0,36%	*	*
Kürleme (°C)	3	5,52370	1,84123	97,63%	*	*
Molarite (SH)	3	0,01994	0,00665	0,35%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	5,65788		100,00%		

5.18. Maliyet Analizi

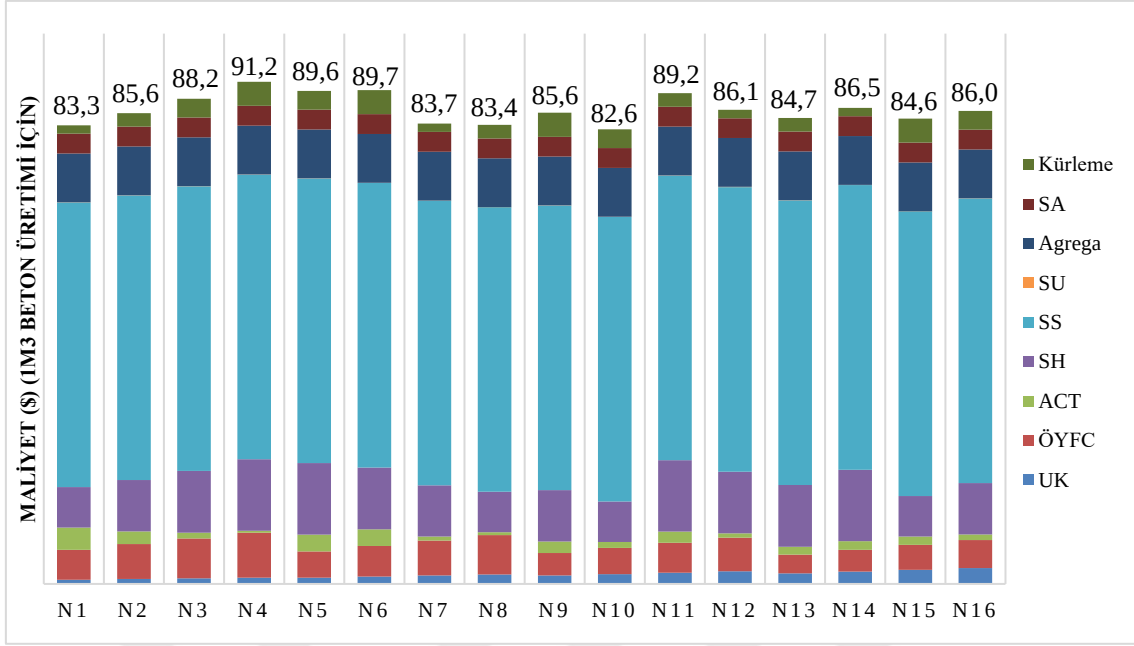
Bu bölümde üretilen geopolimer betonların maliyet analizleri yapıldı. Bununla birlikte, geopolimer karışımlarda kullanılan ve çalışmanın önemli bir bileşeni olan atık cam tozunun maliyetlerinin olması gerekenden çok daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi atık cam tozunun daha henüz hazır beton tesisi (HBT) için yeterli oranlarda üretilmemesidir. Artan cam üretimine bağlı olarak artan atık cam miktarı ve cam tozunun öneminin anlaşılması sebebiyle atık cam tozunun, beton ve geopolimer beton uygulamalarında kullanımının artması beklenilmektedir. Bu sebeple, çalışmada yenilikçi bir yaklaşım olarak atık cam tozunun HBT için maliyet analizi yapıldı. Bunun için, atık cam tozu üretimi için gerekli olan temel maliyetler esas alındı. Bu temel maliyetler esas olarak, amortisman, işçilik giderleri ve enerji tüketiminden oluşmaktadır. Amortisman maliyeti, cam tozu üretiminde kullanılan bilyalı değirmen, havalandırma sistemi ve titreşimli elek ekipmanlarının 5 yıllık üretim sürecinde 1 ton cam tozu başına olan maliyeti ifade etmektedir. Kullanılan enerji ve işçilik maliyetleri ise 1 ton cam tozu için

gerekli olan enerji ve işçilik giderlerini göstermektedir. Benzer hesaplamalar daha önceki bir çalışmada da yapılmıştır (Kılıçoğlu, 2013). Ayrıca, bu hesaplamaların orta ölçekli bir tesise göre yapıldığı, daha büyük ölçekli üretim kapasitesine sahip tesislerin kurulması ile maliyetlerin daha da düşeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bilgiler ışığında hesaplanan ton başına atık cam tozu maliyeti Şekil 5.35'te gösterildi. Buna göre, en yüksek maliyet 24,4 dolar ile 1 nolu cam tozunda görülürken, bunu 12,7 dolar ile 3 nolu, 8,7 dolar ile 4 nolu cam tozları izlemektedir.

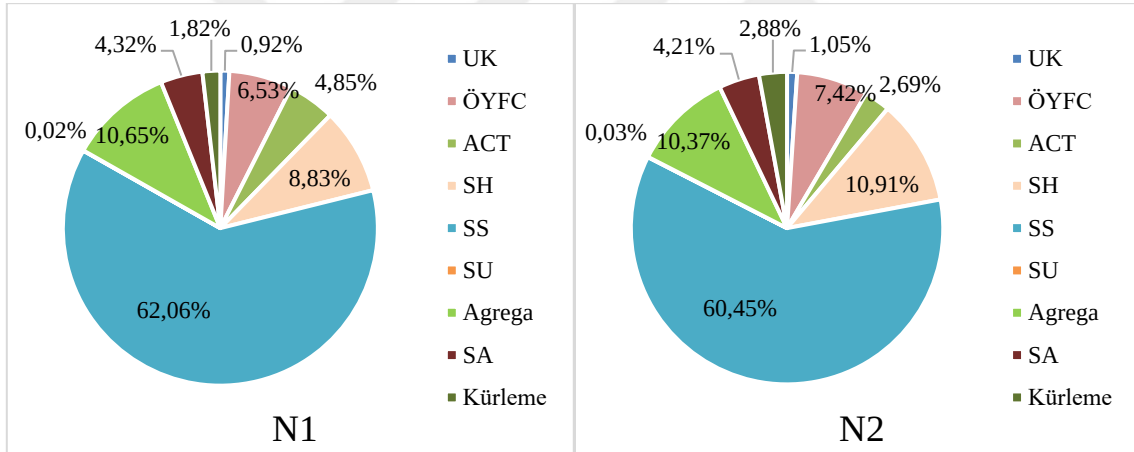


Şekil 5.35. Atık cam tozunun ton başına maliyeti (\$)

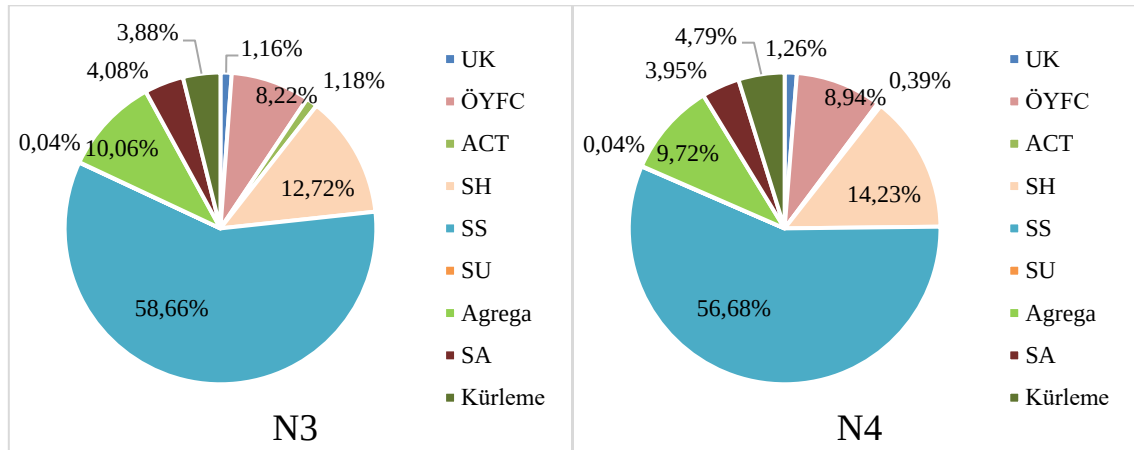
Geopolimer beton karışımların 1 m³'ü için yapılan maliyet analizi sonuçları Şekil 5.36'da gösterildi. 1 m³ geopolimer betonun maliyeti, karışımlarda kullanılan ÖYFC, UK, ACT, agregalar, sodyum hidroksit çözeltisi, sodyum silikat çözeltisi, toplam su, süper akışkanlaştırıcı malzemelerinin fiyatı ve kürlenme işleminin maliyeti dikkate alınarak hesaplandı. Bulgulara göre, geopolimer betonları maliyeti 82,6 ile 91,2 dolar arasında değişmektedir. Bu sonuçlardan, geopolimer betonlar arasında önemli bir fiyat farkının olmadığı söylenebilir. Bu durum, karışım maliyetinin yaklaşık %70-75'ini oluşturan alkali çözeltilerden (SS ve SH) kaynaklanmaktadır. Karışımlarda toplam maliyetin kaynak malzemeler yaklaşık % 8-12'sini, kürlenme işlemi yaklaşık % 2-5'ini, agregalar yaklaşık % 10'unu, süper akışkanlaştırıcı yaklaşık % 4'ünü, toplam su ise yaklaşık % 0,03'ünü oluşturmaktadır. Karışımlarda kullanılan malzemelerin ve kürlenme sıcaklığının toplam maliyete etkisi detaylı bir şekilde sırasıyla Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te gösterildi.



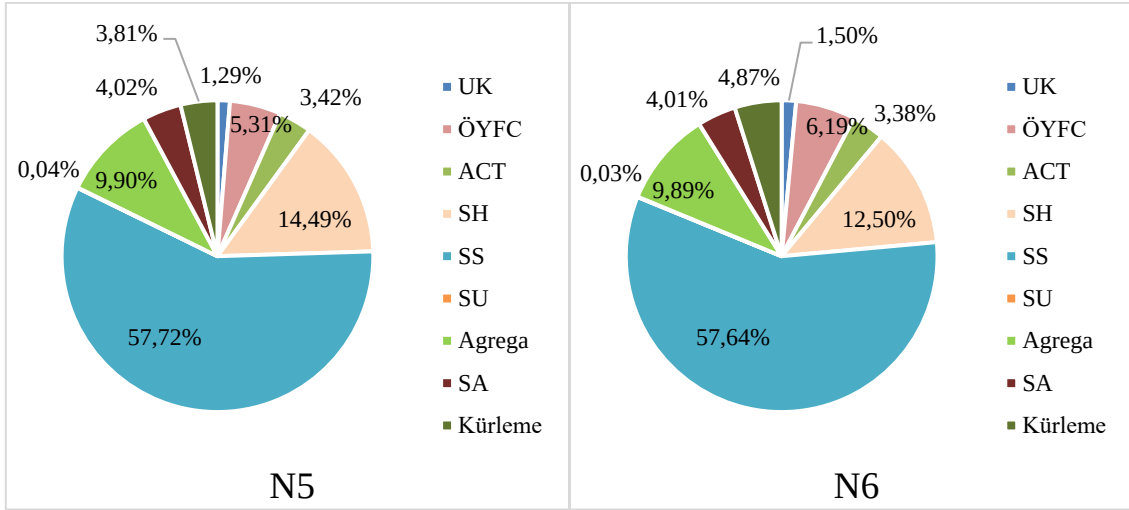
Şekil 5.36. Geopolimer betonun üretim maliyeti (\$/m³)



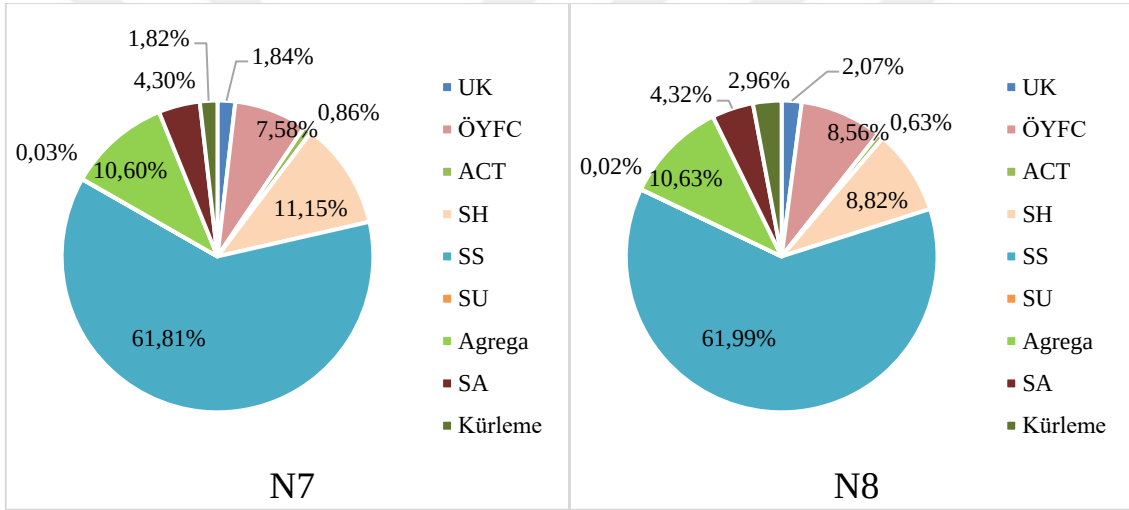
Şekil 5.37. 1 nolu ve 2 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%)



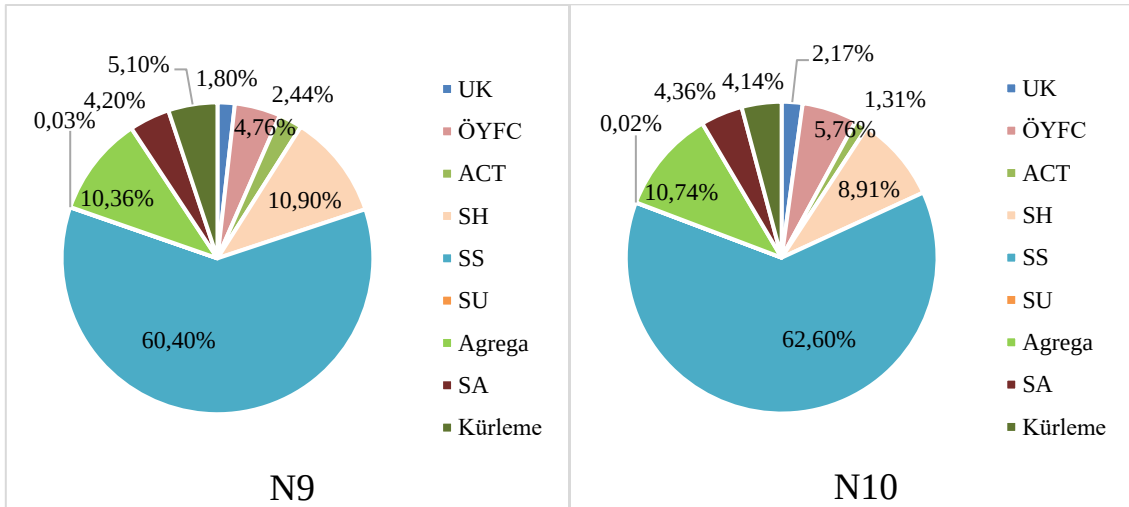
Şekil 5.38. 3 nolu ve 4 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%)



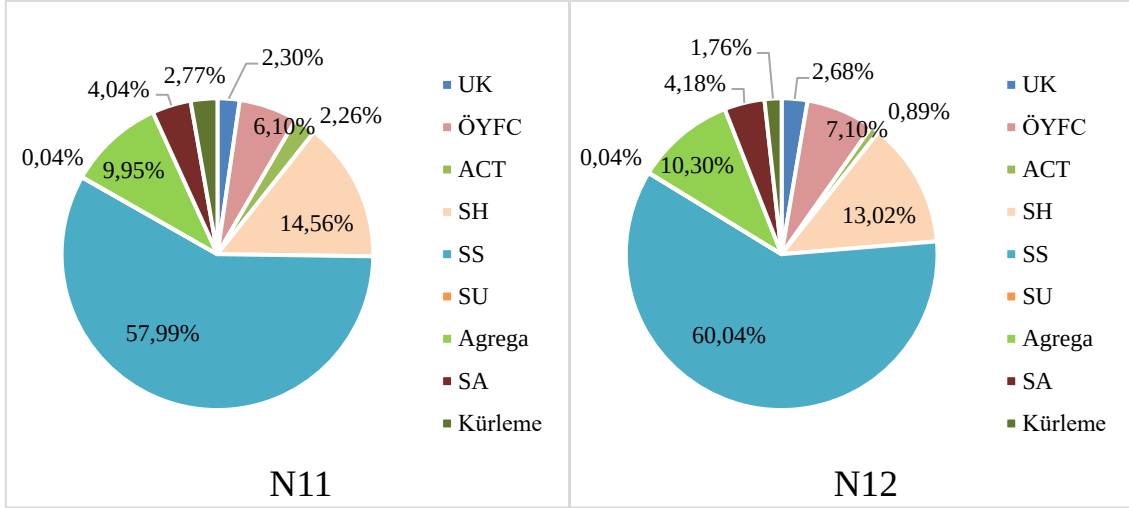
Şekil 5.39. 5 nolu ve 6 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%)



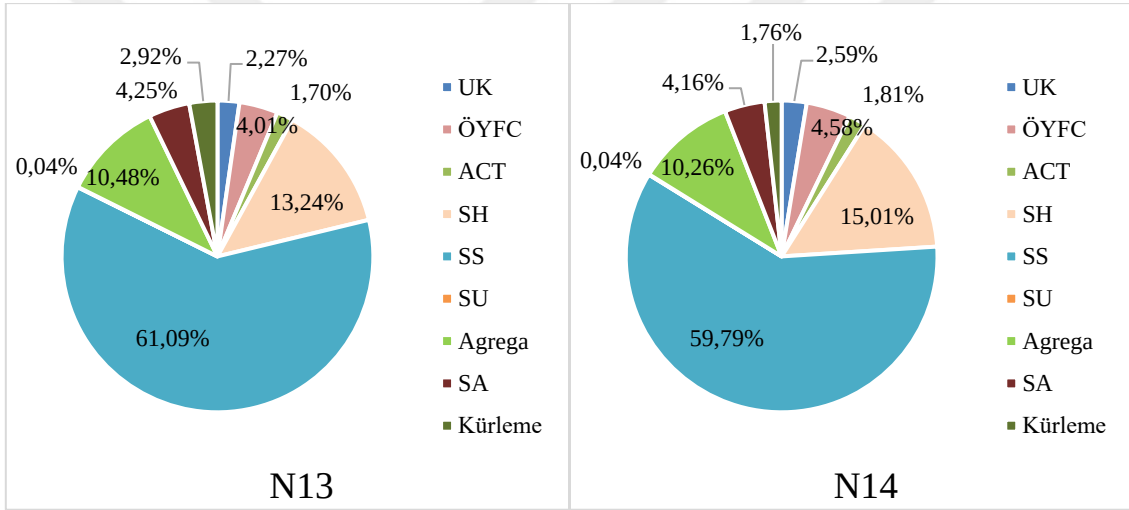
Şekil 5.40. 7 nolu ve 8 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%)



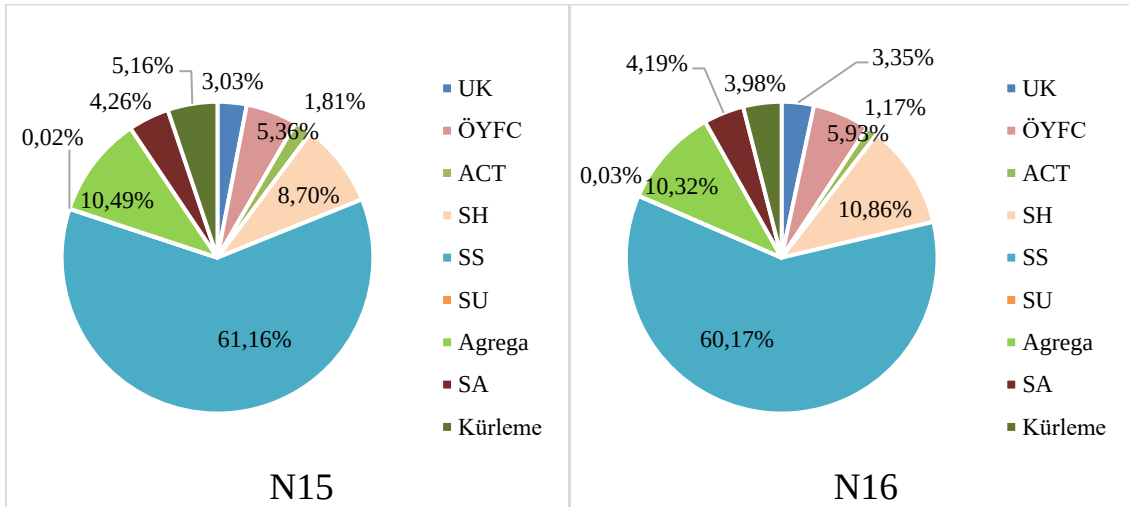
Şekil 5.41. 9 nolu ve 10 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi (%)



Şekil 5.42. 11 nolu ve 12 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi(%)



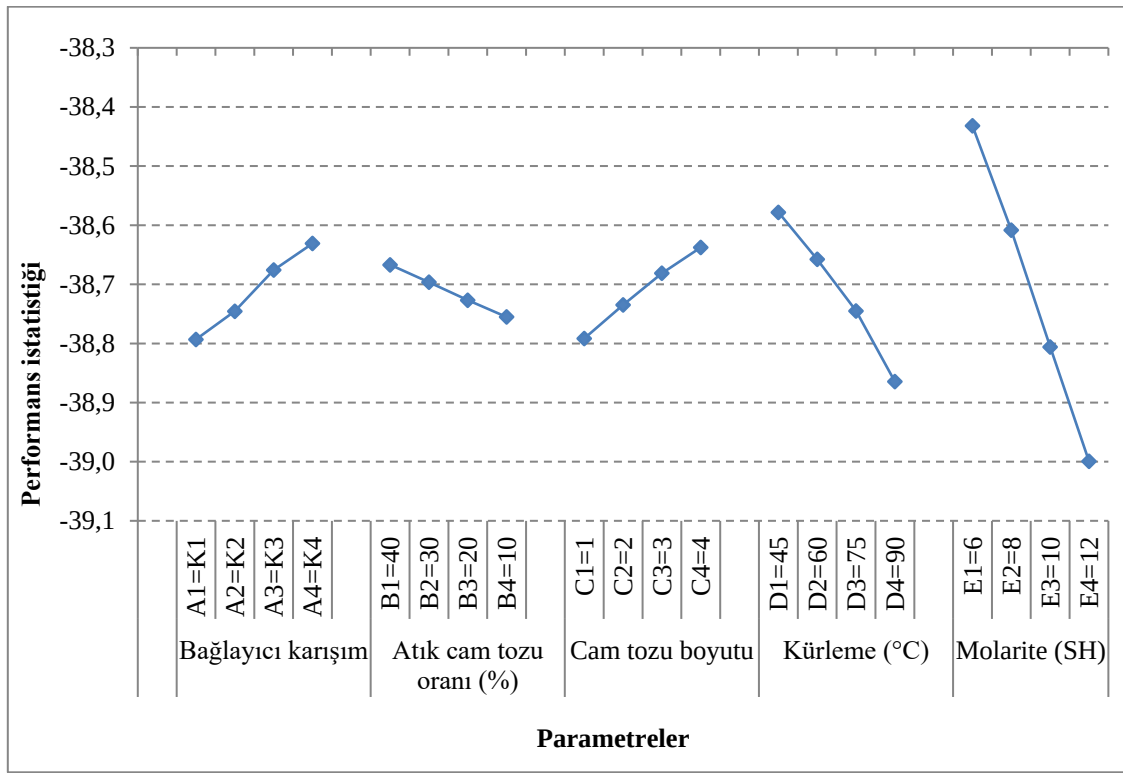
Şekil 5.43. 13 nolu ve 14 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi(%)



Şekil 5.44. 15 nolu ve 16 nolu karışımların bileşenlerinin üretim maliyetine olan etkisi(%)

5.18.1. Maliyet Analizi Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların maliyet analizi değerleri Taguchi metodu ile “daha küçük olan daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.45’te verildi. Karışımlarda optimum parametreler A4=K4, B1=40, C4=4, D1=45, E1=6 olarak bulundu. Buna göre karışımlarda ÖYFC/UK oranının artması, ACT oranının azalması, cam tozu boyutunun büyümesi ve kürleme sıcaklığının düşmesi sürekli olarak maliyeti düşürmektedir.



Şekil 5.45. Maliyet hesapları performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.17’de maliyet analizi değerlerine ait varyans analizi sonuçları verildi. Buna göre en yüksek etkiyi yüksekten düşüğe sırasıyla Molarite (SH), kürleme sıcaklığı, bağlayıcı karışım, cam tozu boyutu ve ACT oranı şeklinde bulundu.

Burada, %69,37 ile en yüksek etkiyi SH molaritesi, en yüksek 2. etkiyi %17,67 ile kürleme sıcaklığının yaptığı, diğer parametrelerin önemli bir etkisinin olmadığı görüldü. Molaritenin nispeten düşük oranlarda değişmesine rağmen en yüksek etkiyi yapması SH’in yüksek maliyetinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.17. Maliyet hesapları varyans analizi

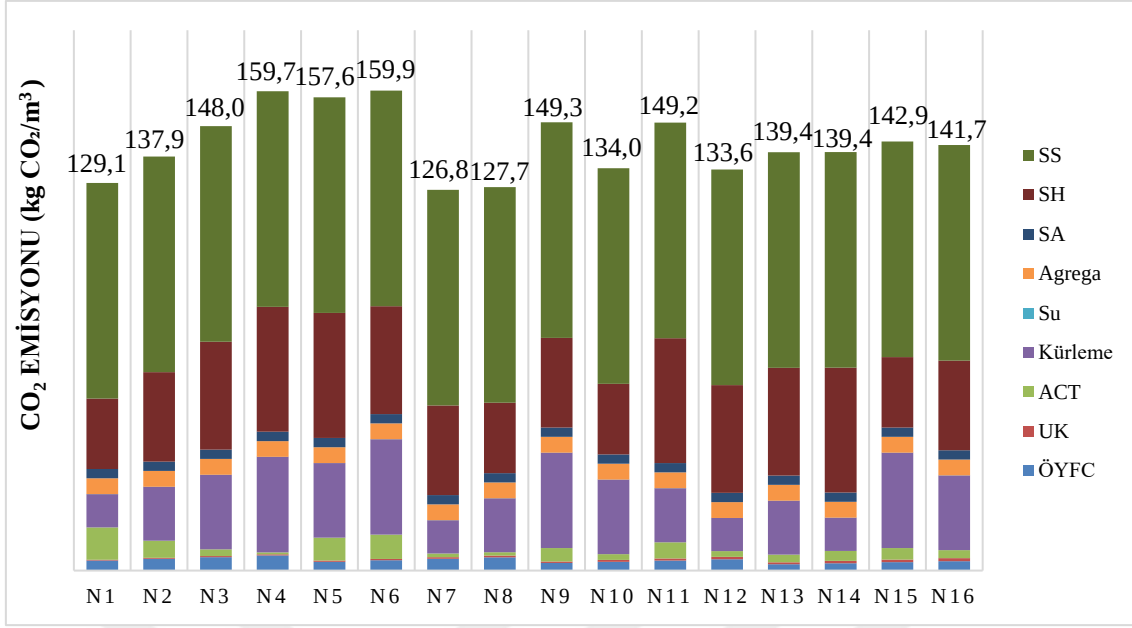
Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	6,514	2,1712	6,30%	*	*
% ACT	3	1,754	0,5848	1,70%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	5,130	1,7100	4,96%	*	*
Kürleme (°C)	3	18,263	6,0878	17,67%	*	*
Molarite (SH)	3	71,699	23,8995	69,37%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	103,360		100,00%		

5.19. CO₂ Emisyonu

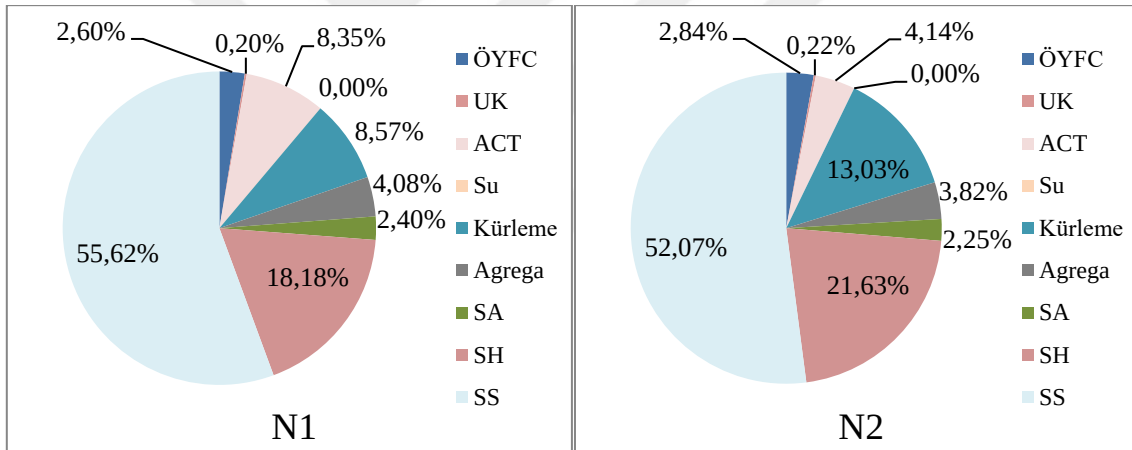
Bu bölümde geopolimer betonların tahmini olarak yaklaşık CO₂ emisyonu analizleri yapıldı. Bunun için 1m³ geopolimer beton üretiminin CO₂ emisyonu için, betonda kullanılan ÖYFC, UK, ACT, agregalar, sodyum silikat, sodyum hidroksit, toplam su ve süper akışkanlaştırıcı malzemelerinin ve kürleme işleminin eşdeğer CO₂ emisyon değerleri göz önüne alınarak hesaplandı. Hesaplanan CO₂ emisyon değerleri Şekil 5.46’da verildi. Buna göre geopolimer betonların üretimi için açığa çıkan CO₂ emisyon değerleri 126,8 kgCO₂/m³ ile 159,9 kg CO₂/m³ arasında bulundu. Bununla birlikte, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve kür işlemi, CO₂ emisyonunun en büyük payını oluşturmaktadır.

Geopolimer beton üretimi için açığa çıkan CO₂ emisyonunun detaylı analizi sırasıyla Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54’te gösterildi. Bulgura göre, toplam emisyonda SS yaklaşık %48-57 oranında, SH yaklaşık 18-30, kür işlemi yaklaşık %8-22, kaynak malzemeler yaklaşık %4-11, agregalar yaklaşık %4, SA yaklaşık %2 paya sahiptir.

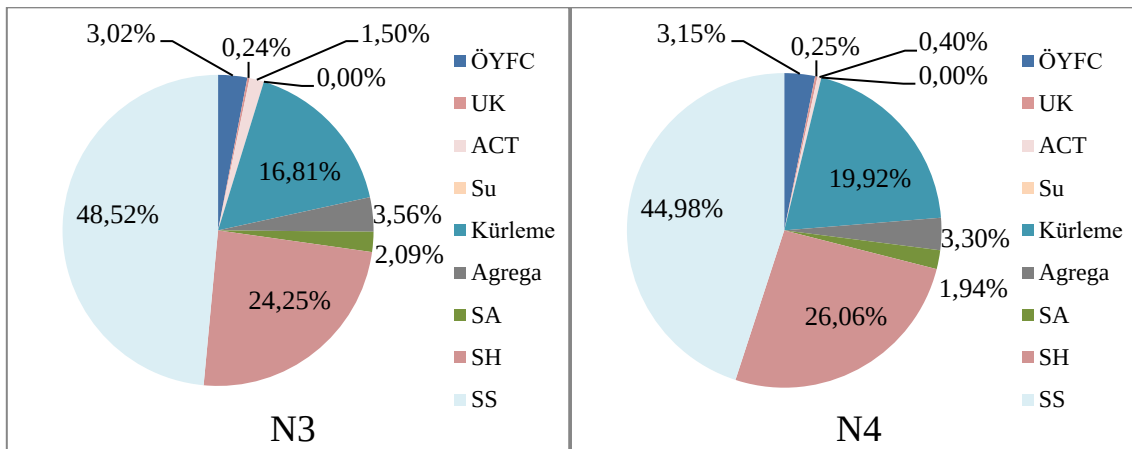
Ayrıca, aktivatörlerin toplam katkısı yaklaşık %80’e kadar çıkabilmektedir. Bununla birlikte, geopolimer betonun %75’ni agregalar oluşturmalarına rağmen, en yüksek payın alkali aktivatörlere ait olduğu görüldü. Maliyet analizine benzer şekilde, CO₂ emisyonunun da en önemli bileşenlerinin alkali aktivatörler olduğu bulunmuştur.



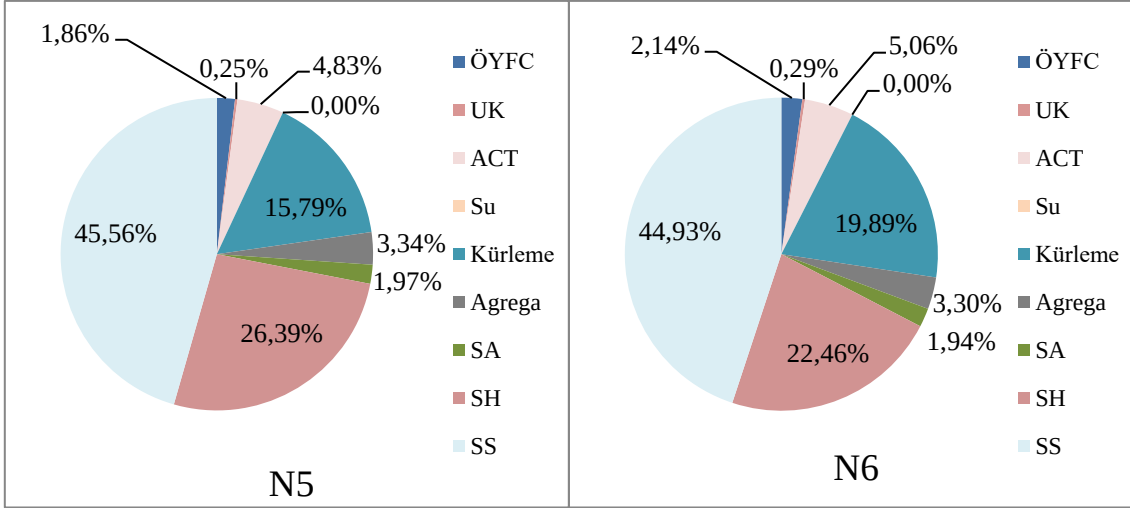
Şekil 5.46. Geopolimer betonun üretimi için açığa çıkan kg CO₂/m³ emisyonu



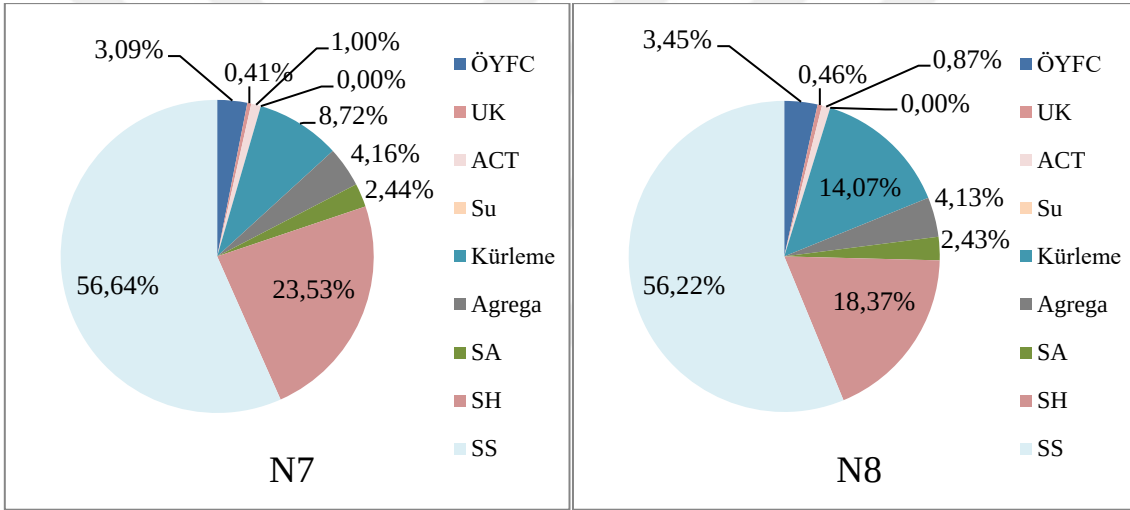
Şekil 5.47. 1 ve 2 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



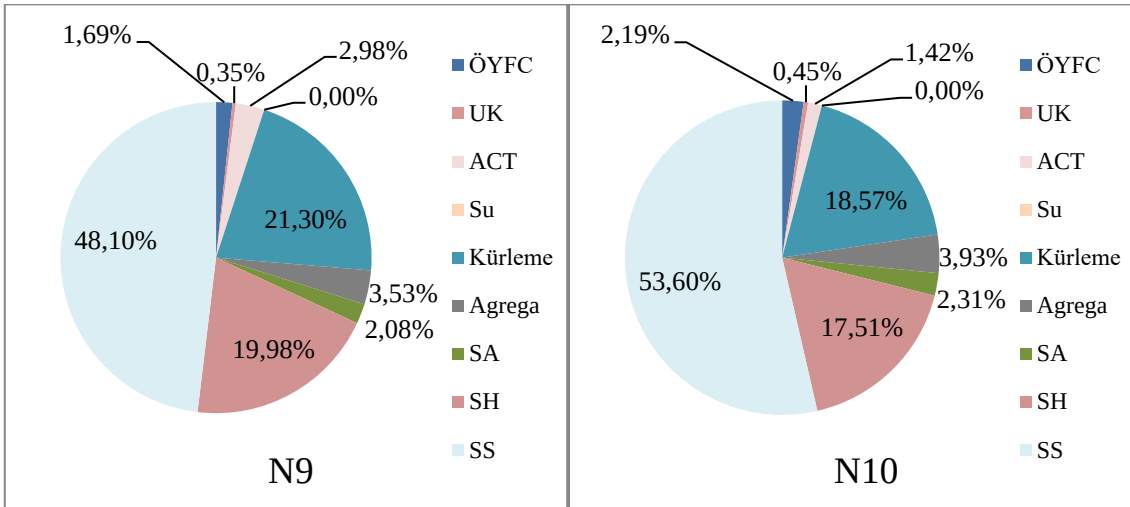
Şekil 5.48. 3 ve 4 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



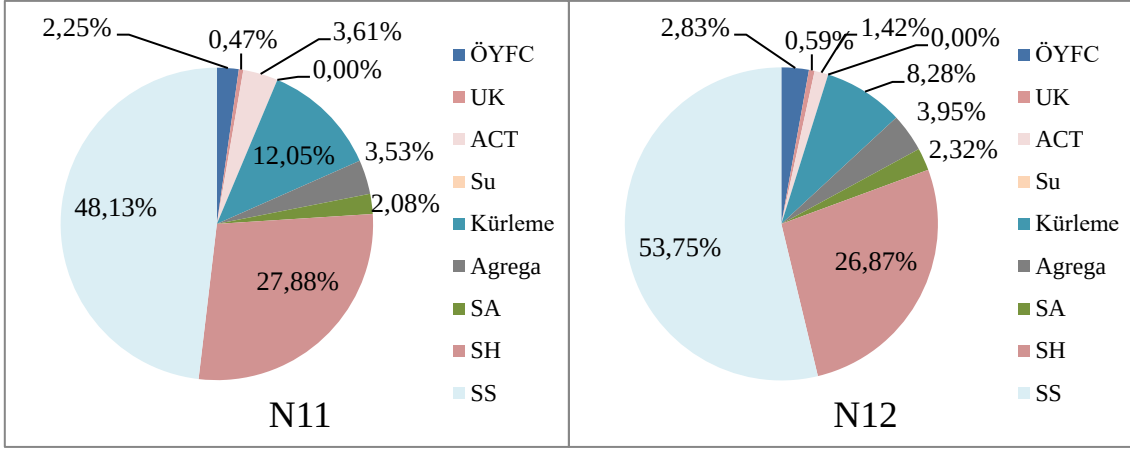
Şekil 5.49. 5 ve 6 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



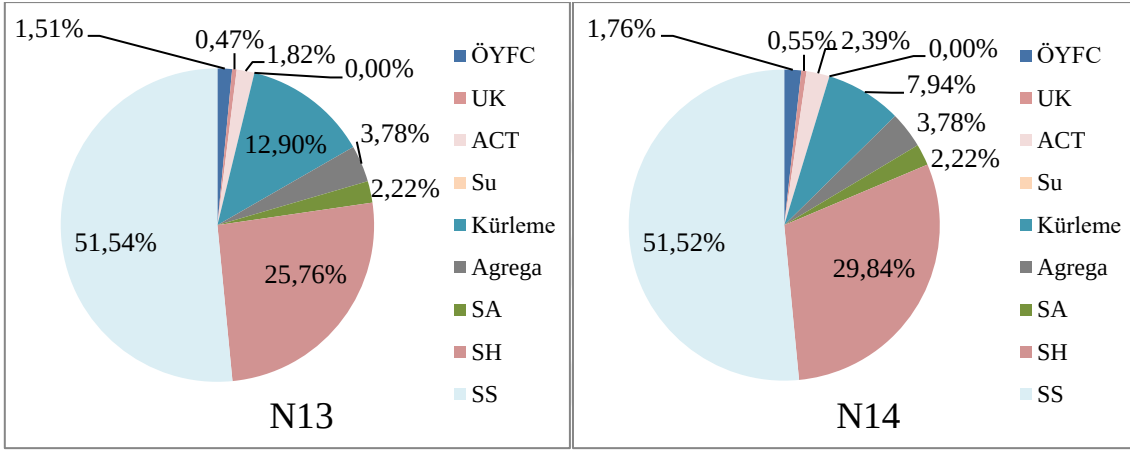
Şekil 5.50. 7 ve 8 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



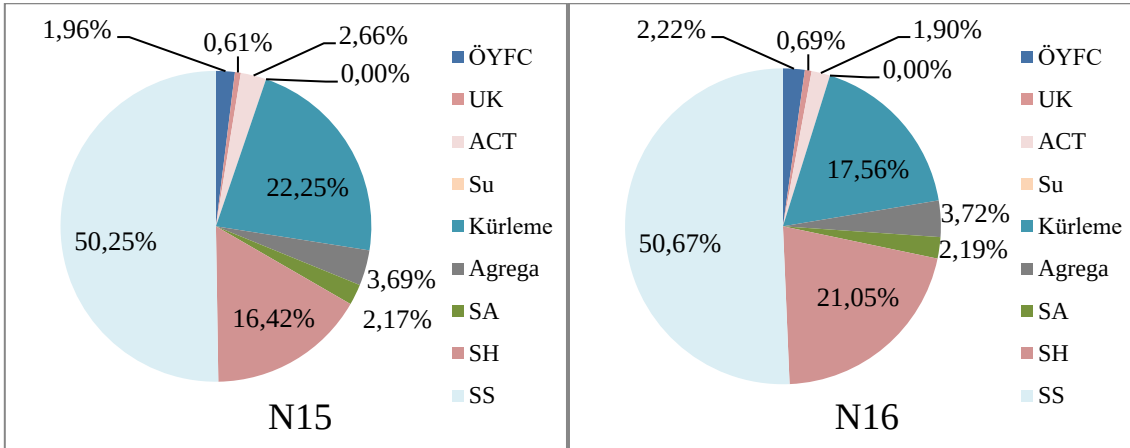
Şekil 5.51. 9 ve 10 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



Şekil 5.52. 11 ve 12 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



Şekil 5.53. 13 ve 14 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)



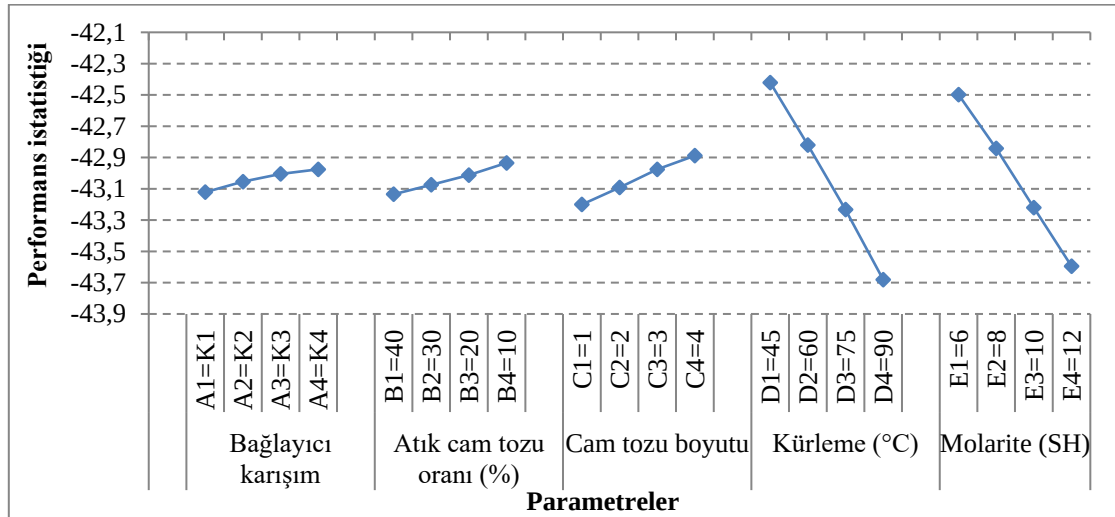
Şekil 5.54. 15 ve 16 nolu karışımların bileşenlerinin CO₂/m³ emisyonuna olan etkisi (%)

Çalışmada bulunan CO₂ emisyonu sonuçları incelendiğinde, literatür bilgileri ile uyumlu geldiği görüldü. Bianco ve diğ., (2021), 35 MPa, 50 MPa ve 70 MPa dayanımlara sahip PÇB ve iki farklı aktivatör ile hazırlanan geopolimer betonların CO₂ emisyonlarını

açıklamıştır. Buna göre, 1 m³ için: 35 MPa, 50 MPa ve 70 MPa dayanımlara sahip PÇB’lerin sırasıyla 333 kg CO₂, 409 kg CO₂ ve 507 kg CO₂ emisyonu açığa çıkardığını; GPB’lerin ise sırasıyla 123-100 kg CO₂, 142-118 kg CO₂ ve 181-160 kg CO₂ emisyonu açığa çıkardığını bildirmiştir. Kim ve diğ., (2013) 18 MPa, 21 MPa ve 24 MPa dayanımlara sahip PÇB’lerin sırasıyla 295,7 kg CO₂, 327,8 kg CO₂ ve 347,7 kg CO₂ emisyonu açığa çıkardığını açıklamıştır. Buna göre, çalışmada en yüksek CO₂ emisyonu bile esas alındığında üretilen GBP’lerin PÇB’lere kıyasla çok daha düşük CO₂ emisyonu açığa çıkardığı gözlemlendi. Bu sonuçlar, GBP’lerin, PÇB’lere kıyasla çok daha sürdürülebilir betonlar olduğunun bir kanıtıdır.

5.19.1. CO₂ Emisyonu Sonuçlarına Ait Performans İstatistiği-Parametreler ve Varyans Analizi Sonuçları

Geopolimer betonların CO₂ emisyonu değerleri Taguchi metodu ile “daha küçük daha iyidir” prensibine göre analiz edildi ve bulunan optimum parametreler Şekil 5.55’te verildi. Karışımlarda optimum parametreler A4=K4, B4=10, C4=4, D1=45, E1=6 olarak bulundu. Buna göre karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması, ACT oranının azalması, cam tozu boyutunun büyümesi ve kürleme sıcaklığının düşmesi sürekli olarak CO₂ emisyonunu düşürdüğü gözlemlendi.



Şekil 5.55. CO₂ emisyonu hesapları performans istatistiği-parametreler grafiği

Tablo 5.18’de CO₂ emisyonu değerlerine ait varyans analizi sonuçları verildi. Buna göre en yüksek etkiyi yüksekten düşüğe sırasıyla kürleme sıcaklığı, Molarite (SH), bağlayıcı karışım, cam tozu boyutu ve ACT oranı şeklinde bulundu. Spesifik olarak, %53,41 ile en

yüksek etkiyi kürleme sıcaklığı, en yüksek 2. etkiyi %40,92 ile SH molaritesi yaptığı, diğer parametrelerin önemli bir etkisinin olmadığı görüldü.

Tablo 5.18. CO₂ emisyonu varyans analizi

Parametreler	SD	KT	KO	Etki oranı	F-Değeri	P-Değeri
Bağlayıcı Karışım	3	20,29	6,763	1,14%	*	*
% ACT	3	22,26	7,420	1,25%	*	*
Cam Tozu Boyutu	3	58,43	19,475	3,28%	*	*
Kürleme (°C)	3	951,63	317,209	53,41%	*	*
Molarite (SH)	3	729,12	243,041	40,92%	*	*
Hata	0	*	*	*		
Toplam	15	1781,72		100,00%		

5.20. SEM ve EDX Analizi

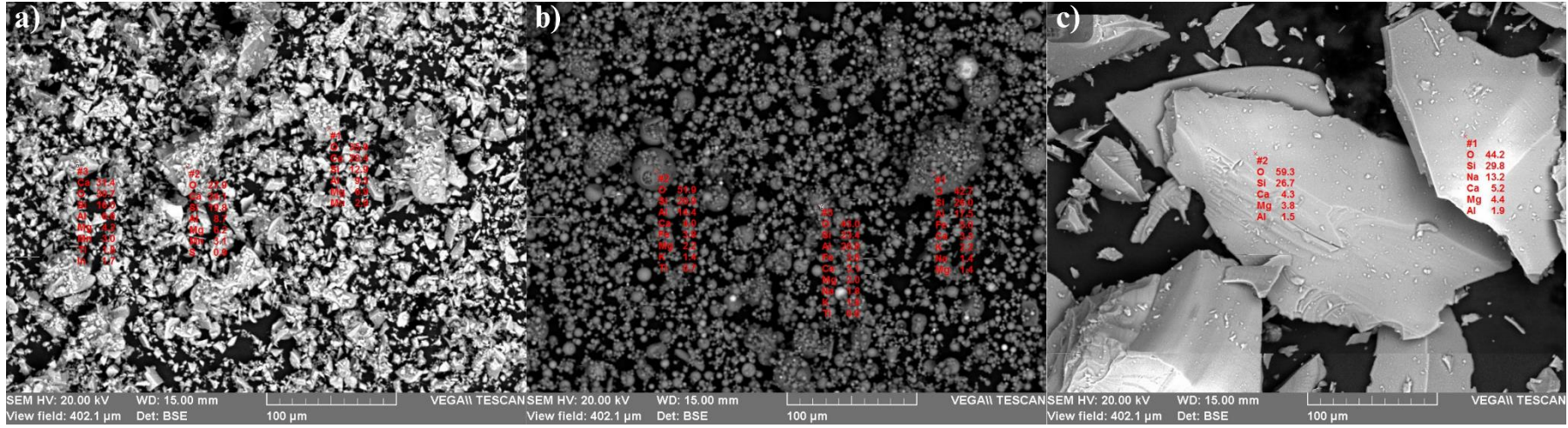
Geopolimer betonların mikroyapısını ve geopolimerizasyon sürecini incelemek amacıyla 90 günlük beton numuneler üzerinde SEM ve EDX analizleri gerçekleştirildi. Geopolimer betonların SEM incelemesinde genel olarak geopolimer jel kısmı, kısmen reaksiyona girmiş veya hiç reaksiyona girmemiş kaynak malzemeler ve mikro çatlaklar görüldü. Çalışmada kullanılan kaynak malzemelerin SEM görüntüleri daha önce Malzeme ve Yöntem bölümünde gösterilmişti. Burada, ÖYFC ve ACT'nun SEM incelemesi altında birbirine oldukça benzer olduğu, ancak iki malzemenin XRF incelemesinde, elementleri farklı miktarlarda ihtiva ettiği görüldü. Bu nedenle, kaynak malzemeler üzerinde de EDX analizleri yapıldı, Şekil 5.56'de kaynak malzemelerin EDX analizleri gösterildi. Buna göre, yüksekte düşüğe, ÖYFC, O, Ca ve Si ağırlıklı yapı gösterirken, ACT ise, O, Si, Na, Ca ağırlıklı yapı göstermektedir. Ek olarak, UK, O, Si ve Al ağırlıklı bir yapı göstermektedir. Bu durumda, geopolimer beton numuneler üzerinde, SEM incelemesinde görülen reaksiyona girmemiş parçacığın hangi kaynak malzemeye ait olduğunu anlamak için aynı görüntü üzerinde EDX analizi yapılarak parçacığın element analizi üzerinden yorumlamaya gidildi.

SEM analizi sonuçlarına göre, tüm geopolimer numunelerde yoğun bir yapı gözlemlendi. Bu durum düşük su/geokatı oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte nispeten en yoğun ve kompakt yapı 3 nolu ve 4 nolu karışımlarda görüldü. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının artmasıyla genel olarak mikro yapının iyileştiği gözlemlendi. Ayrıca, karışımlarda ACT oranının artmasıyla mikro yapıda zayıflamalar, boşluklar, mikro

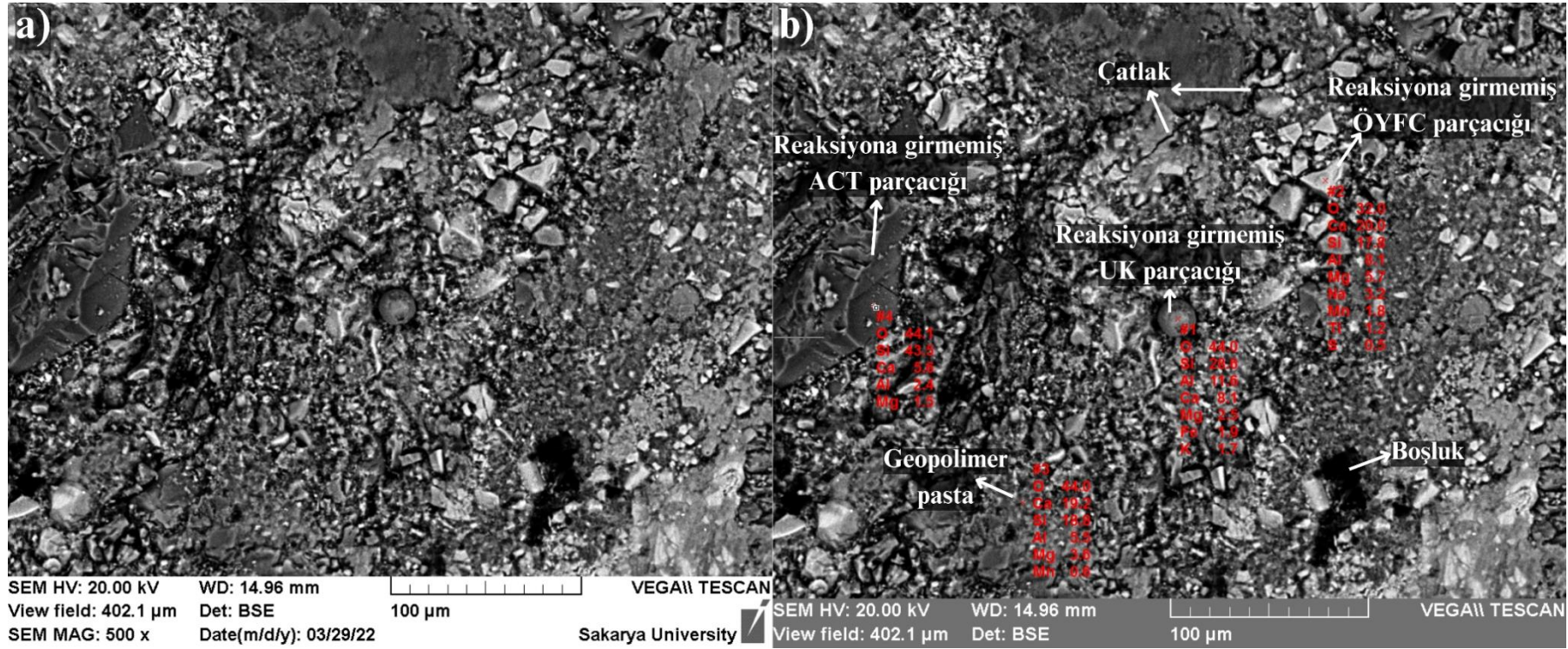
çatlaklar ve reaksiyona girmemiş parçacıkların çoğaldı gözlemlendi. SH molaritesinde, 8 M ve 10 M’de geopolimer jel ürünlerin daha fazla olduğu, 6 M ve 12 M’de ise geopolimer ürünlerin azaldığı görüldü. Bu durum, düşük ve yüksek molaritelerde reaksiyonların azaldığı, orta seviyelerde reaksiyon ürünlerinin daha çok gerçekleştiğini göstermektedir. Mikroyapı üzerine kürleme sıcaklıklarının etkisi 75 °C seviyeye kadar olumlu bir şekilde seyretti, ancak 75 °C’nin üstünde mikro çatlakların arttığı gözlemlendi.

Genel olarak düşük dayanım gösteren geopolimer betonların SEM görüntülerinde reaksiyona girmemiş parçacıkların daha fazla olduğu gözlemlendi. Buradan düşük dayanım veren geopolimer betonlarda geopolimerizasyonun tam olarak gerçekleşmediği, yüksek sıcaklık kürlemesi sonucu dayanımı düşen numunelerde ise mikro çatlakların artmasıyla bu durumun gerçekleştiği söylenebilir. Ek olarak, reaksiyona girmemiş UK mikro küresel parçacıklar, ÖYFC ve ACT, düzensiz kenarları olan köşeli yapılar şeklinde görüldü. SEM görüntülerinin genel itibarıyla, çalışmada daha önce gösterilen mekanik sonuçlar ve literatür bilgisiyle uyumlu olduğu söylenebilir (Tho-In ve diğ. 2018 ; Jiang ve diğ. 2020 ; Dadsetan ve diğ. 2021 ; Jiang ve diğ. 2020).

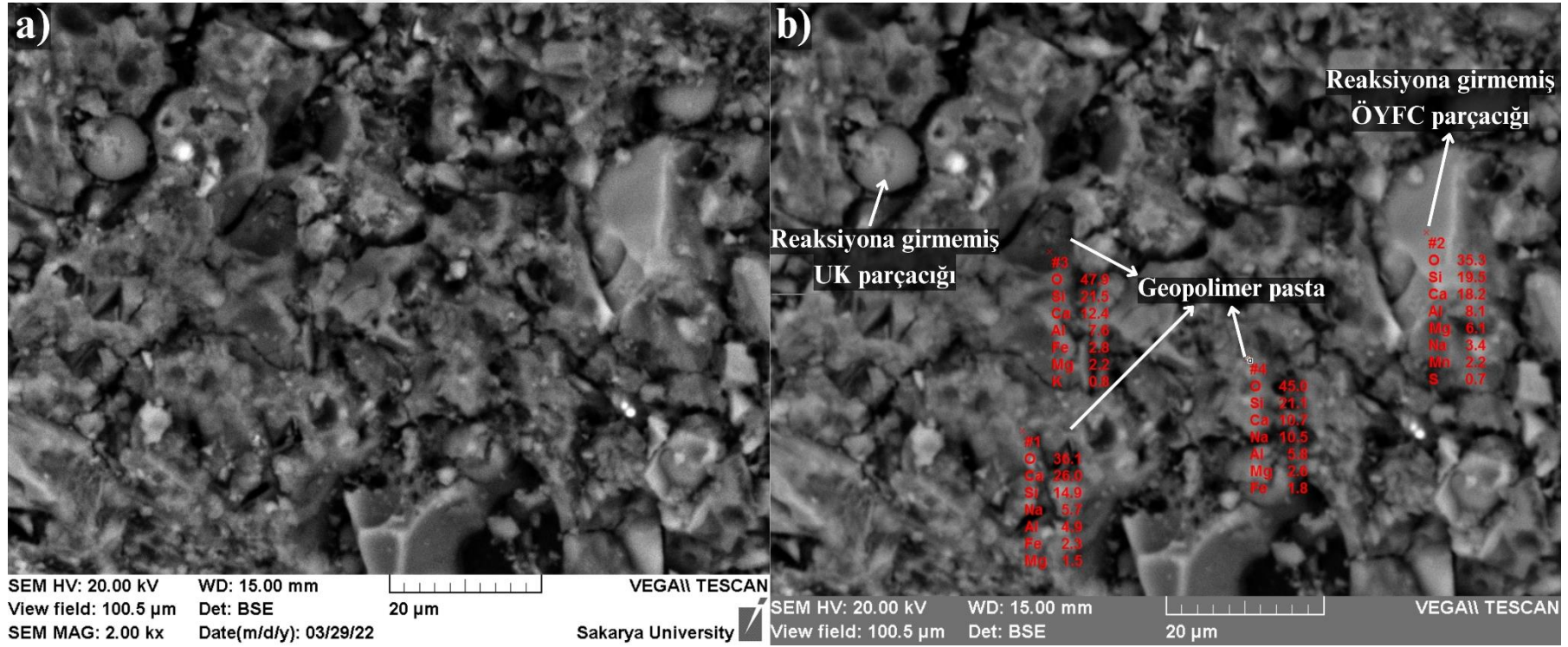
EDX analizi sonuçlarına göre, geopolimer jelin element analizi O, Si, Ca, Al, Fe, Mn, S, K, Ti şeklinde görüldü. Mikroyapıda SEM analizi ile belirlenen geopolimer jel üzerinde spesifik olarak yapılan EDX sonuçlarında ise kısmi değişimler görülmekle birlikte jel yapısının büyük oranda O, Si, Ca, Na, Al elementlerinden oluştuğu görüldü. Bununla beraber az miktarda Mg ve Fe elementlerine de rastlanıldı. EDX analizinde görülen O, Si, Ca, Na, Al elementleri geopolimer numunelerin tamamında oluşan Al-O-Si ve Si-O-Si bağlarına, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin varlığına işaretir (Tho-In ve diğ., 2018 ; Manikandan ve Vasugi 2022). Bununla birlikte, EDX analizinde numunelerin karışım öncesi Si/Al oranına yakın değerler verdiği, geopolimerizasyon sonunda Si/Al oranında önemli bir değişim görülmediği söylenebilir. EDX analizi reaksiyona girmemiş parçacıklar üzerinde yapıldığında ise, çalışmada daha önce gösterilen XRF sonuçları uyumlu şekilde ÖYFC yüksek oranda Ca-Si, UK yüksek oranda Si-Al, ACT ise Si-Na-Ca elementleri gözlemlendi. Çalışmada yapılan SEM ve EDX analizleri görüntüleri sırasıyla Şekil 5.57, Şekil 5.58, Şekil 5.59, Şekil 5.60, Şekil 5.61, Şekil 5.62, Şekil 5.63, Şekil 5.64, Şekil 5.65, Şekil 5.66, Şekil 5.67, Şekil 5.68, Şekil 5.69, Şekil 5.70, Şekil 5.71 ve Şekil 5.72’de gösterildi.



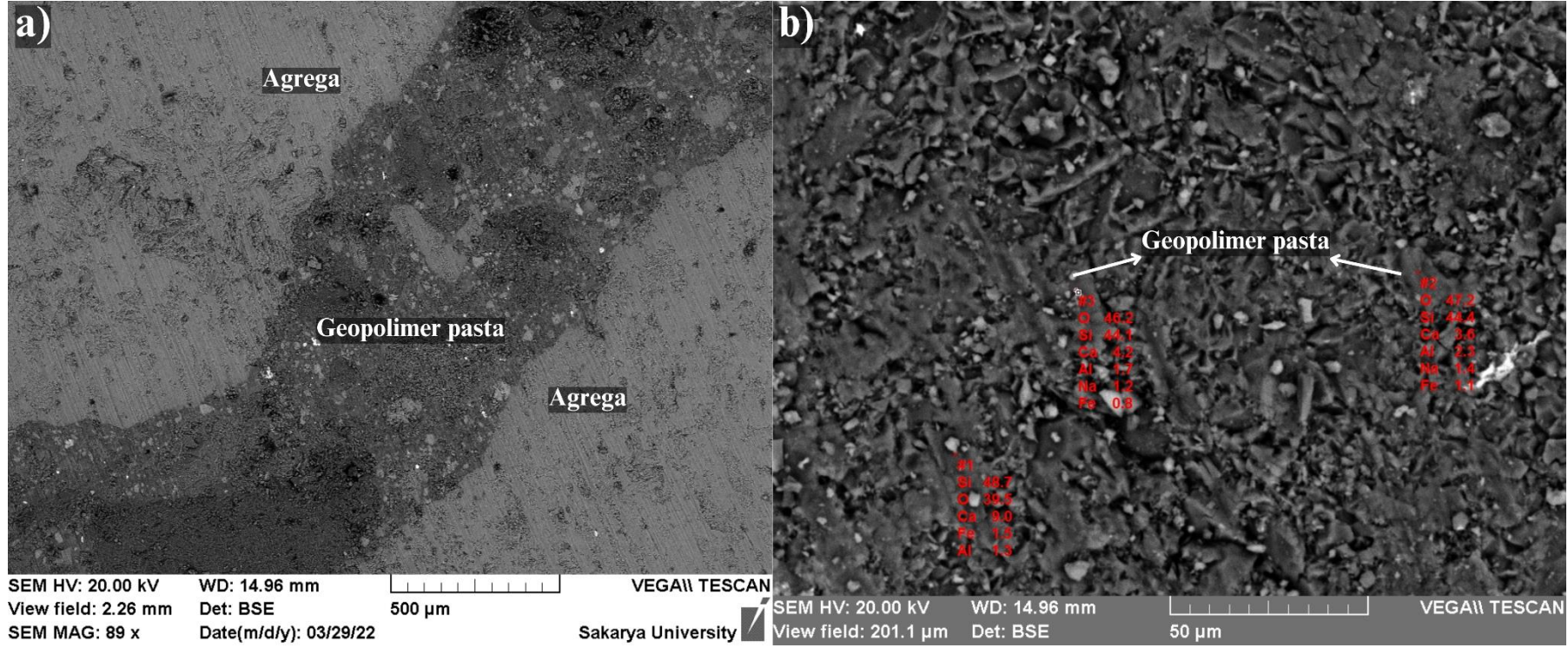
Şekil 5.56. Kaynak malzemelerin EDX analizleri a) ÖYFC, b) UK, c) ACT



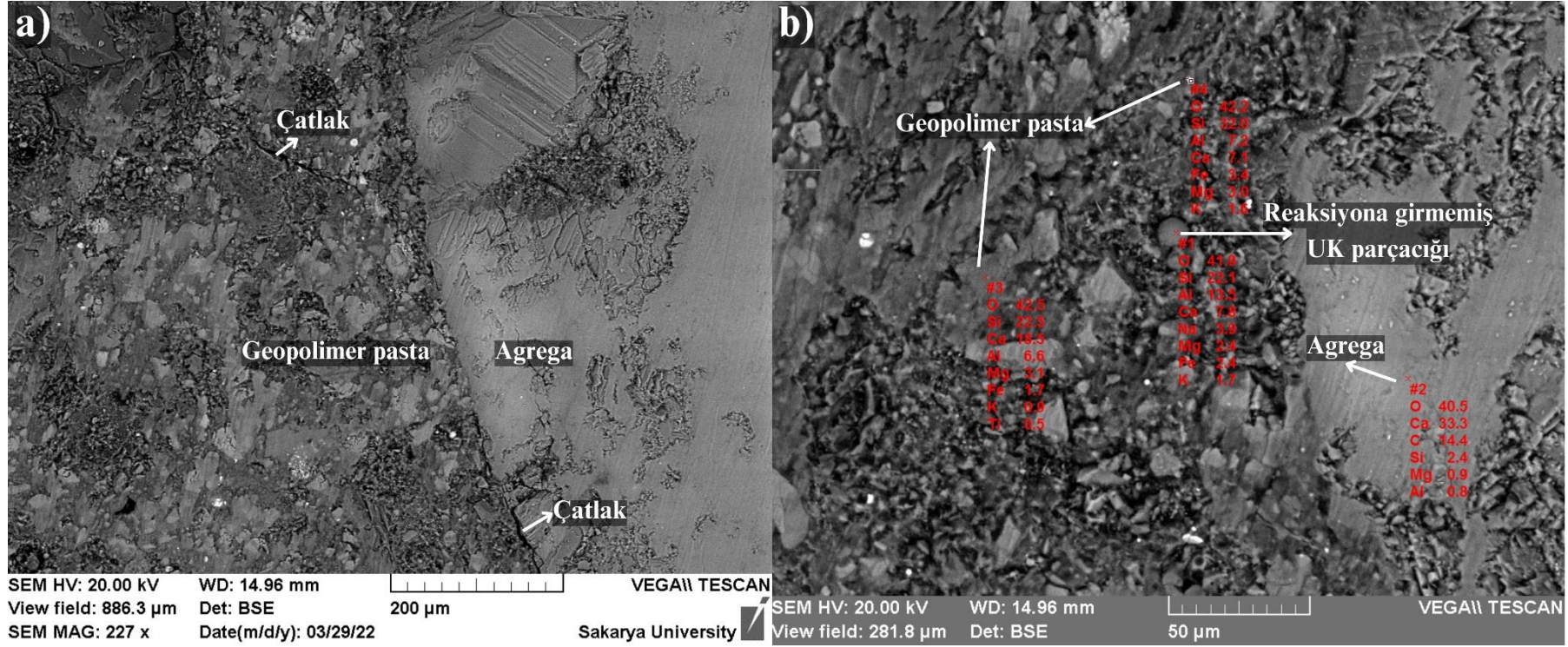
Şekil 5.57. 1 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



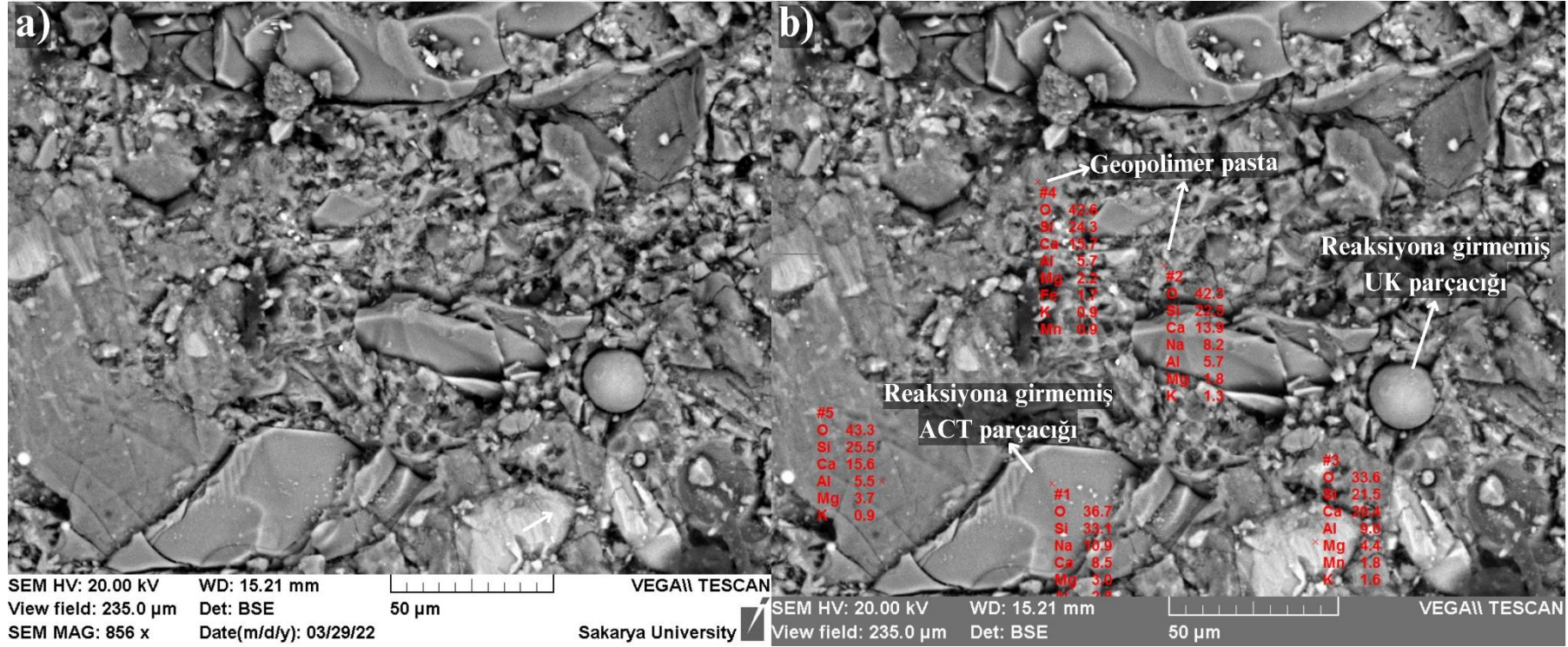
Şekil 5.58. 2 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



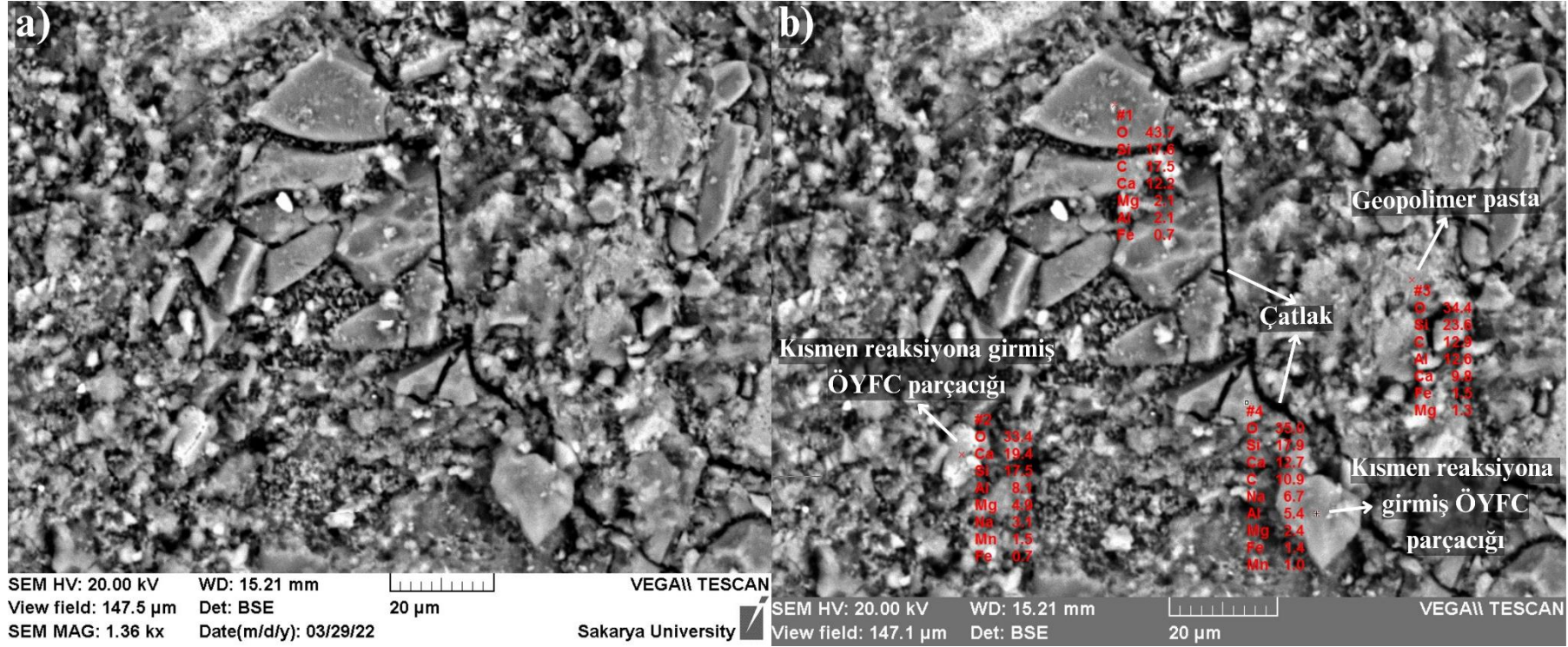
Şekil 5.59. 3 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



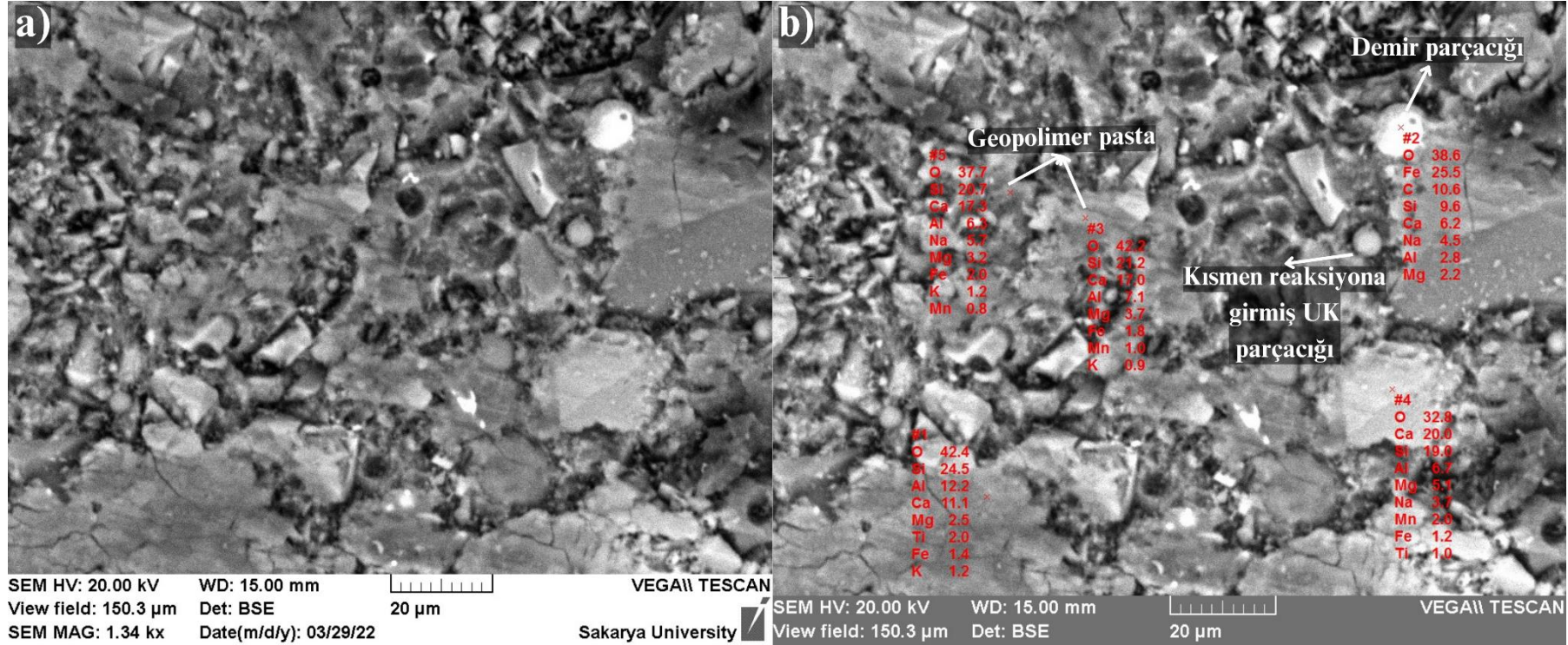
Şekil 5.60. 4 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



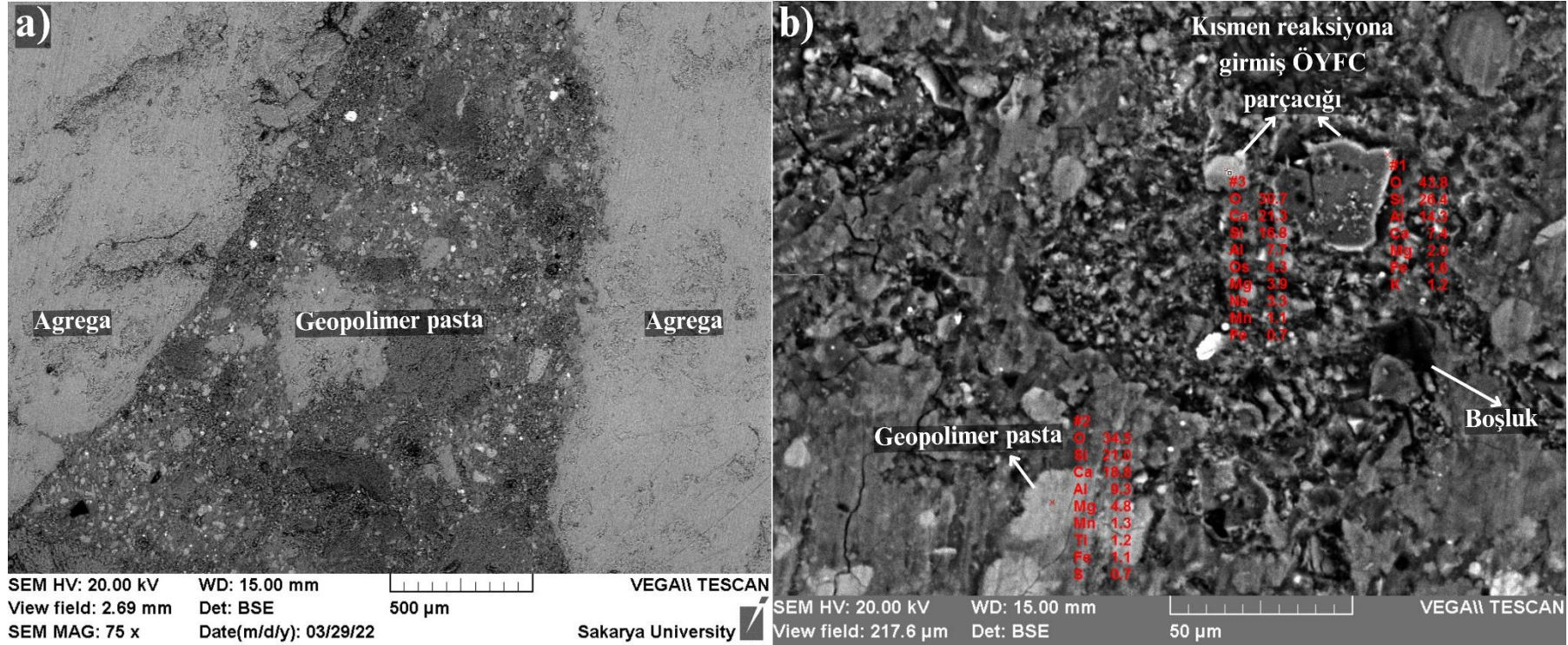
Şekil 5.61. 5 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



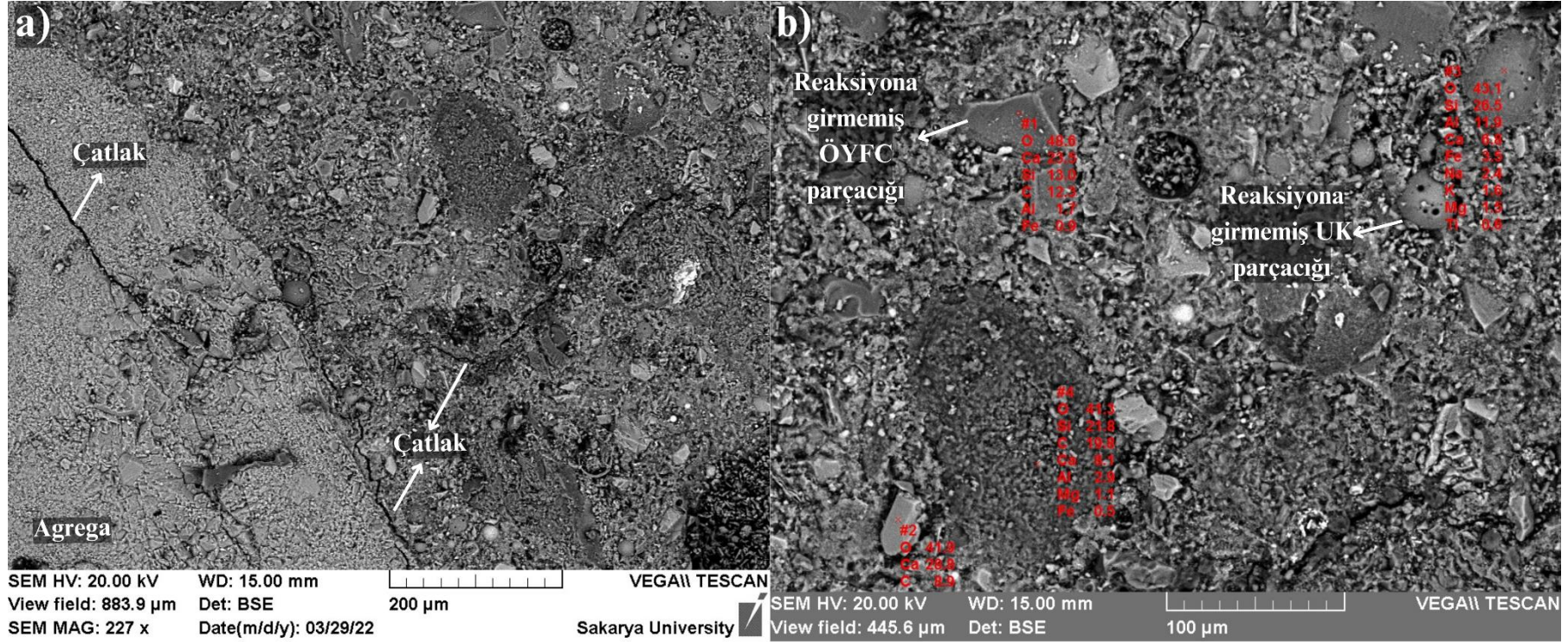
Şekil 5.62. 6 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



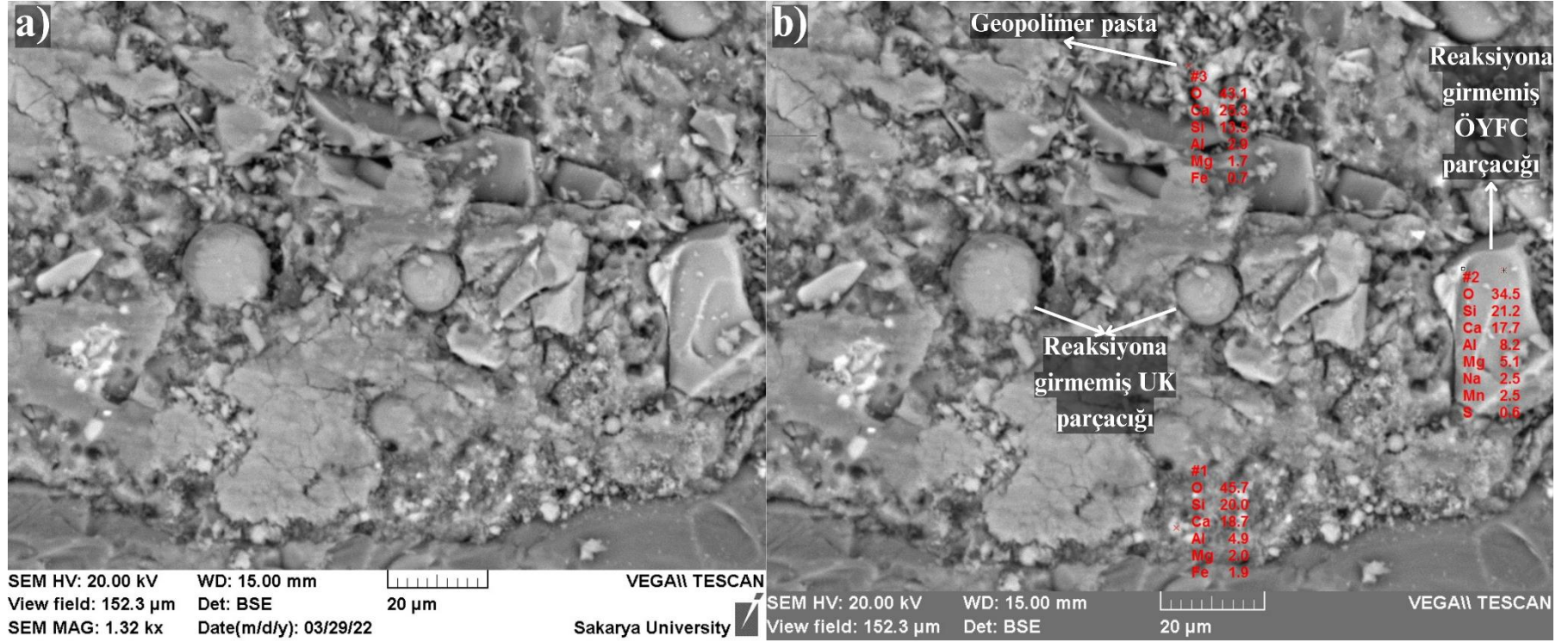
Şekil 5.63. 7 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



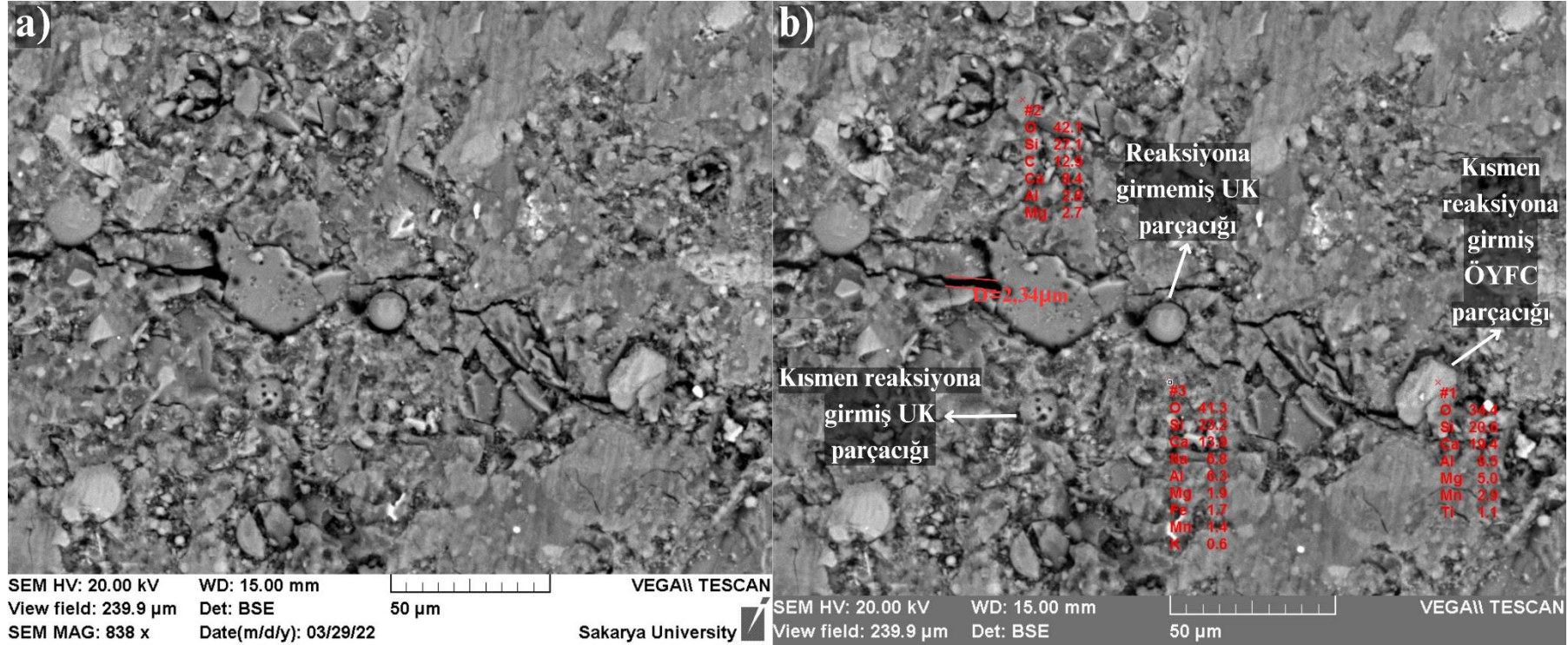
Şekil 5.64. 8 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



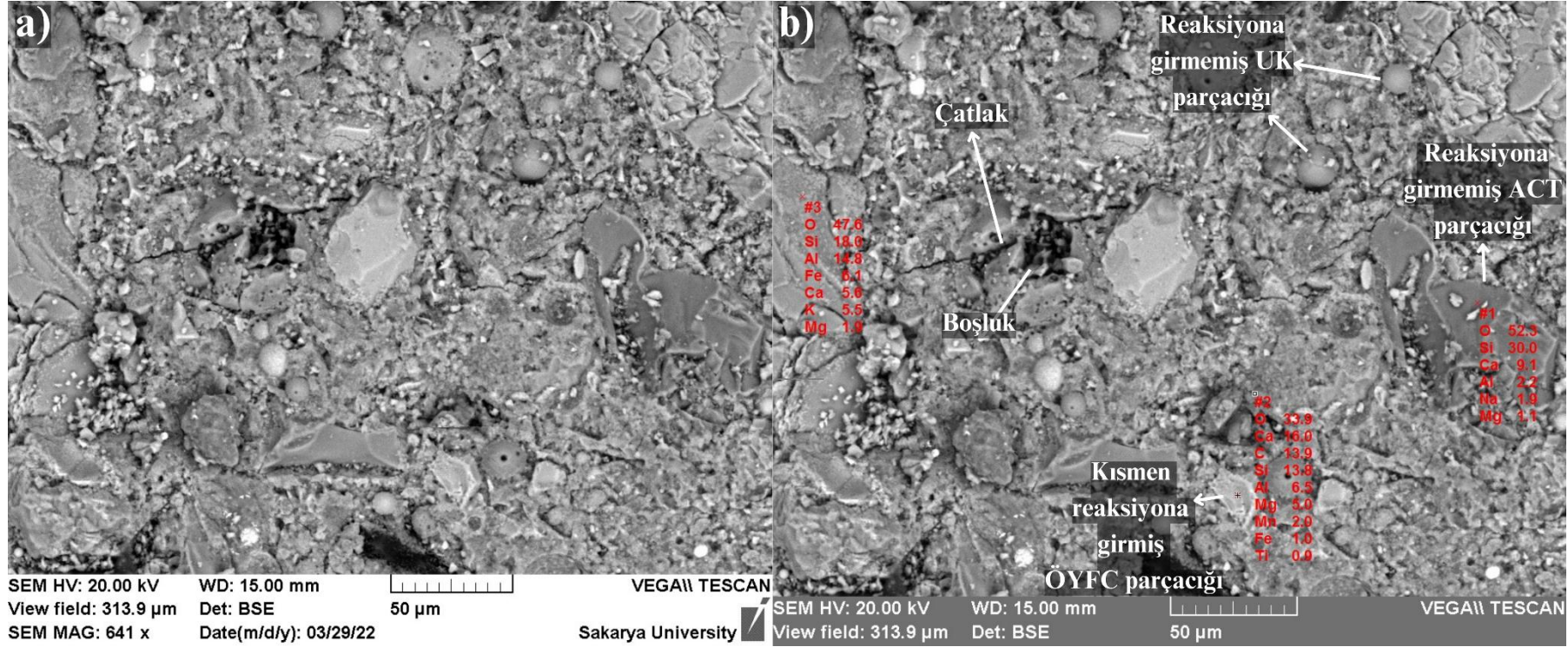
Şekil 5.65. 9 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



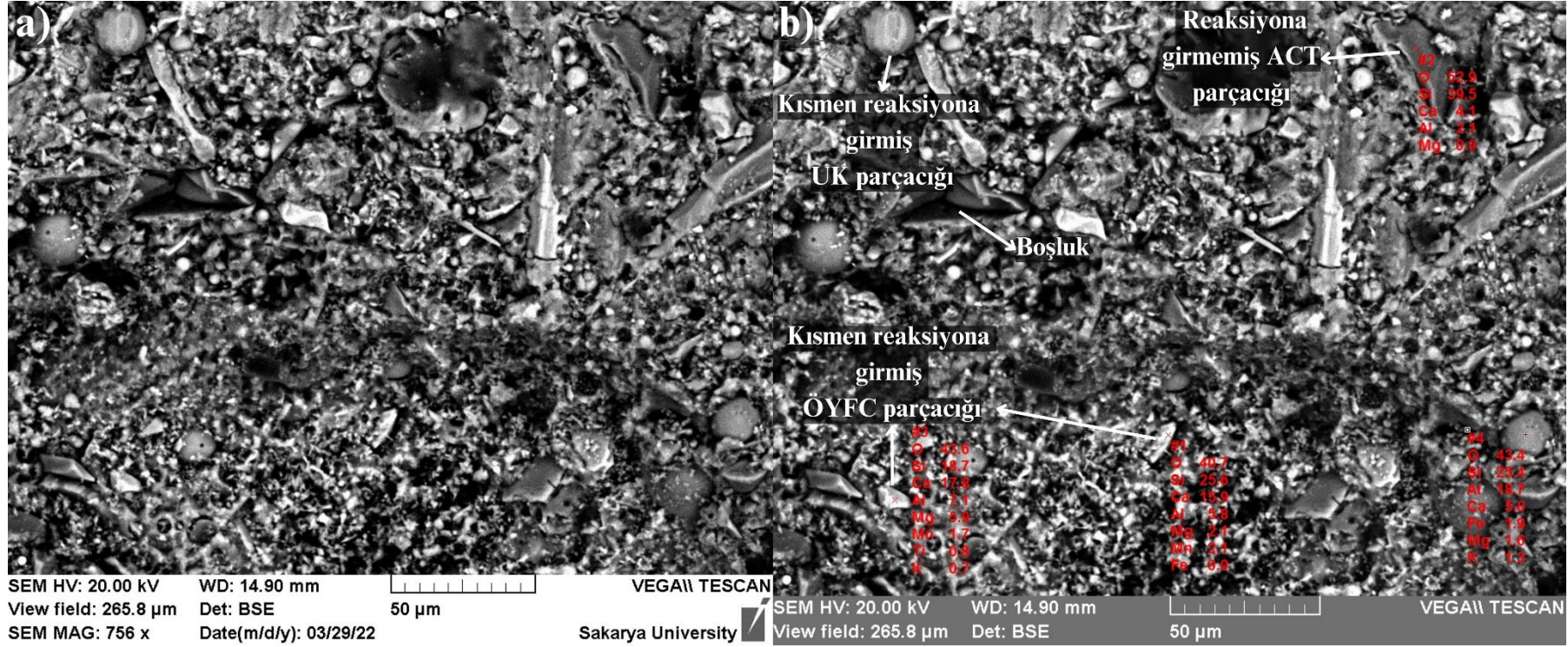
Şekil 5.66. 10 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



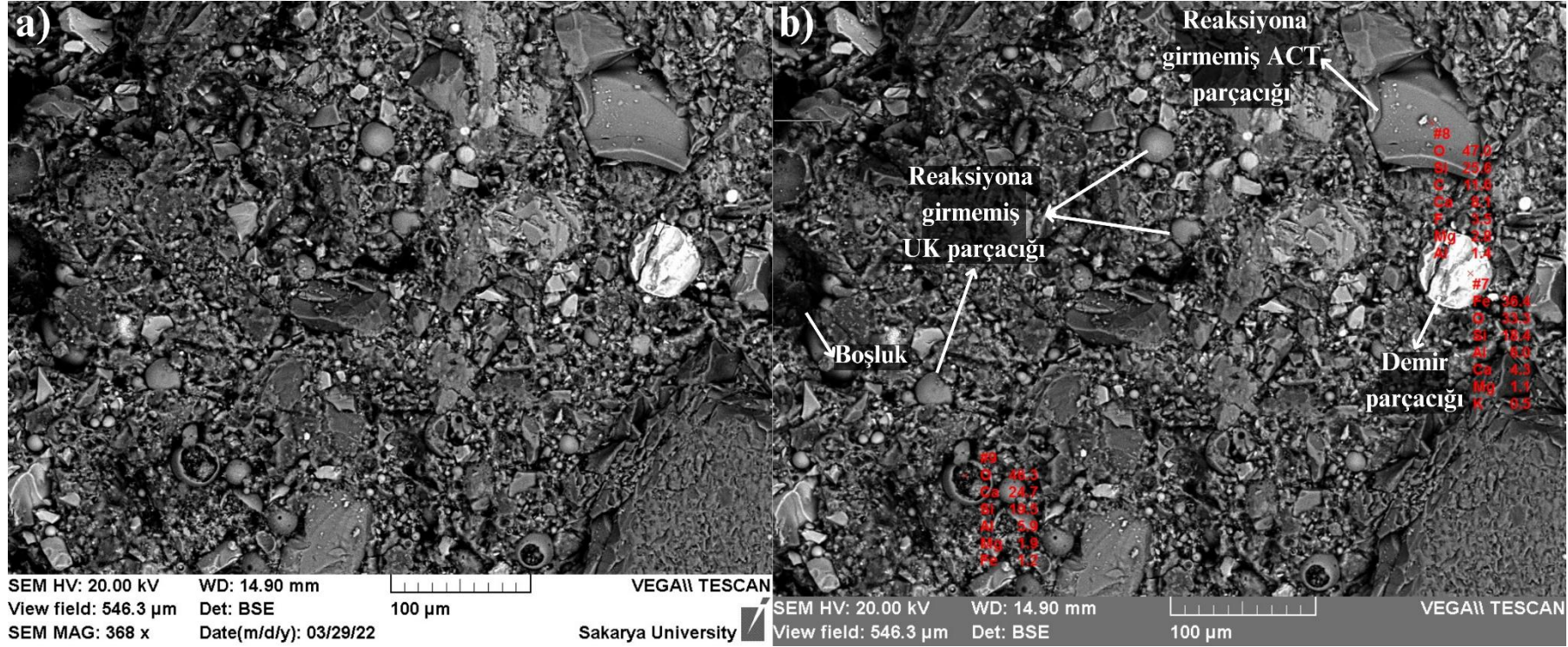
Şekil 5.67. 11 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



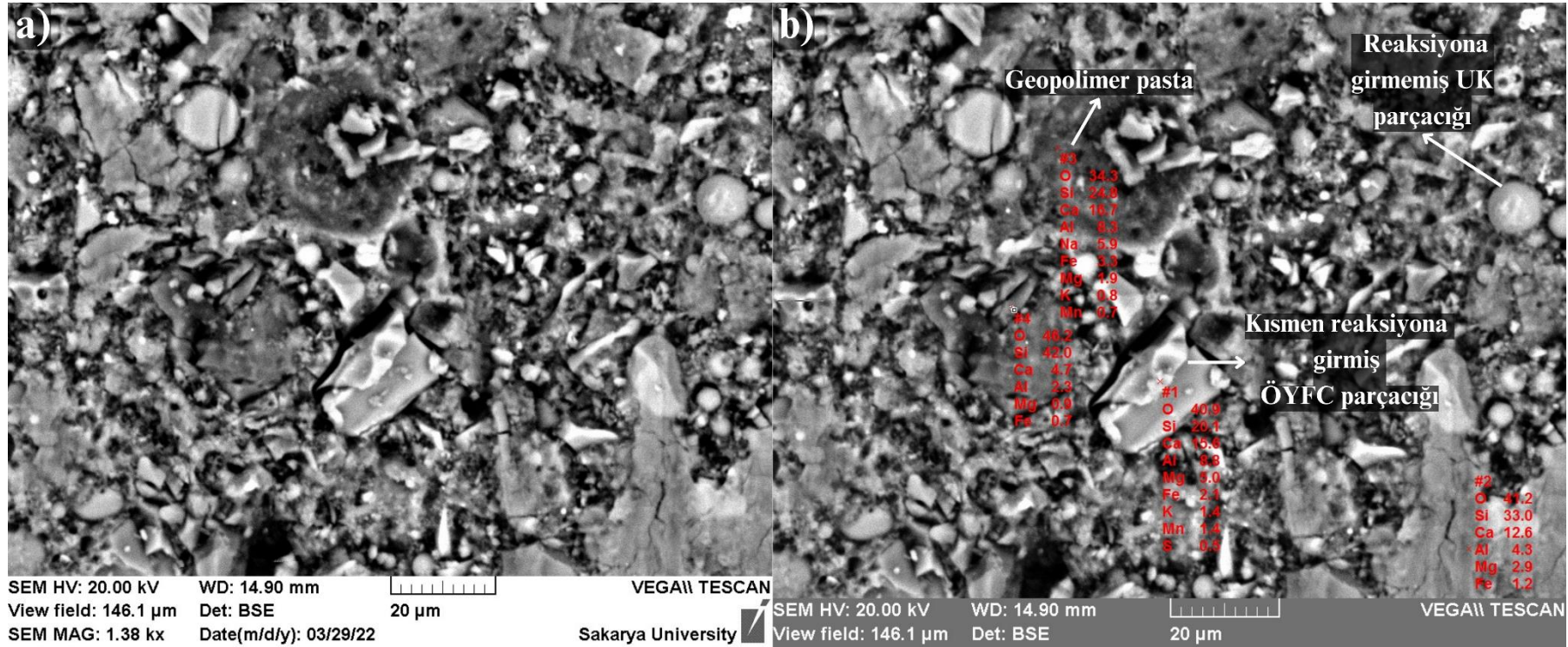
Şekil 5.68. 12 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



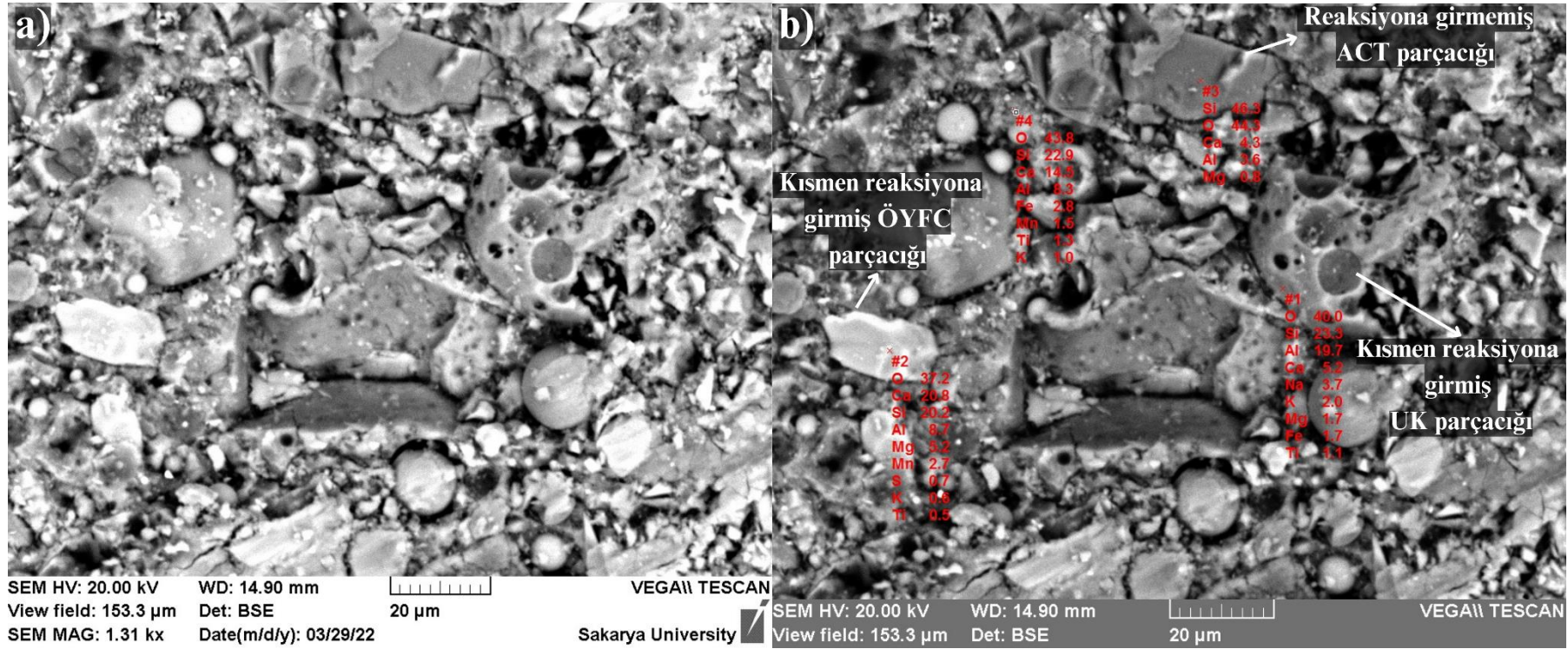
Şekil 5.69. 13 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



Şekil 5.70. 14 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



Şekil 5.71. 15 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi



Şekil 5.72. 16 nolu geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi

5.21. Genel Performans Değerlendirmesi

Çalışmada, her bir deney için ayrı ayrı optimum parametreler daha önce bulunmuştu.

Bununla birlikte, tek bir deney üzerinden optimum beton üretimi yapılması yerine, birden çok özelliğin aynı anda optimize edilmesi için 17 deney üzerinden bir puanlama yapılarak ideal (optimize edilmiş) betonun optimum parametreleri belirlendi. Bu puanlama ise geopolimer beton üzerinde uzmanlaşmış üç akademisyen ile konuşularak yapıldı.

Böylece, ilk priz süresi, slump, 2., 7., 28., ve 90. gün olmak üzere basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımı, 90. gün yoğunluk, 90. Gün UPV (m/s) değerleri, dinamik elastisite, statik elastisite, su emme, kılcal su emme, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) direnci, 112. Gün rötre (büzülme), maliyet analizi, CO_2 emisyonu analizi olmak üzere toplamda 17 farklı değişken ile genel performans değerlendirmesi yapılmış, optimum betonun optimum parametreleri hesaplandı. Bunun için, her bir deney 10 üzerinden puanlandırılmış tüm deneyler puanlandırıldıktan sonra deneylerin yüzde etkisi hesaplandı. Hesaplanan etki yüzdeleri parametrelerin S/G oranları ile çarpılarak optimum beton S/G oranı ortalaması hesaplanmış ve optimum beton parametreleri bulundu.

Tablo 5.19’da her bir deney için S/G oranı, puanlandırma, etki yüzdeleri ve optimum beton S/G oranı ortalaması gösterildi.

Bununla birlikte, genel performans değerlendirmesi sonucu optimum beton için bulunan optimum parametreler Şekil 5.73’te verildi. Buna göre, optimum parametreler $A3=K3$, $B4=10$, $C2=2$, $D3=75$, $E2=8$ şeklinde bulundu.

Bulunan optimum geopolimer beton karışımı ($A3B4C2D3E2$) Taguchi deney planındaki 16 karışımın arasında olmadığı için optimum karışım için yeni dökümler yapılarak, deneyler tekrar gerçekleştirildi.

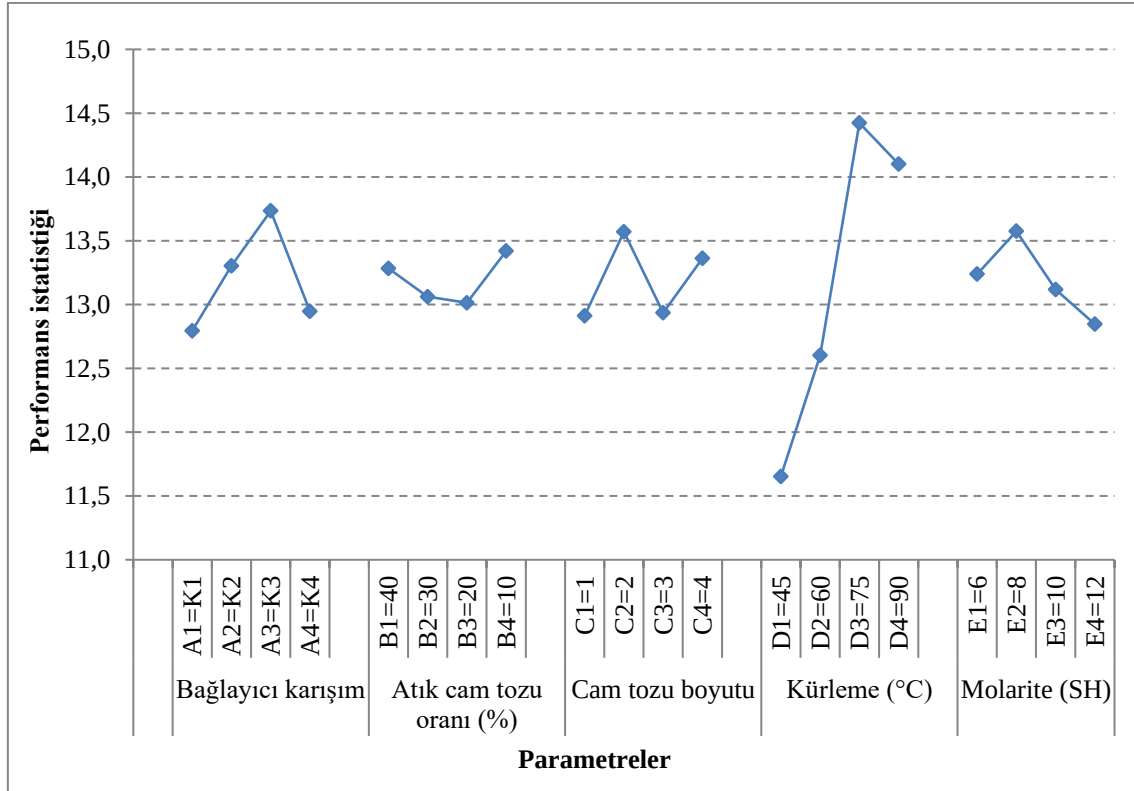
İdeal beton için yapılan deneylerden elde edilen veriler, daha önce Taguchi metodu ile belirlenmiş ve deneyleri yapılmış geopolimer betonlardan elde edilen veriler ile karşılaştırıldı. Böylece optimize edilmiş karışımın kontrolü sağlandı.

Tablo 5.19. Genel performans değerlendirmesi ve genel sinyal/gürültü oranı (S/G) oranı

Deney Kombinasyonu	İlk priz süresi	Slump	Basınç dayanımı (2. gün)	Basınç dayanımı (7. gün)	Basınç dayanımı (28. gün)	Basınç dayanımı (90. gün)	Yarmada çekme dayanımı	Dinamik elastisite	Statik elastisite
1-(K1/40/1/45/6)	32,9	-27,8	28,2	28,3	29,9	27,4	5,9	90,0	78,3
2-(K1/30/2/60/8)	32,3	-25,3	33,1	32,7	33,1	32,2	8,1	91,7	87,0
3-(K1/20/3/75/10)	32,9	-21,8	33,6	34,6	33,9	33,8	10,4	92,7	87,0
4-(K1/10/4/90/12)	32,0	-21,8	31,4	31,2	34,2	32,2	10,4	93,4	84,7
5-(K2/40/2/75/12)	36,0	-15,7	31,5	31,4	30,0	31,1	9,9	92,0	85,4
6-(K2/30/1/90/10)	36,5	-26,4	32,5	33,0	33,0	32,3	9,1	92,2	86,9
7-(K2/20/4/45/8)	34,3	-25,3	30,9	30,6	31,3	29,4	7,1	91,6	82,0
8-(K2/10/3/60/6)	32,0	-21,8	29,4	29,0	31,0	29,0	7,8	91,2	84,8
9-(K3/40/3/90/8)	41,5	-22,6	32,1	32,0	31,8	31,6	7,4	91,2	85,0
10-(K3/30/4/75/6)	36,8	-15,7	32,3	32,7	32,7	31,1	7,9	90,8	85,6
11-(K3/20/1/60/12)	39,4	-31,9	31,1	33,1	33,2	31,8	8,8	91,6	83,4
12-(K3/10/2/45/10)	36,3	-20,8	30,3	31,0	30,7	29,4	7,3	90,8	80,7
13-(K4/40/4/60/10)	45,7	-29,0	29,8	29,7	29,8	27,8	6,2	88,9	81,0
14-(K4/30/3/45/12)	42,2	-29,7	23,0	25,2	26,4	25,5	4,9	89,6	74,4
15-(K4/20/2/90/6)	37,1	-21,8	32,5	32,7	31,9	32,2	8,6	91,4	85,9
16-(K4/10/1/75/8)	37,5	-22,6	32,7	34,2	33,6	33,0	7,9	92,0	87,2
10 üzerinden puanlama	8	10	3	2	2	3	4	4	4
Etki oranı (%)	10,4	13,0	3,9	2,6	2,6	3,9	5,2	5,2	5,2

Tablo 5.19. (Devam) Genel performans değerlendirmesi ve genel sinyal/gürültü oranı (S/G) oranı

Deney Kombinasyonu	Su emme (%)	Kılcal su emme	Yoğunluk (90.gün)	UPV (m/s) (90.gün)	Sülfat direnci	Rötre	Maliyet analizi	CO2 emisyonu	Genel (S/G)
1-(K1/40/1/45/6)	-9,4	-10,2	7,5	71,4	24,2	15,0	-38,4	-42,2	11,1
2-(K1/30/2/60/8)	-7,1	-7,7	7,7	72,4	17,2	20,8	-38,6	-42,8	12,8
3-(K1/20/3/75/10)	-7,0	-6,0	7,7	72,9	8,1	25,7	-38,9	-43,4	13,5
4-(K1/10/4/90/12)	-7,3	-6,2	7,6	73,2	13,1	30,7	-39,2	-44,1	13,7
5-(K2/40/2/75/12)	-7,7	-8,0	7,6	72,5	17,2	27,8	-39,0	-44,0	14,6
6-(K2/30/1/90/10)	-7,8	-6,9	7,5	72,6	12,6	33,0	-39,1	-44,1	13,7
7-(K2/20/4/45/8)	-7,8	-9,2	7,6	72,0	20,1	15,5	-38,5	-42,1	12,1
8-(K2/10/3/60/6)	-6,5	-8,0	7,6	72,1	15,8	21,7	-38,4	-42,1	12,7
9-(K3/40/3/90/8)	-8,5	-9,2	7,5	72,1	17,2	36,2	-38,7	-43,5	14,9
10-(K3/30/4/75/6)	-7,4	-9,3	7,5	71,9	18,8	29,8	-38,3	-42,5	15,0
11-(K3/20/1/60/12)	-7,7	-8,4	7,7	72,5	15,4	22,4	-39,0	-43,5	12,3
12-(K3/10/2/45/10)	-8,5	-9,4	7,5	71,8	20,3	16,0	-38,7	-42,5	12,7
13-(K4/40/4/60/10)	-9,2	-11,5	7,4	70,8	21,6	19,7	-38,6	-42,9	12,5
14-(K4/30/3/45/12)	-10,6	-12,5	7,4	71,2	22,4	14,4	-38,7	-42,9	10,7
15-(K4/20/2/90/6)	-8,1	-11,3	7,5	72,4	11,8	33,8	-38,5	-43,1	14,1
16-(K4/10/1/75/8)	-7,1	-9,7	7,5	72,6	18,4	30,4	-38,7	-43,0	14,5
10 üzerinden puanlama	4	4	3	3	5	6	7	5	
Etki oranı (%)	5,2	5,2	3,9	3,9	6,5	7,8	9,1	6,5	



Şekil 5.73. Tüm deneyler incelendiğinde optimum geopolimer betona ait performans istatistiği-parametreler grafiği

5.21.1. Optimum Beton Karışımına Ait Deney Sonuçları

Genel performans değerlendirmesi sonucu elde edilen optimum betonun deney sonuçları Tablo 5.20’de verildi.

Bununla birlikte, Tablo 5.21’de tüm deneylerden elde edilen minimum ve maksimum sonuçlar optimum sonuçlarla karşılaştırıldı.

Buna göre;

Optimum geopolimer beton, 60/95 dk ilk ve son priz süresi ile ideal bir süre, 200 mm slump çökme değeri ile işlenebilirlik açısından oldukça iyi bir performans sergiledi. Daha öncede bahsedildiği gibi, yüksek kohezyona sahip olan geopolimer beton 200 mm gibi nispeten yüksek slump değerinde herhangi bir segregasyon göstermedi.

Optimum betonun taze halde yoğunluğu $2,44 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, 2, 7, 28 ve 90 günlük sertleşmiş yoğunluklar ise sırasıyla $2,38 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, $2,39 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, $2,37 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ve $2,37 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ile mükemmel değerler gösterdi.

Optimum betonun 2., 7., 28. ve 90. Gün UPV (m/s) değerleri sırasıyla 4669(m/s), 4587(m/s), 4546 (m/s), 4522 (m/s) şeklinde bulundu. Diğer karışımlarda olduğu gibi optimum betonda da artan yaşla beraber UPV (m/s) değerlerinde azalmalar görüldü. Bununla birlikte, optimum beton UPV (m/s) değerlerine göre “iyi-mükemmel” sınıfında yer aldığını söylemek mümkündür. Ayrıca, diğer karışımlardaki bulunan UPV (m/s) değerleri ile kıyaslandığında optimum beton UPV (m/s) değerlerinin oldukça yüksek geldiği görüldü.

Optimum geopolimer betonun basınç dayanımı sonuçları 2., 7., 28. ve 90. günlerde 46,7 MPa, 48,6 MPa, 44,4 MPa ve 48,7 MPa ile oldukça yüksek basınç dayanımları gösterdi. Bu durum, hızlı priz alan yüksek ÖYFC içeriğine sahip geopolimer betonların daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşması ile açıklanabilir. Optimum sürede priz alan ve optimum işlenebilirlik için gerekli slump miktarına sahip geopolimer beton üretimi için basınç dayanımındaki belirli miktarlardaki düşüş kabul edilebilir olarak düşünüldü. Ayrıca, optimum betonlarda faz değişiminin daha az gerçekleştiği, buna bağlı olarak basınç dayanımındaki dalgalanmaların daha az olduğu gözlemlendi

Basınç dayanımındaki duruma paralel olarak oldukça yüksek gelen yarmada çekme dayanımı 2,91 MPa olarak bulundu.

Optimum geopolimer betonun dinamik elastisite modülü 42541,6 (MPa), statik elastisite modülü 20916,7 (MPa) olarak bulundu. Bu değerlerin oldukça yüksek geldiğini söylemek mümkündür. Ancak statik elastisite modülünün basınç dayanımına kıyasla nispeten daha düşük geldiği gözlemlendi.

Optimum geopolimer betonun su emme oranı %2,31 olarak bulundu. Taguchi deney metodundan su emme (%) için gelen optimum parametreler ile optimum beton optimum parametrelerinin oldukça yakın geldiği görüldü. Buradan, su emme oranındaki bu farkın optimum geopolimer betonun artan UK içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Optimum geopolimer beton kılcal su emme yüksekliği 1,67 mm olarak bulundu. Bu sonuç, diğer 16 karışımdan gelen kılcal su emme yüksekliği sonuçlarına kıyasla en düşük sonuçtur. Bu durum optimum betonun mükemmel yoğun yapısı ve en düşük gözenekliliği göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Optimum geopolimer betonun magnezyum sülfat direnci $MgSO_4$ direnci UPV (m/s) değişimi 1. ay, 2. ay ve 3. ay olmak üzere sırasıyla % 4,9, %5,9 ve % 6,5 olarak bulundu. Bu değer diğer karışımların gösterdiği yüksek değerlere kıyasla nispeten daha düşük kalmaktadır. Ancak, optimum betonun sülfat maruziyeti sonrası basınç dayanımı pozitif yönde % 4,4 olduğu gözlemlendi. Bu durum, optimum betonun sülfat etkisi altında bir miktar daha geopolimerizasyon ve M-A-S-H, C-M-A-S-H, N-M-A-S-H gibi yeni reaksiyonlar gerçekleştirdiğini göstermektedir. Daha önce yüksek sıcaklıkta kürleme reaksiyonların nispeten tamamlandığı ve sülfat etkisi altında reaksiyonların N-A-S-H jellerinden düşük mukavemetli M-A-S-H jellerine dönüşerek dayanımı düşürdüğü ifade edilmiştir. Burada ise, karışımlardaki UK içeriğinin artması, ACT ve molaritenin etkisinin kürlemenin etkisini pasivize ettiği düşünülebilir. Ayrıca basınç dayanımlarındaki bir miktar düşüş bu durumu doğrulamaktadır. Sonuç olarak, optimum beton sülfat etkisi altında çok iyi bir performans sergilemiştir.

Optimum geopolimer betonun 112 günlük rötre sonuçlarına göre boy kısalması %0,022 (59 mikrostrain), ağırlık kaybı ise % 1,32 olarak bulundu. Bu kısalmanın portland çimentolu betona kıyasla oldukça düşük olduğu çalışmada daha önce anlatılmıştı. Optimum karışımın 112. Gün ağırlık kaybına göre en düşük ağırlık kaybını gösterdiği bulundu. Ancak, diğer 16 karışım içerisindeki en düşük rötre olmadığı gözlemlendi (9 nolu karışım %0,015 olarak bulunmuştu). Bunun sebebi, rötre sonuçlarını çok yüksek oranda etkileyen kürleme sıcaklığının, optimum karışımında 75 °C ile, 90°C'ye kıyasla nispeten daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Optimum geopolimer betonun analiz sonuçlarına göre 1m³ için: 86,2 \$ maliyet ve 141,39 kg CO₂ emisyonu açığa çıkardığı bulundu. Bu sonuçlar, istenilen sonuca yakın olmakla birlikte ortalama değerlerdir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde optimum betonun istenilen değerleri verdiği gözlemlendi. Eğer literatürdeki yaklaşımlar doğrultusunda sadece basınç değerleri esas alınarak bir optimum beton planlansaydı, üretilen beton çok hızlı priz alacak, düşük slump değerleri, düşük sülfat atağı direnci, yüksek maliyet ve CO₂ emisyonu değerleri gösterecekti. Basınç dayanımından bir miktar feragat edilmesi ile diğer özelliklerde iyileşmeler meydana gelmiş olup, böylece istenilen özelliklere sahip bir geopolimer beton elde edildi.

Tablo 5.20. Optimum geopolimer betonun deney sonuçları

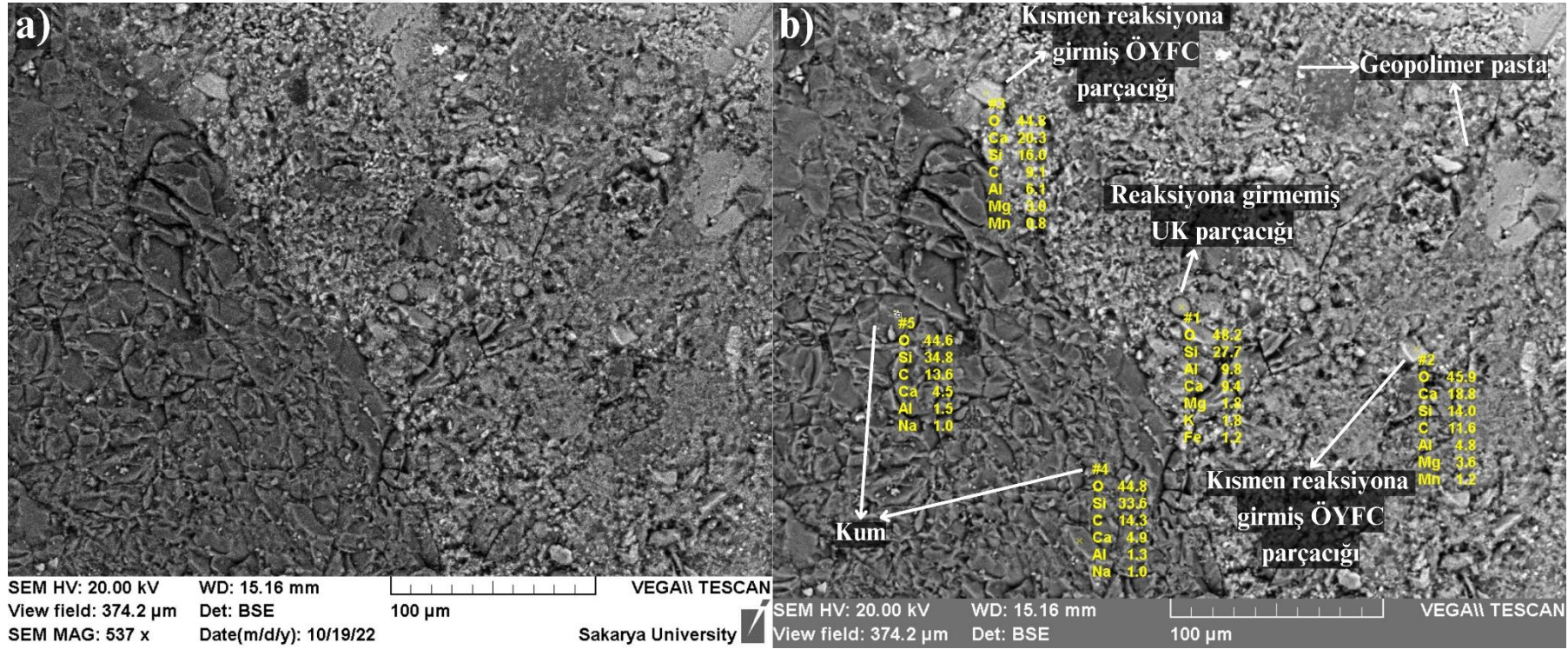
Deney sonuçları		Değerler
Priz (dk)	ilk priz/son priz	65/95
Slump (mm)		200
Taze yoğunluk (g/cm ³)		2,44
Sertleşmiş yoğunluk (g/cm ³)	2./7./28./90. gün	2,38 / 2,39 / 2,37 / 2,37
Basınç dayanımı (MPa)	2./7./28./90. gün	46,7 / 48,6 / 44,4 / 48,7
Ultrases geçiş hızı (m/s)	2./7./28./90. gün	4669,3 / 4587,2 / 4545,6 / 4521,6
Yarmada Çekme dayanımı (MPa)		2,91
Su emme (%)		2,31
8. Gün kılcal su emme yüksekliği (I=mm)		1,668
Statik elastisite modülü (MPa)		20916,7
Dinamik elastisite modülü (MPa)		42541,6
MgSO ₄ direnci (12 hafta sonundaki ağırlık değişimi) (%)		+0,186
MgSO ₄ direnci (12 hafta sonundaki ultrases geçiş hızındaki değişimi) (%)		+6,49
Rötre (kuruma büzülmesi) (%)		0,022
Rötre süresi boyunca meydana gelen ağırlık kaybı (%)		1,32
Maliyet (1 m ³ beton üretimi için) (\$)		86,2
CO ₂ -e emisyonu (kg CO ₂ -e/m ³)		141,39

Şekil 5.74'te optimum betona ait SEM ve EDX analizi gösterilmektedir. Buna göre, oldukça yoğun bir mikro yapı, az miktarda reaksiyona girmemiş parçacıklar ve mikro çatlaklar gözlemlendi. Reaksiyona girmemiş UK parçacıkları küresel şekle sahipken, ÖYFC ve ACT'ler ise düzensiz şekillerde görüldü. Ayrıca, çok güçlü agrega pasta arayüzeyi gözlenmiş olup, genel olarak kompakt bir yapı görüldü. EDX analizlerinde Si-O-Si, Si-O-Al bağlarını ve C-A-S-H jellerinin varlığına işaret eden O, Si, Ca, Na, Al elementleri gözlemlendi. Diğer karışımlarla karşılaştırıldığında, daha yüksek basınç

dayanımları gösteren karışımlara kıyasla, çok az miktarda reaksiyona girmemiş parçacıklar veya kısmen reaksiyona girmiş parçacıklar, yüksek sıcaklık uygulanan karışımlara kıyasla, daha az mikro çatlaklar gözlemlendi. Bu durumda, optimum beton SEM analizlerinin beklenildiği gibi olduğu yorumu yapılabilir.

Tablo 5.21. Optimum geopolimer betonun çalışmada üretimi gerçekleşen geopolimer betonlar ile karşılaştırmalı sonuçları

Deneyler	Minimum sonuçlar	Optimum sonuçlar	Maksimum sonuçlar
İlk Priz Süresi (dk)	40	65	193
Son Priz Süresi (dk)	54	95	280
Slump (mm)	195	200	247
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	1,76	2,91	3,36
Basınç 2. gün (MPa)	14,1	46,7	48,2
Basınç 7. gün (MPa)	18,4	48,6	53,7
Basınç 28. gün (MPa)	21,0	44,4	51,3
Basınç 90. gün (MPa)	18,9	48,7	49,4
BHA (g/cm ³) 90. Gün	2,34	2,37	2,43
UPV (m/s) 90. Gün	3488	4522	4575
Dinamik Elastisite Modülü (MPa)	27825	42542	46975
Statik Elastisite Modülü (MPa)	5263	20917	23083
Sülfat Direnci 3. Ay Değişimi (%)	2,6	6,5	16,3
Sülfat Direnci Basınç Değişimi (%)	-52,0	+4,4	+41,6
Su Emme (%)	2,12	2,31	3,38
Boy Kısalması (%)	0,015	0,022	0,189
8. Gün Kılcal Su Emme Yüksekliği (I=mm)	2,00	1,67	4,19
Birim Maliyet (Dolar)	83	86	91
CO ₂ emisyonu (kg/m ³)	127	141	160



Şekil 5.74. Optimum geopolimer betonun a) SEM görüntüsü, b) EDX analizi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, öğütölmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), uçucu kül (UK), atık pencere camı tozu (ACT) atık malzemeleri kullanılarak Taguchi deneysel metoduna göre üretilen geopolimer harç/beton numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları, Taguchi deneysel tasarım metodu ve varyans analizinden elde edilen sonuçlarla birlikte değerlendirildi. Buna göre tezin kapsamında incelenen geopolimer betonlar için aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

1. İncelenen numunelerde, ilk priz süresi 40 ile 193 dakika arasında, son priz süresinin 54 ila 280 dakika arasında değiştiği bulundu. Genel olarak GBP'lerin priz sürelerinin PÇB betonlara göre daha kısa olduğu gözlemlendi, ancak özellikle ön dökümlü beton üretiminde geopolimer betonların priz sürelerinin nispeten kısa olmasının olumlu etkiler yapacağı düşünülmektedir. Karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması ile priz süresinin önemli oranda kısaldığı, ACT içeriğinin artması ile priz süresinin uzadığı görüldü. Bu durum, ÖYFC'nin daha hızlı reaksiyona girerek priz süresini düşürmesi ile açıklanabilir. SH molaritesi 10 M'ye kadar priz süresini uzatırken, 12 M'de priz süresini kısaltma eğiliminde olduğu görüldü. Cam tozu boyutunun priz süresine önemli bir etkisi olmadığı tespit edildi. Priz süresinde en yüksek etkiye sahip iki faktörün için en yüksek iki etkiyi %52,84 ile bağlayıcı karışım ve %21,67 ile ACT oranının yaptığı gözlemlendi.
2. Test edilen numunelerin slump (çökme) sonuçları 195 mm ile 247 mm arasında bulunmuştur. Burada en dikkat çekici husus yüksek slump değerine sahip olmalarına rağmen beton karışımlarda segregasyon görülmemesidir. Bu, geopolimer betonda kaynak malzeme ve kimyasalların yapısından kaynaklanan yüksek kohezyon sebebiyledir. İncelenen karışımlarda UK içeriği ve SH molaritesi arttıkça slump değerlerinin arttığı görüldü. Burada slump üzerindeki en yüksek etkiye sahip iki faktörün %30,72 ile bağlayıcı karışım ve % 21,15 ile SH molaritesinin yaptığı görüldü.
3. Test edilen beton numunelerin yoğunluk değerleri, taze halde 2,43 ila 2,47 gr/cm³, 2. Gün 2,38 ila 2,44 gr/cm³, 7. Gün 2,38 ila 2,43 gr/cm³, 28. Gün 2,37 ila 2,42 gr/cm³ ve 90. Gün 2,35 ila 2,3 arasında olduğu tespit edildi. Diğer bir ifadeyle, artan yaşla yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Bu durum, geopolimer reaksiyonunda

açığa çıkan suyun buharlaşması ile açıklanmaktadır. Spesifik olarak, karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması ile, GPB'lerin yoğunluk değerlerinin arttığı, ACT oranının artması ile GPB'lerin yoğunluk değerlerinin düştüğü görüldü. Bununla birlikte yoğunluk değerlerini etkileyen parametreler yüksekten düşüğe, bağlayıcı karışım, kürlleme sıcaklığı ve ACT oranı olarak bulundu.

4. Test edilen numunelerin UPV (m/s) sonuçları, 2. gün, 3986,7 ila 4893,9 (m/s), 7. gün, 3795,4 ila 4788,8 (m/s), 28. gün 3727,4 ila 4713,9 (m/s), 90. gün 3487,9 ila 4574,8 (m/s), arasında bulundu. Buna göre, yoğunluk değerlerine benzer şekilde UPV (m/s) değerlerinde de artan yaşla birlikte azalmalar gözlemlendi. Bununla birlikte, karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması, cam tozu boyutunun küçülmesi, kürlleme sıcaklığının artması ile UPV (m/s) değerlerinin arttığı görüldü. UPV (m/s) değerlerini %44,50 ile en yüksek oranda kürlleme sıcaklığının etkilediği, ancak toplam kaynak malzemenin etkisi göz önüne alındığında % 44,06'lık bir etkisi olduğu belirlendi.
5. Test edilen GPB numunelerin basınç dayanımı sonuçlarının, 2. gün 14,1 ila 48,2 MPa, 7. gün 18,4 ila 53,7 MPa, 28. gün 21,0 ila 51,3 MPa, 90. gün 18,9 MPa ila 49,4 MPa arasında bulundu. Bununla birlikte artan yaşla birlikte, geopolimer betonlarda görülen faz değişikliğinden kaynaklı basınç dayanımlarında ani değişimler gözlemlendi. Genel olarak tüm yaşlarda karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması dayanımları düşürmektedir. Karışımlarda cam tozunun %10'dan %20'ye kadar artmasının dayanımları arttırdığı %20 den daha yüksek oranlarda dayanımları düşürdüğü görüldü. Bu durum, ACT'nin nispeten daha düşük reaksiyon kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Cam tozu boyutunun genel olarak küçülmesi dayanımları arttırmaktadır. Bu durumda cam tozunun filler etkisi gösterdiği ve cam tozunun küçülmesi ile daha reaktif hale geldiği söylenebilir. Kürlleme sıcaklığı en etkili parametre olarak gözlemlendi. Buna göre, 75 °C'ye kadar dayanımları arttırmakta 90 °C gelindiğinde düşme eğilimine girmekte olduğu görüldü. SH molaritenin artması 8 mole kadar dayanımın arttığı, 8 molden sonra dayanımı sürekli olarak düşürdüğü görüldü. Bu artan molaritenin belirli bir seviyeden sonra reaksiyonu olumsuz etkilediğini göstermektedir. Özellikle ACT'nun varlığında ortamdaki artan alkali miktarı ile molaritenin 8 mol gibi nispeten düşük bir değerde kalmasını sağlamıştır.
6. İncelenen GPB numunelerin yarmada çekme dayanımlarının, 1,76 MPa ila 3,36 MPa arasında değiştiği gözlemlendi. Beklenildiği üzere yarmada çekme dayanımlarının

basınç dayanımları ile genel olarak uyumlu olduğu tespit edildi. Bununla birlikte, yarmada çekme dayanımlarının yüksek basınç dayanımlarına kıyasla daha düşük olduğu bununda büyük oranda kürlleme sıcaklıklarının meydana getirdiği mikro çatlaklar sebebiyle gerçekleştiği gözlemlendi. Taguchi metoduna göre, karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması ve SH molaritesinin artması ile yarmada çekme dayanımı sonuçlarının arttığı görüldü. Karışımlarda ACT oranının %10'dan %20 artması yarmada çekme dayanımını arttırırken %20 den sonra dayanımı düşürdüğü görüldü. Benzer şekilde kürlleme sıcaklığının 75 °C ye kadar yarmada çekme dayanımını arttırdığı 90 °C'ye gelindiğinde ise çekme dayanımının düşme eğilimi gösterdiği görüldü. Ek olarak, yarmada çekme dayanımlarına en yüksek etkiyi %50,26 ile kürlleme sıcaklığının yaptığı görüldü.

7. Test edilen GPB numunelerin dinamik elastisite ve statik elastisite modülü sırasıyla 27825,4 ila 46974,7 MPa arasında, 5262,6 ile 23083,4 MPa arasında bulundu. Bununla birlikte karışımlarda ÖYFC içeriğinin artması dinamik elastisite modülünü sürekli olarak arttırdığı, statik elastisite modülünü ise belirli bir seviye kadar arttırdığı, sonrasın düşürme eğilimine girdiği görüldü. ACT oranı ise her iki elastisite modülü üzerinde %20 ye kadar pek bir etkisinin olmadığı sonrasında ise düşürme eğiliminde olduğu görüldü. Cam tozu boyutunun küçülmesi genel olarak her iki modülü de olumlu yönde etkilemiş ancak statik elastisite modülünde 2 nolu cam tozu en iyi sonucu vermiştir. Kürlleme sıcaklığının artması dinamik elastisite modülünü sürekli olarak arttırdığı, statik elastisite modülünde ise 75 °C ye kadar arttırdığı sonrasında düşürdüğü görüldü. SH molaritesi dinamik elastisite modülü üzerinde belirgin bir etki yapmadığı, statik elastisite modülü üzerinde 8 M'e kadar olumlu sonrasında olumsuz etkiler yaptığı görüldü. Her iki elastisite modülü sonuçlarında en çok kürlleme sıcaklığından etkilendiği, dinamik elastisite de bu yüzde %36,12 iken statik elastisite sonuçlarında %72,56 şeklinde geldiği görülmüştür.
8. İncelenen numunelerde su emme oranı (%) sonuçları %2,12 ila %3,38 arasında olduğu görüldü. Su emme değerlerinin, basınç dayanım sonuçları ile genel olarak uyumlu geldiği görüldü. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının artması ile belirli bir seviyeye (70/30) kadar su emme oranının azaldığı, ACT oranının artması ile su emme oranının arttığı görüldü. Cam tozu boyutu belirgin bir sonuç göstermemekle beraber en iyi sonuç 2 nolu karışımda görüldü. Kürlleme sıcaklığının 75 °C kadar artması su

emme oranını azalttığı, SH molaritesinin 8 mole kadar Su emme oranını azalttığı daha yüksek molaritelerde ise düşürdüğü görüldü. Varyans analizi sonuçlarına göre, su emme (%) değerlerine en yüksek etkiyi % 42,54 ile kürleme sıcaklığının yaptığı görüldü.

9. İncelenen numunelerde kılcal su emme sonuçları kılcal su emme yüksekliklerinin 2,003 mm ile 4,189 mm arasında değiştiği gözlemlendi. Bununla birlikte, basınç dayanım sonuçları ile kılcal su emme sonuçları arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlendi. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının artması ve ACT oranının azalması kılcal su emme oranını düşürdüğü görüldü. Buradan ÖYFC'nin kılcal su emme oranını azalttığı, UK ve ACT'nin ise kılcal su emme oranını arttırdığı söylenebilir. Cam tozu boyutunun kılcal su emme üzerinde belirgin bir etkisi görülmedi. Kürleme sıcaklığının 75 °C ye kadar artması kılcal su emme oranını azaltırken, 90 °C'ye gelindiğinde kılcal su emme oranının arttığı görüldü. SH molaritesinin 10 mole kadar artması kılcal su emmeyi azalttığı, sonrasında arttırdığı görüldü. Ayrıca, kılcal su emmeye en yüksek etkiyi % 66,05 ile bağlayıcı karışımın en yüksek ikinci etkiyi %19,93 ile kürleme sıcaklığının yaptığı görüldü. ÖYFC/UK oranının su emme oranının etkisi incelendiğinde, geopolimer reaksiyonlar sonucu oluşan düşük gözenekli C-A-S-H jellerinin, yüksek gözenekli N-A-S-H jellerine geçişinin kılcal su emme oranını önemli oranlarda etkilediği söylenebilir.
10. Test edilen GPB numunelerin magnezyum sülfat atağı sonuçları incelendiğinde üretilen geopolimer betonların sülfat etkisine karşı mükemmel dirençli oldukları görüldü. Tüm numunelerde UPV artışları görüldü. Bununla birlikte, numunelerin birçoğunda basınç dayanımlarında önemli artışlar meydana geldi. Ayrıca, sülfat sonrası numunelerde hiçbirinde herhangi bir bozulma emaresi görülmedi. Geopolimer betonlardaki bu UPV gözenekleri dolduran sülfat çözeltisi ve oluşan yeni reaksiyonlar sebebiyle olduğu söylenebilir. Özellikle nispeten reaksiyonun tamamlanmadığı karışımlarda yeni M-A-S-H, M-C-A-S-H ve M-N-A-S-H jellerinin oluşması ile mikro yapının güçlendiği böylece dayanımların arttığı düşünülmektedir. Ayrıca kürleme sıcaklığının artması bozulmayı arttırıcı yönde etkileyen bir parametre olabilir. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının düşmesi, kürleme sıcaklığının düşmesinin UPV değişimini olumlu yönde etkilediği görüldü. ACT oranının artmasının ile önce düşme sonrasında ise artışa sebep olduğu, en iyi sonuçların %40 ACT oranında geldiği

görüldü. Varyans analizi sonuçlarına göre UPV (m/s) değişimine en yüksek etkiyi %60,85 ile kürlenme sıcaklığının yaptığı, bunu % 24,83 ile ACT oranının izlediği gözlemlendi.

11. Rötire sonuçları, geopolimer betonların portland çimentolu betonlara kıyasla çok daha düşük boy kısaltmaları yaptığını göstermiştir. 112. Gün değerlerine göre, en düşük boy kısaltması 41 mikrostrain en yüksek boy kısaltması 504 mikrostrain olarak bulundu. Bununla birlikte, geopolimer harçların 90 günde boy kısaltmasını tamamladığı 90 ile 112 gün arasında hiç değişme ya da 1-2 mikrostrain değişme olduğu gözlemlendi. Rötire değişimine % 97,63 kürlenme sıcaklığının yaptığı ve kürlenme sıcaklığının artması ile boy kısaltmasının azaldığı görüldü. Buradan, kürlenme ile boy değişimine uğrayan numunelerin zaman içerisinde fazla bir değişim göstermediği sonucu çıkartılabilir.
12. Maliyet analizi sonuçlarına göre üretilen geopolimer betonların 1 m³'nün 82,6 ile 91,2 dolar arasında olduğu hesaplandı. Bununla birlikte en yüksek maliyetin alkali çözeltilerden kaynaklandığı görüldü. Spesifik olarak, maliyetin yaklaşık %70-75'inin alkali çözeltiler, yaklaşık %8-12 sinin kaynak malzemeler, yaklaşık %2-5'ini kürlenme işlemi, yaklaşık %10 unu agregalar, yaklaşık %4 ünü süper akışkanlaştırıcı ve yaklaşık %0,03 ünün toplam su tarafından oluştuğu görüldü. Taguchi deneysel metodu ve varyans analizine göre, maliyet analizine en yüksek etkiyi, %69,37 ile SH molaritesinin, %17,67 ile kürlenme sıcaklığının yaptığı görüldü. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması, ACT oranının artması, cam tozu boyutunun büyümesi, kürlenme sıcaklığının düşmesi ve SH molaritesinin düşmesi sürekli olarak maliyeti azaltmakta olduğu gözlemlendi.
13. CO₂ emisyonu analizleri sonuçlarına göre üretilen geopolimer betonların 1m³'ü için 126,8 kgCO₂/m³ ile 159,9 kg CO₂ emisyonu açığa çıktığı hesaplandı. Bu sonuçlara göre GPB üretimi için açığa çıkan sera gazının PÇB'ye kıyasla daha düşük (yaklaşık 3'te 1'i kadar) olduğu gözlemlendi. Bununla birlikte en yüksek CO₂ emisyonun alkali çözeltilerden geldiği görüldü. Toplam emisyonun yaklaşık %67-82 alkali çözeltiler, yaklaşık %18-30'unun kürlenme işlemi, yaklaşık %8-22'ini kaynak malzemeler, yaklaşık %4-11 unu agregalar, yaklaşık %2 ünü süper akışkanlaştırıcı tarafından oluştuğu görüldü. Taguchi deneysel metodu ve varyans analizine göre, CO₂ emisyonuna en yüksek etkiyi %53,41 ile kürlenme sıcaklığı, %40,92 ile SH molaritesi

yapmaktadır. Ayrıca, diğer parametrelerin önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlendi. Karışımlarda ÖYFC/UK oranının azalması, ACT oranının artması, cam tozu boyutunun büyümesi, kütleme sıcaklığının düşmesi ve SH molaritesinin düşmesinin CO₂ emisyonunu azalttığı gözlemlendi.

14. Yapılan SEM ve EDX analizlerinde tüm geopolimer beton numunelerde oldukça yoğun bir yapı görüldü. Bu durumun düşük su/katı oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, numunelerde reaksiyona girmemiş parçacıklar, kısmen reaksiyona girmiş parçacıklar, mikro çatlaklar, boşluklar ve geopolimer jeller görüldü. Ancak yüksek basınç dayanımları veren numunelerde daha az reaksiyona girmemiş parçacıklar, artmış geopolimer jel matrisi ve daha yoğun bir ara yüzey görülürken, düşük dayanım veren numunelerde ise daha fazla reaksiyona girmemiş parçacıklar, daha düşük yoğunluklu geopolimer jel matrisi ve arayüzeylerde mikro çatlakların olduğu görüldü. SEM görüntülerinin genel olarak basınç dayanımı ile uyumlu geldiği söylenebilir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta kürlen numunelerde daha fazla mikro çatlaklar olduğu gözlemlendi. EDX analizlerinde ise geopolimer jellerde oluşan Al-O-Si ve Si-O-Si bağlarına, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin varlığına işaret eden O, Si, Ca, Na, Al elementleri gözlemlendi.
15. Genel performans değerlendirmesi sonucu tasarlanan optimum geopolimer beton yapılan deneyler istenilen düzeylerde performans vermiştir. Bu da optimum geopolimer beton tasarımı için yapılan genel performans değerlendirmesinin doğruluğunu göstermektedir.

Bu sonuçlara göre, erken yüksek dayanım alan ve mükemmel durabilite özellikleri gösteren geopolimer beton, gelecekte inşaat sektörü için önemli bir beton türü ve sürdürülebilir bir beton olarak karşımıza çıkmaktadır. Çimento yerine UK, ÖYFC ve CT gibi atık malzemelerin kullanımı, hem yüksek CO₂ emisyonunun azaltılmasına hem de bu atıkların çevreye olan zararlarını minimuma indirilmesine yardımcı olacaktır. Durabilite açısından yüksek direnç ve pozitif dayanım değişimleri gösteren geopolimer betonların, özellikle sülfat atağına maruz kalan yapılarda kullanılması gelecekte önemli bir konu olarak karşımıza çıkacaktır.

Çalışma sonuçlarına göre, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, UPV, dinamik elastisite, statik elastisite, magnezyum sülfat direnci, rötre, su emme (%) deneylerinde ve

CO₂ emisyonunda, kürleme sıcaklığının en önemli etki faktörü olduğu; priz süresi, slump, yoğunluk ve kılcal su emme deneylerinde ise bağlayıcı karışımın en büyük etki faktörü olduğu; maliyet analizinde, SH molaritesinin en önemli etkin faktör olduğu görüldü. Özellikle cam tozu boyutunun deneyler ve analizler üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlendi. Bu sonuçlara göre, daha sürdürülebilir ve ekonomik bir beton üretimi için deneyler üzerinde daha az etkiye sahip parametrelerin istenilen şekilde seçilmesinin mümkün olduğu görülmektedir. Örneğin, cam tozu boyutu parametresinin deneyler üzerinde çok az etkisi olduğu belirlendiğinden, maliyet açısından en uygun olan 4 nolu cam tozunun seçilmesi mantıklı bir tercih olacaktır.

Farklı kaynak malzemeler ve kimyasallar ile üretimi mümkün olan geopolimer beton için farklı kombinasyon denemeleri yapılmalı en uygun parametreler belirlenmelidir. Ayrıca birbirini olumlu ya da olumsuz olarak doğrudan etkileyen parametreler ve parametrelerin arasındaki karşılıklı ilişkiyi anlamak için çalışmalar sürdürülmelidir. Bununla birlikte yüksek maliyet gösteren alkali çözeltiler ve kürleme sıcaklıklarının geopolimer betonun sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Ayrıca kürleme işleminin şantiyede yapılmasının çok zor olduğu da açıktır. Bunun için soda külü (Na₂CO₃) gibi nispeten daha uygun fiyatlı alkali çözeltiler ile çalışmalar yürütülmeli, hava kürü uygulamasına ağırlık verilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdalqader, A. F., Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2016). Development of Greener Alkali-Activated Cement: Utilisation of Sodium Carbonate for Activating Slag and Fly Ash Mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113, 66-75.
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Woof, B., & Illikainen, M. (2020). High Strength Fiber Reinforced One-Part Alkali Activated Slag/Fly Ash Binders with Ceramic Aggregates: Microscopic Analysis, Mechanical Properties, Drying Shrinkage, and Freeze-Thaw Resistance. *Construction and Building Materials*, 241, 118129.
- Adesina, A. (2022). Durability and Microstructural Characteristics of Alkali Activated Materials Made with Waste Glass as Precursor: A Review. *Cleaner Materials*, 100134.
- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2016). Impact of Combined Use of Ground Glass Powder and Crushed Glass Aggregate on Selected Properties of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, 117, 263-272.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A Review on The Utilization of Fly Ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- Albitar, M., Ali, M. M., Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability Evaluation of Geopolymer and Conventional Concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374-385.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential Applications of Geopolymer Concrete in Construction: A Review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Álvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., ... & Barra, M. (2008). Environmental, Physical and Structural Characterisation of Geopolymer Matrixes Synthesised From Coal (co-) Combustion Fly Ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 175-183.
- American Society for Testing and Materials. (2004). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* (ASTM C1585-04). Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution* (ASTM C1012-09). Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete* (ASTM C597-16). Pennsylvania.

- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete* (ASTM C490/C490M-17). Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM C618-19). Pennsylvania.
- Amin, M. N., Kim, J. S., Dat, T. T., & Kim, J. K. (2010). Improving Test Methods to Measure Early Age Autogenous Shrinkage in Concrete Based on Air Cooling. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(4), 244-256.
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly Ash-Based Eco-Friendly Geopolymer Concrete: A Critical Review of the Long-Term Durability Properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857.
- Annakoa, İ., M., (2019). Geopolimer Betonda Cam Tozu Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 612407.
- Anonim (2011) Merck Laboratuvar El Kitabı (2. baskı), ISBN 978-975-00373-1-3
- Arıöz, E. (2018). Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, Ph ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 405963.
- Asghar, R., Khan, M. A., Alyousef, R., Javed, M. F., & Ali, M. (2023). Promoting the Green Construction: Scientometric Review on The Mechanical and Structural Performance of Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 368, 130502.
- Axinte, E. (2011). Glasses as Engineering Materials: A Review. *Materials & Design*, 32(4), 1717-1732.
- Babu, G. K., Rao, K. V., Dey, S., & Veerendra, G. T. N. (2023). Performance Studies on Quaternary Blended Geopolymer Concrete. *Hybrid Advances*, 2, 100019.
- Badar, M. S., Kupwade-Patil, K., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Allouche, E. N. (2014). Corrosion of Steel Bars Induced by Accelerated Carbonation in Low and High Calcium Fly Ash Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 79-89.
- Bahadur, R., & Parashar, A. K. (2023). An Investigation of Waste Glass Powder With The Substitution of Sand on Concrete Mix. *Materials Today: Proceedings*.
- Bailera, M. (2023). Comparing Different Syngas for Blast Furnace Ironmaking by Using The Extended Operating Line Methodology. *Fuel*, 333, 126533.

- Bakharev, T. (2005). Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246.
- Bakharev, T. (2006). Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134-1147.
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., & Türker, H. T. (2015). Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Çekip Çıkarma ve Aşınma Dirençlerinin Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 87-98.
- Behfarnia, K., & Rostami, M. (2017). An Assessment on Parameters Affecting The Carbonation of Alkali-Activated Slag Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 157, 1-9.
- Bellum, R. R., Muniraj, K., & Madduru, S. R. C. (2020). Investigation on Modulus of Elasticity of Fly Ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Blended Geopolymer Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 27, 718-723.
- Bernal, S. A., de Gutiérrez, R. M., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., & Delvasto, S. (2011). Effect of Binder Content on The Performance of Alkali-Activated Slag Concretes. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 1-8.
- Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., ... & van Deventer, J. S. (2013). Gel Nanostructure in Alkali-Activated Binders Based on Slag and Fly Ash, and Effects of Accelerated Carbonation. *Cement and Concrete Research*, 53, 127-144.
- Berndt, M. L. (2009). Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2606-2613.
- Bhatt, P., MacGinley, T., & Choo, B. (2014). *Reinforced Concrete Design to Eurocodes* (Vol. 4). CRC Press.
- Bianco, I., Tomos, B. A. D., & Vinai, R. (2021). Analysis of The Environmental Impacts of Alkali-Activated Concrete Produced With Waste Glass-Derived Silicate Activator—A LCA Study. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128383.
- Bobirică, C., Shim, J. H., Pyeon, J. H., & Park, J. Y. (2015). Influence of Waste Glass on The Microstructure and Strength of Inorganic Polymers. *Ceramics International*, 41(10), 13638-13649.
- BSI. (2006). EN 15167-1: 2006 Ground Granulated Blast Furnace Slag For Use in Concrete, Mortar and Grout. *Definitions, Specifications and Conformity Criteria*.

- Cai, W., Cen, G., & Wang, H. (2017). Fracture Surface Fractal Characteristics of Alkali-Slag Concrete Under Freeze-Thaw Cycles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Calmon, J. L., Sauer, A. S., Vieira, G. L., & Teixeira, J. E. S. L. (2014). Effects of Windshield Waste Glass on The Properties of Structural Repair Mortars. *Cement and Concrete Composites*, 53, 88-96.
- Carro-López, D., González-Fontebao, B., Eiras-López, J., & Seara-Paz, S. (2019). Comparing Circulating Fluidised Bed Fly Ash and Limestone as Additions For Cement. *Magazine of Concrete Research*, 71(24), 1302-1311.
- Chakkor, O., Altan, M. F., & Canpolat, O. (2021). Metakaolin and Red-Mud Based Geopolymer: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *Celal Bayar University Journal of Science*, 17(1), 101-113.
- Chen, G., Lee, H., Young, K. L., Yue, P. L., Wong, A., Tao, T., & Choi, K. K. (2002). Glass Recycling in Cement Production—An Innovative Approach. *Waste Management*, 22(7), 747-753.
- Chen, X., He, Y., Cui, X., & Liu, L. (2023). High Value Utilization of Waste Blast Furnace Slag: New Ni-CeO₂/hBFS Catalyst For Low Temperature CO₂ Methanation. *Fuel*, 338, 127309.
- Chi, M., & Huang, R. (2013). Binding Mechanism and Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Mortars. *Construction and Building Materials*, 40, 291-298.
- Chindaprasirt, P., & Chalee, W. (2014). Effect of Sodium Hydroxide Concentration on Chloride Penetration and Steel Corrosion of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Under Marine Site. *Construction and Building Materials*, 63, 303-310.
- Chindaprasirt, P., Lao-un, J., Zaetang, Y., Wongkvanklom, A., Phoo-ngernkham, T., Wongsas, A., & Sata, V. (2022). Thermal Insulating and Fire Resistance Performances of Geopolymer Mortar Containing Auto Glass Waste as Fine Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 60, 105178.
- Christensen, T. (Ed.). (2011). *Solid Waste Technology and Management*. John Wiley & Sons.
- Cui, X. M., Liu, L. P., He, Y., Chen, J. Y., & Zhou, J. (2011). A Novel Aluminosilicate Geopolymer Material With Low Dielectric Loss. *Materials Chemistry and Physics*, 130(1-2), 1-4.
- Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of Inorganic Polymer (Geopolymer) Mortars Made of Glass Cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782-2797.

- Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., & Sahmaran, M. (2021). Extensive Evaluation on The Effect of Glass Powder on The Rheology, Strength, and Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer Binders. *Construction and Building Materials*, 268, 121168.
- Danish, A., Ozbakkaloglu, T., Mosaberpanah, M. A., Salim, M. U., Bayram, M., Yeon, J. H., & Jafar, K. (2022). Sustainability Benefits and Commercialization Challenges and Strategies of Geopolymer Concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 105005.
- Dave, S. V., & Bhogayata, A. (2020). The Strength Oriented Mix Design For Geopolymer Concrete Using Taguchi Method and Indian Concrete Mix Design Code. *Construction and Building Materials*, 262, 120853.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and The Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, 16, 91-91.
- Davidovits, J. (2002, October). Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In *Geopolymer 2002 conference* (Vol. 28, p. 29). Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer Chemistry and Sustainable Development. The Poly(Sialate) Terminology : A Very Useful and Simple Model for The Promotion and Understanding of Green-Chemistry. In *Proceedings of The World Congress Geopolymer*, Saint-Quentin, France, 28 June-1 July 2005.
- Davidovits, J. (2005). Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of The World Congress Geopolymer 2005. Geopolymer Institute.
- De Castro, S., & De Brito, J. (2013). Evaluation of The Durability of Concrete Made With Crushed Glass Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41, 7-14.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of Geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512-518.
- Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending With Fly Ash and Activator Content on The Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Drying Shrinkage of Slag Blended Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.

- Dehghani, A., Aslani, F., & Panah, N. G. (2021). Effects of Initial SiO₂/Al₂O₃ Molar Ratio and Slag on Fly Ash-Based Ambient Cured Geopolymer Properties. *Construction and Building Materials*, 293, 123527.
- Demir, F., (2019), Endüstriyel Atıklardan Elde Edilen Geopolimerlerin Sulardan Ağır Metal Gideriminde Adsorban Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 605812.
- Dikmen, S., Dikmen, Z., Yilmaz, G., & Firat, S. (2019). Mechanical Activation of Fly Ash: Physical, Mineralogical and Morphological Characterization of Ground Fly Ashes. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 20, 66-76.
- Duan, W., Li, P., Wu, Q., & Song, H. (2022). Life Cycle Assessment of A Novel Blast Furnace Slag Utilization System. *Energy*, 251, 123900.
- Dumitru, I., & Song, T. (2018). Waste glass. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 257-288). Woodhead Publishing.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of The Art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The Role of Inorganic Polymer Technology in The Development of Green Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597.
- Dyer, T. D. (2014). Glass Recycling. In *Handbook of Recycling* (pp. 191-209). Elsevier.
- Ekinci E. (2022) Bakteri Esasli Kendini Onarma Sisteminin Geopolimer Hamur ve Harçların Performansına Etkisi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 731732.
- Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., & Elshaboury, A. M. (2018). Magnesium Sulfate Resistance of Geopolymer Mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111-127.
- Erfanimesh, A., & Sharbatdar, M. K. (2020). Mechanical and Microstructural Characteristics of Geopolymer Paste, Mortar, and Concrete Containing Local Zeolite and Slag Activated by Sodium Carbonate. *Journal of Building Engineering*, 32, 101781.
- Ertürk, N (2019), Isıl İşlemin Konvansiyonel Camın Mekanik Davranışı Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu, 568350.

- Evangelista, L., & De Brito, J. M. C. L. (2010). Durability Performance of Concrete Made With Fine Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.
- Fang, G., Ho, W. K., Tu, W., & Zhang, M. (2018). Workability and Mechanical Properties of Alkali-Activated Fly Ash-Slag Concrete Cured at Ambient Temperature. *Construction and Building Materials*, 172, 476-487.
- Farooq, F., Jin, X., Javed, M. F., Akbar, A., Shah, M. I., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer Concrete as Sustainable Material: A State of The Art Review. *Construction and Building Materials*, 306, 124762.
- Federico, L. M., & Chidiac, S. E. (2009). Waste Glass as A Supplementary Cementitious Material in Concrete—Critical Review of Treatment Methods. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 606-610.
- Fernández-Duque, B., Pérez, I. A., Sánchez, M. L., García, M. Á., & Pardo, N. (2017). Temporal Patterns of CO₂ and CH₄ in A Rural Area in Northern Spain described by A Harmonic Equation Over 2010–2016. *Science of The Total Environment*, 593, 1-9.
- Fernando, P. T., & Said, J. (2011). Retracted Article: Resistance to Acid Attack, Abrasion and Leaching Behavior of Alkali-Activated Mine Waste Binders. *Materials and Structures*, 44, 487-498.
- Flower, D. J., & Sanjayan, J. G. (2007). Green House Gas Emissions Due to Concrete Manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 282-288.
- Ganesan, N., Abraham, R., & Raj, S. D. (2015). Durability Characteristics of Steel Fibre Reinforced Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 471-476.
- García-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, Á., & Fernández-Jiménez, A. (2012). Cimenturi Hibride Alcaline. Partea I: Fundamente Hybrid Alkaline Cements. Part I: Fundamentals. *Revista Romana de Materiale*, 42(4), 330.
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K., & Kumar, S. (2018). Estimation of Geopolymer Concrete Strength From Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Using High Power Pulser. *Journal of Building Engineering*, 16, 39-44.
- Gollakota, A. R., Volli, V., & Shu, C. M. (2019). Progressive Utilisation Prospects of Coal Fly Ash: A Review. *Science of The Total Environment*, 672, 951-989.
- Gopalakrishna, B., & Dinakar, P. (2023). Mix Design Development of Fly Ash-GGBS Based Recycled Aggregate Geopolymer Concrete. *Journal of Building Engineering*, 63, 105551.

- Grabias-Blicharz, E., & Franus, W. (2023). A Critical Review on Mechanochemical Processing of Fly Ash and Fly Ash-Derived Materials. *Science of The Total Environment*, 160529.
- Grubeša, I. N., Barišic, I., Fucic, A., & Bansode, S. S. (2016). Application of Blast Furnace Slag in Civil Engineering. *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*; Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 51-66.
- Gu, L., Visintin, P., & Bennett, T. (2018). Evaluation of Accelerated Degradation Test Methods For Cementitious Composites Subject to Sulfuric Acid Attack; Application to Conventional and Alkali-Activated Concretes. *Cement and Concrete Composites*, 87, 187-204.
- Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2016). Long Term Permeation Properties of Different Fly Ash Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 124, 352-362.
- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New Perspectives on Recycling Waste Glass in Manufacturing Concrete for Sustainable Civil Infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579.
- Gutt, W. (1992). BS 6699: 1992 Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use With Portland Cement. *Concrete (London)*, 26(1), 37-38.
- Gültekin A. (2022) Farklı Mineral Malzemelerle Geopolimer Kompozit Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 729139.
- Güneş M. (2023) Farklı Tasarım Ve Kür Parametreleri İle Geliştirilen Tasarlanmış Geopolimer Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Sentetik Vollaştonit Mikrofiberlerin Etkileri, Doktora Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 777033.
- Güneyli, H., Karahan, S., & Güneyli, A. (2017). Water Content and Temperature Effect on Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 53, 159-166.
- Güzel, A. S. (2020), İnce Soda Kireç Silika Float Camların Kimyasal Temperleme Yöntemiyle Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 620456.
- Hadi, M. N., Farhan, N. A., & Sheikh, M. N. (2017). Design of Geopolymer Concrete With GGBFS at Ambient Curing Condition Using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424-431.

- Hamada, H. M., Alya'a, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., Tayeh, B. A., & Humada, A. M. (2020). Effect of High-Volume Ultrafine Palm Oil Fuel Ash on The Engineering and Transport Properties of Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00318.
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Thomas, B. (2022). Effect of Recycled Waste Glass on The Properties of High-Performance Concrete: A Critical Review. *Case Studies in Construction Materials*, e01149.
- Han, S. H., & Kim, J. K. (2004). Effect of Temperature and Age on The Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1219-1227.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH Concentrations on Physical and Electrical Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.
- Harrison, E., Berenjian, A., & Seifan, M. (2020). Recycling of Waste Glass as Aggregate in Cement-Based Materials. *Environmental Science and Ecotechnology*, 4, 100064.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). A Review of Properties and Behaviour of Reinforced Geopolymer Concrete Structural Elements-A Clean Technology Option for Sustainable Development. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118762.
- He, P., Zhang, X., Chen, H., & Zhang, Y. (2021). Waste-to-Resource Strategies for The Use of Circulating Fluidized Bed Fly Ash in Construction Materials: A Mini Review. *Powder Technology*, 393, 773-785.
- Heikal, M., Nassar, M. Y., El-Sayed, G., & Ibrahim, S. M. (2014). Physico-chemical, Mechanical, Microstructure and Durability Characteristics of Alkali Activated Egyptian Slag. *Construction and Building Materials*, 69, 60-72.
- Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A Review on Fly Ash Characteristics—Towards Promoting High Volume Utilization in Developing Sustainable Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 147, 546-559.
- Htet, P., Chen, W., Hao, H., & Shaikh, F. (2022). Physical and Mechanical Properties of Quaternary Blended Concrete With Recycled Coarse Aggregates and Crushed Waste Glass. *Construction and Building Materials*, 353, 129016.
- Huang, J., Chen, H., Yang, J., Zhou, T., & Zhang, H. (2023). Effects of Particle Size on Microstructure and Mechanical Strength of A Fly Ash Based Ceramic Membrane. *Ceramics International*.

- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2017). Geopolymer Mortars as Sustainable Repair Material: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74.
- Hwang, S. S., & Cortes, C. M. M. (2021). Properties of Mortar and Pervious Concrete With Co-Utilization of Coal Fly Ash and Waste Glass Powder as Partial Cement Replacements. *Construction and Building Materials*, 270, 121415.
- Ibrahim, M., Johari, M. A. M., Rahman, M. K., Maslehuddin, M., & Mohamed, H. D. (2018). Enhancing the Engineering Properties and Microstructure of Room Temperature Cured Alkali Activated Natural Pozzolan Based Concrete Utilizing Nanosilica. *Construction and Building Materials*, 189, 352-365.
- Idir, R., Cyr, M., & Pavoine, A. (2020). Investigations on The Durability of Alkali-Activated Recycled Glass. *Construction and Building Materials*, 236, 117477.
- Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of Fine Glass as ASR Inhibitor in Glass Aggregate Mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1309-1312.
- Islam, M. M., Islam, M. S., Rahman, M. A., & Das, A. (2011). Strength Behavior of Mortar Using Slag as Partial Replacement of Cement. *Mist International Journal of Science and Technology*, 3(1).
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., ... & van Deventer, J. S. (2013). Influence of fly ash on the water And Chloride Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars and Concretes. *Construction and Building Materials*, 48, 1187-1201.
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of Waste Glass as A Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete. *Waste Management*, 29(2), 655-659.
- Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K. (2014). Fresh and Hardened Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Pastes With Superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 50, 169-176.
- Jiang, X., Xiao, R., Ma, Y., Zhang, M., Bai, Y., & Huang, B. (2020). Influence of Waste Glass Powder on The Physico-Mechanical Properties and Microstructures of Fly Ash-Based Geopolymer Paste After Exposure to High Temperatures. *Construction and Building Materials*, 262, 120579.
- 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*, 254, 119267.
- Jiang, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., & Shi, C. (2019). A Critical Review of Waste Glass Powder–Multiple Roles of Utilization in Cement-Based Materials and Construction Products. *Journal of Environmental Management*, 242, 440-449.

- Jin, S., Zhao, Z., Jiang, S., Sun, J., Pan, H., & Jiang, L. (2021). Comparison and Summary of Relevant Standards for Comprehensive Utilization of Fly Ash at Home and Abroad. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 621, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- Jin, Y., Feng, W., Zheng, D., Dong, Z., Cui, H., Li, M., ... & Tang, W. (2020). Study on The Interaction Mechanism Between Slags and Alkali Silicate Activators: A Hydration Kinetics Approach. *Construction and Building Materials*, 250, 118900.
- Jindal, B. B. (2019). Investigations on The Properties of Geopolymer Mortar and Concrete With Mineral Admixtures: A Review. *Construction and Building Materials*, 227, 116644.
- Jindal, B. B., Jangra, P., & Garg, A. (2020). Effects of Ultra Fine Slag as Mineral Admixture on The Compressive Strength, Water Absorption and Permeability of Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 871-877.
- Kanagaraj, B., Anand, N., & Lubloy, E. (2022). Performance Evaluation of Sodium Silicate Waste as A Replacement for Conventional Sand in Geopolymer Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134172.
- Kani, E. N., Allahverdi, A., & Provis, J. L. (2012). Efflorescence Control in Geopolymer Binders Based on Natural Pozzolan. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 25-33.
- Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Bayrak, B., Celebi, O., Bodur, B., Oz, A., & Aydin, A. C. (2023). Physico-mechanical, Thermal Insulation and Resistance Characteristics of Diatomite and Attapulgitite Based Geopolymer Foam Concrete: Effect of Different Curing Regimes. *Construction and Building Materials*, 373, 130850.
- Kaya, M. (2016). Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 434043.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What A Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *World Bank Publications*.
- Khan, M. N. N., Kuri, J. C., & Sarker, P. K. (2021). Effect of Waste Glass Powder as A Partial Precursor in Ambient Cured Alkali Activated Fly Ash and Fly Ash-GGBFS Mortars. *Journal of Building Engineering*, 34, 101934.
- Khan, M. N. N., Saha, A. K., & Sarker, P. K. (2020). Reuse of Waste Glass as A Supplementary Binder and Aggregate for Sustainable Cement-Based Construction Materials: A Review. *Journal of Building Engineering*, 28, 101052.

- Kılıçoğlu, C. (2013). Cam Atıklarının Betonda Agregada ve Çimento Yerine Kullanımı. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 341452.
- Kim, T., Tae, S., & Roh, S. (2013). Assessment of The CO₂ Emission and Cost Reduction Performance of A Low-Carbon-Emission Concrete Mix Design Using an Optimal Mix Design System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 729-741.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of Self-Compacting Concrete Prepared With Recycled Glass Aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 107-113.
- Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Impact of Alkali Silica Reaction on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), 131-139.
- Laskar, S. M., & Talukdar, S. (2017). Preparation and tests for workability, Compressive and Bond Strength of Ultra-Fine Slag Based Geopolymer as Concrete Repairing Agent. *Construction and Building Materials*, 154, 176-190.
- Lavanya, G., & Jegan, J. (2015). Durability Study on High Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Lee, B. J., Kee, S. H., Oh, T., & Kim, Y. Y. (2017). Evaluating The Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Lee, G., Poon, C. S., Wong, Y. L., & Ling, T. C. (2013). Effects of Recycled Fine Glass Aggregates on The Properties of Dry-Mixed Concrete Blocks. *Construction and Building Materials*, 38, 638-643.
- Lee, N. K., & Lee, H. K. (2013). Setting and Mechanical Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Concrete Manufactured at Room Temperature. *Construction and Building Materials*, 47, 1201-1209.
- Lıban, R. I. (2022) Taguchi Yöntemi ile Uçucu Kül ve Kalker Katkılı Zeolit Esaslı Geopolimer Harçların Tasarlanması, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 733206.
- Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., & Liu, Y. (2019). A Review on Mixture Design Methods for Geopolymer Concrete. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107490.
- Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Zhu, D., Hwang, H. J., Zhu, Y., & Sun, T. (2018). A Mixture Proportioning Method for The Development of Performance-Based Alkali-Activated Slag-Based Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 93, 163-174.
- Li, Z., & Li, S. (2018). Carbonation Resistance of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 668-680.

- Liew, Y. M., Heah, C. Y., & Kamarudin, H. (2016). Structure and Properties of Clay-Based Geopolymer Cements: A Review. *Progress in Materials Science*, 83, 595-629.
- Ling, T. C., Poon, C. S., & Kou, S. C. (2011). Feasibility of Using Recycled Glass in Architectural Cement Mortars. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 848-854.
- Liu, G., Florea, M. V. A., & Brouwers, H. J. H. (2019). Characterization and Performance of High Volume Recycled Waste Glass and Ground Granulated Blast Furnace Slag or Fly Ash Blended Mortars. *Journal of Cleaner Production*, 235, 461-472.
- Liu, J. X., Yu, Q. B., Dou, C. X., & Li, R. (2010). Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Apparatus for Recovering The Waste Heat of Blast Furnace Slag. In *Advanced Materials Research* (Vol. 97, pp. 2343-2346). Trans Tech Publications Ltd.
- Liu, J., Yu, Y., Kong, W., Wang, Q., He, Z., & Yang, X. (2022). Effect of Al₂O₃ on The Molten Slag Microstructure Information by Molecular Dynamics Simulation and Experimental Analysis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 578, 121354.
- Lloyd, R. R. (2009). Accelerated Ageing of Geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 139-166). Woodhead Publishing.
- Long, T., Wang, Q., Guan, Z., Chen, Y., & Shi, X. (2017). Deterioration and Microstructural Evolution of The Fly Ash Geopolymer Concrete Against MgSO₄ Solution. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Lu, J. X., & Poon, C. S. (2019). Recycling of Waste Glass in Construction Materials. In *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete* (pp. 153-167). Woodhead Publishing.
- Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2017). Using Glass Powder to Improve The Durability of Architectural Mortar Prepared With Glass Aggregates. *Materials & Design*, 135, 102-111.
- Luhar, S., Cheng, T. W., Nicolaidis, D., Luhar, I., Panias, D., & Sakkas, K. (2019). Valorisation of Glass Waste for development of Geopolymer Composites—Mechanical Properties and Rheological Characteristics: A Review. *Construction and Building Materials*, 220, 547-564.
- Lydon, F. D., & Balendran, R. V. (1986). Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3), 314-324.
- Lyu, X., Robinson, N., Elchalakani, M., Johns, M. L., Dong, M., & Nie, S. (2022). Sea Sand Seawater Geopolymer Concrete. *Journal of Building Engineering*, 50, 104141.

- Ma, X., Zhang, Z., & Wang, A. (2016). The Transition of Fly Ash-Based Geopolymer Gels Into Ordered Structures and The Effect on The Compressive Strength. *Construction and Building Materials*, 104, 25-33.
- Ma, Y., & Ye, G. (2015). The Shrinkage of Alkali Activated Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 68, 75-82.
- Mahmood, A. H., Foster, S. J., & Castel, A. (2020). Development of High-Density Geopolymer Concrete With Steel Furnace Slag Aggregate for Coastal Protection Structures. *Construction and Building Materials*, 248, 118681.
- Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S. (2016). Effects of Alkaline Solution on Properties of The HCFA Geopolymer Mortars. *Procedia Engineering*, 148, 710-717.
- Manikandan, P., & Vasugi, V. (2022). Potential Utilization of Waste Glass Powder as A Precursor Material in Synthesizing Ecofriendly Ternary Blended Geopolymer Matrix. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131860.
- Manjunath, R., Narasimhan, M. C., & Umesha, K. M. (2019). Studies on High Performance Alkali Activated Slag Concrete Mixes Subjected to Aggressive Environments and Sustained Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 229, 116887.
- Marvila, M. T., de Azevedo, A. R. G., de Oliveira, L. B., de Castro Xavier, G., & Vieira, C. M. F. (2021). Mechanical, Physical and Durability Properties of Activated Alkali Cement Based on Blast Furnace Slag as A Function of %Na₂O. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00723.
- Marvila, M. T., de Azevedo, A. R. G., Júnior, J. A. L., & Vieira, C. M. F. (2023). Activated Alkali Cement Based on Blast Furnace Slag: Effect of Curing Type and Concentration of Na₂O. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, R. M., & Illikainen, M. (2018). Drying Shrinkage in Alkali-Activated Binders—A Critical Review. *Construction and Building Materials*, 190, 533-550.
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020). Silica Fume and Waste Glass in Cement Concrete Production: A Review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete Incorporating OPC as Partial Replacement of Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 150, 792-807.
- Meraz, M. M., Mim, N. J., Mehedi, M. T., Farsangi, E. N., Shrestha, R. K., Arafin, S. A. K., ... & Meraz, M. M. (2023). Performance Evaluation of High-Performance Self-Compacting Concrete With Waste Glass Aggregate and Metakaolin. *Journal of Building Engineering*, 67, 105976.

- Mikulčić, H., Klemeš, J. J., Vujanović, M., Urbaniec, K., & Duić, N. (2016). Reducing Greenhouse Gases Emissions by Fostering The Deployment of Alternative Raw Materials and Energy Sources in The Cleaner Cement Manufacturing Process. *Journal of Cleaner Production*, 136, 119-132.
- Mirzahosseini, M., & Riding, K. A. (2015). Influence of Different Particle Sizes on Reactivity of Finely Ground Glass as Supplementary Cementitious Material (SCM). *Cement and Concrete Composites*, 56, 95-105.
- Mishra, J., Nanda, B., Patro, S. K., Das, S. K., & Mustakim, S. M. (2022). Influence of Ferrochrome Ash on Mechanical and Microstructure Properties of Ambient Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(3), 1095-1108.
- Mithun, B. M., & Narasimhan, M. C. (2016). Performance of Alkali Activated Slag Concrete Mixes Incorporating Copper Slag as Fine Aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 112, 837-844.
- Mo, L., Lv, L., Deng, M., & Qian, J. (2018). Influence of Fly Ash and Metakaolin on The Microstructure and Compressive Strength of Magnesium Potassium Phosphate Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 111, 116-129.
- Naenudon, S., Wongsu, A., Ekprasert, J., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2023). Enhancing The Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Using Recycled Aggregate From Waste Ceramic Electrical Insulator. *Journal of Building Engineering*, 106132.
- Nandagawali, S. D., & Dhamge, N. R. (2014). Study of Blast Furnace Slag For Improving Mechanical Property of Concrete. *Int. J. Eng. Sci. Inn. Tech.* 3 (4)(2014) 473, 477.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to Improve Setting and Early Strength Properties of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205-214.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2017). Flexural Strength and Elastic Modulus of Ambient-Cured Blended Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 22-31.
- Nath, S. K. (2018). Geopolymerization Behavior of Ferrochrome Slag and Fly Ash Blends. *Construction and Building Materials*, 181, 487-494.
- Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in Construction-Recent Developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472.

- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly Ash for sustainable construction: A Review of Fly Ash Concrete and Its Beneficial Use Case Studies. *Cleaner Materials*, 100143.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., & Repette, W. (2008). Drying And Autogenous Shrinkage of Pastes and Mortars With Activated Slag Cement. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 565-574.
- Neupane, K. (2022). Evaluation of Environmental Sustainability of One-Part Geopolymer Binder Concrete. *Cleaner Materials*, 6, 100138.
- Neupane, K., & Hadigheh, S. A. (2021). Sodium Hydroxide-Free Geopolymer Binder for Prestressed Concrete Applications. *Construction and Building Materials*, 293, 123397.
- Ng, C., Alengaram, U. J., Wong, L. S., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., & Ramesh, S. (2018). A Review on Microstructural Study and Compressive Strength of Geopolymer Mortar, Paste and Concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 550-576.
- Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., & Fantilli, A. P. (2009). A Practical Equation for Elastic Modulus of Concrete. *ACI Structural Journal*, 106(5), 690.
- Noushini, A., & Castel, A. (2016). The Effect of Heat-Curing on Transport Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477.
- Noushini, A., Castel, A., Aldred, J., & Rawal, A. (2020). Chloride Diffusion Resistance and Chloride Binding Capacity of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103290.
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of Recycled Aggregate on Fly Ash Geopolymer Concrete Properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016). Effect of Silica Fume on The Mechanical Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete. *Ceramics International*, 42(2), 3000-3006.
- Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete in The Presence of Silica Fume. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1062-1067.
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Designed by Taguchi Method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 191-198.

- Ozer, I., & Soyer-Uzun, S. (2015). Relations Between the Structural Characteristics and Compressive Strength in Metakaolin Based Geopolymers With Different Molar Si/Al Ratios. *Ceramics International*, 41(8), 10192-10198.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties–A Review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- Özcan, A. (2018). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 526096.
- Özgüden, Ö. (2019). Atık Cam Katkılı Betonların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 606301.
- Özkan, Ö., Yüksel, I., & Muratoğlu, Ö. (2007). Strength Properties of Concrete Incorporating Coal Bottom Ash and Granulated Blast Furnace Slag. *Waste Management*, 27(2), 161-167.
- Pal, S. C., Mukherjee, A., & Pathak, S. R. (2003). Investigation of Hydraulic Activity of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1481-1486.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhner, R., & Murphy, T. (2018). Compressive Strength and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Binders at High Temperature. *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18.
- Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2181-2189.
- Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2015). An Overview on The Influence of Various Factors on The Properties of Geopolymer Concrete Derived From Industrial By-Products. *Construction and Building Materials*, 77, 370-395.
- Pascual, A. B., Tognonvi, M. T., & Tagnit-Hamou, A. (2014). Waste Glass Powder-Based Alkali-Activated Mortar. *Int. J. Res. Eng. Technol*, 3(13), 32-36.
- Paul, D., Bindhu, K. R., Matos, A. M., & Delgado, J. (2022). Eco-friendly Concrete With Waste Glass Powder: A Sustainable and Circular Solution. *Construction and Building Materials*, 355, 129217.
- Peng, L., Zhao, Y., Ban, J., Wang, Y., Shen, P., Lu, J. X., & Poon, C. S. (2023). Enhancing The Corrosion Resistance of Recycled Aggregate Concrete by Incorporating Waste Glass Powder. *Cement and Concrete Composites*, 137, 104909.

- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.
- Pilehvar, S., Szczotok, A. M., Rodríguez, J. F., 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*, 200, 94-103.
- Pradhan, P., Dwibedy, S., Pradhan, M., Panda, S., & Panigrahi, S. K. (2022). Durability characteristics of geopolymer concrete-Progress and perspectives. *Journal of Building Engineering*, 105100.
- Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., Green, J. J., Avent, C., ... & Zak, M. A. (2000). Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental science & technology*, 34(8), 1576-1582.
- Provis, J. L. (2014). Geopolymers and Other Alkali Activated Materials: why, how, and what. *Materials and Structures*, 47, 11-25.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2009). Introduction to Geopolymers. *In Geopolymers* (pp. 1-11). Woodhead Publishing.
- Prusty, J. K., & Pradhan, B. (2020). Multi-response Optimization Using Taguchi-Grey Relational Analysis for Composition of Fly Ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 118049.
- Prusty, J. K., & Pradhan, B. Multi-Response Optimization Using Taguchi-Grey Relational Analysis for Composition of Fly Ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 118049, (2020).
- Puertas, F., & Torres-Carrasco, M. (2014). Use of Glass Waste as An Activator in The Preparation of Alkali-Activated Slag. Mechanical Strength and Paste Characterisation. *Cement and Concrete Research*, 57, 95-104.
- Ramezaniapour, A. A. (2014). Cement Replacement Materials. *Springer Geochemistry/Mineralogy*, DOI, 10, 978-3.
- Rangan, B. V. (2008). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Research Report GC 4 Engineering Faculty Curtin University of Technology Perth, Australia
- Rashidian-Dezfouli, H., & Rangaraju, P. R. (2017). A comparative Study on The Durability of Geopolymers Produced With Ground Glass Fiber, Fly Ash, and Glass-Powder in Sodium Sulfate Solution. *Construction and Building Materials*, 153, 996-1009.

- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on The Synthesis of Fly Ash Geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- Redden, R., & Neithalath, N. (2014). Microstructure, Strength, and Moisture Stability of Alkali Activated Glass Powder-Based Binders. *Cement and Concrete Composites*, 45, 46-56.
- Rickard, W. D., Riessen, A. V., & Walls, P. (2010). Thermal Character of Geopolymers Synthesized From Class F Fly Ash Containing High Concentrations of Iron and α -Quartz. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(1), 81-88.
- Rickard, W. D., Williams, R., Temuujin, J., & Van Riessen, A. (2011). Assessing The Suitability of Three Australian Fly Ashes as An Aluminosilicate Source for Geopolymers in High Temperature Applications. *Materials Science and Engineering: A*, 528(9), 3390-3397.
- Ronad, A., Karikatti, V. B., & Dyavanal, S. S. (2016). A Study on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Reinforced With Basalt Fiber. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(07), 474-478.
- Saavedra, W. G. V., & de Gutiérrez, R. M. (2017). Performance of Geopolymer Concrete Composed of Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 154, 229-235.
- SABBAĞ, N., & UYANIK, O. (2018). Doygun betonların Statik ve Dinamik Elastik Parametrelerinin Karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1181-1189.
- Saedi, M., Behfarnia, K., & Soltanian, H. (2019). The Effect of the blaine fineness On The Mechanical Properties of The Alkali-Activated Slag Cement. *Journal of Building Engineering*, 26, 100897.
- Saloma, S., Hanafiah, H., Saggaff, A., & Mawarni, A. (2016, October). Geopolymer Mortar With Fly Ash. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 78, No. 1, pp. 1-6). EDP Sciences.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Sulfate Attack Research—Whither Now. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845-851.
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of Fire Exposure on Cracking, Spalling and Residual Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592.
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of A Fine Glass Powder on The Durability Characteristics of Concrete and Its Comparison to Fly Ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496.

- Serinoğlu, Y. N. (2011). Normal ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Miktarının Taze Beton ve Sertleşmiş Beton Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 284510.
- Shahmansouri, A. A., Yazdani, M., Ghanbari, S., Bengar, H. A., Jafari, A., & Ghatte, H. F. (2021). Artificial Neural Network Model to Predict The Compressive Strength of Eco-Friendly Geopolymer Concrete Incorporating Silica Fume and Natural Zeolite. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123697.
- Shahrajabian, F., & Behfarnia, K. (2018). The Effects of Nano Particles on Freeze and Thaw Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 172-178.
- Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Recycled Coarse Aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100.
- Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (2000). The Effect of Fly Ash Composition on The Expansion Of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1063-1072.
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2022). Geopolymer Concrete as Green Building Materials: Recent Applications, Sustainable Development and Circular Economy Potentials. *Science of the Total Environment*, 155577.
- Sheng, G., Zhai, J., Li, Q., & Li, F. (2007). Utilization of Fly Ash Coming From a CFBC Boiler Co-Firing Coal and Petroleum Coke in Portland cement. *Fuel*, 86(16), 2625-2631.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H. (2005). Characteristics and Pozzolanic Reactivity of Glass Powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 987-993.
- Shimoda, K., & Saito, K. (2007). Detailed Structure Elucidation of The Blast Furnace Slag by Molecular Dynamics Simulation. *ISIJ International*, 47(9), 1275-1279.
- Shoaei, P., Ameri, F., Musaei, H. R., Ghasemi, T., & Cheah, C. B. (2020). Glass Powder as A Partial Precursor in Portland Cement and Alkali-Activated Slag Mortar: A Comprehensive Comparative Study. *Construction and Building Materials*, 251, 118991.
- Shojaei, M., Behfarnia, K., & Mohebi, R. (2015). Application of Alkali-Activated Slag Concrete in Railway Sleepers. *Materials & Design*, 69, 89-95.

- Si, R., Dai, Q., Guo, S., & Wang, J. (2020). Mechanical Property, Nanopore Structure and Drying Shrinkage of Metakaolin-Based Geopolymer With Waste Glass Powder. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118502.
- Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) at Elevated Temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 45-51.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer Concrete: A Review of Some Recent Developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90.
- Singhal, D., Junaid, M. T., Jindal, B. B., & Mehta, A. (2018). Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Incorporating Alccofine at Ambient Curing. *Construction and Building Materials*, 180, 298-307.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 37(2), 251-257.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 37(2), 251-257.
- Solis-Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2008). Evaluation of Concrete Made With Crushed Limestone Aggregate Based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1225-1231.
- Soner, T. O. P., & VAPUR, H. (2020). Artık Malzemelerden Box Behnken Test Dizaynı Kullanılarak Hafif Geopolimer Beton Üretimi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 689-700.
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- Song, W., Zhu, Z., Peng, Y., Wan, Y., Xu, X., Pu, S., ... & Wei, Y. (2019). Effect of Steel Slag on Fresh, Hardened and Microstructural Properties of High-Calcium Fly Ash Based Geopolymers at Standard Curing Condition. *Construction and Building Materials*, 229, 116933.
- Song, W., Zou, D., Liu, T., Teng, J., & Li, L. (2019). Effects of Recycled CRT Glass Fine Aggregate Size and Content on Mechanical and Damping Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 332-340.
- Soroushian, P. (2012). Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Containing Milled Glass as Partial Replacement for Cement. *Construction and Building Materials*, 29, 368-377.

- Soroushian, P., & Sufyan-Ud-Din, M. (2021). Long-Term Field Performance of Concrete Produced With Powder Waste Glass as Partial Replacement of Cement. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00745.
- Strini, A., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferone, C., Messina, F., Schiavi, L., ... & Cioffi, R. (2016). TiO₂-Based Photocatalytic Geopolymers for Nitric Oxide Degradation. *Materials*, 9(7), 513.
- Şinik, O., (2019). Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 566841.
- Taha, B., & Nounu, G. (2008). Properties of Concrete Contains Mixed Colour Waste Recycled Glass as Sand and Cement Replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713-720.
- Tahir, M. F. M., Abdullah, M. M. A. B., Abd Rahim, S. Z., Hasan, M. R. M., Saafi, M., Jaya, R. P., & Mohamed, R. (2022). Potential of Industrial By-Products Based Geopolymer for Rigid Concrete Pavement Application. *Construction and Building Materials*, 344, 128190.
- Tahwia, A. M., Abd Ellatief, M., Bassioni, G., Heniegal, A. M., & Abd Elrahman, M. (2023). Influence of High Temperature Exposure on Compressive Strength and Microstructure of Ultra-High Performance Geopolymer Concrete With Waste Glass and Ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5681-5697.
- Tatar, D. (2006), Sodyum Borsilikat Camlarından Yüksek Silikalı Camların Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 223577.
- T.C. Millî Eğitim Bakanlığı (2013). Seramik ve Cam Teknolojisi, Cam Türleri ve Camı Oluşturan Oksitler.
- Tchakouté, H. K., & Rüschler, C. H. (2017). Mechanical and Microstructural Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Cements from Sodium Waterglass and Phosphoric Acid Solution as Hardeners: A Comparative Study. *Applied Clay Science*, 140, 81-87.
- Tchakouté, H. K., Rüschler, C. H., Kamseu, E., Andreola, F., & Leonelli, C. (2017). Influence of the Molar Concentration of Phosphoric Acid Solution on the Properties of metakaolin-Phosphate-Based Geopolymer Cements. *Applied Clay Science*, 147, 184-194.
- Tchakouté, H. K., Rüschler, C. H., Kamseu, E., Djobo, J. N., & Leonelli, C. (2017). The Influence of Gibbsite in Kaolin and the Formation of Berlinite on the Properties of Metakaolin-Phosphate-Based Geopolymer Cements. *Materials Chemistry and Physics*, 199, 280-288.

- Tchakouté, H. K., Rüschler, C. H., Kong, S., Kamseu, E., & Leonelli, C. (2016). Geopolymer Binders From Metakaolin Using Sodium Waterglass from Waste Glass and Rice Husk Ash as Alternative Activators: A Comparative Study. *Construction and Building Materials*, 114, 276-289.
- Terro, M. J. (2006). Properties of Concrete Made With Recycled Crushed Glass at Elevated Temperatures. *Building and Environment*, 41(5), 633-639.
- Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., & Chindaprasirt, P. (2018). Compressive Strength and Microstructure Analysis of Geopolymer Paste Using Waste Glass Powder and Fly Ash. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2892-2898.
- Tho-In, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., & Jaturapitakkul, C. (2012). Pervious High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 366-371.
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., ... & Hamada, H. M. (2022). Geopolymer Concrete Incorporating Recycled Aggregates: A Comprehensive Review. *Cleaner Materials*, 100056.
- Thomas, M. D., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S., & Cail, K. (1999). Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1207-1214.
- Thomas, R. J., Lezama, D., & Peethamparan, S. (2017). On drying shrinkage in Alkali-Activated Concrete: Improving Dimensional Stability by Aging or Heat-Curing. *Cement and Concrete Research*, 91, 13-23.
- Thomaz, W.A., Miyaji, D. Y., & Possan, E. (2021). Comparative Study of Dynamic and Static Young's Modulus of Concrete Containing Basaltic Aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00645.
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2011). TÇMB Cürufırlar ve Cürufırlu Çımentolar.
- Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly Ash-Based Geopolymers Containing Added Silicate Waste. A Review. *Ceramics International*, 43(17), 14545-14551.
- Topcu, I. B., & Canbaz, M. (2004). Properties of Concrete Containing Waste Glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267-274.
- Topçu, İ. B., Toprak, M. U., & Uygunoğlu, T. (2014). Durability and Microstructure Characteristics of Alkali Activated Coal Bottom Ash Geopolymer Cement. *Journal of Cleaner Production*, 81, 211-217.
- Torgal, F. P., Miraldo, S., Labrincha, J. A., & De Brito, J. (2012). An Overview on Concrete Carbonation in the Context of Eco-Efficient Construction: Evaluation, Use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials*, 36, 141-150.

- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. J. J. O. C. P. (2015). Waste Glass in The Geopolymer Preparation. Mechanical and Microstructural Characterisation. *Journal of cleaner production*, 90, 397-408.
- Tsai, C. J., Huang, R., Lin, W. T., & Wang, H. N. (2014). Mechanical and Cementitious Characteristics of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Basic Oxygen Furnace Slag Blended Mortar. *Materials & Design*, 60, 267-273.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2010). *Beton - Taze Beton Deneyleri Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi* (TS EN 12350-2). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). *Genel Çimento Sınıflarının Bileşimini, Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri* (TS EN 197-1). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2015). *Beton deneyleri-Bölüm 10: Basınç Altında Statik Elastik Modülünün Belirlenmesi* (TS ISO 1920-10). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2017). *Agrega İle Birlikte Kullanılan Bağlayıcılar - Bölüm 2 : Priz süresi tayini*. (TS EN 480-2) Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini* (TS EN 12390-3). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini* (TS EN 12390-7). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Birim Hacim Kütlesi* (TS EN 12350-6). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *Betonun mekanik özellikleri - Bölüm 6: Basınç dayanımının belirlenmesi için deney yöntemi*. (TS EN 12390-6) Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (2009). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. *ANKARA, TÇMB*.
- Uğurlu, A. İ. (2020). Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme ve Sülfat Direncine Geri Dönüştürülmüş Agreganın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 651352.
- Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021). Mechanical and Microstructural Characterization of Geopolymers from Assorted Construction and Demolition Waste-Based Masonry and Glass. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124358.
- URL-1:<https://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/curuf-el-kitabi> (Ziyaret tarihi: 24 Şubat 2023).

- Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T., & Daxner, J. (2012). The Use of Blast Furnace Slag. *Metalurgija*, 51(4), 461-464.
- Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2017). High Strength Geopolymer Binder Based on Waste-Glass Powder. *Advanced Powder Technology*, 28(1), 215-222.
- Valencia Saavedra, W. G., Angulo, D. E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016). Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016148.
- Vanitha, N., Revathi, T., Sivasakthi, M., & Jeyalakshmi, R. (2022). Microstructure Properties of Poly (phospho-siloxo) Geopolymeric Network With Metakaolin as Sole Binder Reinforced With n-SiO₂ and n-Al₂O₃. *Journal of Solid State Chemistry*, 312, 123188.
- Vargas, J., & Halog, A. (2015). Effective Carbon Emission Reductions from Using Upgraded Fly Ash in The Cement Industry. *Journal of Cleaner Production*, 103, 948-959.
- Varma, D. N., & Singh, S. P. (2023). Recycled Waste Glass as Precursor for Synthesis of Slag-Based Geopolymer. *Materials Today: Proceedings*.
- Vassilev, S. V., & Vassileva, C. G. (2007). A New Approach for the Classification of Coal Fly Ashes Based on Their Origin, Composition, Properties, and Behaviour. *Fuel*, 86(10-11), 1490-1512.
- Vinai, R., & Soutsos, M. (2019). Production of Sodium Silicate Powder from Waste Glass Cullet for Alkali Activation of Alternative Binders. *Cement and Concrete Research*, 116, 45-56.
- Wallah, S., & Rangan, B. V. (2006). Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. Research Report GC 2 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia
- Wang, H. Y. (2009). A study of the effects of LCD Glass Sand on The Properties of Concrete. *Waste Management*, 29(1), 335-341.
- Wang, H. Y., & Huang, W. L. (2010). A study on The Properties of Fresh Self-Consolidating Glass Concrete (SCGC). *Construction and Building Materials*, 24(4), 619-624.
- Wang, H. Y., & Huang, W. L. (2010). Durability of Self-Consolidating Concrete Using Waste LCD glass. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1008-1013.
- Wang, W. C., Chen, B. T., Wang, H. Y., & Chou, H. C. (2016). A Study of The Engineering Properties of Alkali-Activated Waste Glass Material (AAWGM). *Construction and Building Materials*, 112, 962-969.

- Wang, Y., Liu, X., Zhang, W., Li, Z., Zhang, Y., Li, Y., & Ren, Y. (2020). Effects of Si/Al Ratio on The Efflorescence and Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118852.
- Williamson, T., & Juenger, M. C. (2016). The Role of Activating Solution Concentration on Alkali–Silica Reaction in Alkali-Activated Fly Ash Concrete. *Cement and Concrete Research*, 83, 124-130.
- Wongsa, A., Zaetang, Y., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates. *Construction and Building Materials*, 111, 637-643.
- Wu, J., Tan, Y., Li, P., Wang, H., Zhu, X., & Liao, Q. (2022). Centrifugal-Granulation-Assisted Thermal Energy Recovery Towards Low-Carbon Blast Furnace Slag Treatment: State of The Art and Future Challenges. *Applied Energy*, 325, 119835.
- Xiao, Q., Liu, X., Qiu, J., & Li, Y. (2020). Capillary Water Absorption Characteristics of Recycled Concrete in Freeze-Thaw Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-12.
- Xiao, R., Ma, Y., Jiang, X., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Y., ... & He, Q. (2020). Strength, Microstructure, Efflorescence Behavior and Environmental Impacts of Waste Glass Geopolymers Cured at Ambient Temperature. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119610.
- Xin, C., Li, Z., Hao, L., & Li, Y. (2023). A Comprehensive Review on Additive Manufacturing of Glass: Recent Progress and Future Outlook. *Materials & Design*, 111736.
- Xue, X., Liu, Y. L., Dai, J. G., Poon, C. S., Zhang, W. D., & Zhang, P. (2018). Inhibiting Efflorescence Formation on Fly Ash–Based Geopolymer Via Silane Surface Modification. *Cement and Concrete Composites*, 94, 43-52.
- Yağmur, E. (2020). Lifli Betonlar İçin Elastisite Modülü Tahmini. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1098-1109.
- Yang, G., Zhao, J., & Wang, Y. (2022). Durability Properties of Sustainable Alkali-Activated Cementitious Materials as Marine Engineering Material: A Review. *Materials Today Sustainability*, 17, 100099.
- Yang, K. H., Song, J. K., & Song, K. I. (2013). Assessment of CO₂ Reduction of Alkali-Activated Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 39, 265-272.
- Yang, T., Gao, X., Zhang, J., Zhuang, X., Wang, H., & Zhang, Z. (2022). Sulphate Resistance of One-Part Geopolymer Synthesized by Calcium Carbide Residue-Sodium Carbonate-Activation of Slag. *Composites Part B: Engineering*, 242, 110024.

- Yang, T., Yao, X., & Zhang, Z. (2014). Geopolymer Prepared With High-Magnesium Nickel Slag: Characterization of Properties and Microstructure. *Construction and Building Materials*, 59, 188-194.
- Yang, T., Yao, X., & Zhang, Z. (2014). Quantification of chloride diffusion in Fly Ash–Slag-Based Geopolymers by X-ray Fluorescence (XRF). *Construction and Building Materials*, 69, 109-115.
- Ye, H., & Radlińska, A. (2017). Carbonation-Induced Volume Change in Alkali-Activated Slag. *Construction and Building Materials*, 144, 635-644.
- Ye, T., Xiao, J., Zhao, W., Duan, Z., & Xu, Y. (2022). Combined Use Of Recycled Concrete Aggregate and Glass Cullet in Mortar: Strength, Alkali Expansion and Chemical Compositions. *Journal of Building Engineering*, 55, 104721.
- Yeğınobalı, A., & Ertün, T. (2011). Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*.
- Yermeydan, M. (2020), Hidrofilik Pirojenik Silika İçin Yüzey Modifikasyonu ve Karakterizasyon Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 632946.
- Yıldırım, S., Baynal, K., and Fidan, O., (2019). Internal Curing and Temperature Effect on Lightweight and Heat Insulated Mortar With Recycled Concrete Aggregate, *Acta Physica Polonica A* 135.
- Yıldız, S. (2019). Dökme Demir Cürufunun Harç İçinde Mineral Katkı Olarak Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 576942.
- Yılmazoğlu, A., (2022) Kauçuk Lif Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 744799.
- Yi, X., Wang, G., Zhang, B., Zhang, G., Liu, Y., & Luo, Z. (2023). Durability Deterioration of Geopolymer Stabilized Soft Soil Under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attack: A Comparative Study. *Buildings*, 13(4), 1075.
- Yin, W., Li, X., Sun, T., Chen, Y., Xu, F., Yan, G., ... & Tian, K. (2021). Utilization of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement for The Cementitious Grouts With Superplasticizer and Viscosity Modifying Agent Binary Mixtures: Rheological and Mechanical Performances. *Construction and Building Materials*, 286, 122953.
- Younis, K. H., Salihi, K. A., & Ibrahim, T. K. (2020). An Overview of Geo-polymer Concrete Including Recycled Aggregate. *Int. J. Sci. Technol. Res*, 9, 6239-6242.

- Yuksel, I. (2018). Blast-Furnace Slag. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 361-415). Woodhead Publishing.
- Yüksel, İ., Bilir, T., & Özkan, Ö. (2007). Durability of Concrete Incorporating Non-Ground Blast Furnace Slag and Bottom Ash as Fine Aggregate. *Building and Environment*, 42(7), 2651-2659.
- Zailan, S. N., Mahmed, N., Abdullah, M. M. A. B., & Sandu, A. V. (2016, June). Self-Cleaning Geopolymer Concrete-A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 133, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Zeng, J. J., Zhang, X. W., Chen, G. M., Wang, X. M., & Jiang, T. (2020). FRP-Confined Recycled Glass Aggregate Concrete: Concept and Axial Compressive Behavior. *Journal of Building Engineering*, 30, 101288.
- Zeyad, A. M., Johari, M. A. M., Abutaleb, A., & Tayeh, B. A. (2021). The Effect of Steam Curing Regimes on The Chloride Resistance and Pore Size of High-Strength Green Concrete. *Construction and Building Materials*, 280, 122409.
- Zhang, B., Zhu, H., Feng, P., & Zhang, P. (2022). A Review on Shrinkage-Reducing Methods and Mechanisms of Alkali-Activated/Geopolymer Systems: Effects of Chemical Additives. *Journal of Building Engineering*, 49, 104056.
- Zhang, D., Zhu, H., Wu, Q., Yang, T., Yin, Z., & Tian, L. (2023). Investigation Of The Hydrophobicity and Microstructure of Fly Ash-Slag Geopolymer Modified by Polydimethylsiloxane. *Construction and Building Materials*, 369, 130540.
- Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., & Ou, Z. (2017). Durability of Alkali-Activated Materials in Aggressive Environments: A Review on Recent Studies. *Construction and Building Materials*, 152, 598-613.
- Zhang, P., Gao, Z., Wang, J., Guo, J., Hu, S., & Ling, Y. (2020). Properties of Fresh and Hardened Fly Ash/Slag Based Geopolymer Concrete: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122389.
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). A Review on Properties of Fresh and Hardened Geopolymer Mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79-95.
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Fly Ash-Based Geopolymers: The Relationship Between Composition, Pore Structure and Efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64, 30-41.
- Zhao, H., Poon, C. S., & Ling, T. C. (2013). Properties of Mortar Prepared With Recycled Cathode Ray Tube Funnel Glass Sand at Different Mineral Admixture. *Construction and Building Materials*, 40, 951-960.

- Zhao, J., Li, Z., Wang, D., Yan, P., Luo, L., Zhang, H., ... & Gu, X. (2023). Hydration Superposition Effect and Mechanism of Steel Slag Powder and Granulated Blast Furnace Slag Powder. *Construction and Building Materials*, 366, 130101.
- Zheng, K. (2013). Recycled Glass Concrete. In *Eco-Efficient Concrete* (pp. 241-270). Woodhead Publishing.
- Zheng, K. (2016). Pozzolanic Reaction of Glass Powder and Its Role in Controlling Alkali–Silica Reaction. *Cement and Concrete Composites*, 67, 30-38.
- Zheng, L., Wang, W., & Shi, Y. (2010). The Effects of Alkaline Dosage and Si/Al Ratio on The Immobilization of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash-Based Geopolymer. *Chemosphere*, 79(6), 665-671.
- Zhou, Y., Gao, J., Sun, Z., & Qu, W. (2015). A Fundamental Study on Compressive Strength, Static and Dynamic Elastic Moduli of Young Concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 137-145.
- Zhu, Z., Huo, W., Sun, H., Ma, B., & Yang, L. (2023). Correlations Between Unconfined Compressive Strength, Sorptivity and Pore Structures for Geopolymer Based on SEM and MIP measurements. *Journal of Building Engineering*, 67, 106011.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly Ash-Based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- Zimmer, A., & Bragança, S. R. (2019). A Review of Waste Glass as A Raw Material For Whitewares. *Journal of Environmental Management*, 244, 161-171.



EK-A

Tablo A.1. Magnezyum sülfat heptahidratın ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) teknik analiz sonuçları

Parametre	Sonuç	Birim
Görünüş	Beyaz Renksiz Kristal	-
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	99	%
Çözünürlük	Tamamı suda eriyebilir	%
MgSO_4	49	%
Ca	0,21	%
Cl	7,7	Ppm
Fe	1	Ppm
Pb	3,0	Ppm
As	2	Ppm
pH (%5'lik, 20°C)	6,19	-

EK-B

Tablo B.1. Geopolimer betonların kılcal su emme (I=mm) değerleri

Süre (s ^{0,5})	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,615	0,250	0,132	0,072	0,081	0,110	0,382	0,191	0,089	0,089	0,212	0,340	0,191	0,412	0,123	0,102
17	1,095	0,501	0,263	0,178	0,127	0,204	0,828	0,420	0,161	0,182	0,407	0,709	0,378	0,968	0,246	0,161
24	1,384	0,649	0,352	0,255	0,191	0,280	1,036	0,560	0,229	0,259	0,535	0,925	0,514	1,337	0,331	0,229
35	1,710	0,815	0,463	0,344	0,255	0,365	1,282	0,705	0,301	0,340	0,666	1,188	0,692	1,757	0,424	0,306
42	1,978	0,938	0,535	0,399	0,306	0,416	1,507	0,819	0,357	0,407	0,772	1,388	0,823	2,109	0,501	0,361
60	2,381	1,125	0,658	0,514	0,378	0,518	1,821	0,989	0,463	0,543	0,921	1,659	1,053	2,627	0,620	0,450
85	2,784	1,375	0,811	0,649	0,458	0,645	2,224	1,227	0,581	0,726	1,095	2,012	1,320	3,319	0,777	0,560
104	2,818	1,570	0,929	0,747	0,531	0,760	2,470	1,401	0,683	0,874	1,218	2,313	1,528	3,663	0,904	0,645
120	2,852	1,740	1,031	0,845	0,598	0,849	2,504	1,553	0,768	1,002	1,341	2,521	1,706	3,731	1,014	0,734
134	2,899	1,901	1,129	0,925	0,637	0,925	2,538	1,710	0,845	1,108	1,447	2,580	1,859	3,782	1,125	0,789
147	2,916	2,024	1,214	0,997	0,683	0,997	2,551	1,816	0,912	1,210	1,532	2,597	1,995	3,798	1,201	0,849
294	3,052	2,262	1,846	1,727	1,146	1,744	2,665	2,351	1,693	2,402	2,411	2,737	3,463	3,964	2,220	1,498
416	3,085	2,288	1,897	1,880	1,511	1,965	2,737	2,402	2,288	2,784	2,491	2,810	3,599	4,028	2,861	1,990
509	3,149	2,343	1,944	1,944	1,859	2,067	2,801	2,436	2,593	2,844	2,525	2,844	3,658	4,104	3,293	2,521
588	3,170	2,360	1,952	1,978	2,135	2,126	2,805	2,470	2,729	2,856	2,546	2,882	3,684	4,117	3,510	2,835
657	3,221	2,389	1,982	1,999	2,368	2,173	2,844	2,504	2,810	2,882	2,597	2,903	3,748	4,168	3,633	3,005
720	3,226	2,406	1,990	2,016	2,419	2,190	2,856	2,517	2,827	2,894	2,610	2,916	3,748	4,180	3,654	3,022
778	3,230	2,402	1,986	2,016	2,462	2,190	2,856	2,517	2,848	2,899	2,602	2,911	3,752	4,176	3,641	3,030
831	3,243	2,419	2,003	2,033	2,517	2,224	2,865	2,517	2,865	2,911	2,623	2,933	3,769	4,189	3,671	3,035

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Yıldız S., Yıldırım S.T., Karaman D., Karaaslan E., (2018) Öğütülmüş Döküm Cürufunun Çimento Harcı İçinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli Türkiye, 23-25 Kasım 2018.

Yıldız, S., (2022). Investigation Of The Usability Of Marble and Granite Wastes In The Construction Industry. *International Marmara Sciences Congress (Spring 2022)*, Kocaeli, Turkey, 13 – 14 May 2022.

Yilmazoglu, A., Yildirim, S.T., Behçet, Ö. F., **Yıldız, S.** (2022). Performance Evaluation of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag-Based Geopolymer Concrete: A Comparative Study. *Structural Concrete*.



ÖZGEÇMİŞ

2010 yılında Karamürsel Alp Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2015 yılından itibaren inşaat sektöründe aktif rol aldı ve çeşitli görevler üstlendi. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansı bitirdi. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri alanında doktora eğitimine başladı. Özel sektörde çalışmalarına devam etmektedir.

