

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK ULTRA YÜKSEK
PERFORMANSLI BETONUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN
ARTIRILMASI**

GİZEM IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Baki ÖZTÜRK
Doç. Dr. Tamer BİROL

BALIKESİR, MAYIS - 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Geopolimer Teknolojisi Kullanılarak Ultra Yüksek Performanslı Betonun Sürdürülebilirliğinin Artırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gizem IŞIK

ÖZET

**GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK ULTRA YÜKSEK
PERFORMANSLI BETONUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN ARTIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
GİZEM IŞIK
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ALTUĞ YAVAŞ)
BALIKESİR, MAYIS - 2026**

Bu çalışmada, Portland çimentosu matrinden tamamen çıkarılarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin alkali aktivasyonu ile üretilen Ultra Yüksek Performanslı Geopolimer Betonun (UYPGB) özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda toplam bağlayıcı, su ve çelik lif miktarları sabit tutulup, uçucu kül/yüksek fırın cürufu oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranı ve sodyum hidroksit molaritesi değişken parametreler olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan 15 farklı karışımın taze haldeki yayılma değerleri ve etüv (60°C), buhar (60°C) ve oda sıcaklığı (20°C) kür koşullarındaki 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, mekanik dayanım açısından en uygun sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2.5 olduğunu ortaya çıkarmıştır. 14 molariteye sahip etüv kürlü numuneler 114 MPa basınç dayanımına ulaşarak en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Çalışmanın en önemli bulgularından biri ise herhangi bir nem veya ısı işlem uygulanmadan, 20°C oda sıcaklığında kürlenmiş karışımların 105 MPa ve 101 MPa değerlerini görerek 100 MPa sınırını aşmasıdır. Çevresel etki hesaplamalarına göre, çimento içermeyen UYPGB karışımı, geleneksel ultra yüksek performanslı betona (UHPC) kıyasla karbon emisyonunu %49.01 oranında azaltarak metreküp başına 342.38 kg CO₂ tasarrufu sağlamaktadır. Bu emisyon düşüşünün ulusal ölçekteki karşılığı incelendiğinde; yıllık bazda yaklaşık 48 milyon ton karbondioksit salınımının önüne geçilebileceği, bu miktarın da 10.4 milyon binek aracın trafikten çekilmesine veya 2.17 milyar yetişkin ağacın karbon absorbe kapasitesine denk geldiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, işlenebilirlik ve yüksek mukavemet özelliklerinden ödün vermeden, inşaat sektöründe düşük karbonlu ve çevre dostu ultra yüksek performanslı betonun üretilebileceğini ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Alkali aktivasyon, basınç dayanımı, karbon ayak izi, sürdürülebilirlik, ultra yüksek performanslı geopolimer beton, yayılma.

ABSTRACT

ENHANCING THE SUSTAINABILITY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE THROUGH GEOPOLYMER TECHNOLOGY

MSC THESIS

GİZEM IŞIK

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, MAY - 2026

In this study, the properties of Ultra-High Performance Geopolymer Concrete (UHPGC), produced by the alkaline activation of industrial by-products (fly ash, ground granulated blast furnace slag, and silica fume) while completely eliminating Portland cement from the matrix, were investigated. Throughout the experimental program, total binder, water, and steel fiber contents were kept constant; whereas fly ash/slag ratio, sodium silicate/sodium hydroxide (SS/SH) ratio, and sodium hydroxide molarity were selected as the variable parameters. Accordingly, the fresh-state slump-flow values of 15 different mixtures, as well as their 7 and 28-day compressive strengths under oven (60°C), steam (60°C), and ambient (20°C) curing conditions, were examined. Experimental results revealed that the optimum sodium silicate/sodium hydroxide ratio in terms of mechanical strength was 2.5. The oven-cured specimens with 14 Molarity reached a compressive strength of 114 MPa, yielding the highest mechanical performance. One of the most significant findings of this study is that the mixtures cured at 20°C ambient room temperature, without requiring any moisture or thermal treatment, surpassed the 100 MPa threshold, achieving strengths of 105 MPa and 101 MPa. According to environmental impact assessments, the cement-free UHPGC mixture reduces carbon emissions by 49.01% compared to conventional ultra-high performance concrete (UHPC), providing a CO₂ savings of 342.38 kg per cubic meter. When evaluating the implications of this emission reduction on a national scale, it was determined that approximately 48 million tons of carbon dioxide emissions could be prevented annually. This quantity is equivalent to taking 10.4 million passenger vehicles off the road or the carbon absorption capacity of 2.17 billion mature trees. Overall, the findings demonstrate that low-carbon and eco-friendly ultra-high performance concrete can be successfully produced in the construction sector without compromising workability and high strength characteristics.

KEYWORDS: Alkali activation, compressive strength, carbon footprint., sustainability, ultra high performance geopolymer concrete, slump flow,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALARI LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	viii
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1 Çimento Endüstrisi	3
2.1.1 Çimento endüstrisi gelişimi ve zorlukları	3
2.2 Düşük Karbonlu Bağlayıcılar	6
2.2.1 Alkali ile aktive edilmiş malzemeler.....	6
2.2.2 Geopolimerler.....	10
2.2.2.1 Geopolimer kimyası	12
2.3 Alkali Aktivatörler	14
2.3.1 Hidroksit esaslı aktivatörler (hidroksit aktivatörleri)	14
2.3.2 Silikat esaslı aktivatörler (silikat aktivatörleri)	15
2.4 Yaygın Olarak Kullanılan Alkali ile Aktive Edilmiş Öncü Malzemeler.....	15
2.4.1 Uçucu kül	15
2.4.2 Öğütülmüş garnüle yüksek fırın cürufu	17
2.4.3 Metakaolin.....	21
2.4.4 Silis dumanı.....	23
2.5 Potansiyel Alkali Aktivatörler ve Alkali Çimentolu Malzemeler	25
2.5.1 Biyokütle külü	26
2.5.2 Atık cam	26
2.5.3 Diyatumlu toprak (diyatomit)	27
2.5.4 Olivin nano-silika.....	27
2.5.5 Bayer likörü.....	28
2.5.6 Kırmızı çamur	28
2.5.7 Alüminyum yüzey temizleme solüsyonu	29
2.5.8 Solvay prosesinde açığa çıkan damıtma atığı	30
2.5.9 Kağıt çamuru	30
2.5.10 Sodyum silikat üretiminden kaynaklanan çamur	30
2.5.11 Pirinç kabuğu külü	31
2.6 Çimento Sektörü ve Karbondioksit Salınımı	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	36
3.1 Kullanılan Malzemeler	36
3.1.1 Uçucu kül	36
3.1.2 Silis dumanı.....	37
3.1.3 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu	37
3.1.4 Agregası	39
3.1.5 Aktivatörler	39
3.1.6 Çelik lif.....	40
3.1.7 Akışkanlaştırıcı.....	41

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.8 Kuvartz unu	42
3.2 Deneysel Çalışmalar	42
3.2.1 Uçucu kül / yüksek fırın cürufu oranı (UK/YFC)	43
3.2.2 Sodyum silikat / sodyum hidroksit oranı (SS/SH)	43
3.2.2 Sodyum hidroksit molaritesi (SH).....	43
3.3 Karışım Oranları	44
3.4 Karıştırma, Yerleştirme ve Kür	44
3.5 Test Yöntemleri	48
3.5.1 Yayılma deneyi	48
3.5.2 Basınç deneyi	49
3.6 Deneysel Sonuçlar	51
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
5. KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Çimento üretim ve dağıtım aşamaları.....	4
Şekil 2.2: Geopolimerlerin alakli aktivasyon reaksiyonunun Duxon Modeli	10
Şekil 2.3: Geopolimerleşme sürecinde polisiyalat.	13
Şekil 2.4: Toz kömürünün elektrik santralinde üretim şeması.....	15
Şekil 2.5: Yüksek fırın süreçleri.....	19
Şekil 2.6: Yüksek fırın cürufunun taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü.....	20
Şekil 2.7: Metakaolinin taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü.....	21
Şekil 2.8: Metakaolin üretiminin akış şeması.....	22
Şekil 2.9: Silis dumanının taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü.....	24
Şekil 3.1: Uçucu kül.....	36
Şekil 3.2: Silis Dumanı.....	37
Şekil 3.3: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu.....	38
Şekil 3.4: Agregat.....	39
Şekil 3.5: Sodyum silikat.....	40
Şekil 3.6: Sodyum hidroksit	40
Şekil 3.7: Çelik lif.....	41
Şekil 3.8: Akışkanlaştırıcı.....	42
Şekil 3.9: Kuvartz unu.....	42
Şekil 3.10: Kalan silis dumanının karışıma ilave edilmeden önceki hali.....	45
Şekil 3.11: Kalan silis dumanının karışıma ilave edildikten sonraki hali.....	46
Şekil 3.12: Hazırlanan UYPGB'nin kütleme öncesi kalıplara dökülmüş hali	46
Şekil 3.13: Hazırlanan UYPGB'nin kalıplara dökümü.....	47
Şekil 3.14: Hazırlanan UYPGB'lerin etüv görüntüsü.....	48
Şekil 3.15: Hazırlanan UYPGB'nin yayılma hunisine dökümü.....	49
Şekil 3.16: Hazırlanan UYPGB'nin yayılma ölçümü.....	49
Şekil 3.17: Basınç dayanımı ölçülen UYPGB	50
Şekil 3.18: Basınç dayanımı ölçülmüş UYPGB.....	50
Şekil 3.19: Farklı kür koşullarında karışımların basınç dayanımı sonuçları.....	53
Şekil 3.20: Etüv küründe (60°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları.....	54
Şekil 3.21: Buhar küründe (60°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları.....	55
Şekil 3.22: Ortam küründe (20°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları	56

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: 1 m ³ hazır beton üretiminde kullanılan malzemelerin üretimi için gereken su miktarları.....	5
Tablo 2.2: Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar hakkındaki önemli olayların bibliyografik tarihi	6
Tablo 2.3: BAUN Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvar'ında üretilen tipik UHPC karışı ve karbon salınımı değerleri.....	34
Tablo 2.4: M1-10 kodlu geopolimer beton karışımı ve karbon salınım değerleri.....	34
Tablo 3.1: Uçucu külün kimyasal bileşenleri.....	36
Tablo 3.2: Silis dumanı kimyasal bileşenleri.....	37
Tablo 3.3: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşenleri.....	38
Tablo 3.4: Çelik lifin fiziksel özellikleri.....	41
Tablo 3.5: Deneyde kullanılan karışım matrisi.....	44
Tablo 3.6: Basınç dayanımı ve yayılma sonuçları.....	51

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

°C	: Santigrat derece
AA	: Alkali aktivatör
AAM	: Alkali ile aktive edilmiş malzemeler
AKŞ	: Akışkanlaştırıcı
Al	: Alüminyum
Al-O	: Alüminyum-oksijen arasındaki kimyasal bağ
C/(N)-A-S-H	: Kalsiyum esaslı sodyum içeren hibrit alüminosilikat jeli
C-A-S-H	: Kalsiyum alüminosilikat hidrat jeli
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
Ca	: Kalsiyum
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CaCO ₃	: Kireçtaşı
CO ₂	: Karbondioksit
H ₂	: Hidrojen gazı
kg	: Kilogram
M	: mol
MK	: Metakaolin
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat jeli
N-C-A-S-H	: Sodyum kalsiyum alüminosilikat hidrat
N ₂	: Azot gazı
NaOH	: Sodyum hidroksit
OPC	: Portland çimentosu
SD	: Silis dumanı
Si	: Silisyum
Si-O	: Silisyum-oksijen arasındaki kimyasal bağ
Si-O-Al	: Silisyum oksijen alüminyum bağ
Si-O-Al-O	: Silisyum oksijen alüminyum oksijen ağı
UYPB	: Ultra yüksek performanslı beton
UYPGB	: Ultra yüksek performanslı geopolimer beton
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, yüksek lisans eğitimim boyunca edindiğim teorik bilginin ve araştırmaya dayalı emeğin bir ürünüdür. Bu tez çalışmasının planlamasından sonuçlandırılmasına kadar geçen sürede, akademik vizyonu, disiplin ve engin tecrübesiyle bana yol gösteren, yapıcı eleştirileriyle çalışmamın geliştirilmesine büyük katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bugüne kadar aldığım her kararda yanımda olan, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bu yoğun çalışma döneminde, bana olan sarsılmaz inançları, sevgileri ve verdikleri motivasyonla her adımda yanımda olan kıymetli aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Balıkesir, 2026

Gizem Işık

1.GİRİŞ

İnşaat sektörü, insan nüfusunun hızla artması ve buna bağlı olarak toplu konut, kentsel dönüşüm ve ulaştırma altyapısı gibi artan taleplerle gelişen ve büyümeye devam eden bir endüstridir. Bu büyüyen endüstri, betonun, sudan sonra dünyada en çok kullanılan ikinci malzeme olmasını sağlamıştır (Monteiro et al., 2017). Ancak günümüzdeki klasik beton teknolojisi, depreme karşı dayanıklılık, korozyon direnci ve uzun servis ömrü gibi beklentilerde zaman zaman yetersiz kaldığından daha yüksek mukavemet gereksinimlerine ihtiyaç duyulmuş ve bunun için yeni malzeme arayışına girilmiştir.

Bu ihtiyaçlara cevap vermek adına beton teknolojisi ilerlemiş, üstün mekanik performansa ve yüksek geçirimsizliğe sahip Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) üretilmiştir. Ultra yüksek performanslı beton, yüksek bağlayıcı içeriği, homojen tane dağılımıyla ve genellikle lif takviyesiyle 120 MPa basınç dayanımını aşan, yeterli çekme sünekliliği ve üstün dayanıklılık gibi özellikleriyle çimento esaslı bir yapı malzemesidir (Amran et al., 2022; Du et al., 2021). Ultra yüksek performanslı betonlar yüksek mekanik performansı, düşük geçirgenliği ve üstün mukavemet özellikleriyle uzun açıklıklı köprüler, yüksek yapılar, patlamaya dayanıklı yapısal elemanlar, savunma sanayi ve özel mühendislik tasarım uygulamalarında fazlasıyla kullanılmaktadır (Qaidi et al., 2022). Ancak ultra yüksek performanslı betonun bu üstün performans yeteneği yüksek miktarda Portland çimentosuna ve enerjinin yoğun bir şekilde kullanıldığı üretim süreçlerine ihtiyaç duymaktadır. Portland çimentosunun üretiminde atmosfere ciddi bir oranda CO₂ salınımı çıkmaktadır (John vd., 2021) ve bu salınım doğrultusunda ultra yüksek performanslı betonun düşük çevresel dostluk seviyesi gösteren bir kompozit malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan araştırmalardaki sonuçlara bakıldığında sıradan Portland çimentosu üretimi, küresel antropojenik karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık olarak %8-10'luk kesiminden sorumlu ve m³ başına ortalama 174 kg CO₂ emisyonu yaymaktadır (El Seidy, 2024; Guo et al., 2024). İstatistiklere bakıldığında ise 1 ton Portland çimento üretilmesi, çevreyi doğrudan kirleten ve dünya sıcaklığını yükselten 1 ton sera gazının açığa çıkmasına sebebiyet verir (Amran et al., 2020). Ayrıca çimentonun içinde bulunan, hızla tüketilen ve yenilemeyen kaynak olan kireçtaşı ve agregaların kullanımı başka bir çevresel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kaynakların tükenmesi ve çevreye verilen zararların artmasından dolayı UYPB inşaat sektöründe sürdürülebilirlik hedefleriyle uyuşmayan bir tablo çizmektedir. Artan CO₂ salınımı, doğal olan kaynakların tükenmesi ve hızla ilerleyen çevresel zararlardan dolayı

araştırmacılar ve mühendisler ultra yüksek performanstan ödün vermeden daha yüksek çevresel dostluk seviyesi gösteren alternatif bağlayıcı sistemleri olan beton üretmeye yönlenmişlerdir. Bu bağlamda karşlarına çıkan en umut verici malzeme olan ve betondaki Portland çimentosunu minimize eden veya tamamen ortadan kaldıran yenilikçi, sürdürülebilir geopolimer betonla tanışmışlardır. Geopolimer beton, içindeki Portland çimentosuna alternatif olarak silika ve alümina açısından zengin, uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) gibi endüstriyel yan ürünler kullanılarak tasarlanan bir beton türüdür. Bu betonlar, erken yaş dayanımı, geçirimsizliği düşük, asit ve sülfat gibi kimyasal malzemelerin saldırılarına karşı yüksek direnç gösteren ve yangına karşı mükemmel dayanıklılık gösteren betonlardır (Eltantawi et al., 2025). Ayrıca geopolimer beton endüstriyel yan atıklarının betonda kullanılarak atık malzeme depolama sorununu da ortadan kaldırarak döngüsel ekonomiye katkıda bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda geopolimer betonun, geleneksel betona göre karbon ayak izinin yaklaşık olarak %80 oranında daha az olduğu bulunmuştur (Ganesh and Muthukannan, 2021). İçindeki Portland çimentosunu çıkarıp yerine endüstriyel yan ürünler koyularak hazırlanan ve daha doğa dostu beton olmasından dolayı bütün dünyada geopolimere doğru bir paradigma kayması yaşanmaktadır (Amran et al., 2020).

Bu çalışmanın temel amacı, küresel inşaat endüstrisinin karbon ayak izini minimize etmek, yüksek klinker içerikli Portland çimentosu bazlı bağlayıcı beton karışımlarının yarattığı ekolojik tahribatı elimine etmek ve döngüsel ekonomi prensiplerini malzeme bilimlerine entegre etmek amacıyla Portland çimento bazlı sistemlere çok daha iyi bir alternatif olan, endüstriyel yan atık malzemelerin alkali aktivasyonu ile sentezlenen üstün mekanik performansa ve durabiliteye sahip, Ultra Yüksek Performanslı Geopolimer Beton (UYPGB) kompozitlerinin basınç dayanımlarını iyileştirebilmek adına bağlayıcı sistem ve aktivatör bileşen molar oranlarının değiştirilmesiyle geopolimerleşme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda beton içindeki çimento tamamen çıkartılarak bağlayıcı olarak uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu farklı oranlarda karışıma dahil edilmiştir. Karışımlarda kullanılan bağlayıcılar, aktivatörler ve agrega türleri sabit tutulmuş, su miktarı tüm karışımlarda aynı kalarak, değişken oranı yalnızca mol oranları ve bağlayıcı miktarları olmuştur. Ayrıca mekanik performansı ve süneklilik özelliklerinin yükseltilmesi amacıyla karışımlara çelik lif ilave edilmiştir. Elde edilen farklı tiplerdeki karışım parametreleri ile malzeme bileşimi ve çelik lif takviyesinin UYPGB betonun mekanik ve basınç özellikleri üstündeki etkileri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Çimento Endüstrisi

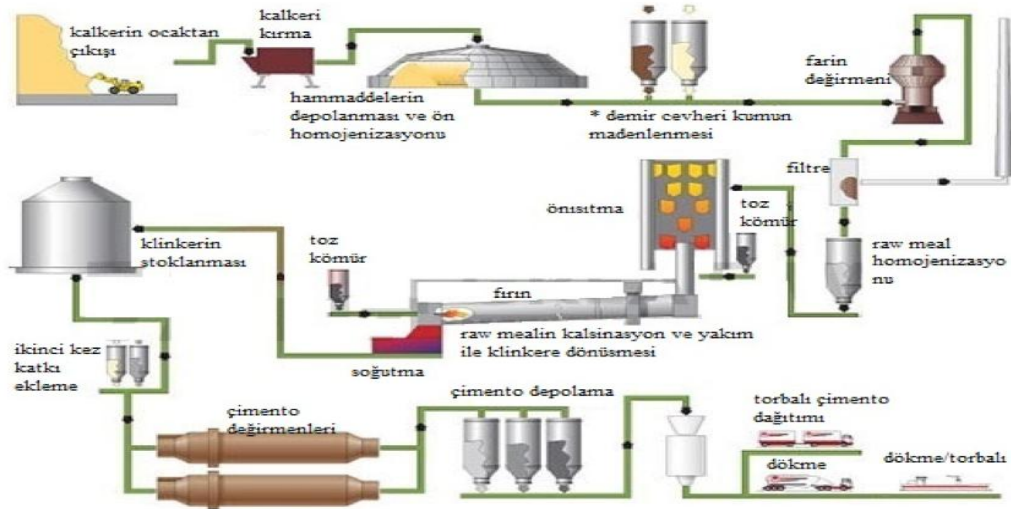
2.1.1 Çimento endüstrisi gelişimi ve zorlukları

İnsanoğlunun varoluşundan itibaren duyduğu en temel ihtiyaç barınma olmuştur. İlk insanlar buzulların erimesiyle mağaralardan çıkarak yeni yaşam yerleri aramaya başlamış ve bu durum insanoğlunu göçebe hayata yönlendirmiştir. Başlarda ormanların bol olduğu yerlerde ağaç dal ve yapraklarının çamurla birleştirilmesiyle basit barınaklar inşa etmişlerdir fakat zamanla ormanların yetersiz kalması ve azalmasıyla daha dayanıklı olan taş ve sağlam kayalara yönelmişlerdir. Ancak bazı coğrafyalarda taş bulunması da zorlaştığından dolayı insanoğlu yapı inşa edecek daha farklı malzemelere yönelmiştir. Suyla birleştğinde yarı akışkanlık kazanan ve sertleştiğinde şeklini koruyan killi topraklar insanlar için yeni bir yapı malzemesi olmuştur. Fakat kilin pişirilmesi araştırma sonucu değil bir tesadüf sonucu kullanılmaya başlanmıştır. M.Ö 3000’li yıllarda Fırat Nehri kıyısına düşen bir yıldırım sonucu pişen kilin daha sert ve sağlam olduğu görülmüş ve iyi bağlayıcı elde etmek için killer basit fırınlarda pişirilerek kullanılmaya başlanmıştır (Bozkurt ve Sayın, 2021). Fakat bağlayıcı olarak kullanılan bu malzeme iyi olarak görünse de suya karşı dirençsiz olduğundan dolayı dayanıklılığında düşme görülmüş ve insanoğlu farklı malzeme arayışına girmiştir.

“Çimento” teriminin kökeni Antik Roma’ya uzanmaktadır. Romalılar MÖ 3. yüzyıllarda “opus caementitium” adındaki yapı malzemesini kullanmışlardır. Opus Caementitium’un basınç dayanımı yaklaşık olarak 5-40 N/mm² arasında değişmektedir ve bu malzemeyle yapılmış birçok yapı günümüze kadar hala ayakta kalmayı başarmıştır (Rifa et al., 2023; da Silva et al., 2015). Sonrasında ise ince öğütülmüş doğal-yapay puzolanlar ve bunların kireçle karışımları “caementum”, “caement” veya “cement” şeklinde adlandırılmışlardır. B. F. Belidor ve John Smeaton kireçtaşı ve kil karışımından oluşan hidrolik kireçlerde kilin malzemeye sağladığı dayanım arttırma etkisine değinmişlerdir. Smeaton, Eddystone Deniz Feneri için hidrolik kireci kullanarak dayanıklı bir harç tasarımı oluşturmuştur. James Parker, 1796 yılında hidrolik kireci yakarak “Roman Cement” adında ve kendiliğinden yerleşen bağlayıcıyı bulmuştur. Bu bulunan malzeme 1250°C altında ve yakılmış bileşenlerden oluşan ilk çimento olarak kabul edilmiştir. Edgar Dobbs, Louis-Joseph Vicat, ve Johann Friedrich John bunlardan bağımsız olarak %25-30 oranında kil, %70-75 oranında doğal kireç taşı karışım tasarımlarının hidrolik bağlayıcı olarak en iyi bağlayıcı özellik

gösterdiğini bulmuştur. Bu yapılan çalışmalarda görülmüştür ki Si, Al, Ca ve Fe içeren, 1250 °C altında pişirilerek oluşan bileşikler, hidrolik sertleşme göstermektedirler (El Seidy, 2024).

1824 yılında duvarcı ustası olan Joseph Aspdin, tamamını doğal killi kalkerden oluşturmak yerine 3 kalkere 1 kil metodunu kullanıp bu malzemeyi yüksek sıcaklıklı fırında pişirip öğüterek dayanıklılığı oldukça yüksek gri renkli bir bağlayıcı ortaya çıkarmıştır. Bu gri renkli bağlayıcının renginin İngiltere’de bulunan Portland adasındaki yapı taşlarına benzediğini gören Joseph Aspsin, 21.10.1824 tarihinde “Portland Çimentosu” adı altında 5022 nolu patenti almıştır (Türkçimento, t.y.). Joseph Aspdin’in bulduğu bu bağlayıcı Roman çimentoya kıyasla çok daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Patenti alınan ve kullanıma geçen Portland çimentosuyla birlikte kentleşmeler artmış ve bu doğrultuda alt ve üst yapı çalışmaları hız kazanmıştır. Şekil 2.1’de çimento üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Çimento üretim ve dağıtım aşamaları (CRC ROTA, t.y.)

Çimento sektörü, kuruluşundan itibaren en çok ihtiyaç duyulan yapılaşmaya hizmet ederken, CO₂ salınımı, yüksek enerji gereksinimi ve çevreye bıraktığı atıklardan dolayı ciddi zararlara yol açmaktadır. Çimento üretimi, döner fırınlarda kullanılan yakıttan elektrik enerjisinde kadar birçok aşamada yoğun enerji tüketimi yapmaktadır. 2023 yılında Türkiye, hazır beton üretiminde 2017 yılı zirvesi olan 115 milyon m³ seviyesine yeniden yükselmiştir (THBB, t.y.). 2017 yılındaki verilere bakıldığında ise dünyamızda 10 milyar m³ hazır beton üretilmiş ve dünyadaki kişi başına düşen beton miktarının yaklaşık olarak 1.5 m³ olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlara bakarak betonun dünyada sudan sonra en çok tüketilen malzeme olduğu anlaşılmıştır. 1 m³ beton üretimi için ihtiyaç duyulan agrega, çimento ve kimyasal katkı üretimleri için ihtiyaç duyulan su miktarı yaklaşık olarak 250 litredir. Tablo 2.1’de hazır betonda kullanılan malzemelerin üretimi için gereken su miktarları gösterilmektedir (Beton ve Çimento, t.y.). 2017 yılında üretilen 10 milyar m³ beton üretimi için ise yaklaşık olarak 2,5 trilyon litre su kullanılmıştır. Bu miktar, Atatürk Barajının yaklaşık olarak %5’lik kısmına denk gelmektedir.

Tablo 2.1: 1 m³ hazır beton üretiminde kullanılan malzemelerin üretimi için gereken su miktarları (Beton ve Çimento, t.y.)

Bileşen	Miktar (kg/m ³)	Su İçeriği (litre/ton)
Çimento	290	1000
Agrega	1900	1000
Su	175	1000
Kim. Katkı	4,5	650
Toplam	2369,5	3650

Sürdürülebilirlik, ilk olarak 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Kalkınma Komisyonu’nun hazırladığı rapordaki bir maddede karşımıza çıkmaktadır. Bu maddede komisyon sürdürülebilirliği, “Sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama olanaklarını tehlikeye atmadan, bugünün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınmadır.” şeklinde ele almıştır (World Commision on Eviroment and Development, 1987). Sürdürülebilirliğin ilk olgusu denge ikinci olgusu ise doğal yaşamdır. Bu kapsamda diğer birçok sektörde olduğu gibi çimento sektöründe de dengeyi ve doğal yaşamı sağlamak adına çalışmalar yürütülmektedir. Çimento sektörünün temelinde bulunan doğal kaynaklar, pahalı bir üretim olduğunu göstermektedir. Doğal kaynaklar yerine geri dönüştürülmüş kaynak kullanımı yeni kaynak üretiminden tasarruf sağlayarak hem ekonomiye hem de doğaya pozitif bir etki sağlayacaktır. Örneğin termik santrallerde kömürün yakılmasıyla elde edilen ve baca filtrelerinde atık olarak biriken uçucu küller betonda kullanılarak çimento ikamesini azaltan ve hava kirliliğinin önüne geçen bir malzeme olarak önümüze çıkar. Bununla birlikte pirinç kabuğu külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler agrega veya çimento ikamesi olarak geri dönüşüme kazandırılarak hem atıkların bertaraf edilmesi için gereken maliyeti azaltır hem de atık depolama alanlarından tasarruf sağlar fakat en önemlisi, atıkların katma değere dönüştürülmesiyle çevreye uyumlu ve sürdürülebilir bir üretim modeline geçişin temelini oluşturur (Bozkurt ve Sayın, 2021).

2.2 Düşük Karbonlu Bağlayıcılar

2.2.1 Alkali ile aktive edilmiş malzemeler

Alkali aktivasyon teknolojisi geçmişten günümüze köklü bir tarihe sahiptir. 1940'lı yıllarda Purdon'un sodyum hidroksit ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanması ürettiği malzeme alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların gelişmesine büyük katkıda bulunmuştur (Pacheco-Torgal et al., 2008). 1950 ve 1960'lı yıllarda Sovyetler Birliği'nde araştırmacı olan Victor Glukhovsky ise volkanik süreçlerden elde edilen malzemelerin içine sodyum hidroksit bazlı aktive edici çözeltilerin eklenmesiyle aktive olan sistemleri geliştirmiştir. Yani alkali metalleri içeren ve alkali çözeltilerle aktive edilen, düşük kalsiyuma sahip veya hiç kalsiyum içermeyen alüminosilikat prekürsörlere dayalı bağlayıcıları bulmuştur. Bu bulunan bağlayıcılar, sertleştikten sonra Portland çimentosuna benzemiş yani hidratlaşmış kalsiyum silikat fazları (C-S-H) içeren malzemeler olmuştur. Glukhovsky, bu malzemeleri “toprak silikat (soil cements)” olarak adlandırmıştır (Marvila et al., 2021). 1970'li yıllarda Fransız araştırmacı olan Davidovits, silisyum ve alüminyum bakımından zengin doğal malzemelerin alkali çözeltiyle aktive edilerek alkali ile aktive edilmiş malzemeyi geliştirmiştir. Elde edilen malzeme polimerik malzeme oluşumundaki polimerizasyon reaksiyona benzer bir oluşuma benzetildiğinden dolayı “geopolimerler” olarak adlandırılmıştır. Tablo 2.2'de alkali ile aktive edilen bağlayıcılar hakkındaki önemli olayların bibliyografik tarihi gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar hakkındaki önemli olayların bibliyografik tarihi (Pacheco-Torgal et al., 2008; Marvila et al., 2021)

Yazar	Yıl	Araştırma
Feret	1939	Çimento üretiminde cüruf kullanımı
Purdon	1940	Cüruf ve alkali çözeltilerin birleşimi
Glukhovsky	1959	Çimentoda alkali çözeltilerin teorik temeli ve gelişimi
Glukhovsky	1965	İlk malzemeye alkali çimento adı verilir
Davidovtis	1979	Geopolimer teriminin kullanımı
Malinowski	1979	Antik Roma su kemerlerinin karakterizasyonu
Forss	1983	Alkalin cüruf ve süper akışkanlaştırıcı içeren çimento
Langton and Roy	1984	Eski yapı malzemelerinin karakterizasyonu

Tablo 2.2 (devam)

		Mısır piramitlerinde kullanıldığına inanılan
Davidovits and Sawyer	1985	malzemenin kimyasal bileşimine benzer bir çimento patenti
Krivenko	1986	M ₂ O-MO-SiO ₂ -H ₂ O tanımı
Malolepsi and Petri	1986	Sentetik cürufların aktivasyonu
Malek et al.	1986	Radyoaktif atıkların aktifleştirilmiş cüruf çimentolarda kullanımı
Davidovits	1987	Eski ve modern çimentoların karşılaştırılması
Deja and Malolepsi	1989	AA malzemelerin klorür direncine dair kanıt
Kaushal et al.	1989	AA malzemelerine nükleer atıkların dahil edilmesi
Roy e Langton	1989	Beton üretimi eski yöntemlerle benzer şekilde yapılır
Majundar et al.	1989	C ₁₂ A ₇ cüruf aktivasyonu
Talling e Brandstetr	1989	Alkalin cüruf aktivasyonu
Wu et al.	1990	Cüruf bazlı çimentonun alkali aktivasyonu
Roy et al.	1991	Çabuk prizlenen alkali çimentoların üretimi
Roy e Silsbee	1992	“Alkalinle aktive edilmiş çimentolar: genel bir bakış” adlı makalenin yayınlanması
Palomo and Glasser	1992	Metakaolinin aktivasyonu
Krivenko	1994	Alkali çimentoların özellikleri
Davidovits	1994	Polisialatlar aracılığıyla geopolimerlerin yapısının tanımlanması
Wang and Scrivener	1995	AA malzemelerin mikro yapısının keşfi
Palomo	1999	“Uçucu külün alkali aktivasyonu: geleceğin çimentosu” başlıklı makalenin yayınlanması
Krivenko, Roy and Shi	2006	Alkalin aktivasyon üzerine ilk kitabın yayınlanması
Provis e Deventer	2007	Alkalin aktivasyon reaksiyonunun kinetik modellemesinin tanımı
Habert et al.	2011	Yaşam döngüsü bazında geopolimerik beton üretiminin çevresel değerlendirmesi
Avustralya	2013	Victoria'da E-Crete ile köprü inşaatı

Tablo 2.2 (devam)

Davidovits	2016	Bolivya ve Peru'da Kolomb öncesi uygarlıklar tarafından kalıntılar ve anıtlar üzerine yapılan çalışmalar
Davidovits	2019	Bolivya'daki Pumapunku-Tiwanaku'daki Kolomb öncesi anıtların karakterizasyonu
Provis et al.	2020	Alkali ile aktive edilen malzemelerin test yöntemlerinin standardizasyonu ve RILEM raporlarının yayınlanması
Panda et al.	2020	Geopolimer betonun 3D yazıcı teknolojisinde kullanımı ve reoloji kontrolü
Amran et al.	2021	Geopolimerlerin döngüsel ekonomideki rolü ve sürdürülebilirlik potansiyellerinin kapsamlı değerlendirilmesi
Lahoti / Zhang et al.	2022	Geopolimer karışım tasarımlarının ve basınç dayanımının tahmininde yapay zeka kullanımı
NASA / ESA Projeleri	2023	Ay ve Mars toprağı simulantları (regolit) kullanılarak yerinde kaynak kullanımıyla geopolimer yapı inşası çalışmaları
Luo ve et al.	2024	Ultra Yüksek Performanslı Geopolimer Beton (UYPGB) üretiminde nano-malzemelerin ve liflerin hibrit kullanımı.
Wang / Liu et al.	2024	Doğrudan karbon yakalama özelliğine sahip karbon-negatif geopolimerlerin geliştirilmesi.

Geopolimer olarak adlandırılan bu malzemeler, alkali ile aktive edilmiş malzemeler olarak (AAM) sınıflandırılır (Ponomar et al., 2023). AAM'ler, çevre dostu kazanımlar sağlamak adına geliştirilmiş örnek önemli bir alternatiftir. AAM'lere örnek olarak vereceğimiz uçucu kül veya metalurjik cürüflar, alkali çözeltiyle aktive edilerek reaksiyon hızı kazanır ve bu durum çözünmez, güçlü bir bağlayıcı faz oluşumu sağlar. Bu bağlayıcılar, kireçtaşı (CaCO_3) gibi karbonat prekürsörlerini ve çimentonun yüksek sıcaklıkta işlenmesine ihtiyaç duyulmasını yani CO_2 salınımını ortadan kaldırır (Ponomar et al., 2023).

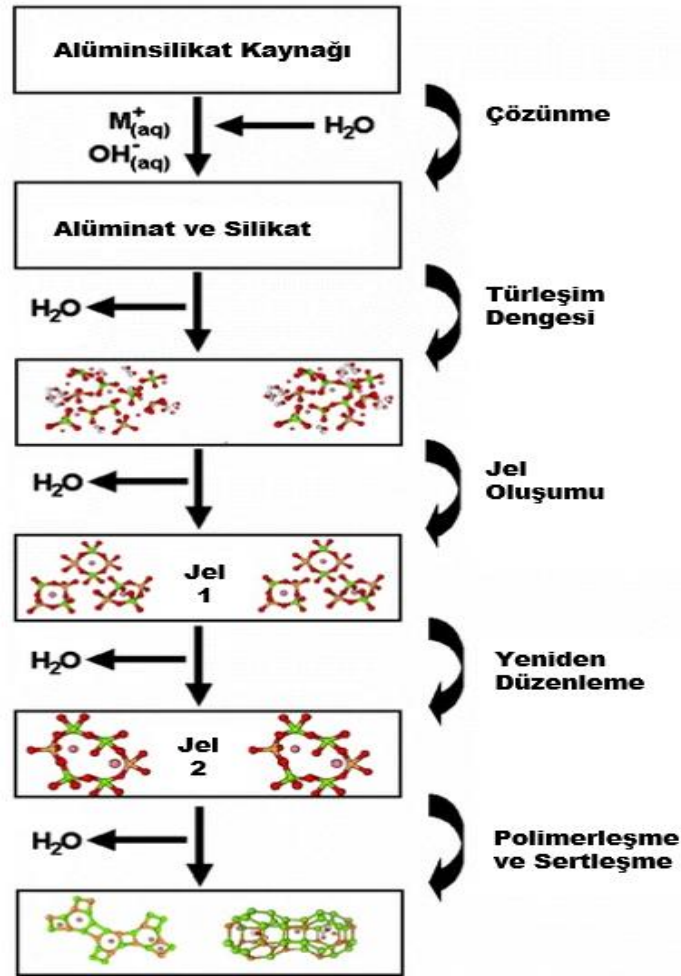
Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin nanoyapısı öncelikle içindeki kalsiyum miktarından oldukça etkilenmektedir. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu gibi içeriğinde yüksek kalsiyum olan sistemlerdeki baskın faz, tobermorit yapısına benzer olan kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jelidir. Uçucu kül ve metakaolin gibi düşük kalsiyumlu sistemlerde ise sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) jeli oluşmaktadır. Yüksek ve düşük kalsiyumlu bu jeller prekürsör karışımlarına dayalı bağlayıcılarda birlikte bulunabilmektedirler (El Seidy, 2024). Bu oluşan jelleri açıklayacak olursak;

C-A-S-H Jeli (Kalsiyum Alüminosilikat Hidrat): Yüksek kalsiyum oranına sahip malzemelerin aktivasyonu sonucunda oluşmaktadır. Bu jelin içinde bulunan cüruf, yapısında bulunan kalsiyum (Ca) miktarında artışa sebep olarak C-A-S-H jel oluşumunu sağlar ve bu durum daha yoğun, kompakt bir yapı ve yüksek bir erken yaş dayanımı sağlar (Yazıcı ve Karagöl 2022; Amran et al., 2020).

N-A-S-H Jeli (Sodyum Alüminosilikat Hidrat): Düşük kalsiyum oranına sahip malzemelerin aktivasyonu sonucunda oluşmaktadır. Oluşan bu yapı, Si-O-Al bağlarından oluşan yarı kristal ve amorf bir polimerik ağa sahiptir. Oluşan bu jel, asit direnci ve yüksek sıcaklığa karşı dirençten sorumludur (Yazıcı ve Karagöl 2022; Midhin et al., 2023).

Hibrit Jeller: Yüksek ve düşük kalsiyum oranına sahip yüksek fırın cürufu ve uçucu külün bir arada kullanıldığı jellerde N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri beraber bulunabilir veya N-C-A-S-H jel oluşumu sağlanabilir. Oluşan bu hibrit jel yapı, gözenekliliği azalttığından dolayı dayanıklılığı arttırmaktadır (Midhin et al., 2023).

Şekil 2.2’de geopolimerlerin alkali aktivasyon reaksiyonunun Duxson modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Geopolimerlerin alkali aktivasyon reaksiyonunun Duxson Modeli (Duxon et al., 2007)

Duxon et al., (2007) tarafından yapılan bu model şu şekilde açıklanmıştır; Alüminosilikat kaynağı bir alkali aktivasyon çözeltisiyle temas etmesi sonucu çözünmesi, bireysel şekilde alümina ve silikat oluşmasını sağlar. Bu aşama jeopolimerizasyonun ilk aşaması olarak kabul edilir. Monomerler etkileşime girip dimerler, trimerler tetramerler ve benzerlerini oluşturur. Alüminosilikat jeli doymunlaştığında çöker. Alüminyum silikattan daha hızlı şekilde çözünür bundan dolayı Jel 1 alüminyum açısından zengin olur. Reaksiyon ilerlemeye devam ettikçe silikatlara çözünmeye başlar ve jelde bulunan silikat artarak Jel 2'yi oluşturur. Çözülme, türleşim dengesi, jel oluşumu, yeniden düzenleme, polimerleşme ve sertleşme aşamaları aynı anda devam eder (Duxon et al., 2007).

2.2.2 Geopolimerler

Geopolimer, doğal jeolojik bağlanma mekanizmasının mühendislik bakış açısıyla yeniden yorumlanmasıyla ortaya çıkan, çimentoyu kısmen veya tamamen ortadan kaldıran,

alüminosilikat esaslı katı malzemelerin alkali ortamlarda, yüksek enerji ihtiyacı duyulmadan kimyasal olarak yeniden örgütlenmesi sonucunda ortaya çıkan ve yüksek bağlanma yapısına sahip çevre dostu, sürdürülebilir, inorganik polimerik bir bağlayıcı sistemdir. Geopolimer ilk kez 1978 yılında Fransız asıllı Joseph Davidovits tarafından “geopolimer” olarak tanımlanmıştır (Verma et al., 2022). Ayrıca literatürde “alkali ile aktive edilmiş çimento”, “mineral polimer”, “alkali bağlı seramik” ve “inorganik polimer camı” olarak da görmek mümkündür (Lahoti et al., 2019). Geopolimerler, mikrogözenekli kristalin katılar olan zeolitlerin jeolojik oluşumunun birebir aynısı taklit edilerek geliştirilmiştir. Kendine özgü olan özellikleri sayesinde su yumuşatma, saflaştırma, gaz ve çözücü ayrımları gibi birçok uygulamada fazlasıyla fayda sağlar (El Seidy, 2024).

Geopolimerin ve Portland çimentosunun reaksiyon mekanizmaları birbirinden farklıdır. Çimento, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ürünlerini açığa çıkaran hidrasyon yoluyla reaksiyona girerken geopolimer beton, silisyum (Si) ve alüminyum (Al) açısından zengin olduğundan dolayı reaksiyon mekanizmasında alüminosilikat minerallerini aktive edebilmek için sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörlerin kullanılarak aktive edildiği geopolimerizasyon sürecine dayanır yani alüminosilikat minerallerinin alkali aktivasyon ortamında çözünmesiyle gerçekleşerek amorf formda tekrar eden Si-O-Al-O etkileşimlerini ortaya çıkarır. Dolayısıyla üç boyutlu amorf alüminosilikat ağından oluşan C(N)-A-S-H jeli geopolimer betonun ana reaksiyon ürünüdür (Abdellatief, 2023). Geopolimerizasyon temelde üç aşamadan oluşmaktadır;

- Çözünme: Katı olarak bulunan alüminosilikatlar alkali ortamda çözünmesi ve monomerlerin serbest bırakılması (Meskhi et al., 2023).
- Jel Oluşumu ve Oryantasyon: Çözünmüş halde bulunan iyonların birleşerek oligomer oluşturması ve jel yapısına geçmesi (Meskhi et al., 2023).
- Polikondenzasyon ve Sertleşme: Oluşan jel yapısının düzenlenerek sertleşip dayanım kazanması (Meskhi et al., 2023).

Denklem 2.1’de geopolimerizasyonun ilk aşaması (çözünme ve hidroliz), Denklem 2.2’de üçüncü aşama olan (polikondenzasyon ve sertleşme) süreci gösterilmektedir.

$$\begin{array}{c} \text{n(Si}_2\text{Os, Al}_2\text{O}_2) + 2\text{nSiO}_2 + 4\text{nH}_2\text{O} \rightarrow \text{n(OH)}_3\text{-Si-O-Al}^{(-)\text{-O-Si-(OH)}_3 \\ | \\ \text{(OH)}_2 \end{array} \quad (2.1)$$

$$\begin{array}{c} \text{n(OH)}_3\text{-Si-O-Al}^{(-)}\text{-O-Si-(OH)}_3 \rightarrow (\text{Na}^+, \text{K}^+)\text{-(}\text{--Si-O-Al}^{(-)}\text{-O-Si-O--)} + 4\text{nH}_2\text{O} \\ \quad \quad \quad | \quad \quad \quad | \quad \quad \quad | \quad \quad \quad | \\ \quad \quad \quad (\text{OH})_2 \quad \quad \quad \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \end{array} \quad (2.2)$$

Geopolimerizasyon polimerik Si-O-Al bağlarını üretebilmek için alümino-silikat oksitlerini ve alkali polisilikatlar arasında gerçekleşen kimyasal bir reaksiyondur (Swathi and Vidjeapriya, 2023). Geopolimerizasyon işleminde, Si ve Al açısından zengin bir malzeme, reaksiyonu başlatabilmek için yüksek pH'lı çözeltilere ihtiyaç duyduğu için yüksek alkali çözeltilerle kimyasal reaksiyona girer ve üç boyutlu inorganik polimerik bir ağ yapısı oluşturur. Geopolimerizasyonun kimyası, sıcaklığa karşı duyarlı olması ve aktivatörlerin konsantrasyonundan fazlasıyla etkilenebildiği için oldukça etkileyici bir kimyadır. Bu kimyasal reaksiyon, zorlu ortamlarda yüksek direnç göstermektedir (Hakeem et al., 2024). Geopolimerizasyon egzotermik yani ısı açığa çıkaran bir reaksiyondur ve sıcaklık, aktivatör molaritesi ve kullanılan malzemenin tanecik boyutu reaksiyonun hızını ve dayanıklılığını direkt etkiler. Özellikle ısı kürü uygulanması, polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırır ve yüksek erken dayanıma ulaşılmasını sağlar (Meskhi et al., 2023; Yazıcı ve Karagöl, 2022).

2.2.2.1 Geopolimer kimyası

Geopolimerler yüksek mekanik özellikleri sahip ve basınç dayanımları 100 MPa üzerini bulabilen malzemelerdir (Atış et al., 2015). Geopolimerlerin sertleşme ve dayanım kazanma mekanizması, Portland çimentosunun (OPC) özgül hidratasyon temelli süreçlerinden farklı olup, bu süreçte alüminosilikata sahip öncül malzemelerin alkalilerle çözünmesi ve üç boyutlu polimerik ağ yapısı oluşturarak katılaşmasına dayanmaktadır (Lahoti et al., 2019). Geopolimerleşme süreci, alüminosilikat oksit mineralleriyle yüksek alkali olan bir çözelti arasındaki kimyasal reaksiyondan oluşur ve bu reaksiyon çok hızlı bir şekilde gerçekleşir. Geopolimer bloklar, polimerik bağlar ile (Si-O-Al-O) zincirlerinden oluşan üç boyutlu yapılardan meydana çıkar. Yapının içinde bulunan alümina ve silika miktarları, reaksiyon ve bağlanma derecesini, dolayısıyla geopolimerlerin birçok özelliklerini etkiler. Aşağıda verilen Denklem 2.3'te polisiyalat zincirli yapının temsildir (El Seidy, 2024).

$$M_n[-(SiO_2)_z-AlO_2]_n \cdot wH_2O \quad (2.3)$$

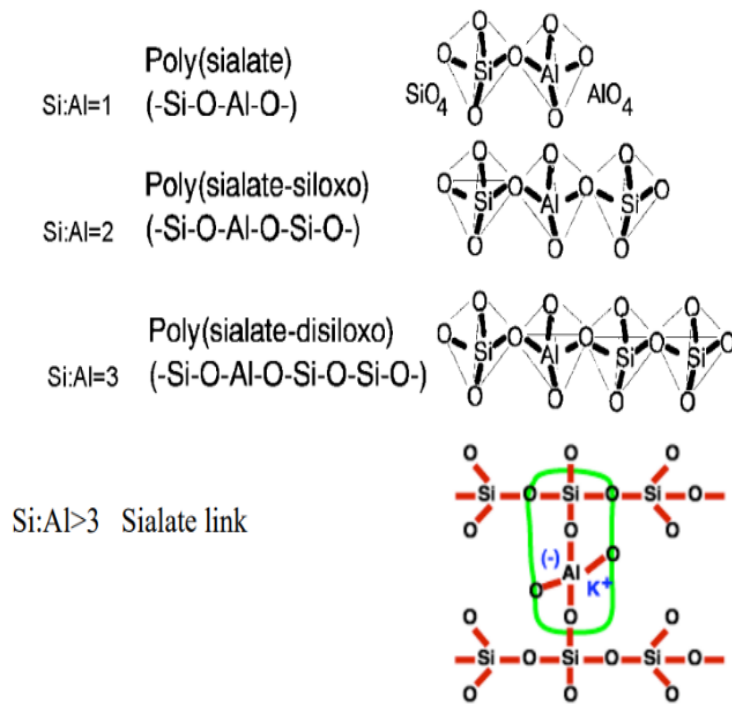
M: Katyon veya alkali bir element

z: Reaksiyon kimyasına bağlı sayı

n: Polimerleşme derecesi

w: Hidratasyon derecesi

Şekil 2.3'te geopolimerleşme sırasında polisiyalat oluşum süreci gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Geoplimerleşme sürecinde polisiyalat (Davidovits, 2002)

Geopolimer sistemlerde oluşan reaksiyonlar sabit bir mekanizma ile ilerlemez. Bu nedenle geopolimer kimyasında süreci etkileyen faktörlerin bilinmesi, bu sürecin kontrol edilebilirliğini ve istenen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi adına büyük önem taşımaktadır. Aşağıda geopolimer kimyasal sürecini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin oluşturduğu etkiler bulunmaktadır.

- **Si/Al Oranı:** Alüminyum ve silisyum arasındaki oran, oluşan bağlayıcı ağı yapısını ve doğal olarak malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen parametrelerden biridir. Bu oranın düşük olduğu sistemlerde üç boyutlu ağ yapıları gelişirken, bu oranın artmasıyla birlikte polimer ağ düzenli şekilde oluşamaz ve

reaksiyon verimi olumsuz etkilenebilir (Shehata et al., 2022; Swathi and Viidjeapriya, 2023).

- Kür Koşulları: Malzemeye uygulanan yüksek sıcaklıktaki kür, erken yaş reaksiyonlarını hızlandırır ve kısa sürede yüksek dayanım kazandırır. Ortam sıcaklığında kürlenene cüruf esaslı malzemelerde ise zamanla daha dengeli ve kararlı bağlayıcı yapılar oluşabilmektedir (Meskhi et al., 2023).
- Alkali Aktivatörler: Aktivasyon ortamına silikat içeren çözelti eklenmesiyle, çözünmüş silika miktarı artar ve bağlayıcı ağ oluşumu hızlanarak dayanım değerleri yükselir (Yeşiloğlu, 2025). İçine sodyum karbonat (Na_2CO_3) gibi alternatif aktivatörler koyulan malzemelerde ise daha yavaş ilerleyen reaksiyon mekanizmaları olur ve sistemin kinetik davranışı farklı şekilde etkilenir (Lao et al., 2023).

2.3 Alkali Aktivatörler

2.3.1 Hidroksit esaslı aktivatörler (hidroksit aktivatörleri)

Alkali ile aktive edilen çimentolu sistemlerdeki reaksiyon mekanizması, çözeltide açığa çıkan yüksek alkaliniteye bağlı şekilde gelişen çok aşamalı fizikokimyasal süreçlerin bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Aktivasyon ortamında bulunan alkali hidroksitler, sulu fazda iyonlaşarak hidroksil iyon yoğunluğunu artırır ve gözenek çözeltisinin pH değerini önemli bir şekilde artırır. Oluşan yüksek pH koşulu, alüminosilikat esaslı öncü malzemelerin camsı olan yapısının termodinamik olarak kararsız hale geçmesine neden olarak katı fazdan iyon salınımını mümkün kılar. Yüksek alkali altında, hidroksil iyonları güçlü nükleofiller olarak davranır, alüminosilikat ağındaki silisyum ve alüminyum merkezli bağlara etki eder. Bu etki ettiği bağ enerjileri dikkate alındığında Al-O bağlarının Si-O bağlarına göre daha zayıf olması, alüminyum içeren türlerin çözeltide çok daha hızlı bir şekilde birikmesine yol açar. Bu sebepten ötürü erken evrede oluşan gözenek çözeltisi, özellikle tetrahidroksialüminat bakımından zenginleşir. Çözünme süreci devam ettikçe ve silikat türlerinin de devreye girmesiyle iyon konsantrasyonu doygunluğa ulaşır. Bu aşamadan sonra sistem, çözünmeyerek yeniden yapılanmaya geçer ve temeli polimerizasyon olan bir jelleşme davranışı gösterir. Alkali katyonların türü ve kalsiyumun var olması, bağlanma yapısının karakterini belirleyerek N-A-S-H veya C-A-S-H tipi üç boyutlu alüminosilikat ağların ortaya çıkmasına neden olur. Kondenzasyon reaksiyonları sırasında biraz su ve hidroksil iyonunun tekrar ortaya çıkması, alkali ortamın sürekliliğini ve

reaksiyonların daha derin katmanlarda da devam etmesini sağlar. Bu nedenle, alkali kationların iyonik yarıçapı ve hidratasyon davranışı, ortaya çıkan jelin reolojik özellikleri ve nihai mikro yapısını anlamada temel bir çerçeve sunar (El Seidy, 2024).

2.3.2 Silikat esaslı aktivatörler (silikat aktivatörleri)

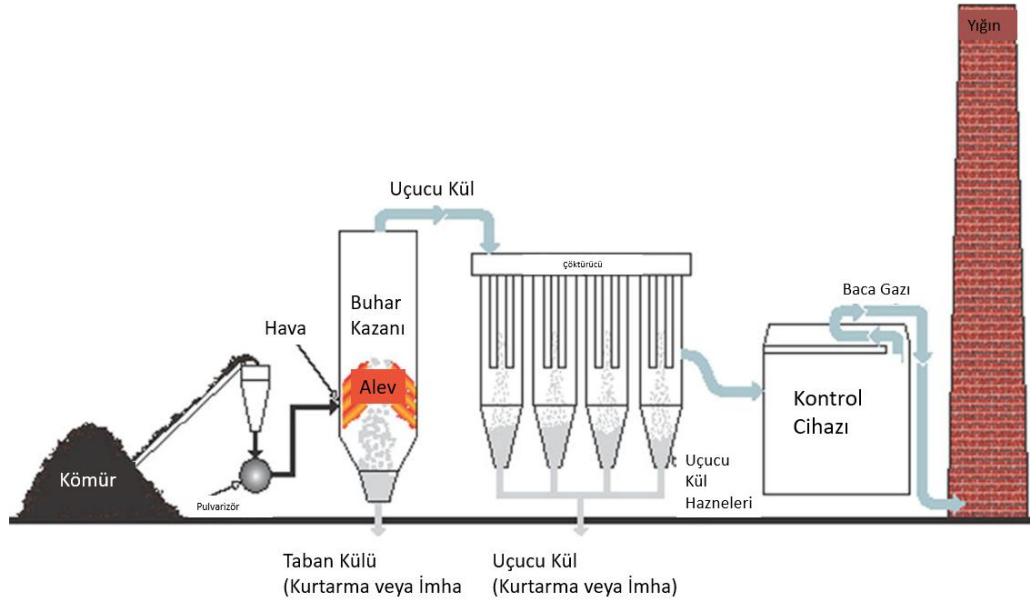
Silikat esaslı aktivatörlerin davranışına etki eden parametrelerden biri olan silis modülü, molar veya ağırlık cinsinden tanımlanır ve çözeltideki silikat polimerleşme derecesinin göstergesi olarak kabul edilir. Bu aktivatörlere etki eden bir diğer parametre ise çözelti konsantrasyonudur. Bu iki parametrenin artması, çözelti içinde bulunan polisilikat zincirlerinin uzamasına sebep olur ve bu durum viskozitenin artmasına sebep olur. Viskozite, sıvıların akmada birbirlerine takılarak oluşturduğu içsel sürtünmedir. Çözeltideki artan viskozite işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyerek pratik kullanıma engel olur. Çözeltiye artan bu iki maddeyi dengelemek adına alkali hidroksit koyulur. Koyulan alkali hidroksit, uzayan polisilikatlar eklenen alkali hidroksit sayesinde kısalarak viskoziteyi olması gereken şekilde tutar. Silikat esaslı aktivatörlerin yapısının yalnızca basit silikat türlerinden oluştuğu düşünülmesi yanlıştır. Çözelti içinde ortosilikat, hidroksit ve alkali iyonları bulunmaktadır (El Seidy, 2024). Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda 1-2 aralığında kullanılan silis modülünün (öncü malzemelerin yapısına göre değişkenlik gösterebilir) genellikle en iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur (Newlans et al., 2017; Duxon et al., 2007).

Silikat esaslı aktivatörlerin içinde çözünmüş halde bulunan silikatlar, alüminyumlarla hızlı bir şekilde etkileşime girer ve daha yoğun bir ağ oluşumuna katkıda bulunur. Oluşan yoğun ağ yapısı mikro yoğunluk sağlar ve erken yaş dayanımını olumlu etkiler. Literatürde “su camı” olarak da bilinen silikat esaslı aktivatörlerin anlatılan bu mekanizmasının, hidroksit esaslı sitemlere benzer özellikler gösterdiği görülmektedir (El Seidy, 2024).

2.4 Yaygın Olarak Kullanılan Alkali ile Aktive Edilmiş Öncü Malzemeler

2.4.1 Uçucu kül

Uçucu kül elektrikle çalışan santrallerde üretilen bir alkali-aktive öncüdür. Santrallerde bulunan pulverize kömürler yanma odasına püskürtülür. Daha sonra yanma odasından ısı çekilerek minerallerde katılaşma sağlanır. Büyük parça yapısına sahip olan parçalar dibe düşerek taban külünü, daha küçük olan parçalar ise baca gazına çıkarak uçucu külü oluşturur. Şekil 2.4’te toz haline getirilen kömürün elektrik santralinde üretim şeması gösterilmiştir (Amran et al., 2021).



Şekil 2.4: Toz kömürün elektrik santralinde üretim şeması (Amran et al., 2021)

Uçucu küller içindeki kalsiyum miktarına göre 2'ye ayrılmaktadır. F tipi olarak adlandırılan ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu külün içindeki kalsiyum oranı düşük olurken, C tipi ve linyit kömüründen elde edilen uçucu küllerin kalsiyum miktarları yüksek olur (Özcan ve Uğur, 2019). Uçucu kül koyu renkli ve ufak tane yapısına sahip olan bir alkali-aktif öncüdür. Uçucu külün rengi yanma şekline göre değişkenlik göstermektedir. Koyu renkli uçucu küller bu koyu rengini yanmamış karbondan almaktayken açık renkli uçucu küller ise daha iyi yanma sonucunda bu açık renge sahip olurlar. Uçucu külün tanecik yapısına etki eden en büyük etkenler öğütülme ve bacadan kaçma miktarıdır. Bu malzemenin çimento yerine kullanılması, termik santrallerin bacasından toplanıp doğaya salınmamasını sağlayarak çevreye fayda oluştururken atık depolama alanına götürülen uçucu küllerin ise depolama maliyetini ortadan kaldırmış olur. Daha fazla öğütülmüş uçucu kül daha küçük tanecik yapısına sahip olmaktadır. Uçucu külün kimyasal yapısı birçok etkene bağlı şekilde değişim göstermektedir (Güler vd., 2005). Bunlar sırasıyla:

- Yakılan pulverize kömürün cinsi
- Pulverize kömürün yakıldığı kazan cinsi
- Yakma işlemi yapılırken ayarlanan sıcaklık derecesi
- Külün toplanma mekanizması
- Külün uzaklaştırma sistemi

Yakılan pulverize kömüre eklenen katkı maddeleri olarak sıralayabiliriz (Güler vd., 2005).

Bu alkali-aktive öncü malzeme küçük tanecik yapısı sayesinde gözenekliliği azaltarak korozyon sorununu önler, ayrıca özgül ağırlığı çimentoya göre düşük olduğundan yapıya gelen zati yüklerin azalmasını sağlar (Özcan ve Güngör, 2019). Uçucu kül mikroyapısal olarak camsı kürelerden oluştuğu için bu küreler bilye etkisi yaratmaktadır ve bu bilye etkisi taneciklerde sürtünmeyi azalttığından dolayı betona işlenebilirlik kazandırmaktadır. Bu yapısal özellik sayesinde uçucu kül kullanılan betonlarda su/bağlayıcı oranı düşmekte ve yüksek kalite beton üretilmektedir (Özcan ve Güngör, 2019). Orman endüstri atık külü ile yapılan ve ikame ürün olarak yalnızca uçucu külün kullanıldığı bir deneyde bir betonunun yayılmasının çok düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Çıkan bu sonuçta malzemenin yapışma özelliği olduğu sonucuna varılabilir (Yeşiloğlu, 2023).

Yapılan bir başka deneyde, F tipi (kalsiyum oranı düşük) uçucu kül içeren beton, ortam sıcaklığında ve etüvde kürlenmiştir. Etüvde kürlenmiş uçucu kül esaslı geopolimer betonun mukavemetinin, ortam sıcaklığında kürlenmiş betona oranla çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir (Gültekin vd., 2022). Etüve koyulan uçucu külün daha yüksek mukavemet sağlamasının sebebi, taneciklerin parçalanarak reaksiyona girmesi için gereken enerjinin sağlanması ve sertleşmeyi sağlayan jellerin daha hızlı ve yoğun şekilde oluşması olarak düşünülebilir.

Uçucu külün kullanıldığı betonlarda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılması ve kullanılan NaOH miktarının belirli bir miktarda artmasıyla basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Farooq et al., 2021). Uçucu kül kullanılan ve sodyum hidroksitle aktive edilerek üretilen geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımının 13 M sodyum hidroksit içeren karışım olduğunu bulunmuştur (Ganesh and Muthukannan, 2021). Gözlemlenen bu olgu, sodyum hidroksit aktivatörünün uçucu külün partiküllerinin çözünürlüğünü artırarak polimer ağının kurulmasında kritik bir rol oynadığı şeklinde yorumlanabilir.

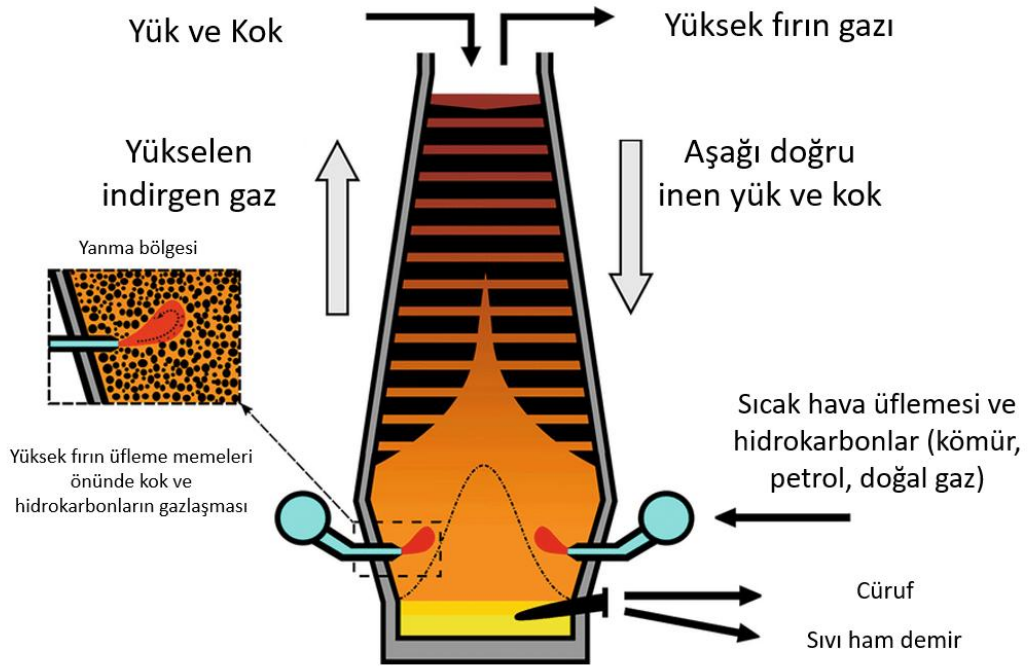
2.4.2 Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu demir-çelik endüstrisinde pik demir üretimi sırasında ortaya çıkan ve ekonomik değeri yüksek olan bir yan malzemedir. Üretim süreci fırın tepesinden kok kömürü, cüruf yapıcı ve demir cevherinin yüklenmesiyle başlar. Fırının alt kısmından üflenen sıcak hava ve oksijen, kok kömürünü gazlaştırır ve yukarı yöne yükselen CO₂, H₂ ve N₂ gazlarından oluşan sıcak bir indirgeyici gaz akımı yaratılır. Bu fırın ters akım

ve k t le değişimi reaktörü mekanizmasıyla çalışır. Fırının içine üflenen sıcak hava 1500 C-1600 C derecelerine ulaştığında şarj malzemeleri erimeye başlar. Demir cevheri metalik demire indirgenirken, cevherde bulunan silis ve alümin gibi asidik karakterli mineralleriyle kok kömüründen gelen kalıntılar, şarja eklenen kireçtaşı kaynaklı kalsiyum oksitle reaksiyona girer. Bu kimyasal etkileşim sonucunda kalsiyum-alümino-silikat esaslı c r f meydana çıkar. Oluşan sıvı c r f hazne kısmında toplanır. C r fun yoğunluğunun sıvı olarak bulunan demirden daha az olması sebebiyle metalin üst kısmında yüzmesini sağlar. Fırın tabanında bulunan bu iki malzeme, belirli aralıklarla açılan deliklerden dışarı tahliye edilir. Fırından tahliye edilen ve yüksek sıcaklıkta olan c r fa soğutma yöntemi uygulanır. Yüksek fırın c r funa uygulanan iki tip soğutma yöntemi vardır.

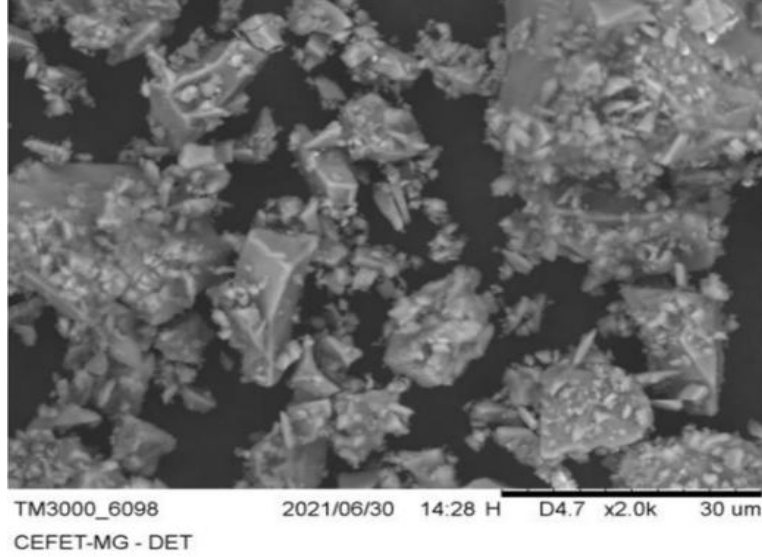
- 1) Ani Soğutma (Granülasyon): Granülasyon işlemi, basınçlı su jetleriyle çok hızlı şekilde soğutarak şoklanması işlemiyle elde edilir. Bu şoklama işlemi dolayısıyla, c r f kristal bir yapı oluşturmayıp, camsı bir yapıda katılaşma sağlar. Elde edilen bu camsı yapıya sahip yüksek fırın c r fu bağlayıcı özellik gösterir.
- 2) Yavaş (Havada) Soğutma: Açık havada soğumaya bırakılan c r flar, çok işleminden farklı olarak kristalize bir yapıya sahip olur. Kristalize yapıya sahip olan bu c r f, hidrolik özelliğe sahip olmadığından dolayı genellikle agrega veya yol dolgularında kullanılmaktadır.

Suyla şoklanarak oluşturulan granüle yüksek fırın c r fu, yüksek neme sahip bir yapıdadır. Bu malzeme şoklama işleminden sonra kurutularak “ ğ t lm ş Granüle Yüksek Fırın C r fu” olarak adlandırılan malzemeye dönüşmektedir (Amran et al., 2020; Spanlang et al., 2016). şekil 2.5’de yüksek fırın süreci gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Yüksek fırın süreçleri (Spanlang et al., 2016)

Oluşan bu yüksek fırın cürufu içindeki %30-40 oranında bulunan silikon dioksit ve %40 kadar bulunan kalsiyum oksit sebebiyle Portland çimentosuna benzer özellikler göstermektedir (Amran et al., 2020). Yüksek fırın cürufu alkali bir aktivatörle etkileşime girdiğinde (C-A-S-H) jelleri oluşturmaktadır. Oluşan bu jeller, N-A-S-H jelleriyle beraber daha yoğun ve boşluksuz bir yapı meydana getirir. Meydana gelen bu yapı sayesinde mikroyapıdaki boşluklar dolarak betonun geçirimsizliği azalmaktadır (Yazıcı ve Karagöl, 2022; Abdellatief et al., 2023). Şekil 2.6'da granüle yüksek fırın cürufunun taramalı elektron mikroskobu altındaki tanecik yapısı görüntüsü verilmiştir (França et al., 2023).



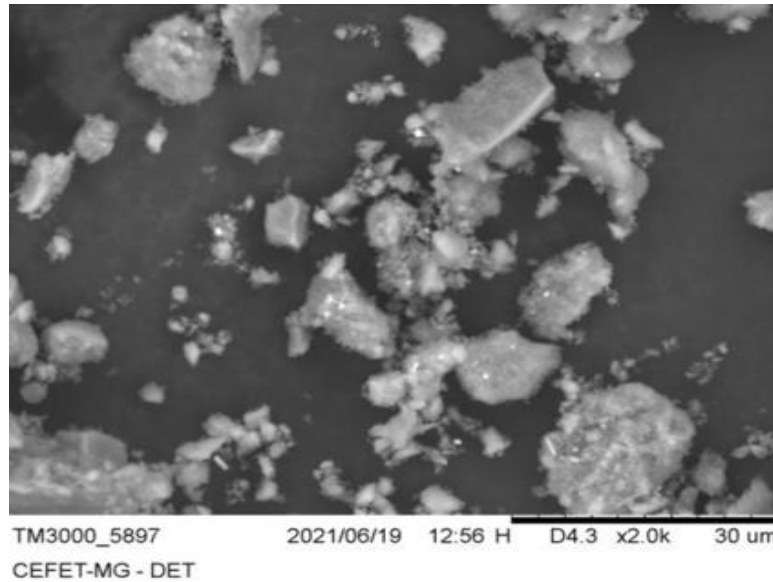
Şekil 2.6: Yüksek fırın cürufunun taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (França et al., 2023)

Cürufun mikroskop yapısında da görüldüğü üzere köşeli bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı uçucu külün işlenebilirliği azdır (Seathi and Vidjeapriya, 2023). Yüksek fırın cürufu yüksek sıcaklıklara karşı dirençli bir malzemedir ve içerdiği kalsiyum sayesinde ortam sıcaklığında kürlendiğinde sertleşme sağlamaktadır. Örneğin uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli bir betonda 800°C’den sonra beton içindeki cürufun artmasıyla dayanım kaybının azaldığı görülmüştür ve daha kararlı hale gelmiştir (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Yüksek fırın cürufunun en önemli avantajlarından biri de içerdiği yüksek kalsiyum sayesinde ortam sıcaklığında sertleşme sağlamasıdır (Alshaeer et al., 2025). Ayrıca karışım tasarımına eklenen yüksek fırın cürufu priz süresini kısaltarak erken yaş dayanımı sağlamaktadır (Seathi and Vidjeapriya, 2023). Yüksek fırın cürufu içeren harçlarda molarite arttıkça eğilme dayanımında artma olduğu gözlemlenmiştir. Bu beton karışımı tasarımında yüksek fırın cürufuna %15 uçucu kül eklenirse eğer eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmektedir (Aydın vd., 2023). Silis dumanı ve çelik liflerle beraber kullanılan cüruf, “Ultra Yüksek Performanslı Geopolimer Beton (UYPGGB)” üretebilmektedir. Üretilen bu karışımların standart kütleme koşulları altında basınç dayanımları lif olmadığında 120 MPa, çelik lif takviyesiyle birlikte ise 175 MPa basınç dayanımları gördüğü bulunmuştur (Alshaeer, 2025; Midhin et al., 2023). Uçucu kül esaslı geopolimer beton içeriğine yüksek fırın cürufu eklenmesi basınç dayanımında iyileşme sağladığı görülmüştür. Örnek olarak, %50 oranında cüruf ve %50 oranında uçucu kül içeren karışım tasarımlarının en yüksek basınç dayanımı sağladığı bulunmuştur (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Bir başka çalışmada ise uçucu kül azaltılıp

yerine yüksek fırın cürufu kullanılmasıyla (%40 oranında cüruf ve %60 uçucu kül), basınç dayanımının 50,5 MPa değerlerine ulaştığı rapor edilmiştir (Krishnan et al., 2014). Cürufun agrega olarak kullanıldığı betonlarda 900°C’lerde bile numunelerin bütünlüğünü koruduğu fakat basınç dayanımında yaklaşık olarak %53,60 kadar bir kayıp yaşandığı tespit edilmiştir. Aynı deney kireçtaşı agregalar üzerinde yapıldığında ise numuneler tamamen parçalanmıştır (Gültekin vd., 2022).

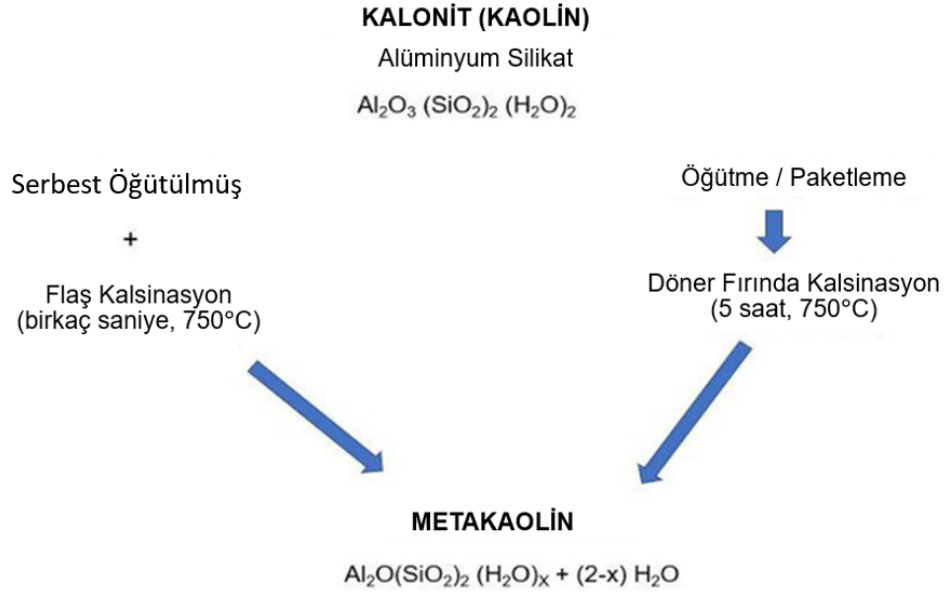
2.4.3 Metakaolin

Metakaolin (MK), doğal kil minerali olan kaolinin ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-S}_2$ ve $\text{O}_2\text{-2H}_2\text{O}$) belirli sıcaklıklarda ısıtma işlemine tabi tutulması ve içindeki suyun uçurulması (dehidroksilasyon) sonucu elde edilen yapay puzolanik bir malzemedir. Bu işlem doğrultusunda malzeme amorf bir yapıya dönüşüp ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{- S}_2$ ve O_2) halini alır. Kaolin granitik veya volkanik kayalardaki feldspat minerallerinin değişimi sonucu oluşan ve içinde kaolinit, dikit, nakrit gibi mineral barındıran kil grubudur. Metakaolin üretimi için kaolin kili, 500°C ile 8000°C arasında değişen sıcaklıklarda kalsine edilir (Noorvand., 2022; Marvila et al., 2021). Şekil 2.7’de metakaolinin taramalı elektron mikroskobu altındaki tanecik yapısı görüntüsü verilmiştir (França et al., 2023).



Şekil 2.7: Metakaolinin taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (França et al., 2023)

Saf kaolitin 750°C’de 24 saatlik ısıtılmasıyla yüksek reaktiviteye sahip metakaolin elde edildiği raporlanmıştır (Alonso and Palomo, 2000). Şekil 2.8’de metakaolin üretim sürecini gösteren akış şeması verilmiştir (Jindal et al., 2023).



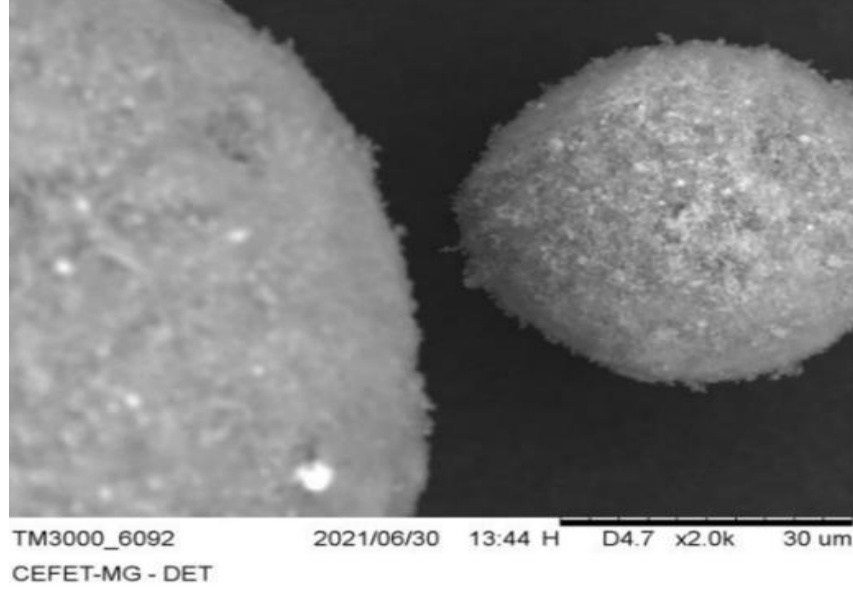
Şekil 2.8: Metakaolin üretiminin akış şeması Jindal et al., 2023)

Metakaolinde 400°C’nin altındaki sıcaklıklar içindeki kaolitin yapısı bozmadığından dolayı yetersiz kalırken, 950°C’nin üstündeki sıcaklıklarda ise malzemenin mullit ve kristobalite dönüşmesine ve reaktivitesini kaybetmesine sebebiyet vermektedir (Marvila et al., 2021). Kalsinasyon işlemi sonucu kaolinin yapısı bozulur ve yüksek derecede amorf ve susuz bir alüminosilikat olan metakaolin meydana gelir (Farooq et al., 2021). Metakaolin çimentoya göre yaklaşık olarak 5-6 kat daha az CO₂ emisyonu sağlamaktadır. Bu açıdan metakaolin çimentoya göre daha çevre dostu bir üründür (Marvila et al., 2021). Kimyasal bileşimi açısından metakaolin, yüksek oranlarda silis ve alümin içermektedir. Uçucu külle kıyaslandığında ise daha yüksek alüminyum oksit içeriğine ve %50-62 oranında silikon dioksitine sahip bir malzemedir (Noorvand et al., 2022; Marvila et al., 2021). Metakaolin uygun karışım tasarımları ve ısıtma kürlemesiyle (60°C’de 5 gün) yüksek basınç dayanımlarına ulaşabilir (Gültekin vd., 2022). İçinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bulunan geopolimerlere %10-40 oranında metakaolin eklenmesi betonun mekanik özelliklerinde iyileşme göstermiştir. Ayrıca cam tozu ikame edildiğinde, %100 metakaolin içeren karışımlarla aynı basınç dayanımının korunduğu gözlemlenmiştir (Shehata et al., 2022).

Fakat bazı çalışmalarda cürufun, metakaoline kıyasla daha yüksek kalsiyum içermesi nedeniyle metakaoline göre daha iyi basınç dayanımı sağladığı belirtilmiştir (Hakeem et al., 2024). Metakaolin plaka benzeri tanecik yapısı ve çok ince olan yapısı sebebiyle uçucu külle göre çok daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır. Bunda dolayı yüksek metakaoline sahip karışım tasarımlarında taze betonun işlenebilirliği azaltılabilir (Duxon et al., 2007; Lahoti et al., 2019). 1300°C-1400°C'lere kadar erimeden kalan metakaolin geopolimerleri termal olarak kararlıdır. Fakat yukarda anlatıldığı üzere içerisindeki su miktarı fazla olduğundan dolayı yüksek sıcaklığa maruz kaldığında oluşan buhar basıncı sebebiyle makro çatlaklar meydana gelebilir ve dayanım kaybı yaşanabilir (Lahoti et al., 2019). Metakaolin esaslı geopolimer betonlar, içerisinde bulunan yüksek alüminyum içeriği ve hızlı reaksiyon sebebiyle, uçucu kül esaslı geopolimer betonlara göre daha yüksek bir rötre eğilimi gösterir (Marvila et al., 2021).

2.4.4 Silis dumanı

Literatürde mikro silika olarak da karşımıza çıkan silis dumanı, elektrik ark fırınlarında 2000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kömür veya kok ile indirgenir. Bu işlem sırasında yüksek saflıkta bulunan kuvars silikona indirgenerek silikon dioksit oluşur. Oluşan bu silikon dioksit buhar fazında bulunur. Buhar halinde bulunan silikon dioksit oksitlenip düşük sıcaklıklarda yoğunlaşarak ultra ince, amorf ve küresel silis dumanını oluşturur. Oluşan silis dumanı parçacıkları, bir çimento tanesinin yaklaşık olarak 1/1000'ü kadar, çok ince bir tozdur (Panesar, 2019; Amran et al., 2020; Güler vd., 2005). Bu ince çok ince olan yapısı sayesinde daha kompakt ve homojen bir mikro yapısı olan malzeme, hidrasyon sırasında betona ilave edilmesi gereken suyu azaltarak gözenekliliği düşürür (Midhin et al., 2023). Şekil 2.9'de silis dumanının taramalı elektron mikroskobu altındaki tanecik yapısı görüntüsü verilmiştir (França et al., 2023).



Şekil 2.9: Silis dumanının taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (França et al., 2023)

Yüksek saflık gerektiren geopolimer üretimlerinde ise yüksek saflıkta silis dumanı üretmek için, silikon tetraklorür, hidrojen ve oksijen alevinde buhar fazı hidroliziyle işlenmesi gerekmektedir (Bahmani and Mostofinejad, 2023; Noorvand, 2022). Bu toz amorf yapıda ve olup çok küçük bir yüzey alanına sahiptir. İnce tanecik yapısından dolayı taşınması güç bir malzemedir. Bu malzemenin taşınmasını kolaylaştırmak adına birçok yöntem geliştirilmiştir. Silis dumanının taşınma yöntemlerine örnek verecek olursak; ilk yöntem silis dumanını su bazlı bir şerbet formuna getirerek taşımak ikinci yöntem silis dumanını sıkıştırarak daha yoğun bir form elde ederek taşımak, üçüncü yöntem ise su ve biraz çimento karıştırıp paletlenmesidir (Panesar, 2019). Silis dumanı, yüksek performanslı beton üretmek adına kullanılan puzolanik bir malzemedir ve betondaki dayanım ve durabiliteyi iki temel mekanizma üzerinden gerçekleştirmektedir.

- 1) Homojen Hidratasyon Gelişimi: Puzolanik davranış gösteren mikro silika, hidratasyon ürünlerinin üretimini arttırarak yapı içinde daha dengeli ve homojen bir dağılım sergilenmesine katkıda bulunur.
- 2) Gözenek Yapısının İyileştirilmesi: Malzeme, fiziksel bir dolgu malzemesi gibi davranarak, hamur içerisindeki mikro boşlukları doldurur ve ortalama gözenek çapının küçülmesine katkıda bulunur.

Buradan da anlaşılacağı üzere silis dumanının beton performansına pozitif yönde katkıda bulunmasında, kullanılan hammaddeden üretildiği fırın tasarımlarına kadar ve dolayısıyla

bunlara bağılı olarak değişen tanecik boyutu ile malzeme içeriği gibi faktörler direkt olarak ilişkilidir (El Seidy, 2024). Silis dumanı ilave edilen bir betonda geirimsilik azalır ve klorür iyonu geçişine karşı direnç artar. İnce yapısı sayesinde zararlı iyonların beton içine nüfuz etmesi engellenmiş olur. Fakat bu ince yapı, taze betonda terlemeyi azaltacağından dolayı yüzeyde hızlı bir kurumaya ve plastik rötre çatlakları oluşmasına yol açabilir bu yüzden kürleme işlemi sırasında dikkat edilmelidir (Panesar, 2019). Silis dumanı kullanılan betonlar yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmasıyla beraber, yoğun olan yapısı sebebiyle buhar basıncı kaçması doğrultusunda parça atma yani spalling riski ortaya çıkabilir. Bu sorunu uygun tasarım yaparak (rneğin lif ekleyerek) zmek mümkündür (Murali, 2024; Midhin et al., 2023). Silis dumanı yapısal olarak gözenek çözeltisindeki alkalilerde hızlı bir şekilde birleştiğinden dolayı geirimsililiği azaltarak alkali-silika reaksiyonundan doğan genleşmeyi engellemektedir (Panesar, 2019).

Yapılan deneylerde silis dumanı ultra yüksek performanslı geopolimer betonların (UYPGB) retiminde ve puzolanik bir dolgu malzemesi olarak test edilmiştir. UYPGB’da silis dumanı %0’dan %30’a çıkarıldığı zaman 28 günlük basınç dayanımında %26’lık bir artış grlmştir. Ayrıca içine %30 oranında silis dumanı eklenen bir betonda, betonun kırılma enerjisi, yaklaşık olarak %49,7 oranında artış sağlamıştır (Qaidi et al., 2022). Başka yapılan bir çalışmada ise %15 ve %30 oranlarında silis dumanı kullanımı içinde hiç silis dumanı bulunmayan malzemelere göre sırasıyla %15,15 ve %30,54 daha yüksek basınç dayanımı vermiştir (Panesar, 2019). %25 oranında silis dumanı bulunan bir betonda, silis dumanının elik liflere desteklenmesiyle %10 silis dumanı içeren ve içinde lif bulunmayan karışımla kıyaslandığında dayanımında %40,1 ile %74,7 arasında yükselmeler sağlanmıştır (Tahwia et al., 2022).

2.5 Potansiyel Alkali Aktivatörler ve Alkali imentolu Malzemeler

Alkali aktivasyon teknolojisi, silika ve alümina açısından zengin endüstriyel yan ürünler veya doğal alüminosilikatların bağlayıcıya dönüşmesini sağlayan kimyasal süreçlerdir. Bu süreçler yüksek pH seviyesine sahip alkali aktivatörlerin eklenmesiyle sağlanmaktadır. Alkali aktivatörler katı malzemeleri çözerek silikat ve alüminatları açığa çıkartıp polimerleşerek bağlayıcı jel fazını oluşturur. Alkali ile aktive edilen malzemeler hem atıkların geri dönüştürülmesi hem de imento kullanımını azaltarak veya tamamen ortadan kaldırarak üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyon sorununu çözmek için umut verici

malzemelerdir. Aşağıda sürdürülebilir beton üretiminde kullanılabilecek potansiyel endüstriyel yan ürünler verilmiştir.

2.5.1 Biyokütle külü

Biyokütle külü, silisyum, kalsiyum ve potasyum açısından zengin, geopolimer betonda kullanılabilen alüminosilikat esaslı bağlayıcı bir malzeme olmasının yanı sıra doğal bir alkali kaynak olarak değerlendirilen çevre dostu yan üründür. Izgaralı ve akışkan yataklı kazanların genellikle kullanıldığı biyokütle yakma işlemi, yaygın olarak bilinen bir biyokütle enerji dönüştürme şeklidir (Badem ve Olgun, 2024). Tarımsal yan ürünlerin veya orman endüstri atıklarının enerji üretmek ve atıkları bertaraf etmek için yakılması sonucu ortaya çıkan bir yan üründür (Yeşiloğlu, 2023). Biyokütle külünden, kostik olarak adlandırılan yüksek alkaliye sahip çözelti elde edilir. Yakılan ürüne göre farklı kimyasal ve fiziksel özellik gösteren bu malzeme, geopolimer beton üretiminde ve sürdürülebilir bir beton üretiminde kaynak olarak değerlendirilebilmektedir (Peys et al., 2016). Pirinç kabuğu külü, şeker kamışı biyokütle külü, zeytin biyokütle külü, mısır koçanı külü, pamuk kabuğu külü ve odun biyokütle külü gibi malzemeler geopolimer beton üretiminde başlıca kaynak olarak değerlendirilebilmektedir (Alonso et al., 2019; Peys et al., 2016; Balo et al., 2018; Cheah et al., 2015). Pirinç kabuğu külü ve şeker kamışı külü gibi tarımdan elde edilen atıklar bitkisel ürünlerden elde edildiklerinden dolayı %90 oranında silise sahiptir (Adesanya et al., 2021; Peys et al., 2016). Odun ve orman endüstrisinden elde edilen küller ise kalsiyum açısından zengin bir yapıya sahiptirler (Peys et al., 2016). Zeytin biyokütle külü, mısır koçanı külü ve pamuk kabuğu külü gibi diğer atıklar ise potasyum içeren ve pH değerleri 13-14 seviyelerini bulan yan ürünlerdir (Adesanya et al., 2021).

2.5.2 Atık cam

Atık camlar, soda-kireç, borosilikat, kurşun ve baryum gibi kategorilere ayrılrsa da büyük çoğunluğu soda-kireç kimyasal yapısından oluşmaktadır. İnce üretildiğinde bu malzeme çimentoyla aynı bağlayıcı özellikleri göstermektedir (Shi and Zheng, 2007). Atık camın geopolimer betona dahil edilmesiyle karışımın akışkanlığında artış gözlemlenmektedir. Örneğin, %7,5 ile %22,5 oranlarında atık cam kullanılan betonda akışkanlıkta sırasıyla %1,6 ve %4,6 arasında iyileşme görülmüştür (Tahwia et al., 2022; Rifa et al., 2023). Bu durum, atık camın pürüzsüz bir yüzey dokusuna, düşük sürtünme katsayısına ve doğal kuma kıyasla daha düşük su emme kapasitesine bağlı olmaktadır. Bu yapısı sayesinde içine girdiği karışımların işlenebilirliğini artırır (Youssif et al., 2025). Betondaki atık cam kullanımı %15

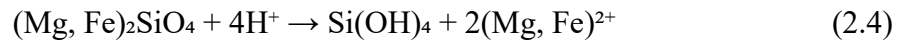
ikamelerindeyken 90. gün sonundaki basınç dayanımı 179 MPa gibi çok yüksek bir basınç dayanımı sağlamıştır (Hakeem et al., 2024). Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, atık cam fazının bağlayıcı matris içinde kompakt bir yapı oluşturduğu ve cam tanelerinin yüzeyde puzolanik reaksiyonlar sayesinde jel fazıyla güçlü bir bağ kurduğu gözlemlenmektedir (Tahwia et al., 2022).

2.5.3 Diyatumlu toprak (diyatomit)

Bira fabrikalarının atık yan ürünü olan diyatumlu toprak, canlı organizma kaynaklı üretim süreçleri sonucu oluşan amorf silika açısından zengin tortul bir kayadır. Doğal puzolan olarak sınıflandırılır. Temel olarak %70-80 oranında silika içeriğine, %2-8 oranında ise alüminyum içermektedir. Yüksek gözenekli ve geniş yapıya sahip ve mikroyapısına bakıldığında kabuklardan ve plakalardan oluşan gözeneklere sahip olduğu görülmüştür (Letelier et al., 2016; Adesanya et al., 2021). Yüksek silika içeriği sayesinde granüle yüksek fırın cürufu aktivasyonunda silika kaynağı olarak kullanılmıştır (Adesanya et al., 2021). Doğal puzolanik yapısı sayesinde kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer ve kalsiyum silikat hidrat üreterek mekanik dayanım artırır. Çimento yerine optimum olan %10-15 oranlarında kullanımı, kontrol betonuna göre daha yüksek dayanım vermiştir (Letelier et al., 2016). Karışıma eklenen diyatomit ilavesi hibrit geopolimer köpüklerde fiziksel ve kimyasal özellikleri etkilemek amacıyla da kullanılmaktadır (Lahoti et al., 2019).

2.5.4 Olivin nano-silika

Olivin nano-silika, magnezyum-demir silikat yapısına sahip olan olivin mineralinin, genellikle sülfirik asit kullanıldığı asidik ortamda düşük sıcaklıklarda çözündürülmesiyle elde edilen bir malzemedir (Gao et al., 2017). Olivin, asitle reaksiyona girdiğinde magnezyum/demir tuzlarıyla birlikte amorf silika oluşturur. Bu reaksiyon Denklem 2.4'te gösterilmektedir (Lazaro et al., 2012).



Bu ekzotermik yani ısı açığa çıkaran işlem, reaksiyon sıcaklığını korumak için gerekli olan enerjiyi kendi kendine sağlayan verimli bir enerji kaynağıdır. Ayrıca düşük enerji gerektiren ve olivinin fazla ve ucuz olması sebebiyle maliyet açısından yararlı bir üründür. Yüksek saflıkta, kristal olmayan ve gözenekli yapıya sahip olivin nano-silika birincil tanecik boyutları 10 ile 25 nm arasında değişen, küçük taneciklerinin bir araya gelerek kümeler

oluşturduğu bir malzemedir. Olivin nano-silika, sodyum hidroksit içinde neredeyse tamamen çözünür ve suyla da karıştırılarak sodyum silikat çözeltilerine benzer kimyasal bileşime sahip aktivatör hazırlanmasına olanak sağlar. Bu malzemeden üretilen geopolimer betonlarda, sodyum silikatla üretilen betona benzer basınç dayanımı (28. günde 72,9 – 82,1 MPa aralığında) göstermişlerdir (Gao et al., 2017; Lazaro et al., 2012). Üretiminde açığa CO₂ çıkan sodyum silikatlar yerine nano-silika kullanımı doğaya salınan karbon emisyonunu %20,40 ile %29 oranında azaltmaktadır (Adesanya et al., 2021).

2.5.5 Bayer likörü

Bayer likörü, alüminyum üretimine uygulanan Bayer prosesi sırasında açığa çıkan yüksek alkali özelliğe sahip ve içinde sodyum alüminat olan proses bir sıvıdır. Bu çözelti, boksit cevherinin kostik soda ortamında işlenmesiyle oluşur ve alüminanın çözdürülmesi sonrasında kalan alkali fazı temsil eder. Bayer prosesi sırasında boksit, sodyum hidroksit içeren alkali ortamda basınç ve yüksek sıcaklık altında alümina çözünür. Çözünmeyen katı atıklar kırmızı çamur olarak ayrılırken, alümina açısından zengin sodyum alüminat içeren bulamaç kalır. Likör, proses içinde sürekli geri dönüştürülerek kullanılır fakat safsızlık birikmesi veya kimyasal etkinliğin gücünü kaybetmesi durumunda sistemden uzaklaştırılarak atık statüsüne geçer. Bu atık yıllık endüstriyel ölçüde oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Adesanya et al., 2021; El Seidy, 2024).

Bayer likörü, güçlü bir alkali yapıya sahip, sodyum alüminat açısından zengin bir malzemedir. Fabrikada işlenmiş likör, ağırlıkça yaklaşık olarak %24 sodyum oksit, %15 alümina ve %61 su içerebilir. İçindeki yüksek alkaliniteden dolayı uçucu kül gibi malzemeleri aktive etmek amacıyla kostik sodyum alüminat kaynağı olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda sodyum hidroksit yerine %100 bayer likörü kullanılması, üretilen uçucu kül esaslı geopolimerlerin basınç dayanımını 43 MPa'a kadar çıkarmıştır. Bu malzemenin geopolimer üretiminde kullanılması, geopolimer endüstrisinde en yüksek maliyete sahip olan kostik girdisini ortadan kaldırarak maliyet açısından pozitif etki yaratır (van Riessen et al., 2013).

2.5.6 Kırmızı çamur

Kırmızı çamur, alüminyum üretim (Bayer prosesi) sırasında açığa çıkan, yüksek alkaliniteye sahip ve depolama sorununa sebep veren endüstriyel bir yan atıktır (Adesanya et al., 2021). Yüksek alkalinitesi (pH değeri genellikle 10-13 arasında değişir) ve ince taneli yapısı

sebebiyle bertaraf edilmesi zor, maliyeti yüksektir (Yılmazoğlu, 2025). Kırmızı çamur, rengini içinde yüksek oranda bulunan demir oksitten alır. Bu malzeme alümina, ipek, kalsiyum, titanyum ve sodyum oksitleri bakımından zengindir (Amran et al., 2020; Yılmazoğlu, 2025). İçindeki sodyum içeriği, boksitin işlemi sırasında kullanılan sodyum hidroksitten kaynaklanmaktadır. Kırmızı çamurun içindeki alüminosilikat içeriği tek başına geopolimer üretmek için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı veya metakaolin gibi alüminosilikat açısından zengin malzemelerle karıştırarak kullanılması uygundur (Ke et al., 2015). Kırmızı çamurla üretilen geopolimer betona, ağırlıkça %20-30 silis dumanı takviyesi polimerizasyonu iyileştirerek daha yoğun bir matris oluşmasını sağlar. Isıl işlem gören ve silis dumanı takviyesi yapılan bu betonların basınç dayanımları 31,5 MPa'a kadar ulaşmıştır (Ye et al., 2016). Ayrıca kırmızı çamurun geopolimer betona %50 ile %20 oranlarında eklenmesi priz süresini ve basınç dayanımını iyileştirmiş fakat %30 oranlarına çıktığında performansı olumsuz etkileyebileceği bildirilmiştir (Amran et al., 2020). Uygun oranlarda üretilen kırmızı katkı bulunan geopolimer betonlar, su emme oranı %1,28 civarlarında çok düşük çıkmıştır ve yüksek su geçirimsizliğe sahiptirler (Dimas et al., 2009).

2.5.7 Alüminyum yüzey temizleme solüsyonu

Alüminyum endüstrisinde eloksal işlemi öncesinde alüminyum yüzeylerin koruyucu kaplamaya hazırlanması veya kalıp aletlerinin temizlenmesi sırasında açığa çıkan pH değeri genellikle 12 ile 15,5 arasında değişen çok kuvvetli bir yan üründür. Bu işlem sırasında alüminyum metali, kostik soda çözeltisi içinde çözünerek doygun hale gelir ve kimyasal aktivitesi düşerek yan atık olur. Bu çözeltiler tehlikeli atık olarak geçer ve bertaraf edilmesi yüksek maliyetler doğurmaktadır Alüminyum yüzey temizleme solüsyonu, sodyum alüminat açısından zengin ve serbest halde bulunan sodyum hidroksit içeren bir yapıya sahiptir (Adesanya et al., 2021). Yüksek alkalitesi ve içindeki çözünmüş alüminat sayesinde, uçucu kül, cam tozu gibi malzemeleri aktive etmek için kullanılır (Cristelo et al., 2019). Bu çözeltilerin kullanıldığı geopolimerler, atık içindeki ağır metallerin hapsedilmesi konusunda yüksek potansiyel göstererek çevresel sızma testlerinde (bir tanesi hariç) limitlerin altında kalarak güvenli bulunmuştur (Ogundiran et al., 2016). Yapılan çalışmalarda bu atıkla aktive edilen uçucu kül esaslı geopolimer betonların ortam sıcaklığında kürlendiğinde 28. gündeki basınç dayanımı 51 ile 84 MPa arasında basınç dayanımına ulaşmıştır (Adesanya et al., 2021).

2.5.8 Solvay prosesinde açığa çıkan damıtma atığı

Bu atık, sodyum karbonat üretimi için kullanılan Solvay yönteminden açığa çıkan bir yan üründür (Adesanya et al., 2021; Şener, 2008). Sodyum karbonat üretimi sırasında “damıtıcı atığı” denilen su açığa çıkar. Bu su katı kısımlarının çökmesi ve sıvının alınmasıyla elde edilen çamur, “katı soda atığı” olarak adlandırılır (El Seidy, 2024). Atık çamur temel olarak kalsiyum karbonat, kalsiyum hidroksit, magnezyum hidroksit, sodyum klorür ve kalsiyum klörür içermektedir. Malzeme, pH değeri 10 ile 12 arasında değişen bir karaktere sahiptir. Bu atığın aktivatör olarak kullanıldığı sistemlerde, içindeki alkaliler cürufun çözünmesini sağlayarak jel oluşumunu destekler. Solvay prosesi atıklarının geopolimerde kullanılması, büyük miktarda endüstriyel atığın bertaraf sorununu giderirken ticari aktivatörlere ihtiyacı azaltarak çevre bilinci yüksek bir beton üretimine katkıda bulunur (Adesanya et al., 2021).

2.5.9 Kağıt çamuru

Kağıt çamuru, geri dönüştürme işlemi sırasında kağıdı mürekkepten arıtma işlemi ardından açığa çıkan atık bir malzemedir. Geri dönüştürülen atıkların yaklaşık olarak %70’lik kısmını bu çamur oluşturmaktadır. 1 ton geri dönüştürülmüş kağıt üretimi başına yaklaşık olarak 300 kg çamur ortaya çıkmaktadır. Açığa çıkan bu atık ürünün yüksek oranda (bazı analizler sonucunda %38,5 ile %95,1 arasında değişen oranlarda) kalsiyum oksit içerdiği bilinmektedir. Bu malzeme sodyum hidroksitle ön işleme tabi tutulur ve katı bir aktivatöre dönüşür. İşlem sırasında çamurda bulunan kalsiyum karbonat, NaOH ile tepkimeye girer ve sodyum karbonat gibi bileşikler oluşturur. Ön işlem görüp öğütülmüş çamur, yüksek fırın cürufuyla karıştırılarak ve sadece suyun eklenmesiyle sertleşen bir bağlayıcı elde edilebilir. Elde edilen bu malzeme hem aktivatör hem de dolgu malzemesi görevi görür. Yapılan bazı çalışmalarda cüruf esaslı geopolimer betona ağırlıkça %18 kadar kağıt çamuru eklendiğinde basınç dayanımının 28 günlük kür sonunda 42 MPa, 50 günlük kür sonunda ise 48 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Ancak eklenen çamur miktarı arttıkça priz süresinde artmalar görülmüştür. Betonda kağıt çamuru kullanımı hem büyük miktarda endüstriyel atığın bertarafını hem de çevresel etkisi yüksek olan sodyum silikat kullanımını ortadan kaldırarak daha düşük karbon ayak izine sahip beton üretmeye fayda sağlar (Adesanya et al., 2021; Adesanya et al., 2018).

2.5.10 Sodyum silikat üretiminden kaynaklanan çamur

Bu çamur, sodyum silikat üretimi sırasında ortaya çıkan endüstriyel bir yan atıktır. İçeriğinde yüksek oranlarda bulunan alkaliler ve silikatlar nedeniyle tehlikeli atık olarak sınıflandırılıp

bertaraf edilmesi oldukça zordur ancak bu içerikleri sayesinde alkali aktivasyon potansiyeli yüksek olan bir malzemedir. Ağırlıkça yaklaşık %4,1 sodyum oksit, %7,3 silika ve %16,5 su içermektedir. İçeriğinin büyük bir kısmını sodyum silikat üretiminde kullanılan ancak reaksiyona katılmamış silis kumu oluşturmaktadır. İçerdiği çözünmüş alkali ve silikatların, cürufu aktive eden bir alkali aktivatör görevi yaparken, içindeki reaksiyona girmemiş kum sayesinde doğal ince agrega yerini alabilen dolgu malzemesi olarak çalışabilmektedir. Fakat içeriğinde bulunan parçacıkların ince ve gözenekli bir yapıda olması su talebini arttırarak işlenebilirliği düşürür. İstenilen işlenebilirliğe ulaşmak için su miktarının arttırılmasına ve su/cüruf oranının (örneğin 0,73 – 0,98) yüksek olmasına sebep vermektedir. Ayrıca yüksek su oranı ve kuruma sürecine sahip olduğu için numunelerde çatlak oluşumuna ve dolayısıyla mekanik özelliklerine olumsuz etkide bulunmaktadır (Adesanya et al., 2021; Kucharczyková et al., 2019).

2.5.11 Pirinç kabuğu külü

Pirinç kabuğu, pirinç taneciklerini çevreleyen dış katmanı oluşturur ve pirinç üretiminde %20-25'lik kısmı oluşturur. Bu kabuklar enerji üretmek amacıyla yakılarak pirinç kabuğu külünü oluşturmaktadır (Yeşiloğlu, 2023). Bu malzeme “karbon-nötr yeşil ürün” olarak tanımlanan çevre dostu bir üründür. Bitkisel kaynaklı olan bu ürün içindeki silika açısından dünyadaki en zengin kaynaktır. İçeriğinde yaklaşık olarak %90-95 kadar silika vardır (Balo et al., 2018; Amran et al., 2020). Mineralojik yapısı yakma sıcaklığına göre değişkenlik göstermektedir. Optimum sıcaklık olan 600°C’lerde yüksek puzolanik aktiviteye sahip amorf silika elde edilirken, bu sıcaklık 500°C’lerin altına indiğinde karbon kalıntısı artarak reaktiviteyi düşürür (Balo et al., 2018). Yapılan bir çalışmada uçucu külle birlikte ağırlıkça %50 oranında pirinç kabuğu külü karıştırılması, 90. güne kadar ilerleyen dayanım artışları sağlamıştır (Yeşiloğlu, 2023). Bu durum geopolimerizasyon sürecinin uzun süre boyunca ilerleyebildiğini bizlere göstermektedir. Yüksek amorf silika içeren bu malzeme sodyum hidroksit içinde çözünme sağlayarak sodyum silikat üretiminde kullanılmaya müsait bir üründür. Bu durum sodyum silikatın kullanımını azaltarak karbon ayak izini ve maliyeti düşürür (Balo et al., 2018; Lahoti et al., 2019). Ayrıca pirinç kabuğu külü içeren geopolimer betonlar yüksek sıcaklıklarda mükemmel performans göstermektedirler (Amran et al., 2020; Badem ve Olgun 2024). Pirinç kabuğu külü, içinde kullanıldığı karışım tasarımlarında ısı yalıtım özelliklerini arttırdığı için termal iletkenliği düşürebilmektedir (Youssif et al., 2025; Jindal et al., 2023).

2.6 Çimento Sektörü ve Karbondioksit Salınımı

Çimento üretiminde gerçekleşen toplam karbondioksit salımlarının büyük kısmı, hammadde olarak kullanılan kalkerin kalsinasyon sırasında kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşmaktadır. Klinker üretilmesi amacıyla döner fırınlarda yaklaşık olarak 1450°C sıcaklığa kadar ısıtılan kireçtaşı, ayrışmaya uğrayarak kalsiyum oksit ve karbondioksit açığa çıkarır. Bu reaksiyondan doğan karbondioksit doğrudan atmosfere salınır. Klinker üretimi için zorunlu olan bu kalsinasyon işlemi, yalnızca enerji verimliliği uygulamaları veya alternatif bir yakıt kullanımı ile tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Çimento üretiminde karbon ayak izini azaltılabilmesi için proses emisyonları hedefleyen stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda en yaygın yaklaşımlardan biri, çimento içerisinde bulunan klinker oranının düşürülmesidir. Klinker tamamen veya kısmi kaldırılarak yerine uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve doğal puzolan maddeler gibi tamamlayıcı malzemelerin kullanılması, hem kalsinasyon ihtiyacını azaltmakta hem de üretimden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını önemli derecede düşürmektedir (El Seidy, 2024; Yılmazoğlu, 2025).

Klinkerleşme reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi adına döner fırınların yaklaşık 1400 – 1500 °C sıcaklıklara ulaşması gerekmekte olup, bu sıcaklığı elde etmek için gerekli olan enerji linyit, petrokok, fuel-oil ve kömür gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Bu kullanılan yakıtların yanması sonucunda oluşan emisyonlar, çimento sektöründeki toplam karbon ayak izinin önemli bir kısmını meydana getirmektedir. (Yazıcı ve Karagöl 2022; John vd., 2021)

Üretim aşamasındaki enerji tüketimine ek olarak, hammaddelerin ve nihai ürünlerin taşınması da sera gazını arttıran unsurlardan biridir. Çimento üretiminde kullanılan kireçtaşı, agrega, kil ve diğer hammaddelerin fabrikalara sevk edilmesi sırasında yüksek miktarda fosil yakıt tüketimi olmaktadır. Özellikle büyük hacimlerde taşınan çimentolar, uzun mesafeli lojistik faaliyetlerde önemli miktarda karbon salınımına sebep olmaktadır. Yakıt kaynaklı emisyonların azaltılması amacıyla son yıllarda alternatif enerji kaynaklarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlamış lastikler, atık yağlar ve geri dönüştürülebilir endüstriyel atıklar birçok çimento tesisinde fosil yakıtları tamamen veya kısmi şekilde ortadan kaldırarak kullanılabilir. Bu şekilde hem atıklar değerlendirilebilir hem de geleneksel fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılarak karbon emisyonları düşürülmesine katkı sunulmaktadır (Bozkurt ve Sayın, 2021; Peduzzi, 2014; Guo et al., 2024).

İklim değışikliği ile mücadele kapsamında yürürlüğe giren Paris Anlaşması, küresel çapta sıcaklık artışını sanayi öncesindeki döneme kıyasla 2°C'nin altında tutmayı hatta mümkün olduğunca 1,5°C ile sınırlandırmayı hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşabilmek adına yüksek miktarda sera gazı salınımı gerçekleştiren sektörlerin üretim süreçlerinde köklü değışikliğe gitmesi gerekmektedir. Sera gazı salınımı yüksek olan çimento üretimi bu dönüşümden doğrudan etkilenen sektörlerin başında gelmektedir. Mevcut üretim yöntemlerinin devam etmesi halinde çimento sektöründeki karbon emisyonlarının yüksek kalacağı öngörüldüğünden, uluslararası kuruluşlar ve çevre politikaları sektörü düşük karbonlu üretime teşvik etmektedir (Guo et al., 2024).

Türkiye, çimento ve demir-çelik gibi ağır sanayi bakımından Avrupa'nın önde gelen ülkelerinden biri olup aynı zamanda dünya çapında önemli ihracatçılar arasında yer almaktadır. Geniş üretim altyapısı ve yüksek üretim hacim sayesinde bu sektör ülke ekonomisine önemli katkı sağlamaktadır. Fakat yüksek üretim miktarına sahip bu çimento, enerji tüketimi ve karbon emisyonları açısından önemli boyutta olumsuz etki oluşturmaktadır. Türkiye'de devam eden kentleşme, nüfus artışı ve kentsel dönüşüm projelerinde ve büyük ölçekli altyapı yatırımları uzun vadede çimentoya olan ihtiyacın artacağını göstermektedir. Bu durum, sektörün çevreye verdiği zararın azaltılmasına yönelik çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır. Bu kapsamda birçok çimento fabrikası atık ısı geri kazanım sistemini kullanmaya geçmiştir. Döner fırınlardan çıkan yüksek sıcaklıkta olan gazlar elektrik enerjisi üretiminde kullanılmakta ve bu sayede enerji verimliliği arttırılmaktadır. Sektörde sürdürülebilirlik açısından öne çıkan bir diğer yaklaşım ise endüstriyel yan ürünlerin bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmesidir. Uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, metakaolin ve silis dumanı gibi malzemeler, çimento ve beton üretiminde ikame malzeme olarak kullanılabilir. Bu sayede hem endüstriyel atıkların değerlendirilerek çevreye verdiği olumsuz etki azaltılmakta hem de klinker kullanım oranı düşürülerek karbon emisyonlarında azalma sağlanmaktadır. Özellikle geopolimer teknolojisi, Türkiye'nin hem atık yönetimini hem de düşük karbonlu yapı malzemesi geliştirme hedefleri açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Geopolimer teknolojisiyle üretilen betonlar, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olup sürdürülebilir yapı üretimi için güçlü bir alternatif olmaktadır (Bozkurt ve Sayın, 2021; Gültekin vd., 2022; Özcan ve Güngör, 2019; Yılmazoğlu, 2025). Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te çimentolu ultra yüksek performanslı betonun ve çimentosuz ultra yüksek performanslı betonun karbon salınım değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3: BAUN Prof. Dr. Şerif Saylan Yapı Mekaniği Laboratuvar’ında üretilen tipik UHPC karışı ve karbon salınımı değerleri

Bileşen	Miktar (kg/m ³)	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ /kg)	Toplam Salınım (kg CO ₂ /m ³)	Kaynak
Çimento	720	0,912	656,64	(Sobuz et al., 2024)
Silis Dumanı	240	0,024	5,76	(Sobuz et al., 2024)
Yüksek Fırın Cürufu	720	0,019	13,68	(Singh et al., 2015)
Su	204	0,000196	0,039984	(Sobuz et al., 2024)
Akışkanlaştırıcı	24	0,72	17,28	(Singh et al., 2015)
Agrega (Kuvartz)	855	0,006	5,13	(Singh et al., 2015)
Toplam			698,529984	

Tablo 2.4: M1-10 kodlu geopolimer beton karışımı ve karbon salınım değerleri

Bileşen	Miktar (kg/m ³)	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ /kg)	Toplam Salınım (kg CO ₂ /m ³)	Kaynak
Uçucu Kül	540	0,027	14,58	(Sobuz et al., 2024)
Silis Dumanı	120	0,024	2,88	(Sobuz et al., 2024)
Yüksek Fırın Cürufu	540	0,019	10,26	(Singh et al., 2015)
Sodyum Silikat	257	0,75	192,75	(Adnan & Anas, 2025)
Sodyum Hidroksit	103	1,2	123,60	(Adnan & Anas, 2025)
Akışkanlaştırıcı	12	0,72	8,64	(Sobuz et al., 2024)
Agrega (Kuvartz)	572	0,006	3,432	(Singh et al., 2015)
Su	66	0,000196	0,012936	(Sobuz et al., 2024)
Toplam			356,154936	

Tablo 2.3 ve 2.4 Portland çimentosunun tamamen ortadan kaldırılarak üretildiği M1-10 kodlu geopolimer beton karışımında metreküp başına yaklaşık 342,38 kg/CO₂ tasarrufu sağlayarak karbon ayak izini %49,01 oranında azaltmaktadır. Türkiye’de 2025 yılında 140

milyon metreküp hazır beton üretimi dikkate alındığında, bu dönüşüm ulusal ölçekte yıllık 47.933.200 ton daha az karbon salınımı anlamına gelmektedir. (THBB, 2026)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Uçucu kül

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Kullanılan uçucu külün resmi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Uçucu kül

Bu çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşenleri aşağıdaki tabloda bulunmaktadır.

Tablo 3.1: Uçucu külün kimyasal bileşenleri (TUNÇBİLEK, 2025)

(%)	Tunçbilek Değerleri
SiO ₂	54,79
Al ₂ O ₃	18,58
Fe ₂ O ₃	8,90
CaO	2,81
MgO	5,90
K ₂ O	1,65
Na ₂ O	0,21
TiO ₂	0,93
P ₂ O ₅	0,23
MnO	0,15
Cr ₂ O ₃	ND
LOI	2,88

3.1.2 Silis dumanı

Bu çalışmada kullanılan silis dumanı Mask Tradings firmasından temin edilmiştir. Kullanılan silis dumanının resmi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Silis dumanı

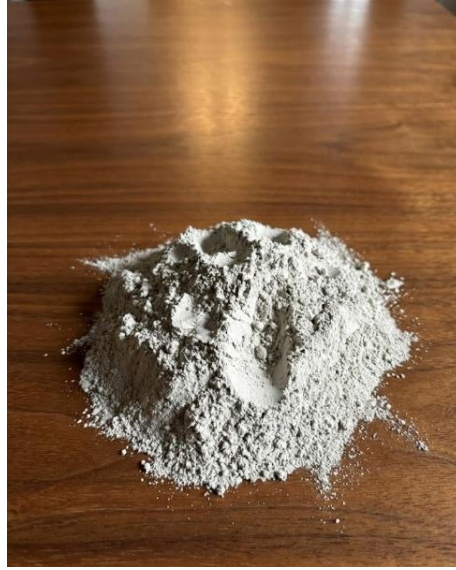
Bu çalışmada kullanılan silis dumanının kimyasal bileşenleri aşağıdaki tabloda bulunmaktadır.

Tablo 3.2: Silis dumanının kimyasal bileşenleri (MASK TRADINGS, 2025)

(%)	Mask Tradings Değerleri
SiO ₂	93,40
Al ₂ O ₃	0,30
Fe ₂ O ₃	0,35
CaO	0,38
MgO	0,85
C	-
S	-
Kızdırma kaybı	4,45

3.1.3 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu Kardemir firmasından temin edilmiştir. Kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu resmi Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kimyasal bileşenleri aşağıdaki tabloda bulunmaktadır.

Tablo 3.3: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşenleri (KARDER, 2025)

(%)	Karder Değerleri
SiO ₂	32,47
Al ₂ O ₃	9,94
Fe ₂ O ₃	1,25
CaO	32,45
MgO	9,31
SO ₃	0,82
S	0,33
Na ₂ O	0,31
K ₂ O	0,85
TiO ₂	1,16
Mn ₂ O ₃	3,51
Cl	0,015

3.1.4 Agregas

Bu çalışmada kullanılan agrega Aydınlar Madencilik firmasından temin edilmiştir. Kullanılan agreganın resmi şekil 3.4'te verilmiştir.



şekil 3.4: Agregas

3.1.5 Aktivatörler

Bu çalışmada kullanılan sodyum silikat Pozitif Kimya – Pozitif Mühendislik firmasından alınmıştır. Bir diğer alkali aktivatör olan sodyum hidroksit Karan Kimya firmasından alınmıştır.

Kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksitin resimleri sırasıyla şekil 3.5 ve şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5: Sodyum silikat



Şekil 3.6: Sodyum hidroksit

3.1.6 Çelik lif

Bu çalışmada kullanılan çelik lif Bekaert firmasından temin edilmiştir. Kullanılan çelik lifin resmi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Çelik lif

Bu çalışmada kullanılan çelik lifin fiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda bulunmaktadır.

Tablo 3.4: Çelik lifin fiziksel özellikleri (BEKAERT, 2025)

Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (boy/en)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
0,16	13	81	7,8	2500	210000

3.1.7 Akışkanlaştırıcı

Bu çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı Chryso firmasından temin edilen Premia 518 kullanılmıştır. Kullanılan akışkanlaştırıcının resmi Şekil 3.8’te verilmiştir.



Şekil 3.8: Akışkanlaştırıcı

3.1.8 Kuvartz unu

Bu çalışmada kullanılan kuvartz unu Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kuvartz ununun resmi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9: Kuvartz unu

3.2 Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, çimento tamamen sistemden çıkarılarak ultra yüksek performanslı geopolimer beton (UYPGB) üretilmiştir. Bağlayıcı sistem; uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanıyla (SD) oluşturulmuştur. Bu üç mineral katkının birlikte kullanılma amacı,

hem yüksek reaktiviteye sahip hem de yoğun mikro yapılı bir bağlayıcı matris üretmektir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Kıvam alması için karışımlara belirli bir oranda akışkanlaştırıcı (AKŞ) eklenmiştir. Tüm karışım tasarımlarında toplam bağlayıcı ve lif oranları sabit tutularak, bağlayıcı bileşen oranlarının ve aktivatör parametrelerinin betonun basınç dayanımı ve yayılması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.2.1 Uçucu kül / yüksek fırın cürufu oranı (UK/YFC)

Bağlayıcı içinde bulunan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu oranı üç seviyede tutulmuştur.

- 0,40 → Numuneler: M1-0.4 – M2.5-0.4 – M4-0.4
- 0,20 → Numuneler: M1-0.2 – M2.5-0.2 – M4-0.2
- 1 → Numuneler: M1-10 – M1-12 – M1-14 – M2.5-10 – M2.5-12 – M2.5-14 – M4-10 – M4-12 – M4-14

Bu değişkenle sistemdeki yüksek fırından gelen kalsiyumlar ve uçucu külden gelen alüminosilikatların reaksiyon mekanizmasına etkisi incelenmiştir.

3.2.2 Sodyum silikat / sodyum hidroksit oranı (SS/SH)

Alkali aktivatörlerin oranı 3 farklı seviyede tutulmuştur.

- SS/SH = 1 → Numuneler: M1-0.4 – M1-0.2 – M1-10 – M1-12 – M1-14
- SS/SH = 2,5 → Numuneler: M2.5-0.4 – M2.5-0.2 – M2.5-10 – M2.5-12 – M2.5-14
- SS/SH = 4 → Numuneler: M4-0.4 – M4-0.2 – M4-10 – M4-12 – M4-14

Bu parametreler değiştirilerek, sistem içindeki çözünmüş halde bulunan silikat miktarının ve bundan dolayı oluşan N-A-S-H / C-A-S-H jel yapılarının türünü kontrol etmek hedeflenmiştir.

3.2.3 Sodyum hidroksit molaritesi (SH)

UK/YFC oranının 0,4 ve 0,2 olduğu altı karışımdaki sodyum hidroksitin konsantrasyonu 12 molar olarak sabit tutulmuş, UK/YFC oranının 1 olduğu diğer karışımlarda alkaliliğin reaksiyon hızına etkisini incelemek amacıyla 3 farklı seviye tercih edilmiştir.

- 10 Molar → Numuneler: M1-10 – M2.5-10 – M4-10

- 12 Molar → Numuneler: M1-12 – M2.5-12 – M4-12 – M1-0.4 – M1-0.2 – M2.5-0.4 – M2.5-0.2 – M4-0.4 – M4-0.2
- 14 Molar → Numuneler: M1-14 – M2.5-14 – M4-14

3.3 Karışım Oranları

Ön deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda, toplam on beş farklı geopolimer harç karışımı üretilmiştir. Geopolimer kalitesinin temel performans göstergesi olarak "basınç dayanımı" seçilmiştir. Basınç dayanımı, geopolimer dış kuvvetlere karşı direnç gösterme kabiliyetini temsil etmektedir. Düşük basınç dayanımı değerleri, karışım oranlarının hatalı tasarlandığını veya kullanılan kaynak malzemelerin uygun olmadığını göstermektedir. Aksine, yüksek basınç dayanımı, geopolimer karışımının doğru tasarlandığını ve zorlu koşullar altında yapısal bütünlüğünü koruyacağını kanıtlamaktadır. Geopolimer harçların karışım kompozisyonları Tablo 3.5'de detaylandırılmıştır. Karışımlarda alkali ile aktive edilmiş malzemeler 1200 g şeklinde değiştirilmeden bırakılmıştır.

Tablo 3.5: Deneyde kullanılan karışım matrisi

Krş. No	UK/ YFC	SD/AAM	AA/AAM	SS/SH	SH (Mol.)	Su/AAM (%)	Akş./AAM (%)	Lif (%)
M1-0.4	0,4	0,1	0,4	1	12	5,5	1	2
M1-0.2	0,2	0,1	0,4	1	12	5,5	1	2
M2.5-0.4	0,4	0,1	0,4	2,5	12	5,5	1	2
M2.5-0.2	0,2	0,1	0,4	2,5	12	5,5	1	2
M4-0.4	0,4	0,1	0,4	4	12	5,5	1	2
M4-0.2	0,2	0,1	0,4	4	12	5,5	1	2
M1-10	1	0,1	0,4	1	10	5,5	1	2
M1-12	1	0,1	0,4	1	12	5,5	1	2
M1-14	1	0,1	0,4	1	14	5,5	1	2
M2.5-10	1	0,1	0,4	2,5	10	5,5	1	2
M2.5-12	1	0,1	0,4	2,5	12	5,5	1	2
M2.5-14	1	0,1	0,4	2,5	14	5,5	1	2
M4-10	1	0,1	0,4	4	10	5,5	1	2
M4-12	1	0,1	0,4	4	12	5,5	1	2
M4-14	1	0,1	0,4	4	14	5,5	1	2

3.4 Karıştırma, Yerleştirme ve Kür

Karışımı oluşturan tüm bileşenler, 0,01 kg hassasiyete sahip elektronik bir terazi ile tartılmıştır. Katı bileşenler sırasıyla; granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı miktarının %50'si, agrega ve kuvarz unu ilave edilmiştir. Kuru bileşenler 2-3 dakika

boyunca homojen bir dağılım elde etmek amacıyla karıştırılmıştır. Silis dumanının bu safhada kısmi olarak eklenmesiyle malzemenin hem topaklanması önlenmiş hem de ilk jel köprü oluşumu geciktirilerek işlenebilirliğin korunması hedeflenmiştir. Kuru karışımın tamamlanmasının ardından, tam soğumuş olan sodyum hidroksit çözeltisi karışıma eklenmiş ve 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu aşamada sodyum silikat çözeltisi sisteme dahil edilmemiştir. Böylece cürufun çözünme süreci başlamış ancak hızlı hızlı jel ağı oluşumu gözlemlenmediği için ani priz riskinin önüne geçilmiştir. Ardından, sistemde sisteme akışkanlaştırıcı ilave edilerek karışım 1 dakika daha sürdürülmüştür. Siteme sodyum silikat ilavesi, bu adımdan sonra yavaş ve kademeli olarak 2-3 porsiyonda eklenmiştir. Sodyum silikatın ardından, sistemde ani viskozite sıçramasını engellemek ve jel köprüsünü geciktirmek için başta ayrılan %50 oranındaki silis dumanı eklenerek 1 dakika daha karıştırma yapılmıştır. Çelik lifler ise son aşamada eklenerek karışım tamamlanmıştır.



Şekil 3.10: Kalan silis dumanının karışıma ilave edilmeden önceki hali



Şekil 3.11: Kalan silis dumanının karışıma ilave edildikten sonraki hali

Karışımdan bir miktar malzeme alınarak yayılma değerleri belirlenmiştir. Eğer yayılma 15 cm'den büyükse taze haldeki geopolimer harcı, 100x100x100 mm boyutlarında çelik ve plastik küp numunelere dökülmüştür.



Şekil 3.12: Hazırlanan UYPGB'nin kürleme öncesi kalıplara dökülmüş hali

Çalışma kapsamında geliştirilen UYPGB numunelerinin sertleşme süreçleri ve mekanik özellik gelişimini inceleme amacıyla üç farklı kürleme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ilk kürlemede çelik kalıplara dökülmüş numuneler, 24 saat ön kürlemeye tutulmuş ardından 60°C sıcaklığa ayarlanmış etüve yerleştirilmiştir. Numuneler bu sıcaklık altında 24 saat boyunca kesintisiz olarak ısıl küre tabi tutulmuştur. İkinci kürleme işleminde çelik kalıplara dökülen numuneler, 24 saat süresince laboratuvar koşullarında ön kürlemeye bırakılmış, ardından yüksek nem ve sıcaklık etkisinin kombinasyonunu gözlemlemek amacıyla 24 saat boyunca buhar kürü ünitesinde kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Üçüncü ve son olan kürleme işleminde plastik kalıplara dökülen numuneler ortam sıcaklığında kürlenmiştir.



Şekil 3.13: Hazırlanan UYPGB'nin kalıplara dökümü



Şekil 3.14: Hazırlanan UYPGB'ların etüv görüntüsü

3.5. Test Yöntemleri

3.5.1 Yayılma deneyi

Taze haldeki geopolimer harcın işlenebilirliği yayılma deneyi ile ölçülmüştür. Bu test, ASTM C 230 (2003) ve ASTM C 1437 (2001) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde, tabla temizlenmiş ve yüzeyi hafifçe yağlanmıştır. Testin uygulanması aşamasında, harcın yayılma çapı hassas bir şekilde ölçülmüştür.



Şekil 3.15: Hazırlanan UYPGB'nin yayılma hunisine dökümü



Şekil 3.16: Hazırlanan UYPGB'nin yayılma ölçümü

3.5.2 Basınç deneyi

Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen basınç dayanımı testleri, 100 x 100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Testler, ASTM 1012.9 (1999) standardına uygun olarak 1 MPa/sn sabit yükleme hızında icra edilmiştir. Şekil 3.17'de beton

pres cihazında basınç dayanımı ölçülen UYPGB, Şekil 3.18’de ise basınç dayanımı ölçülmüş UYPGB’nin fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 3.17: Basınç dayanımı ölçülen UYPGB



Şekil 3.18: Basınç dayanımı ölçülmüş UYPGB

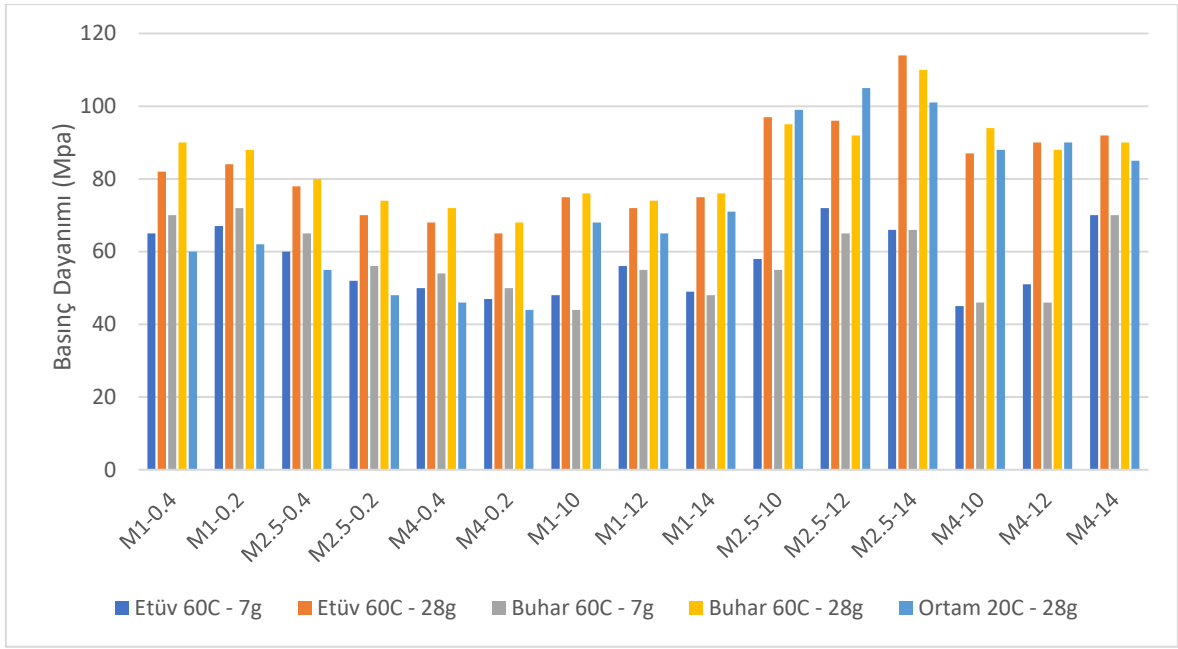
3.6 Deneysel Sonuçlar

Tablo 3.6: Basınç dayanımı ve yayılma sonuçları

Karışım No	Kür Tipi	Kür Sıcaklığı	Yayılma Miktarı (cm)	Basınç Dayanımı (Mpa)	Test Zamanı (Gün)
M1-0.4	Etüv	60	22	65	7
	Etüv	60		82	28
	Buhar	60		70	7
	Buhar	60		90	28
	Ortam	20		60	28
M1-0.2	Etüv	60	22	67	7
	Etüv	60		84	28
	Buhar	60		72	7
	Buhar	60		88	28
	Ortam	20		62	28
M2.5-0.4	Etüv	60	20	60	7
	Etüv	60		78	28
	Buhar	60		65	7
	Buhar	60		80	28
	Ortam	20		55	28
M2.5-0.2	Etüv	60	17	52	7
	Etüv	60		70	28
	Buhar	60		56	7
	Buhar	60		74	28
	Ortam	20		48	28
M4-0.4	Etüv	60	17	50	7
	Etüv	60		68	28
	Buhar	60		54	7
	Buhar	60		72	28
	Ortam	20		46	28
M4-0.2	Etüv	60	16	47	7
	Etüv	60		65	28
	Buhar	60		50	7
	Buhar	60		68	28
	Ortam	20		44	28
M1-10	Etüv	60	21	48	7
	Etüv	60		75	28
	Buhar	60		44	7
	Buhar	60		76	28
	Ortam	20		68	28
M1-12	Etüv	60	21	56	7
	Etüv	60		72	28
	Buhar	60		55	7
	Buhar	60		74	28
	Ortam	20		65	28

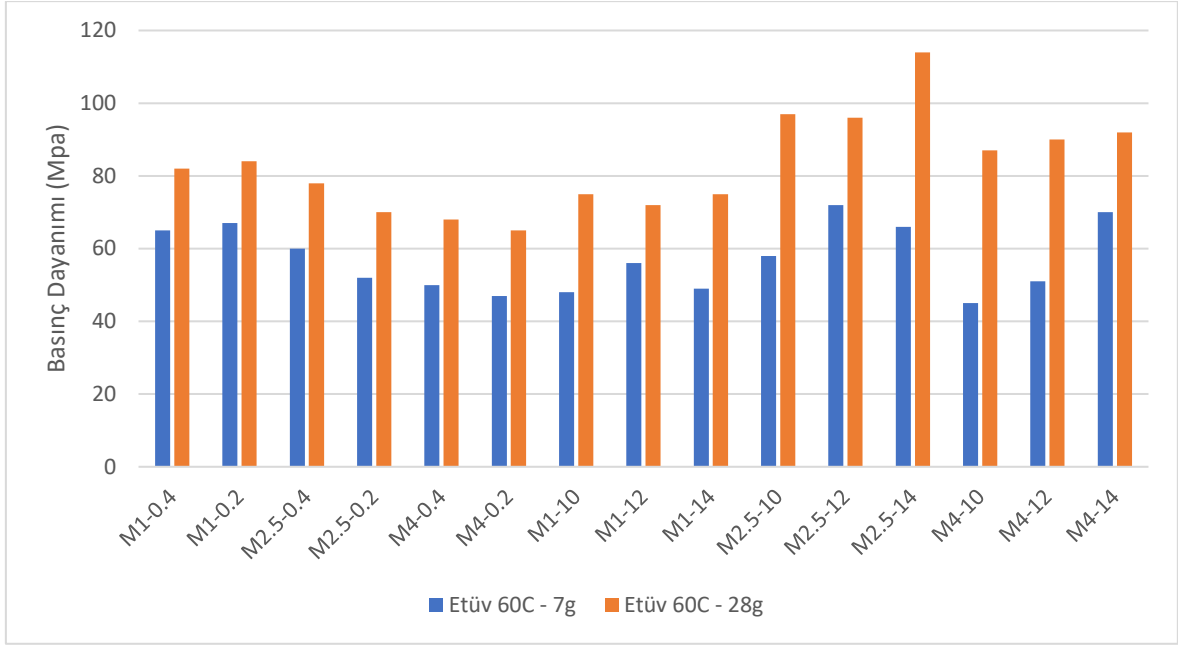
Tablo 3.6 (devam)

M1-14	Etüv	60	19	49	7
	Etüv	60		75	28
	Buhar	60		48	7
	Buhar	60		76	28
	Ortam	20		71	28
M2.5-10	Etüv	60	17	58	7
	Etüv	60		97	28
	Buhar	60		55	7
	Buhar	60		95	28
	Ortam	20		99	28
M2.5-12	Etüv	60	16	72	7
	Etüv	60		96	28
	Buhar	60		65	7
	Buhar	60		92	28
	Ortam	20		105	28
M2.5-14	Etüv	60	16	66	7
	Etüv	60		114	28
	Buhar	60		66	7
	Buhar	60		110	28
	Ortam	20		101	28
M4-10	Etüv	60	22	45	7
	Etüv	60		87	28
	Buhar	60		46	7
	Buhar	60		94	28
	Ortam	20		88	28
M4-12	Etüv	60	21	51	7
	Etüv	60		90	28
	Buhar	60		46	7
	Buhar	60		88	28
	Ortam	20		90	28
M4-14	Etüv	60	22	70	7
	Etüv	60		92	28
	Buhar	60		70	7
	Buhar	60		90	28
	Ortam	20		85	28



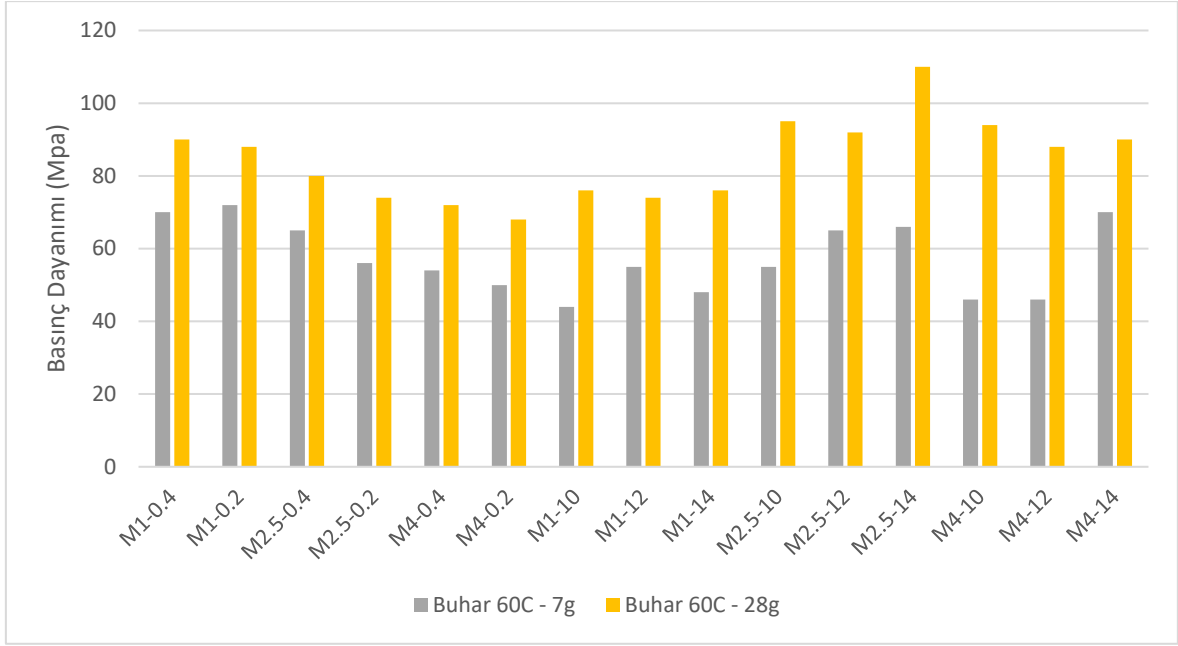
Şekil 3.19: Farklı kür koşullarında karışımların basınç dayanımı sonuçları

Tüm kür koşulları ve test yaşlarının bir arada olduğu genel basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, karışım tasarımında kullanılan değişken parametrelerin ultra yüksek performanslı geopolimer betonun basınç dayanımında doğrudan ve belirgin bir rol oynadığı görülmektedir. Tüm karışım tasarımlarında, test yaşının 7 günden 28 güne çıkarılmasıyla kararlı bir mukavemet artışı görülmüştür. Dayanımlardaki bu değişimlerin temel nedenlerinden biri, karışım tasarımındaki alkali aktivatörün yapısını belirleyen SS/SH oranı ve sodyum hidroksit molaritesi ile çözünür silis dengesidir. Genel eğilim doğrultusunda, en yüksek basınç dayanımına, SS/SH oranının 2.5 olduğu M2.5 serisinde ulaşılmıştır. Bu durum, sistem içinde çözünen alüminyum ve silis iyonlarının polimerizasyon jeli (C-A-S-H / N-A-S-H) oluşturması için en ideal silis/alkali dengesinin bu oranda bulunduğunu göstermektedir. SS/SH oranı 4'e yükseltildiği M4 serisinde ortamda bulunan aşırı silis birikimine ve reaksiyona girmeyen serbest silisin karışıma zayıf halka oluşturup mukavemet düşüşün neden olduğunu ortaya koymaktadır.



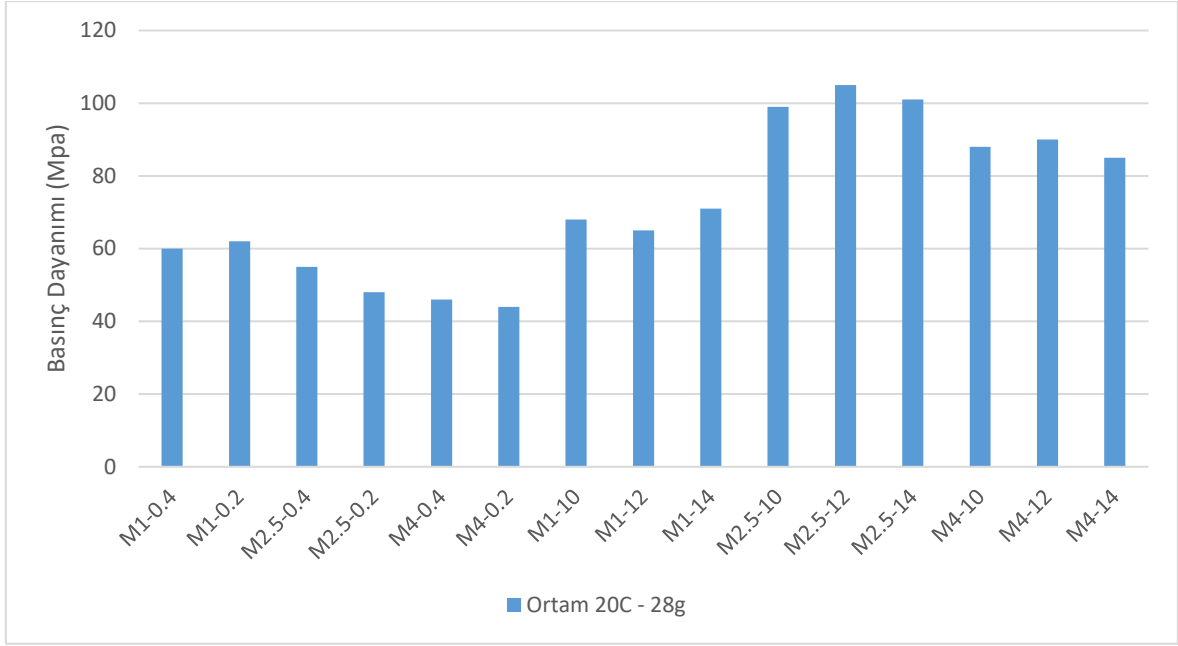
Şekil 3.20: Etüv küründe (60°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları

Grafığe bakıldığında sıcaklığın geopolimerizasyon ve reaksiyon hızı üzerindeki olumlu etkisi net şekilde ortaya çıkmaktadır. 60°'lik etüv kürlemesi koşulu altında en yüksek basınç dayanımı, M2.5-14 karışımında 114 MPa olarak elde edilmiştir. Bu yüksek dayanımın sebebi, 14 molarite gibi yüksek SH konsantrasyonunun hammaddelerdeki silis ve alüminyum çok daha hızlı çözmesi ve yüksek sıcaklıkla birleştiğinde matrisi hızlı bir şekilde yoğunlaştırmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek alkali içeren fakat SS/SH oranı 4'e çıkan ve molaritesi 10'a düşen M4-10 karışımı, 7 günlük yaşta 45 MPa ile en düşük dayanımı göstermektedir. Bu düşüş, düşük molarite nedeniyle alkali aktivasyonun yavaşlaması ve yüksek SS/SH oranından kaynaklı sistemde oluşan aşırı sodyum silikatın etüv ortamında hızla kuruyarak mikro çatlaklara sebep olmasıdır. Düşük UK/YFC oranına sahip karışımlar kendi aralarında değerlendirildiğinde, granüle yüksek fırın cürufunun artmasının cüruftan gelen kalsiyum iyonları sayesinde erken yaş dayanımlarını sınırlı miktarda olumlu etkilediği görülmektedir.



Şekil 3.21: Buhar küründe (60°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları

Nem ve sıcaklığın bir arada incelendiği bu kürlenme koşulu, numunelerde kararlı bir mukavemet artışı sağladığı görülmektedir. Buhar kürü yapısı gereği etüv kürünün aksine, yüksek sodyum silikat içeriğine sahip karışımlarda meydana gelebilecek olası erken yaş kuruma rötresi çatlaklarını nem desteğiyle engelleyerek jel oluşumunu sürekli hale getirmiştir. Bu seride en yüksek basınç dayanımı M2.5-14 olan karışımda 110MPa olarak görülmektedir. 7 günlük basınç dayanımına bakıldığında en yüksek dayanımı, düşük UK/YFC oranına sahip olan M1-0.2 karışımında 72 MPa olarak sergilenmiştir. Bunun nedeni, granüle yüksek fırın cürufunun yapısında bulunan kalsiyumun, buhar kürlenmesi altında hızlı nem ve sıcaklık kombinasyonu ile anında kalsiyum silikat hidrat jeli üreterek erken yaşta iskelet yapıyı kurmasıdır. Buna karşılık SS/SH oranının 4 olduğu M4-10 ve M4-12 serilerinde 7 günlük basınç dayanımının 45-46 MPa seviyelerinde kalması, ortamda bulunan fazla silis dumanı ve sodyum silikatın, granüle yüksek fırın cürufunun hidrasyonunu ve polimerizasyon reaksiyonunun başlangıç aşamasını yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Ancak reaksiyonun ilerlemesiyle birlikte bu numunelerin basınç dayanımlarının 90 MPa değerlerine ulaşması, geç çözünmüş silisin uzun vadede matrise dahil olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.22: Ortam küründe (20°C) karışımların basınç dayanımı sonuçları

Ultra yüksek performanslı geopolimer betonun herhangi bir ısıtma işlem ve nem koşullarına tutulmaksızın ortam sıcaklığında 28 gün boyunca kürlenmesi, oda sıcaklığında alkali aktivasyon mekanizmasının başarısını göstermektedir. Grafik sıcaklık katalizörü olmamasına rağmen karışımlarda yüksek dayanımlara ulaşılabildiğini göstermektedir. Özellikle SS/SH oranının 2.5 olduğu M2.5-12 (105 MPa), M2.5-14 (101 MPa) ve M2.5-10 (99 MPa) karışımları, ısıtma işlem uygulanan birçok serinin 28 günlük basınç dayanımını geçmiştir. Bunun temel nedeni, 12 ve 14 molarite gibi yüksek SH değerinin oda sıcaklığında bile hammaddeleri çözecek yeterli pH seviyesine sahip olması ve 2.5'lik optimum SS/SH oranı sayesinde dışarıdan gelecek ısıya ihtiyaç duymadan oda sıcaklığında en kararlı yapısını kurabilmesidir. Buna karşılık, ısıtma kürün hızlandırıcı etkisi olmadan, en düşük basınç dayanımını M4-0.2 (44 MPa) ve M4-0.4 (46 MPa) numuneleri vermiştir. Bunun nedeni, uçucu külün oda sıcaklığında yavaş çözünmesi ve ortamda reaksiyonu tetikleyecek sıcaklığın olmaması dolayısıyla yüksek silikatin reaksiyona girmeyerek karışım içinde serbest ve zayıf bir faz olarak kalmasıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada on beş farklı ultra yüksek performanslı betonun taze haldeki yayılma özellikleri ile sertleşmiş haldeki 7 ve 28 günlük basınç dayanımı gelişimleri; farklı alkali aktivatör oranları (SS/SH), farklı sodyum hidroksit molariteleri, farklı UK/YFC oranları ve etüv (60 °C), buhar (60 °C), ortam (20 °C) kür koşulları altındaki özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, karışım bileşimi, yayılma miktarı ve kür koşullarının basınç dayanımı üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilmiş taze haldeki betonlarda yayılma değerleri (16-22 cm) ile sertleşmiş beton basınç dayanımları (44-114 MPa) beraber değerlendirildiğinde, karışımdaki alkali-silis dengesinin ve kimyasal konsantrasyonun malzemenin hem işlenebilirliği üstünde hem de mekanik yapısı üzerinde birbiriyle rekabet eden etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Yüksek sodyum silikat oranı ve düşük granüle yüksek fırın cürufu miktarı, taze beton harcının viskozitesini düşürerek yayılma performansına olumlu etki sağlasa da sertleşmiş halde reaksiyona girmeyen serbest silis fazı bırakarak nihai dayanımın düşmesine sebep olmuştur. Buna karşılık, molaritenin artması hammaddelerin içindeki çözünme enerjisini arttırmış ve 60° etüv kürü altında yüksek mukavemetlerin elde edilmesini sağlamıştır. Çalışmanın dikkat çekici yerlerinden biri, herhangi bir sıcaklık veya nem uygulaması olmaksızın 20° oda sıcaklığında kürlenene belirlenen M2.5-12 ve M2.5-14 gibi numunelerin 100 MPa sınırını aşmasıdır. Bu durum, doğru bir karışım tasarımıyla enerji tasarruflu ve çevre bilinci yüksek ultra yüksek performanslı betonun üretiminin mümkün olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda ulaşılan sonuçlar ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Mekanik dayanım açısından en ideal sodyum silikat / sodyum hidroksit oranı M2.5 serileri olarak belirlenmiştir. Bu 2.5 oranında çözünen alüminosilikat iyonları en kararlı ve en yoğun bağ jeli yapısını kurmuştur.
- Sodyum hidroksit konsantrasyonunun 14 molariteye yükseltilmesi reaksiyon hızını arttırmış ve 60° etüv küründeki M2.5-14 isimli karışımda 114 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermiştir.
- İşlenebilirlik performansı, M1-0.4 ve M4-10 karışımlarında 22 cm yayılma ile elde edilmiştir. Karışım tasarımlarında UK/YFC oranının artması yani yüksek fırın cürufunun artması erken jel oluşumunu tetiklemiş ve yayılma miktarını sınırlamıştır.

- 60°'lik buhar küründe kürlenene betonlar, kürün sağladığı nem sayesinde yüksek sodyum silikat içeren serilerde erken yaş kuruma rötresi çatlaklarını engelleyerek etüv kürüne göre daha homojen ve kararlı bir mukavemet artışı sağlamıştır.
- Geopolimer betonda çimento kullanılmamış fakat aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat, yüksek emisyon faktörü nedeniyle tek başına yüksek karbondioksit salınımına yol açarak bu karışımın en büyük karbon kaynağı olmuştur.
- Türkiyede 2025 yılında 140 milyon m³ hazır beton üretildiği dikkate alındığına Tablo 2.3 ve Tablo 2.4 yapılan hesaplamalara göre geopolimer betona geçiş, ulusal ölçekte betonda 47.933.200 ton daha az karbon salınımı yapılacağı anlamına gelmektedir. Bu az salınım, 10,4 milyon binek aracın trafikten tamamen çekilmesine, salınımı absorbe etmek için 2,17 milyar yetişkin ağaçtan oluşan bir orman varlığına veya 10 milyon konutun bir yıllık elektrik tüketiminden kaynaklanan karbon ayak izinin sıfırlanmasına eşdeğerdir.
- Gelecek çalışmalarda, karışımındaki SS/SH oranı ve molarite değişimlerinin betondaki jelin gözenek yapısını atomik boyutta nasıl etkilediğini görebilmek adına, SEM-EDS, XRD ve FTIR gibi gelişmiş mikroyapı analizlerinin yapılması büyük önem arz etmektedir.
- Oda sıcaklığında bile yüksek dayanım veren bu betonun asit etkisi, sülfat atağı, klor geçirimsizliği gibi uzun vadeli performanslarını zamana bağlı otojen ve kuruma büzölmeleri ölçölmelidir.
- Betonun sünekliliği ve eğilme performansını daha yüksek seviyelere çıkarma amacıyla farklı lif türlerinin hibrit şekilde kullanımı araştırılmalıdır.
- Betonda kullanılan sodyum bazlı aktivatörler yerine alternatif olarak daha ekonomik ve çevre dostu aktivatörlerin karışım üzerindeki etkileri test edilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Abdellatief, M., Abd Elrahman, M., Abadel, A. A., Wasim, M., & Tahwia, A. (2023a).** Ultra-high performance concrete versus ultra-high performance geopolymer concrete: mechanical performance, microstructure, and ecological assessment. *Journal of Building Engineering*, 79, 107835.
- Abdellatief, M., Mortagi, M., Abd Elrahman, M., Tahwia, A. M., Alluqmani, A. E., & Alanazi, H. (2023b).** Characterization and optimization of fresh and hardened properties of ultra-high performance geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02549.
- Adesanya, E., Ohenoja, K., Luukkonen, T., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018).** One-part geopolymer cement from slag and pretreated paper sludge. *Journal of Cleaner Production*, 185, 168-175.
- Adesanya, E., Perumal, P., Luukkonen, T., Yliniemi, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2021).** Opportunities to improve sustainability of alkali-activated materials: A review of side-stream based activators. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125558.
- Adnan, & Anas, M. (2025).** Geopolymer concrete as a sustainable alternative to OPC. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, 16(4), 1223–1245.
- Ahdaya, M., & Imqam, A. (2019).** Investigating geopolymer cement performance in presence of water based drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 934-942.
- Alonso, M. M., Gascó, C., Morales, M. M., Suárez-Navarro, J. A., Zamorano, M., & Puertas, F. (2019).** Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, radiology and leaching behaviour. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103384.
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001).** Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 25-30.
- Alshaeer, H., Amran, M., Rezzoug, A., Murali, G., Makul, N., Al-Yaari, M., ... & Alluqmani, A. E. (2025).** Recent trends in rubberized and non-rubberized ultra-high performance geopolymer concrete for sustainable construction: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 64(1), 20250127.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M.** (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T.** (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, 352, 129029.
- Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O. K. A. N., Bilim, C., İlkentapar, S. E. R. H. A. N., & Luga, E.** (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials*, 96, 673-678.
- Badem, A., & Olgun, H.** (2024). Ticari biyokütle yakma sistemlerinde kül kaynaklı problemler üzerine bir değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, (716), 462-486.
- Bahmani, H., & Mostofinejad, D.** (2023). A review of engineering properties of ultra-high-performance geopolymer concrete. *Developments in the Built Environment*, 14, 100126.
- Balo, A. M., Rahier, H., Mobili, A., Katsiki, A., Fagel, N., Chinje, U. M., & Njopwouo, D.** (2018). Metakaolin-based inorganic polymer synthesis using cotton shell ash as sole alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 191, 1011-1022.
- Beton ve Çimento.** (t.y). “Su Ayak İzi ve Hazır Beton”. <https://betonvecimento.com/beton-2/su-ayak-izi-ve-hazir-beton/> (Erişim Tarihi: 27 Aralık 2025)
- Bozkurt, N., & Sayın, N.** (2021). Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 9(4), 1159-1173.
- Cheah, C. B., Part, W. K., & Ramli, M.** (2015). The hybridizations of coal fly ash and wood ash for the fabrication of low alkalinity geopolymer load bearing block cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 88, 41-55.
- Crc Rota.** (t.y.). “Çimento” <https://www.crcrota.com/tr/cimento/> (Erişim Tarihi: 26 Aralık 2025)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cristelo, N., Fernández-Jiménez, A., Castro, F., Fernandes, L., & Tavares, P. (2019).** Sustainable alkaline activation of fly ash, aluminium anodising sludge and glass powder blends with a recycled alkaline cleaning solution. *Construction and Building Materials*, 204, 609-620.
- da Silva, F. M., Barbosa, L. A. G., Lintz, R. C. C., & Jacintho, A. E. P. (2015).** Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 91, 71-79.
- Davidovits, J. (2002).** 30 Years of successes and failures in geopolymer applications: Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, 28-29 Ekim 2002, Melbourne, Avustralya.
- Dimas, D. D., Giannopoulou, I. P., & Pantias, D. (2009).** Utilization of alumina red mud for synthesis of inorganic polymeric materials. *Mineral processing & Extractive metallurgy review*, 30(3), 211-239.
- Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., ... & Wang, H. (2021).** New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 224, 109220.
- 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(9), 2917-2933.
- El Seidy, E. (2024).** Exploring the viability of various waste materials as aggregates in low-carbon two-part alkali-activated cementitious composites (Doctoral dissertation, Brunel University London).
- Eltantawi, I., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. (2025).** Influence of stainless steel fibres on the mechanical properties of self-compacting ultra-high-performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 463, 140092.
- 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.
- França, S., Sousa, L. N., Silva, M. V. D. M. S., Borges, P. H. R., & Bezerra, A. C. D. S. (2023).** Preliminary reactivity test for precursors of alkali-activated materials. *Buildings*, 13(3), 693.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ganesh, A. C., & Muthukannan, M.** (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543.
- Gao, X., Yu, Q. L., Lazaro, A., & Brouwers, H. J. H.** (2017). Investigation on a green olivine nano-silica source based activator in alkali activated slag-fly ash blends: Reaction kinetics, gel structure and carbon footprint. *Cement and Concrete Research*, 100, 129-139.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H.** (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye*, 19, 419-423.
- Gültekin, A., Hosseini, H., & Ramyar, K.** (2022). Agregat türünün geopolimer betonun yüksek sıcaklık direncine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 913-921.
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P., & Zhu, T.** (2024). A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. *Journal of Environmental Sciences*, 136, 682-697.
- Hakeem, I. Y., Zaid, O., Arbili, M. M., Alyami, M., Alhamami, A., & Alharthai, M.** (2024). A state-of-the-art review of the physical and durability characteristics and microstructure behavior of ultra-high-performance geopolymer concrete. *Heliyon*, 10(2).
- Jindal, B. B., Alomayri, T., Hasan, A., & Kaze, C. R.** (2023). Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25299-25324.
- John, S. K., Nadir, Y., & Girija, K.** (2021). Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review. *Construction and Building Materials*, 280, 122443.
- Karagöl, F.** (2022). Uçucu kül esaslı ve cüruf katkılı geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1592-1606.
- Ke, X., Bernal, S. A., Ye, N., Provis, J. L., & Yang, J.** (2015). One-part geopolymers based on thermally treated red mud/NaOH blends. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(1), 5-11.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Krishnan, L., Karthikeyan, S., Nathiya, S., & Suganya, K.** (2014). Geopolymer concrete an eco-friendly construction material. *Magnesium*, 1(1).
- Kucharczyková, B., Bílek, V., & Šimonová, H.** (2019, November). Shrinkage of the alkali-activated slag mortars containing alternative activator. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 660, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H.** (2019). A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*, 221, 514-526.
- Lao, J. C., Xu, L. Y., Huang, B. T., Zhu, J. X., Khan, M., & Dai, J. G.** (2023). Utilization of sodium carbonate activator in strain-hardening ultra-high-performance geopolymer concrete (SH-UHPGC). *Frontiers in Materials*, 10, 1142237.
- Lazaro, A., Brouwers, H. J. H., Quercia, G., & Geus, J. W.** (2012). The properties of amorphous nano-silica synthesized by the dissolution of olivine. *Chemical Engineering Journal*, 211, 112-121.
- Letelier, V., Tarela, E., Muñoz, P., & Moriconi, G.** (2016). Assessment of the mechanical properties of a concrete made by reusing both: Brewery spent diatomite and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 114, 492-498.
- Marvila, M. T., Azevedo, A. R. G. D., & Vieira, C. M. F.** (2021). Reaction mechanisms of alkali-activated materials. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(3), e14309.
- Meskhi, B., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Mailyan, L. R., Shilov, A. A., ... & Özkılıç, Y. O.** (2023). Analytical review of geopolymer concrete: Retrospective and current issues. *Materials*, 16(10), 3792.
- Midhin, M. A., Wong, L. S., Ahmed, A. N., Jasim, A. M. D., & Paul, S. C.** (2023). Strength and chemical characterization of ultra high-performance geopolymer concrete: a coherent evaluation. *All Open Access*.
- Monteiro, P. J., Miller, S. A., & Horvath, A.** (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16(7), 698-699.
- Murali, G.** (2024). Recent research in mechanical properties of geopolymer-based ultra-high-performance concrete: A review. *Defence Technology*, 32, 67-88.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Newlands, K. C., Foss, M., Matchei, T., Skibsted, J., & Macphee, D. E. (2017). Early stage dissolution characteristics of aluminosilicate glasses with blast furnace slag- and fly-ash-like compositions. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(5), 1941-1955.
- Noorvand, H., Radovic, M., Hassan, M., Sukhishvili, S., Arce, G., AbuFarsakh, R., ... & Zhen, S. (2022). Development of ultra-high performance engineered geopolymer composites (UHP-EGCs).
- Ogundiran, M. B., Nugteren, H. W., & Witkamp, G. J. (2016). Geopolymerisation of fly ashes with waste aluminium anodising etching solutions. *Journal of Environmental Management*, 181, 118-123.
- Özcan, U., & Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir bir yöntem/betonda puzolan kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 176-182.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.
- Panesar, D. K. (2019). Supplementary cementing materials. In developments in the formulation and reinforcement of concrete (pp. 55-85). *Woodhead Publishing*.
- Peduzzi, P. (2014). Sand, rarer than one thinks. Article reproduced from united Nations environment programme (UNEP) global environmental alert service (GEAS). *Environ. Develop. 11*, 208–218.
- Peys, A., Rahier, H., & Pontikes, Y. (2016). Potassium-rich biomass ashes as activators in metakaolin-based inorganic polymers. *Applied Clay Science*, 119, 401-409.
- Ponomar, V., Luukkonen, T., & Yliniemi, J. (2023). Revisiting alkali-activated and sodium silicate-based materials in the early works of Glukhovsky. *Construction and Building Materials*, 398, 132474.
- Qaidi, S. M., Atrushi, D. S., Mohammed, A. S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Emad, W., ... & Najm, H. M. (2022). Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 346, 128495.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rifa, A., Subhani, S. M., Bahurudeen, A., & Santhosh, K. G.** (2023). A systematic comparison of performance of recycled concrete fine aggregates with other alternative fine aggregates: An approach to find a sustainable alternative to river sand. *Journal of Building Engineering*, 78, 107695.
- Saygılı, A., Agha, A. A., & Abed, M. H.** (2025). Development of a sustainable geopolymeric grout via mechanochemical activation with recycled brick powder. *Materials Science-Poland*, 43(1), 18-41.
- 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*, 836, 155577.
- Shi, C., & Zheng, K.** (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, conservation and recycling*, 52(2), 234-247.
- 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.
- Sobuz, M. H. R., Aditto, F. S., Datta, S. D., Kabbo, M. K. I., Jabin, J. A., Hasan, N. M. S., Khan, M. M. H., Rahman, S. M. A., Raazi, M., & Zaman, A. A. U.** (2024). High-strength self-compacting concrete production incorporating supplementary cementitious materials: Experimental evaluations and machine learning modelling. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1), 67.
- Spanlang, A., Wukovits, W., & Weiss, B.** (2016). Development of a blast furnace model with thermodynamic process depiction by means of the rist operating diagram. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 973-978.
- Swathi, B., & Vidjeapriya, R.** (2023). Influence of precursor materials and molar ratios on normal, high, and ultra-high performance geopolymer concrete—A state of art review. *Construction and Building Materials*, 392, 132006.
- Şener, S.** (2008). Use of solid wastes of the soda ash plant as an adsorbent for the removal of anionic dyes: Equilibrium and kinetic studies. *Chemical Engineering Journal*, 138(1-3), 207-214.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tahwia, A. M., Heniegal, A. M., Abdellatief, M., Tayeh, B. A., & Abd Elrahman, M.** (2022). Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01393.
- THBB.** (t.y). “İstatistikler”. <https://www.thbb.org/sektor/istatistikler/> (Erişim Tarihi: 26 Aralık 2025)
- THBB.** (2026, 7 Nisan). Türkiye Hazır Beton Birliği 2025 yılı hazır beton sektör raporunu açıkladı. <https://www.thbb.org/haberler/turkiye-hazir-beton-birligi-2025-yili-hazir-beton-sektor-raporunu-acikladi/> (Erişim Tarihi: 10 Nisan 2026)
- Türkçimento.** (t.y). “Çimento Üretiminin Tarihçesi”. https://www.turkcimento.org.tr/tr/cimento_uretiminin_tarihcesi/ (Erişim Tarihi: 26 Aralık 2025)
- Van Riessen, A., Jamieson, E., Kealley, C. S., Hart, R. D., & Williams, R. P.** (2013). Bayer-geopolymers: An exploration of synergy between the alumina and geopolymer industries. *Cement and Concrete Composites*, 41, 29-33.
- Verma, M., Dev, N., Rahman, I., Nigam, M., Ahmed, M., & Mallick, J.** (2022). Geopolymer concrete: a material for sustainable development in Indian construction industries. *Crystals*, 12(4), 514.
- WCED.** (1987). Our common future. Oxford: Oxford University Press.
- Xu, H.,** 2002. “Geopolymerisation of aluminosilicate minerals”, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, the University of Melbourne, Australia, 270 pp.
- Ye, N., Yang, J., Liang, S., Hu, Y., Hu, J., Xiao, B., & Huang, Q.** (2016). Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud. *Construction and Building Materials*, 111, 317-325.
- Yeşiloğlu, A.** (2023). Pirinç kabuğu külü ve orman endüstri atık külü ile üretilen sürdürülebilir geopolimer betonun performans özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 93.
- Youssf, O., Abbass, A. M., Ahmed, A. K., & Tahwia, A. M.** (2025). Sustainable high-performance geopolymer concrete: The role of recycled industrial wastes in strength, durability, and microstructure enhancement. *Infrastructures*, 10(9), 241.