

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN
DONMA-ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE
İNCE LASTİK ATIĞININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taha Yusuf ORHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

HAZİRAN 2022

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN
DONMA-ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE
İNCE LASTİK ATIĞININ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taha Yusuf ORHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

HAZİRAN 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren ve cesaretlediren, çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan, bilim insanı kişiliğiyle akademik hayatta ve aynı zamanda hayatımın her kesiminde örnek aldığım, her zaman öğrencisi olmaktan onur ve gurur duyduğum değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ'a,

Çalışmamın ilerlemesine yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Ahmet ÖZCAN'a ve laboratuvar görevlisi İlhami BAYSAL'a,

Hayatım her evresinde olduğu gibi bu çalışmam süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme, bu çalışmayı ithafen yazdığım annem Sıddıka ORHAN'a ve babam Çetin ORHAN'a, her zaman maddi ve manevi destekçilerim olan, aldığım her kararda arkamda olan ağabeylerim M. Turan ORHAN ve Burak ORHAN'a,

Çalışmam süresince manevi destek olan Sayın Arş. Gör. Eyyüp Ensar YALÇIN'a, numune dökümüne yardımcı olan Sayın İnş. Müh. Abdurahman YOLCU'ya, Sayın İnş. Müh. Murat KEÇİÖREN'e, İnş. Müh. R. Can YÜNGÜL'e

teşekkür ederim.

Bu çalışmanın literatüre katkıda bulunmasını dilerim.

Taha Yusuf ORHAN
İnşaat Mühendisi

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Betonların Donma Çözölme ve Sülfat Direncine İnce Lastik Atığının Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığıın bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Taha Yusuf ORHAN



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1 Geopolimer	4
2.1.1 Geopolimer kimyası	5
2.1.2 Geopolimer beton	7
2.1.3 Geopolimer betonun avantajları	12
2.1.4 Geopolimer betonun dezavantajları	13
2.1.5 Geopolimerlerin kullanım alanları	13
2.2 Yüksek fırın cürufu	15
2.2.1 Yüksek fırın cürufunun tarihçesi	15
2.2.2 Yüksek fırın cürufunun üretimi	16
2.2.3 YFC esaslı bağlayıcılar	18
2.3 Atık lastik	20
2.3.1 Atık lastiğin yapısı	20
2.3.2 Atık lastiklerin çevresel sorunu	21
2.3.3 Atık lastiklerin kullanım alanları	23
2.3.4 Dünyada ve ülkemizde atık lastik	23
2.3.5 Betonda atık lastik kullanımı	24
2.3.6 Atık lastik ile ilgili çalışmalar	25
2.4 Betonda donma çözülme olayı	27
2.5 Betonda sülfat etkisi	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM	33
3.1 Materyal	33
3.1.1 Yüksek fırın cürufu	33
3.1.2 Doğal agrega	33
3.1.3 Atık lastik ve özellikleri	35
3.1.4 Aktivatör	36
3.1.5 Sülfatlar	36
3.1.6 Aletler	37
3.1.6.1 Elekler	37
3.1.6.2 Beton karışım mikseri	38
3.1.6.3 Etüv cihazı	38
3.1.6.4 Çelik kalıplar	39
3.1.6.5 Donma çözülme cihazı	39
3.1.6.6 Basınç dayanım cihazı	40
3.1.6.7 pH metre	40
3.1.6.8 Hassas terazi	41
3.1.6.9 SEM cihazı	41

3.2 Yöntem	42
3.2.1 Agregalarda uygulanan yöntemler	42
3.2.2 Geopolimer beton karışım miktarlarının belirlenmesi	42
3.2.3 Geopolimer betonların üretimi ve yerleştirilmesi.....	43
3.2.4 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler	44
3.2.4.1 Basınç dayanımı	45
3.2.4.2 Ağırlık değişimi.....	46
3.2.4.3 Su emme tayini.....	46
3.2.4.4 Kılcal geçirimsizlik deneyi.....	46
3.2.4.5 Donma çözülme direnci	48
3.2.4.6 Sülfat etkisi.....	49
3.2.4.7 SEM analizi	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	50
4.1 Agregada deneyleri ile ilgili bulgular ve tartışma	50
4.2 Sertleşmiş beton deneyleri ile ilgili bulgular ve tartışma	50
4.2.1 Kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma	50
4.2.1.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı	50
4.2.1.2 Kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizliği	54
4.2.1.3 Kontrol numunelerinin su emme oranları	54
4.2.1.4 Kontrol numunelerinin görsel incelemeleri.....	56
4.2.2 Sülfat etkisindeki numuneler ile ilgili bulgular ve tartışma	57
4.2.2.1 Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	58
4.2.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	63
4.2.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizliği.....	65
4.2.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin su emme oranları.....	69
4.2.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim.....	71
4.2.2.6 Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	72
4.2.3 Donma çözülme etkisindeki numuneler ile ilgili bulgular ve tartışma.....	73
4.2.3.1 Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	73
4.2.3.2 Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri	76
4.2.3.3 Donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizliği.....	78
4.2.3.4 Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları	80
4.2.3.5 Donma çözülme etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri	81
4.2.4 İç yapı analizi	83
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Atık otomobil lastiklerin ortalama bileşimi (Batır, 2002).	21
Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.	33
Çizelge 3.2 : Atık lastiğin ortalama bileşimi.....	35
Çizelge 3.3 : Potasyum hidroksitin kimyasal özellikleri.....	36
Çizelge 3.4 : Sülfat çözeltilerinin pH değerleri.....	37
Çizelge 3.5 : Üretilen geopolimer beton kodları.	43
Çizelge 3.6 : Geopolimer beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.	43
Çizelge 4.1 : Agregaların özgül ağırlık ile su emme oranı.	50
Çizelge 4.2 : 28 günlük geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri.....	51
Çizelge 4.3 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.	54
Çizelge 4.4 : Kontrol numunelerin su emme oranları.	55
Çizelge 4.5 : %5 Na ₂ SO ₄ ve %5 MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.....	59
Çizelge 4.6 : %5 Na ₂ SO ₄ ve %5 MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	63
Çizelge 4.7 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.....	66
Çizelge 4.8 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.....	66
Çizelge 4.9 : %5 Na ₂ SO ₄ ve %5 MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin su emme oranları.	70
Çizelge 4.10 : %5 Na ₂ SO ₄ ve %5 MgSO ₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi.....	71
Çizelge 4.11 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları.....	74
Çizelge 4.12 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.....	76
Çizelge 4.13 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.....	79
Çizelge 4.14 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Geopolimer terminolojisi (Konstantinos, 2011).....	6
Şekil 2.2 : Geopolimerizasyon olayı (Davidovits, 1991).....	6
Şekil 2.3 : Geopolimerlerin alkali aktivasyon modeli (Shi vd., 2011).....	7
Şekil 2.4 : Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury vd, 2020).....	8
Şekil 2.5 : Geopolimer betonun üretim şeması (McLellan vd., 2011).....	8
Şekil 2.6 : Yüksek fırın cürufu türleri (Engin, 2015).....	15
Şekil 2.7 : Yüksek fırın cürufunun üretim aşaması (Engin, 2015).	17
Şekil 2.8 : Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009).....	17
Şekil 2.9 : Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009).....	18
Şekil 2.10 : Lastiğin yapısı (Ünlü, 2006).	21
Şekil 2.11 : Atık lastik yangınları (Ağaçkesen, 2018).	22
Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.	33
Şekil 3.2 : İnce ve iri agrega.	34
Şekil 3.3 : Agrega gradasyon eğrisi.	34
Şekil 3.4 : İnce atık lastik.	35
Şekil 3.5 : Potasyum hidroksit.	36
Şekil 3.6 : Deneyde kullanılan sülfatlar.	37
Şekil 3.7 : Sarsma cihazı ve elekler.	37
Şekil 3.8 : Beton karışım mikseri.	38
Şekil 3.9 : Etüv cihazı.	38
Şekil 3.10 : Çelik kalıplar.....	39
Şekil 3.11 : Donma çözülme cihazı.	39
Şekil 3.12 : Basınç dayanım cihazı.	40
Şekil 3.13 : pH metre.	40
Şekil 3.14 : Hassas terazi.	41
Şekil 3.15 : SEM cihazı.....	41
Şekil 3.16 : Kalıplara yerleştirilen geopolimer beton numuneler.	44
Şekil 3.17 : Geopolimer beton numunelerinin kür edilmesi.	44
Şekil 3.18 : Basınç dayanım cihazındaki beton numune.....	45
Şekil 3.19 : Etüvde bekletilen geopolimer beton numuneler.	47
Şekil 3.20 : Kılcal geçirimsizlik deneyi düzeneğindeki geopolimer beton numuneler.....	48
Şekil 3.21 : Donma çözülme etkisine maruz kalan numuneler.	48
Şekil 3.22 : Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler.	49
Şekil 4.1 : 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.2 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri....	54
Şekil 4.3 : Kontrol numunelerin su emme yüzdeleri.....	55
Şekil 4.4 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerinin görünüşleri.	57
Şekil 4.5 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerinin basınç dayanım deneyi sonrası görünüşleri.....	57
Şekil 4.6 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltilinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.	59
Şekil 4.7 : %5 MgSO ₄ çözeltilinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.....	59
Şekil 4.8 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltilinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.	63
Şekil 4.9 : %5 MgSO ₄ çözeltilinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.....	64
Şekil 4.10 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltilinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	67
Şekil 4.11 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltilinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	67

Şekil 4.12 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	67
Şekil 4.13 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	68
Şekil 4.14 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	68
Şekil 4.15 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	68
Şekil 4.16 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranları.....	70
Şekil 4.17 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranları.....	70
Şekil 4.18 : %5 Na ₂ SO ₄ ve %5 MgSO ₄ çözeltilerinin pH değerleri değişimi.....	71
Şekil 4.19 : %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.....	72
Şekil 4.20 : %5 MgSO ₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin yüzeyinde görülen beyaz lekeler.....	73
Şekil 4.21 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları.....	74
Şekil 4.22 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimindeki azalma....	77
Şekil 4.23 : 100 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	79
Şekil 4.24 : 200 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	80
Şekil 4.25 : 300 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.....	80
Şekil 4.26 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları.....	81
Şekil 4.27 : Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin görünüşleri.....	82
Şekil 4.28 : Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin yüzeylerindeki atık lastik görünüşleri.....	82
Şekil 4.29 : Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanım deneyi uygulanan numunelerin görünüşleri.....	82
Şekil 4.30 : 28 gün kür sonrası kontrol numunelerinin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.	84
Şekil 4.31 : 12 hafta %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.....	84
Şekil 4.32 : 12 hafta %5 MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.....	85
Şekil 4.33 : 300 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.....	85

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CaO	: Kalsiyum Oksit
CH	: Kalsiyum Hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
CSH	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
Fe₂O₃	: Demir Oksit
GGBFS	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
GPC	: Geopolimer Beton
K₂SiO₃	: Potasyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
MgO	: Magnezyum Oksit
MgSO₄	: Magnezyum Sülfat
Na₂O	: Sodyum Oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
PÇ	: Portland Çimentosu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	: Silisyum Dioksit
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER BETONLARIN DONMA-ÇÖZÜLME VE SÜLFAT DİRENCİNE İNCE LASTİK ATIĞININ ETKİSİ

Taha Yusuf ORHAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

99+x sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

Bu tez çalışmasında yüksek fırın cürufu esaslı ve ince atık lastik takviyeli geopolimer beton üretilmiş ve üretilen bu geopolimer betonların sülfat ve donma çözülme direncine karşı dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik, ince agrega yerine kullanılarak ve KOH aktivatörü ile aktive edilerek 4 grup geopolimer beton üretilmiştir. Üretilen beton numuneler 28 gün kür edildikten sonra 4, 8 ve 12 hafta süresince sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. Ayrıca kür sürelerini tamamlayan numuneler 100, 200 ve 300 çevrim donma çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Bu süre içerisinde numunelerin basınç dayanımları, ağırlık değişimleri, kılcal geçirimsizlikleri, su emme oranları, pH değerleri değişimi incelenmiş ve görsel değişimleri ile içyapılarına bakılmıştır. Elde edilen bulgular kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde atık lastik oranı arttıkça basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Ancak beton içerisine atık lastik katılma oranının artmasının sülfat ve donma çözülme direncine olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri, su emme oranları ve ağırlıkları artmış, kılcal geçirimsizlik katsayıları ise azalmıştır. Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanım değerleri ve ağırlıkları azalmış, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve su emme oranları artmıştır. Elde edilen sonuçlar görsel incelemeler ve mikroyapı görüntüleri ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, yüksek fırın cürufu, atık lastik, donma çözülme direnci, sülfat direnci.

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF FINE RUBBER WASTE ON FREEZE THAW AND SULPHATE RESISTANCE OF BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER CONCRETES

Taha Yusuf ORHAN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

99+x sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ

In this thesis, blast furnace slag based and thin waste rubber reinforced geopolymer concrete was produced and the resistance properties of these geopolymer concretes against sulfate and freeze-thaw resistance were investigated. For this purpose, 4 groups of geopolymer concrete were produced by using 0%, 5%, 10% and 15% volumetric waste rubber instead of fine aggregate and activated with KOH activator. After curing for 28 days, the produced concrete samples were kept in sodium sulfate and magnesium sulfate solutions for 4, 8 and 12 weeks. In addition, the samples that completed their curing times were exposed to 100, 200 and 300 cycles of freeze-thaw effect. During this period, the compressive strength, weight changes, capillary permeability, water absorption rates, pH values of the samples were examined and their visual changes and internal structures were examined. The obtained results were compared with the control samples. When the test results were examined, the compressive strength decreased as the waste tire ratio increased. However, it has been observed that the increase in the ratio of waste rubber in the concrete has a positive effect on sulfate and freeze-thaw resistance. The compressive strength values, water absorption rates and weights of the samples kept in sulfate solutions increased, while the capillary permeability coefficients decreased. Compressive strength values and weights of the samples under freeze-thaw effect decreased, capillary permeability coefficient and water absorption rates increased. The results obtained were supported by visual inspections and microstructure images.

Keywords: Geopolymer concrete, blast furnace slag, waste rubber, freeze thaw resistance, sulphate resistance.

1. GİRİŞ

Beton, tüm dünyada inşaat sektöründe kullanılan önemli bir malzemedir. Betonun düşük maliyeti, dayanıklılığı, yapıtaşını oluşturan malzemelerin mevcut olması ve herhangi bir şekil veya boyuta dönüştürülme yeteneğine sahip olması nedeniyle en yaygın yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir. Ayrıca bağlayıcılık kabiliyeti ve kullanılan malzemeler beton üretimini inşaat teknolojisinde de gerekli kılmaktadır. Beton ve betonarme uygulamalarında en yaygın kullanılan bağlayıcı malzeme çimentodur. Portland çimento (PÇ) üretimi dünya genelinde yıllık %9 oranında artmaya devam etmektedir. Bu artış oranı, çimento üretimi sırasında atmosfere salınan büyük miktarda karbondioksit (CO₂) gazı nedeniyle çevre için büyük bir risk teşkil etmektedir. Dünya giderek artan çevresel sorunlarla karşı karşıya kalmaya devam ettikçe sıradan betonun yerini alacak yeni bir sürdürülebilir beton katkısının gelişimi daha önemli hale gelmiştir (Amran vd., 2019).

Üretilen çimento türüne ve endüstriyel kullanımına bağlı değişiklikler olmakla birlikte, 1 ton çimento üretimi yaklaşık olarak 0,9 ton CO₂ salımına sebep olmaktadır. Dünyada yıllık çimento üretiminin 3,5 milyar tonun üzerinde olması ve sektörün insan kaynaklı CO₂'nin %5 ile %8'inden sorumlu oluşu bilim insanlarını çevresel etkisi daha az olan malzeme arayışlarına yöneltmektedir (Doğan vd., 2019).

Beton üretiminde temiz teknolojiler ile alakalı temel hedefler şunlardır:

- CO₂ gazının salınımının azalması,
- Çimento üretim aşamasındaki fosillerden elde edilen yakıt veya enerji tüketiminin azalması,
- Beton üretiminde, farklı cinsteki kimyasal maddeler gibi çevre veya sağlığı tehlikeye atabilecek maddelerin kullanımının azalması,
- Çimento içerisine yüksek miktarda uçucu kül (UK) veya diğer atık türlerinin katılarak kullanılmasıyla tasarruf edilmesi,
- İnorganik polimerler, alkali kullanılarak aktivasyon olan bağlayıcılar, manyezit çimentosu ve sülfoaluminat çimentolar gibi yeni bağlayıcılık özelliği olan malzemelerin kullanılması,
- Geri dönüşümlü çimento/beton oranının türlü imkanları ve farklı yollarla oluşturulacak agregaların kullanılmasıdır (Suhendro, 2014).

Çevre Koruma Ajansı (EPA)'ndan elde edilen verilere göre, Türkiye de dahil Avrupa'daki 28 ülkenin 2012 yılında oluşturduğu toplam atık 109 ton olmakla birlikte bunun inşaat sektöründeki payı 106 ton olarak bildirilmiştir (Mika, 2017).

Atık oluşumuna neden olan en büyük sektörlerden biri de otomotiv sektörüdür. Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 240 milyondan fazla otomobil lastiği ve 45 milyondan fazla kamyon lastiği birikmektedir. Bunların 22 milyon adedi yenilenmekte, 42 milyon adedi başka alternatiflerde kullanılmakta ve 188 milyon atık lastik stoklara veya çöplüklere gönderilmektedir. EPA, ülke genelinde hurda lastik stoklarının şu anda yaklaşık 2-3 milyar lastik içerdiğini tahmin etmektedir. Hurda lastikleri için yol dolguları, dalgakıranlar, istinat duvarları, inşaat yapıları gibi alternatif kullanım alanları geliştirilmiştir (Lougheed ve Papagiannakis, 1996).

Geri dönüşümlü atık lastiklerin betona katılarak kullanılması, betonun çok sayıda özelliğini değiştirmektedir. Bazı bilim insanları, beton içerisine ikame edilen ve atık durumda olan otomobil lastik kırıntılarının betonun sünekliliğine olan tesirini araştırmışlardır. İnşaat mühendisliğinin çeşitli uygulama alanlarında, beton elemanların birim ağırlığının az olması, tokluk ve çarpma etkilerinin fazla olması hedeflenmektedir. Maalesef beton inşaat alanında çok yaygın olmasına karşı, genellikle belirtilen bu nitelikleri yalnız başına karşılayamamaktadır. Bu sebeple, betonlarda bazı özellikleri iyileştirmek amacıyla, beton içerisine atık lastiklerin ikame edilmesi düşüncesi son zamanlarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır (Turgut ve Yeşilata, 2009).

Dünya çelik endüstrisi alanında yaklaşık 780 milyon ton ham çelik ve eş zamanlı olarak 300 milyon ton katı atık oluşmaktadır. Bu yüzden ton ham çelik başına ortalama miktar olarak 200 ile 400 kg katı madde üretilir. Bunun en büyük payını (%70-80) ekolojik tehlike oluşturan yüksek fırın cürufu (YFC) ve oksijen cürufu oluşturmaktadır. Dünyadaki gelişmiş ülkelerin çoğunda bu atıkların kullanılmasıyla ilgili teknolojiler geliştirilmiştir (Nadeem ve Pophale, 2013).

Bu veriler ışığında bu çalışmada hem çimento kullanımını azaltarak çimento yerine endüstriyel atık olan YFC'nin kullanılmasıyla hem de doğal kaynakların korunması için atık lastiklerin kullanılmasıyla çevre dostu, daha ekonomik, yenilenebilir ve sürdürülebilir beton üretilerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın amacı YFC esaslı ve atık lastik takviyeli geopolimer beton üretmek aynı zamanda elde edilen bu geopolimerlerin sülfat ve donma çözülme etkisine karşı mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda yapılan bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak YFC, alkali aktivatör olarak potasyum hidroksit (KOH), agrega olarak ise dere agregası kullanılmıştır. Hazırlanan beton karışımlarında yapılan laboratuvar denemeleri neticesinde bağlayıcı dozajı 500 kg/m^3 , KOH çözeltisinin molaritesi 12 M ve çözelti/bağlayıcı oranı 0.45 olarak belirlenmiştir. İnce atık lastik (0-4 mm) hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ince dere kumu agregası (0-4 mm) yerine ikame edilerek 4 grup geopolimer beton hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer beton karışımları $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ ebatlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Üretilen geopolimer beton numuneleri 28 gün laboratuvar ortamında $23 \pm 1^\circ \text{C}$ 'de kür edilmiştir. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan beton numuneleri sülfat ve donma çözülme etkilerine tabi tutulmuştur. Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler 4, 8 ve 12 hafta süresince sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. Donma çözülme etkisine tabi tutulan numuneler 100, 200 ve 300 çevrim olacak şekilde donma çözülme döngüleri uygulanmıştır. Sülfat ve donma çözülme etkilerine tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı, ağırlık değişimi, su emme ve kılcal geçirimsizlik oranlarına bakılarak 28 gün kür edilen referans numuneleri ile kıyaslanmıştır. Son olarak numunelerin görsel değişimleri ve içyapı analizleri incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Geopolimer

Geopolimer, kireç ve sıradan Portland çimentosunun ardından üçüncü nesil çimento olarak kabul görmektedir. Geopolimerlerin genellikle "inorganik polimerler", "alkali ile aktive edilmiş çimentolar", "geocementler", "alkali- bağlı seramikler", "hidroseramik" şeklinde çeşitli isimleri vardır. Bu çeşitli adlandırmalara rağmen, bu terimlerin tümü benzer kimyasal maddelerden sentezlenen malzemeleri tanımlar (Singh vd., 2015).

Geopolimer 1970'lerin başında Davidovits tarafından tanıtılmıştır. Geopolimer genellikle katı olan alüminosilikat tozunun alkali bir metal silikat yada hidroksit çözeltisi ile tepkimeye giren ve ortam sıcaklığında yada bir dereceye kadar artırılmış sıcaklıklarda meydana gelen malzeme sınıflarıdır. PÇ ile kıyaslandığında geopolimer daha az enerji tüketimine, daha az CO₂ yayılımı, yüksek erken dayanıma, daha az büzölmeye, daha düşük geçirgenliğe, yangın ve asit dayanımına sahiptir. Bu özellikler, malzemelerin türü, alüminosilikat kaynaklarındaki mineralojik ve kimyasal bileşim gibi pek çok etkene bağlıdır (Tchakoute Kouamo vd., 2012).

CO₂ salınımı temel olarak çimento üretimi esnasında fosil yakıtların yakılması ve kireçtaşının ayrışmasından ötürü meydana gelmektedir. Ayrıca öğütme ve taşıma da çimento endüstrisinin çevresel zararlarında önemli sebeplerdendir. Çimento endüstrisi kısıtlanmış karbon endüstrisinde alternatif bağlayıcı olmasının doğruluğunu kabul etmeye başlamaktadır. CO₂ emisyonunu düşüren ve ayrıca bazı avantajları olan alternatif bağlayıcı malzemeler mevcuttur (Van Deventer vd., 2012).

Geopolimerler bir yapı malzemesi olarak son zamanlarda dikkat çekmektedir. Artan çevresel kaygılar ve azalan doğal kaynaklar nedeniyle geopolimerler, PÇ için değerli bir alternatif olarak görölmektedir. Geopolimerler, PÇ ile benzer özelliklere sahip olabilir, ancak diğer endüstrilerin yan ürünlerinden (örneğin UK, YFC) veya daha az enerji isteyen ve CO₂ yayan malzemelerden (örneğin kalsine kil, alkali aktivatörler) üretilebilirler (Weerd, 2011).

Geopolimer üretmek için iki cins malzemeye ihtiyaç duyulur. Biri alümina ve silika bulunduran kaynak malzeme ve diğeri polimerizasyon tepkimesini aktive eden bir alkalidir. Kaynak malzemeler (alümino-silikat), kaolinit, kalsine kaolinit ve killer gibi doğal mineraller olabilir. Bunların yerine, UK, cüruf, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi endüstri atıkları, geopolimerlerin bileşimi için kaynak malzeme olarak

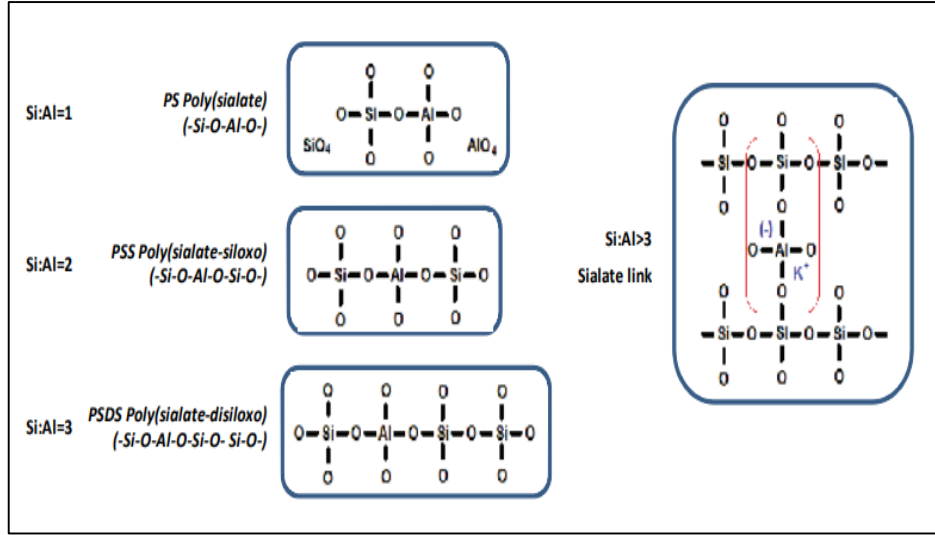
kullanılabilir. Kaynak malzeme amorf olmalıdır ve polimerizasyon derecesi çoğunlukla alümino silikat malzemelerin amorflik ve incelik derecesine bağlıdır (Chithambar Ganesh ve Muthukannan, 2018).

Geopolimer; UK, metakaolin, cüruf vb. gibi katı alüminosilikat bazlı malzemelerin bir alkali metal hidroksit ve silikat çözeltisinin termal aktivasyonu ile sentezlenen bir alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcılar, Portland çimentosuna göre yüksek performanslı, çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak potansiyel kullanımları nedeniyle şu anda yaygın ilgi görmektedir (Thakur ve Ghosh, 2009). Davidovits'e göre geopolimerik malzemeler, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler ve metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir (Rangan, 2014).

2.1.1 Geopolimer kimyası

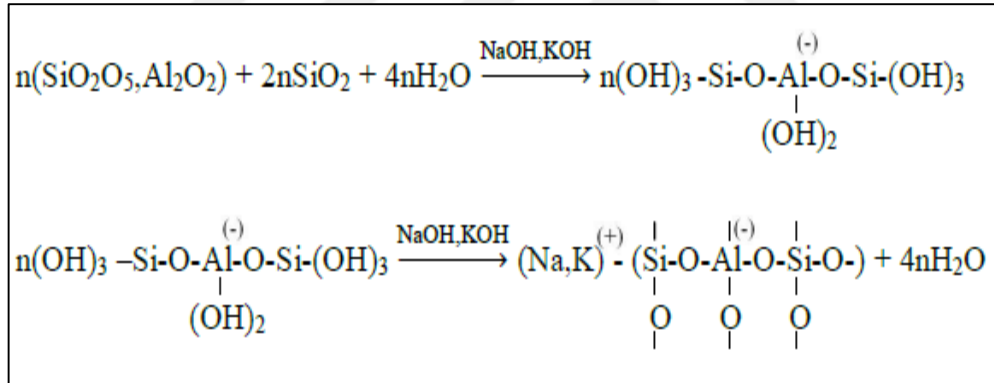
Geopolimerizasyon sürecinin aşamaları: yüksek alkali koşullar altında, alümina-silika esaslı zengin kaynak malzemelerden oksit minerallerinin çözünmesi, çözülmüş oksit minerallerinin taşınması veya yönlendirilmesi, ardından pıhtılaşma/jelasyon ve poliyogunlaşma ile 3- D kararlı silikoaalüminat yapı ağları oluşturmak şeklinde tanımlanmıştır. Kimyasal bağ oluşturma türlerine bağlı olarak, 3-D alümino-silikat kararlı ağından ($-Si-O-Al-O-$), ($Si-O-Al-O-Si-O$) ve ($Si-O-Al-O-Si-O-Si-O$) şeklinde başlıca üç tür yapı oluşturulabilirler (Saha ve Rajasekaran, 2017).

Geopolimerler, ortam sıcaklığında üretilen ve sertleşen seramik benzeri özelliklere sahip amorf üç boyutlu alüminosilikat malzemelerdir. Yüksek alkali koşullar altında, alkali hidroksit ve silikat çözeltisinin varlığında, reaktif alüminosilikatlar hızla çözüldüğünde ve çözeltide serbest SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral birimleri salındığında polimerizasyon gerçekleşir. Tetrahedral birimler, alternatif olarak, amorf geopolimerleri oluşturan oksijen atomlarını paylaşarak polimerik öncülere bağlanır. Esas yapılarında bulunan K^+ veya Na^+ gibi pozitif iyonlar, negatif yükleri dengelerler. Siliko-alüminatlara bağlı olarak geopolimerlerin kimyasal tanımı için, silikon-okso-alüminat için bir kısaltma olan poli(sialat) terimi önerilmiştir. Poli(siyalatlar) oksijen ile koordinasyon içinde olan Si_4^+ ve Al_3^+ içeren zincir ve halka polimerleridir (Komnitsas, 2011).



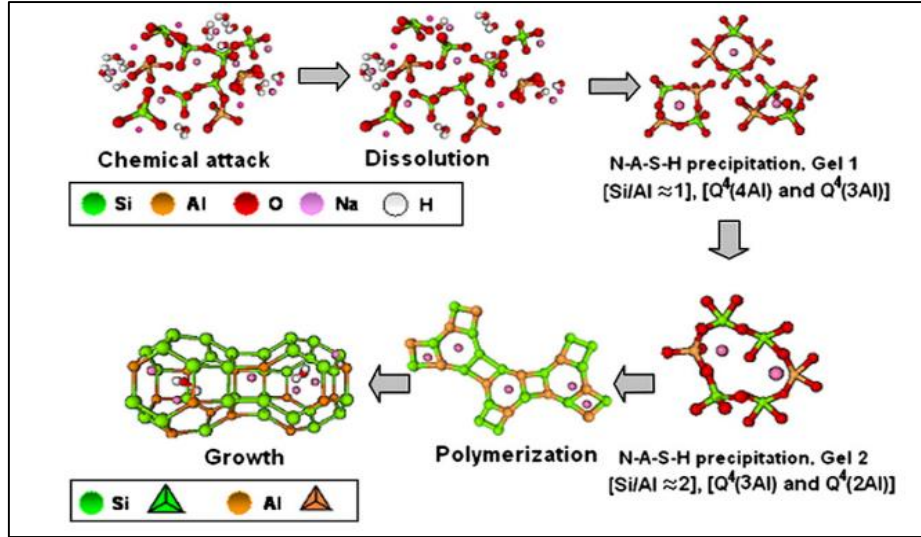
Şekil 2.1 : Geopolimer terminolojisi (Konstantinos, 2011).

Geopolimerizasyon süreci ekzotermik tepkimeler sonucu oluşmaktadır. Davidovits'e, (1991) göre Şekil 2.2'de gösterilen tepkimeye bakılarak oligomerler aracılığıyla üç boyutlu makromoleküler yapıların meydana gelmesini sağladığı düşünülmektedir



Şekil 2.2 : Geopolimerizasyon olayı (Davidovits, 1991).

Geopolimerler, alüminyum ve silikaların K ve Na gibi alkaliler ile tetrahedral yapı oluşturmasından meydana gelirler. Bulunduğu ortamdaki oksijen atomunu dönüşümlü olarak kullanırlar. Al-O-Si yapısı geopolimerin esasını oluşturmaktadır. Alüminat ve silikatların hidroksitler ve alkali tuzlarla çözünmesiyle geopolimer tepkimeleri oluşmaktadır (Balçıkanlı, 2016). Fernández-Jiménez ve Palomo, alkali alüminosilikat malzemelerin mikroyapısal gelişimini betimlemek amacıyla 2005 yılında Şekil 2.3'te gösterilen grafik modelini tavsiye etmişlerdir (Shi vd., 2011).



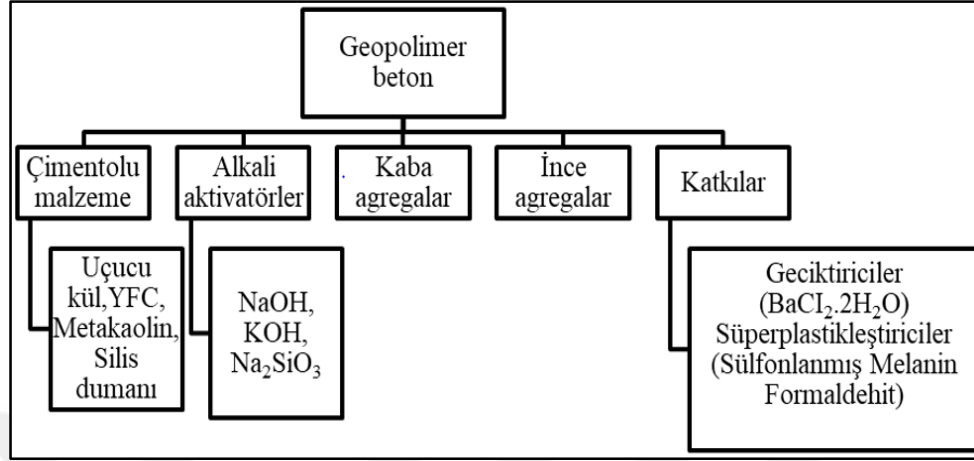
Şekil 2.3 : Geopolimerlerin alkali aktivasyon modeli (Shi vd., 2011).

2.1.2 Geopolimer beton

İnsan nüfusunun aşırı artması ve endüstrilerin yenilikçi gelişimi sonucu konut ve altyapılar için büyük bir ihtiyaca gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle, giderek daha fazla inşaat ve altyapı geliştirmesi önemli hale gelmiştir. Bu da, Romalılardan beri yaygın olarak kullanılan temel bir yapı malzemesi olan betona olan talebi arttırmıştır. Bunun sonucunda beton üretimi için temel bileşenlere yani ince ve kaba doğal malzemelerle birlikte bağlayıcı olarak PÇ'nin kullanımı da arttırmıştır. PÇ'nin mevcut üretim sürecinde daha yüksek enerji elde etmek için doğal malzemelerin yanı sıra hammadde olarak kireçtaşı gerektirmektedir. Bu süreç sadece doğal kaynakları yok etmekle kalmaz, aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda kireçtaşından dolayı CO₂ de yayar. Bu doğa ve küresel ısınma için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, bir yandan, doğal agregaların kullanımının azaltılması son derece arzu edilirken, diğer yandan çeşitli atık malzemelerin, PÇ veya doğal agrega için bir ikame malzemesi olarak uygulanmaları amacıyla geopolimer beton geliştirilmiştir (Luhar vd., 2020).

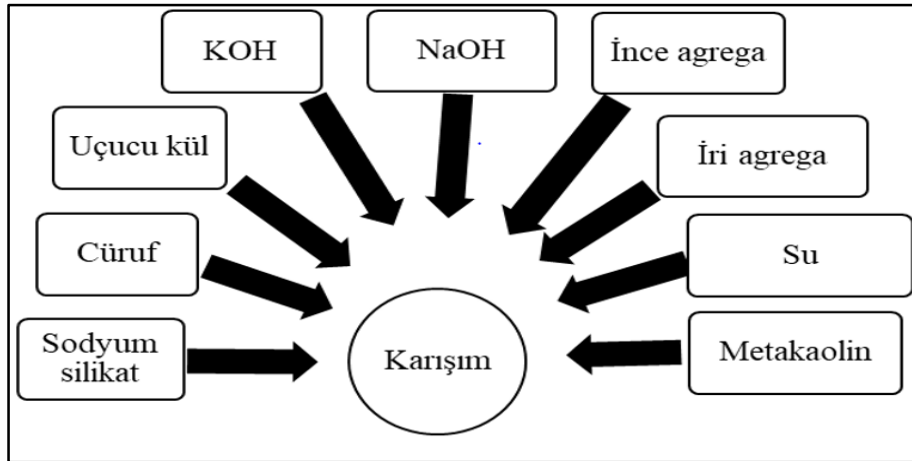
Uçucu kül, metakaolin, cüruf, pirinç kabuğu külü ve yüksek kalsiyumlu odun külü gibi alüminosilikatların alkali çözelti kullanılarak aktivasyon yoluyla polimerize edilmesiyle geopolimer beton üretilebilir. Bu nedenle geopolimer beton üretimindeki verimlilik, aktivatörlerin yanı sıra alüminosilikat kaynaklarının türlerine de büyük ölçüde bağlıdır. Geopolimer beton yan ürün atıklarını çimento yerine kullanma ve üretimi sırasında sera gazı emisyonunu azaltmadaki avantajı nedeniyle, araştırmacı bilim adamları ve inşaat uygulayıcıları arasında önemli bir ilgi görmeye başlamıştır. Ayrıca geleneksel betona göre daha iyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahiptir (Ma vd., 2018).

Geopolimer betonun bileşenleri bir bağlayıcı malzeme, aktivatörler, agregalar ve gerekli katkılarından oluşur. Geopolimer betonun bileşenleri ve sıklıkla kullanılan bazı malzeme türleri Şekil 2.4’de gösterilmiştir (Chowdhury vd., 2020).



Şekil 2.4 : Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury vd, 2020)

Uygun atık yönetimi ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımı ile çimento üretimindeki enerjinin kullanımı önemli ölçüde azaltılabilir. Bu, sera gazı emisyonlarını azaltmanın yolunu açar ve aynı zamanda hammadde maliyetlerini düşürür. Portland çimentosu betonu yerine yaygın olarak %50'den az çimento içeren uçucu kül betonları kullanılmış ve son zamanlarda ilginç çimento kullanımını tamamen ortadan kaldıran beton kullanımına odaklandığı görülmüştür. Ortaya çıkan böyle bir malzeme, çimento yerine sadece mineral katkıları kullanan “Geopolimer beton” adını ön plana çıkarmaktadır. Geopolimer betonlar, çimento kullanımını ortadan kaldırarak karbon ayak izini azaltmak ve aksi takdirde atık malzeme olarak atılacak olan endüstriyel yan ürünleri kullanarak maliyeti düşürmek amacıyla geliştirilmiştir (Cheng vd., 2020).



Şekil 2.5 : Geopolimer betonun üretim şeması (McLellan vd., 2011).

Hosan ve diğ; (2016) yaptıkları çalışmada F sınıfı UK bağlayıcılı geopolimer betonların dayanıklılık özelliklerine aktivatör türünün etkisini araştırmışlardır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ile KOH kullanmışlardır. Çalışmada aktivatörler $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ve $\text{K}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ oranı açısından kütlece 2, 2.5 ve 3 oranında olacak şekilde oluşturulmuştur. Üretilen geopolimer numuneler 28 gün kür edildikten sonra yüksek sıcaklık etkisini incelemek için 200°C , 400°C , 600°C ve 800°C 'lik dört farklı yüksek sıcaklığa maruz kalmıştır. Deney sonuçları, 600°C 'ye kadar ulaşan sıcaklık artışlarında potasyum aktivatörler ile aktive edilerek üretilen geopolimerlerin sodyum alkaliler ile aktive edilerek üretilen geopolimerlere göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Öte yandan potasyum ile aktive edilerek üretilen geopolimerlerin, yüksek sıcaklığa dayanıklı olması, minimum hacimsel değişiklik, daha az ağırlık kaybı ve daha az çatlak oluşumu olduğu sonucuna varmışlardır.

Xie vd;(2009) yaptıkları araştırmada maksimum 54 mikron boyutunda olan UK, metakaolin ve cüruf gibi bağlayıcıları kullanarak geopolimer elde etmişlerdir. Geopolimerleri aktive etmek için KOH ve K_2SiO_3 ile aktivatör çözeltisi hazırlamışlardır. UK, metakaolin ve cüruf bağlayıcıları farklı miktarlarda aktivatörlerle birlikte aktive edilerek mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bununla birlikte katı/sıvı ile KOH/ K_2SiO_3 oranları farklı miktarlarda belirlenerek basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. KOH/ K_2SiO_3 oranı düşük olan geopolimerlerin basınç dayanımının da düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada maksimum basınç dayanımı değerinin 31.6 MPa değer ile uçucu kül, metakaolin ve cüruf bağlayıcılarının sırasıyla 3:1:3 kütle oranlarında kullanılması ve ayrıca 24 saat 60°C 'da kür edilen geopolimer numunelerden elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Tippayasam vd; (2016) yaptıkları çalışmada geopolimer üretiminde sık kullanılan NaOH ile Na_2SiO_3 alkali aktivatörler yerine nispeten daha az kullanılan KOH ile K_2SiO_3 alkali aktivatörlerini kullanarak aktivasyon çözeltileri hazırlamışlardır. Farklı alkali çözeltiler kullanılarak üretilen metakaolin esaslı geopolimerler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Geopolimerler üzerinde kür sıcaklığının, alkali aktivatör türünün ve sıcaklık değişiminin etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar KOH çözelti konsantrasyonunu 6, 8, 10, 20, 30 ve 40 M olacak şekilde belirlemişlerdir. Alkali çözelti $\text{K}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ oranını 1 ve 1.5 olarak belirlemişler ve kür sıcaklığını 24 saat süre için 40°C ve 60°C olacak şekilde belirlemişlerdir. 10 M KOH alkali ile aktive edilen ve 24 saat 40°C sıcaklıkta kür olan 28 günlük numunelerin 37.75 MPa değer ile maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir.

De Toledo Pereira vd; (2018) ürettikleri geopolimer betonlar ile yüksek performanslı betonlar arasında mekanik, termal ve mikroyapı açısından kıyaslama ve değerlendirmeler yapmışlardır. Geopolimerin hazırlanması amacıyla metakaolin, YFC ve alkali aktivatör olarak ise KOH kullanmışlardır. Oluşturulan geopolimer bağlayıcı 0.016 mm altındaki incelikte elenmiş metakaolin ile cüruf bağlayıcıları partikülleri yüksek alkalimli ve pH 14 olacak şekilde KOH alkali çözeltisi içinde çözülmesi geleneksel uygulamalarla hazırlanmıştır. Çözülme olayı ortalama 5 dakika süren geopolimerizasyon süresince ortalama 25°C sıcaklığındaki oda şartlarında gerçekleşmiştir. Karışıma hacimce %40 oranında çakıl ve hacimce %25 oranında kum eklenmiştir. Brezilya standardına uygun olarak 1, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra 5 numunede her iki beton türünde de basınç dayanımları test edilmiştir. Bunun yanı sıra 2 saat agrega ile birlikte su, geopolimer çimento ile karıştırılıp 5 numune örneğinde basınç dayanımı test edilmiştir. Geopolimer betonlarda 2 saat kür sonrası elverişli basınç dayanımları elde edilirken yüksek performanslı betonlarda daha az dayanım elde edilmişlerdir. Çalışmacılar deney sonrası yüksek performanslı betonun geopolimer betona göre daha fazla gözenekli ve daha fazla çatlaklı bir yapıda olduğunu gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre geopolimer betonda 7 güne kadar ortalama dayanımın daha fazla olduğu fakat 28 günün sonunda yaklaşık olarak yüksek performanslı betonla aynı dayanım özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir.

Ravikumar vd., (2010) yaptıkları çalışmada farklı puzolanlar kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada F sınıfı UK ile granüle YFC kullanmışlardır. Geopolimerleri aktive etmek amacıyla 4, 6 ve 8 M oranlarında NaOH kullanmışlar ve üretilen bu betonların basınç dayanımını, gözenekliliğini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmada yüksek basınç dayanımı sağlamak amacıyla en elverişli kür koşulları oluşturmuşlardır. Çalışma sonuçlarına göre aktivatör yoğunluğu ile birlikte aktivatör ile bağlayıcı oranının da geopolimer betonların basınç dayanımını etkilediğini bulmuşlardır. Aynı zamanda çalışmada YFC kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımını UK kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımından daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Araştırmacılar ayrıca en elverişli kür sıcaklığında UK kullanılarak üretilen geopolimer betonlar ile YFC esaslı geopolimer betonların basınç dayanımlarını bulmuşlardır. Deney sonucunda UK esaslı geopolimer betonların 75°C sıcaklıkta kür edilmesi sonucu en yüksek basınç dayanımına ulaşmışlardır.

Kurtoğlu vd., (2018) yaptıkları çalışmada geopolimer betonların ve geleneksel portland çimentolu betonların dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerini inceleyip kıyaslama yapmışlardır. Çalışmada geopolimer beton üretmek için iki farklı bağlayıcı olarak UK ve YFC kullanmışlardır. Üretilen hem geopolimer betonlarda hem de OPC betonlarda deniz suyu, $MgSO_4$ ve H_2SO_4 etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda her iki beton türüne en fazla olumsuz etkiyi H_2SO_4 çözeltisi yapmıştır. Öte yandan deniz suyu diğer çözeltilere göre en az olumsuz etkisi olan çözelti olmuştur. Aynı zamanda araştırmacılar H_2SO_4 çözeltisine en dayanıklı betonun UK esaslı geopolimer betonlar olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda geopolimer betonlara göre portland çimentolu betonların kötü performans gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Gümüş, (2016) yapmış olduğu tez çalışmasında UK ve metakaolin kullanarak geopolimer beton üretmiştir. Çalışmada geopolimer betonları aktive etmek amacıyla alkali aktivatör olarak ise $NaOH$ ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-20 mm olmak üzere farklı agrega boyutları kullanılmıştır. Beton numuneler 5 ve 24 saat süreyle $60^\circ C$ ve $90^\circ C$ olacak şekilde farklı sıcaklıklarda kür edilmiştir. 7 günlük geopolimer beton numuneler üzerinde basınç dayanımı, görünen porozite, su emme, görünen yoğunluk, UPV, birim hacim ağırlık deneyleri uygulamıştır. Araştırmacı yapmış olduğu deneyler sonucunda kür süresi ve UK miktarının artmasıyla basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Maksimum basınç dayanımı %40 oranında UK içeren ve 24 saat kür edilen geopolimer betonlarda görülmüştür.

Guo vd., (2010) yapmış oldukları çalışmada puzolanik özelliği olan UK ve alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmacılar SiO_2/Na_2O oranlarını sırasıyla 1.0, 1.5 ve 2.0 M olacak şekilde alkali aktivatörleri ayarlamışlardır. Su/bağlayıcı oranı 0.40 olan karışımlarda saf su kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda maksimum basınç dayanımı SiO_2/Na_2O oranı 1.5 olan ve %10 Na_2O içeriğine sahip numunelerde görülmüştür. Bunun yanı sıra çalışmada kür sıcaklığının basınç dayanımı üzerine etkisi de araştırılmıştır. Yapılan deneylerde $23^\circ C$ ve $75^\circ C$ sıcaklıklarda kür edilen numunelerde maksimum basınç dayanımı $23^\circ C$ sıcaklıkta kür olan numuneler de 63.4 MPa olarak elde edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalar sonucunda geopolimer betonların PÇ betonlara göre daha düşük hidratasyon ısısı açığa çıkarttığını ve geopolimerlerin çevre ve enerji kaynaklarının korunmasında daha avantajlı olduklarını bildirmişlerdir.

2.1.3 Geopolimer betonun avantajları

Küresel olarak, son birkaç yıldır düşük sera gazı emisyonlarına sahip ve sürdürülebilirliği sağlayan inşaat malzemelerine artan bir talep olmuştur. Sanayi sektörlerindeki gelişmeler, çimento ve diğer doğal kaynakların yoğun bir şekilde tüketilmesine neden olmuştur. Bu doğal kaynakların bu kadar endişe verici bir oranda tükenmesi, gelecek nesillerimiz için korunacak hiçbir şeyin kalmamasına sebep olur ve sürdürülebilirliği etkileyebilir. Herhangi bir araştırmanın temel amacı, yeni veya çevre dostu bir ürün keşfetmektir. Bu açıdan bakıldığında geopolimer beton çok yönlü bir malzemedir ve aynı zamanda PÇ betonu ile karşılaştırıldığında uygun maliyetlidir. Geopolimer betonun kullanılması, inşaat sürecini hızlandırmaya yardımcı olacak ve ayrıca uzun vadede ekonomik olduğunu kanıtlayacaktır (Thaarrini vd., 2016).

Geopolimer beton ve Portland çimentolu betonun üretim maliyetlerini kıyaslamak için sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak aynı kalitede 1 m³ geopolimer beton ve Portland çimentolu beton üretilmiştir. Portland çimento betonu için toplam üretim maliyetinin 109.59 dolar olduğu ve bu maliyetin %53.38'lik kısmını çimento üretim maliyeti oluşturmuştur. Geopolimer beton üretim maliyetine bakıldığında ise toplam üretim maliyetinin 79.22 dolar olduğu görülmüştür. Üretilen beton türleri arasında karşılaştırma yapıldığında geopolimer beton için metreküp başına üretim maliyetinin, Portland çimentolu betona göre %27.71 daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu karşılaştırma geopolimer betonun daha ekonomik bir beton olduğunu ortaya koymuştur (Oyebisi vd., 2019).

PÇ ile karşılaştırıldığında, geopolimerler aşağıdaki özelliklere sahiptir;

- Bol hammadde kaynakları: Alkali çözeltilerde kolayca çözülen herhangi bir puzolanik bileşik veya alümino-silikat kaynağı, geopolimer üretimi kaynağı olarak yeterlidir.
- Enerji tasarrufu ve çevre koruma: Geopolimerler büyük enerji tüketimi gerektirmez. Nispeten düşük sıcaklıkta doğal alümino-silikatların ısıl işlemi, uygun geopolimerik hammaddeler sağlayarak portland çimentosundan %60 daha az enerji tüketir.
- Basit hazırlama tekniği: Geopolimer, alümino-silikat reaktif malzemelerle kuvvetli alkali çözeltilerin karıştırılması ve ardından oda sıcaklığında kürlenmesiyle basitçe sentezlenebilir. kısa sürede yeterli dayanım gösterir.
- İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler, portland çimentosundan %80 daha düşük büzülme özelliğine sahiptir.
- Kısa sürede yeterli dayanım kazanımı: Geopolimer, prizinin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının %70'ini elde edebilir.

- Ultra-mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton veya harç, çok fazla fonksiyon kaybına uğramadan binlerce yıllık hava koşullarına karşı koruma sağlayabilir.
- Yüksek yangın direnci ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimer 1200°C'ye yapısında bozulma olmadan dayanabilir. Geopolimerin ısı iletkenliği 0.24- 0.3 W/m.K arasındadır ve bu yönüyle hafif tuğlaların ısı iletkenliğinden daha azdır (Li vd., 2004).

2.1.4 Geopolimer betonun dezavantajları

Geopolimer betonun dezavantajları şöyledir (Zerfu ve Ekaputri, 2016):

- Geopolimer üretiminde kullanılan alkali çözeltisi pahalıdır. UK çimentoya göre daha ekonomik olsa da, alkali çözeltinin maliyeti toplam maliyetin %60'dan daha fazladır.
- Geopolimer betonlar kırılğan yapıya sahip olduğu için yüksek darbe yükü sonucu geniş yayılma çatlakları oluşabilir. Bu durum maksimum yüke vardığında herhangi bir uyarı vermeden kırılabileceğini gösterir. Bu nedenle pratik yapıda uygun olamayabilir.
- Erken yaşlarda dayanım en çok kürlenme şartlarına bağlıdır. Geopolimer betonun dayanım kazanması için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulur. Bu nedenle yüksek sıcaklığın ve stabil nem durumunun olmadığı ülkelerde yerinde beton dökülmesini engelleyebilir. Ancak tropikal ülkelerde bu engel olmayabilir ve tabi olarak kür edilebilir.

2.1.5 Geopolimerlerin kullanım alanları

Son yıllarda, Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olması bakımından geopolimer betonun mühendislik, termal, mikro-yapısal ve dayanıklılık özelliklerini araştırmak için dünya genelinde birçok araştırma ve geliştirme çalışması yapılmıştır. Önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar, geopolimer betonun sıradan Portland çimentosu betonundan daha iyi mekanik dayanım ve dayanıklılık özellikleri sergilediğini göstermiştir. Günümüzde geopolimer beton, normal dayanımlı betona göre yapısal ve ekonomik faydaları nedeniyle yüksek binalar ve köprüler gibi büyük inşaat işlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Neupane vd., 2018). Kısa zamanda, ön üretilmiş yapı elemanları ve güverteler gibi yapılar için geopolimer beton uygulamaları olmasının yanı sıra geopolimer-fiber kompozitlerinin kullanılması yapısal güçlendirmeler için büyük bir uygulama alanı olmuştur. Geopolimer teknolojisi, hassas malzemelerin (örneğin, yüksek alkali aktive edici çözeltiler) işlenmesinde kolaylık sağlaması ve geopolimer betonun kür şartlarının iyi olması

nedeniyle ön üretimli yapı elemanları uygulamalarında en ileri düzeydedir. Geopolimerlerin diğer potansiyel uygulamaları, kaldırım, tuğla ve levhalardır (Mo vd., 2016).

Geopolimerler yüksek dayanım özelliği, yüksek sıcaklıklara direnç göstermesi, maksimum mukavemeti ve hızlı priz yapması gibi özelliklerinin olmasından dolayı atık arıtmada, yangın dayanıklılığında, inşaat ve askeri mühendislikte ve ayrıca biyomalzemelerde kullanılmaktadır (Yao vd., 2009).

Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları şunlardır (Vickers vd., 2015);

İnşaat kullanım alanları;

- Tünel kaplaması
- Kanalizasyon arıtması, setler için kimyasal direnç, döşeme kaplaması
- Güneş enerjili ısı transfer elementleri
- Lağım suyu, kanalizasyon boruları
- Gaz ve petrol kuyu dibi çimentolaması
- Mevcut geleneksel portland çimentolu yapılar, ahşap ve çelik için ısı dayanım kaplamaları
- Demiryolu traversleri

Askeri kullanım alanları;

- Yangına dayanıklı yakıt depolama
- Cephane depolama yerleri
- Egzoz gazı termal yalıtımı, düşey kalkış ve iniş rampaları, zırhlanmış araçlar, askeri gemilerin türbin motor egzozu
- Askeri denizcilik: yangına dayanımlı bileşenler

Zararlı atık yönetimi;

- Su saflaştırması
- Toksik metal enkapsülasyonu
- Nükleer atık depolaması

2.2 Yüksek fırın cürufu

Doğada bulunan bazı kayaçlar yapısında demir cevheri içerir. Bu kayaçlar büyük sanayi tesislerinde bulunan ve yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda demir cevherinin eritilmesini sağlamak için 1400°C'lere kadar ısıtılır. Eriyen ve kızgın hale gelen bu demir cevheri, yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle fırın içinde aşağı yönde bir eğilim göstererek akar. Eriyen demir işlenmesi için demir çelik üretiminin yapıldığı alanlara gönderilir. Yüksek fırınlarda kayaçların ısıtılması ve demir cevherinin ayrışması sonucunda ana kayacın atıkları kalır. Artık olarak kalan bu kalıntıların soğuma işlemi için bir müddet beklenilir ve daha sonra boyutları 2 mm ile 5 mm arasında değişen ve kum görüntüsüne benzeyen malzeme elde edilir. Elde edilen bu malzemeye YFC denir (Uğurlu, 2015).



Şekil 2.6 : Yüksek fırın cürufu türleri (Engin, 2015).

2.2.1 Yüksek fırın cürufunun tarihçesi

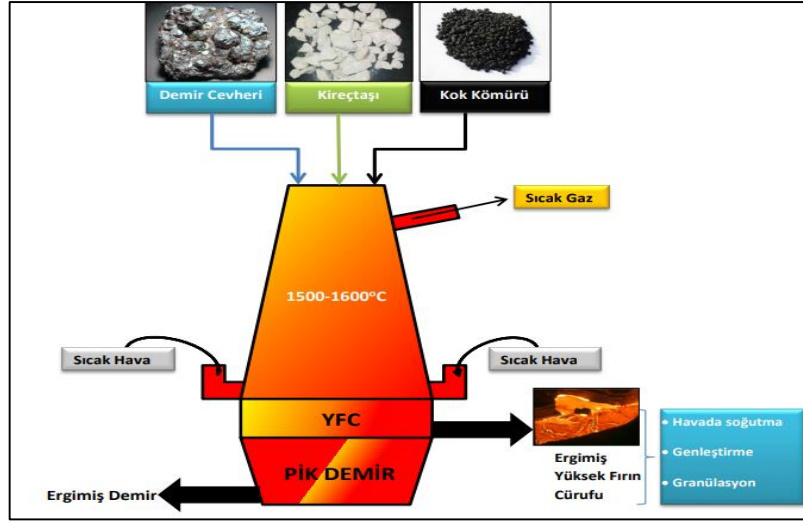
Puzolanların tarihi eski çağlara kadar uzanmaktadır. Romalılar döneminde yaşayanlar, pişirilmiş kil, öğütülmüş tuğla yada kiremidin puzolanik malzeme özelliği gösterdiği farkına varmışlardır. Romalılar tarafından volkanik külü, volkanik küllü toprağı veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirilmesiyle, su altında da sertleşebilen bağlayıcı üretilmiştir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları yerleştirilerek, günümüzdeki betona benzer betonlar üretilmiştir. Osmanlılar döneminde ise çoğunluk tarafından kullanılan “Horasan harcı” da kil kullanılarak yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş haldeyken söndürülmüş kireçle karıştırılması sonucunda meydana getirilmiştir (Alpaslan, 2012). Puzolanlar doğal ve yapay puzolanlar olarak ayrılmaktadır. Yapay puzolanlardan biri YFC’dir. 1862 yılında Alman bir araştırmacı olan Emil Largens tarafından YFC’yi granüle hale getirmesiyle birlikte YFC ile ilgili çalışmalar başlamıştır. İlk defa 1865 yılında Almanya’da bulunan bir fabrikada YFC esaslı çimento üretilmiştir.

Üretilen bu çimento ticari olarak üretimine ilk kez 1892 yılında Almanya’da daha sonra ise 1896 yılında ABD’de başlanmıştır. Ayrıca 1889 yılında Paris’te yapılan bir yeraltı metrosunda kullanılmıştır. 1950 yılına gelindiğinde ise beton katkı malzemesi olarak çeşitli ülkelerde kullanılmaya başlanılmıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Türkiye’de ise cüruf son dönemlerde önemli bir bağlayıcı malzeme olmuştur. Kocaeli ilinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından lisanslı olan cüruf depolama tesisi bulunmaktadır. İzmir’de ise cürufun büz boru, parke taşı üretimi ve agrega temini için yine bakanlık lisanslı geri dönüşüm tesisi mevcuttur (Uysal ve Bahar, 2018). Türkiye 2006 yılı sonunda 23 milyon ton üretim kapasitesiyle dünya çelik üretiminde 11. sıradadır. Dünyada demir çelik üretimi 1244 milyon tondur ve bu üretimin % 1.87’si ülkemizde gerçekleşmektedir (Topçu ve Canbaz, 2008). Ülkemiz demir çelik endüstrisinde son 15 yıllık zaman diliminde kapasite ve üretim artış hızı bakımından önemli bir yere sahiptir. Ham çelik üretme kapasitesi 2000 yılında yaklaşık 20 milyon ton olan ülkemiz 2013 yılı sonunda bu miktarı 50 milyon ton seviyesine yükselterek, dünya ham çelik üretimi sıralamasında 8. sırada yer almıştır. Ayrıca Türk demir çelik sektörü üretim faaliyetleri açısından büyük oranda cüruf olduğundan en büyük atık üreticisidir (Kürklü, 2016).

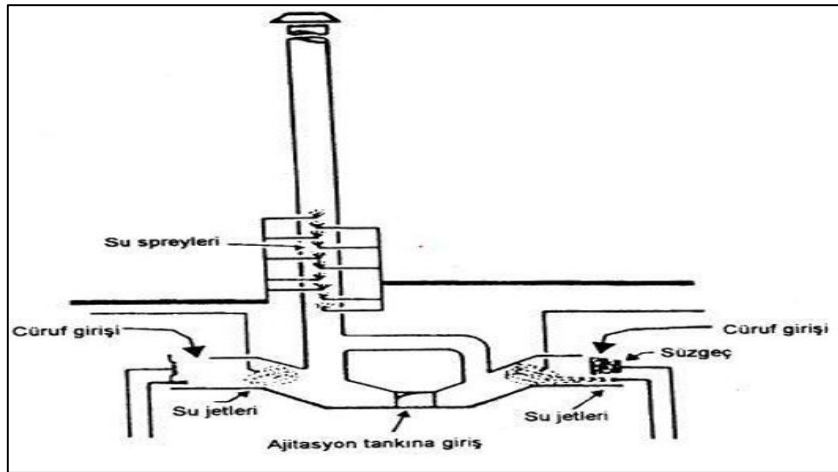
2.2.2 Yüksek fırın cürufunun üretimi

YFC demir çelik fabrikalarında demir üretimi sırasında oluşan atık bir yan üründür. Demir üretim işleminde demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü hammadde olarak kullanılmaktadır. Kullanılan hammaddelerden biri olan demir cevheri, demir oksit ile beraber silis, alümin ve kükürt gibi demir dışında maddeler de bulundurmaktadır. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen işlemlerde bu maddeler ayrışır. Bu aşamada kireçtaşı yardımcı bir malzeme olarak görev alır ve gerekli olan yakıt kok kömüründen karşılanır. Yüksek fırınlarda sıcaklık 1600 °C’lere varmaktadır. Bu sıcaklık neticesinde eriyen malzemeler altta pik demiri, üstte ise cüruf olarak fırının alt kısmında birikir (Engin, 2015). YFC temelinde silis, kalsiyum alümina silis ve bazik bileşikler olan ve fırınlarda demir üretimi esnasında ergimiş olarak elde edilen bir üründür. YFC’nin kimyasında esas olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ bulunmaktadır. Ancak cürufun kimyasal bileşimi önemli olduğu kadar kristal yapısı da önemlidir (Dorum vd., 2009).

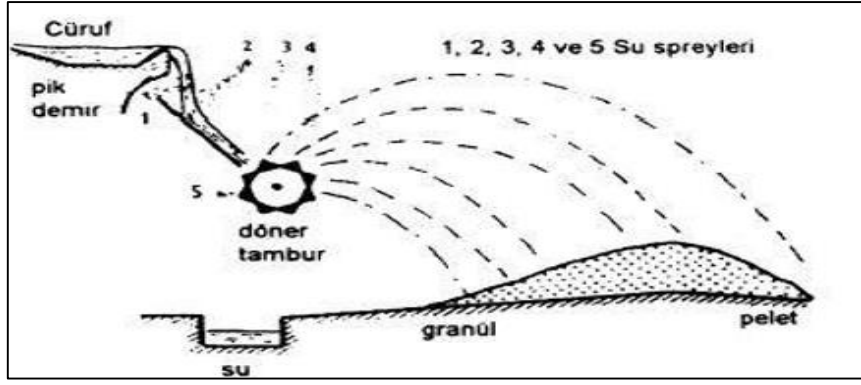


Şekil 2.7 : Yüksek fırın cürufunun üretim aşaması (Engin, 2015).

Yüksek fırından alınan ve atık bir malzeme olan cüruf eğer havada soğuma işlemi yapılırsa kristal bir hal alır. Ancak soğutma işlemi suya dökülerek veya başka bir yöntemle soğutulursa amorf bir yapıya dönüşür ve iri kum tanesi boyutunda granüle hale gelmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). YFC'nin soğutma işleminde granülasyon yöntemi ve peletleme yöntemi olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır. Granülasyon yönteminde cürufun soğutulmasında yüksek oranda su ihtiyacı gerekmektedir. Bu yöntem kullanılarak üretilen cürufun özellikleri iyi durumdadır. Ancak yöntemin maliyetinin yüksek olması nedeniyle bu yöntemin kullanımı sınırlıdır. YFC'nin soğutulması için uygulanan diğer yöntem olan peletleme yöntemi Kanada'da geliştirilmiştir. Peletleme yönteminde yarı kuru haldeki cüruf ilk işlem olarak su yardımıyla soğutulur ve daha sonra 300 devir/dk hızla dönen tambur yardımıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde daha az su kullanımına ihtiyaç vardır (Tokyay ve Erdoğan, 2009).



Şekil 2.8 : Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009).



Şekil 2.9 : Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

2.2.3 YFC esaslı bağlayıcılar

Demir yapımında bir yan ürün olarak oluşan YFC metalürjik cüruf türlerinden biridir. Başlıca bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO olan YFC inşaat sektöründe çimento yerine kullanılmaktadır. İnce öğütülmüş YFC'nin çimento yerine kullanılması teknolojik, ekonomik ve ekolojik açıdan önemli bir uygulamadır. Betonun mekanik özelliklerini ve zayıf asitlere ve tuzlara karşı direncini iyileştirir (Václavík vd., 2012).

Kılınç vd., (2017) yaptıkları çalışmada YFC ve UK kullanarak ürettikleri geopolimer betonlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmada ağırlıkça %4, %10 ve %20 oranlarında YFC'yi, UK ile yer değiştirmişlerdir. Geopolimerleri aktive etmek için 12 M KOH çözeltisi hazırlamışlardır. Agregası olarak ise ince agregası ve boyutu 12 mm-20 mm arasında değişen kırmataş kullanmışlardır. Numune boyutları 15 cm olan geopolimerler laboratuvar ortamında havada kür edilmiştir. 7 ve 28 gün kür süresi sonunda dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda YFC oranının artması basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini ve maksimum basınç dayanımının bu numunelerde görüldüğünü belirtmişlerdir.

Ben Haha vd., (2011) yaptıkları çalışmada YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Geopolimerleri aktive etmek amacıyla NaOH ve sodyum metasilikat olmak üzere iki ayrı aktivatör kullanmışlardır. Geopolimer numuneleri deney zamanına kadar oda koşullarında kür etmişlerdir. Geopolimer betonlara dayanım, SEM ve XRD testleri yapmışlardır. Numunelerin ilk 1 günlük kür sonrası basınç dayanımını test etmişlerdir ve bu süre sonunda yalnızca NaOH ile aktive edilen numunelerde basınç dayanım değeri görülmüştür. Kür süresi 7 günü tamamlayan numunelerde de yine NaOH ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımı maksimum olmuştur. Ancak 180 gün kür sonrası maksimum basınç dayanımı sodyum metasilikat ile aktive edilen YFC'li geopolimer betonlardan elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda araştırmacılar NaOH ile aktive edilen geopolimerlerin daha erken dayanım olurken, sodyum metasilikat ile aktive edilen geopolimer betonların nihai dayanımının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Deb vd., (2014) yaptıkları çalışmada YFC ve UK kullanarak geopolimer harç üretmişlerdir. Geopolimer harçlar hazırlanırken %10 oranında UK ile %20 oranında YFC'yi yer değiştirerek kullanmışlardır. Çalışmada sodyum silikat/sodyum hidroksit oranını sırasıyla 1.5 ve 2.5 olarak belirlemişlerdir. Geopolimer numuneler ortam şartlarında 23°C ve %70 bağıl nem altında kür edilmişlerdir. Çalışma sonucunda YFC oranı fazla ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı düşük olan numunelerde maksimum dayanım ve işlenebilirlik olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda 180 güne kadar cüruf içeriği artıka dayanımda paralel olarak arttığını ifade etmişlerdir.

Cheng vd., (2003) yaptıkları çalışmada YFC ve metakaolin bağlayıcıları ile geopolimer üretmişlerdir. Çalışmada geopolimerleri aktive etmek amacıyla KOH ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucu araştırmacılar sıcaklık etkisinin, KOH yoğunluğunun ve Na₂SiO₃ oranının geopolimerlerin priz olma zamanları üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca YFC içeren geopolimerlerin 79 MPa değeriyle en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bunun yanı sıra KOH aktivatörünün kullanılmasının da yangın dayanımında olumlu etkileri olduğunu ifade etmişlerdir.

Altundal., (2019) yapmış olduğu tez çalışması kapsamında geopolimer beton ve PÇ betonun durabilite özelliklerini kıyaslamak için çalışma yapmıştır. Çalışmada geopolimer beton üretiminde UK ve YFC bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada 3 ayrı oranda, %100 UK, %50 UK ile %50 YFC ve %100 YFC bağlayıcılarını kullanmıştır. Geopolimer betonları aktive etmek amacıyla NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatör olarak belirli oranlarda karıştırılıp kullanılmıştır. Ürettikleri geopolimer ve PÇ betonları %5 H₂SO₄ çözeltisine bırakmıştır. Çalışma sonucunda geopolimer betonların daha iyi dayanım sağladığını belirtmiştir. Ayrıca %50 UK ile %50 YFC karışımında en iyi dayanım elde edilirken, %100 UK içeren geopolimerlerde ise en olumsuz dayanım elde edilmiştir.

Bernal vd., (2011) yaptıkları araştırmada YFC bağlayıcılı geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada silis modülü 2.4, %5 Na₂O ve su/bağlayıcı oranı ise 0.42 olacak şekilde karışım hazırlanmıştır. Geopolimer beton numunelerine 25°C sıcaklıkta ve %90 bağıl nem altında 28 gün ve 90 gün kür edilmişlerdir. Araştırmacılar geopolimer beton numunelerinin 28 ve 90 gün sonunda YFC oranlarının artmasıyla dayanımın arttığını belirtmişlerdir.

Altındal, (2020) yaptığı tez çalışmasında UK ve YFC'yi bağlayıcı olarak kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak ise NaOH ile Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Çalışmada 3 ayrı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar %100 YFC, %75 YFC ile %25 UK ve %50 YFC ile %50 UK olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada kür şartlarının araştırılması amacıyla 13 ayrı kür uygulanmıştır. Çalışma sonucunda kür şartlarının dayanımı etkilediği bulunmuştur. Ayrıca en fazla dayanım %100 YFC içeren betonlarda bulunmuştur. Araştırmacı bunun nedenini YFC'de bulunan yüksek oranda CaO bulundurmasından kaynaklandığını bildirmiştir.

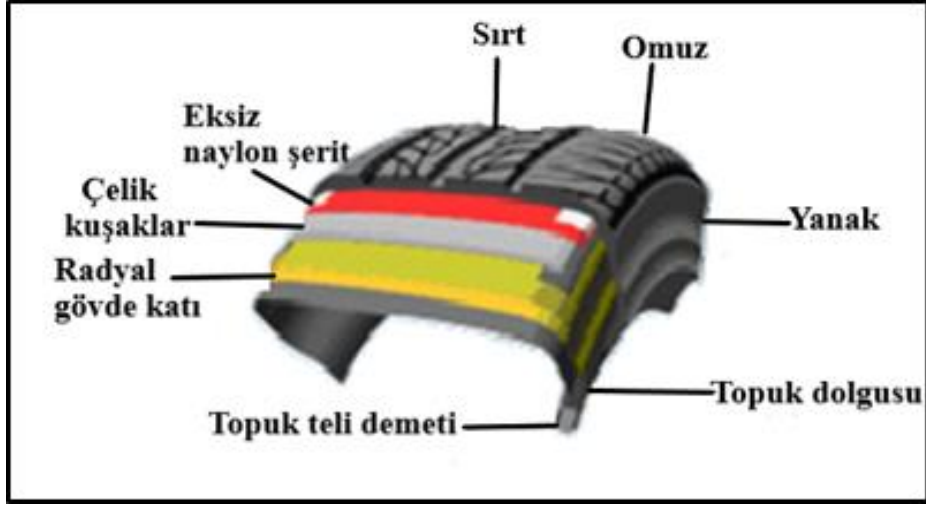
Chi ve Huang., (2013) UK ve YFC bağlayıcılarını kullanarak harç üretmişlerdir. Alkali kullanılarak aktivasyon işlemi gerçekleştirilen harçların farklı miktarlarda YFC ve UK kullanılmasını incelemişlerdir. Üretilen harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı, su emme ve eğilme dayanımı testleri uygulamışlardır. Aynı zamanda portland çimentolu harçlar üretilerek de bu numuneler arasında kıyaslama yapmışlardır. Çalışma sonucunda YFC ve UK oranı %50 olan numuneler maksimum dayanım göstermişlerdir. Portland çimentolu harçlara göre dayanımları kıyaslandığında ise oldukça yüksek dayanım değerleri elde etmişlerdir.

2.3 Atık lastik

2.3.1 Atık lastiğin yapısı

Araç lastiklerin yapısında mukavemeti sağlamak amacıyla naylon ve polyester gibi elyaf kordonlarla beraber topuk dayanımını sağlayan çelik kordonlar bulunur. Birbirinden farklı özellikleri olan malzemelerin bir arada tutulmasını ve lastiğin zeminle temasını sağlayan lastik karışımıdır. Lastik karışımı doğal ve sentetik kauçuk malzemelerden, ana dolgu olarak ise karbon siyahından oluşur. Yapısında bulunan kimyasal yağların amacı karışımın işlenmesi ve homojenliğini sağlamaktır. Araç lastikleri her birinin kendine göre işlevleri olan çeşitli kısımlardan oluşur. Bunlar sırt, omuz, kuşak ve yanaklardır. Kuşaklar ve gövde kısımları lastiğin şeklinin bozulmasını önler.

Kuşaklar yüksek karbonlu çelik tellerden oluşan kauçuk katmanı oluşturur. Yanaklar ise iki taraftan dış lastiğe tutturulur. Böylece jant ile lastik arasındaki ara yüzü güçlendirerek lastiğin yapısal bütünlüğüne katkı sağlar (Doğan vd., 2019).



Şekil 2.10 : Lastiğin yapısı (Ünlü, 2006).

Atık araç lastikleri yapısında birçok kimyasal madde içermektedir. Bu kimyasal maddelerin kütlece yüzdeleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Atık otomobil lastiklerin ortalama bileşimi (Batır, 2002).

Bileşen	Kütlece miktar (%)
Kauçuk	47,0
Karbon siyahı	21,5
Metal	16,5
Katkı maddeleri	7,5
Tekstil elyaf	5,5
Çinko oksit	1,0
Kükürt	1,0

2.3.2 Atık lastiklerin çevresel sorunu

Ülkemizde sanayileşmenin hızlanması ve doğal kaynakların bilinçsiz bir şekilde kullanılması son zamanlarda çevre kirliliğinin artmasına neden olmuştur. Motorlu araç sayısındaki artış ve bunun sonucunda ortaya çıkan atık araç lastiği çevre kirliliğini beraberinde getirmiştir. Bu sorun tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de çözüm beklemektedir. Bir adet kamyon lastiği üretiminde yarım varil ham petrole gereksinim vardır. Eğer lastiklerin bakımı doğru bir şekilde yapılırsa yeni lastik üretimi için kullanılan ham madde ve enerjiden tasarruf edilebilir. Böylece lastik üretimi sonucu meydana gelen hava kirliliği önlenir. Atık lastikler kontrolsüz yangınlara neden olmaktadır ve bu

yangınları kontrol altına almak zordur. Bir lastik ortalama 9,5 litre yağ içermektedir. Lastiklerin yüksek oranda yağ içermesi bu yangınların aylarca sürmesine, zehirli gazların açığa çıkmasına neden olmaktadır. Lastik yangınlarının söndürülmesinde köpük veya su kullanılması da hava, su ve toprak kirliliğine sebep olur. Ayrıca atık lastikler sivrisineklerin yaşaması ve üremesi için ortam oluşturur. Oluşan bu ortam sonucunda sivrisineklerden bulaşan salgın hastalıklara ve şiddetli çocuk hastalıklarına sebep olmaktadır (Aile ve Tüketici Hizmetleri Atık Lastikler, 2011).



Şekil 2.11 : Atık lastik yangınları (Ağaçkesen, 2018).

Petrol türevli maddeler içeren atık lastiklerin enerji değerleri yaklaşık olarak kaliteli bir kömürün enerji değerine eşittir. Fosil yakıt kaynaklarının hızlı bir şekilde tüketilmesiyle beraber atık lastikler alternatif bir yakıt kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Yüksek enerji içerikleri nedeniyle söndürülmesi zor yangınlara neden olurlar. Bu yangınlar insan sağlığını bozabilir, bitki ve hayvan yaşamını olumsuz etkileyebilir ve hatta bazı canlıların ölümüne sebep olabilir. Atık lastiklerin yönetimi konusu gelişen veya gelişmekte olan bütün ülkelerin sorunu hale gelmiştir. Çünkü küresel ısınma ve bunun neden olduğu çevre sorunları endişe vericidir. Atık lastiklerin doğada kendini yok etmesi uzun zaman almaktadır. Bu nedenle ekonomik açıdan güçlü olan ülkeler, atık lastiklerin neden olduğu zararlı çevresel etkileri önlemeyi amaçlamışlardır. Bu çevresel sorun için geri kazanım yolunu en önemli yöntem olarak görmüşlerdir (Yozcu, 2019).

2.3.3 Atık lastiklerin kullanım alanları

Günümüzde atık lastikler birçok alanda kullanılmaktadır. Atık lastikler günlük hayatta park ve koşu alanlarının yüzey kaplamasında, oyuncak yapımında, gemi yanaşma noktalarında bariyer ve dalga kırıcı ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra mühendislik uygulamalarında drenaj yeteneklerinin yüksek olması ve birim hacim ağırlıklarının düşük olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Şevlerde toprak kaymasını engellemek amacıyla kullanılır. Ayrıca ısı yalıtımları yüksek hafif bir malzeme oldukları için, istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Aktürk, 2018).

Atık lastikler, düşük birim ağırlıkları nedeniyle hafif agregalar olarak değerlendirilmekte ve zemin dolgusunda kullanılmaktadır. Düşük birim ağırlık, iyi yalıtım özellikleri ve yüksek tokluk gibi avantajlı özelliklerinden dolayı asfalt ve beton agregaları olarak da kullanılırlar. Ayrıca dalga kırıcılarda ve demiryollarında amortisör olarak kullanılırlar. Öte yandan atık malzemeler ayrıca erozyon kontrolü, otoyollarda gürültü bariyerleri, bataklık iyileştirme, yol dolgularında zemin kaplama malzemesi, sıcak karışım asfalt kaplamalarda modifiye malzeme, yürüyüş yollarında ve binalarda sismik izolatörler olarak da kullanılabilir. Son yıllarda, beton sektöründe lastik atıklarının kullanımını araştıran bir dizi çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar özellikle ufalanmış ve toz haline getirilmiş atık lastiklerin farklı boyut ve şekillerde kullanımına odaklanmıştır (Koçak vd., 2012).

2.3.4 Dünyada ve ülkemizde atık lastik

Kullanılmış lastiklerle ilgili atık sorunu, bir çevre kirliliği kaynağı olarak bugün dünyanın karşı karşıya olduğu sorunlardan biridir. Dünya yılda yaklaşık 1,5 milyar atık lastik üretiyor ve bunun %40'ı Çin, Hindistan, Güney Amerika, Güneydoğu Asya, Güney Afrika ve Doğu Avrupa gibi ülkeler oluşturmaktadır. Elde edilen verilere göre, atık lastik oluşumu 1990 yılında %11 iken 2005 yılında %87'ye çıkarak büyük bir artış göstermiştir (Shtayeh vd., 2010). Katı atıklardan biri olan atık lastiklerin geri kazandırılması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda İngiltere'de her yıl 20 milyon araç lastiği geri dönüşüme kazandırılmış ve elde edilen kauçuklar yeni lastik üretiminde kullanılmıştır. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) verilerine göre Amerika'da her yıl yaklaşık 242 milyon atık araç lastiği oluşmaktadır ve yaklaşık 2-3 milyar atık araç lastiği depolarda birikmiştir. Kore'de ise 1998 yılından bu yana yılda 20 milyona yakın atık araç lastiği oluşmakta ve oluşan bu atık lastikler geri dönüşüme kazandırmak için çimento katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Demir, 2021).

Önemli bir kauçuk malzeme kaynağı olan atık araç lastikleri kesinlikle değerlendirilmesi gereken bir atıktır. Türkiye’de yılda 200 bin ton civarında, Avrupa Birliği Ülkelerinde ise 2008 yılında elde edilen verilere göre yaklaşık 3,2 milyon ton atık lastik oluşmaktadır (Karabörk ve Akdemir, 2013). Atık sahalarında stoklanan bu lastikler aynı zamanda hava, su ve toprak kirliliği nedeniyle çeşitli sağlık riskleri, çevresel ve ekonomik riskler oluşturmaktadır. Her yıl milyonlarca lastik kullanım ömrünün sonuna ulaşmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre 2007-2012 yılları arasında “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” kapsamında 337 bin 700 ton ömrünü tamamlamış lastik mevcuttur ve yaklaşık 210 bin ton lastik toplanmıştır. Bu lastiklerin geri dönüşüm tesislerinde malzeme geri dönüşümü için, yaklaşık 140 bin tonu ise çimento ve enerji tesislerinde enerji geri dönüşümü için kullanılmıştır. Bakanlığın teşvikleri, sosyal sorumluluk projeleri ve çalışmaları ile 2014 yılında sadece 120 bin ton ömrünü tamamlamış lastik toplanarak geri dönüşüme kazandırılmıştır. Lastik Sanayicileri Derneği verilerine göre 2017 yılı sonunda 765 ton ömrünü tamamlamış lastik geri dönüşüme kazandırılmış olup, 2018 yılı sonunda bu miktarın 935 bin tona ulaşması beklenmektedir. Buna ek olarak 2007 yılında geri dönüşüm tesisi sayısı üç iken bugün bu sayının 24’e ulaştığını belirtmiştir (Cemalgil ve Etlı, 2020).

2.3.5 Betonda atık lastik kullanımı

Atık lastiklerin beton içerisinde agrega olarak kullanılma fikri son zamanlarda popüler çalışma alanı olmuştur. Beton üretiminde kullanılan normal agrega yerine hacimsel olarak kauçuk ile yer değiştirilmesi ekonomik olarak avantaj sağlamaktadır. Kauçuklu beton ile geleneksel beton kıyaslandığında kauçuklu beton düşük birim ağırlığa sahip olma, yüksek tokluk ve yalıtım özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Ancak lastik oranı ve boyutu arttıkça dayanımda azalma görülmektedir. Atık lastik kullanımı ile ilgili çeşitli literatür çalışmaları mevcuttur (Öztürk, 2016). Her ne kadar lastik kauçukların betonlarda kullanılmasıyla ilgili literatür çalışması olsa da yapı uygulamalarında kullanılmadan önce araştırılması gereken bir konudur. Atık lastik kauçukların betonun dayanımını azalttığı ortaya çıksa da betonun esneklik ve tokluk gibi özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir (Kızar, 2017). Otomobil endüstrisinden geri dönüştürülen atık kauçuğun, hafif yapı malzemeleri geliştirmek için çimentolu matriste ince agregalar olarak potansiyel kullanımı mevcuttur. Lastik kauçuğun su yayılmasını önleme eğiliminde olması ve su emilimini azaltması beton için önemli bir avantajdır. Ayrıca korozyona karşıda olumlu etkileri vardır. Lastik kauçuğun betondaki diğer avantajı ise ses enerjisini emdiği yönünde olumlu etkisidir (Aiello ve Leuzzi, 2010).

2.3.6 Atık lastik ile ilgili çalışmalar

Sarkaz (2020) yaptığı tez çalışması kapsamında 800 kg/m^3 YFC'yi sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive ederek geopolimer beton üretmiştir. Çalışmada atık lastik boyutu 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm ve 0-4 mm olmak üzere ve %0, %5, %10, %15 oranlarında atık lastiği agrega ile yer değiştirmiştir. Toplamda 13 grup olarak üretilen geopolimer beton numuneleri 28 gün sonunda su emme oranı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı özelliklerini incelemiştir. Ayrıca geopolimer beton numunelerin 300°C , 600°C ve 900°C sıcaklıkta dayanım özelliklerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda farklı boyutlarda atık lastik kullanımının dayanımı etkilediği ve atık lastik ikamesinin basınç dayanımını azalttığı sonucuna varmıştır. Ayrıca atık lastik oranı arttıkça beton numunelerin su emme oranını azalttığını belirtmiştir.

Yeluri ve Yadav., (2020) yaptıkları çalışmada yanmış pirinç kabuğu külü, UK ve granüle YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada 1-4 mm ve 2-4 mm boyutlarındaki atık lastiği %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ince agrega ile yer değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda %15 atık lastik kullanımının basınç dayanımını %60 oranında azalttığı bulunmuştur.

Mousa (2017) yaptığı çalışmada iki grup beton kullanmıştır. İlk grup, çimento ile üretilen dört karışımdan oluşmuştur. Çalışmada 500 kg çimento, 0,3 su-bağlayıcı oranı, iri agrega olarak çakıl ve çimento ağırlığının yerini alan %0, %10, %15 ve %20 silis dumanı kullanılmıştır. İkinci grupta ise beton formülasyonu, çimento yerine %20 silis dumanı ile birlikte %0, %3, %5 geri dönüştürülmüş ince lastik kauçuk (2 mm) ve %3 iri lastik kauçuk (5 mm) kullanılarak üretilmiştir. İkinci grupta lastik kauçuk içeren beton karışımlarının yüksek sıcaklıkta performansını artırmak için iri agrega olarak dolomit kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çimentonun %20'ye kadar artan silis dumanı içeriği ile yangına karşı yüksek direnç göstermektedir. Dolomit ve %3 geri dönüştürülmüş lastik kauçuk (2 mm, 5 mm) kullanılarak ek iyileştirme elde edilmiştir.

Aly vd., (2019) yaptıkları çalışmada öğütülmüş YFC, atık lastik kauçuk, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanarak geopolimer beton üretmişler ve bu geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada atık lastik kauçuğu hacimce %0, %10, %20 ve %30 oranlarında olacak şekilde agrega ile yer değiştirmişlerdir. Karışımlar için agregalar, toplam agrega ağırlığının %35'i oranında doğal kum ile kırılmış dolomit ve doğal kum kombinasyonundan oluşmuştur. Beton numuneler 28 ve 60 gün kür edildikten sonra basınç

dayanım ve eğilme dayanımı testi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda basınç dayanımı %10 atık lastik kauçuk kullanılan numunelerde artmıştır. Ancak bu orandan sonra basınç dayanımı atık lastik kullanım oranına paralel olarak azalmıştır. Ayrıca eğilme dayanımında atık lastik kauçuk oranına bağlı olarak atık lastik oranı arttıkça azalmıştır.

Aksoy (2021) yaptığı tez çalışmasında atık lastik katkılı polimer beton üretmiştir. Çalışmada beton içerisine atık lastiğe ek olarak polimer katkısı kullanmıştır. Çalışma kapsamında 0-4 mm inceliğinde atık lastik ince agrega ile yer değiştirerek hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında olacak şekilde betona katılmıştır. Aynı zamanda çimento hacminin %1, %2 oranlarında polyester ve stiren-bütadien polimeri kullanmıştır. Üretilen betonlar üzerinde dayanıklılık özelliklerini araştırmak için birim hacim ağırlık, su emme, donma çözülme ve basınç dayanım deneyleri yapmıştır. Çalışma sonucunda %1 stiren bütadien içeren betonların en dayanıklı beton olduğunu bulmuştur.

Doğan (2005) yaptığı tez çalışması kapsamında PÇ 42,5 çimento, kırma taş ve atık lastik kullanarak beton üretmiştir. Atık lastikleri %10, %15, %30, %45 hacim oranlarında kırmataş agrega yerine ikame ederek ürettiği betonların dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır. Betona lastik takviye edilmesiyle 28 günlük basınç dayanımının sırasıyla %23, %29, %50, %56 oranlarında azaldığını belirtmiştir. Beton numunelerinde yüklenme miktarı arttıkça normal betonların dağıldığı ancak atık lastik içeren numunelerde dağılma olmayıp çatlakların meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Ameri vd., (2020) yaptıkları çalışmada alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarında bakır cürufunu hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik kırıntı kauçuğu ile değiştirerek dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, kırıntı kauçuk agregaların 1 saat ve 24 saat sodyum hidroksit çözeltisi ile ön muamelesinin harç karışımlarının işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, ısı iletkenlik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, kırıntı kauçuğu kullanımı, kontrol karışımına kıyasla daha düşük işlenebilirlik ve mekanik mukavemet göstermiştir. Alkali muamelesi kauçuk bağlayıcı bağını desteklemiştir ve özellikle erken yaşlarda (%59'a kadar) karışımların gücünü etkili bir şekilde arttırdığını bulmuşlardır. Ancak 24 saat boyunca alkali muamelesi taze karışımın işlenebilirliğini büyük ölçüde azaltmıştır. Bu nedenle araştırmacılar kabul edilebilir bir performans elde etmek için 1 saat boyunca NaOH çözeltisine önceden batırılmış %10 kırıntı kauçuğu kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Çalışmada son olarak ekonomik ve ekolojik analiz yapmışlardır. Üretilen harcın çevreye faydalı olduğunu belirtmişlerdir.

2.4 Betonda donma çözülme olayı

Beton servis ömrü süresince fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalabilir. Maruz kalınan bu etkiler sonucunda beton zamanla performans kaybına uğrayabilir hatta dayanımını tamamen yitirebilir. Betonun tekrarlı donma çözülme etkisine maruz kalması fiziksel çevre etkileri arasındadır. Çimento hamuru, agrega, agrega-çimento kompozitlerinin boşluklu yapısında dolayı beton heterojen ve boşluklu bir yapıya sahiptir. Beton yapısındaki kılcal boşluklar çimento hamurunun geçirimsizliğine ve donma çözülme direncine etki eden esas etkenlerdendir. Betonda meydana gelen donma çözülme olayı ile ilgili çeşitli teoriler ortaya atılmaktadır. Kılcal boşluklardaki suyun bir miktarının donması sonucu donan suyun genişleyebileceği boş bir alan oluşur. Suyu doymuş olan bir betonda ise kılcal boşluklar su ile dolu olduğundan dolayı hacim artışı meydana gelir ve buz boşluk çeperlerine basınç yapar. Betonun bulunduğu ortam, sıcaklık değişimi, nem durumu ve suyun donma hızı donma çözülme şiddetini etkilemektedir. Eğer beton sürekli olarak donma çözülme etkisine maruz kalırsa betonda çatlama, yüzeyinde dökülmeler veya soyulmalar gözlemlenebilir. Donma çözülme etkisinin uzun süreli ve şiddetli olması sonucunda betonun kesiti boyunca çatlama oluşur. Donma olayı sonucunda betonda meydana gelecek hasarları belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Şengül vd., 2003).

Betonda meydana gelen donma çözülme olayı günlük hayatımızda bulunan her mekanda görülebilecek bir durumdur. Donma çözülme olayı şiddetli ve tekrar tekrar gerçekleşirse betonlar kısa zamanda hasar görür ve performanslarını kısa zamanla kaybederler. Soğuk çevre koşulları altında betonun kapiler boşluklarındaki su donar. Ancak betonun içinde bulunan su hava ortamında yani açıkta bulunan su gibi 0°C 'de donmamaktadır. Beton içindeki suyun yapısında bulunan çeşitli tuzlar nedeniyle beton kapiler boşluklarındaki su 0°C 'nin biraz altında donmaktadır. Suyun donma sıcaklığını etkileyen en önemli etken kapiler boşlukların boyutudur. Su büyük boşluklarda bulunursa 0°C veya biraz altındaki sıcaklıklarda donar, eğer su küçük boşluklarda bulunursa -15°C civarındaki sıcaklıklarda donmaktadır. Ancak betonun jel boşluklarında bulunan su jel boşluklarının çok küçük olması nedeniyle daha düşük sıcaklıklarda (-78°C) donmaktadır. Yani beton içerisinde bulunan suların donma derecesi tam belirgin değildir. Bu sular donduğu zaman suyun hacmi %9 artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda su yavaş bir şekilde donmaktadır. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda donma olayı aniden gerçekleşmemektedir. Kapiler boşlukların tamamı veya %91'i su ile dolu olduğu zaman ve donma olayı başladığı zaman hacim artışı meydana gelir. Bu hacim artışı nedeniyle boşluklarda bulunan ve henüz donmamış olan su hidrolik basınç

etkisiyle dışarı atılmaya çalışmaktadır. Boşluklardan atılmak istenen su, boşlukların çevresinde bulunan çimento hamurunun çatlamasına neden olacak büyük gerilmeler meydana getirir. Beton sıcaklığı artırıldığı zaman ise boşluklarda donan su çözülmeye başlayacak ve beton içerisinde meydana gelen gerilmeler ortadan kalkacaktır. Fakat donma çözülme olayının tekrarlı ve uzun sürmesi sonucunda bu olay yeniden gerçekleşecek ve beton hasar alacaktır. Betonda donma olayı başladığında kapiler boşluklarda bulunan henüz donmamış olan suyun oluşturduğu hidrolik gerilmelerin artmasına neden olan iki etken daha bulunmaktadır. Bu iki etkenden birincisi jel boşluklarındaki su ile buz tutmuş yani donmuş su arasındaki termodinamik dengesizliktir. Bu jel suyunun az miktarının kapiler boşluklara doğru yönelen suyun donmasına ve bunun sonucunda hidrolik gerilmelerin artmasına neden olur. İkinci etken ise dışarı çıkan sudan geriye kalan tuz ve benzeri maddelerin yoğunluğu ve osmotik basıncı arttırmasıdır (Nergiz, 2007).

Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada atık kırıntı kauçuğunu geopolimer betonlarda kullanmışlar ve bunun donma çözülme direncine etkisini incelemişlerdir. Geopolimer beton üretiminde bağlayıcılık özellikleri olan UK ve YFC ağırlıkça aynı oranlarda karıştırılmış ve Na_2SiO_3 ile NaOH aktivatörleri kullanılarak aktive edilmişlerdir. Agregada olarak ise nehir kumu ince agregada olarak, granit ise iri agregada olarak kullanılmıştır. Nehir kumu yerine hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kırıntı kauçuğu eklenerek 5 grup beton üretilmiştir. Aynı zamanda geopolimer betonlar ile OPC betonlar arasında da kıyaslama yapmak için aynı şartlarda OPC betonları da üretilmiştir. Üretilen bu betonlar 28 gün kür edildikten sonra sıcaklığın $20\pm 2^\circ\text{C}$ olarak ayarlandığı suya 4 gün boyunca suya daldırılmıştır. 4 gün sonra numuneleri sudan çıkartmışlar ve kurutmuşlardır. Kurutulan numuneleri donma-çözülme sıcaklığı -20 ile 5°C arasında değişen ve 2,5 ile 4 saat süren donma çözülme etkilerine bırakmışlardır. Çalışma sonucunda geopolimer betonların OPC betonlara göre daha iyi performans sergilediklerini görmüşlerdir. Aynı zamanda orta dereceli kırıntı kauçuk ilavesinin geopolimer betonların özelliklerini desteklediğini ve optimum değiştirme oranının %10 olduğunu, bunun da yüksek mukavemet ve iyi donma-çözülme direnci sağladığı sonucuna varmışlardır.

Bhavani vd., (2021) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak ağırlıkça %40 UK, %60 GGBS ve zeolit, alkali aktivatör olarak ise 12 M sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanarak kauçuklu geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada doğal iri agregada kısmi ikame olarak kauçuk talaşları, ince agregada yerine kısmi olarak kauçuk tozu kullanılmıştır. Bu karışım oranları UK yerine %5 zeolit, doğal iri agregada yerine %2.5 kauçuk talaşı ve doğal

ince agrega yerine ise ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık kauçuk tozu ile değiştirilerek belirlenmiştir. Üretilen betonların mekanik özelliklerini ve dayanıklılıklarını incelemiştir. Donma çözülme deneyi ASTM C666 standardına uygun olarak 28 gün boyunca yapılmıştır. Çalışma sonucunda üretilen bu betonların yüksek darbe direnci ve iyi donma-çözülme direnci özelliklerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Alsaif vd., (2019) yaptıkları çalışmada esnek beton kaplamalar için tasarlanmış çelik fiber ve kauçuk takviyeli betonların donma-çözülme performansını incelemiştir. Çalışmada ince ve kaba agrega yerine hacimce %30 ve %60 oranlarında lastik kauçuk kullanılarak donma çözülme direnci araştırılmıştır. Donma-çözülme performansı, yüzey ölçeklemesi, iç hasar, artık basınç dayanımı ve eğilme davranışı yoluyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çelik fiber takviyeli kauçuklaştırılmış betonların kabul edilebilir ölçeklendirme ile ve mekanik performansta iyi olduğunu ve hasar veya bozulma göstermeden 56 donma-çözülme döngüsüne dayanabildiğini göstermektedir. Çalışma sonucunda elde edilen verilere dayanılarak çelik fiber takviyeli kauçuklaştırılmış betonların aşırı donma-çözülme koşullarında iyi performans gösterebileceğini ve asfalt betonlarına sürdürülebilir bir alternatif olarak uzun ömürlü esnek kaplamalar inşa etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Pilehvar vd., (2019) yaptıkları çalışmada mikro kapsüllü faz değişim malzemesi içeren geopolimer beton (GPC) ve PÇ betonunun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelemiştir. UK ve granüle YFC kullanılarak üretilen geopolimer betonları sodyum silikat ve 14 M sodyum hidroksit ile aktive etmişlerdir. PÇ betonu için, su ve çimento oranı 0.35 olan su ve çimento, geopolimer ile aynı kıvamı elde etmek için 90 saniye boyunca karıştırılmıştır. GPC ve PÇ beton numuneleri 10x10x10 cm'lik kalıplara döküldükten sonra, 24 saat ortam sıcaklığında %90 bağıl nem bulunan ortamda kür edilmişlerdir. Kalıptan çıkarılan numuneler musluk suyunda 20°C'de 28 gün süreyle kür havuzunda bekletilmiştir. Donma-çözülme döngülerine başlamadan önce, kürlenmiş numuneler 1 saat yüzey suyunun uzaklaştırılmasına yardımcı olmak için açık havada bekletilmiştir. Daha sonra numuneler -20±1°C sıcaklıkta 18 saat derin dondurucuda bırakılmıştır. Numuneler 0, 7, 14 ve 28 donma-çözülme döngüsüne tabi tutulduktan sonra dayanımları test edilmiştir. Geopolimerlerin, Portland betonlara göre daha iyi basınç dayanımı sergilediğini ve mikro kapsüllü faz değişim malzemesi dahil edilmesinin basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu bulmuşlardır.

Aksoy (2021) yaptığı tez çalışmasında atık lastik katkılı polimer beton üretmiştir. Çalışmada beton içerisine atık lastiğe ek olarak polimer katkısı kullanmıştır. Çalışma kapsamında 0-4 mm inceliğinde atık lastik ince agrega ile yer değiştirerek hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında olacak şekilde betona katılmıştır. Aynı zamanda çimento hacminin %1, %2 oranlarında polyster ve stiren-bütadien polimeri kullanmıştır. Üretilen betonlar 28 gün kür edildikten sonra donma çözülme direnci incelenmiştir. Çalışma sonucunda 100 döngü donma çözülme etkisindeki beton numunelerin %0.5 ve %2.4 arasında ağırlık kaybettiğini ve basınç dayanımlarının %0.7 ve %31.7 arasında azaldığını belirtmiştir.

Nasser vd., (1992) yaptıkları çalışmada geopolimer beton üreterek donma çözülme etkisini araştırmışlardır. Çalışmada linyit UK'ü farklı miktarlarda katılarak ve hava boşluğu %4 ile %6 oranında olan karışımlar elde etmişlerdir. Donma çözülme etkisi ASTM tip 1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Beton numuneleri 80 gün süren donma çözülme etkisine bırakılmıştır. Donma çözülme etkisi sonrası deneyler yapılmış ve deney sonuçlarına göre %35 ve %50 oranında UK içeren numunelerde dahil olmak üzere %6 oranında hava boşluğu olmasına karşın donma çözülme etkisi sonrası dayanım kaybı olduğu görülmüştür. Ancak %20 oranında UK içeren numunelerin, içermeyenlere göre daha fazla dayanım değeri elde etmişlerdir.

2.5 Betonda sülfat etkisi

Yüksek dayanıklılık ve mukavemet özelliği ile ön plana çıkan beton, soğuk şartlarda açık deniz platformları veya toprak altında yapılan tehlikeli atık depoları gibi genellikle zor çevresel koşullardaki yapıların inşası için seçilen malzemedir. Zorlu ortamlarda inşaat talebi arttıkça, bu yapıların uzun ömürlü olma endişesi de artmaktadır. Genellikle beton yapılar, minimum bakımla 50 ile 100 yıl arasında zor çevresel şartlara dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Betondan, kimyasal ve radyoaktif atık muhafaza alanları veya şiddetli çevresel koşullara maruz kalan dayanıklı yapıların yapılması için kullanılması betonun ne kadar önemli bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır. Toprakta, yeraltı suyunda, deniz suyunda, çürüten organik maddede veya beton bir yapıyı çevreleyen endüstriyel atıklarda bulunan sülfatlar, bu ortamlara maruz kalan betonun uzun vadeli dayanıklılığı için büyük bir tehdit oluşturur. Betonda oluşacak sülfat atağı çatlamaya, kabarmaya, geçirgenliğin artmasına ve dayanım kaybına neden olabilir. Bu nedenle, uzun süreli performans sağlamak için, sülfat içeren toprak veya su ile temas halindeki beton, sülfat saldırısından kaynaklanan hasara dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır (Monteiro ve Kurtis, 2003). Sülfat

ortamında, sülfat etkisine maruz kalan betonun dayanıklılığının bozulması çok ciddi bir sorundur. Sülfat saldırısı, genişleyen ürünlerin oluşmasına ve çimentonun hidrasyon ürünlerinin ayrışmasına neden olabilir. Genel olarak, sülfatın betona etkisini etkileyen faktörler arasında çimento tipi, sıcaklık, bağıl nem, pH değeri, sülfat çözeltisinin tipi ve konsantrasyonu yer alır. Bunlar arasında sülfat çözeltisinin konsantrasyonu en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir. Sertleşmiş betonda sülfat saldırısı ile etrenjit oluşumu gelişmeye neden olabilir (Liu vd., 2019).

Rajmohan vd., (2022) yaptıkları çalışmada F sınıfı UK bağlayıcılı geopolimer beton üretek sülfat direncini test etmişlerdir. Çalışmada geopolimer 12 M NaOH aktivörü kullanılmıştır. Alkali sıvı/bağlayıcı oranı 0.35 olarak belirlenmiş ve üretilen geopolimer betonlar 28 gün boyunca 60°C, 80°C ve 100°C sıcaklıkta kür etmişlerdir. Kür sürelerini tamamlayan geopolimer beton numuneleri %2.5 Na₂SO₄ çözeltisine 4 hafta maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisinden sonra 60°C kürlenme sıcaklığına sahip numuneler için basınç dayanımı %24 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, 80°C ve 100°C kürlenme sıcaklıklarında kürlenmiş numuneler için, basınç dayanımındaki azalma sırasıyla %19 ve %18'dir. Araştırmacılar basınç dayanımındaki azalmayı esas olarak Na içindeki sülfat iyonlarının nedeninden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Guo vd., (2021) yaptıkları çalışmada elyaf takviyeli, UK ve çelik çürüğü esaslı geopolimer harç üretmişler ve bu geopolimerlerin sülfat direncini incelemişlerdir. Çalışmada %0, %0.2, %0.3 ve %0.4 oranında elyaflar katılarak 4 grup geopolimer harç üretilerek 28 gün standart kür ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 15 döngü ve her 3 döngüde bir ıslatma kurutma işlemi uygulanarak %5 Na₂SO₄ çözeltisine daldırılmıştır. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı, ağırlık değişimi ve eğime dayanımı incelenmiştir. Çalışma sonucunda sülfata en dayanıklı geopolimerin %0.4 elyaf içeren geopolimerler olduğu bulunmuştur.

Nnaemeka vd., (2019) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak UK ve metakaolini 14M NaOH ile aktive ederek geopolimer beton üretmişlerdir. 28 gün boyunca oda koşullarında kür işlemi uygulanan geopolimer betonların %5 Na₂SO₄ çözeltisine 100 gün boyunca maruz bırakmışlar ve geopolimer numunelerin basınç dayanımı ve ağırlık değişimini gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda sıradan portland çimentolu betonda üretilen bu betonların sülfat direncine dayanıklılık özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda sülfat etkisindeki geopolimer betonların basınç dayanım değerlerinin OPC betondan daha yüksek olduğu ve ağırlık kaybının daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Genel olarak geopolimer betonların OPC betonlara göre sülfat dirençlerinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Kretzer vd., (2021) yaptıkları çalışmada UK, metakaolin ve granüle YFC kullanarak geopolimer harç üretmişlerdir. Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve potasyum hidroksit kullanmışlardır. Üretilen geopolimer harçların sülfat direnci açısından değerlendirmek için aynı zamanda portland çimento ile geopolimer çimentoyu yer değiştirmişlerdir. Üretilen geopolimerin sülfat direncinde iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Al-Akhras (2006) yaptığı çalışmada çimento yerine metakaolin ikame ederek ürettiği beton sülfat direncini incelemiştir. Çalışmada üç metakaolin ikame seviyesi dikkate alınarak çimento ağırlığının %5, %10 ve %15'i oranlarında yer değiştirmiştir. Çalışmada incelenen diğer deneysel parametreler su/bağlayıcı oranı (0,5 ve 0,6), ilk nemli kürlenme süresi (3, 7 ve 28 gün), kür tipi (nemli ve otoklavlama) ve hava içeriği %1.5 ve %5 olacak şekilde deneysel çalışma yapmıştır. Belirtilen ilk nemli kür süresinden sonra, beton numuneleri toplam 18 ay boyunca %5 sodyum sülfat çözeltisine daldırılmıştır. Sülfat etkisinin derecesi, beton prizmaların genleşmesi, beton küplerin basınç dayanımındaki azalma ve beton numunelerinin çatlaklara karşı gözle muayenesi ölçülerek değerlendirilmiştir. Çalışma, çimentonun metakaolin ile değiştirilmesinin betonun sülfat direncini arttırdığını göstermiştir. Araştırmacı metakaolin ikame seviyesinin artmasıyla metakaolin betonunun sülfat direncini arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca 0,5 w/b oranındaki metakaolin betonun sülfat direncini, 0,6 w/b oranından daha yüksek bulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

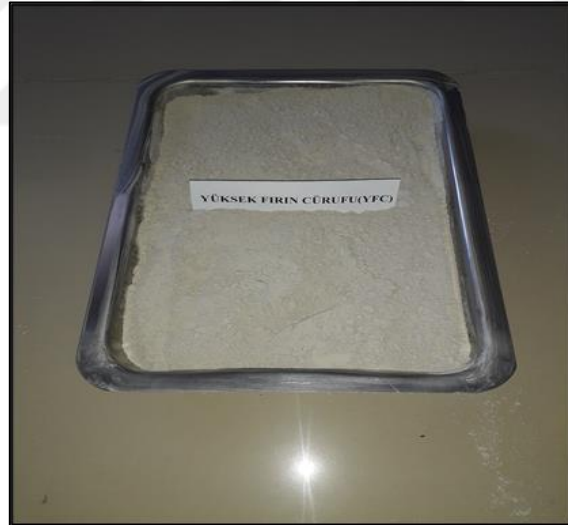
3.1 Materyal

3.1.1 Yüksek fırın cürufu

Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan YFC, demir çelik fabrikası bulunan Karabük ilindeki Karçimsa firması tarafından temin edilmiştir. Temin edilen yüksek fırın cürufunun özgül yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve özgül ağırlığı 2.86 g/cm^3 'tür. Bağlayıcı malzeme olan YFC'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

Bileşim (%)	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3
YFC	9.94	32.47	32.45	1.25	9.31	0.82
Bileşim (%)	Na_2O	S-2	TiO_2	K_2O	Mn_2O_3	Cl^-
YFC	0.31	0.33	1.16	0.85	3.51	0.015



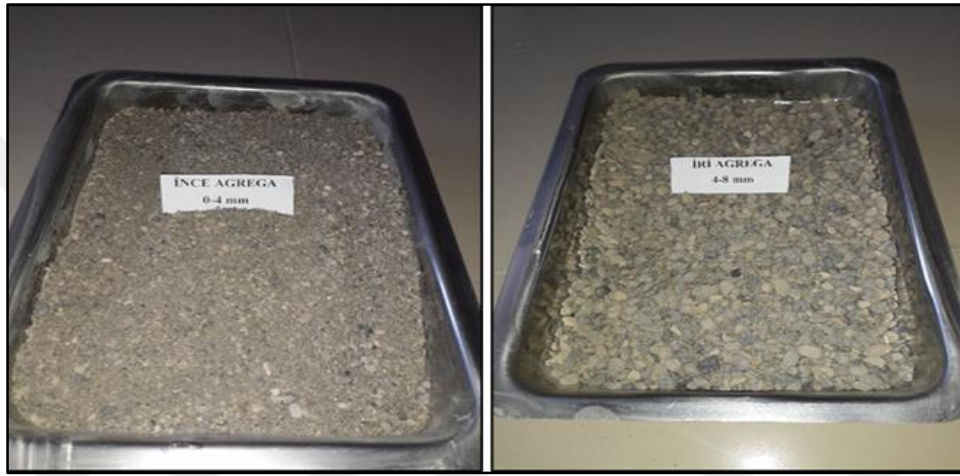
Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu.

3.1.2 Doğal agrega

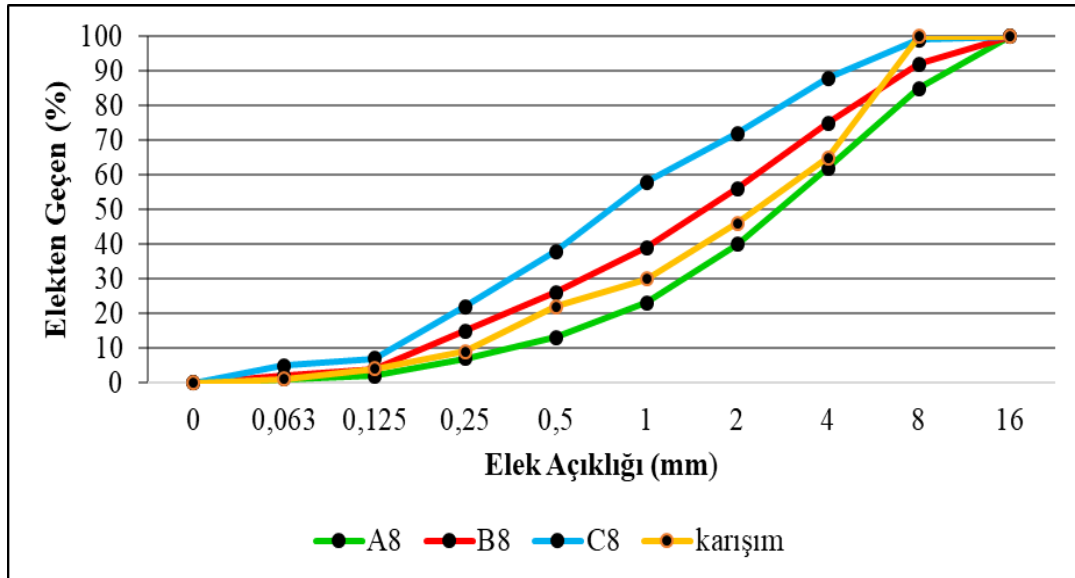
Geopolimer beton numunelerin üretiminde ince agrega olarak dere kumu agregası, iri agrega olarak ise dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın dane dağılım oranı, en büyük dane büyüklüğüne göre TS 802 standartında belirtildiği gibi optimum bölgeye uygun olarak seçilmiştir. Kullanılan ince agreganın dane boyutu 0-4 mm, iri agreganın ise dane boyutu 4-8 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan dere agregasının ilk önce musluk suyu ile

yıkılarak temizlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra laboratuvarında bir gün bekletilerek elek sarsma cihazında gerekli dane boyutlarına göre sınıflandırılıp uygun yerde muhafaza edilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin üretiminde kullanılan ince agrega oranı hacimce %65, iri agrega oranı hacimce %35 olarak belirlenmiştir. Beton karışımında kullanılan agregalar Şekil 3.2’de ve agrega gradasyon eğrisi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

Yapılan çalışmada kullanılan agregalardan alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerle malzemelerin çeşitli özellikleri tespit edilmiştir. Bu deneylerden elde edilen bulgular Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında verilmiştir.



Şekil 3.2 : İnce ve iri agrega.



Şekil 3.3 : Agrega gradasyon eğrisi.

3.1.3 Atık lastik ve özellikleri

Çalışmada kullanılan atık lastik malzemeleri Malatya ilinde bulunan Ford Trucks Çetinkayalar Otomotiv firması tarafından temin edilmiştir. Temin edilen malzeme yeterli inceliğe sahip olduğundan dolayı mevcut haliyle kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan atık lastik Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Geopolimer beton üretiminde kullanılan ince atık lastiğinin tane boyutu 0-4 mm inceliğinde olup yoğunluğu 1.10 g/cm³’tür. Kullanılan atık lastiğinin yapısı lif şeklindedir. Yapılan analizler sonucu elde edilen atık lastiğinin ortalama bileşimi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Atık lastiğın ortalama bileşimi.

Bileşen	Kütlece miktar (%)
Kauçuk	47.0
Karbon siyahı	21.5
Metal	16.5
Katkı maddeleri	7.5
Tekstil elyaf	5.5
Çinko oksit	1.0
Kükürt	1.0



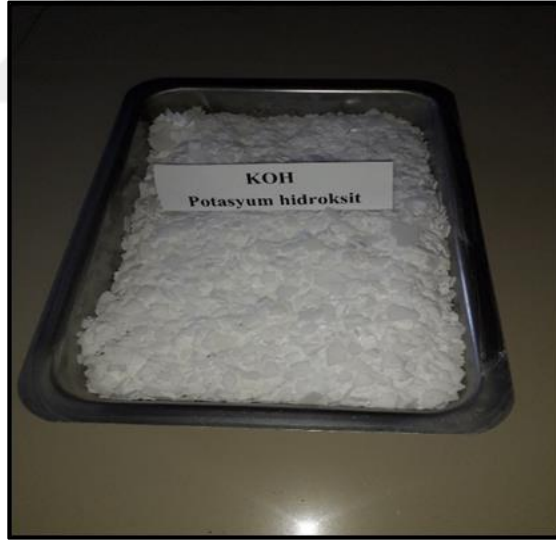
Şekil 3.4 : İnce atık lastik.

3.1.4 Aktivatör

Üretilen geopolimer beton numunelerini aktive etmek amacıyla KOH çözeltisi aktivatör olarak kullanılmıştır. Yaygın ismi potas kostik olarak ifade edilen ve Şekil 3.5’de görüldüğü gibi beyaz renkli pul şeklinde katı yapıya sahip olan KOH inorganik kimyasal bir bileşiktir. Seçilen konsantrasyonda 12 mol KOH çözeltisi elde edebilmek için musluk suyu kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan KOH’ın analiz sonuçlarına göre kimyasal özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Potasyum hidroksitin kimyasal özellikleri.

Özellikler	Potasyum Hidroksit
Molekül formülü	KOH
Molekül kütlesi (g/mol)	56.106
Renk	Beyaz
pH	13.5
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.044
Erime noktası (°C)	380
Kaynama noktası (°C)	1327



Şekil 3.5 : Potasyum hidroksit.

3.1.5 Sülfatlar

Deneysel çalışmada Şekil 3.6’da gösterilen Merck marka MgSO₄ ve Sigma-Aldrich marka Na₂SO₄ kullanılmıştır. Ağırlıkça %5 konsantrasyonlu MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltileri içme suyu kullanılarak hazırlanmıştır. Deney süresince hazırlanan sülfat çözeltileri dört haftalık periyotlarla revize edilmiştir. Belirlenen periyotlarda yenilenen sülfat çözeltilerinin pH değişimi ölçülmüştür. Deneyde kullanılan sülfatların pH değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Sülfat çözeltilerinin pH değerleri.

Çözelti	pH
%5 Na ₂ SO ₄	8.15
%5 MgSO ₄	7.72



Şekil 3.6 : Deneyde kullanılan sülfatlar.

3.1.6 Aletler

3.1.6.1 Elekler

Üretilen geopolimer beton numunelerinde kullanılan agreganın gerekli dane boyutlarına göre elenmesi TS 706 EN 12620+A1 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Agregaların dane boyutları 4 mm ve 8 mm göz açıklıklı kare delikli tel eleklerden elenerek hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan sarsma cihazı ve elekler Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Sarsma cihazı ve elekler.

3.1.6.2 Beton karışım mikseri

Geopolimer beton üretiminde kullanılacak olan malzemeleri karıştırmak amacıyla UTEST marka laboratuvar tipi beton karışım mikseri kullanılmıştır. 5 litre kapasiteli ve düşük hızda karıştırma kabı yörüngesinde 62 devir/dakika, yüksek hızda karıştırma kabı yörüngesinde 125 devir/dakika hız gibi karışım seçeneklerine sahip olan beton karışım mikseri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Beton karışım mikseri.

3.1.6.3 Etüv cihazı

Çalışmada üretilen geopolimer betonların karışımında kullanılacak olan agreganın özgül ağırlık tayini deneylerinde ve geopolimer beton numunelerine uygulanan deneylerde Şekil 3.9’da gösterilen dijital termostata sahip etüv cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : Etüv cihazı.

3.1.6.4 Çelik kalıplar

Hazırlanan geopolimer beton numuneleri Şekil 3.10’da gösterilen 50x50x50 mm ebatlı çelik kalıplara yerleştirilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.10 : Çelik kalıplar.

3.1.6.5 Donma çözülme cihazı

Üretilen geopolimer beton numunelerin donma-çözülme direncinin belirlenmesi için SIEMENS marka su içerisinde donma çözülme yapabilen dijital donma çözülme cihazı kullanılmıştır. Donma-çözülme direnci ASTM C666-A standardına uygun olarak beton numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 çevrim olacak şekilde donma çözülme etkisine tabi tutulmuştur. Deneyde kullanılan donma çözülme cihazı Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : Donma çözülme cihazı.

3.1.6.6 Basınç dayanım cihazı

Üretilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımlarının belirlenmesi için ELE marka 3000 kN yükleme kapasiteli tek eksenli otomatik basınç dayanım cihazından yararlanılmıştır. Üretilen beton numunelerinin boyutları 50x50x50 mm olduğu için yükleme başlıkları arasına 50x50 mm yükleme başlığına sahip aparat yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan basınç dayanım cihazı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Basınç dayanım cihazı.

3.1.6.7 pH metre

Üretilen geopolimer betonların sülfat dirençlerini belirlemek amacıyla 12 hafta süresince sülfat çözeltileri hazırlanmıştır. Deney süresince hazırlanan sülfat çözeltileri dört haftalık periyotlarla revize edilmiştir ve yenilenen sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişimi incelemek için Şekil 3.13’de gösterilen HANNA marka dijital pH metre kullanılmıştır.



Şekil 3.13 : pH metre.

3.1.6.8 Hassas terazi

Çalışmada üretilen beton numunelerin deneylerden önce ve sonra ağırlıklarını tespit etmek ve çalışmada kullanılan malzemelerin ağırlıklarının ölçülmesinde Şekil 3.14’de gösterilen Dikomsan marka 0.01 g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.14 : Hassas terazi.

3.1.6.9 SEM cihazı

Üretilen geopolimer beton numunelerinin içyapısını incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.15 : SEM cihazı.

3.2 Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde geopolimer beton üretimi için kullanılan agregalara uygulanan deneyler, geopolimer beton karışım oranlarının belirlenmesi ve belirlenen karışım oranlarına göre geopolimer betonun hazırlanması, kalıplara yerleştirilmesi, kür edilmesi anlatılmıştır. Kür sürelerini tamamlayan geopolimer betonlara uygulanan deneyler ayrıntılı bir biçimde verilmiştir.

3.2.1 Agregalarda uygulanan yöntemler

Geopolimer beton numunelerinde en büyük dane çapı 4 mm olan dere kumu ve en büyük tane çapı 8 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Numune alım yönteminde TS EN 932-2’de belirtilen çeyrekleme yöntemi uygulanmıştır. Kullanılan agregaların geopolimer beton üretiminde hacimce yüzdeleri %65 ince agrega, %35 iri agrega olacak şekilde TS 802’ye uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan agregaların özgül ağırlıklarını belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında gösterilmiştir.

3.2.2 Geopolimer beton karışım miktarlarının belirlenmesi

Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak YFC kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcının dozajı 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Geopolimer beton üretiminde iri agrega olarak tane boyutu 4-8 mm olan dere agregası, ince agrega olarak ise 0-4 mm tane boyutunda dere kumu agregası kullanılmıştır. Kullanılan ince agrega yerine hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında tane boyutu 0-4 mm olan ince atık lastik ikame edilerek 4 grup geopolimer beton numunesi üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton gruplarının kodları Çizelge 3.5’de sırasıyla R0, R5, R10 ve R15 olarak verilmiştir. İncelenen literatür çalışmaları ve yapılan laboratuvar denemeleri neticesinde çözelti/bağlayıcı oranı 0.45 ve KOH çözeltisinin molaritesi 12 M olarak belirlenmiştir. Belirlenen değerlere göre aktivatör olarak kullanılan KOH’ın miktarı ve hacmi hesaplanmıştır. Bağlayıcı miktarının ve aktivatör miktarının toplamı 1 m^3 ’den çıkarılarak toplam agrega hacmi hesaplanmıştır. Geopolimer beton üretimi için belirlenen karışım oranları ve miktarları Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Üretilen geopolimer beton kodları.

Hacimce malzeme oranı (%)		
Geopolimer beton kodu	Lastik atık (0-4 mm)	İnce agrega (0-4 mm)
R0	0	100
R5	5	95
R10	10	90
R15	15	85

Çizelge 3.6 : Geopolimer beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.

Karışımlar	R0	R5	R10	R15
YFC (kg)	500	500	500	500
KOH çözeltisi (kg)	225	225	225	225
İnce agrega (0-4 mm) (kg)	1002.59	952.46	902.33	852.20
Atık lastik (0-4 mm) (kg)	0	20.38	38.62	54.71
İri agrega (4-8 mm) (kg)	556.66	556.66	556.66	556.66

3.2.3 Geopolimer betonların üretimi ve yerleştirilmesi

Geopolimer beton üretimi için kullanılacak olan malzemeler 0.1 g hassasiyetli terazide belirlenen miktarlarda tartılmış ve karışıma hazır hale getirilmiştir. İlk önce alkali aktivatör çözeltisi olarak kullanılan KOH çözeltisi hazırlanmıştır. KOH çözeltisi 10 dakika süresince karıştırılmış ve karıştırma sırasında ısı açığa çıktığından dolayı karışıma başlamadan önce çözelti hazırlanıp soğuması için bekletilmiştir. Daha sonra sırasıyla YFC, ince agrega, atık lastik ve iri agrega karışıma ilave edilerek hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen geopolimer beton karışımı 50x50x50 mm boyutundaki çelik kalıplara düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin düzgün şekilde yerleşmesini sağlamak amacıyla hem şişleme çubuğu kullanılmış, hem de tokmakla vurularak titreşim etkisi oluşturulmuştur. Yerleştirilen numunelerin yüzeyi mala yardımıyla düzeltilip 24 saat kalıpta bekletilmiştir. 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılan geopolimer beton numuneleri labovatuvarında düzgün bir yere bırakılmış ve oda koşullarında deney gününe kadar bekletilmiştir. Kalıplara yerleştirilen geopolimer beton numuneler Şekil 3.16'da ve geopolimer beton numunelerin kür edilmesi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Kalıplara yerleştirilen geopolimer beton numuneler.



Şekil 3.17 : Geopolimer beton numunelerinin kür edilmesi.

3.2.4 Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışmada üretilen geopolimer betonlar 28 günlük kür süresi ardından ağırlıkça %5 konsantrasyonundaki Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerine yerleştirilmiştir. Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerine yerleştirilen numuneler 4, 8 ve 12 hafta süresince sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. Ayrıca 28 günlük kür süresini tamamlayan geopolimer beton numuneleri sırasıyla 100, 200 ve 300 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme döngülerine tabi tutulmuştur. Belirlenen süreler içerisinde hem sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde hem de donma çözülme etkisindeki numunelerde basınç dayanımları, ağırlık değişimleri, su emme oranları, kılcal geçirimsizlik katsayıları belirlenmiş ve görsel olarak değişimleri ile içyapıları incelenmiştir.

Ayrıca sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin 4, 8 ve 12 hafta boyunca pH değişimi ölçülmüştür. Elde edilen deney verileri, 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin ölçüm değerleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.4.1 Basınç dayanımı

Üretilen geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Yapılan tüm deneylerden sonra numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Denklem 3.1’de basınç dayanımlarının elde edilmesinde kullanılan eşitlik verilmiştir. Hesaplanan basınç dayanımları için her karışım oranı için 3’er adet numune dökülmüş ve basınç dayanımlarının aritmetik ortalaması 3 numune için hesaplanmıştır. Elde edilen basınç dayanım değerleri kontrol numunelerinin basınç dayanım değerleriyle kıyaslanmıştır.

$$F_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.1)$$

F_c : Basınç dayanımı, MPa.

P : Kırılma anındaki en büyük yük, N.

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uyguladığı en kesit alanı, mm².



Şekil 3.18 : Basınç dayanım cihazındaki beton numune.

3.2.4.2 Ağırlık değişimi

Üretilen geopolimer beton numunelerinin sülfat ve donma çözülme etkisi sonucu meydana gelecek deformasyonları belirlemek amacıyla ağırlık değişimi deneyi yapılmıştır. Numunelerin ağırlık değişimi ASTM C 267’de belirtildiği gibi yapılmıştır. Geopolimer beton numunelerinin ağırlık değişimini belirlemek için donma çözülme ve sülfat etkisi öncesi ve sonrasında 0.01 hassasiyetteki terazide tartılmış ve bu iki ağırlık arasındaki farkın 100’e oranlanmasıyla ağırlık değişimi hesaplanmıştır.

Elde edilen deney sonuçları her 3 numunenin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Numunelerin ağırlık değişimi, Denklem 3.2’de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.

Ağırlık değişimi

$$(\%) = \frac{(W - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

W_0 : Numunenin başlangıçtaki ağırlığı, g.

W : Numunenin deney sonrası ağırlığı, g.

3.2.4.3 Su emme tayini

Geopolimer beton numunelerinin su emme deneyinde, TS 12390-7’de belirtildiği gibi, etüv cihazında kurutulmuş numuneler $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ’deki suda 24 saat bekletilmiştir. Sonrasında numunelerin etüv kurusu ve ıslak ağırlıkları ölçülmüştür. Her bir numunenin ıslak ağırlığından kuru ağırlığı çıkartılarak kuru ağırlığa bölünüp su emme yüzdeleri bulunmuştur. Donma çözülme ve sülfat deneylerinden önce ve sonra su emme deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin ağırlıkça su emme yüzdeleri Denklem 3.3’ de gösterilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme } (\%) = \frac{(W_d - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

W_d : Numunenin suya doymuş durumda havadaki ağırlığı,

W_0 : Numunenin 24 saat 105°C ’de kurutulmuş ağırlığı,

3.2.4.4 Kılcal geçirimsizlik deneyi

Beton içinde bulunan ve çapı çok küçük olan boşluklar tarafından emilen su, kılcallık etkisiyle betonun iç kısımlarına kadar emilir ve bu durumun gerçekleşmesi betonda istenmeyen bir durumdur. Geopolimer beton numunelerinin kılcal su emme değerlerinin belirlenmesi için ASTM C1585 standardına uygun olarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Her karışımdan üçer tane numune kullanılmıştır. Numuneleri tamamen kuru hale getirmek

için Şekil 3.19’ da gösterildiği gibi 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. Bu sıcaklığın karışımında kullanılan atık lastiğin erime sıcaklığından düşük olduğu kontrol edilmiş ve bu sıcaklığın karışımların içeriği için bir sakıncası olmadığı anlaşılmıştır. Etüvde çıkartılan numuneler soğuduktan sonra yan yüzeylerinden su almaması ve emilen suyun dışarı çıkıp buharlaşmasını engellemek amacıyla numuneler alt ve üst yüzeyi açıkta kalacak şekilde yan yüzeyleri su geçirmez bant ile tamamen sarılmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 3.20’de görüldüğü gibi 5 mm suya girecek şekilde alt yüzeyinden su ile temas ettirilmiştir. Numuneler 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakika sonra çıkarılarak nemli bir bezle alt yüzeyleri kurulanıp tartılmıştır. Numunelerin 24 saat içerisinde birim alanda kapiler olarak emdiği su miktarından hareketle kılcal geçirimsizlik katsayısı Denklem 3.4 kullanılarak belirlenmiştir.

Elde edilen deney sonuçları her üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Donma çözülme ve sülfat etkisindeki beton numunelerin kılcal geçirimsizlik değerleri belirlenirken yukarıda belirtilen yöntem kullanılmıştır. Deney verileri kontrol numuneleri ile karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

$$k = \frac{Q}{A \times \sqrt{t}} \quad (3.4)$$

k: Kılcal su emme katsayısı, (cm/s^{0.5})

Q: Absorbe edilen su miktarı, (cm)

A: Su ile temas eden yüzey alanı, (cm²)

t: Zaman, (s)



Şekil 3.19 : Etüvde bekletilen geopolimer beton numuneler.



Şekil 3.20 : Kılcal geçirimsizlik deneyi düzeneğindeki geopolimer beton numuneler.

3.2.4.5 Donma çözülme direnci

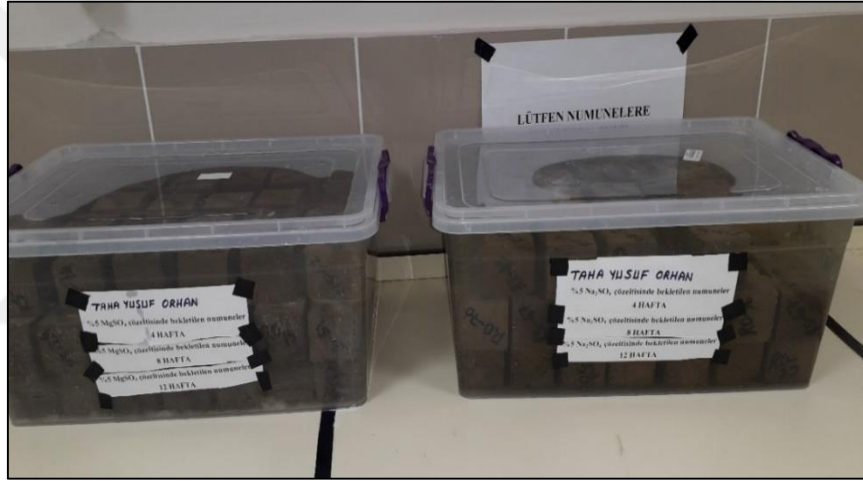
Donma çözülme çevrimleri ASTM C666 standardına uygun olarak yapılmış ve bu standartta belirtilen A prosedürü uygulanmıştır. A prosedüründe donma ve çözülme olayı su içinde gerçekleşmektedir. Geopolimer numuneler 28 gün kür sürelerini tamamladıktan sonra Şekil 3.21’de gösterildiği gibi donma çözülme cihazına yerleştirilmiştir. Numunelere bir döngü süresi 5 saat olan ve $+4^{\circ}\text{C}$ ’den -18°C ’ye inen ardından tekrar -18°C ’den $+4^{\circ}\text{C}$ ’ye çıkan donma çözülme döngüleri uygulanmıştır. Geopolimer beton numuneler 100, 200 ve 300 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme döngülerine maruz bırakılmıştır. Donma çözülme döngülerini tamamlayan numuneler çıkarıldıktan sonra basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik, su emme, ağırlık değişimi gibi özellikleri incelenmiştir. Elde edilen deney verileri kontrol numuneleri ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.



Şekil 3.21 : Donma çözülme etkisine maruz kalan numuneler.

3.2.4.6 Sülfat etkisi

Üretilen geopolimer beton numuneleri 28 gün kür sürelerini tamamladıktan sonra %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerine yerleştirilmiş ve 12 hafta süresince çözeltilerin içerisinde bekletilmiştir. Sülfat çözeltilerine bırakılan numuneler Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerinin 4, 8 ve 12 hafta boyunca basınç dayanımı, ağırlık değişimi, su emme, kılcal geçirimsizlik gibi özellikleri incelenmiştir. Belirtilen süreler boyunca numunelerin görsel olarak değişimlerine bakılmıştır. Ayrıca sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim ölçülmüştür. 12 hafta boyunca sülfat çözeltilerinde bekletilen geopolimer beton numunelerinin görsel değişimleri ve içyapı analizleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları kontrol numuneleri ile kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.



Şekil 3.22 : Sülfat çözeltilerinin içinde bekletilen numuneler.

3.2.4.7 SEM analizi

Üretilen geopolimer beton numunelerinin içyapılarını analiz etmek amacıyla SEM analizi yapılmıştır. SEM analizlerine başlamadan önce, hem kontrol numunelerinden hem de donma çözülme ve sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerden küçük numune örnekleri alınmıştır. Daha sonra bu numunelerin üzerine düşen elektronların bir noktada birikmesini önlemek amacıyla numunelerin yüzeyi iletken bir kaplama olan altın paladyum tozları ile kaplanmıştır. İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi laboratuvarlarında SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Agregalarla ilgili bulgular ve tartışma

Çalışmada kullanılan iri ve ince agregalar için özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde agregaların kuru özgül ağırlık, doymuş kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Agregaların özgül ağırlık ile su emme oranı.

Özellikler	İnce agregalar (0-4 mm)	İri agregalar (4-8 mm)
Kuru özgül ağırlık	2.49	2.60
Doymuş kuru özgül ağırlık	2.57	2.62
Görünen özgül ağırlık	2.62	2.69
Su emme oranı (%)	2.00	1.50

4.2 Sertleşmiş beton deneyleri ile ilgili bulgular ve tartışma

4.2.1 Kontrol numuneleri ile ilgili bulgular ve tartışma

Sülfat etkilerine ve donma çözülme etkisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin sonuçlarını kıyaslamak için 28 günlük kür süresi sonunda kontrol numunelerin basınç dayanım değerleri, su emme oranları ve kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca beton numunelerin görsel değişimleri de incelenmiştir.

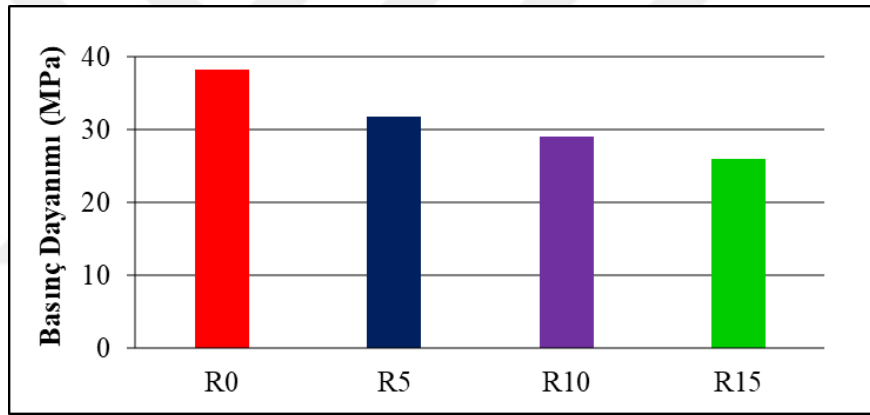
4.2.1.1 Kontrol numunelerinin basınç dayanımı

%0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik ikame edilerek üretilen 4 grup geopolimer beton numunelerinin 28 günlük kür süresi sonrası basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Elde edilen basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi atık lastik içeren geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri atık lastik içermeyen geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri ile kıyaslandığında basınç dayanım değerlerinde azalma olmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik takviye edilmesi beton numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %16.51, %23.76, %32.01 oranlarında azalttığı görülmüştür.

Dolayısıyla atık lastik oranı arttıkça beton numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Atık lastik oranı arttıkça basınç dayanımının azalmasının nedeni atık lastik ile geopolimer harç arasında oluşan bağ eksikliğinden dolayı olduğu ve tatbik edilen yükün doğrultusuna dik yüksek gerilmelere sebep olan beton karışımında oluşan zayıf noktaların artmasının nedeni olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak atık lastik parçacıklarının beton hamurundaki homojen olmayan dağılımından dolayı da betonun mukavemetinde azalmalar meydana getirdiği düşünülmektedir.

Çizelge 4.2 : 28 günlük geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri.

Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)
R0	38.17
R5	31.87
R10	29.10
R15	25.95



Şekil 4.1 : 28 günlük geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları.

Mhaya vd., (2020) yaptıkları çalışmada granüle YFC ve atık lastik kauçuğu kullanarak ürettikleri betonların dayanımlarını test etmişlerdir. Atık lastik kauçuğu 1-4 mm ve 4-8 mm inceliğinde olmak üzere ince ve iri nehir agregası yerine hacimce %5, %10, %20 ve %30 oranlarında katılmıştır. Numunelere 23°C suda 28 gün boyunca kür işlemi uygulanmıştır. %5, %10, %20 ve %30 oranlarında atık lastik kauçuğu 28 gün basınç dayanımını %9.3, %16.4, %46.3 ve %60.4 oranında azaltmıştır.

Sarkaz (2020) yaptığı tez çalışması kapsamında 800 kg/m^3 YFC'yi sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive ederek geopolimer beton üretmiştir. Çalışmada atık lastik boyutu 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm ve 0-4 mm olmak üzere ve %0, %5, %10, %15 oranlarında atık lastiği agrega ile yer değiştirmiştir. Toplamda 13 grup olarak üretilen geopolimer beton numunelerinin 28 gün sonunda basınç dayanımı özelliklerini incelemiştir. Çalışma

sonucunda atık lastik içeren gruplar arasında en yüksek basınç dayanımının 56.18 MPa değeri ile 2-4 mm inceliğinde ve %5 oranında atık lastik içeren beton numunelerinde görülmüştür. Ayrıca lastik oranı arttıkça da basınç dayanımının azaldığı bulunmuştur.

Azmi vd., (2016) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki farklı atık lastik kauçuk yüzdesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada çevre dostu, hafif ve dayanıklı bir ürün olarak kauçuklu geopolimer beton üretmek amaçlanmıştır. Geopolimer betondaki ince agregaların yerine 73 µm ile 375 µm arasında değişen ebatlarda atık lastik kauçuğu kullanılmıştır. UK esaslı geopolimer betonda atık lastik kauçuk ikameleri %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmıştır. Uçucu külün alkali aktivatöre oranı 2.5 ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2.0 olarak belirlenmiştir. Kür işleminden sonra, numunelerin dayanımlarını 7. ve 28. günlerde test etmişlerdir. Sonuçlar, atık lastik kauçuk karışımı açısından tüm numunelerin basınç dayanımında bir azalmaya neden olmuştur. Çalışma sonucunda 28 günlük betonlarda en yüksek basınç dayanımı %0 atık lastik kauçuk içeren numunelerde 65.0 MPa olurken en düşük basınç dayanımı %20 atık lastik kauçuk içeren numunelerde 15.5 MPa olarak bulunmuştur.

Yeluri ve Yadav (2020) yaptıkları çalışmada yanmış pirinç kabuğu külü, UK ve granüle YFC kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada 1-4 mm ve 2-4 mm boyutlarındaki atık lastiği %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ince agrega ile yer değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda %15 atık lastik kullanımının basınç dayanımını %60 oranında azalttığı bulunmuştur.

Aly vd., (2019) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak öğütülmüş YFC, aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada İnce agrega olarak incelik modülü 2.25 mm olan kum, kaba agrega olarak ise maksimum boyutu 12 mm olan dolomit %65 ve %35 oranlarında kullanılmıştır. Boyutu 1-4 mm olan atık lastik kauçuğu ince agrega yerine hacimce %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame etmişlerdir. 28 gün kür edilen beton numunelerinin basınç dayanımını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri 55.4 MPa olarak %10 atık lastik kauçuk içeren numunelerde, en düşük basınç dayanım değerini ise 38.3 MPa olarak %30 atık lastik kauçuk içeren numunelerde elde edildiğini belirtmişlerdir.

Zaetang vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK bazlı geopolimer harçlarda ince agrega olarak atık lastik kauçuk kullanılmasının dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada nehir kumunu hacimce %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında atık lastik

kauçuk ile yer değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda 28 gün kür edilen geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanım değeri %0 oranında atık lastik kauçuk içeren numunelerde 37.4 MPa bulunurken, en düşük basınç dayanım değeri %100 oranında atık lastik içeren numunelerde 2.7 MPa olarak bulunmuştur.

Luhar vd., (2019) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betonlara atık lastik kauçuk ikamesinin dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 14 M sodyum hidroksit sodyum silikat aktivatör olarak kullanılmıştır. Kauçuklaştırılmış geopolimer beton üretmek için, ince agregaların %10, %20 ve %30'unun yerini almak üzere atık lastik kauçuk kullanılmıştır. Ürettikleri geopolimer betonları 3, 7, 28, 90 ve 365 gün boyunca kür etmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda atık lastik kauçuk oranı arttıkça her yaşta geopolimer betonun dayanımının azaldığını belirtmişlerdir.

Ali vd., (2020) atık lastik kauçuğunun geopolimer betonda kullanılması uygunluğunun belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılmışlardır. Geopolimer karışımı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ çözeltisi içinde uçucu kül tozu, ince agrega ve süperakışkanlaştırıcı karıştırılarak yapılmıştır. Karışımlar atık lastik kauçuğu içeriğine dayalı olarak, 0.12 sabit su/uçucu kül oranı ve UK ağırlığına göre %45 alkali dozaj ile dört farklı grup oluşturulmuştur. Atık lastik kauçuk oranı %0, %10, %20 ve %30 olmak üzere iki maksimum boyutta (2 ve 4 mm) ince agrega ile yer değiştirilmiştir. Elde edilen geopolimer numunelerin basınç dayanımı 28 gün kür süresi sonunda ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre atık lastik oranı %10 olan numunelerin basınç dayanım değeri referans numunelerine göre artmıştır. Ancak %20 ve %30 oranında atık lastik kauçuk içeren numunelerin basınç dayanım değerleri sırasıyla %18.6 ve %21.2 oranında azalmıştır.

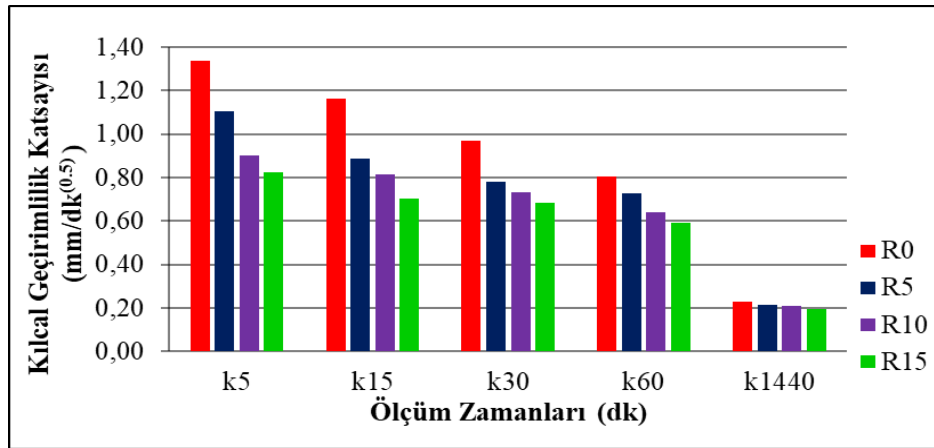
Pandya vd., (2018) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betonlarda atık lastik kauçuk kullanılmasının dayanım üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada aktivatör olarak 16 M NaOH agrega olarak 2.4-4 mm boyutunda ince agrega ve 15-20 mm boyutunda iri agrega kullanmışlardır. Ayrıca atık lastik kauçuğu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında iri agrega ile yer değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda 28 gün kür edilen geopolimer betonlara basınç dayanım testi uygulanmış ve atık lastik oranı arttıkça dayanımın azaldığı gözlenmiştir. %0 atık lastik kauçuk içeren numunelerin basınç dayanım değeri 33.15 MPa olurken, %20 atık lastik kauçuk içeren numunelerin basınç dayanım değeri 31.77 MPa olarak bulunmuştur.

4.2.1.2 Kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizliği

28 günlük kür süresi sonunda beton numunelerine kılcal geçirimsizlik deneyi yapılmış ve kılcal geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Deney sonrası elde edilen veriler Çizelge 4.3’de belirtilmiş ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde atık lastik oranı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı azalmıştır. Çizelge 4.3’de belirtilen veriler incelendiğinde %0 atık lastik takviye edilen R0 kodlu beton numunesinde kılcal geçirimsizlik katsayısı sırasıyla 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm süreleri boyunca 1.34, 1.16, 0.97, 0.81 ve 0.23 değerleri ile maksimum olduğu görülürken %15 atık lastik takviye edilen R15 kodlu beton numunesinde kılcal geçirimsizlik katsayısı sırasıyla 5, 15, 30, 60 ve 1440 dakikalık ölçüm süreleri boyunca 0.82, 0.71, 0.68, 0.59, 0.20 değerleri ile minimum olduğu görülmüştür. Ayrıca ölçüm zamanının artması ile kılcal geçirimsizlik katsayısında azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

Karışımlar	Kılcal geçirimsizlik katsayısı [$\text{mm}/\text{dk}^{(0.5)}$]				
	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
R0	1.34	1.16	0.97	0.81	0.23
R5	1.10	0.89	0.78	0.73	0.22
R10	0.90	0.82	0.74	0.64	0.21
R15	0.82	0.71	0.68	0.59	0.20



Şekil 4.2 : Geopolimer beton kontrol numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

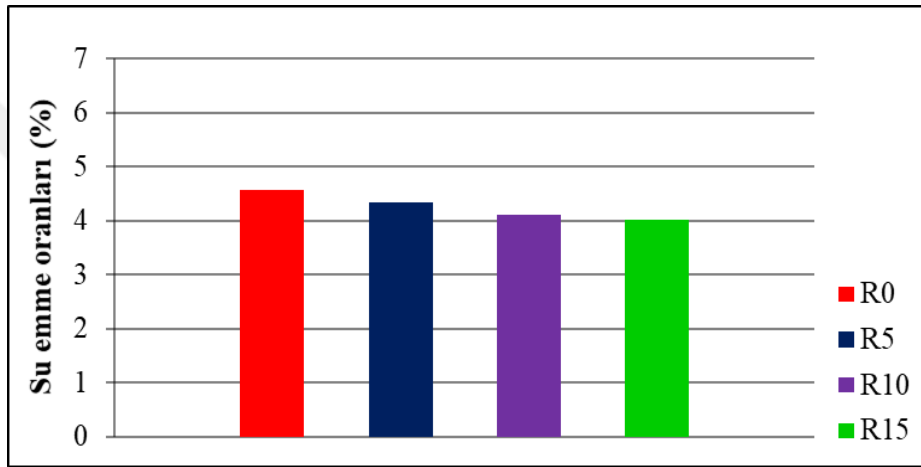
4.2.1.3 Kontrol numunelerinin su emme oranları

Geopolimer beton numunelerinin 28 günlük kür süresi sonunda su emme yüzdeleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 4.4’de verilmiş ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde atık lastik oranı arttıkça su emme oranı azalmıştır. Aynı zamanda atık lastik içermeyen R0 kodlu geopolimer beton numunesi %4.57 değer ile su

emme oranı maksimum olduğu görülürken %15 atık lastik içeren R15 kodlu geopolimer beton numunesi %4.03 değer ile su emme oranı minimum olduğu görülmüştür. Beton içerisine atık lastik ikame oranı arttıkça su emme oranının azalma nedeninin atık lastiğin hidrofobik bir yapıda olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.4 : Kontrol numunelerin su emme oranları.

Karışımlar	Su Emme Oranları (%)
R0	4.57
R5	4.33
R10	4.12
R15	4.03



Şekil 4.3 : Kontrol numunelerin su emme yüzdeleri.

Sarkaz (2020) yaptığı tez çalışması kapsamında 800 kg/m^3 YFC'yi sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive ederek geopolimer beton üretmiştir. Çalışmada atık lastik boyutu 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm ve 0-4 mm olmak üzere ve %0, %5, %10, %15 oranlarında atık lastiği agrega ile yer değiştirmiştir. Çalışmada su emme oranı atık lastik oranına bağlı olarak azalmıştır. Ancak bu değişkenliğin atık lastik boyutuna ve oranına bağlı olarak değişebileceğini belirtmiştir.

Thomas ve Gupta, (2016) yaptıkları çalışmada atık lastik kauçuğu içeren betonların özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada 10 mm-20 mm boyutlarında iri agrega ve incelik modülü 2.83 olan nehir kumu kullanılmıştır. Atık lastik kauçuk boyutu 0-2 mm ve 2-4 mm olmak üzere nehir kumu agregası ile %0-%20 arasında %2.5 artacak şekilde yer değiştirmişlerdir. Araştırmada atık lastik kauçuk içeren numunelerin su emme değerlerine bakılmış ve kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır.

Çalışma sonucunda %7.5 oranına kadar atık lastik kauçuk içeren numunelerin su emme değerlerinde azalma görülmüştür. Araştırmacılar çalışma sonucunda küçük kauçuk parçacıklarının doğal agregalar arasındaki gözenekleri doldurduğunu ve bunun da geçirgenliği azalttığını belirtmişlerdir.

Záleská vd., (2019) Portland çüruf çimentolu betonda atık lastik kauçuk kullanılması üzerine inceleme yapmışlardır. Çalışmada atık lastik kauçuk boyutu 0-4 mm ve 4-8 mm olmak üzere ince ve iri agrega yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame ederek olacak atık lastik ile yer değiştirmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda kür edilen beton numunelerin su emme değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda atık lastik kauçuk boyutu ve oranına bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte atık lastik kauçuk oranı arttıkça su emme değerlerinde nispeten azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Medine vd., (2018) yaptıkları çalışmada portland çimento kullanarak ürettikleri hafif betonlarda atık lastik kauçuk kullanılmasının betonun dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada atık lastik kauçukları %5, %7.5 ve %10 oranlarında kum ve çakıl ile yer değiştirmişlerdir. 28 gün boyunca kür edilen beton numunelerinin su emme değerlerini incelemişlerdir. Çalışmada kontrol numunelerinin su emme oranı %5.09 bulunurken, %7.5 oranında atık lastik kauçuk içeren numunelerin su emme oranı %4.35 olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda araştırmacılar kauçuk ilavesinin su emme yüzdesini azalttığını ve suya daha az duyarlı olan karışımlarda suyun yayılmasını sınırladığını belirtmişlerdir.

Segre ve Joekes (2000) yaptıkları çalışmada çimento macununa ek olarak atık lastik parçacıkları ilave etmişlerdir. 28 gün boyunca 20°C sıcaklıkta kür edilen numunelerin su emme özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonunda atık lastik kauçuk parçacıklarının suyu emmemesi nedeniyle, kauçuk parçacıklarının eklenmesinin emilen su miktarını azalttığını gözlemlemişlerdir.

4.2.1.4 Kontrol numunelerinin görsel incelemeleri

28 günlük kür süresini tamamlayan geopolimer beton numunelerinin görünüşleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.4'de verilen görsel incelendiğinde atık lastik ikame edilmesinin geopolimer beton numunelerinin görünümünde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir. Şekil 4.5'de verilen görselde ise 28 günlük kür süresini tamamlayan kontrol numunelerinin basınç dayanım deneyi sonrası görünümü verilmiştir. Görselde görüldüğü gibi basınç dayanım deneyi sonrası numuneler yüzeyinde parçalanmalar oluşmuştur. Ancak

atık lastik oranı arttıkça numune yüzeyindeki parçalanmalar azalmıştır. Atık lastik içermeyen R0 kodlu beton numunesinde yüzeyindeki parçalanma daha fazla iken %15 oranında atık lastik içeren R15 kodlu beton numunesinin yüzeyinde daha az parçalanma görülmüştür. Bunun yanında atık lastik ikame edilmesi beton numunesinin dağılmasını önlemiştir. Atık lastik parçacıklarının lif etkisi oluşturarak yanal çekme gerilmelerini karşıladığı ve bu nedenle betonun dağılmasını önlediği düşünülmektedir.



Şekil 4.4 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerinin görünüşleri.



Şekil 4.5 : Kür süresini tamamlayan kontrol numunelerinin basınç dayanım deneyi sonrası görünüşleri.

4.2.2 Sülfat etkisindeki numuneler ile ilgili bulgular ve tartışma

Üretilen beton numuneleri 28 günlük kür süresi sonrası %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde 12 hafta boyunca bekletilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin sülfat etkisine karşı dirençlerinin belirlenmesi amacıyla 4, 8 ve 12 hafta süresince basınç dayanımı, ağırlık değişimi, kılcal geçirimsizlik ve su emme gibi özellikleri incelenerek kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca 12 hafta boyunca sülfat çözeltileri her dört haftalık periyotlarda yenilenmiş ve pH değerleri değişimi incelenmiştir.

4.2.2.1 Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerin 4, 8 ve 12 hafta süresince basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen veriler Çizelge 4.5’de verilip Şekil 4.6 ve 4.7’de grafik halinde gösterilmiştir. 4, 8 ve 12 hafta sonunda elde edilen basınç dayanım değerleri 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin basınç dayanım değerleri ile kıyaslandığında;

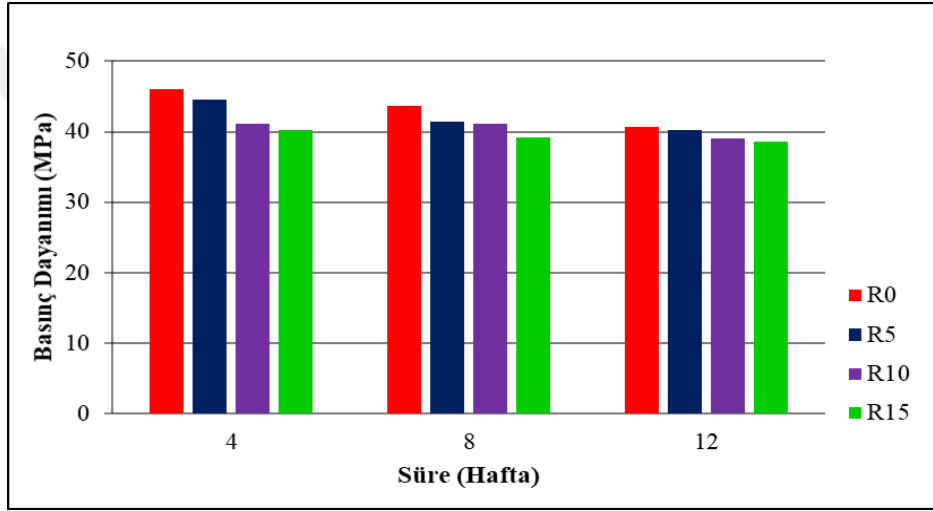
- %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numuneler için; 4 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %20.51, %39.94, %43.33 ve %55.18 oranında artmıştır. 8 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %14.23, %29.90, %41.24 ve %51.18 oranında artmıştır. 12 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %6.50, %26.23, %34.26 ve %48.94 oranında artmıştır.
- %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numuneler için; 4 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %17.63, %27.39, %33.68 ve %46.17 oranında artmıştır. 8 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %11.21, %24.47, %29.90 ve %41.62 oranında artmıştır. 12 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %3.62, %22.06, %26.98 ve %37.57 oranında artmıştır.

Aynı zamanda tüm numunelerde sülfat çözeltilerinde bekletilme zamanı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Yine aynı şekilde beton numunelerinin atık lastik ikame edilme oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Ayrıca %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir.

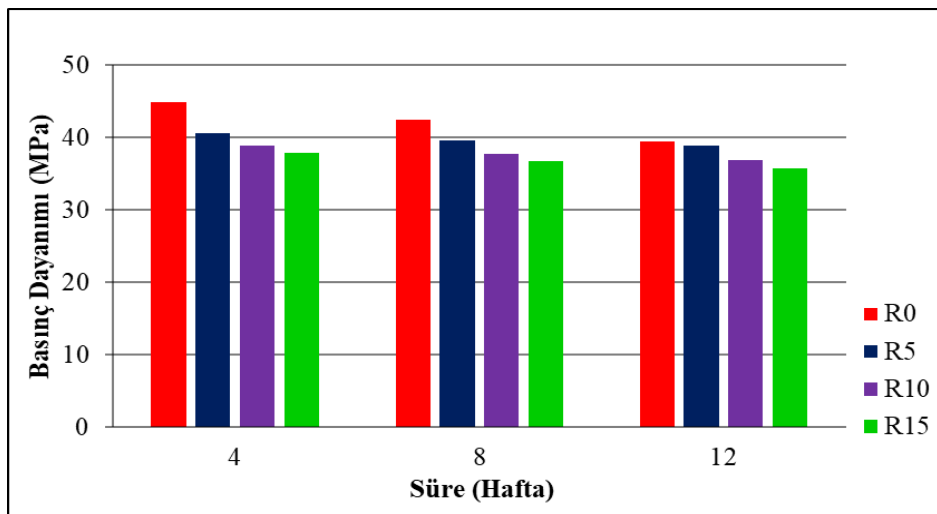
Hem %5 Na₂SO₄ çözeltisinde hem de %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanım değerleri 28 gün kür edilen kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında basınç dayanım değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Basınç dayanımında görülen bu artışın nedeninin sülfat çözeltisinde geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.5 : %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.

Çözelti	Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 Na ₂ SO ₄	R0	46.00	43.60	40.65
	R5	44.60	41.40	40.23
	R10	41.17	41.10	39.07
	R15	40.27	39.23	38.65
%5 MgSO ₄	R0	44.90	42.45	39.55
	R5	40.60	39.67	38.90
	R10	38.90	37.80	36.95
	R15	37.93	36.75	35.70



Şekil 4.6 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.



Şekil 4.7 : %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri.

Koç (2021) yaptığı tez çalışmasında KOH ve NaOH ile 3 farklı oranda silis dumani kullanarak üretilen, C sınıfı uçucu küllü geopolimer harçların dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Numuneler döküldükten sonra sonra 100°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletmiştir. Etüvden sonra numuneler kalıptan söküldükten sonra oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiş ve daha sonra fiziksel ile mekanik özellikleri incelemiştir. Numuneler Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltileri içerisine konulmuştur. Deneyler sonucunda NaOH kullanılarak üretilmiş numunelerin yüksek miktarda dayanım kaybetmedikleri, KOH kullanılarak üretilen ve sülfat etkisi sonrası numunelerin 30. günde basınç dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir. Na₂SO₄ etkisindeki numunelerin 30 gün sonra basınç dayanımı % 98,62 oranında artarak 75,14 MPa MgSO₄ etkisi sonrası %69,99 oranında artarak 64,31 MPa olduğu sonucuna varmıştır. Araştırmacı sülfat etkisinden sonra KOH aktivatörü kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımını yüksek oranda arttığını belirtmiştir.

Long vd., (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve portland çimento betonun magnezyum sülfat direncini araştırmışlardır. Geopolimer beton üretiminde bağlayıcı olarak UK kullanılmıştır. Geopolimer beton numunelerini aktive etmek için sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit aktivatör olarak kullanılmıştır. UK esaslı geopolimer beton ve PÇ beton numuneleri, 32 ıslatma-kurutma döngü olacak şekilde %5 MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Her 8 döngüden sonra basınç dayanımını incelemiştir. Üretilen beton numuneleri 28, 36, 44, 52, 60 gün boyunca sülfat saldırısına maruz kalmıştır. 28 günlük geopolimer beton numunelerinin 32 MPa olan basınç dayanımı magnezyum sülfat etkisiyle 60 gün sonra %71,88 artarak 55 MPa ulaşmıştır. Araştırmacılar PÇ beton numunelerinin mukavemet kaybına uğradığını, ancak UK esaslı geopolimer beton numunelerinin MgSO₄ saldırısından sonra mukavemet artışı kazandığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca UK esaslı geopolimer betonun çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısı MgSO₄ saldırısından sonra hidratlı kalsiyum silikat jelden daha kararlı olduğu için PÇ betondan daha iyi magnezyum sülfat direncine sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Bakharev (2005) yaptığı çalışmada sülfat ortamına maruz kalan F sınıfı UK ve alkali aktivatör kullanılarak üretilen geopolimer pastaların dayanıklılığını araştırmışlardır. Geopolimer malzemelerin direncini belirlemek için 5 aylık bir süre boyunca %5 sodyum sülfat ve magnezyum sülfat solüsyonlarına ve %5 sodyum sülfat+%5 magnezyum sülfat solüsyonuna daldırılmıştır. Çalışmada aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum hidroksit+potasyum hidroksit, sodyum silikat şeklinde üç çeşit aktivatör kullanmışlardır. Sodyum hidroksit ile aktive edilen geopolimerlerin sülfat etkisi sonucu %5 Na₂SO₄

numunelerinin basınç dayanımı %4, %5 MgSO₄ numunelerinin basınç dayanımı %12, ve %5 Na₂SO₄+MgSO₄ numunelerinin basınç dayanımı %12 artmıştır. Sodyum hidroksit+potasyum hidroksit ile aktive edilen geopolimerlerin sülfat etkisi sonucu %5 MgSO₄ numunelerinin basınç dayanımı %35, %5 Na₂SO₄+MgSO₄ numunelerinin basınç dayanımı %10 şeklinde artış göstermiştir. Araştırmacılar alkalinin geopolimerden çözeltiye geçtiğini gözlemlemişlerdir. Magnezyum sülfat çözeltisinde, alkalilerin geopolimerlerden çözeltiye göçüne ek olarak, geopolimerlerin yüzey tabakasında Mg ve Ca'nın difüzyonu olduğunu ve bununda mukavemeti artırdığı sonucuna varmışlardır.

Valencia vd., (2016) geopolimer betonun sülfat direncini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Çalışmada bağlayıcı olarak %80 oranında UK (320 kg/m³) %20 oranında granüle YFC (80 kg/m³), alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmış ve çözelti/bağlayıcı oranı 0.48 olacak şekilde geopolimer beton üretmişlerdir. Ürettikleri beton numunelerini 28 gün boyunca oda sıcaklığında kür etmişlerdir. Daha sonra %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisine 360 gün boyunca maruz bırakmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda 360 gün sodyum sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımının %25 oranında arttığını gözlemlemişlerdir.

Hardjito vd., (2015) UK esaslı geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada F sınıfı UK sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiştir. Geopolimer numuneleri 60 °C sıcaklıkta 24 saat kür etmişlerdir. Daha sonra numuneleri 12 hafta boyunca %5 konsantrasyonundaki sodyum sülfat çözeltisine bırakmışlardır. 12 hafta sodyum sülfat etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Araştırmacılar geopolimer betonun, özelliklerinde herhangi bir sülfat atağı veya bozulma belirtisi göstermediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca UK bazlı geopolimer betonun, mükemmel basınç dayanımına sahip olduğunu ve yapısal uygulamalar için uygunluğunu vurgulamışlardır.

Elyamany vd., (2018) yaptıkları çalışmada kürlenme sıcaklığının, sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesinin, alkali çözeltinin bağlayıcıya oranının ve bağlayıcı tipinin geopolimer harcının magnezyum sülfat direnci üzerine etkisi incelenmişler ve PC harcı ile çeşitli geopolimer harçlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Örnekler 48 haftaya kadar % 10 magnezyum sülfat çözeltisine bırakılmıştır. Çalışmada UK, granüle YFC ve silika dumanı kullanmışlardır. Sonuçlar, kürlenme sıcaklığının artırılması, sodyum hidroksit çözeltisi molaritesinin ve alkali çözeltinin bağlayıcı oranının azaltılmasının, geopolimer harcının magnezyum sülfat direncini arttırdığını göstermiştir. %50 UK, %35 granüle YFC

ve %15 silika dumanı içeren karışımlar, magnezyum sülfat çözeltisinde en iyi performansı göstermiştir. Genel olarak, çeşitli geopolimer harçlar, OPC harçlarına kıyasla magnezyum sülfat çözeltisinde daha iyi performans sergilemişlerdir. Araştırmacılar geopolimer numunelerinin 12. haftaya kadar basınç dayanımının azaldığını ancak 24. haftada basınç dayanımının tekrar arttığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar basınç dayanımındaki bu dalgalanmanın nedenini alkali iyonlarının numunelerden çözeltiye göçü sırasında meydana gelen Mg'nin matrise difüzyonundan kaynaklanıyor olabileceğini ifade etmişlerdir.

Başcarević (2014) yaptığı çalışmada iki farklı UK örneği kullanarak ürettiği geopolimer harçların sülfat direncini araştırmışlardır. Çalışmada Sırp termalinden alınan Svilajnac ve Kolubara uçucu külleri 1.5 modül silikat ve 10 M NaOH kullanılarak aktive etmişlerdir. Numuneler 24 saat 95°C sıcaklıkta kür edildikten sonra oda koşullarında 365 gün boyunca bekletmişlerdir. Numuneleri %5 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakmışlardır. Çalışmada kullanılan Svilajnac uçucu küllü geopolimerlerin 180 gün boyunca basınç dayanımında çok küçük mukavemet kaybı olmuş ve 365 gün sonra %10 mukavemet kaybı gözlenmiştir. Ancak Kolubara uçucu küllü geopolimerlerin ise gözle görülür bir mukavemet artışı olduğunu gözlemlemişlerdir. Yani yapısal bir iyileşme meydana gelmiştir. Araştırmacılar basınç dayanımındaki bu farklılığı UK Svilajnac ve UK Kolubara bazlı geopolimer harç numunelerinin farklı gözeneklilikleriyle açıklayabilmişlerdir. UK Kolubara harçlarının daha yüksek gözenekliliği nedeniyle, sülfat çözeltisinin geopolimer yapıya girişi daha hızlı gerçekleştiğini ve sülfat çözeltisine maruz kalmanın, muhtemelen sülfat çözeltisinde alkali aktivasyon reaksiyonunun devam etmesi nedeniyle daha gözenekli geopolimer numunelerinin mukavemetinde bir artışa neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Karaşin ve Doğruyol (2011) yaptıkları çalışmada çimentoyu UK ile yer değiştirerek ürettikleri betonların sülfat direncini test etmişlerdir. 28 gün boyunca kür edilen beton numunelerini ağırlıkça %15 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisinde 5 ay boyunca bekletmişlerdir. Çalışma sonucunda UK katkılı betonların sülfat etkisi sonucunda basınç dayanımında artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada sülfat maruz kalan numunelerin 28 günlük basınç dayanım değeri 34.53 MPa olarak bulunurken 150 günlük basınç dayanım değeri 40.09 MPa olarak bulunmuştur.

Kumar vd., (2021) yaptıkları çalışmada UK esaslı geopolimer betonların sülfat direncini belirlemek amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmada beton numuneleri kür edildikten sonra %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda geopolimer numunelerin basınç dayanım değerleri hem %5 Na₂SO₄ çözeltisinde hem de %5 MgSO₄

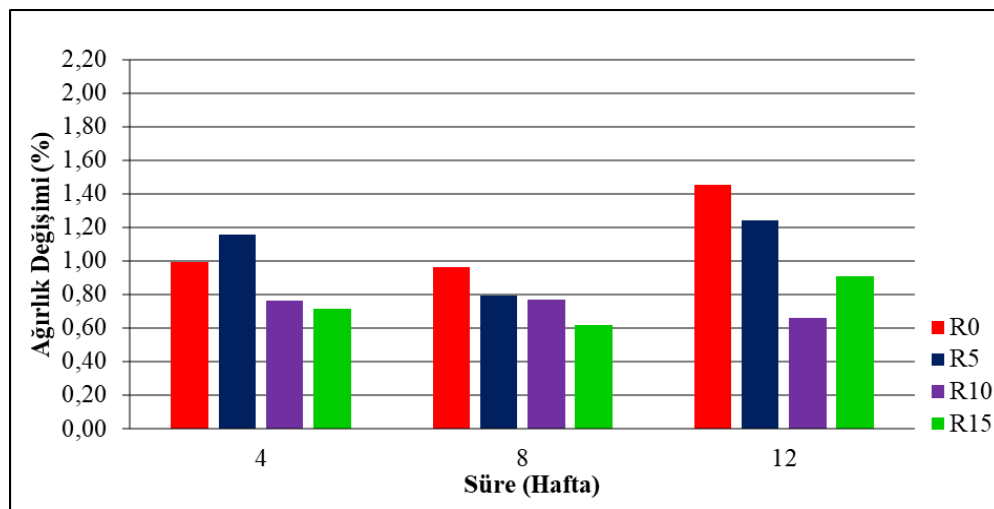
çözeltilisinde 15 hafta bekletilme süresine kadar artmış daha sonra basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir.

4.2.2.2 Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

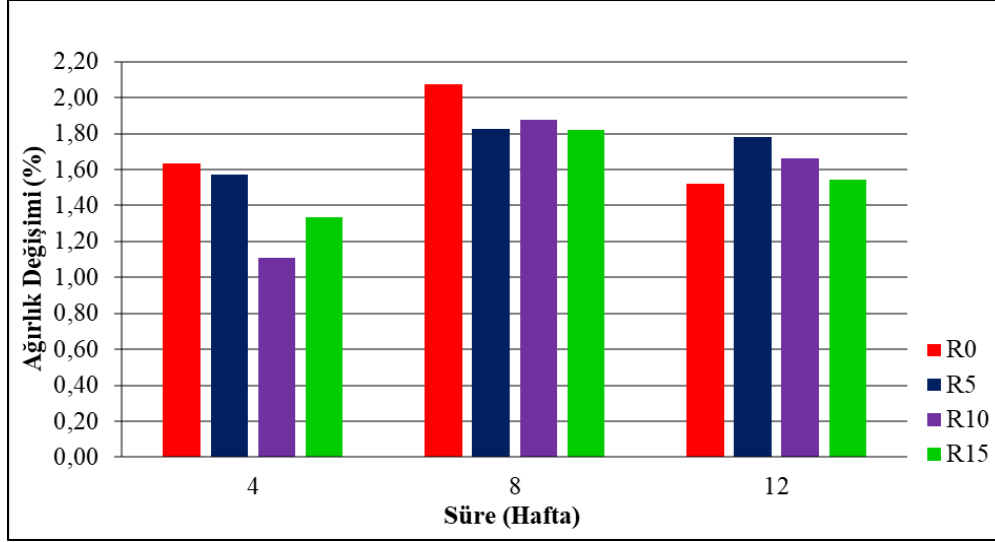
Üretilen geopolimer beton numuneleri sırasıyla 4, 8 ve 12 hafta boyunca sülfat çözeltilerinde bekletilip bu süre zarfında ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. Sülfat etkisine maruz bırakılan beton numunelerinin ağırlık değişimleri verileri Çizelge 4.6’da verilmiş olup, bu değişimler Şekil 4.8’de ve Şekil 4.9’da grafik halinde gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerde ağırlık artışı olmuştur. Ancak veriler incelendiğinde ağırlık değişimlerindeki artış düzenli olmamıştır. Bunun nedeninin beton numuneleri üzerinde biriken sülfat tortularından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.6 : %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.

Çözelti	Karışımlar	Ağırlık Değişimi (%)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 Na ₂ SO ₄	R0	0.99	0.97	1.45
	R5	1.15	0.79	1.24
	R10	0.76	0.77	0.66
	R15	0.71	0.62	0.91
%5 MgSO ₄	R0	1.64	2.07	1.52
	R5	1.57	1.82	1.78
	R10	1.11	1.88	1.66
	R15	1.33	1.82	1.54



Şekil 4.8 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.



Şekil 4.9 : %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin ağırlık değişimleri.

Long vd., (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer beton ve portland çimento betonun magnezyum sülfat direncini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda geopolimer betonların %5 MgSO₄ çözeltisine maruz kalması sonucunda %4.05 oranında ağırlık artışı olduğunu bulmuşlardır.

Elyamany vd., (2018) yaptıkları çalışmada geopolimer harçlar 48 haftaya kadar %10 magnezyum sülfat çözeltisine bırakmışlardır. Geopolimer harçların 36 haftaya kadar magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalması sonucunda ağırlıklarında artış gözlemlemişlerdir. 36 haftadan sonra ise ağırlıklarında çok az değişim olmuştur. Araştırmacılar 36 haftaya kadar ağırlıktaki artışın nedenini muhtemelen boşluk oranı ve maruz kalan yüzeyde veya gözenekler içinde beyaz tortulardan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Maraş (2013) yaptığı tez çalışması kapsamında Elazığ Ferrokrom cürufu, dere agregası ve kırma kum kullanılarak geopolimer beton üretmiştir. Beton karışımlarda EFC dozajı 400 kg/m³ olarak optimum silis modülü 1.35 ve ağırlıkça sodyum oksit miktarı 9.13 olarak belirlenmiştir. Geopolimer betonlar %60 nem ve 75°C sıcaklıkta 72 saat buhar kürü uygulandıktan sonra laboratuvar koşullarında deney gününe kadar muhafaza edilmiştir. 28 gün kür edilen geopolimer beton numuneler %3, %5 ve %7 oranlarında MgSO₄ çözeltisinde 16 hafta süresince bekletilmiştir. Çalışma sonucunda geopolimer beton numunelerinde ağırlık artışı olduğu gözlemlenmiştir.

Dener (2022) yaptığı tez çalışması kapsamında alkali-aktif YFC bağlayıcılı kendinde yerleşen harçların dayanıklılık ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Çalışmada agrega olarak pomza aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Portland çimentosu %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında YFC ile yer değiştirilerek harç numuneleri üretilmiştir. Çalışma sonucunda 6 ay boyunca %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen harç numunelerinin kontrol numunelerine göre ağırlıklarında artış olduğunu belirtmiştir.

4.2.2.3 Sülfat etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizliği

Üretilen geopolimer beton numuneleri %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta bekletildikten sonra kılcal geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney verileri Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verilmiş olup, Şekil 4.10-15’de değişimler grafik olarak gösterilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde sülfat çözeltilerinin her ikisinde de bekleme süresi arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı artmıştır. Deney verileri incelendiğinde her iki çözeltide de atık lastik oranı beton içerisinde arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayısı azalmıştır. Yine her iki çözeltide bekletilen numuneler göz önüne alındığında en yüksek kılcal geçirimsizlik katsayı değeri %0 atık lastik içeren R0 kodlu beton numunesinden elde edilirken, en düşük katsayı değeri %15 atık lastik içeren R15 kodlu beton numunesinden elde edilmiştir. Aynı zamanda %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen beton numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen beton numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayı değerlerinden fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca deney ölçüm zamanı arttıkça birbirini takip eden zamanlar arasında ölçülen katsayı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.

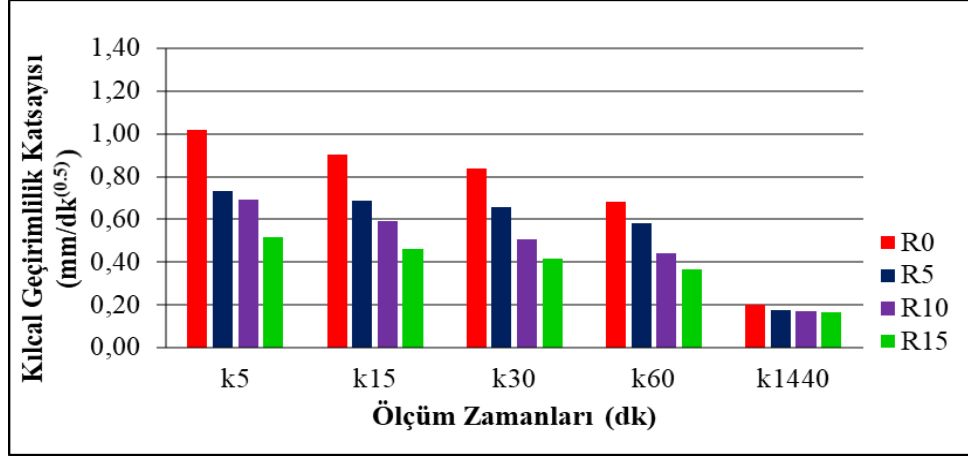
Sülfat çözeltilerinde bekletilen geopolimer beton numuneleri 28 gün kür edilen kontrol numuneleri ile kıyaslandığında kılcal geçirimsizlik katsayısı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin sülfat tortularının beton yüzeyinde birikerek özellikle yüzey boşluklarını azaltmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.7 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

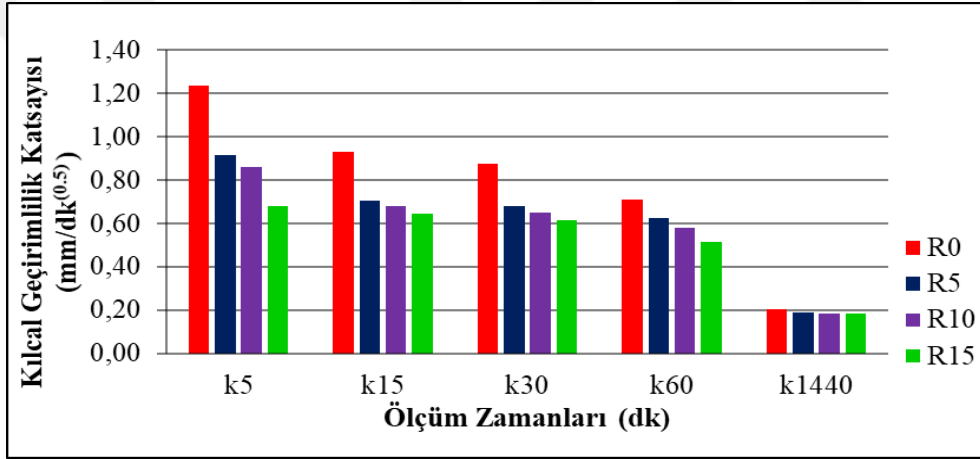
Kılcal geçirimsizlik katsayısı [mm/dk ^(0.5)]							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
%5 Na ₂ SO ₄	4 Hafta	R0	1.02	0.91	0.84	0.68	0.20
		R5	0.73	0.69	0.66	0.58	0.18
		R10	0.69	0.59	0.51	0.44	0.17
		R15	0.52	0.46	0.42	0.37	0.17
%5 Na ₂ SO ₄	8 Hafta	R0	1.23	0.93	0.87	0.71	0.21
		R5	0.92	0.71	0.68	0.62	0.19
		R10	0.86	0.68	0.65	0.58	0.18
		R15	0.68	0.65	0.61	0.51	0.18
%5 Na ₂ SO ₄	12 Hafta	R0	1.30	1.12	0.93	0.77	0.22
		R5	1.01	0.75	0.72	0.68	0.21
		R10	0.88	0.71	0.68	0.61	0.19
		R15	0.78	0.67	0.63	0.54	0.19

Çizelge 4.8 : %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı değerleri.

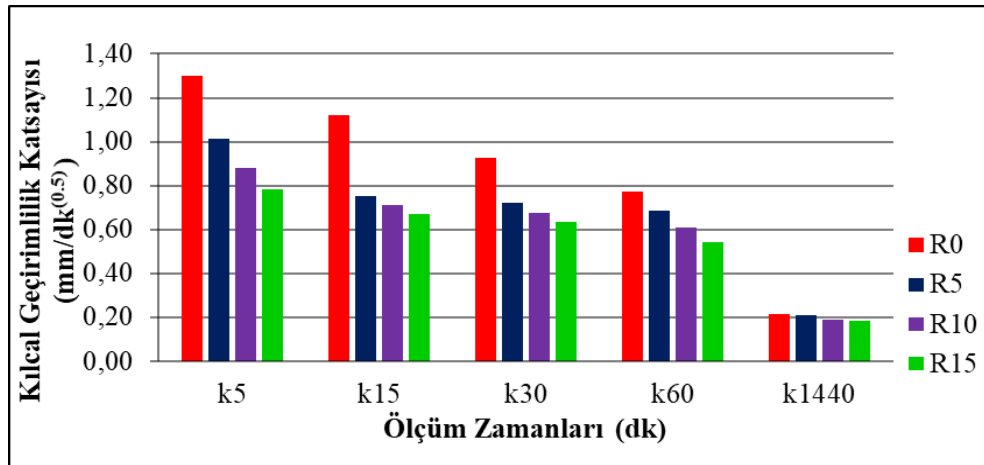
Kılcal geçirimsizlik katsayısı [mm/dk ^(0.5)]							
Çözelti	Süre (Hafta)	Karışımlar	k ₅	k ₁₅	k ₃₀	k ₆₀	k ₁₄₄₀
%5 MgSO ₄	4 Hafta	R0	0.94	0.80	0.75	0.60	0.18
		R5	0.69	0.66	0.64	0.54	0.17
		R10	0.66	0.56	0.48	0.42	0.16
		R15	0.48	0.44	0.38	0.35	0.16
%5 MgSO ₄	8 Hafta	R0	1.04	0.84	0.79	0.68	0.19
		R5	0.89	0.69	0.66	0.58	0.19
		R10	0.76	0.63	0.59	0.53	0.17
		R15	0.64	0.55	0.53	0.48	0.17
%5 MgSO ₄	12 Hafta	R0	1.20	1.01	0.82	0.72	0.21
		R5	0.95	0.71	0.69	0.63	0.20
		R10	0.81	0.65	0.62	0.58	0.18
		R15	0.74	0.60	0.58	0.50	0.18



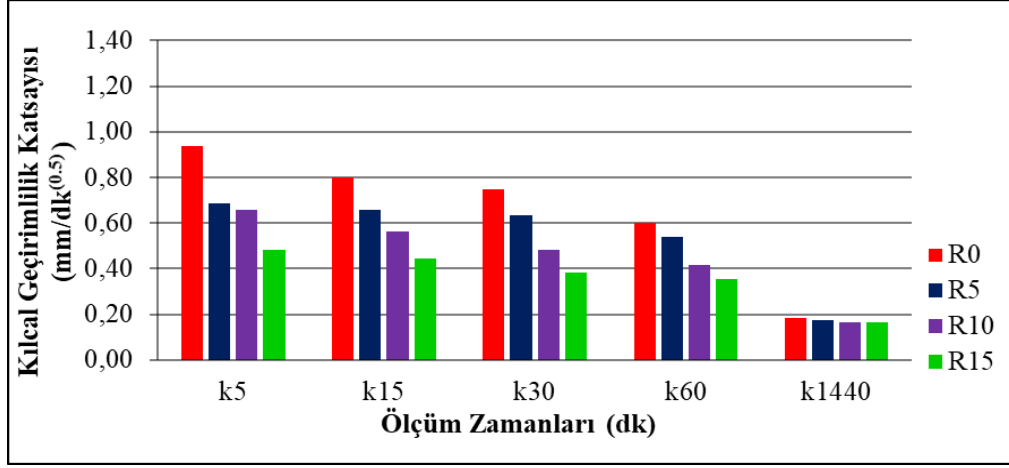
Şekil 4.10 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



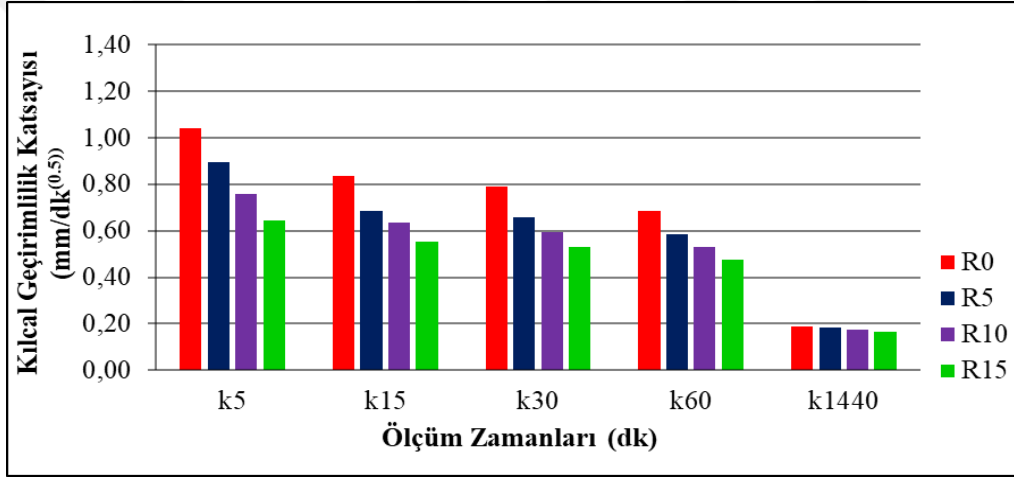
Şekil 4.11 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



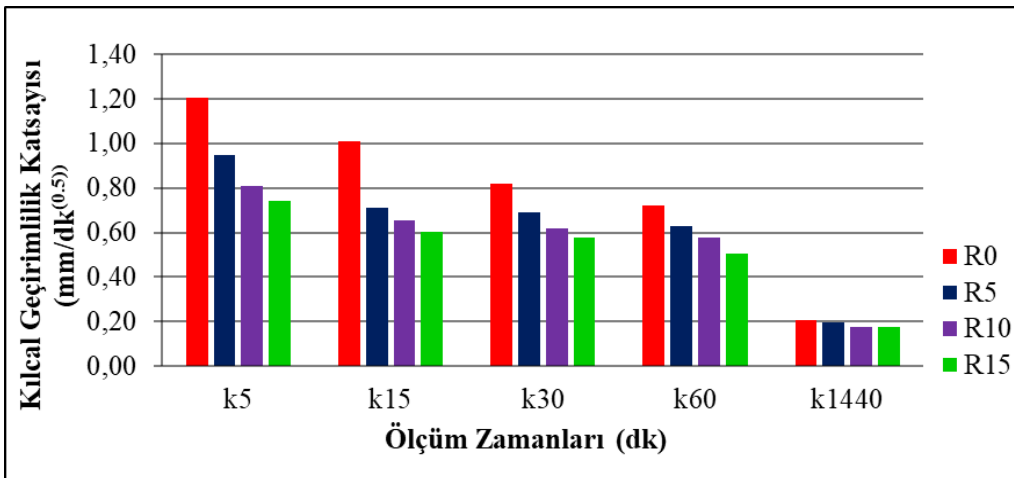
Şekil 4.12 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.13 : %5 MgSO₄ çözeltisinde 4 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.14 : %5 MgSO₄ çözeltisinde 8 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.15 : %5 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.

4.2.2.4 Sülfat etkisindeki numunelerin su emme oranları

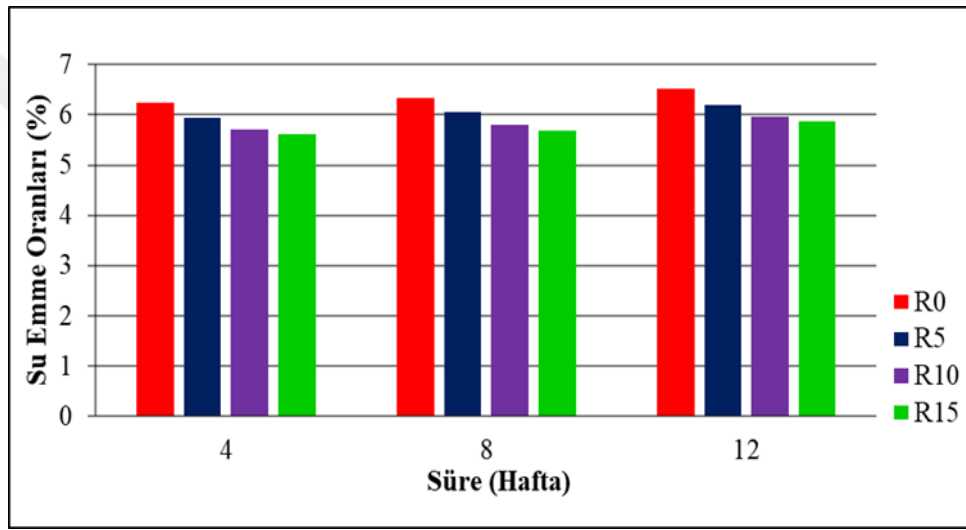
Üretilen geopolimer beton numuneleri 4, 8 ve 12 hafta boyunca %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerine maruz kaldıktan sonra su emme oranları incelenmiştir. Elde edilen deney verileri Çizelge 4.9’da verilip Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de grafik olarak gösterilmiştir. Sülfat etkisine maruz kalan beton numunelerinin su emme oranları, 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin su emme oranları ile kıyaslandığında;

- %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numuneler için; 4 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %36.76, %37.41, %38.59 ve %39.21 oranında artmıştır. 8 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %38.51, %39.95, %41.02 ve %41.44 oranında artmıştır. 12 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %42.89, %42.96, %44.90 ve %45.41 oranında artmıştır.
- %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numuneler için; 4 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %24.73, %26.56, %29.85 ve %30.52 oranında artmıştır. 8 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %31.51, %31.64, %35.19 ve %36.23 oranında artmıştır. 12 hafta sülfat etkisine maruz kalan numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin su emme oranları sırasıyla %40.48, %42.49, %42.96 ve %43.18 oranında artmıştır.

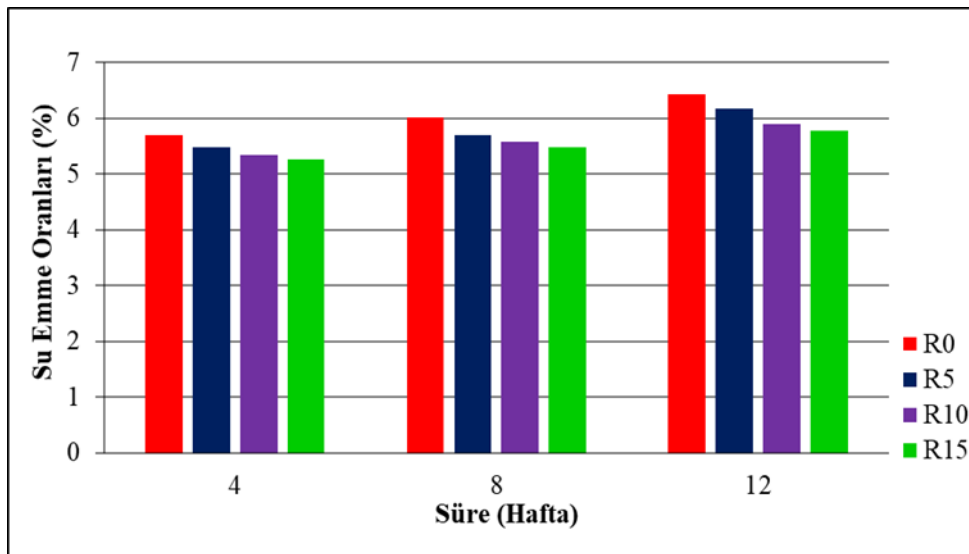
Aynı zamanda tüm numunelerde sülfat çözeltilerinde bekletilme zamanı arttıkça su emme oranları artmıştır. Ancak beton numunelerinin atık lastik ikame edilme oranı arttıkça su emme oranları azalmıştır. Ayrıca %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranlarının %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranlarından daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.9 : %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin su emme oranları.

Çözelti	Karışımlar	Su Emme Oranları (%)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 Na ₂ SO ₄	R0	6.25	6.33	6.53
	R5	5.95	6.06	6.19
	R10	5.71	5.81	5.97
	R15	5.61	5.70	5.86
%5 MgSO ₄	R0	5.70	6.01	6.42
	R5	5.48	5.70	6.17
	R10	5.35	5.57	5.89
	R15	5.26	5.49	5.77



Şekil 4.16 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranları.



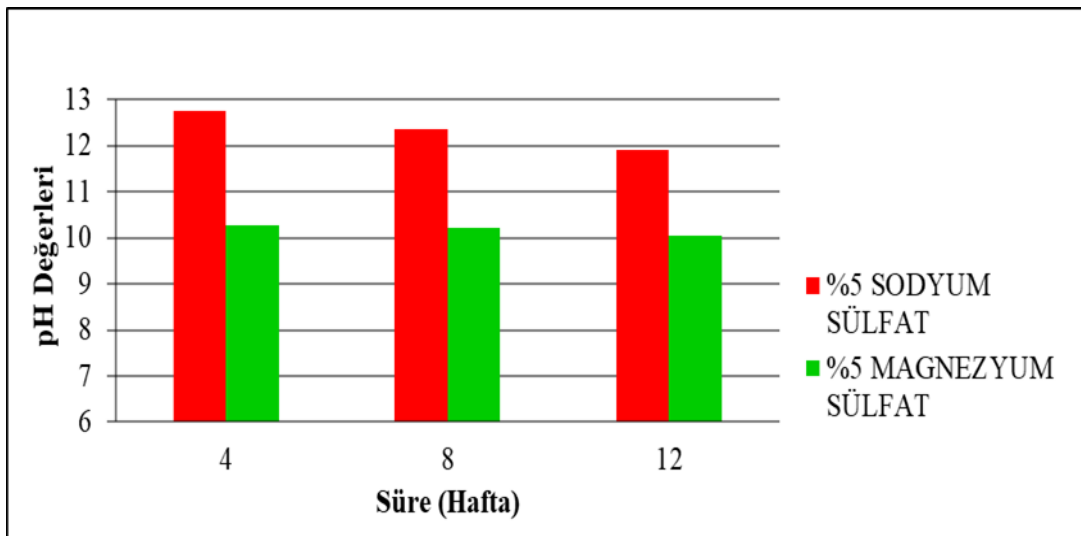
Şekil 4.17 : %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin su emme oranları.

4.2.2.5 Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim

Sülfat etkisine bırakılan geopolimer beton numuneleri sırasıyla 4, 8 ve 12 hafta süresince %5 konsantrasyonlu Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Bu sülfat çözeltileri her dört hafta da aynı konsantrasyonda çözelti hazırlanarak yenilenmiştir. Her dört hafta sonunda içerisinde numuneler bulunan sülfat çözeltilerinin pH değerleri ölçülerek belirlenmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler Çizelge 4.10'da verilmiş olup pH değerlerindeki değişim Şekil 4.18'de grafik olarak gösterilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde her iki sülfat çözeltisinde de bekletilme süresi arttıkça pH değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Her dört hafta da yenilenen %5 Na_2SO_4 ve %5 MgSO_4 çözeltilerinin pH değerleri ise sırasıyla 8.15 ve 7.72 olarak ölçülmüştür. Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim incelendiğinde %5 Na_2SO_4 çözeltisinin pH değerlerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %56.56, %51.78 ve %46.13 oranlarında artış olduğu, %5 MgSO_4 çözeltisinde ise 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %33.03, %32.25 ve %30.05 oranında artış olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10 : %5 Na_2SO_4 ve %5 MgSO_4 çözeltilerinin pH değerleri değişimi.

Çözelti	Çözelti pH değeri	pH değerleri değişimi (pH)		
		Süre (Hafta)		
		4	8	12
%5 Na_2SO_4	8.15	12.76	12.37	11.91
%5 MgSO_4	7.72	10.27	10.21	10.04



Şekil 4.18 : %5 Na_2SO_4 ve %5 MgSO_4 çözeltilerinin pH değerleri değişimi.

Thokchom vd., (2010) çalışmasında magnezyum sülfat çözeltisinde UK bazlı geopolimer harç numunelerinin performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada 24 hafta %10 MgSO₄ çözeltisinin pH değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda pH değerlerinde ilk üç hafta boyunca hızlıca arttığı ve daha sonra kayda değer bir artmanın olmadığı hatta durduğu bulunmuştur.

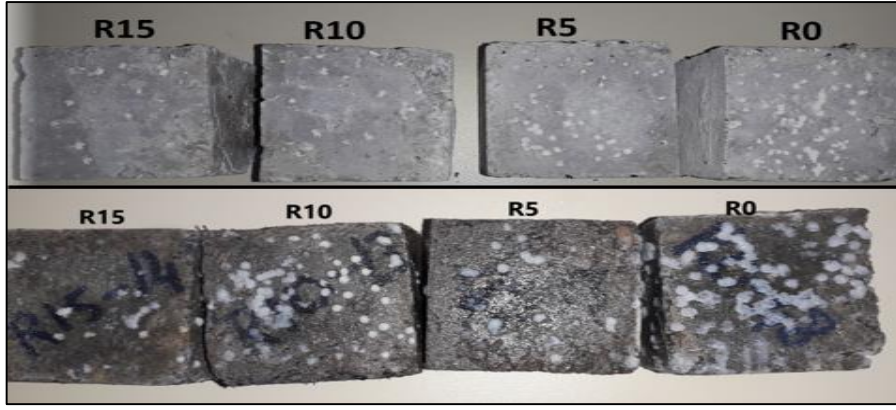
Alcamand vd., (2018) yaptıkları çalışmada metakaolin ve cüruf bazlı geopolimer harçların sülfat dayanıklılığını incelemişlerdir. Harçların üretiminde alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit agrega olarak ise nehir kumu agregası kullanmışlardır. 28 gün boyunca oda koşullarında kür işlemi uygulanan numuneleri ağırlıkça %5 MgSO₄ çözeltisine 180 gün boyunca maruz bırakmışlardır. Çalışmada sülfat çözeltisinin pH değişimini incelemişlerdir. Sülfat çözeltilerinin pH değerleri ilk 30 gün %31.29 artış göstermiş daha sonra magnezyum sülfat çözeltisinin testin sonuna kadar (180 gün) yenilenmemesi nedeniyle çözeltinin pH değeri çoğunlukla sabit olduğu belirtilmiştir.

4.2.2.6 Sülfat etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

Sülfat çözeltilerine bırakılan geopolimer beton numunelerin çözeltilerden çıkarıldıktan sonraki görünüşleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Sülfat çözeltilerinde 12 hafta süresince bekletilen beton numunelerinin görünüşleri incelendiğinde %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki numunelerde belirgin bir renk değişimi olmamış, yüzeylerinde çatlama vb. görülmemiştir. Ancak %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin görünüşleri beyazımsı bir renk olup yüzeyinde beyaz lekeler oluşmuştur.



Şekil 4.19 : %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin görünüşleri.



Şekil 4.20 : %5 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin yüzeyinde görülen beyaz lekeler.

Thokchom vd., (2010) tarafından magnezyum sülfat çözeltisinde UK bazlı geopolimer harç numunelerinin performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Numuneler, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisinin bir karışımı ile etkinleştirilerek düşük kalsiyumlu uçucu külden üretilmiş ve termal olarak kürlenmiştir. Numuneyi 24 haftaya kadar ıslatmak için ağırlıkça %10 magnezyum sülfat çözeltisi kullanmışlardır. Çalışmada belirtilen süre boyunca geopolimer harçların görünümünü incelemiştir. Araştırma sonunda numune yüzeyinde başlangıçta yumuşak olan ancak daha sonra sert kristallere dönüşen beyaz tortular meydana geldiğini ifade etmiştir.

4.2.3 Donma çözülme etkisindeki numuneler ile ilgili bulgular ve tartışma

Geopolimer beton numuneleri 28 gün kür edildikten sonra donma çözülme cihazına yerleştirilmiştir. Donma çözülme cihazına yerleştirilen beton numuneleri 100, 200 ve 300 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme döngülerine tabi tutulmuştur. Donma çözülme etkisine bırakılan geopolimer beton numunelerin sırasıyla 100, 200 ve 300 çevrim sayısı sonrası basınç dayanımı, ağırlık değişimi, kılcal geçirimsizlik katsayıları ve su emme oranları incelenerek kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Aynı zamanda donma çözülme döngüsüne bırakılan numunelerin görsel incelemeleri ve içyapı görüntüleri elde edilmiştir.

4.2.3.1 Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

Donma çözülme etkisine maruz kalan geopolimer beton numunelerin sırasıyla 100, 200 ve 300 çevrimlik donma çözülme etkisinden sonra basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen veriler Çizelge 4.11’de verilip Şekil 4.21’de grafik halinde gösterilmiştir. 100, 200 ve 300 donma çözülme çevrimleri sonunda elde edilen basınç dayanım değerleri 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin basınç dayanım değerleri ile kıyaslandığında;

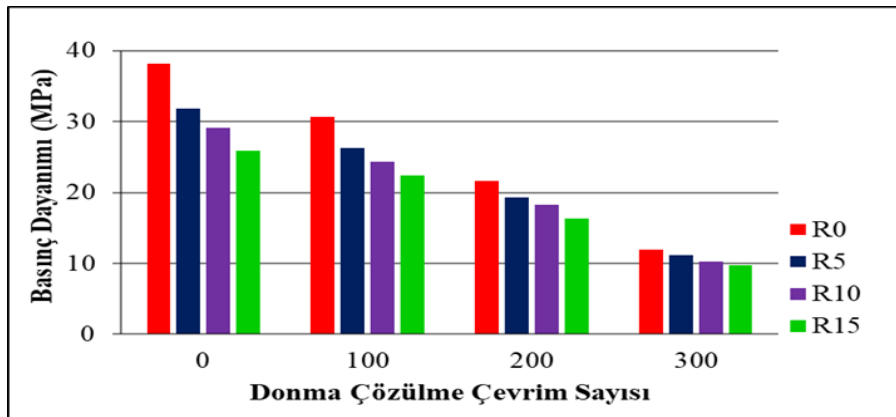
- 100 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %19.49, %17.48, %16.39 ve %13.80 oranında azalmıştır. 200 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %43.15, %39.22, %37.01 ve %36.92 oranında azalmıştır. 300 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerde R0, R5, R10 ve R15 kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %68.69, %65.08, %64.67 ve %62.24 oranında azalmıştır.

Aynı zamanda deney sonuçlarına bakıldığında geopolimer beton numunelerine atık lastik ikame edilme oranı arttıkça basınç dayanım değerleri azalmıştır. Ancak basınç dayanım değerlerindeki azalma yüzdeleri göz önüne alındığında geopolimer beton numunelerine atık lastik takviye edilmesinin olumlu etkisi olduğu söylenebilir.

Ayrıca donma çözülme çevrim sayısı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. En yüksek basınç dayanım değeri 100 çevrim donma çözülme etkisindeki %0 atık lastik içeren R0 kodlu geopolimer beton numunesinde görülürken, en düşük basınç dayanım değeri 300 çevrim donma çözülme etkisindeki %15 atık lastik içeren R15 kodlu geopolimer beton numunesinde görülmektedir. Deney verileri incelendiğinde donma çözülme etkisi sonrası beton numunelerinde büyük oranda dayanım kaybı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.11 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları.

Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)			
	Donma Çözülme Çevrim Sayısı			
	0	100	200	300
R0	38.17	30.73	21.70	11.95
R5	31.87	26.30	19.37	11.13
R10	29.10	24.33	18.33	10.28
R15	25.95	22.37	16.37	9.80



Şekil 4.21 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları.

Rashad ve Sadek., (2020) yaptıkları çalışmada alkali aktive cüruf ve atık lastik kauçuğu kullanarak macun üreterek atık lastik kauçuğun donma çözülme direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada macunları aktive etmek için sodyum silikat kullanılmıştır. Atık lastik kauçukları %1, %2.5, %5 ve %15 oranlarında cüruf yerine ikame edilmiştir. Üretilen macunlar 28 gün kür işleminden sonra sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 çevrim olacak şekilde donma çözülme etkisine bırakılmıştır. Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanımı %1 ile %69.9 arasında azalmıştır. Atık lastik kauçuğunun donma kaynaklı gerilmelerin azaltılmasında ve don suyu alanı oluşturmada olumlu katkısı olduğu gözlenmiştir.

Özdal (2019) yaptığı tez çalışması kapsamında Elazığ ferrokrom cürufu ve YFC kullanarak ürettiği geopolimer betonların donma çözülme etkisi sonrası dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat kullanmıştır. Elazığ ferrokrom cürufunu ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında YFC ile yer değiştirmiştir. Donma çözülme döngülerini ASTM C666 standardına uygun olarak sırasıyla 50, 100, 150, 200 ve 300 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme döngüleri uygulamıştır. Çalışma sonucunda donma çözülme sayısı arttıkça numunelerin basınç dayanımında azalma görülmüştür. Elazığ ferrokrom cürufu oranı %75 olan numuneler 200 çevrime kadar, %100 olan numuneler ise 150 çevrime kadar dayanabildiği ve dağıldığı görülmüştür.

Doğan (2005) yaptığı tez çalışması kapsamında PÇ 42,5 çimento, kırma taş ve atık lastik kullanarak beton üretmiştir. Atık lastikleri %10, %15, %30, %45 hacim oranlarında kırmataş agrega yerine ikame ederek ürettiği betonların dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır. Beton numunelerin 25 tekrarlı donma çözülme deneyi basınç dayanımı değerlerinin %3 ile %8 arasında atık lastik artma oranına bağlı olarak azaldığını gözlemlemiştir.

Gönen (2018) yaptığı çalışmada atık lastik kauçuklu betonların donma çözülme direncini incelemiştir. Çalışmada portland çimento 0-4 mm boyutunda ince agrega ve 4-8 mm boyutunda iri agrega kullanılmıştır. Atık lastik kauçukları 1-2 mm boyutunda olmak üzere atık lastik kauçuk %0.5, %1, %2 ve %4 oranlarında kum ve çakıl ile yer değiştirmiştir. Ürettiği betonları 28 gün kür ettikten sonra donma çözülme etkisine bırakmıştır. Çalışma sonucunda 28 çevrim suda donma çözülme yapılan numunelerin dayanımlarının azaldığını ancak atık lastik kauçuğunun donma çözülme direncine olumlu katkısı olduğu belirtilmiştir.

Guelmine (2022) yaptığı çalışmada atık lastik kauçuk kullanarak ürettiği betonların donma çözülme etkisinden sonra dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak portland çimento agrega olarak ise dere kumu agregası ve çakıl kullanmıştır. Atık lastik kauçuk boyutları 0.08-3 mm olmak üzere dere kumu agregası yerine %5, %10 ve %15 oranlarında ikame etmiştir. 28 gün boyunca su kürü uygulanan numuneler donma çözülme testine tabi tutulmuştur. Donma çözülme deneyi -30°C ve 20°C sıcaklıklar arasında değişen ve 120, 240 ve 340 çevrim sayısı olacak şekilde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda numuneler üzerinde basınç dayanım deneyi yapılmış ve çevrim sayısı arttıkça basınç dayanımının azaldığını gözlemlemiştir. Aynı zamanda betona atık lastik ilave edilmesinin donma çözülme direncine olumlu etkisi olduğunu ve bunun nedeninin atık lastik kauçuklarının buzun hidrolik basıncını azalttığından kaynaklandığını belirtmiştir.

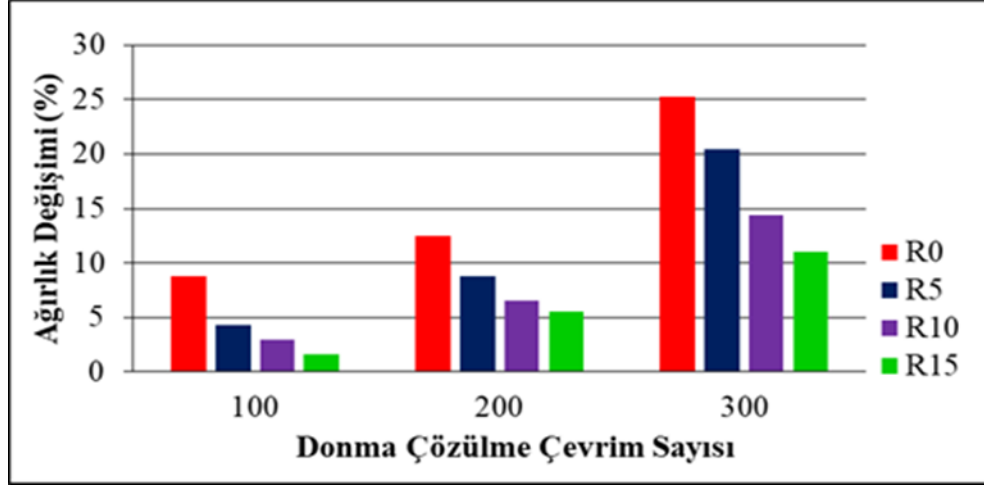
4.2.3.2 Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri

Üretilen geopolimer beton numuneleri 100, 200 ve 300 çevrim donma çözülme etkisinden sonra ağırlıkları tartılıp oluşan ağırlık değişimi incelenmiştir. Donma çözülme etkisi sonrası ağırlık değişim değerleri Çizelge 4.12’de verilmiş olup Şekil 4.22’de grafik halinde gösterilmiştir. Deney sonuçlarından da görülebileceği üzere tüm numunelerin ağırlıkları azalmıştır. Aynı zamanda donma çözülme çevrim sayısı arttıkça beton numunelerinin ağırlık değişimindeki azalma değerleri de artmıştır. Ancak donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimindeki azalma yüzdeleri incelendiğinde atık lastik oranı arttıkça ağırlık kaybının azaldığı görülmüştür. Bir başka deyişle geopolimer beton numunelerine atık lastik ikame edilmesinin ağırlık kaybı üzerinde olumlu etkisi olmuştur.

Elde edilen veriler incelendiğinde maksimum ağırlık kaybının 300 çevrim donma çözülme etkisi sonrası %0 atık lastik içeren R0 kodlu beton numunesinde %25.28 olduğu görülürken, minimum ağırlık kaybının 100 çevrim donma çözülme etkisi sonrası %15 atık lastik içeren R15 kodlu beton numunesinde %1.65 olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanım değerleri ile de uyumludur.

Çizelge 4.12 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimleri.

Karışımlar	Ağırlık Kayıpları (%)		
	Donma Çözülme Çevrim Sayısı 100	200	300
R0	8.82	12.53	25.28
R5	4.35	8.76	20.49
R10	2.90	6.59	14.39
R15	1.65	5.49	11.07



Şekil 4.22 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimindeki azalma.

Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada UK ve öğütülmüş granüle YFC bağlayıcılarını NaOH aktivatörü ile aktive ederek geopolimer beton üretmişlerdir. Atık lastik kauçuğunun boyutu 0.15-4.75 mm boyutunda olacak şekilde 0.15-4.75 mm boyutundaki kum ile hacimce %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirmişlerdir. Üretilen geopolimer beton numunelerin 25 ve 50 çevrim donma çözülme etkisine bırakılmıştır. Her bir çevrim -20°C ve $+5^{\circ}\text{C}$ arasında olmak üzere 4 saat süren çevrimlerden oluşmaktadır. 25 çevrim sonrası atık lastik kauçuk oranı % 0'dan % 20'ye yükseldiğinde kütle kaybı % 4.6'dan % 1.3'e düşmüştür. 50 çevrim sonrası ise kütle kaybı %12.1'den %6.7'ye düşmüştür. Çevrim sayısı arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. Lastik kauçuğunun artmasının donma çözülme direncine olumlu etkisi olmuştur.

Özdal (2019) yaptığı tez çalışması kapsamında Elazığ ferrokrom cürufu ve YFC kullanarak ürettiği geopolimer betonların donma çözülme etkisi sonrası dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum metasilikat kullanmıştır. Elazığ ferrokrom cürufunu ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında YFC ile yer değiştirmiştir. Donma çözülme çevrimlerini ASTM C666 standardına uygun olarak sırasıyla 50, 100, 150, 200 ve 300 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme çevrimleri uygulamıştır. Çalışma sonucunda donma çözülme çevrim sayısı arttıkça numunelerde %0.22 ile %61.68 arasında ağırlık kayıplarının olduğu görülmüştür.

Şinik (2019) yaptığı çalışmada UK esaslı geopolimer betonların donma çözülme direncini incelemiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak UK aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. 50°C ve 70°C sıcaklıklarda kür edilen geopolimer betonlara 28 gün sonra donma çözülme deneyi uygulanmıştır. Donma çözülme deneyi -20°C 'ye kadar

dondurma özelliği olan dondurucuda 12 saat bekletildikten sonra çıkartılmış ve 23°C sıcaklıktaki suda 12 saat bekletilmiştir. 25 donma çözülme çevriminin ardından geopolimer betonların ağırlık değişimleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda donma çözülme etkisindeki numunelerin aynı yaş ve sıcaklıkta kür edilen kontrol numunelerine göre %4.3 oranında ağırlık kaybı olduğunu bulmuştur.

Guelmine (2022) yaptığı çalışmada atık lastik kauçuk kullanarak ürettiği betonların donma çözülme etkisinden sonra dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak portland çimento agrega olarak ise dere kumu agregası ve çakıl kullanmıştır. Atık lastik kauçuk boyutları 0.08-3 mm olmak üzere dere kumu agregası yerine %5, %10 ve %15 oranlarında ikame etmiştir. 28 gün boyunca su kürü uygulanan numuneler donma çözülme testine tabi tutulmuştur. Donma çözülme deneyi -30°C ve 20°C sıcaklıklar arasında değişen ve 120, 240 ve 340 çevrim sayısı olacak şekilde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 340 çevrim uygulanan numunelerde %0 atık lastik kauçuk içeren numunelerin ağırlık kaybı %3.50 olurken %15 atık lastik kauçuk içeren numunelerin ağırlık kaybı %1.50 olarak bulunmuştur. Araştırmacı atık lastik kauçuğunun yüzey hasarını önemli ölçüde azalttığını ve atık lastiğin bu özelliğinin donma-çözülme saldırısına maruz kalan beton yapıların ömrünü uzatabileceğini belirtmiştir.

Duan vd. (2017) yaptıkları çalışmada bağlayıcı malzeme olarak metakaolin, UK, cüruf kullanarak ürettikleri geopolimer betonların donma çözülme etkisine karşı dayanıklılık özelliklerini test etmişlerdir. Çalışmada geopolimer beton numuneleri aktive etmek için 10 M sodyum hidroksit kullanmışlar ve üretilen beton numunelerine 28 gün boyunca 20°C sıcaklıkta standart kür uygulamışlardır. Beton numuneleri 0, 25, 50, 75 ve 100 çevrim sayısı olacak şekilde donma çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda çevrim sayısı arttıkça numunelerin ağırlıklarında azalma görülmüştür. Araştırmacılar çalışma sonucunda beton numunelerinin ağırlıklarındaki azalmanın 75 çevrime kadar belirgin olmadığını ancak bu çevrim sayısından sonra çok daha hızlı kütle kaybı olduğunu belirtmişlerdir.

4.2.3.3 Donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçimliliği

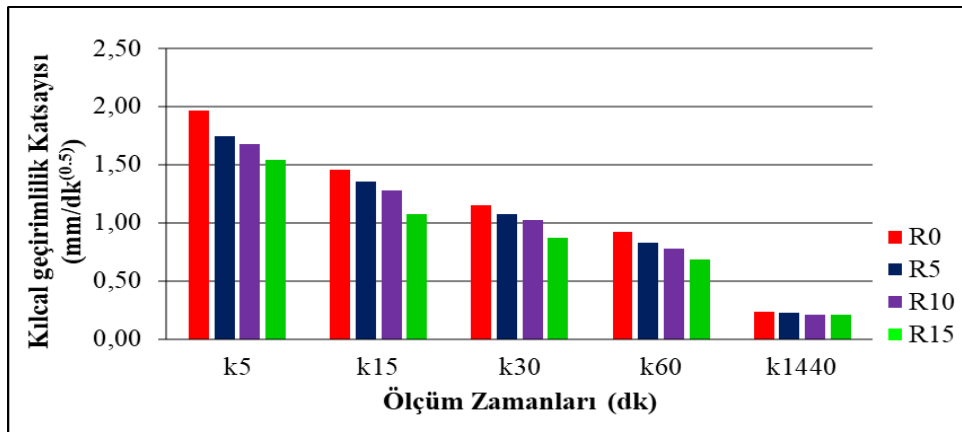
Üretilen geopolimer beton numuneleri 100, 200 ve 300 çevrim donma çözülme etkisinden sonra kılcal geçirimsizlik deneyi uygulanmıştır. Deney sonrası elde edilen değerler Çizelge 4.13'de verilmiş ve Şekil 4.23-25'de grafik olarak gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde donma çözülme çevrim sayısı arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayı değerleri artmıştır. Ancak

geopolimer beton numunelerine atık lastik ilave edilme oranı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayı değerleri azalmıştır. Yani tüm donma çözülme çevrimlerinde en yüksek kılcal geçirimlilik katsayısı %0 atık lastik içeren R0 kodlu beton numunesinden elde edilirken, en düşük kılcal geçirimlilik katsayısı %15 atık lastik içeren R15 kodlu beton numunesinden elde edilmiştir.

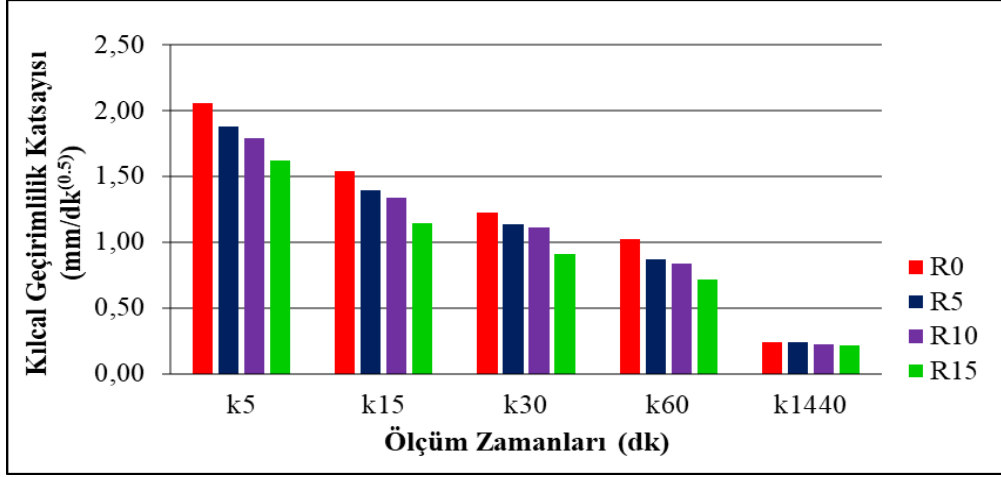
Ayrıca deney ölçüm zamanı arttıkça kılcal geçirimlilik katsayıları azalmaktadır. Donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimlilik katsayıları, 28 gün kür olan kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında ise tüm donma çözülme çevrimlerinden elde edilen kılcal geçirimlilik katsayılarının, kontrol numunelerinden elde edilen kılcal geçirimlilik katsayılarından daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.13 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı değerleri.

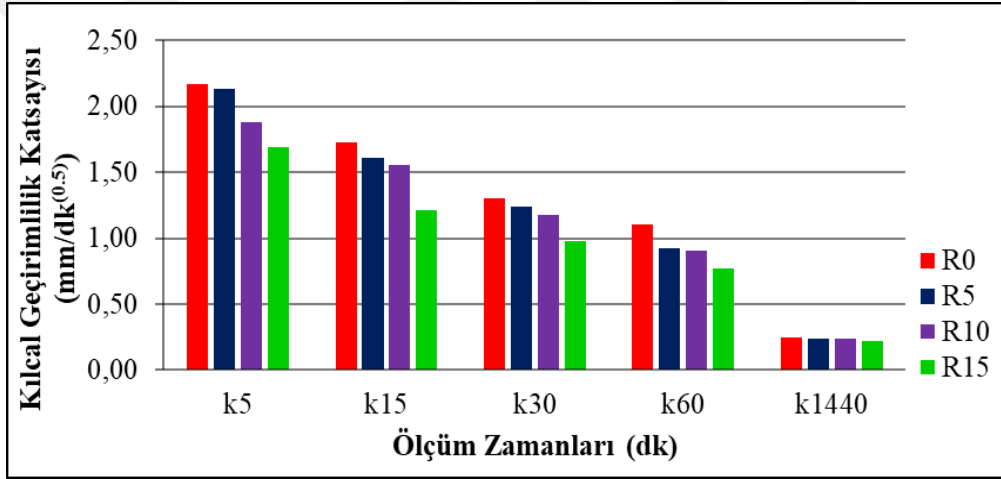
Donma çözülme çevrim sayısı	Karışımlar	Kılcal geçirimlilik katsayısı [$\text{mm/dk}^{(0.5)}$]				
		k_5	k_{15}	k_{30}	k_{60}	k_{1440}
100	R0	1.96	1.46	1.15	0.92	0.23
	R5	1.74	1.35	1.07	0.83	0.23
	R10	1.68	1.27	1.02	0.78	0.21
	R15	1.54	1.08	0.87	0.68	0.21
200	R0	2.06	1.54	1.22	1.03	0.24
	R5	1.88	1.39	1.14	0.87	0.24
	R10	1.79	1.34	1.11	0.83	0.23
	R15	1.62	1.15	0.91	0.72	0.22
300	R0	2.17	1.72	1.30	1.10	0.25
	R5	2.13	1.61	1.24	0.92	0.24
	R10	1.88	1.55	1.18	0.90	0.24
	R15	1.69	1.21	0.97	0.77	0.22



Şekil 4.23 : 100 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.24 : 200 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.



Şekil 4.25 : 300 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki değişim.

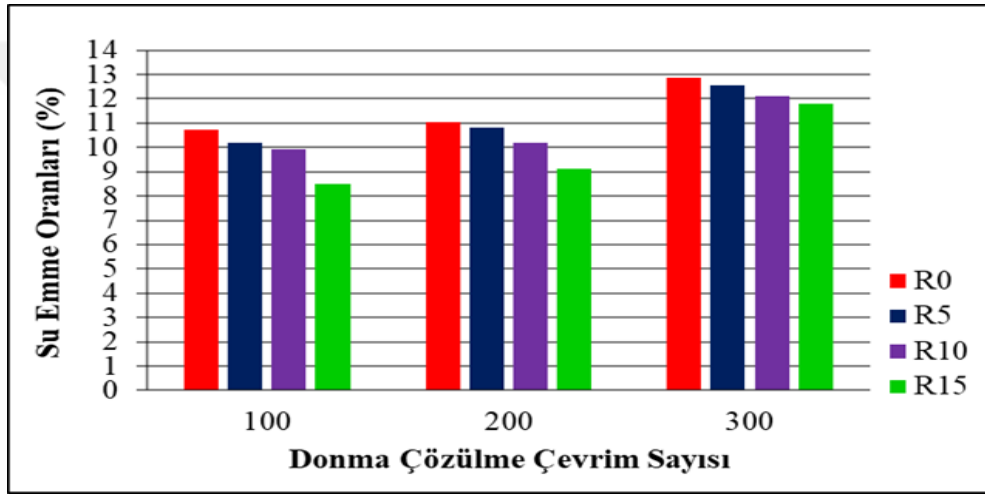
4.2.3.4 Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları

Geopolimer numunelerin 100, 200 ve 300 çevrim donma çözülme etkisinden sonra su emme oranları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14’de verilip Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Bulgular incelendiğinde donma çözülme çevrim sayısı arttıkça su emme oranları artmıştır. Ancak geopolimer beton numunelerine atık lastik takviye edilme oranı arttıkça su emme oranlarında azalma görülmüştür. Donma çözülme etkisi sonrası maksimum su emme oranı 300 çevrim uygulanan ve %0 oranında atık lastik içeren R0 kodlu beton numunesinde elde edilirken, minimum su emme oranı 100 çevrim uygulanan ve %15 oranında atık lastik içeren R15 kodlu beton numunesinden elde edilmiştir. Ayrıca donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin

su emme oranları ile kıyaslandığında büyük oranda artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin donma çözülme çevrim sayısı arttıkça numunelerde daha fazla çatlaklar olacağı ve bu çatlaklara su girişinden dolayı su emme oranlarının arttığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.14 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları.

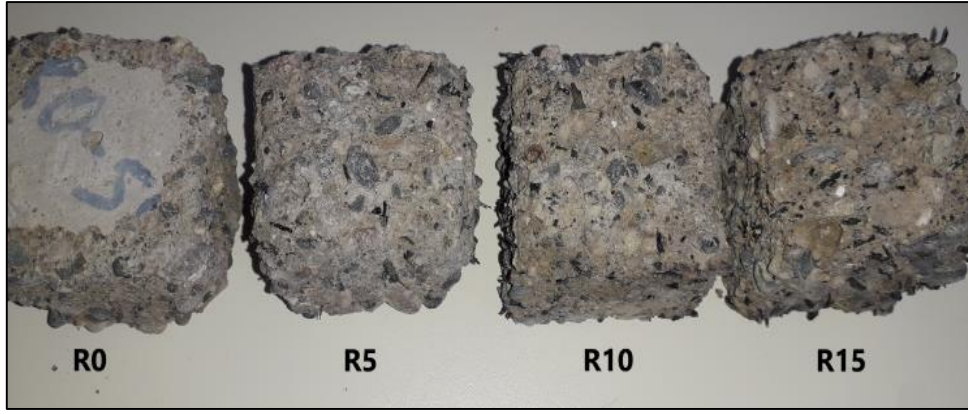
Karışımlar	Su Emme Oranları (%)		
	Donma Çözülme Çevrim Sayısı		
	100	200	300
R0	10.74	11.04	12.87
R5	10.20	10.83	12.55
R10	9.92	10.21	12.12
R15	8.49	9.11	11.82



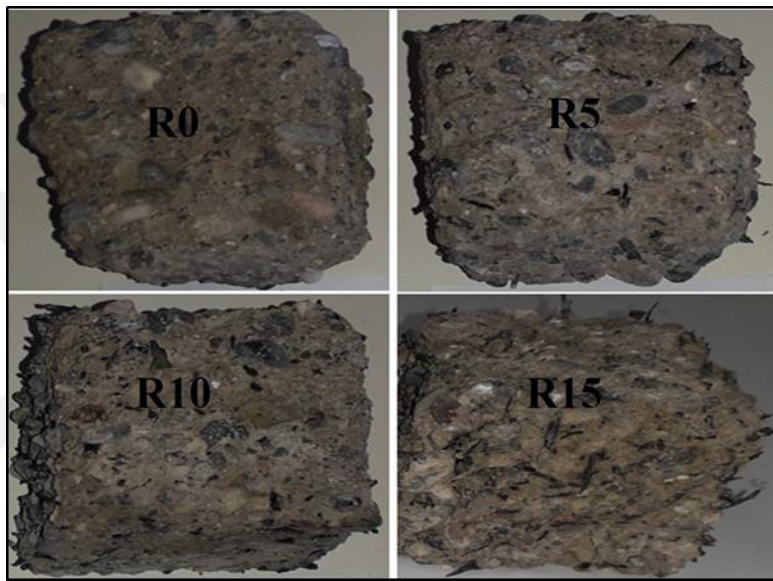
Şekil 4.26 : Donma çözülme etkisindeki numunelerin su emme oranları.

4.2.3.5 Donma çözülme etkisindeki numunelerin görsel incelemeleri

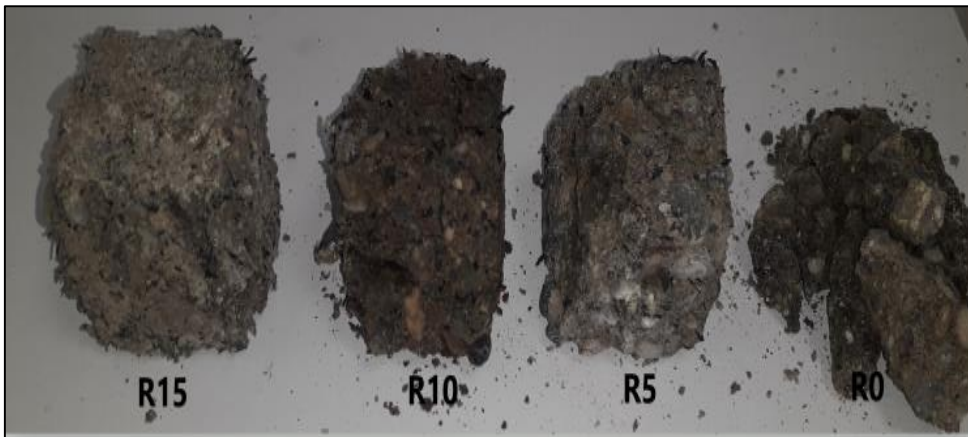
Geopolimer beton numuneleri donma çözülme etkisinden sonra görsel olarak incelenmiştir. Elde edilen görünüşler Şekil 4.27-28’de gösterilmiştir. Şekil 4.27 ile Şekil 4.28’de verilen ve 300 çevrim donma çözülme etkisine ait olan görseller incelendiğinde geopolimer beton numunelerde büyük oranda hasar meydana geldiği ve yüzeylerinde dökülmeler olduğu görülmektedir. Aynı zamanda donma çözülme etkisi sonrası geopolimer betonların içeriğinde bulunan atık lastikler belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.29’da ise 300 çevrim donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanım deneyi yapılan beton numunelerinin görünüşleri verilmiştir. Bu görünüşler incelendiğinde atık lastik oranı arttıkça beton numunelerinin dağılmasının azaldığı fark edilmektedir. Yine aynı şekilde kontrol numunelerinde olduğu gibi atık lastik parçacıklarının lif etkisine benzer bir yapı oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 4.27 : Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin görünüşleri.



Şekil 4.28 : Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin yüzeylerindeki atık lastik görünüşleri.



Şekil 4.29 : Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanım deneyi uygulanan numunelerin görünüşleri.

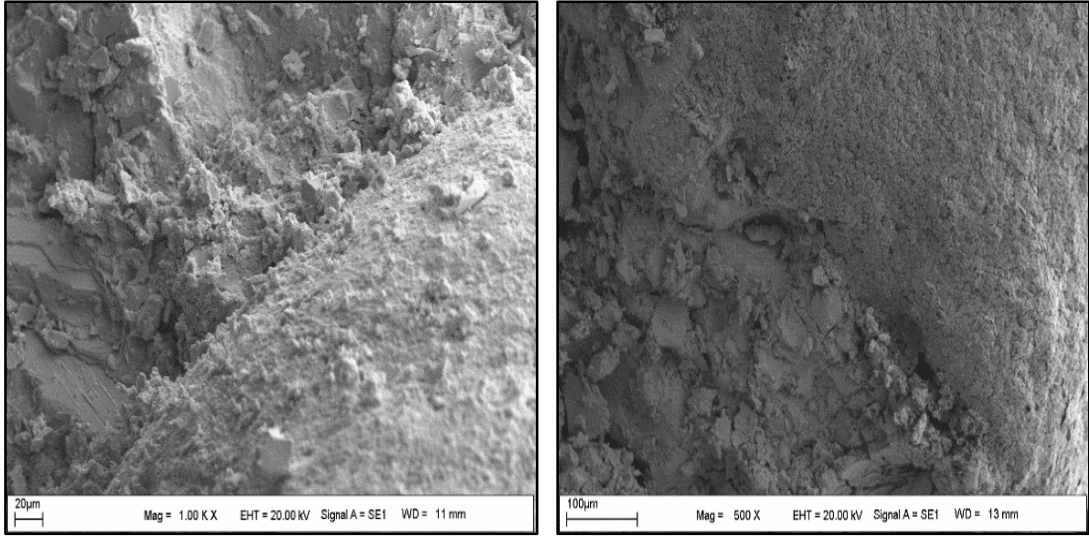
Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada donma çözülme etkisi sonrası numuneleri görsel olarak incelemiştir. 50 çevrim donma çözülme direncine maruz kalan numunelerin büyük hasar aldığını yüzeylerinde dökülmeleriyle birlikte iri agregaların görüldüğünü belirtmişlerdir.

Guelmine (2022) yaptığı çalışmada atık lastik kauçuk kullanarak ürettiği betonların donma çözülme etkisinden sonra dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Donma çözülme deneyi -30°C ve 20°C sıcaklıklar arasında değişen ve 120, 240 ve 340 çevrim sayısı olacak şekilde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda çevrim sayısı arttıkça numunelerin yüzeylerinde dökülmeler olduğu gözlemiştir. Ayrıca atık lastik kauçuğunun donma-çözülme saldırısına maruz kalan betonun yüzeyini iyileştirdiğini belirtmiştir.

Jiao vd., (2021) yaptıkları çalışmada kürlenme koşullarının (standart ve buharla kürlenme) C sınıfı UK, F sınıfı UK, cüruf ve Ca(OH) içeren geopolimer harçların donma-çözülme direnci üzerindeki etkilerine odaklanmışlardır. Geopolimer harç örnekleri, 0.35 ve 0.40 su/bağlayıcı oranlarında, farklı bileşimlerle %45 ve %100 CaO içerikleri ile hazırlanmıştır. Donma çözülme etkisine bırakılan numunelerin görsel olarak incelemelerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda 100 donma-çözülme çevriminden sonra bozulma belirtisi gözlenmemiştir. Bununla birlikte, don çatlaklarının 200 çevrimde ortaya çıktığını ve bu bozulmanın çevrim sayısı arttıkça ilerlediğini belirtmişlerdir.

4.2.4 İç yapı analizi

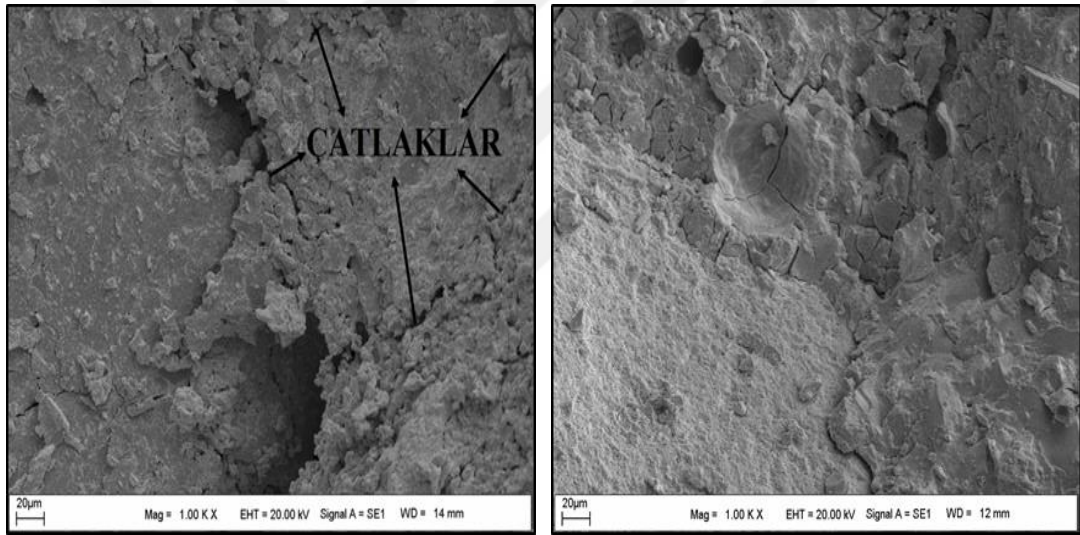
Aşağıda verilen görsellerde 28 gün kür edilen kontrol numunelerin, 12 hafta sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin ve 300 döngü donma çözülme etkisindeki numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri R0 ve R15 kodlu geopolimer beton numuneleri için verilmiştir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de görüldüğü gibi hem %5 MgSO₄ hem de %5 Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen geopolimer betonların SEM görüntülerine bakıldığında, sülfat etkisiyle numunelerin içyapılarında çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Sülfat iyonları numunenin içerisine geçtiğinden dolayı numunelerde çatlak ve gözeneklilik oluşmuştur. Donma çözülme etkisindeki numunelerin SEM görüntülerinde bakıldığında çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.33’den de görüldüğü üzere atık lastik oranı arttıkça çatlakların miktarı ve genişliği azalmıştır. Oluşan bu çatlaklar geopolimerlerin mekanik özelliklerinde etkili olmuştur ve oluşan çatlakların donma-çözülme olayı sonrası buz hacminin artması neticesinde meydana gelen gerilmelerin, betonun çekme gerilmelerini aşmasından dolayı kaynaklandığı bilinmektedir.



(a)

(b)

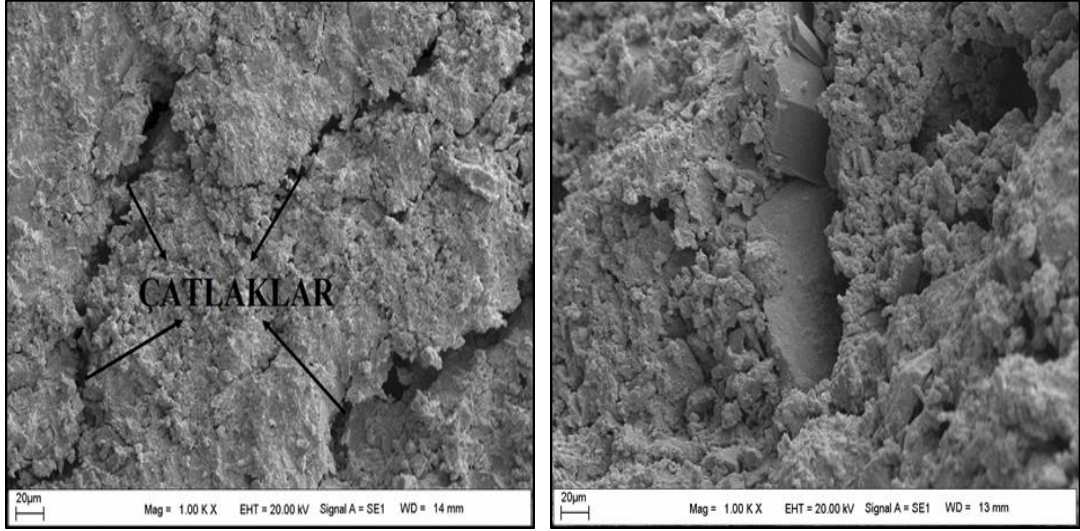
Şekil 4.30 : 28 gün kür sonrası kontrol numunelerinin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.



(a)

(b)

Şekil 4.31 : 12 hafta %5 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin SEM görüntüleri; (a) R0, (b) R15.

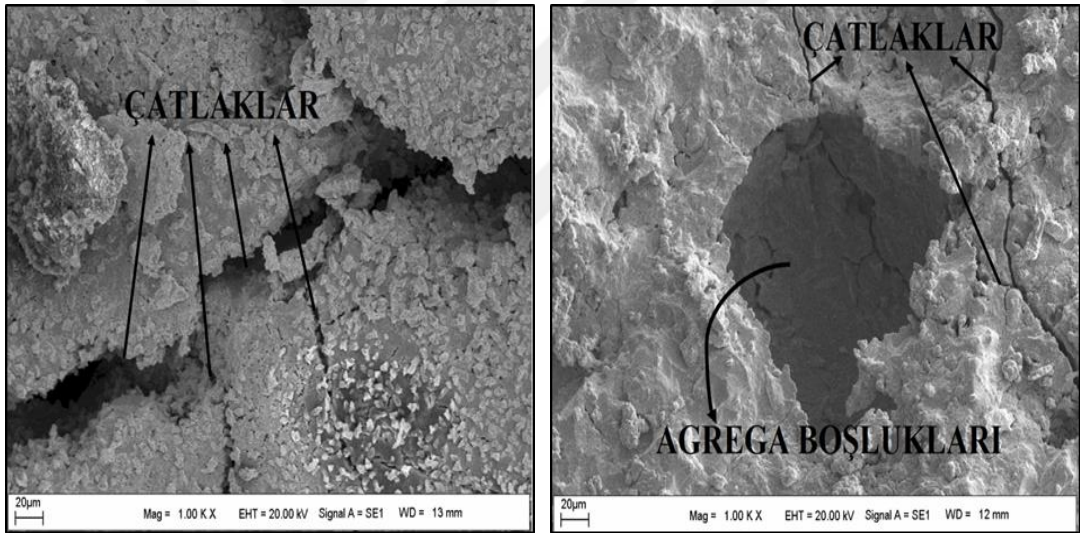


(a)

(b)

Şekil 4.32 : 12 hafta %5 MgSO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerin SEM görüntüleri;

(a) R0, (b) R15.



(a)

(b)

Şekil 4.33 : 300 çevrim donma çözülme etkisindeki numunelerin SEM görüntüleri;

(a) R0, (b) R15.

Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada donma çözülme etkisi sonucu numunelerin SEM görüntülerini incelemiştir. Elde ettikleri görüntülere göre donma çözülmeye maruz kalan numunelerde çatlaklar ve kristaller gözlemlenmiştir. Bašćarević (2014) yaptığı çalışmada geopolimer harç numunelerinin SEM görüntülerini incelemiştir. Çalışmada sülfat etkisi sonucu basınç dayanımının arttığı numunelerde kırılma yüzeyinde Na₂SO₄ kristalleri gözlemlenmiştir. Na₂SO₄ kristallerinin varlığını muhtemelen geopolimer yapısındaki sülfat

iyonlarının göçü ile ilişkilendirmiştir. Elyamany vd., (2018) yaptıkları çalışmada geopolimer harcın magnezyum sülfat etkisi sonucu SEM görüntülerinde çatlakların ve alçı kristallerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bakharev (2005) yaptığı çalışmada ürettiği geopolimerlerin SEM görüntülerini incelemiştir. Çalışmada magnezyum sülfat sonrası basınç dayanımının arttığı numunelerde derin dikey çatlakların oluşumunu gözlemlemiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik ince agrega yerine ikame edilerek geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneleri ağırlıkça %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinde 4, 8 ve 12 hafta süresince bekletilmiştir. Aynı zamanda beton numunelerine sırasıyla 100, 200 ve 300 çevrim donma çözülme etkisi uygulanmıştır. Geopolimer betonlarda atık lastik kullanımının sülfat direncine ve donma çözülme direncine etkisini incelemek için beton numunelerin basınç dayanımı, ağırlık değişimi, kılcal geçirimsizlik katsayısı, su emme oranları belirlenmiş, görsel değişimler ve içyapı analizleri incelenmiştir. Yapılan deney sonuçları 28 gün kür edilen kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca sülfat çözeltilerinin 4, 8 ve 12 hafta süresince pH değerlerindeki değişim de incelenmiştir. Uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı atık lastik miktarı arttıkça azalmıştır ve en yüksek basınç dayanımı 38.17 MPa değer ile R0 karışımından, en düşük basınç dayanımı 25.95 MPa değer ile R15 karışımından elde edilmiştir.
- %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin bekletilme süresi arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. 12 hafta sonunda %5 Na₂SO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanım değeri R0 karışımında 40.65 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri R15 karışımında 38.65 MPa olarak elde edilmiştir. 12 hafta sonunda %5 MgSO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerde ise en yüksek basınç dayanım değeri R0 karışımında 39.55 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri R15 karışımında 35.70 MPa olarak elde edilmiştir. %5 Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarının, %5 MgSO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımlarından daha fazla olduğu görülmektedir.
- %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün kür edilen geopolimer beton kontrol numunelerinin basınç dayanımlarına göre artmıştır. 12 hafta sonunda %5 Na₂SO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımı, kontrol numunelerinin basınç dayanımına göre %6.50 ile %48.94 arasında artmıştır. 12 hafta sonunda %5 MgSO₄ çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanımı, kontrol numunelerinin basınç dayanımına göre %3.62 ile %37.57 arasında artmıştır.

- Donma çözülme çevrim sayısı arttıkça geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. 300 çevrim donma çözülme etkisi sonrası en yüksek basınç dayanım değeri R0 karışımında 11.95 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç dayanım değeri R15 karışımında 9.80 MPa olarak elde edilmiştir.
- Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanımları, 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin basınç dayanımlarına göre genel olarak azalmıştır. 300 çevrim donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanımı, kontrol numunelerinin basınç dayanımlarına göre R0 karışımında %68.69 oranında ve R15 karışımında %62.64 oranında azalmıştır. Bu nedenle atık lastik içeriğinin artması donma çözülme direncine olumlu etki yaptığı sonucuna varılmıştır.
- Sülfat etkisi sonrası beton numunelerinde ağırlık artışı olmuştur. Ancak ağırlık artışı düzenli olmamıştır.
- Donma çözülme etkisi sonrası geopolimer beton numunelerinde ağırlık kaybı olmuştur. Ayrıca donma çözülme çevrim sayısı arttıkça da ağırlık kaybı artmıştır. Ancak atık lastik oranı arttıkça ağırlık kaybı azalmıştır. 300 çevrim donma çözülme etkisi sonrası en fazla ağırlık kaybı R0 karışımından elde edilirken, en az R15 karışımından elde edilmiştir.
- 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayısı atık lastik oranı arttıkça ve deney ölçüm zamanı arttıkça azalmıştır.
- Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları kontrol numunelerine göre azalmıştır. Ancak sülfat etkisinde bekletilme süresi arttıkça kılcal geçirimsizlik katsayıları artmıştır.
- Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayıları kontrol numunelerine göre artmıştır. Aynı zamanda donma çözülme çevrim sayısı arttıkça da kılcal geçirimsizlik katsayıları artmıştır.
- 28 gün kür edilen kontrol numunelerinin su emme oranları atık lastik arttıkça azalmıştır. En fazla su emme oranı R0 karışımında elde edilirken, en az R15 karışımından elde edilmiştir.
- Sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerin su emme oranları kontrol numunelerine göre artmıştır. Aynı şekilde sülfat etkisinde bekletilme süresi arttıkça su emme oranları artmıştır.

- Donma çözülme etkisi sonrası numunelerin su emme oranları kontrol numunelerine göre artmıştır. Aynı şekilde donma çözülme çevrim sayısı artıkça da su emme oranları artmıştır.
- Sülfat çözeltilerinin pH değerlerindeki değişim 12 hafta boyunca ölçülmüştür. %5 Na₂SO₄ çözeltisinin pH değerlerinde 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %56.56, %51.78 ve %46.13 oranlarında artış olduğu, %5 MgSO₄ çözeltisinde ise 4, 8 ve 12 hafta boyunca sırasıyla %33.03, %32.25 ve %30.05 oranında artış olduğu görülmektedir.
- %5 Na₂SO₄ çözeltisinde 12 hafta süresince bekletilen numunelerin görünümünde herhangi bir değişim olmazken, %5 MgSO₄ çözeltisinde 12 hafta bekletilen numunelerin yüzeylerinde beyazımsı lekeler ve renk değişimi olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmadan elde edilen ölçümler ve sonuçlar neticesinde, atık lastik oranı ve boyutu değiştirilerek sülfat direnci ve donma çözülme direncine etkisini araştırmak amacıyla farklı yöntemler geliştirilebilir. Ayrıca alkali aktivasyon çözelti türü ve miktarı değiştirilerek ya da YFC yerine başka bağlayıcılar kullanılarak üretilecek geopolimer betonların dayanıklılığı incelenebilir. Bunun yanı sıra farklı konsantrasyonlarda sülfat çözeltileri hazırlanarak geopolimer betonların dayanıklılık özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Ağaçkesen, H. (2018).** *Atık Lastikten Elde Edilmiş Pirolitik Sıvının Asidik Kükürt Giderim İşleminin Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Aiello, M. A., & Leuzzi, F. (2010).** Waste Tyre Rubberized Concrete: Properties at Fresh and Hardened State. *Waste Management*, 30(8-9), 1696-1704.
- Aile ve Tüketici Hizmetleri Atık Lastikler. (2011).** Milli Eğitim Bakanlığı.
- Aksoy, S. R. (2021).** *Atık Lastik Katkılı Farklı Polimer Betonların Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Aktürk, K. (2018).** *Lastik Parçacıklarının Kumlu Zeminlerin Kayma Dayanımına Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale.
- Al-Akhras, N. M. (2006).** Durability of Metakaolin Concrete to Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1727–1734.
- Alcamand, H. A., Borges, P. H. R., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018).** The Effect of Matrix Composition and Calcium Content on the Sulfate Durability of Metakaolin and Metakaolin/Slag Alkali-Activated Mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037–5044. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.102>
- Ali, I. M., Naje, A. S., & Nasr, M. S. (2020).** Eco-Friendly Chopped Tire Rubber as Reinforcements in Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Global Nest Journal*, 22(3), 342–347. <https://doi.org/10.30955/gnj.003192>
- Alpaslan, L. (2012).** *Atık Lastik ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yüzey Özelliklerinin Çimento Harçlarının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Alsaif, A., Bernal, S. A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2019).** Freeze-Thaw Resistance of Steel Fibre Reinforced Rubberised Concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.103>
- Altındal, İ. (2020).** *Değişik Geopolimer Beton Numunelerinin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aly, A. M., El-Feky, M. S., Kohail, M., & Nasr, E. S. A. R. (2019).** Performance of Geopolymer Concrete Containing Recycled Rubber. *Construction and Building Materials*, 207, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121>
- Ameri, F., Shoaie, P., Reza Musaei, H., Alireza Zareei, S., & Cheah, C. B. (2020).** Partial Replacement of Copper Slag with Treated Crumb Rubber Aggregates in Alkali-Activated Slag Mortar. *Construction and Building Materials*, 256.
- Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2019).** Clean Production and Properties of Geopolymer Concrete; A Review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>
- ASTM C267 (2020).** *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM C666 / C666M-15 (2020).** *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1585 (2020).** *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes,* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Azmi, A. A., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Victor Ssнду, A., & Hussin, K. (2016).** Effect of Crumb Rubber on Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *MATEC Web of Conferences.*
- Bakharev, T. (2005).** Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research, 35(6), 1233–1246.*
- Balçıkanlı, M. (2016).** *Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimentosuz Cürüflü Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri ve Üretim Optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Baščarević, Z., Komljenović, M., Miladinović, Z., Nikolić, V., Marjanović, N., & Petrović, R. (2014).** Impact of Sodium Sulfate Solution on Mechanical Properties and Structure of Fly Ash Based Geopolymers. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 48(3), 683–697.* <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0325-4>
- Batır, B. (2002).** *Türkiye İçin Kullanılmış Lastik Yönetimi Araştırması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ben Haha, M., Le Saout, G., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2011).** Influence of Activator Type on Hydration Kinetics, Hydrate Assemblage and Microstructural Development of Alkali Activated Blast-Furnace Slags. *Cement and Concrete Research, 41(3), 301–310.* <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.016>
- Bernal, S. A., Mejía De Gutiérrez, R., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., & Delvasto, S. (2011).** Effect of Binder Content on The Performance of Alkali-Activated Slag Concretes. *Cement and Concrete Research, 41(1), 1–8.*
- Bhavani, S., Nagesh kumar, G., Reddy, M. S., & Sanjeeva Rayudu, E. (2021).** Experimental Study on Geopolymer Rubberized Concrete Using Natural Zeolite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1132(1), 012038.*
- Bilenler Altundal, M. (2019).** *Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Mekanik Davranışı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cemalgil, S., & Etli, S. (2020).** Effects of Specimen Size on The Compressive Strength of Rubber Modified Self-Compacting Concrete. *International Journal of Pure and Applied Sciences, 6(2), 118–129.* <https://doi.org/10.29132/ijpas.789480>
- Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003).** Fire-Resistant Geopolymer Produce by Granulated Blast Furnace Slag. *Minerals Engineering, 16(3), 205–210.*
- Cheng, Z. Q., Zhao, R., Yuan, Y., Li, F., Castel, A., & Xu, T. (2020).** Ageing Coefficient for Early Age Tensile Creep of Blended Slag and Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials, 262, 119855.*
- Chi, M., & Huang, R. (2013).** Binding Mechanism and Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Mortars. *Construction and Building Materials, 40, 291–298.*
- Chithambar Ganesh, A., & Muthukannan, M. (2018).** A Review of Recent Developments in Geopolymer Concrete. *International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7(4.5 Special Issue 5), 696–699.* <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.29.14000>

- Chowdhury, S., Mohapatra, S., Gaur, A., Dwivedi, G., & Soni, A. (2020).** Study of various properties of geopolymer concrete - A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5687–5695. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.835>
- Davidovits, J. (1991).** Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656.
- De Pereira, D. S. T., Da Silva, F. J., Porto, A. B. R., Candido, V. S., Da Silva, A. C. R., Garcia Filho, F. D. C., & Monteiro, S. N. (2018).** Comparative Analysis Between Properties and Microstructures of Geopolymeric Concrete and Portland Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 606–611.
- Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014).** The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Materials and Design*, 62, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>
- Dener, M. (2022).** *Alkali-Aktif Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Hafif Agregata ile Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mühendislik Özellikleri* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Doğan, Ö. (2005).** *Lastik Agregalı Betonların Özelliklerinin Deneysel İrdelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Doğan-Sağlamtimur, N., Oznuroz, H., Bilgil, A., Vural, T., & Süzgeç, E. (2019).** The Effect of Alkali Activation Solutions with Different Water Glass/NaOH Solution Ratios on Geopolymer Composite Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012003>
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., & Uçar, A. (2009).** Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine ve Hidratasyona Etkileri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19, 47–58.
- Duan, P., Yan, C., & Zhou, W. (2017).** A Novel Water Permeable Geopolymer with High Strength and High Permeability Coefficient Derived from Fly Ash, Slag and Metakaolin. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1430–1434.
- Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, A. E. M., & Elshaboury, A. M. (2018).** Magnesium Sulfate Resistance of Geopolymer Mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212>
- Engin, Y. (2015).** *Yüksek Fırın Cürufu & Yüksek Fırın Cürufü Çimento Üretimi Özellikleri Etkileri*, 1-20. <https://www.betonvecimento.com>
- Erdoğan, T. Y., & Erdoğan, T. S. (2007).** *Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri*, 23–34.
- Gonen, T. (2018).** Freezing-Thawing and impact Resistance of Concretes Containing Waste Crumb Rubbers. *Construction and Building Materials*, 177, 436–442.
- Guelmine, L. (2022).** The Freeze-Thaw Durability of Concrete Containing the Rubber Aggregate of Tire Waste. *Research on Engineering Structures and Materials*, 1–13. <https://doi.org/10.17515/resm2022.371ma1207>
- Gümüş, A. (2016).** *Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010).** Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>

- Guo, X., & Xiong, G. (2021).** Resistance of Fiber-Reinforced Fly Ash-Steel Slag Based Geopolymer Mortar to Sulfate Attack and Drying-Wetting Cycles. *Construction and Building Materials*, 269, 121326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121326>
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2015).** Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), 77–86. <https://doi.org/10.1080/13287982.2005.11464946>
- Hosan, A., Haque, S., & Shaikh, F. (2016).** Compressive Behaviour of Sodium and Potassium Activators Synthetized Fly Ash Geopolymer at Elevated Temperatures: A Comparative Study. *Journal of Building Engineering*, 8, 123–130.
- Jiao, Z., Li, X., & Yu, Q. (2021).** Effect of Curing Conditions on Freeze-Thaw Resistance of Geopolymer Mortars Containing Various Calcium Resources. *Construction and Building Materials*, 313(November), 125507.
- Karabörk, F., & Akdemir, A. (2013).** Atık Taşıt Lastiklerinin Parçalanması ve Lastik Tozunun Karakterizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 29(1), 29–40.
- Karaşin, A., & Doğruyol, M. (2011).** Sülfat Etkisinde Maruz Betonda Puzolanik Katkı Kullanımı. 348–357.
- Kılınç, K., & Gök, S. G. (2017).** Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 3, 123–131.
- Kızar, S. (2017).** Atık Lastiklerin Bina Yapı ve Duvar Elemanlarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Isıl ve Ses Performanslarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Koç, H. (2021).** Silis Dumanı Katkılı Uçucu Kül ile Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Farklı Sülfatlar Etkisi Altındaki Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yozgat Bozok Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yozgat.
- Koçak, Y., Subaşı, S., Yaman, Y., Uğur, L. O., & Ateş, A. (2012).** The Effect of the Rate of Waste Tire Powder Substitution on the Physical and Mechanical Properties of CEM II Cement. *April*, 1235–1240.
- Komnitsas, K. A. (2011).** Potential of Geopolymer Technology Towards Green Buildings and Sustainable Cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023–1032.
- Kretzer, M. B., Effting, C., Schwaab, S., & Schackow, A. (2021).** Hybrid Geopolymer-Cement Coating Mortar Optimized Based on Metakaolin, Fly Ash, and Granulated Blast Furnace Slag. *Cleaner Engineering and Technology*, 4.
- Kumar, R., Verma, M., & Dev, N. (2021).** Investigation on the Effect of Seawater Condition, Sulphate Attack, Acid Attack, Freeze-Thaw Condition, and Wetting-Drying on the Geopolymer Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00767-9>.
- Kürklü, G. (2016).** The Investigation of Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortars with Granulated Blast Furnace Slag Cured at Room Temperature. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(2), 356–367.

- Kurtoğlu, A. E., Alzebaree, R., Aljumaili, O., Niş, A., Gülşan, M. E., Humur, G., & Çevik, A. (2018).** Mechanical and Durability Properties of Fly Ash and Slag Based Geopolymer Concrete. *Advances in Concrete Construction*, 6(4), 345–362.
- Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y. (2004).** Development of sustainable cementitious materials. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 1(1), 55–76.
- Liu, P., Chen, Y., Yu, Z., & Lu, Z. (2019).** Effect of Sulfate Solution Concentration on The Deterioration Mechanism and Physical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 227, 116641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.022>
- Long, T., Wang, Q., Guan, Z., Chen, Y., & Shi, X. (2017).** Deterioration and Microstructural Evolution of the Fly Ash Geopolymer Concrete Against MgSO₄ Solution. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Lougheed, T. J., & Papagiannakis, A. T. (1996).** Viscosity Characteristics of Rubber-Modified Asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(3), 153–156.
- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2019).** Development of Rubberized Geopolymer Concrete: Strength and Durability Studies. *Construction and Building Materials*, 204, 740–753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.185>
- Luhar, S., Luhar, I., & Gupta, R. (2020).** Durability Performance Evaluation of Green Geopolymer Concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–49. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1847691>
- Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W. (2018).** Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>
- Maraş, M. M. (2013).** *Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011).** Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090.
- Medine, M., Trouzine, H., De Aguiar, J. B., & Asroun, A. (2018).** Durability Properties of Five Years Aged Lightweight Concretes Containing Rubber Aggregates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(2), 386–397.
- Mhaya, A. M., Huseien, G. F., Abidin, A. R. Z., & Ismail, M. (2020).** Long-Term Mechanical and Durable Properties of Waste Tires Rubber Crumbs Replaced GBFS Modified Concretes. *Construction and Building Materials*, 256.
- Mika, J. (2017).** Meteorological and Hydrological Changes Based on European Environment Agency (2017). *Air and Water Components of the Environment 2017*, 9, 227–234. https://doi.org/10.24193/awc2017_28
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016).** Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review. *Construction and Building Materials*, 120, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.088>
- Monteiro, P. J. M., & Kurtis, K. E. (2003).** Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 987–993.

- Mousa, M. I. (2017).** Effect of Elevated Temperature on the Properties of Silica Fume and Recycled Rubber-Filled High Strength Concretes (RHSC). *HBRC Journal*, 13(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.03.002>
- Nadeem, M., & Pophale, A. D. (2013).** Granular Slag - Potential Sustainable Material Alternative to Fine Aggregate in Construction Applications. *Gazi University Journal of Science*, 26(2), 269–278.
- Nasser, K. W., & Lai, P. S. H. (1992).** Resistance of Fly Ash Concrete to Freezing and Thawing. In *American Concrete Institute, ACI Special Publication* (Vol. SP132, pp. 205–226). <https://doi.org/10.14359/2057>
- Nergiz, V. (2007).** *Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Neupane, K., Chamers, D., & Kidd, P. (2018).** High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15–25.
- Nnaemeka, O. F., & Singh, N. B. (2019).** Durability Properties of Geopolymer Concrete Made From Fly Ash in Presence of Kaolin. *Materials Today: Proceedings*, 29, 781–784. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.696>
- Oyebisi, S. O., Ede, A., Olutoge, F. A., Ofuyatan, O., & Alayande, T. (2019).** Building a Sustainable World: Economy Index of Geopolymer Concrete. *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference, June*.
- Özdal, M. (2019).** *Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Beton Donma Çözülme Dayanıklığının Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Öztürk, H. (2016).** *Atık Lastik Katkısının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mühendislik Özelliklerine Etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Pandya, J., Shah, S., & Dave, S. (2018).** Feasibility of Utilization of Industrial Polyurethane (PU) Rubber Waste in Geopolymer Concrete. *ICRISET2017, 1*, 285–290. <https://doi.org/10.29007/2xq2>
- Pilehvar, S., Szcotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjøniksen, A. L. (2019).** Effect of Freeze-Thaw Cycles on The Mechanical Behavior of Geopolymer Concrete and Portland Cement Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials. *Construction and Building Materials*, 200, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.057>
- Rajmohan, B., Nayaka, R. R., Rajesh Kumar, K., & Kaleemuddin, K. (2022).** Mechanical and Durability Performance Evaluation of Heat Cured Low Calcium Fly Ash Based Sustainable Geopolymer Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1337–1343. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.227>
- Rangan, B. V. (2014).** Geopolymer Concrete for Environmental Protection. *The Indian Concrete Journal*, 88(4), 41–59.
- Rashad, A. M., & Sadek, D. M. (2020).** Behavior of Alkali-Activated Slag Pastes Blended with Waste Rubber Powder under The Effect of Freeze/Thaw Cycles and Severe Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*, 265.

- Ravikumar, D., Peethamparan, S., & Neithalath, N. (2010).** Structure and Strength of NaOH Activated Concretes Containing Fly Ash or GGBFS as The Sole Binder. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 399–410.
- Saha, S., & Rajasekaran, C. (2017).** Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 146, 615–620.
- Sarkaz, A. M. H. (2020).** *Atık Lastik Katkılı Geopolimer Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Segre, N., & Joekes, I. (2000).** Use of Tire Rubber Particles as Addition to Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 1421–1425.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, Ş., & Sönmez, R. (2003).** Agregatürünün Betonun Donma - Çözülme Dayanıklılığına Etkisi. *3.Ulusal Kırma Taş Sempozyumu, 03-04 Aralık 2003, İstanbul*, 44–50.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011).** New Cements for the 21st Century: The pursuit of an Alternative to Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Shtayeh, S., Abaza, O. A., & Shtayeh, S. M. (2010).** Crumbed Rubber for Non-Structural Portland Cement Concrete Applications. *Dirasat, Engineering Sciences*, 37(2), 2010–2214. <https://www.researchgate.net/publication/258519171>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Şinik, O. (2019).** *Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Suhendro, B. (2014).** Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 305–320.
- Tchakoute Kouamo, H., Elimbi, A., Mbey, J. A., Ngally Sabouang, C. J., & Njopwouo, D. (2012).** The Effect of Adding Alumina-Oxide to Metakaolin and Volcanic Ash on Geopolymer Products: A Comparative Study. *Construction and Building Materials*, 35, 960–969. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.023>
- Thaarrini, J., Dhivya, & S., & Dhivya, S. (2016).** Comparative Study on the Production Cost of Geopolymer and Conventional Concretes. *International Journal of Civil Engineering Research*, 7(2), 117–124. <http://www.ripublication.com>
- Thakur, R. N., & Ghosh, S. (2009).** Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 68–74.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010).** Performance of Fly Ash Based Geopolymer Mortars in Sulphate Solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 36–40. <https://doi.org/10.25103/jestr.031.07>
- Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016).** Properties of High Strength Concrete Containing Scrap Tire Rubber. *Journal of Cleaner Production*, 113, 86–92.

- Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindaprasirt, P., & Chaysuwan, D. (2016).** Potassium Alkali Concentration and Heat Treatment Affected Metakaolin-Based Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 104, 293–297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.027>
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2009).** *Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Topçu, İ. B., & Canbaz, M. (2008).** Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlarda Donma Çözülme. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2, 1–16.
- TS 706 EN 12620+A1 (2009).** *Beton agregaları*. TSE, Ankara.
- TS 802 (2016).** *Beton karışım tasarımı hesap esasları*. TSE, Ankara.
- TS EN 932-2 (1999).** *Agregaların genel özellikleri için deneyler bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-3 (2019).** *Beton – Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7 (2019).** *Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini*, TSE, Ankara.
- Turgut, P., & Yeşilata, B. (2009).** Atık Lastik Katkılı Harç Plak ve Briketlerin Termomekanik Davranışlarının Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(4), 651–658.
- Tüzüm Demir, P. (2021).** Araç lastiklerinin geri dönüşümü üzerine bir derleme. *Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi*, 1–8.
- Uğurlu, S. (2015).** *Yeni Nesil Yüksek Fırın Cürüflü CEM III B-C Tipli Çimentoların Yüksek Sülfatlı Ortamlarda Performansı* (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi.
- Ünlü, H. (2006).** *Otomotiv Endüstrisinde Oluşan Tehlikeli Atıkların Geri Kazanımı* (Issue Nisan) [Uludağ Üniversitesi]. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- Uysal, F. F., & Bahar, S. (2018).** Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 37–52.
- Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T., & Daxner, J. (2012).** The Use of Blast Furnace Slag. *Metalurgija*, 51(4), 461–464.
- Valencia Saavedra, W. G., Angulo, D. E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2016).** Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016148.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012).** Technical and Commercial Progress in the Adoption of Geopolymer Cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>
- Vickers, L., Riessen, A. van, & Rickard, W. (2015).** Fire-Resistant Geopolymers: Role of Fibres and Fillers to Enhance Thermal Properties. In *SpringerBriefs in Materials*.
- Weerdt, K. D. W. (2011).** Geopolymers – State of the art SINTEF Bokhandel. *SINTEF Building and Infrastructure*. <https://www.sintefbok.no/book/index/1018>
- Xie, J., Yin, J., Chen, J., & Xu, J. (2009).** Study on The Geopolymer Based on Fly Ash and Slag. *2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009*, 3, 578–581. <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.607>

- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009).** Geopolymerization Process of Alkali-Metakaolinite Characterized by Isothermal Calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1–2), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002>
- Yeluri, S. C., & Yadav, N. (2020).** Mechanical Properties of Rubber Aggregates Based Geopolymer Concrete - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 989(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/989/1/012014>
- Yozcu, E. (2019).** *Ömrünü Tamamlamış Atık Lastiklerin Yeni Kullanım Alanlarının Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Zaetang, Y., Wongs, A., Chindaprasirt, P., & Sata, V. (2019).** Utilization of Crumb Rubber as Aggregate in High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortars. *International Journal of GEOMATE*, 17(64), 158–165. <https://doi.org/10.21660/2019.64.12697>
- Záleská, M., Pavlík, Z., Čítek, D., Jankovský, O., & Pavlíková, M. (2019).** Eco-Friendly Concrete with Scrap-Tyre-Rubber-Based Aggregate – Properties and Thermal Stability. *Construction and Building Materials*, 225, 709–722.
- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016).** Review on Alkali-Activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Materials Science Forum*, 841, 162–169.
- Zhang, B., Feng, Y., Xie, J., Lai, D., Yu, T., & Huang, D. (2021).** Rubberized geopolymer concrete: Dependence of mechanical properties and freeze-thaw resistance on replacement ratio of crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 310, 125248. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125248>

ÖZGEÇMİŞ

