

Şeker Üretim Sürecinde Açığa Çıkan Pres Filtre Atığının
Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılması

Taylan Sofuoğlu

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022

The Utilization of Pres Filter Waste Revealed in Sugar Production Process
for Geopolymer Mortar Production

Taylan Sofuoğlu

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

January 2022

Şeker Üretim Sürecinde Açığa Çıkan Pres Filtre Atığının
Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılması

Taylan Sofuoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

“Bu Tez ESOGÜ tarafından 2017-1578 no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.”

Ocak 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Şeker Üretim Sürecinde Açığa Çıkan Pres Filtre Atığının Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılması” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 18/02/2022

Taylan SOFUOĞLU

ÖZET

Teknolojinin gelişme göstermesi ile birlikte açığa çıkan endüstriyel atıkların fazla olması ve doğaya vereceği zararlar analiz edildiğinde atıkların geri dönüşümünü gerekli hale getirmiştir. Şeker üretiminde badana kıvamındaki hidratik kireç, pancardan elde edilen ham şerbet ile karıştırılarak içindeki kolloidal maddelerin çökmesi sağlanır. Ham şerbete ilave edilen fazla kireç ise karbonatlama kazanlarında karbondioksit yardımı ile ham şerbetten uzaklaştırılır. Buradan alınan çamurlu şerbetin çamur kısmı da dekantörlerde çöktürülerek pres filtreler ile süzülür. Pres filtrelerden çıkan yaklaşık %80 oranında kuru madde içeren atığa “Pres Filtre Atığı” adı verilir. Ülkemizde, şeker fabrikalarında yıllık yaklaşık 18,000,000 ton pancar işlenip; şeker üretilmekte ve yaklaşık 900,000 ton PFA katı atık olarak ortaya çıkmaktadır.

Çimento üretiminde yüksek oranda açığa çıkan emisyonun doğaya verdiği zarar yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Çimentonun, beton bileşeni olarak devamlı kullanılması ekonomik ve sürdürülebilirlik anlamında da sıkıntılar yaratmaktadır. Bu problemler; araştırmacıları, çimento dışı bir bağlayıcı malzeme elde etme yönünde çalışmaya yönlendirmiştir. Literatürde, beton veya harçta çimento kullanılmadan bağlayıcı özellikli yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi atıkların aktivatörler ile aktivasyonu üzerine çalışmaların olduğu görülmüştür.

Tezde farklı oranlarda su, pres filtre atığı ile uçucu kül karıştırılarak sabit bir oranda sodyum silikat yardımı ile aktive edilerek numuneler elde edilmiştir. Deneysel yöntemler ile numunelerin harç özellikleri üzerine etkiler incelenmiştir. Her bir atık oranı ve kür sıcaklığı için taze halde sırasıyla taze birim ağırlık, yayılma, priz deneyleri; sertleşmiş halde ise sertleşmiş birim ağırlık, su emme, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle birlikte numunelerin XRD, SEM ve sürdürülebilirlik analizleri yapılmış ve makine öğrenmesi kullanılarak algoritmik modeller elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pres Filtre Atığı, Uçucu Kül, Geopolimer Harç, XRD, SEM

SUMMARY

With development of technology, large amount of industrial wastes that are revealed and damage to nature have made recycling of wastes necessary. In sugar production, hydratic lime in consistency of whitewash is mixed with raw juice obtained from beet and colloidal substances in it are precipitated. Excess lime added to raw juice is removed from raw juice with help of carbondioxide in carbonation boilers. Sludge part of muddy juice taken from here is settled in decanters and filtered with press filters. Waste containing approximately 80% dry matter coming out of press filters is called “Press Filter Waste”. In our country, about 18,000,000 tons of beet are processed annually in sugar factories; sugar is produced and approximately 900,000 tons of PFA is revealed as solid waste.

Damage caused by emission, which is revealed at high rate in cement production, to nature has been determined as a result of studies. Continuous use of cement as a concrete component also creates problems in terms of economy and sustainability. These problems are; led researchers to work towards obtaining non-cement binder material. In literature, it has been seen, there are studies on activation of wastes such as binder blast furnace slag and fly ash with activators without using cement in concrete or mortar.

In thesis, samples were obtained by mixing different ratio of water, press filter waste and fly ash and activating them with help of sodium silicate at a constant ratio. Effects on mortar properties of samples were investigated by experimental methods. For each, waste ratio and curing temperature, fresh unit weight, flow and setting tests in fresh condition, respectively; in hardened state, unit weight, water absorption, ultrasonic pulse velocity and compressive strength tests were carried out. With these experiments, XRD, SEM and sustainability analyzes of samples were made and algorithmic models were obtained by using machine learning.

Keywords: Press Filter Waste, Fly Ash, Geopolymer Mortar, XRD, SEM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Geopolimerlerin Tarihçesi	5
2.2. Geopolimer Nedir?.....	8
2.3. Uçucu Kül (UK).....	9
2.4. Alkali Aktivatörler	10
2.5. Geopolimer Harçların Kimyasal Yapısı.....	11
2.6. Geopolimer Uygulamaları ve Çalışmalar	12
3. PRES FİLTRE ATIĞI (PFA)	14
3.1. PFA Uygulamaları ve Çalışmalar	16
4. MATERYAL VE YÖNTEM	17
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	18
4.1.1. Su.....	18
4.1.2. Standart Kum.....	18
4.1.3. Uçucu Kül (UK)	19
4.1.4. Pres Filtre Atığı (PFA)	19
4.1.5. Alkali Aktivatör.....	20
4.2. Karışım Oranları	20
4.3. Numune Üretimi	22
4.4. Yapılan Deneyler	23
4.4.1. Taze harç halinde halde yapılan deneyler	23
<u>4.4.1.1. Taze birim ağırlık deneyi</u>	23

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.4.1.2. Yayılma deneyi	24
4.4.1.3. Priz süresi deneyi	25
4.4.2. Sertleşmiş harç halinde yapılan deneyler	26
4.4.2.1. Sertleşmiş birimi ağırlık deneyi (SBA).....	26
4.4.2.2. Kılcal su emme deneyi.....	26
4.4.2.3. Ultrases geçiş süresi deneyi	28
4.4.2.4. Basınç dayanımı deneyi	29
4.4.3. Mikro yapı analizi	30
4.4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD).....	30
4.4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM)	31
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32
5.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	32
5.1.1. PFA oranının taze birim ağırlığa etkisinin değerlendirilmesi	32
5.1.2. PFA oranının yayılma etkisinin değerlendirilmesi.....	33
5.1.3. PFA oranının priz süresine etkisinin değerlendirilmesi	35
5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	36
5.2.1. Sertleşmiş Harç Deneylerinde PFA Etkisinin Değerlendirilmesi	36
5.2.1.1. PFA oranının SBA etkisinin değerlendirilmesi	36
5.2.1.2. PFA oranının kılcal su emme etkisinin değerlendirilmesi	40
5.2.1.3. PFA oranının ultrases geçiş hızı etkisinin değerlendirilmesi.....	43
5.2.1.4. PFA oranının basınç dayanımına etkisinin değerlendirilmesi	45
5.2.2. Sertleşmiş Harç Deneylerinde Sıcaklık Etkisinin Değerlendirilmesi.....	47
5.2.2.1. Sıcaklığın sertleşmiş birim ağırlığa etkisinin değerlendirilmesi....	48
5.2.2.2. Sıcaklığın kılcal su emme değerine etkisinin değerlendirilmesi....	50
5.2.2.3. Sıcaklığın ultrases geçiş hızına etkisinin değerlendirilmesi	54
5.2.2.4. Sıcaklığın basınç dayanımına etkisinin değerlendirilmesi.....	56
5.3. Mikro yapı analizlerinin değerlendirilmesi.....	59
5.3.1. X-ışının difraktometresi (XRD) sonuçlarının değerlendirilmesi.....	59
5.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçlarının değerlendirilmesi.....	62

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

5.4. Sürdürülebilirlik Analizi	65
5.5. Sonuçların Makine Öğrenmesi (ML) ile Modellenmesi	68
5.5.1. Determinasyon katsayısı (R^2).....	69
5.5.2. Genelleştirilmiş Lineer Modeli (Generalized Linear Model).....	70
5.5.3. Derin Öğrenme Modeli (Deep Learning Model)	72
5.5.4. Karar Ağacı Modeli (Decision Tree Model)	75
5.5.5. Rassal Orman Modeli (Random Forest Model)	77
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR DİZİNİ	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

1.1. Puzolanların sınıflandırılması.....	4
2.1. Geopolimerizasyon reaksiyon mekanizması.	11
3.1. PFA'nın açığa çıkma süreci.....	15
4.1. Yayılma deneyi.....	24
4.2. Otomatik Vicat cihazı.....	25
4.3. Kılcal su emme deney aparatları.	27
4.4. Ultrases geçiş süresi deney cihazı	29
5.1. Taze birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.	33
5.2. Yayılma miktarının PFA oranı ile değişimi.	34
5.3. Priz süresinin PFA oranı ile değişimi.	35
5.4. 120 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.	37
5.5. 140 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.	38
5.6. 160 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.	39
5.7. 120 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.....	40
5.8. 140 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.....	41
5.9. 160 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.....	41
5.10. Su emme yüzdesinin PFA oranı ile değişimi.....	42
5.11. 120 °C kür sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.....	43
5.12. 140 °C kür sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.....	44
5.13. 160 °C kür sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.....	44
5.14. 120 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.	45
5.15. 140 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.	46
5.16. 160 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.	47
5.17. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).	48
5.18. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).	49
5.19. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).	49
5.20. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).....	51
5.21. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).....	51
5.22. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.23. Su emme yüzdesinin kür sıcaklığı ile değişimi.	53
5.24. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).	54
5.25. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).	55
5.26. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).	55
5.27. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).	57
5.28. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).	57
5.29. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).	58
5.30. PFA10UK90S1T1, PFA20UK80S1T1, PFA30UK70S1T1, XRD analizi.	60
5.31. PFA10UK90S2T1, PFA20UK80S2T1, PFA30UK70S2T1, XRD analizi.	60
5.32. UK100 kontrol geopolimer harç numunesi SEM analizi.	62
5.33. PFA10UK90S1T1, PFA20UK80S1T1, PFA30UK70S1T1, PFA10UK90S2T1, PFA20UK80S2T1, PFA30UK70S2T1, SEM analizi.	63
5.34. 120 °C’de kürlenmiş numunelerin EDS analizleri	64
5.35. Genelleştirilmiş Lineer model grafiği.	72
5.36. Derin Öğrenme modeli vizüalizasyonu.	73
5.37. Derin Öğrenme modeli grafiği.	74
5.38. Karar Ağacı modeli vizüalizasyonu.	75
5.39. Karar Ağacı modeli grafiği.	76
5.40. Rassal Orman modeli örnek bir ağaç vizüalizasyonu.	77
5.41. Rassal Orman modeli grafiği.	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Geopolimer sentezi için kullanılan çeşitli hammaddeler.....	6
2.2. Geopolimerizasyonda kullanılan alkali aktivatörler.....	6
2.3. Geopolimerler hakkında yapılmış araştırmaların kronolojik sıralaması.	7
2.4. Türkiye'deki termik santrallerin analiz sonuçları	9
3.1. PFA ve örnek bir kireçtaşının kimyasal kompozisyonu (% Ağırlık).	14
4.1. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi.....	18
4.2. Kullanılan standart kumun granülometresi ve sınır değerleri.	18
4.3. F Sınıfı UK'ün kimyasal analizi (Tunçbilek).	19
4.4. UK'ün fiziksel özellikleri (Tunçbilek).	19
4.5. PFA'nın kimyasal analizi.	20
4.6. Na ₂ SiO ₃ bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri (3 modül).	20
4.7. UK ve PFA ile hazırlanan geopolimer numuneler.	21
5.1. E-enerji ve E-CO ₂ analizi.	67
5.2. Numunelerin sürdürülebilirlik analizi.	68
5.3. Genelleştirilmiş Lineer modeli sütun ağırlıkları.....	71
5.4. Genelleştirilmiş Lineer modeli vizüalizasyonu.	71
5.5. Genelleştirilmiş Lineer modeli tahminleri.....	71
5.6. Derin Öğrenme modeli sütun ağırlıkları.....	73
5.7. Derin Öğrenme modeli tahminleri.....	74
5.8. Karar Ağacı modeli sütun ağırlıkları.	75
5.9. Karar Ağacı modeli tahminleri.	76
5.10. Rassal Orman modeli sütun ağırlıkları.	77
5.11. Rassal Orman modeli tahminleri.	78
5.12. ML modelleri ile tahmini basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Anortit
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
C _A	Kılcal su emme
C ₂ S	Dikalsiyum silikat
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat
C ₃ S	Trikalsiyum silikat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum alümina ferrit
d	Yoğunluk, kg/dm ³
G	Gehlenit
h	Numune yüksekliği, cm
kN	Kilonewton
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ SiO ₃	Potasyum silikat
kV	Kilovolt
M	Mullit
m ₁	Kabın boş kütlesi, kg
m ₂	Kabın, içerisindeki numune ile birlikte toplam kütlesi, kg
mA	Miliamper
M ₀	90 gün süreyle küre tabi tutulduktan sonraki numune kütlesi, g
M _j	28 gün süreyle suya temas sonrası ölçülen numune kütlesi, g
MK	Metakaolin
ML	Makine öğrenmesi
MPa	Megapascal
MSE	Ortalama karesel hata
NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
OPC	Normal portland çimentosu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
PC	Portland çimentosu
PFA	Pres filtre atığı
PYYK	Palm yağı yakıt külü
Q	Kuvars
s	Ultrases dalgası gönderilen yüzeyler arası mesafe, cm
S	Su oranı, ml
SBA	Sertleşmiş birim ağırlık
SD	Silis dumanı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
t	Ultrases dalgasının geçiş zamanı, sn
T	Sıcaklık, derece
TS EN	Türk Standartları European Norm
Upv	Ultrases dalgasının hızı, km/sn
UK	Uçucu kül
V	Kabın hacmi, dm ³
XRD	X ışını difraksiyonu
YFC	Yüksek fırın cürufu
YSA	Yapay sinir ağları
µm	Mikrometre

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Geçmişten günümüze gelişen teknoloji ile yapı malzemeleri, pek çok alanda gereksinimleri karşılamak için teknolojik gelişime ayak uydurmuş ve bu doğrultuda sektörün gereksinimlerine her zaman cevap verebilmiştir. Kilden ve çamurdan kurulan yapılar yerini ahşaba ve kesme taşlara onlar ise zamanla yerini beton ve çeliğe bırakmıştır. Günümüzde farklı beton çeşitleri inşaat sektörünün talepleri doğrultusunda üretilmektedir. Fakat geleneksel betonun çimento bazlı oluşu gerek sektör için büyük maliyetler oluşturması gerekse karbon dioksit (CO₂) emisyonunun yüksek oluşundan dolayı ekolojik dengeye verdiği zararlar göz ardı edilemeyecek kadar büyük bir sorun haline gelmiştir. Bu sorunlar 30 yılı aşkın süredir bilim adamlarının ilgisini çekmiş ve çimento bazlı olmayan betonlar için araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bahsi geçen tarzdaki yeni nesil betonlar hakkında literatüre bakıldığında karşılaşılan ana sorunun sahada uygulanabilirlik olduğu görülmektedir. Çalışmanın ana konusu oluşturan geopolimerler ise yeni nesil çimentosuz betonların bir üyesi olup, çok geniş bir araştırma alanına sahiptir.

Antik çağlarda yapılar çoğunlukla topraktan veya kesme taştan inşa edilmişlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılan ilk malzemeler ise sönmüş kireç ve alçıdır. Hititler (MÖ 2000-1100) ve Fenikeliler (MÖ 3000-3060) sönmüş kireci tanıyorlardı. Büyük olasılık ile bu malzeme daha önceden de tanınan ve kullanılan bir malzeme idi. Sönmüş kireç-puzolan karışımı hidrolik bağlayıcıları ilk kullananlar, her ne kadar Roma medeniyeti olarak bilinse de, bu karışımı ilk olarak kullanan medeniyetler Hititler ve Giritlilerdir. Hattuşas'ta (Çorum, MÖ 2000) puzolan-kireç karışımı bağlayıcıların kullanıldığı yapılar (burçlu sur, yapı temelleri, kent surları) şu an halen ayakta durmaktadır. Aynı tür yapılara Hititler-Frigler döneminde kurulan Alişar'da (Yozgat, MÖ 1200-1700) rastlanmaktadır (Urhan, 2000). Eski Mısır'da tuğlanın (pişmiş kil) öğütülerek kirece katılması düşünülmüş ve bu yöntemle elde edilen harca "horasan harcı" denilmiştir. Osmanlılar, bu harcı geniş ölçüde ve bilinçli bir şekilde kullanmışlardır. Avrupa coğrafyasında ise Romalılar, Napoli civarındaki Puzzuoli kasabası toprağından yararlanmışlardır. "Puzolan" terimi de bu kasabanın adına literatüre geçmiştir. Almanlar ise puzolana "tras" demektedir olup; ülkemizde de bu terim yaygın olarak kullanılmakta ve standartlarımızda bu şekilde geçmektedir (Gündeşli ve Tanrıkulu, 2008).

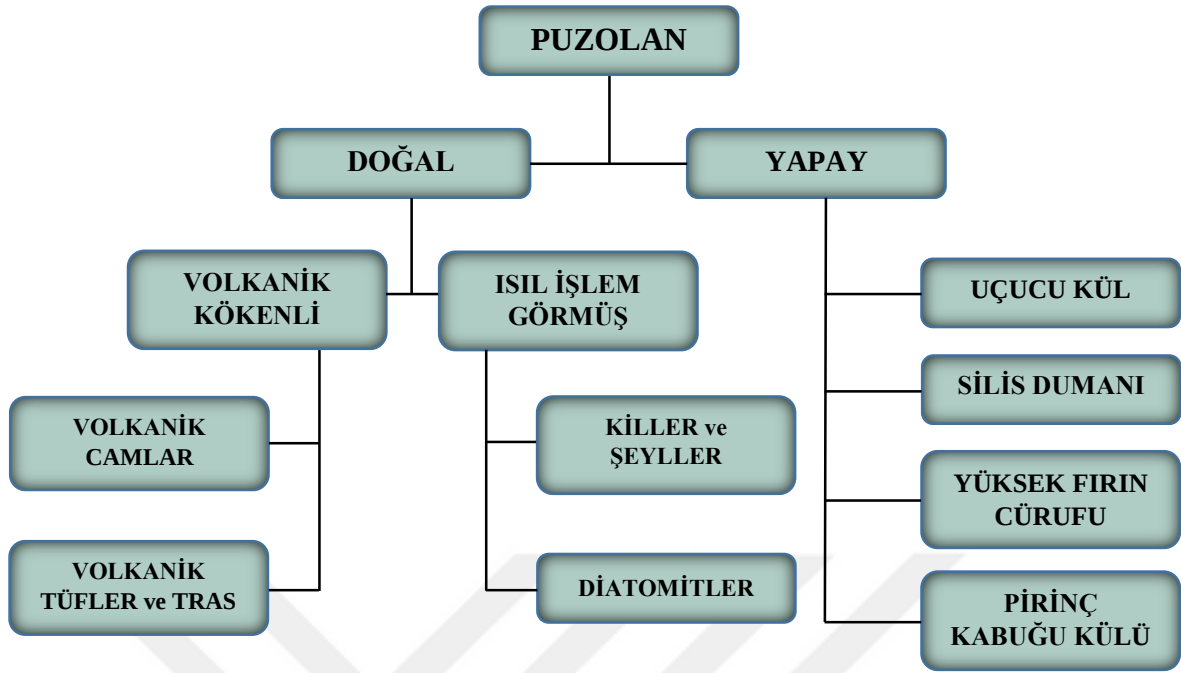
OPC, ana yapı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak üretim sürecinde yüksek oranda CO₂ emisyonu açığa çıkar. Günümüzde, geopolimer bağlayıcıların düşük oranda CO₂ emisyonu nedeniyle alternatif bir bağlayıcı olarak büyük ilgi gördüğü (Phoo-ngernkham, vd., 2016), bilinmektedir. Araştırmacılar, her türlü yapım işinde sürdürülebilirlik performansını arttırabilmek için OPC yerine yeşil çimento da diyebileceğimiz bir bağlayıcı olan geopolimerlerin kullanılabilirliği üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmıştır (Khan vd., 2016). Çimento yerine günümüzde iki şekilde; doğal veya yapay olmak üzere çimentoya benzer bağlayıcı özelliğe sahip çimentodan farklı malzemeler elde edilmeye çalışılmıştır. Özellikle son yıllarda endüstriyel atık olup bağlayıcılık özelliği gösteren puzolanlar kullanılarak geopolimerizasyon yöntemi ile yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip istenilen özelliklerde çeşitli bağlayıcılar üretilmektedir. Ancak endüstriyel atıkların çeşitliliği, her tip atık üzerine deneysel bir çalışma yapabilme imkanını kısıtlamakta ve bu nedenle de literatürde sınırlı sayıda yapılan çalışma bulunmaktadır. Günümüzde her tür ve tipte atığın geri dönüşümü üzerine yapılacak çalışmalar ile ekonomik ve çevresel anlamda verdiği zararlar zamanla en aza indirgenecektir.

En eski ve en ilkel ısınma yöntemi, organik bir maddenin yakılması yöntemidir. Bu yöntemde malzeme oksijen ile reaksiyona girdiği sürece kendini tüketene kadar ısı açığa çıkarmaya devam eder. Kömür, organik malzemelerin uzun zamanda çürüyerek oluşturduğu bir kayaç mineraldir ve dünya çapında en çok kazılan madendir. Kömürün yakılması sonucu açığa çıkan atık olan UK'nın, beton üretiminde kullanılması 1985 yılına kadar dayanır. Beton karışımında UK kullanımı ile betonun işlenebilirliği artar ve maliyeti düşer ayrıca böylelikle daha az çimento kullanıldığından CO₂ emisyonu da azalır (Keyte, 2009). UK; beton karışımına ya da çimento üretimine doğrudan katılarak kullanılabilir. Aynı zamanda karışımlarda kum yerine de kullanılabilir. Kum yerine kullanıldığı durumda özgül yüzey artarsa, kumdan tasarruf sağlanabilir. Bununla birlikte betonun basınç dayanımı üzerine olumlu katkılar sağladığı gözlemlenmiştir. Küresel bir yapıya sahip olması sayesinde su gereksinimini arttırmayarak, düşük su/çimento oranı ile uygun işlenebilirlik elde edilir (Topçu ve Canbaz, 2001). Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya bağlayıcılık özelliği çok az olan ancak ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiğinde zamanla bağlayıcılık özelliği kazanan farklı yapılara sahip silikalı, alüminalı malzemelerdir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Gereksinime göre puzolan içeren geopolimerler farklı yöntemler ile üretilerek kullanılabilir.

Puzolanlar, “doğal puzolan” ve “yapay puzolan” olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Doğal puzolan sınıfına volkanik kül, volkanik tüf, diatomlu toprak vb., yapay puzolan sınıfına ise UK, YFC, SD vb. örnek olarak verilebilir. Adlarından anlaşılacağı üzere doğal puzolanlar doğada kendi halinde bulunan bağlayıcı özellikli malzemeler, yapay puzolanlar ise endüstriyel tesislerde imalat sürecinde açığa çıkan bağlayıcı özellikli atık malzemelerdir. Çevre açısından ele alındığında puzolanik malzemelerin kullanımının iki temel avantajı vardır. Bunlardan birisi, CO₂ emisyonunun azalması ve üretim sürecinde kullanılan enerjinin asgari seviyeye düşmesidir. Bir diğeri ise atık malzemelerin depolanıp bertaraf edilmesi yerine geri dönüşümde aktif olarak kullanılmasıdır (Saloma vd., 2016). PFA’nın temel kimyasal bileşeni CaO olup aynı zamanda özellikle kireç-bazlı çimento hammaddelerinin de temel kimyasal bileşenidir. Bundan dolayı teoride CaO, klinker üretiminde kullanılan kireç-bazlı malzemelerin bir alternatifi olarak ta değerlendirilebilir.

UK, YFC, SD ve doğal puzolanlar ya PC üretimi klinker aşamasında ya da beton karışımı içerisinde PC ağırlığının belirli oranında kullanılmaktadır. 2003 yılında çimentoda klinker kullanımı %85 seviyelerine düşer iken bu oran 2010 yılında %77 seviyelerine düşmüştür. İleride ise bu oranın %71 seviyesine düşeceği tahmin edilmektedir. Günümüzde, Amerika’da kullanılan hazır betonların %60’ı çimento dışında puzolanik malzeme içermektedir (Maria ve Siddique, 2015). Hazır beton, dünyada hemen hemen tüm yapıım işlerinde kullanılan taşıyıcı özelliğe sahip temel yapı malzemesi olduğu bilinmektedir. Ancak beton üretim teknolojilerinin gelişmesi ile hazır betonun temel bileşeni olan çimentonun üretim sürecinin hem maliyeti hem de çevresel zararlı etkileri dikkate alındığında çimentoya alternatif olarak yine çimentoda olduğu üzere bağlayıcı özelliklere sahip farklı malzemeler üzerinde çalışmalara ağırlık verilmiştir.

PFA üzerine yapılan bir çalışmada, fırındaki yüksek sıcaklık (1400 °C üstünde) toksik organik maddeleri ve bakterileri parçaladığı belirlenmiş ve bununla birlikte PFA’nın ısıl değerinin yüksek olması enerji sarfıyatı olan yakıt kullanımı da azalttığı görülmüştür. PFA içerisinde CaO dışında farklı hammaddeler ile karıştırıldığında saflığı bozan MgO, SO₃, P₂O₅ gibi bileşenler de vardır. Az orandaki MgO, sülfür ve fosfat bileşenleri viskoziteyi düşürmek için kullanılan mineraller iken aynı zamanda farklı C₃S polimorfları ve C₂S bileşenlerini dengeleyerek diğer az orana sahip bileşenlerle beraber veya tek olarak PC basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Liv vd., 2014).



Şekil 1.1. Puzolanların sınıflandırılması.

Çelik endüstrisi üretim sürecinde pres filtrelerden çıkan kırmızı çamur şeklindeki atıkların çimento ile katılaştırılması ile ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalarda yapı malzemesi anlamında değerlendirilebilecek bir takım yararlı sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Çimento ile kırmızı çamur şeklindeki katı atıkların katılaştırılması deneyleri sonunda kabul edilebilir bir basınç dayanım değeri ve geçirimsizlik değerine sahip olan bir malzeme başarı ile elde edilmiştir (Topçu, 1995).

Bu tez çalışmasında bir şeker fabrikası atığı olan PFA ile bir kömür termik santrali atığı olan UK'ya alkali aktivatör yardımı ile geopolimerizasyon yöntemi uygulanarak bir geopolimer harç elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışma ile ülkemizde kamu sektörüne ait 15 ve özel sektöre ait 18 olmak üzere toplamda 33 adet şeker fabrikasından üretim döneminde açığa çıkan yaklaşık 900,000 ton PFA'nın geri dönüşümü sağlanarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bir şeker fabrikası atığı olan PFA ile yapay puzolanik özelliğe sahip UK ve belirlenen oranda alkali aktivatör (Na_2SiO_3) içeren harç numuneler hazırlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda çimento üretim sürecinde açığa çıkan sera gazı emisyonu ve çimento üretim maliyetinin bir miktarda olsa azalması yönünde bir etki göstereceği beklenirken bununla birlikte endüstriyel atıkların geri dönüşümü sağlanarak depolama problemi ve bu atıkların çevreye vermiş olduğu zararlı etkilerin de belli seviyede azalacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimerlerin Tarihçesi

Geopolimer, 1970’lerde Fransız bilim insanı ve kimyager olan Prof. Joseph Davidovits tarafından keşfedilmiştir. Asıl geliştirilme amacı daha çok ısıya ve ateşe dayanıklı, ısı ile sertleşen polimerleri üretebilmektir. Bu doğrultuda ilk kullanım alanı gemilerin dış kaplamalarında yangına karşı koruma amaçlı olmuştur. Ayrıca yüksek ısıya dayanıklı karbon fiber kompozitlerin üretiminden, ahşap yapıların yangından korunmasına kadar pek çok alanda da kullanılmıştır. Fakat alkali aktivasyonlu ve UK içeren harçların üretimine kadar yapı malzemesi olarak çok fazla tercih edilmemiştir (Provis ve Van Deventer, 2009). Alkali aktivasyon yöntemi ile yapı malzemelerinin sentezi yani içeriğinde PC olmayan harçların öncülleri (genellikle yüksek kalsiyum içeren metalürjik cürufklar) ilk olarak (Purdon, 1940) tarafından belirlenmiştir. Purdon, tarafından ilk adımları atılan alkali aktive harçlar daha sonrasında pek çok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Bununla birlikte geopolimerizasyon teknolojisi de gelişerek sektörde de uygulama alanı bulmuştur.

Antik yapıların inşası esnasında geopolimerizasyon teknolojisinin kullanıldığı ile ilgili teoriler bulunmaktadır. Özellikle piramitlerin inşası için kullanılmış olabilecekleri çeşitli araştırmalar ile desteklenmiştir (Barsoum vd., 2006). Çok büyük boyutlarda taşların birbirine tutturulması için kullanıldığı öngörülen geopolimer harçlar günümüzde kullandığımız alkali aktive harçlar ile benzer özellikler taşımaktadır (Davidovits ve Davidovits, 2001). Avrupa’nın doğusunda 1950’li yıllarda 2. Dünya Savaşı sonrası PC’nun çevreye zararlı etkilerini anlaşılması üzerine Glukhovsky vd., alüminyum ve silisyum içeren malzemelerin alkali aktivatörlerle tepkimesi ile alakalı araştırmalar yapılmıştır. Glukhovsky, çimentoya karşılık YFC kullanarak sorunu ortadan kaldırmaya yönelik girişimlerde bulunmuştur. Bu girişimlerin sonucunda elde ettiği malzemelerin daha dayanıklı olduğunu belirlemiştir. Geliştirmiş olduğu deneysel, yeni, temel ve etkili yöntemler sayesinde bilimsel araştırmaların ileriye yönelik adımlar atmasını sağlamış, 1970’li senelerde Davidovits tarafından metakaolin de katılarak alümina silikatların, silikat ve alkali hidroksit çözeltileri ile girdiği reaksiyon ve tepkimeleri incelemiştir (Tokay, 2019).

Geopolimerizasyon, yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondenzasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini kapsayan bir ekzotermik kimyasal süreçtir. Polikondenzasyon çeşitli ısı ve kimyasal etki ile monomerler arasındaki bağların değişmesi ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi (Zeybek, 2009) ile gerçekleşir. Geopolimer, organik kimya ürünü polimerlerden farklı olarak karbon elementi yerine kuvars içerisindeki silisyum moleküllerinin yüksek pH değerine sahip alkali ortamda alüminatlarla polikondenzasyona uğraması ile oluşur. Oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu istenilen karışım sağlandıktan sonra 40 °C-100 °C sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıtılarak tabi tutularak, polimerizasyon süreci uzatılır. Böylece üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri de iyileştirilmiş olur (Görhan ve Kürklü, 2014). Geopolimer harç, gelecekte yapı malzemelerinin yerine kullanılmak üzere geliştirilebilecek çevre dostu bir malzemedir. Geopolimer harçlar endüstriyel atıklardan elde edilebilir iken üretim sürecinde ise PC üretim sürecine göre daha az enerji harcanmaktadır. PC üretim sürecinde klinkerde yanma işleminin gerçekleşmesi için 1000 °C sıcaklığa gerek olup bu yanma süreci sonucunda açığa havayı kirletecek bir oranda CO₂ gazı açığa çıkmaktadır (Salomah vd., 2016). Geopolimer üretim süreci esnasında açığa çıkan CO₂ emisyonunun bir hayli az olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2.1. Geopolimer sentezi için kullanılan çeşitli hammaddeler (Khan vd., 2014).

Kullanılan Hammadde	Kompozisyon	Uygulama
UK	%100	Yalıtım
MK	%100	Yapı Malzemesi
(PYYK + YFC) / UK	(PYYK + YFC) / UK = 1,8	Yapı Malzemesi
YFC + UK	YFC = %30-%55	Yapı Malzemesi
Çelik çürufu	%100	Fotokataliz
Volkanik kül	%100	İnşaat
Pirinç kabuğu külü	%1-%10	İnşaat
Nano SiO ₂ -Al ₂ O ₃		İnşaat

Çizelge 2.2. Geopolimerizasyonda kullanılan alkali aktivatörler (Khan vd., 2014).

Kullanılan aktivasyon çözeltileri	Örnek	Uygulama
Alkali metal hidroksit	NaOH, KOH, LiOH	Yalıtım
Alkali metal silikat	Na ₂ SiO ₃ , K ₂ SiO ₃	Yalıtım
Alkali metal hidroksit silikat	Na ₂ SiO ₃ +NaOH	Yalıtım
Alkali metal hidroksit silikat + nano silica	Na ₂ SiO ₃ +NaOH+SiO ₂	Nano etkisi
Metal alüminat	NaAlO ₂	Bir kısım Geopolimer
Metal karbonat	Na ₂ CO ₃	Bir kısım Geopolimer
Kırmızı çamur	Kırmızı çamur + NaOH	Yeni tip Geopolimer

Çizelge 2.3. Geopolimerler hakkında yapılmış araştırmaların kronolojik sıralaması.

Araştırmacı	Yıl	Çalışma Konusu
Feret	1939	Cürufun çimentoda kullanımı
Purdon	1940	Alkali-Cüruf birleşimi
Glukhovsky	1959	Alkali aktive çimentolar için teorik çözümleme
Glukhovsky	1965	İlk alkali çimento üretimi
Davidovits	1979	Geopolymer'in literatüre gelişi
Malinowski	1979	Eski kemerlerin inşasında rastlanan buluntular
Forss	1983	F-Çimento (slag-alkali-superplasticizer)
Langton and Roy	1984	Antik yapıların inşasında rastlanan buluntular
Davidovits vd.	1985	Piramit harçların patenti
Krivenko	1986	MSc tezi, $n_2O-nO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik Melilit Cürufların Aktivasyonu
Malek vd.	1986	Düşük radyoaktif atıklardan harç üretimi
Davidovits	1987	Antik ve modern betonların karşılaştırılması
Deja ve Malolepsy	1989	Kloritlere karşı dayanımının incelenmesi
Kaushal vd.	1989	Alkaline karışımlar ile nükleer atıkların izolasyonunun sağlanması
Roy ve Langton	1989	Antik betonların kataloglanması
Majundar vd.	1989	$C_{12}A_7$ -Cüruf aktivasyonu
Talling vd.	1989	Alkali aktive cüruf üretimi
Wu vd.	1990	Cürufu harçların aktivasyonu
Roy vd.	1991	Hızlı priz alan alkali aktive harçların üretimi
Roy ve Silsbee	1992	Alkali aktivasyonlu harçların üzerine bir inceleme
Roy ve Malek	1993	Cürufu çimento
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecekteki betonlar
Krivenko	1994	Alkali harçlar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkali aktivasyonlu mikro yapılar
Rahier vd.	1996a-1996b-1997	Düşük ısıda sentezlenmiş alümina silikat camların üretimi
Xu and van Deventer	2000-2002	Farklı minerallerin geopolimerilazasyonu
Duxson vd.	2007	"Geopolimer Teknolojisi: Son Teknoloji" adlı makalenin yayımlanması
Davitovits	2008	"Geopolimer kimyası ve uygulaması" adlı kitabın yayımlanması
Provis vd.	2009	"Geopolimerler: Yapı, Üretim Özellikleri, ve Endüstriyel Uygulamaları"
Ahmari ve Zhang	2011	Geopolimerlere çimento fırını atığı eklendiğinde dayanıklılık ve basınç dayanım özelliklerine olumlu katkı yaptığı görülmüştür.
Kusbiantoro vd.	2012	Sıcaklık kürü ile elde edilen değerler diğer kür yöntemlerine göre daha iyidir. %7 oranında UK yerine pirinç çeltiği külü kullanıldığında en yüksek basınç dayanım değeri elde edilmiştir.
Yusuf vd.	2013	10 M NaOH konsantrasyonuna sahip numunelerde maksimum 57.10 MPa dayanım elde edilmiş ve 28 günlük süreçte 3 günlük dayanımlarda toplam dayanımın %80'i kazanılmıştır.
Ariffin vd.	2013	Normal Potland çimento ile elde edilen numunelerden 3 kat daha fazla basınç dayanım değerine sahip numuneler elde edilmiş ve numunelerin yüksek derecede sülfürik aside dayanıklı olduğu belirlenmiştir.
Nath	2013	Ortalama 93.4 Mpa basınç dayanımı elde etmiştir
Pacheco-Torgal vd.	2013	Optimum 12 M NaOH konsantrasyonuna sahip metakaolin içeren geopolimerlerde NaOH konsantrasyonunun artması ile sonraki yaşlarda eğilme ve basınç dayanımında artış, işlenebilirlikte azalma belirlenmiştir.
Adak vd.	2014	Ortam sıcaklığında %6 nano-silika eklenmesi ile elde edilen geopolimer ile sıcaklık kürü yapılarak elde edilen UK içerikli geopolimerin basınç dayanım ve su geçirimsizlik değerleri karşılaştırılabilir seviyededir.
Nath ve Sarker	2014	Bir noktaya kadar cüruf artışı ile basınç dayanımı arasında ters orantı olduğu gözlemlenmiştir. En iyi sonuçlar UK'nın %30 oranında yerine kullanılması ile elde edilmiştir.
Kouamo vd..	2016	Metakaolin ve volkanik küllerden oluşan geopolimerlere Al_2O_3 eklendiğinde basınç dayanım değerlerinde artış görülmüştür. Metakaolin, volkanik küllere göre daha uygun bir alternatiftir.
He vd.	2018	Metakaolin ve kırmızı çamur içeren geopolimerlerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında 9 günlük kür sonucu metakaolin içeren geopolimerlerin 31 MPa değerinde yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.
Nazari ve Sanjayan	2019	Alüminyum ve gri dökme demir cürufu içeren geopolimerlerde, NaOH konsantrasyonunun arttıkça basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 16 M NaOH çözelti içeren numunelerin maksimum basınç dayanım değeri 73 MPa olarak elde edilmiştir.
Topçu ve Sofuoğlu	2020-2021	Farklı oranlarda su, pres filtre atığı, uçucu kül karıştırılarak sabit bir oranda Na_2SiO_3 aktivatörü yardımıyla 23.68 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer harç elde edilmiştir.

2.2. Geopolimer Nedir?

Geopolimer, silikon ve alüminyum açısından zengin UK, YFC gibi atık ve/veya yan ürün malzemelerinden sentezlenerek inorganik bir alümino-silikat bileşiği (Guades, 2016) olarak elde edilir. Geopolimerler, alkali çözeltiler ile aktive edilmiş jeolojik orijinli veya UK, kalsine kaolin, metakaolin gibi değişik tiplere sahip alümino-silikatlı endüstriyel atık malzemelerin alkali aktivasyonu ile sentezlenen inorganik alümino-silikatlı polimerlerdir (Huseien vd., 2016). Bu kimyasal geopolimerizasyon sürecinde alkali aktivatör ile aktive edilmiş bileşenler sonuç olarak üç boyutlu bir polimerik zincir oluşturur. Geopolimerler, doğal minerallerin kimyasal kompozisyonlarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi sonucu üretilir. Doğal kayaç yapılarına eşdeğer özellikler gösteren geopolimerler çevre dostu yapı malzemelerinin en işlevsel olanlarından biridir. Geopolimer harçların üretiminde PC üretimine göre daha az enerji gerekmektedir ve bununla birlikte çevreyi kirletme oranı ve atıklardan elde edilen malzemeler ile üretildiğinden dolayı maliyeti oldukça azdır. Geleneksel yapı malzemelerine karşı pek çok alanda teknolojik üstünlük sağlayan geopolimerler, yeterli performansı sağlamak konusunda geri kaldıkları için uygulamada halen nadir (Duxson vd., 2007) tercih edilmektedirler. Ancak geopolimerlerin üretim ve kullanım süreci dikkate alındığında yapı malzemesi sektörü kapsamında birçok yarar sağlayabileceği yapılan çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir.

Günümüzde halen araştırılmakta olan bir malzeme türü olan geopolimerler henüz tam istenilen potansiyele sahip değildirler. Özellikle son on yıldır, geopolimerlerin üretim sürecinde açığa çıkan düşük oranda CO₂ emisyonu ile birlikte iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması sonucu geopolimer konusu (Djobo vd., 2016) araştırmacıların daha fazla dikkatini çekmiştir. Geopolimerlerin bu tip özelliklere sahip olması geopolimerlerin elde edilmesi sürecinde kullanılan alümino-silikat malzemelerin doğasıyla yakından alakalıdır. Geopolimerler, Si-O-Al bağına sahip bir dizi amorf ile yarı kristal faz içeren üç boyutlu inorganik polimerlerdir. Bu tür bir polimerin yapısı, köprülerde oksijen bağına sahip Si⁴⁺ ve Al³⁺ katyonlarının tetra-hedral koordinasyonundan meydana gelir (Noor-ul-Amin vd., 2016). Bu meydana gelen polimer yapısı için başka bir deyişle geopolimerizasyon; yani alkali ortamın varlığında alümina-silikat malzemelerin kimyasal reaksiyonunu içeren bir polimerizasyon ile üç boyutlu polimerik zincirlerin meydana gelmesi ile sonuçlanan bir süreçtir (Mehta ve Siddique, 2016).

2.3. Uçucu Kül (UK)

UK, termik güç santrallerinden üretim sonucu açığa çıkan bir atık malzemesi olup aynı zamanda alternatif olarak da çimento malzemesi yerine olarak kullanılabilir. UK'nın bağlayıcı özellik gösterebilmesi için katalizör olarak alkali aktivatör ile birlikte ilave edilmesi (Saloma vd., 2016) gerekir. Araştırmalarda aktivatör olarak da NaOH, KOH, K_2SiO_3 ve camsuyu olarak adlandırılan Na_2SiO_3 veya bunların farklı çözeltileri kullanılmaktadır. En uygun aktivatör kullanılan bağlayıcıya göre hidroksitler veya suda çözünebilen silikatlar ile üretilenlerdir (Atabey, 2017).

Çizelge 2.4. Türkiye'deki termik santrallerin analiz sonuçları (Özcan ve Güngör, 2019).

Santral	CaO (%)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	Sonuç
Afşin-Elbistan	53.44	30.68	Standartlara uygun değildir.
Orhaneli	9.48	80.73	Standartlara uygundur.
Çatalağzı	1.46	89.75	Standartlara uygundur
Seyitömer	4.26	84.34	Standartlara uygundur
Yatağan	10.53	80.65	Standartlara uygundur
Tunçbilek	1.95	87.82	Standartlara uygundur.
Soma	20.95	70.48	Standartlara kısmen uygundur.
Kangal	31.91	53.37	Standartlara kısmen uygundur
Yeniköy	39.41	32.05	Standartlara uygun değildir.
Kemerköy	38.49	43.76	Standartlara uygun değildir
Çayırhan	11.82	73.83	Standartlara uygundur

Beton yapıların tasarımında; mühendisler, sertleşmiş betonun bir dizi mekanik veya mühendislik özeliğini varsayarak kullanırlar ancak aktive edilmiş doğal puzolanlardan elde edilen geopolimer çimentolar ile üretilen betonların davranışı hakkında çok az bilgi vardır (Bondar vd., 2011). Bu nedenle alkali aktivatörler ile aktive edilmiş puzolanların, beton özelliklerinin incelenmesi; beton teknolojileri açısından yararlı olacaktır. UK içerisinde kil, kum ve organik madde içerir. Bu maddeler kömürün yanması esnasında erir ve erimeden sonra hızlıca havaya karışarak bacalardaki filtrelerle takılır.

Katı halde bulunan alümino-silikatların alkali aktivatörler ile çözünmesiyle polikondenzasyon süreci başlar ve sonuç olarak 3 boyutlu siliko-alüminatlı bağ yapısına sahip parçacıklar oluşur. Bu sürecin tamamı “geopolimerizasyon” süreci olarak adlandırılır. Malzemenin davranışı ve özellikleri açısından iyi geopolimerlerin elde edilmesi için çoğunlukla gösteren UK, YFC, kaolin gibi silika ve alümin açısından zengin malzemeler

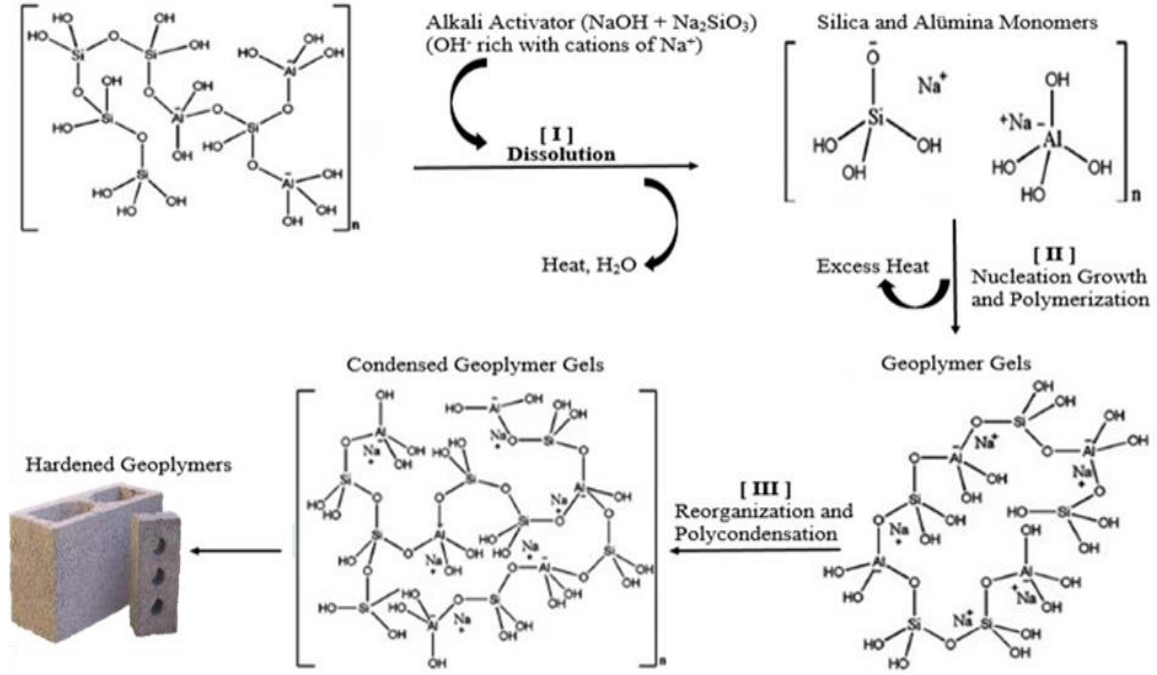
kullanılır (Wazien vd., 2016). YFC, kaolin, SD gibi UK'nın da bir endüstriyel atık olması hem performans olarak hem de ekonomik anlamda bir avantaj sahibi olması geopolimerlerin elde edilmesi sürecinde kullanılan başlıca malzemelerden birisidir. Polimerizasyon işlemi, puzolanik malzemenin alkali aktivatör çözeltisi ile temas ettirilmesiyle gerçekleştirilir ve sonuçta polimerik zincirlerin oluşmasını sağlar. Geopolimerlerin oluşumu sürecinde gerçekleşen polimerizasyon süreci, hidrasyon ile değil yüksek sıcaklık altında kür uygulaması ile aktif hale gelir (Montes ve Allouche, 2012).

Geopolimerik malzemeler, alümina silikat malzemelerin; alkali silikatlar veya hidroksitlerle en fazla 120 °C sıcaklıkta aktive edilerek (Bondar, 2013) sentezlendiği tespit edilmiştir. Kullanılan hammaddeye ve çözeltilerin molar konsantrasyonuna göre geopolimerler karışımların sertleşme sürecinde 30 °C ve 90 °C arasında bir sıcaklığın olması gerektiğini (Hardjito, 2003) önerdiği görülmüştür. Geopolimerlerin, genel olarak 60 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üretilebileceği de yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Doğal puzolanik malzemelerin bileşimi ve belirli sıcaklıklarda uygulanan kürleme işlemlerinin geopolimerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırmak için yapılan bir çalışmada (Rao ve Rao, 2015), yüksek sıcaklıklarda uygulanan kürlemenin geopolimer numunenin yapısında çatlaklara neden olduğu ve geopolimer numunenin fiziksel özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığı saptanmıştır.

2.4. Alkali Aktivatörler

En yaygın kullanılan alkali aktivatörler, NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileridir ayrıca NaOH konsantrasyonunun; geopolimerlerin hem basınç dayanımını hem de yapısını önemli ölçüde etkilediği saptanmıştır (Phoo-ngernkham vd., 2015). Geopolimerizasyon sürecinde sulu fazdaki NaOH çözeltisi, katı haldeki parçacıkların birbirleri ile bağ oluşumunu etkiler.

Günümüzde; bazı araştırmacılar, yeni ve farklı tipte atıkların yapısındaki alüminyum, demir vb. oluşumları ve atığın aktivasyon reaktifliğini test etmektedirler. Yeni teknolojiler; kentsel, metalurji, seramik, inşaat, ve tarımsal sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların geri dönüşümü üzerine odaklanmaktadır Alkali aktivasyon ise oda sıcaklığında katı bir alümino-silikat içeriği ile bir alkali aktivatör arasındaki kimyasal reaksiyonu sonucu sertleşmiş bir ürün veren (Shi vd., 2003) ve küresel olarak büyüyen bir teknolojidir.

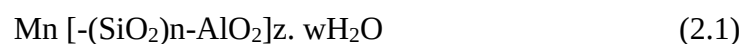


Şekil 2.1. Geopolimerizasyon reaksiyon mekanizması.

Alkali aktivatörler ile aktive edilen geopolimerler, Si ve Al bakımından zengin ancak düşük CaO içeriğine sahip olan endüstriyel bir atığın; alkali bir katalizör ile reaksiyona girmesiyle oluşur. Bu alkali katalizörler genellikle konsantre ve sıvı halde hidroksit, silikat, karbonat veya sülfat çözeltisi formundadır (Mijarsh vd., 2015). Geopolimerizasyon süreci, alkali alümino-silikat hidarete jelinin oluşumu; partikül bozunması veya çözünmesi, partiküllerin yoğunlaşması veya hidroliz, kristalleşme veya yoğunlaşma şeklinde olmak üzere üç ana adımda (Ghafoori vd., 2016) izlenebilir. Na_2SiO_3 derişiminin yüksek olduğu reaksiyonlarda da reaksiyon hızı çok yüksektir. Reaksiyonun sağlanabilmesi için çözeltinin sıvı halde olması gerekmektedir. Karışım içerisindeki malzemelerin boşluk oranlarının yüksek olması, harçta oluşan jel yapıyı güçlendirmekle beraber reaksiyonu hızlandırma yönünde pozitif etki gösterir.

2.5. Geopolimer Harçların Kimyasal Yapısı

Geopolimerizasyon süreci, alkali Si-Al arasında üç adımda gerçekleşen çok hızlı bir reaksiyondur. Reaksiyon sonucunda polimer zincirler ve halkalardan oluşan Si-O-Al-O yapısı oluşur. Reaksiyonun teorik gösterimi sırası ile,

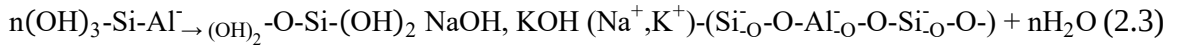
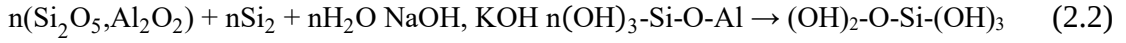


(2.1) denkleminde;

M = Alkali element ya da pozitif P, Na, Ca katyonlarını temsil eder.

n = Polimerizasyonun derecesidir.

z = 1, 2, 3 ya da giren moleküllere göre daha yüksek bir rakam alır.



Geopolimerizasyon esnasında malzemenin sertleşmesi ya da bağların oluşumunun sürecinin ne şekilde sağlandığı halen çok net olmamakla beraber, araştırmalarda en sık kullanılan teorik mekanizma (Bakri vd., 2011) aşağıda verilen adımları takip etmektedir;

- (1) Si ve Al atomlarının kaynağı oluşturan malzemeden hidroksit iyonları ile ayrışması,
- (2) İyonların monomerleri oluşturmak için taşınması ve yoğunlaşmanın sağlanması,
- (3) Polimerleşmenin tamamlanarak polimer oluşum sürecinin sona ermesi.

Polimerleşme sonucu meydana gelen bu bileşiklere polisialat adı verilir. Sialat; silikon-oksijen-alüminyum'un oluşturduğu yapıyı ifade etmektedir. Sialat bağları SiO_4 ve AlO_4 moleküllerinin ortak olarak oksijen atomlarını kullanması ile oluşur. Pozitif iyonlar (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , vb) dengenin sağlanması için Al tarafından oluşturulan dört bağlı negatif molekül ile birleşir. Bağlar ve halkalar bir araya gelip çapraz olarak eşlenerek, Si-O-Al köprüsü etrafında birleşerek polisialatları oluşturur (Abdullah vd., 2011).

2.6. Geopolimer Uygulamaları ve Çalışmalar

Son yıllarda, artık geopolimerler erken basınç dayanımı, düşük geçirgenliği, yüksek seviyede bir kimyasal direnci ve yüksek seviyede bir yangın direnci davranışına sahip olması nedeniyle bağlayıcılar arasında büyük ilgi görmüştür. Bu avantajlı özellikleri nedeniyle geopolimerler, kimya ve nükleer endüstrileri için yapı malzemeleri, beton, yangına dayanıklı kaplamalar, lifli kompozitlerin yapımında çeşitli sürdürülebilir ürünler geliştirmek için OPC'ye alternatif olarak (Singh vd., 2015) değerlendirebilecek malzemelerdir.

Geopolimerlerin bir avantajı da UK, YFC gibi yapay puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların geopolimerizasyon sürecinde kullanılarak geri dönüşüm şeklinde değerlendirilerek, sahada depolama gibi sorunlarında ortadan kalkabilecek olmasıdır. Geopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su, işlenebilirlik için kullanılmakta, geopolimerin kür ve priz sırasında geopolimer içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın direnci gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır. UK'nın alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir (Binici vd., 2012). Ayrıca geopolimerlerin bir avantajı ise kısa süre içerisinde dayanım kazanmaları, dış etkilere olan dayanıklılıkları ve yüksek hacim kapasitesine sahip olmaları da gösterilebilir (Topçu ve Toprak, 2009).

Geopolimerizasyon prosesi, UK, YFC, SD gibi endüstriyel atık, volkanik tüf, ufalanmış doğal başkalaşım kayalar ya da 750 °C de fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış alumino-silikat yapıdaki toprak katımlarla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesi ile başladığı (Felekoğlu, 2016) yapılan çalışmalar sonucu saptanmıştır. Ağırlıklı olarak metakaolin olmak üzere kalsine killeri, geopolimer sentezinde yoğunlukla kullanılmalarına rağmen plakaya benzer parçacık şekillerinden dolayı beton üretiminde yüksek su talebi ve yüksek poroziteye neden olduklarından dolayı (Kürklü, 2016) çok elverişli değildir. Geopolimerler, OPC ile karşılaştırıldığında; alkali çözeltiler içerisinde kolaylıkla çözünebilen her türlü alimüna-silika veya silikat içeren doğal puzolanik özellikli malzemeler herhangi bir endüstriyel süreç gereği olmadan geopolimer üretimi için yeterli olacaktır. Bununla birlikte, kısa sürede içeriğine göre geopolimerler, PC'na göre, priz süresinin 4 saatinde nihai basınç dayanımının %70'ini sağladığı belirlenmiştir (Li vd., 2004).

Geopolimer tipte malzemelerin kimyasal bileşimi, doğal zeolitik malzemelere benzer özellikler gösterir iken mikro yapısı incelendiğinde bu yapının amorf olduğu (Budh ve Warhade, 2014) gözlemlenmiştir. Fazları oluşturan her atomun kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı gelişigüzel bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Kristal yapılarda fazlar atom, iyon ve molekülden meydana gelen düzenli bir oluşum vardır. Geopolimer yapısının amorf olması; reaksiyon sürecinin nasıl, ne şekilde gerçekleştiği ve meydana gelen bir geopolimerin faz yapısı hakkında yorum yapabilmeyi zorlaştırmaktadır.

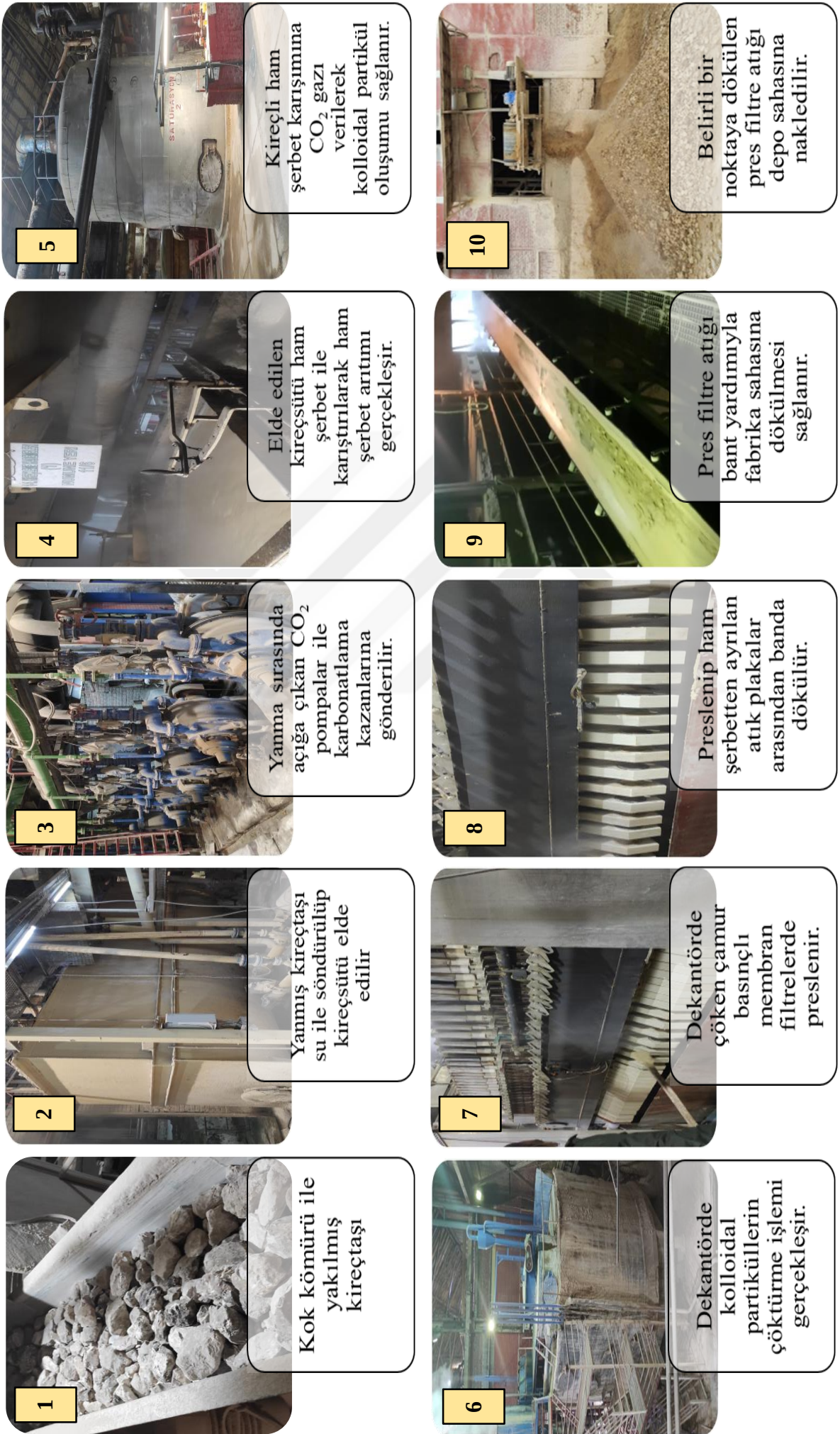
3. PRES FİLTRE ATIĞI (PFA)

Şeker üretim sürecinde kullanılan kireçtaşı söndürülür ve üretim esnasında arıtmada kullanılır. İşlem sonucunda ham şerbete katılan kireç CO_2 eklenerek şerbetten uzaklaştırılır, çamurlu bir hale gelen şerbet dekantörlerde çöktürülür. Çıkış ağızlarında filtreler bulunan dekantörlerde toplanan atığa “Pres Filtre Atığı (PFA)” adı verilir. Geopolimerler gibi alkali aktivasyonu ile bağlayıcılık özelliği kazanan harçların üretiminde kullanılabilirliğine dair araştırmalar literatürde bulunmaktadır. Ülkemizde bulunan şeker üretim endüstrisinin her zaman atık olarak uzaklaştırmak zorunda kaldığı PFA, yapı malzemesi olarak değerlendirilip çevre dostu, sürdürülebilir, düşük maliyetli malzeme üretimi sağlanabileceği düşünülmektedir. Araştırmanın özgünlüğü ve gelecekteki potansiyeli yüksek olmakla beraber, sıfırdan oluşturulan bir literatür olması sayesinde, ulaşılan her nokta ve yapılan her deney önem arz etmektedir. Milli gelir kaybının önlenmesi, çevrenin yani ekolojik dengenin korunması, atıkların geri dönüşümünün sağlanması ve yapı maliyetlerinin düşürülmesi gibi pek çok alanda yarar sağlayabilecek olması konunun önemini vurgular niteliktedir. Ayrıca yapı sektörü dışında kimya ve malzeme mühendisliği gibi disiplinlerin analiz ve araştırmaları ile ileri de çok daha büyük bir potansiyele ulaşabilecek bir konudur. Açığa çıkan her tipte endüstriyel atığın geri dönüşümünün sağlanması konusunda kullanılacak geopolimerizasyon veya alkali aktivasyon yöntemleri ile zaman içerisinde daha ekonomik, gereksinimlere göre uygulanabilirliği daha kolay malzemeler üretilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Çizelge 3.1. PFA ve örnek bir kireçtaşının kimyasal kompozisyonu (% Ağırlık).

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅
Kireçtaşı	3.62	0.65	0.35	50.37	0.05	0.03	0.88	-	-
PFA	3.74	1.20	1.02	56.37	-	0.09	2.02	0.21	0.19

Yapılan bir çalışmada PFA; PC klinkeri hazırlanırken kullanılabilir olduğu görülmüştür. PFA ham karışımların yanıcılığını yükseltirken, sıvı faz miktarını da arttırdığı saptanmıştır. Bu özellik C_3S oluşumu için oldukça önemli bir yer tutmaktadır. PC'nun en önemli fazının bileşenleri olan C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF her çimento klinkerinde var olduğu bilinmektedir. Uygun oranda PFA içeriğinin C_3S oluşumunu desteklediği ve klinkerdeki C_3S miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Kireçtaşının yerine yüksek oranda PFA kullanımı $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ ve $\text{C}_2\text{S}0.5\text{C}_3\text{P}_2$ oluşumu ile sonuçlandırılmış (Li vd., 2014) yapılan çalışmada gözlemlenmiştir.



Şekil 3.1. PFA'nın açığa çıkma süreci.

3.1. PFA Uygulamaları ve Çalışmalar

PFA'nın yapı malzemesi olarak kullanılması adına yapılan araştırmalar incelendiğinde, bu atık malzemenin özel bir üretim süreci sonunda açığa çıkması nedeniyle yerli ve yabancı kaynaklarda oldukça az araştırmacının yapmış olduğu araştırmalar bulunmaktadır. Bu atığın farklı özelliklerinden dolayı puzolan özelliğe sahip diğer atıklar ile beraber kullanarak bir alkali aktivatör yardımı ile geopolimerizasyon süreci gerçekleştirilmiştir.

PFA ve çimento karışımı ile elde edilen harç numunelerde PFA oranı arttıkça hidratasyon sürecinin uzadığı ve CEM I 42.5R çimento (%95) ile PFA (%5) içeren harç numune basınç dayanımı, kontrol harç numune basınç dayanımının %96'sı kadar (Topçu ve Sofuoğlu, 2017) olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, yapılan diğer bir çalışmada UK, alkali aktivatör ve PFA kullanılarak elde edilen harçların 28 günlük basınç dayanımı 17.00-24.00 MPa ve yine 28 günlük sertleşmiş birim ağırlıklarının ise 1.917 kg/dm³-1.950 kg/dm³ arasında bir değer aldığı saptanmıştır. PFA kullanılarak üretilmiş harç numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, ön çalışmalar ile belirlenen sabit bir oranda Na₂SiO₃ kullanılan harç numunelerde, su ve PFA oranında yapılan değişiklikler ile ideal harç tipi (Topçu ve Sofuoğlu, 2020) tayin edilmeye çalışılmıştır. Harç numunelerin 7 ve 28. gündeki basınç dayanımı dikkate alındığında şunlar söylenebilir;

- Harç numuneler içerisindeki PFA oranının azalması ile basınç dayanımı artmıştır,
- Su/Na₂SiO₃ oranındaki azalma numunelerin basınç dayanımına olumlu etki sağlamıştır,
- İçeriği %30 PFA ve 75 ml su olan ve 120 °C, 140 °C ve 160 °C kür sıcaklığı uygulanan geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları karşılaştırıldığında 28 günlük geopolimer harç numunelerde, 7 günlük geopolimer harç numunelere göre sırasıyla %0.41, %0.68 ve %0.21 oranında artış (Topçu ve Sofuoğlu, 2021) görülmüştür,
- Uygulanan yüksek kür sıcaklığı geopolimer harç numunelerin bazı mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Ultra ses geçiş süresi ve hızı değerlerinin de bu özellikler arasında yer aldığı (Topçu ve Sofuoğlu, 2021) saptanmıştır. %10 PFA içeren geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızı değeri, uygulanan kür sıcaklığının artışı ile azalmıştır. En yüksek ultrases geçiş hızı değeri; kontrol geopolimer harç numuneleri hariç, 120 °C sıcaklıkta kürlen 75 ml su içerikli (3.29 km/sn) geopolimer harç numunelerde olduğu belirlenmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, şeker üretim sürecinde açığa çıkan ve bir endüstriyel atık olan PFA'nın geri dönüşümü üzerine yapılmıştır. Bu atık ile alkali aktivatörlerin de yardımıyla, UK'dan oluşan geopolimer harç karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen numunelere belirlenen kür koşulları uygulanarak bazı taze ve sertleşmiş harç özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada, literatür taraması doğrultusunda karışımlar; standart kum, UK, Na_2SiO_3 aktivatörü, PFA ve şebeke suyu kullanılarak elde edilmiştir. Harç karışımları ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.0, su/bağlayıcı oranı 0.19, 0.17 ve su/ Na_2SiO_3 oranı 0.386, 0.341 olacak şekilde hazırlanmış olup elde edilen numuneler üç farklı tipte kür sıcaklığı uygulamasına tabi tutulmuştur. 220 ml Na_2SiO_3 çözeltisi harç karışımlara dahil edilmiştir. Elde edilen numuneler harç kalıpları ile 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra 72 saat boyunca kalıptan çıkarılmadan etüvde sırasıyla 120 °C, 140 °C ve 160 °C sıcaklıklarda kür edilmiş, etüvden alındıktan sonra kalıplardan çıkarılarak numuneler 7 ve 28 gün süre ile laboratuvar ortamında (23 ± 20 °C ve nemi %50 $\pm$ 5) havada kürlenerek deneyler yapılmıştır.

İstatistiksel olarak inceleme yapılabilmesi için farklı PFA ve su oranlarına sahip karışımlardan 6 adet numune tipi üretilmiştir. Farklı üç tip sıcaklık kürü koşulları için ise her bir 220 ml Na_2SiO_3 , UK, PFA içeren 40x40x160 mm ebatlarında olmak üzere toplamda $6 \times 3 \times 2 \times 6 = 216$ adet numune üretilmiştir. Ön deneylerle belirlenen oranlar sonucunda elde edilen harç karışımlar üzerinde kür koşulları çerçevesinde ilk olarak taze beton deneyleri yapılmış olup; bu deneyler taze birim ağırlık, yayılma, priz süresi deneylerini kapsamaktadır. Sonrasında uygulanan üç tip kür koşulu çerçevesinde saklanan numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri yapılmış olup; bu deneyler sertleşmiş birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, su emme, basınç dayanımı deneyleri ile mikro yapı incelemesini kapsamaktadır. Mikro yapı analizleri kapsamında XRD analizi ve SEM görüntü çalışmaları yapılmış, numunelerde meydana gelen fazlar belirlenerek değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar dışında ayrıca elde edilen geopolimerlerin sürdürülebilirlik analizleri de yapılarak, çimento üretim ve kullanım sürecinin sürdürülebilirliği ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışması hakkındaki genel bir değerlendirme yapıldığında karışık bir geopolimerizasyon süreci sonunda meydana gelen geopolimer numunelerin farklı özelliklerinin belirlenmesi üzerine detaylı deneysel çalışmalar yapılmış ve kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzemeler

Geopolimer harç numunelerin üretim sürecinde aşağıda çeşitli özellikleri verilmiş olan şebeke suyu, standart kum, UK, PFA ve alkali aktivatör olarak (Na_2SiO_3) kullanılmıştır.

4.1.1. Su

Geopolimer harç numunelerin üretim sürecinde su olarak laboratuvarımızda kullanılan Eskişehir şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan şehir şebeke suyuna ait yapılan kimyasal analizi değerlendirildiğinde TS 1247 kapsamında harç veya betonlarda kullanılan karma suyu niteliklerini taşıdığı saptanmıştır.

Çizelge 4.1. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi.

Parametreler	Ölçü Birimi	Değer
pH	-	7.49 (20°C)
Klorür (Cl^-)	mg/L	6.53
Kalsiyum (Ca)	mg/L	63.8
Çinko (Zn)	mg/L	0.375
Sülfat (SO_4)	mg/L	91.5
Magnezyum (Mg)	mg/L	41.5
Bakır (Cu)	mg/L	0.092
Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$)	mg/L	4.35
Demir (Fe)	mg/L	0.074
Serbest Klor (ClO_2)	mg/L	< 0.05
Toplam Klor (ClO_2)	mg/L	< 0.09

4.1.2. Standart Kum

Deneysel çalışmada numuneler hazırlanırken TS EN 196-1 standardına uygun olarak “Rilem Cembureau Standart” kumu kullanılmıştır. Standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımları ve standart sınır değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanılan standart kumun granülometresi ve sınır değerleri.

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0.08	0.16	0.50	1.00	1.60	2.00
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

4.1.3. Uçucu Kül (UK)

Deneysel çalışmalarda kullanılan UK, Kütahya-Tavşanlı Tunçbilek termik santralinden temin edilmiş olup; deneylere başlamadan önce UK'nın kimyasal (XRF analizi yapılmış) ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. F Sınıfı UK'nın kimyasal analizi (Tunçbilek).

Bileşenler	Ağırlıkça Oran (%)
SiO ₂	54.43
Al ₂ O ₃	20.94
Fe ₂ O ₃	10.05
CaO	2.39
MgO	5.35
SO ₃	0.33
K ₂ O	1.46
Kızdırma Kaybı	1.42
Serbest CaO	0.15
Klorür	0.051

Çizelge 4.4. UK'nın fiziksel özellikleri (Tunçbilek).

Fiziksel Özellikler	90 μ (%)	45 μ (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Blaine (cm ² /gr)
	-	35	2.05	3200

4.1.4. Pres Filtre Atığı (PFA)

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, şeker fabrikasının kristal şeker üretimi sürecinde açığa çıkan katı atık PFA malzemesi UK ile alkali aktivatör yardımıyla beraber numune karışımlarında kullanılarak geopolimer harç numuneler elde edilmiştir. PFA'nın XRF analiz yapılarak elde edilen kimyasal analizi Çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Atığın kimyasal analizi değerlendirildiğinde ağırlıkça en fazla olan oksidin CaO olduğu görülmüştür. Kireçtaşı, şeker üretim sürecinde ham şerbetin arıtılma aşamasında kullanılmaktadır. Bu arıtma süreci başlamadan önce kireçtaşı yakıldığında açığa yüksek bir oranda CaO ve CO₂ çıkmaktadır. Atığın içerisindeki CaO ağırlıkça oranının yüksek olması, kireçtaşının yanma reaksiyonu sonucu açığa çıkan CaO oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer oksitler ise ham şerbetten arıtım yoluyla ayrılan ve dekantörlerde çöken atık (PFA) içeriğine gübre vb. malzelerden gelmektedir. Ancak atık içeriğinde ağırlıkça oranları azdır.

Çizelge 4.5. PFA'nın kimyasal analizi.

Bileşen	Ağırlıkça Oran (%)
MgO	2.0242
Al ₂ O ₃	1.2064
SiO ₂	3.7480
P ₂ O ₅	0.1948
SO ₃	0.2142
K ₂ O	0.0910
CaO	56.3714
TiO ₂	0.0783
Cr ₂ O ₃	0.0392
Fe ₂ O ₃	1.0255
BaO	0.2331
Kızd. Kaybı	34.7740

4.1.5. Alkali Aktivatör

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen numunelerde sabit bir oranda Na₂SiO₃ çözeltisi aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu aktivatör kimyasal üreten sertifikalı firmalar tarafından temin edilmiş olup bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Na₂SiO₃ kimyasal ve fiziksel özellikleri (Moleküler SiO₂/Na₂O = 3 (3 modül)).

Kimyasal ve Fiziksel Özellik	Na ₂ SiO ₃
Görünüm	Berrak kıvamlı sıvı
Ph	11.00-13.00
Moleküler Ağırlık, gr/mol	122.06
Modul	3.36
Bome (Bé) (20 °C)	40.8
Birim Ağırlık, gr/cm ³ (20 °C)	1.391
SiO ₂ /Na ₂ O, ağırlıkça, %	3.26
SiO ₂ , %	29.11
Na ₂ O, %	8.93
Cl, %	0.01
SO ₄ , %	0.01

4.2. Karışım Oranları

PFA ve UK'nın kullanım oranlarının değişmesi ve farklı sıcaklıklarda kür edilmesi ile harç numunelerde oluşacak değişimlerin incelenmesi amacıyla tüm karışımlarda belirlenen bazı oranlar sabit tutulmuştur. Sırasıyla UK, PFA, kum, su, Na₂SiO₃ için uygulanan oranlar, kür sıcaklıkları ve numunelerin kod listesi Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. UK ve PFA ile hazırlanan geopolimer numuneler.

Numune Kodu	UK (gr)	PFA (gr)	Kum (gr)	Su (gr)	Su/ Bağlayıcı	Na ₂ SiO ₃ (ml)	Sıcaklık (°C)
UK100S1T1	450	0	1350	85	0.19	220	120
UK100S1T2	450	0	1350	85	0.19	220	140
UK100S1T3	450	0	1350	85	0.19	220	160
UK100S2T1	450	0	1350	75	0.17	220	120
UK100S2T2	450	0	1350	75	0.17	220	140
UK100S2T3	450	0	1350	75	0.17	220	160
PFA10UK90S1T1	405	45	1350	85	0.19	220	120
PFA10UK90S1T2	405	45	1350	85	0.19	220	140
PFA10UK90S1T3	405	45	1350	85	0.19	220	160
PFA10UK90S2T1	405	45	1350	75	0.17	220	120
PFA10UK90S2T2	405	45	1350	75	0.17	220	140
PFA10UK90S2T3	405	45	1350	75	0.17	220	160
PFA20UK80S1T1	360	90	1350	85	0.19	220	120
PFA20UK80S1T2	360	90	1350	85	0.19	220	140
PFA20UK80S1T3	360	90	1350	85	0.19	220	160
PFA20UK80S2T1	360	90	1350	75	0.17	220	120
PFA20UK80S2T2	360	90	1350	75	0.17	220	140
PFA20UK80S2T3	360	90	1350	75	0.17	220	160
PFA30UK70S1T1	315	135	1350	85	0.19	220	120
PFA30UK70S1T2	315	135	1350	85	0.19	220	140
PFA30UK70S1T3	315	135	1350	85	0.19	220	160
PFA30UK70S2T1	315	135	1350	75	0.17	220	120
PFA30UK70S2T2	315	135	1350	75	0.17	220	140
PFA30UK70S2T3	315	135	1350	75	0.17	220	160

Endüstriyel atık olarak farklı santrallerden temin edilen UK ve PFA deneysel çalışmalara başlamadan önce UK, 24 saat 100 °C sıcaklıkta, PFA ise 48 saat 110 °C sıcaklıkta olmak üzere etüvde bekletilmiş sonrasında 75 µm'lik elekten geçirilmiştir. Atıkların 75 µm'lik elekten geçirilmesi yüzey alanının artırılarak daha reaktif bir ortamın sağlanması şeklinde öngörülmüştür. Böylelikle geopolimer harç numunelerde kullanılan UK ve PFA'nın 75 µm'lik elekten geçirilmesi ile çimento tanecik inceliğine yakınlığı da sağlanmıştır. Normal koşullarda 24 saat 105 °C sıcaklık numunelerdeki nemi buharlaştırmak için yeterlidir. Ancak procesten yeni çıkan PFA, içeriğindeki yüksek nem oranı nedeniyle 110 °C sıcaklıkta 48 saat etüvde tutulması uygun görülmüştür. UK'nın ise nem içeriği PFA'nın nem içeriği kadar yüksek olmadığından UK, etüvde 24 saat 100 °C sıcaklıkta tutulması uygun görülmüştür. Atıkların içeriğindeki nem tamamen uzaklaştırıldıktan sonra atıklar kullanılıncaya kadar laboratuvar ortamında dışarıdan nem almayacak şekilde saklanmış deneysel çalışmalara başlanmıştır.

4.3. Numune Üretimi

Numunelerin elde edilmesi için UK, PFA'nın ve diğer materyallerin Çizelge 4.7'de verilen oranlara göre tartımları yapılmıştır. 450 gr bağlayıcı içeren numunelerde su/bağlayıcı oranı 0.19 ve 0.17 olacak şekilde laboratuvar tipi karıştırıcı haznesine su, standart kum, UK ve PFA ile belirlenen oranda (220 ml) Na_2SiO_3 karışıma ayrı ayrı olmak üzere eklenmiştir. Bileşenlerin hazneye alınmasından sonra karıştırıcı düşük hızda (62.5 dakika^{-1} , yörüngesel dönme hızında) çalıştırılmaya başlanmış ve 30'uncu saniyede standart kum otomatik şekilde dökülmeye başlanarak, 30 saniye içerisinde standart kumun tamamı karışıma girmiştir (başlangıçtan itibaren 60'ıncı saniyede tamamlanacak şekilde). Böylelikle karışım karıştırıcı haznesinde 30 saniye daha düşük hızda çalıştırıldıktan sonra yüksek hıza alınmış (125 dakika^{-1} , yörüngesel dönme hızında) ve bu hızda da 60 saniye daha karıştırıldıktan sonra karıştırıcı durdurulmuştur.

Harcın karışım işlemi tamamlandıktan sonra karışım hemen kalıba alınmıştır. Bu amaçla her taze karışım $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ebatlarındaki 3 seri kalıba iki tabaka halinde doldurulmuştur. Her bir tabaka 10 ila 15 sarsma ile sıkıştırılmış ve ikinci tabaka sonrasında kalıp üzerinde kalan harç mala yardımıyla testere hareketi ile kalıp üzerinden alınmış ve metal master ile numunelerin üzeri düzgün bir yüzey elde edilecek şekilde yüzey düzeltmesi yapılmıştır. Numuneler, Çizelge 4.7'de verilen numune kodları kullanılarak işaretlenmiştir.

Harç karışımların kalıplara dökülüp gerekli vibrasyon ve yüzey düzeltme işlemleri tamamlandıktan sonra üzerine hava geçirmeyecek şekilde naylon örtüler ile sarılarak taze harç karışımlar ile 24 saat boyunca kalıptan çıkarılmadan laboratuvar koşullarında ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ve nemi 50 ± 5) bekletilmiştir. 24 saat tamamlandıktan sonra numuneleri saran naylon örtüler alınarak, numuneler kalıptan alınmadan bu sefer alüminyum folyolar ile kalıbı da tamamıyla içerisine alacak şekilde kaplanmıştır. Alüminyum folyo ile kaplama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler Çizelge 4.7'de belirlenen farklı sıcaklıklarda fırın içerisine konularak 72 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuşlardır. 72 saat sıcaklık kürü tamamlandıktan sonra numuneler fırından alınarak kalıplardan çıkarılmış ve oda koşullarında laboratuvar ortamında hava kürüne ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ve nemi 50 ± 5) bırakılarak 7 ve 28. günlerinin tamamlanması sağlanmıştır. Taze halde iken ve 7 ve 28. günlerini tamamlandıktan sonra numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmış ve bu şekilde tez çalışması da sonlandırılmıştır.

4.4. Yapılan Deneyler

Elde edilen geopolimer harç numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki mekanik, fiziksel vb. özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneyler ve analizler yapılmıştır. Bu analizler kapsamında, 28 günlük geopolimer numunelerin iç yapıları incelenmiş buna bağlı olarak mikro yapı analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte gömülü enerji ve gömülü CO₂ analizleri yapılarak elde edilen geopolimer harçların, çimento üretimi ve kullanımı sürdürülebilirliği ile karşılaştırılmak üzere sürdürülebilirlik analizleri yapılmıştır.

4.4.1. Taze harç halinde halde yapılan deneyler

Geopolimer harç numunelerin özellikle taze haldeki bazı mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek için taze birim ağırlık, yayılma ve de priz süresi deneyleri yapılmıştır.

4.4.1.1. Taze birim ağırlık deneyi

Taze karışım geopolimer numunelerinin 0. gün taze birim ağırlığını belirlemek için TS EN 12350-6 standardı kullanılmıştır. Taze birim ağırlık, 4.1 denklemi kullanılarak hesaplanmış ve deney sonucu elde edilen değerlerin analizi yapılarak malzemenin su, Na₂SiO₃ içeriğine bağlı olarak taze özellikleri hakkında bir fikir edinmeye çalışılmıştır.

$$d = (m_2 - m_1) / V \quad (4.1)$$

d : Taze harcın birim ağırlığı, kg/dm³,

m_1 : Kalıbın boş kütlesi, kg,

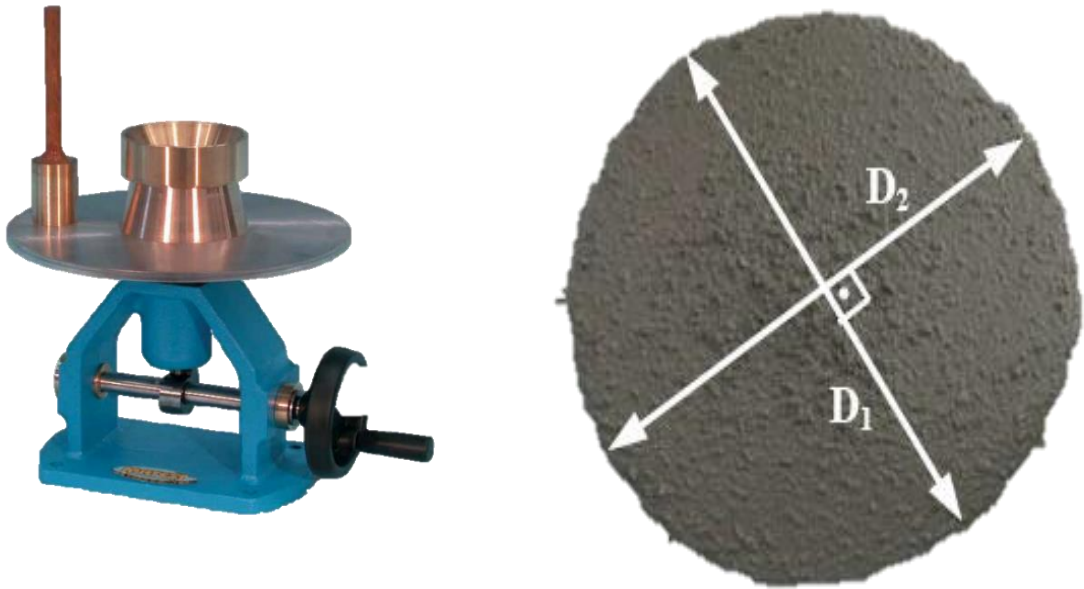
m_2 : Kalıbın içerisindeki taze harç numune ile birlikte toplam kütlesi, kg,

V : Kalıbın hacmi, dm³,

Formülde kullanılan kısaltmalar yukarıda belirtilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise öncelikle kalıbın boş kütlesi belirlenir, taze geopolimer harç karışımlar hazırlanıp elde edilir edilmez kalıba dökülerek satandartlar çerçevesinde vibrasyon ve yüzey düzeltme işlemleri yapıldıktan sonra kalıbın dolu kütlesi belirlenir daha sonra ise belirlenen kütlelerin arasındaki fark kalıbın hacmine bölünerek taze birim ağırlıkların değeri saptanır.

4.4.1.2. Yayılma deneyi

Taze haldeki geopolimer harç karışımların yayılma değerleri TS EN 1015-3 standardına uygun olacak şekilde deneyi yapılarak elde edilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere verilen standart çerçevesinde yayılma tablası üstü kalıp, yayılma tablasının dairesel levhası üzerine merkezlenerek yerleştirilmiş ve harç, kalıp içerisine iki tabaka halinde her iki harç tabakasına ayrı olmak üzere tokmak ile harç yüzeyine düzgün şekilde dağılan en az 15 kısa vuruş yapılarak sıkıştırılmış ve yayılma tablası üstü kalıp doldurulmuştur. Kalıbın üst yüzeyinde kalan fazla harç, yüzey düzeltme bıçağı ile sıyrılmış, dairesel tablanın üzerine dökülen fazla taze harç artıkları tablanın boş yüzey kesitlerinden silinerek temizlenmiştir. Yayılma tablası üstü kalıp düşey olarak yukarıya doğru yavaşça çekilerek alınmış ve dairesel tabla üzerinde kalan taze geopolimer harç kütlesi, yayılma tablası saniyede bir defa olmak üzere, belirlenen sabit frekansta 15 defa düşürülerek tablaya yayılması sağlanmıştır. Yayılan taze geopolimer harç kütlesinin çapı, birbirine dik iki doğrultuda kumpas ve pergel yardımı ile 2 kez kontrollü olmak üzere tekrar ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları cm olacak şekilde her deneyde ayrı ayrı belirlenerek, elde edilen değerler kaydedilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlerin her taze geopolimer harç numuneye göre aritmetik ortalaması olarak yayılma değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Yayılma deneyi.

4.4.1.3. Priz süresi deneyi

Tüm taze geopolimer harç numuneler için önemli bir parametre olan priz başlangıç ve bitiş süreleri TS EN 480-2 standardına uygun olarak saptanmıştır. Prizin başlangıç ve bitiş sürelerine taze harç içine batırılan bir iğnenin belirlenmiş bir derinliğe eriştiğinin gözlenmesi yoluyla ulaşılır. Deneyler manuel veya Şekil 4.2’de verilen otomatik bir vicat cihazı kullanılarak gerçekleştirilebilir. Priz deney iğnesi olarak ise korozyona dirençli paslanmaz çelikten yapılmış ve etkili uzunluğu (50 ± 1 mm), çapı (1.13 ± 0.05 mm) olan iğne kullanılmıştır. Deney esnasında kullanılan vicat kalıbı sert bir kauçuktan elde edilmiş olmalıdır. Kalıp, (40 ± 0.2 mm) derinliğinde kesik koni şeklinde olup, üst ve alt iç çapları; sırayla 70 ± 5 mm ve 8 ± 5 mm olması gerekmektedir. Taban plakası ise kalıptan daha geniş, cam veya sert plastik malzemelerden ve de en az 2.5 mm kalınlıkta olması gerekmektedir.

Priz başlama süresini belirlemek için öncelikle otomatik vicat cihazının iğnesi tabandaki cam plakaya değene kadar indirilmiş ve gösterge çizelgesi sıfırı gösteriyor olması gerekmektedir. İğne taze harcın yüzeyi ile temas edene kadar dikkatlice indirilmiş, ardından hızla serbest bırakılmıştır. Cam plakanın üst yüzü ile iğnenin ucu arasındaki mesafenin 4.0 mm olduğu ana kadar geçen süre taze harcın priz başlangıcı olarak belirlenir. Taze harcın priz bitiş süresi ise kalıp üstüne kapatılan diğer bir cam plaka üzerine ters çevrilerek iğnenin ucunun en çok 2.5 mm battığı ana kadar ki geçen süre olarak belirlenir.



Şekil 4.2. Otomatik Vicat cihazı.

4.4.2. Sertleşmiş harç halinde yapılan deneyler

Çalışmalar sonucunda elde edilen geopolimer harç numunelerin; sertleşmiş haldeki çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerini saptamak amacıyla sertleşmiş birim ağırlık, kılcal su emme, ultrases geçiş süresi, basınç dayanımı deneyleri ile mikro yapı analizleri yapılmıştır.

4.4.2.1. Sertleşmiş birimi ağırlık deneyi (SBA)

Sertleşmiş birim ağırlık deneyi 40x40x160 mm ölçülere sahip prizmatik geopolimer numuneler üzerinde yapılarak birim ağırlık değerleri saptanmıştır. Sertleşmiş birim ağırlığı TS EN 12390-7 (2010)'a göre belirlemek amacı ile tüm geopolimer numuneler farklı sıcaklıklarda kür edildikten sonra 7 ve 28. günlerde olmak üzere tüm geopolimer numuneler 30 kg kapasiteli 2 gr duyarlıklı terazide tartılmıştır. Numuneler tartımların yapıldığı esnada en, boy ve yükseklikleri kumpas kullanılarak hassas bir şekilde tekrar ve tekrar ölçülmüştür. Belirlenen ölçüler yardımı ile prizmatik geopolimer numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Böylelikle tartımlar sonucu elde edilen ağırlık değerlerinin, geopolimer harç numunelerin hacmine oranı ile tüm numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları da (kg/dm^3) belirlenmiştir.

4.4.2.2. Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme deneyine başlamadan öncelikle geopolimer harç karışımlarında kullanılan tüm malzemeler deney numune kalıpları da dahil olmak üzere 20 ± 2 °C'de ve 65 ± 5 bağıl nemde sabit tutulan ortamda 24 saat olmak üzere koşullandırılmıştır (TS EN 480-5). Deney süreci kapsamında geopolimer harç karışımlar hazırlanarak 40x40x160 mm ölçülerinde prizmatik numune kalıplarına kalıplar yağlanmadan yerleştirilerek elde edilir. Geopolimer harç numunelere; 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak kapalı ortamda sırasıyla 7 günlük ve 90 günlük olana kadar kür işlemi (20 ± 2 °C'de ve 60 ± 5 bağıl nem) uygulanır. 7 ve 90 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra bu kapalı ortamda tartılır (M_0). Tartım işlemi gerçekleştirildikten sonra sabit seviyede su ile doldurulan bir kaba düşey veya yatay vaziyette yerleştirilir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere numunelerin alt yüzeylerine suyun temas edebilmesi için numuneler çubuk veya pimlere dayandırılmak zorundadır. Su yüksekliği ise numune alt yüzeyinin (3 ± 1 mm) üzerinde olmak üzere sabit tutular ve geopolimer harç numuneler bu şekilde yerleştirilerek ortamda koşullandırılır.

İlk seriye ait geopolimer harç numuneler 7 gün standart çerçevesinde belirlenen ortam koşullarında (20 ± 2 °C’de ve $\%65\pm 5$ bağıl nemde) kür edildikten sonra 1 ve 7 gün boyunca yukarıda belirtildiği üzere su ile temastan sonra deney uygulanır. İkinci seriye ait numuneler ise 90 gün ortam koşullarında (20 ± 2 °C’de ve $\%65\pm 5$ bağıl nem) kür edildikten sonra 1,7 ve 28 gün boyunca yukarıda tarif edildiği üzere su ile temastan sonra deney uygulanır. Geopolimer harç numuneler su ile temastan sonra kaptan çıkarılıp kuru bez veya kuru kâğıt ile silinerek üzerindeki su fazlası alınarak tartım işlemine geçilir (M_j).

Belirlenen sürelerde suyla temas sonrası istenen süredeki kılcal su emme C_A ; aşağıdaki 4.2 denklemi ile hesaplanır ve birim olarak g/mm^2 birimi ile sonuçlanır.

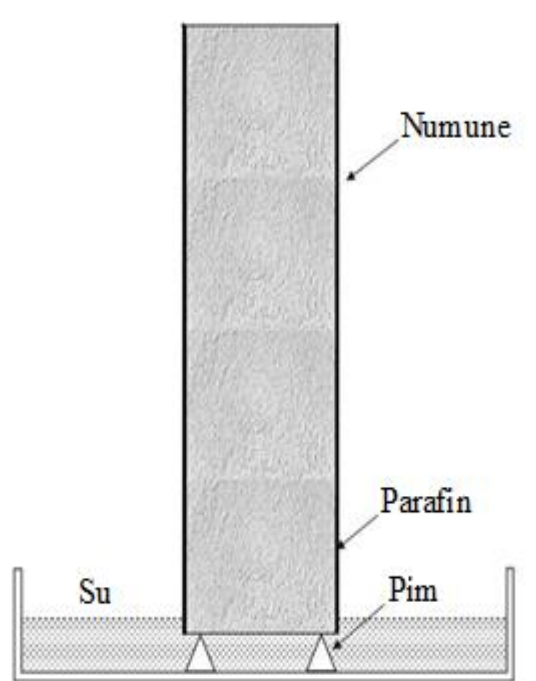
$$C_A = (M_j - M_0) / 1600 \quad (4.2)$$

Burada;

M_0 : 7 veya 90 gün süreyle küre tabi tutulduktan sonraki numune kütlesi; g,

M_j : 1, 7 ve 28 gün süreyle suya temas sonrası ölçülen numune kütlesi; g,

1600 ise $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarındaki numunenin suya temas eden yüzeyinin alanıdır.



Şekil 4.3. Kılcal su emme deney aparatları.

4.4.2.3. Ultrases geçiş süresi deneyi

Ultrases geçiş süresi deney cihazında var olan problemler yardımıyla alıcı ile verici arasında ultrases dalgaların beton veya harç numunenin içerisinden geçirilerek bu dalgaların geçiş süresi ve buradan hesaplanan geçiş hızı ile beton veya harç numunenin dayanımı hakkında bilgiye ulaşılabılır. Ayrıca ultrases geçiş süresi deney cihazı ile sadece dayanım üzerine değil beton veya harç numunenin boşluk yapısı, yapısal kusurları ve çatlakları hakkında da bilgi elde edilebilir. Beton veya harç numunenin içerisinden geçen ultrases dalgaların hızı ile dayanımları arasından doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak numunenin birim ağırlığı veya yoğunluğu dikkate alındığı takdirde yoğunluğu düşük olan (hafif beton vb.) boşluklu numunenin içerisinden geçirilen ultrases dalgası daha yavaş ilerleyeceğinden dolayı numunenin bir yüzünden diğer bir yüzüne daha uzun bir sürede geçecektir. Başka bir deyişle betonun içerisindeki boşluk arttıkça, ultrases geçiş hızı yavaşlayacak; betonun içerisindeki boşluk azaldıkça, ultrases geçiş hızı da artacaktır. Geopolimer harç numunelerinin ölçüleri bilindiği için ultrases dalgasının kat ettiği mesafenin zaman bölünmesi ile ultrases dalgasının geçiş hızına ulaşılabılır. Deneylerde alıcı ve vericinin tam olarak rahatlıkla temas edeceği harç numune yüzeyleri pürüzsüz ve temiz olmalıdır. Ultrases dalgasının geçiş hızı, 4.3 denklemi yardımı ile bulunur.

$$U_{pv} = (s / t) \times 10 \quad (4.3)$$

Burada;

s : Ultrases dalgası gönderilen yüzeyler arası mesafe, cm,

t : Ultrases dalgasının geçiş zamanı, µsn,

U_{pv} : Ultrases dalgasının hızı, km/sn,

Formülde kullanılan kısaltmaların açıklamaları yukarıda belirtilmiştir. Deneyisel çalışmalarda tüm numuneler 7 ve 28. günde ultrases geçiş süresi deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneylerde kullanılan cihaz (Şekil 4.4) 54 kHz verici ve alıcı olmak üzere iki adet transdüserle sahip olup ASTM C 597-02 standardına uygundur. Deneylerin yapılışı esnasında ultrases geçiş sürelerinin okumaları en az 2 kez tekrar edilmiş ve ultrases geçiş süreleri mikro saniye (10^{-6} saniye) duyarlılığında bir otomatik cihaz yardımıyla okunmuştur.



Şekil 4.4. Ultrases geçiş süresi deney cihazı.

4.4.2.4. Basınç dayanımı deneyi

Sırasıyla 7 ve 28 gün sonra numuneler öncelikle sertleşmiş birim ağırlık deneyleri uygulanmış ve daha sonra ise ultrases geçiş süresi deney cihazı ile ses dalgalarının geçiş süresi bulunup hızları hesap edilmiştir. Bu deneyler tamamlandıktan sonra basınç dayanım deneylerine geçilmiştir. 40x40x160 mm ölçülere sahip geopolimer numunelerden 40x40x yaklaşık 80 mm ölçülerine sahip iki adet numune elde edilerek dayanım deneylerine başlanmıştır. Deneyler; 2000 kN kapasiteli beton deney presi, hidrolik üniteleri ile birlikte TS EN 12390-3, 12390-4 ve ASTM C39 BS 1881 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Numune ölçülerinin birbirinden farklı olması nedeniyle belirli yüzey alanı oluşturmak amacıyla harçların pürüzsüz yüzeyleri ile hidrolik pres yüzeyleri arasında 40x40 mm ölçülerinde çelik plakalar yerleştirilmiştir. Bu plakalar arasında yerleştirilen harç numuneler beton presi altında yaklaşık 0.3 MPa/sn bir hızda yüklenerek kırılması beklenmiş ve kırılma işlemi tamamlandıktan sonra kırılma yükleri belirlenmiştir. Kırılma yükleri belirlendikten sonra yüzey alana bölünerek (40x40 mm) basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Farklı oranlarda PFA içeren ve farklı kür sıcaklığı uygulanan her tip numuneden 6 adet hazırlanmıştır. Bu 4 adet numuneden her bir PFA, her bir su içeriği ve her bir sıcaklık kürü için üretilen 12 adet numuneye basınç dayanım deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak o tip numune için basınç dayanımı saptanmıştır.

4.4.3. Mikro yapı analizi

Farklı oranlarda PFA içeren geopolimer harç numunelerin farklı tipte sıcaklık kürlerinin altında harcın içyapısında ne gibi değişikliklere neden olduğunu saptamak amacıyla içyapı ve mikro yapı analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda X-Işını Kırınım incelemesi (XRD) ile Taramalı Elektron Mikroskobu incelemesi (SEM) yapılmış olup daha sonra elde edilen veriler analiz edilerek değerlendirilmiştir. Tüm içyapı ve mikro yapı analizleri (XRD, SEM vb.) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı ile Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında yapılmıştır.

4.4.3.1. X-ışını difraktometresi (XRD)

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz yöntemi, analiz sırasında numuneye hasar vermez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. XRD yöntemi ile toz, katı ve ince film şeklindeki fazlar, fazların miktarı, kristal boyutu, latis parametreleri, yapıdaki değişimler, kristal yönlenmesi ve atom pozisyonları hakkında çeşitli analizler yapılabilir. XRD analizlerinde genellikle dalgaboyu olarak $1\text{ }^{\circ}\text{A}$ kullanılmaktadır. Bunun nedeni; kristal yapılardaki kafes boşluklarının genişliğinin yaklaşık olarak bu değerde olmasıdır.

XRD analiz çalışması kapsamında toplamda ilk etapta farklı oranda PFA içeren, farklı oranda su içeriğine sahip ve farklı sıcaklık kğrleri uygulanan 18 adet harç numunenin analizi yapılmıştır. Öncelikle numunelerin yeterli sayıda kristalin ve kristal yönlenmelerinin analize dahil edilmesi ve doğru sonuçların elde edilebilmesi için öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Cu, K α radyasyonu kullanılarak, 45 kV, 40 mA, 10-80 $^{\circ}$ aralığında, 2 θ pozisyonunda, 0.08 adım hızında Panalytical Empyrean marka cihazla yapılmıştır. Ardından toz haldeki numune cihaz numune tutucuya konularak her bir numune tipi için 5 dakika ölçüm yapılmıştır. Numune ölçümleri tamamlandıktan sonra elde edilen veriler dijital ortama aktarılarak ve HighScore Plus™ programı ile kütüphane taraması yapılarak fazlar belirlenmiş; grafikler elde edilerek analizler yapılmıştır.

4.4.3.2. Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili dedektörlerce toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir. SEM’de (taramalı elektron mikroskobu) görüntü meydana getirmek için daha çok, elektron demeti tarafından uyarılmış numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan (SE) yararlanılır. Harç numunenin farklı bölgelerinden kopan ikincil elektronların sayısındaki değişme ile öncelikle demetin yüzeye temas açısına, yani yüzeyin topografisine bağlıdır. İkincil elektronlar ile birlikte geri saçılan elektronlar (BSE), karakteristik X-ışınları, ışık (elektron demeti), numune akımı ve aktarılan elektronlarla da geopolimer harç numuneden çeşitli sinyaller elde edilerek amaca uygun topografi ve kompozisyon analizleri yapılır.

SEM analizleri kapsamında topografi, morfoloji, şekil, boyut ve bileşim yapıları hakkında detaylı bilgiye ulaşmak mümkündür. Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi Elektron Mikroskopi Hizmet Birimi kapsamındaki SEM numune hazırlama laboratuvarlarında bulunan Hitachi Regulus 8230 FE-SEM Cihazı ve JEOL JSM 5600 ile biyolojik numuneler başta olmak üzere aerogel, hidrojel gibi polimerik ve çeşitli malzemelerin kurutularak SEM görüntülemelerinin yapılması sağlanmaktadır. Ayrıca, SEM görüntülemesi istenen iletken olmayan numunelerin farklı özellikte kaplama cihazı ile istenilen kaplama kalınlıklarında altın/paladyum (Au/Pd) ve/veya karbon (C) ile kaplanabilmektedir.

Bu kapsamda ilk olarak cihazın numune tutucusuna sığacak şekilde var olan numunelerden yaklaşık 5x5 mm ölçülerinde olmak üzere bütün (bulk) numuneler temin edilmiştir. Numuneler karbon bant ile numune tutucuya yapıştırıldıktan sonra numuneler platin ile kaplanmıştır. Geopolimer harç numuneler daha sonra numune odasına yerleştirilerek cihazın kapağı kapatılmış ve numune odasına numune ile etkileşime girmeyen azot gazı verilerek vakumlu bir ortam oluşturulmuştur. Analiz ortamı hazırlandıktan sonra geopolimer harç numunelerin analiz yapılarak çeşitli yakınlaştırma oranlarında fotoğraflar çekilerek kayıt altına alınmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

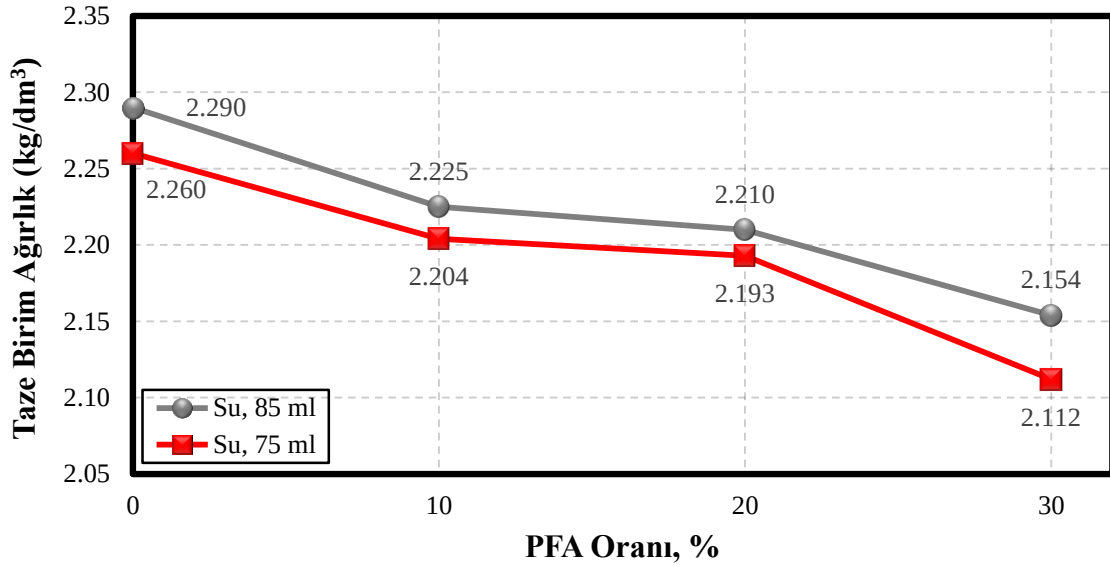
Bir şeker fabrikası atığı olan PFA, bir kömür termik santrali atığı olan UK ve Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile elde edilen geopolimer harç karışımların taze ve sertleşmiş harç olarak bazı mekanik, fiziksel davranışları incelenmiş ve irdelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ulaşılan tüm veriler üzerinde gerekli hesaplamalar yapılarak gerek çizelgeler gerek grafikler çizilerek analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte içyapının incelenmesi kapsamında XRD yöntemi ile grafikler çizilmiş ve SEM uygulaması ile detaylı resimler çekilmiştir. Ayrıca sürdürülebilirlik analizleri de yapılarak elde edilen geopolimer harç numunelerin çimento üretimi ve kullanımının sürdürülebilirliği ile karşılaştırılmıştır. Bahsi geçen tüm deneysel uygulamalar her bir PFA oranı ve her bir sıcaklık kürü için yapılarak değerlendirilmiş ve analizleri yapılmıştır.

5.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen geopolimer harç numunelerinin taze halde yapılan taze birim ağırlık, yayılma ve priz süresi deneyleri sonucu ulaşılan veriler incelenerek analiz edilmiş ve ayrıntılı değerlendirmesi aşağıda yapılmıştır.

5.1.1. PFA oranının taze birim ağırlığa etkisinin değerlendirilmesi

Tüm numunelerin taze birim ağırlıklarının belirlenmesi aşamasında her tip deneyin uygulanabilmesi için toplamda 216 adet taze harç numunenin taze halde iken ağırlıkları tartılmıştır. Bu 216 adet taze harç numunesinin 72 adedi %10 oranında, 72 adedi %20 oranında ve diğer 72 adedi ise %30 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerdir. Bu verilerin ortalaması alınarak taze birim ağırlıkların PFA içeriğine göre değişimleri grafiklerde toplanmıştır. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında numunelerdeki PFA oranının artması ile taze birim ağırlığın azaldığı belirlenmiştir. Kendi içerisinde aynı oranda PFA oranı içerip farklı oranda su içeriğine sahip numunelerde; numune içeriğindeki su miktarının azalması ile taze birim ağırlığın da azaldığı gözlemlenmiştir. Grafiklerde, aynı oranlarda PFA içeren ve farklı oranlarda su içeriğine sahip numuneler ayrı kodlandırılarak gösterilmiştir.

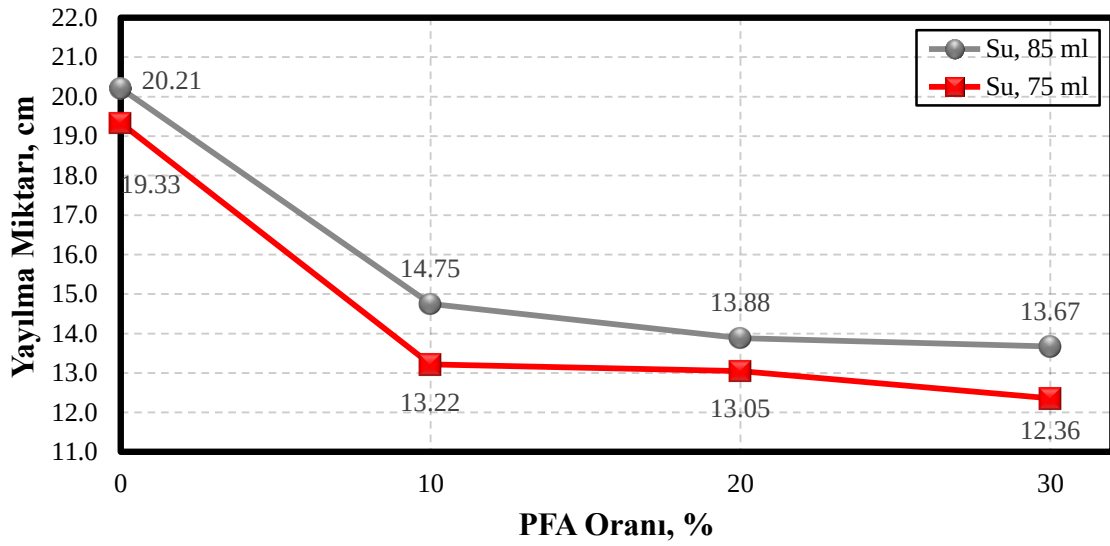


Şekil 5.1. Taze birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere geopolimer harçlardaki taze birim ağırlığın değişiminin; PFA’nın numune içerisindeki miktarı ile ters orantılı bir şekilde olduğu saptanmıştır. Aynı oranda su içeriğine, farklı oranlarda PFA ve UK içeriğine sahip numunelerde PFA oranının artması ile taze birim ağırlığın azaldığı belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerde en yüksek taze birim ağırlığa %100 UK içeren kontrol geopolimer harç numunelerin sahip olduğu görülmektedir. %100 UK içeren geopolimer harç numunelerde ise kendi içerisinde farklı oranlarda su içeriğine göre bir değerlendirme yapıldığı takdirde 85 ml su içeren UK harç numunelerin 75 ml su içeren UK harç numunelerine göre taze birim ağırlığın fazla olduğu saptanmıştır (2.29 kg/dm^3 , 2.26 kg/dm^3).

5.1.2. PFA oranının yayılma etkisinin değerlendirilmesi

Yayılma deneyinin TS EN 1015-3 standardına uygun olacak şekilde yapılabilmesi için yayılma tablası ve geopolimer harcın yerleştirileceği kesik huninin yağlanmış olması gerektiğinden yayılma deneyi için hazırlanmış olan taze geopolimer harç karışımların çeşitli özelliklerini değiştireceği düşünülerek yayılma deneyinde kullanılan taze geopolimer harç karışımlar diğer deneylerde kullanılmamıştır. Bu yüzden yayılma deneylerini gerçekleştirmek için ayrı taze geopolimer harç karışımlar elde edilmiştir. Bu geopolimer harç karışımlara yayılma deneyi uygulandıktan sonra ulaşılan veriler Şekil 5.2’de görüldüğü üzere grafik yardımı ile birlikte ifade edilmiştir.



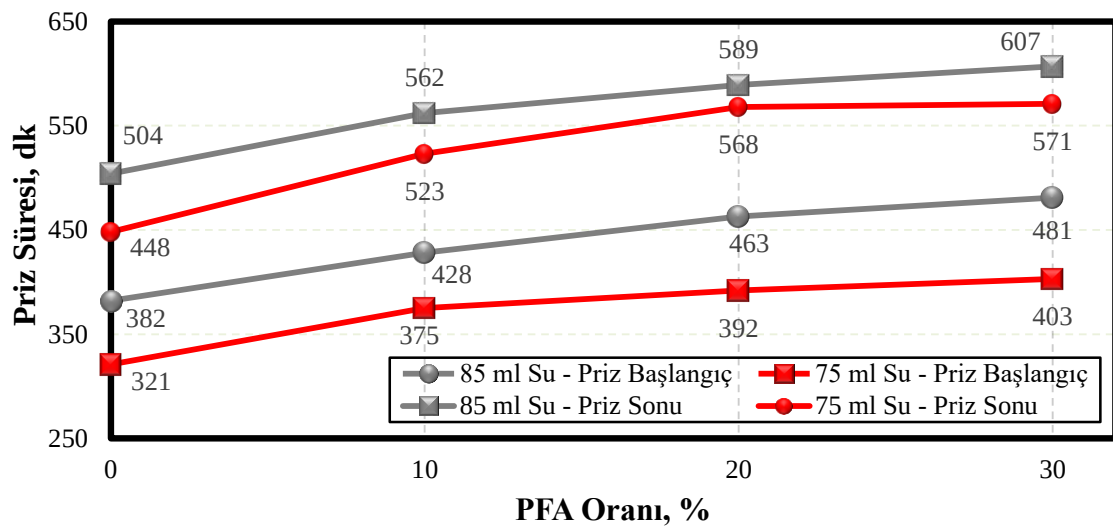
Şekil 5.2. Yayılma miktarının PFA oranı ile değişimi.

Genel olarak yayılma miktarları değerlendirildiğinde %100 UK içeren kontrol karışımlarının daha fazla yayılma miktarına sahip oldukları gözlemlenmiştir. 85 ml su içeren taze geopolimer harç karışımlarda PFA içeriğinin artması ile yayılma miktarı ve işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. 75 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımlarda da 85 ml su içeriğine sahip numunelerde olduğu üzere PFA içeriğinin artması ile yayılma miktarı ve işlenebilirliğin azaldığı saptanmıştır. 75 ml ve 85 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımların yayılma miktarları karşılaştırıldığında ise beklenildiği üzere 85 ml su içeriğine sahip olan taze geopolimer harç karışımlarının yayılma miktarının daha fazla olduğu görülmüştür. 85 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımlarda sırasıyla %10, %20 ve %30 PFA içeriğine sahip karışımların, 75 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımlara göre yayılma miktarı sırasıyla %12, %6 ve %10.5 daha fazladır. 85 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımlarda; %10 oranında PFA içeren karışımların %30 PFA içeren karışımlara göre yayılma miktarının %7 kadar fazla olduğu bu yayılma miktarının 75 ml su içeriğine sahip taze geopolimer harç karışımlarda; %10 oranında PFA içeren karışımların %30 PFA içeren karışımlara göre yayılma miktarının ise yine 7% kadar fazla olduğu belirlenmiştir. Farklı su içeriğine sahip ve aynı UK içeriğine sahip olan kontrol karışımları ile PFA içeren taze geopolimer harç karışımları karşılaştırıldığında kontrol karışımlarına göre PFA içeren taze geopolimer harç karışımların yayılma miktarının yaklaşık %15 daha az olduğu görülmüştür.

Böylelikle taze geopolimer harç karışımlarda su/bağlayıcı oranının azalması, UK içeriğinin azalması ve PFA içeriğinin artması ile işlenebilirliğin daha zor bir hale geldiği yayılma miktarının azalmasından anlaşılmaktadır. Taze geopolimer harç karışımlarda taze birim hacim ağırlığının azalması ile yayılma miktarlarının da azaldığı saptanmıştır. Yayılma miktarındaki azalmanın, su içeriği ile birlikte UK ve PFA'nın karışımından elde edilen geopolimer harçların taze birim hacim ağırlıklarının %100 UK içeren kontrol karışımlarına göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.1.3. PFA oranının priz süresine etkisinin değerlendirilmesi

Üretilen geopolimer harç karışımların priz süresi deneyleri TS EN 480-2 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Düşük oranda Ca içeren UK'dan elde edilen geopolimer harç karışımların priz başlangıç ve sonu sürelerinin geciktiği belirlenmiştir. UK, genel olarak reaksiyona girebilmek için hidrasyon ürünlerinin ortaya çıkmasını bekler. Bu durum priz sürecini geciktirir. Priz alma süreleri değerlendirildiğinde F sınıfı UK ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$, $\text{CaO} < \%10$), C sınıfı UK'ya ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$, $\text{CaO} > \%10$) göre daha fazla bir gecikme etkisi olduğu saptanmıştır. Şekil 5.3'te karışımlarda atık oranının artması ile priz başlangıç ve priz sonu süreleri görülmektedir. Atık oranının artması ile priz başlangıç ve sonu sürelerinde bir artma olduğu görülmüş, aynı oranda atığa sahip karışımların su içeriği arttıkça priz sürelerinin de arttığı belirlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Priz süresinin PFA oranı ile değişimi.

5.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

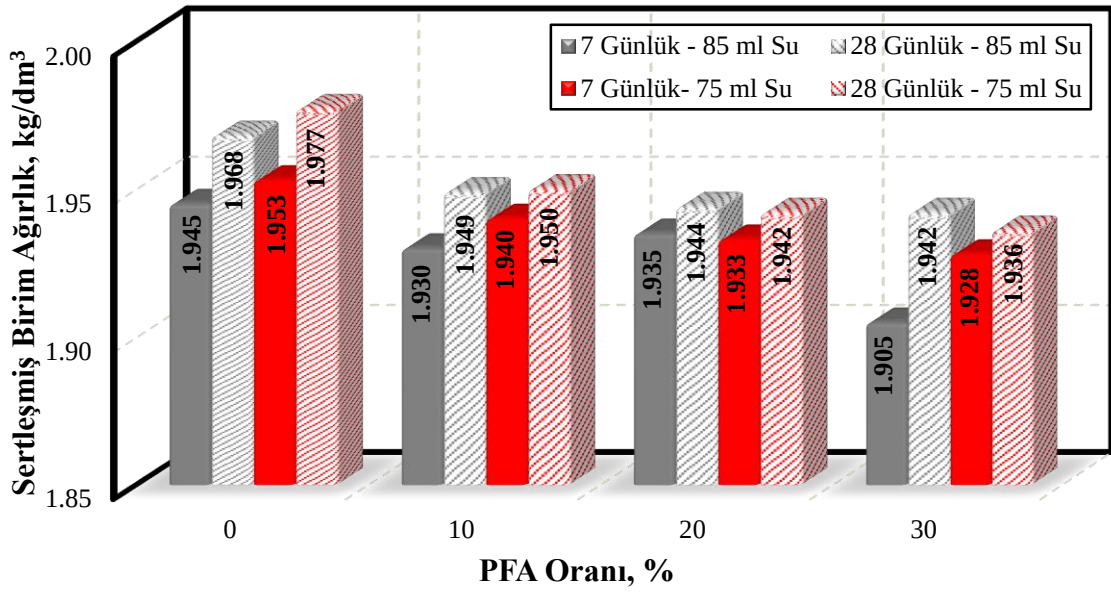
Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen geopolimer harç numunelerin sertleşmiş halde yapılan sertleşmiş birim ağırlık, kılcal su emme, ultrases geçiş süresi, basınç dayanım deneyleri sonucunda ulaşılan veriler incelenerek; analizleri yapılmış ve ayrıntılı bir şekilde değerlendirmesi aşağıda yapılmıştır.

5.2.1. Sertleşmiş Harç Deneylerinde PFA Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu başlık altında yapılan sertleşmiş geopolimer harç deneylerinde numunelerin içeriğindeki PFA oranına göre elde edilen sertleşmiş birim ağırlık, kılcal su emme, ultra ses geçiş süresi, basınç dayanım değerleri grafikler yardımıyla ifade edilerek değerlendirilmiştir.

5.2.1.1. PFA oranının sertleşmiş birim ağırlığa etkisinin değerlendirilmesi

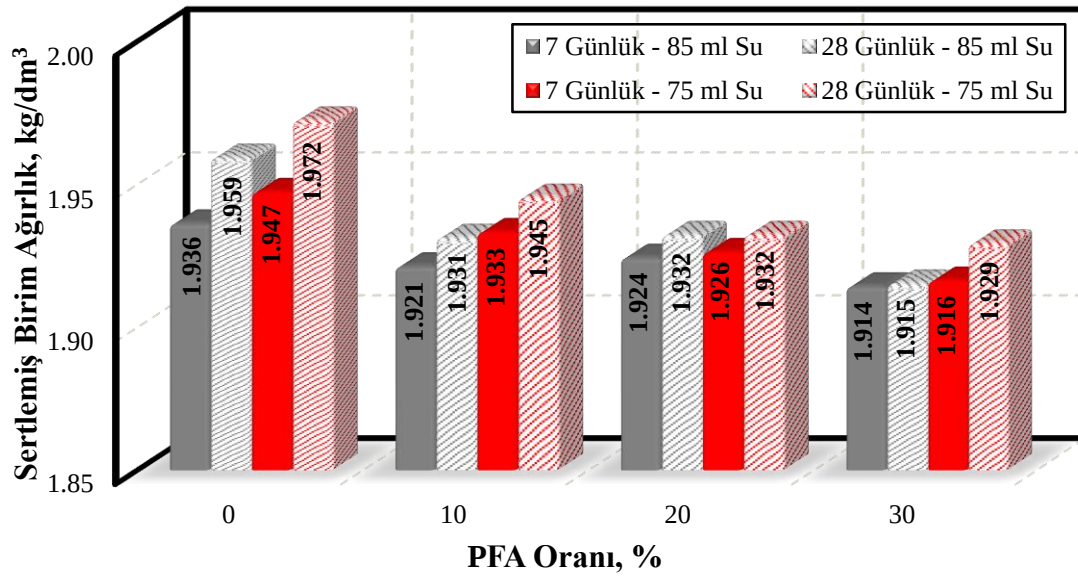
Sertleşmiş birim ağırlıkların belirlenmesi aşamasında farklı PFA içeriği ve farklı su içeriğine sahip farklı tipte sıcaklık kürü uygulanmış 7 ve 28 günlük geopolimer harç numuneler elde edilmiştir. Her bir PFA içeriği, her bir su içeriği ve her bir kür sıcaklığı tipi için 7 ve 28 günlük deneylerde kullanılmak üzere toplamda 216 adet geopolimer harç numune üretilmiş; her bir PFA içeriğinin sertleşmiş birim ağırlığa etkisinin değerlendirilebilmesi için 7 ve 28 günlük olmak üzere her bir kür sıcaklığı tipi için toplamda 6 adet veri elde edilmiştir. Bu verilerin aritmetik ortalaması alınarak sertleşmiş birim ağırlıkların PFA içeriğine göre değişimleri grafikte toplanarak ifade edilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığında geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması ile genel anlamda sertleşmiş birim ağırlığın azaldığı grafiklerde görülmektedir. Aynı tip geopolimer harç numunelerdeki su içeriğinin azalması basınç dayanım değerlerinden de anlaşılacağı üzere genel anlamda sertleşmiş birim ağırlığın artması yönünde bir katkı sağlamıştır. Bu duruma, sadece 7 günlük geopolimer harç numuneler için değil 28 günlük geopolimer harç numuneler içinde geçerli olduğu yapılan deneyler sonucu ulaşılmıştır. Yalnız bu değerlendirmeler yapılır iken sadece PFA veya geopolimer harç karışımında kullanılan suyun içeriği değil geopolimer harç numunelere uygulanan farklı sıcaklık kür tipleri de dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.4. 120 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.

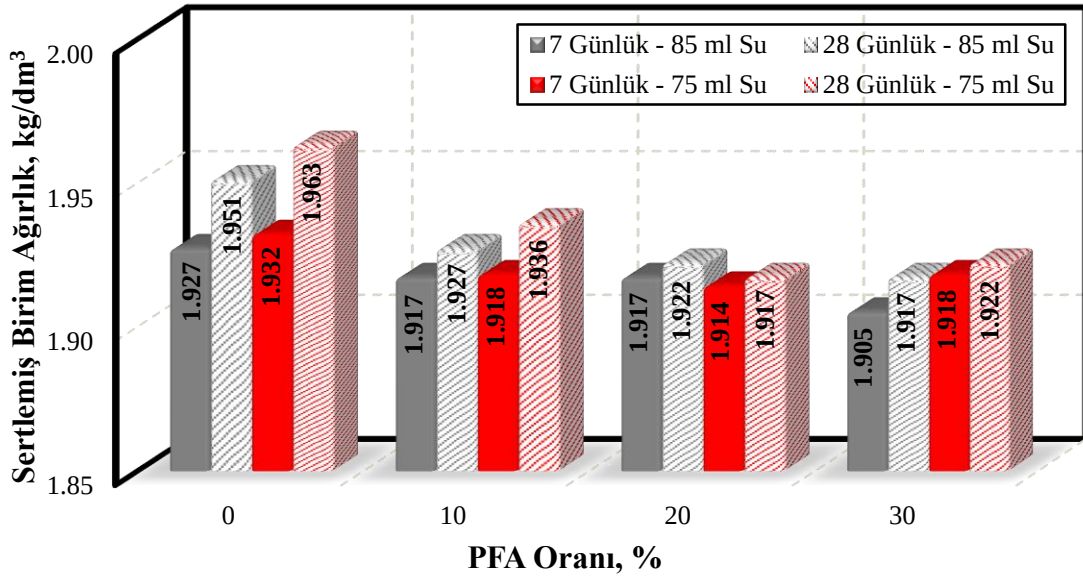
Farklı oranlarda PFA ve su içeren geopolimer harç numuneler, 24 saat süresince laboratuvar koşullarında hava kürü uygulandıktan hemen sonra etüve alınarak 120 °C sıcaklıkta 72 saat süresince sıcaklık kürü uygulanmıştır. 7 günlük %100 oranında UK ile elde edilen kontrol geopolimer harç numunelerin 85 ml ve 75 ml su içeren tiplerinin sertleşmiş birim hacim ağırlığı, sırasıyla 1.945 kg/dm³ ve 1.953 kg/dm³ olarak belirlenmiştir. Kontrol geopolimer harç numuneleri de dahil olmak üzere 28 günlük geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlığının 7 günlük geopolimer harç numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. PFA oranına göre bir değerlendirme yapıldığı takdirde 75 ml su içeriğine sahip olan 7 günlük geopolimer harç numuneler içerisinde %20 PFA içeren geopolimer harç numunelerin en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değerine (1.940 kg/dm³) sahip olduğu Şekil 5.4'de ifade edilmiştir. 28 günlük geopolimer harç numuneler arasında ise %10 PFA ve 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin en yüksek sertleşmiş birim ağırlık değerine (1.950 kg/dm³) sahip olduğu saptanmıştır. PFA'nın artması ile geopolimer harç numunelerin su içeriği fark etmeksizin genel olarak sertleşmiş birim ağırlığın azalması atığın boşluklu bir yapısal özellik göstermesinden dolayı olacağı şeklinde düşünülmektedir. Şekil 5.4'te de görüldüğü üzere en düşük sertleşmiş birim ağırlığa 220 ml Na₂SiO₃ ile aktive edilmiş %70 UK, %30 PFA ve 85 ml su içeriği ile elde edilen 7 günlük geopolimer harç numunelerin sahip olduğu görülmektedir (1.905 kg/dm³).

Sırasıyla %10, %20 ve %30 PFA ve 75 ml ile 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numuneler taze geopolimer harç numuneler hazırlandıktan sonra 24 saat süresince laboratuvar koşullarında hava kürü uygulandıktan hemen sonra etüve alınarak 140 °C sıcaklıkta 72 saat süresince sıcaklık kürü uygulanmıştır. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında Şekil 5.5'te görüldüğü üzere geopolimer harç numunelerde PFA içeriği arttıkça 7 ve 28 günlük sertleşmiş birim ağırlığın azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.5. 140 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.

Geopolimer harç numunelerin su içeriğine göre bir karşılaştırma yapıldığında sertleşmiş birim ağırlığın, 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin 85 ml su içeriğine sahip numunelere göre daha fazla olduğu Şekil 5.5'te görülmektedir. Ayrıca bununla birlikte 28 günlük geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlıklarının 7 günlük numunelere göre fazla olduğu da belirlenmiştir. %100 UK içeren kontrol geopolimer harç numunelerin haricinde en yüksek sertleşmiş birim hacim ağırlığa 28 günlük %10 PFA ve 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin olduğu saptanmıştır (1.945 kg/dm³). En düşük sertleşmiş birim ağırlığa ise 7 günlük %30 PFA ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin olduğu görülmüştür. Sertleşmiş birim ağırlığın 28 günlük 85 ml su içeren geopolimer harç numunelerin de 28 günlük kontrol geopolimer harç numunelerine göre ise bu oranın ortalama %1.73 daha az olduğu görülmüştür. En düşük sertleşmiş birim ağırlık ise 7 günlük %30 PFA ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde saptanmıştır.



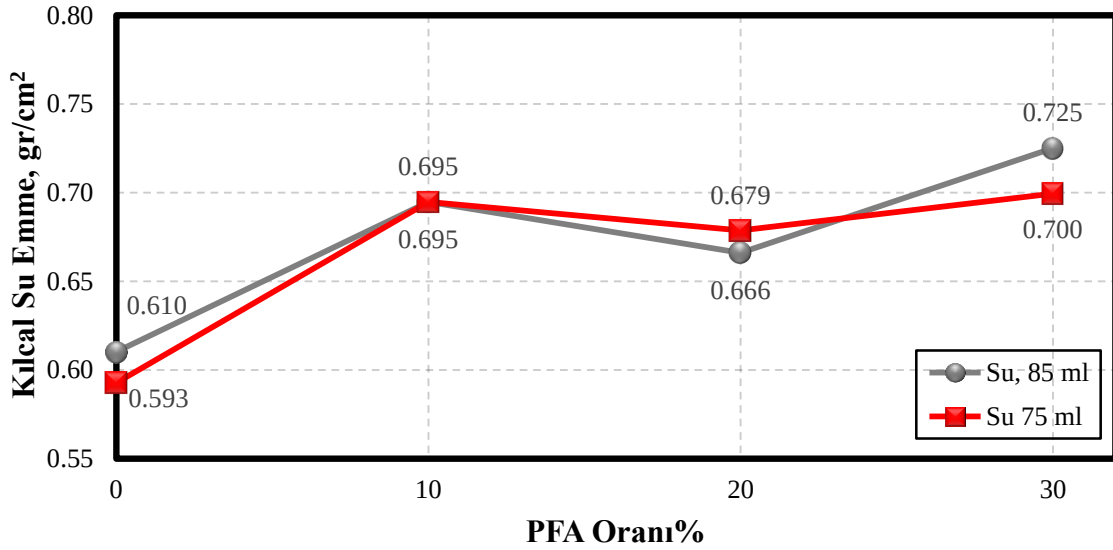
Şekil 5.6. 160 °C kür sıcaklığında sertleşmiş birim ağırlığın PFA oranı ile değişimi.

Farklı oranlarda PFA ve su içeren geopolimer harç numuneler 24 saat laboratuvar ortamında 24 saat süresince hava kürü uygulamasından sonra 72 saat süresince 160 °C sıcaklık kürü uygulanmıştır. Geopolimer harç numuneler yapısında PFA içeriğinin artması ile sertleşmiş birim ağırlığın da azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kür ortamında sıcaklık artışı da geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlığını olumsuz yönde etkileyerek değerlerin azalmasına neden olmuştur. Şekil 5.6'da ifade edildiği üzere PFA içeren geopolimer harç numuneler arasında en yüksek sertleşmiş birim ağırlık 28 günlük 75 ml su ve %10 PFA'ya sahip geopolimer harç numunelerde gözlemlenmiştir (1.936 kg/dm³). Sertleşmiş birim ağırlığın 7 günlük 85 ml su içeren geopolimer harç numunelerin yine 7 günlük kontrol geopolimer harç numunelerine göre ortalama %0.5 daha az olduğu belirlenmiş, 28 günlük 85 ml su içeren geopolimer harç numunelerin de 28 günlük kontrol geopolimer harç numunelerine göre ise bu oranın ortalama %1.50 daha az olduğu görülmüştür. 160 °C sıcaklık kürü uygulanmış geopolimer harç numunelerde en düşük sertleşmiş birim ağırlık ise 7 günlük %30 PFA ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde saptanmıştır.

Sertleşmiş birim ağırlıklar üzerine bir değerlendirme yapıldığında geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması genel olarak sertleşmiş birim ağırlığın azalması yönünde bir eğilimi, geopolimer harç numunelerde su içeriğinin azalması ile sertleşmiş birim ağırlığının artması yönünde bir eğilimi ortaya çıkardığı belirlenmiştir.

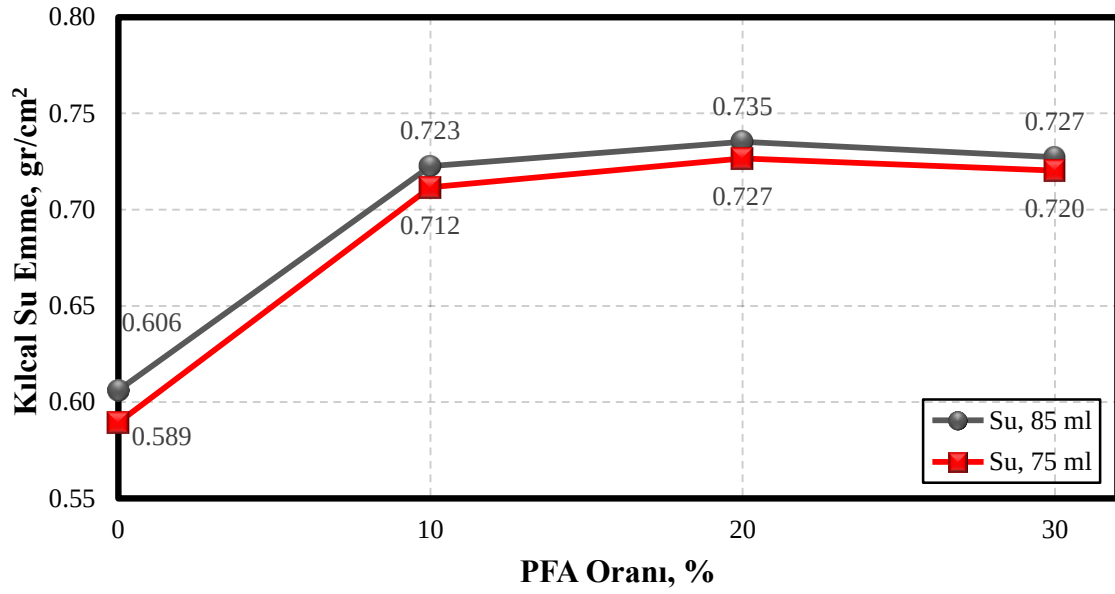
5.2.1.2. PFA oranının kılcal su emme etkisinin değerlendirilmesi

Kılcal su emme değerine ulaşmadan önce geopolimer harç numuneler 24 saat süresince laboratuvar koşullarında 72 saat süresince de sonra farklı sıcaklık kür tipleri uygulandıktan sonra kalıptan alınmış ve toplamda 28 gün süresini tamamlayacak şekilde kapalı ortamda ($(20 \pm 2$ °C'de ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem) kür uygulanmıştır. 28 gün süresince kapalı ortamda geopolimer harç numunelere kür uygulandıktan sonra 28 gün süresince TS EN 480-5 standardına uygun olacak şekilde su ile yüzeysel temas sağlanarak 28. gün tamamlanıp kılcal su emme değerleri ve su emme yüzdeleri tartılarak hesaplanmıştır.



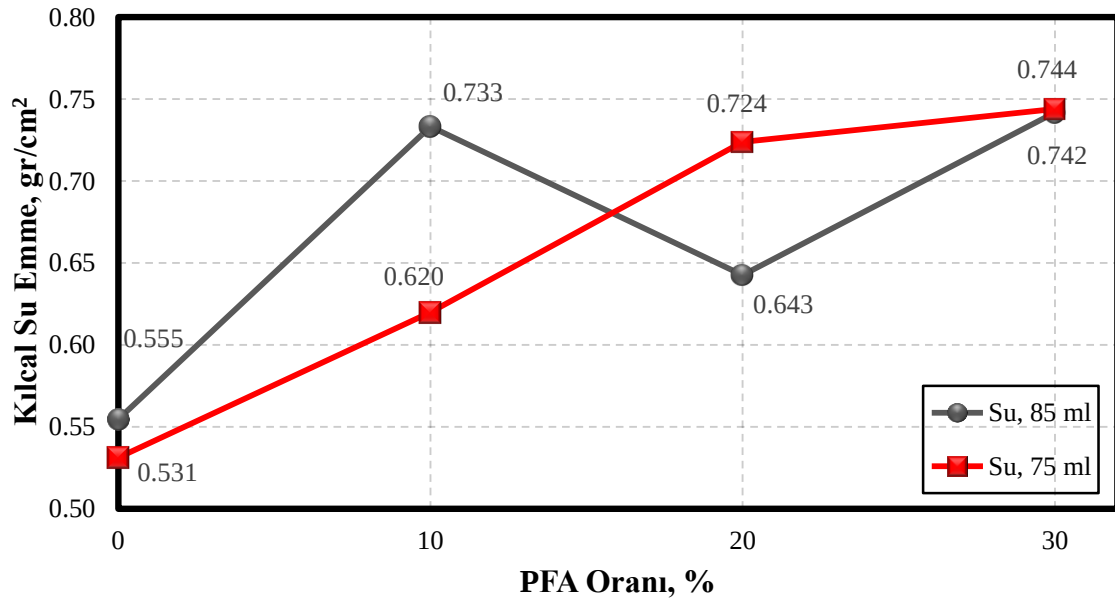
Şekil 5.7. 120 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.

120 °C sıcaklıkta 72 saat süresince kür uygulanmış farklı su ve PFA içeriğine sahip olan tüm geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su oranı fark etmeksizin; %10 ve %20 PFA içeren numunelerde kılcal su emme değerlerinde bir düşüş ancak %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde ise bir artış belirlenmiştir. Bu bağlamda %20 PFA içeren geopolimer harç numunelerden sonraki bir diğer geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması numunelerin su emme gereksiniminin arttığına işaret etmektedir. Şekil 5.7’de 85 ml su içeriğine sahip %100 UK geopolimer harç numunelerine göre 85 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin yaklaşık %18.85 daha fazla su emme değerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca 75 ml su içeriğine sahip %100 UK kontrol geopolimer harç numunelerine göre 75 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin su emme değeri yaklaşık %18.04 daha fazladır.



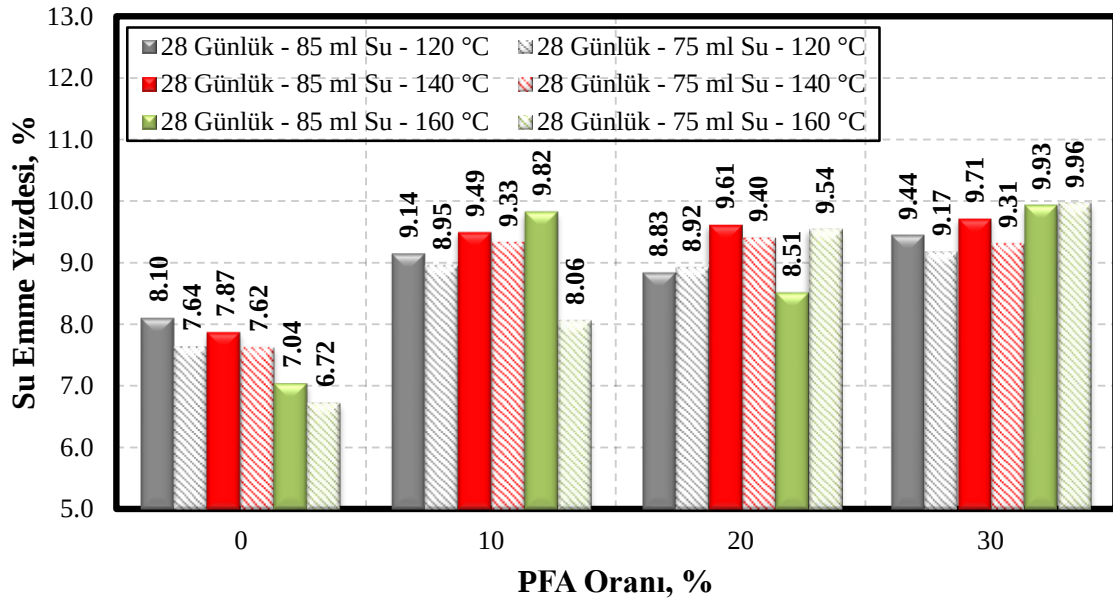
Şekil 5.8. 140 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.

Geopolimer harç numunelerin 140 °C sıcaklık kür uygulaması sonunda su içeriği fark etmeksizin %20 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin; kontrol numuneler hariç bir diğer geopolimer harç numunelere göre su emme değerlerinin fazla olduğu belirlenmiştir. En düşük su emme değerine (0.712 gr/cm²) 75 ml su ve %10 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin olduğu belirlenmiştir. En yüksek su emme değerine (0.735 gr/cm²) ise 85 ml su ve %20 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. 160 °C kür sıcaklığında su emme değerlerinin PFA oranı ile değişimi.

Bir diğer kür uygulaması olan 160 °C'lik kür tipi uygulanan kontrol geopolimer harç numunelerde su emme değerinin en az olduğu Şekil 5.9'da görülmektedir. Bu su emme değerleri, diğer sıcaklıklarda kür uygulanan geopolimer harç numunelere göre de oldukça düşüktür. En yüksek su emme değerine ise 75 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin olduğu belirlenmiştir (0.744 gr/cm²). Bu numunenin, 75 ml su içeriğine sahip kontrol harç numunesine göre %40 daha fazla su emme değeri olduğu da saptanmıştır.

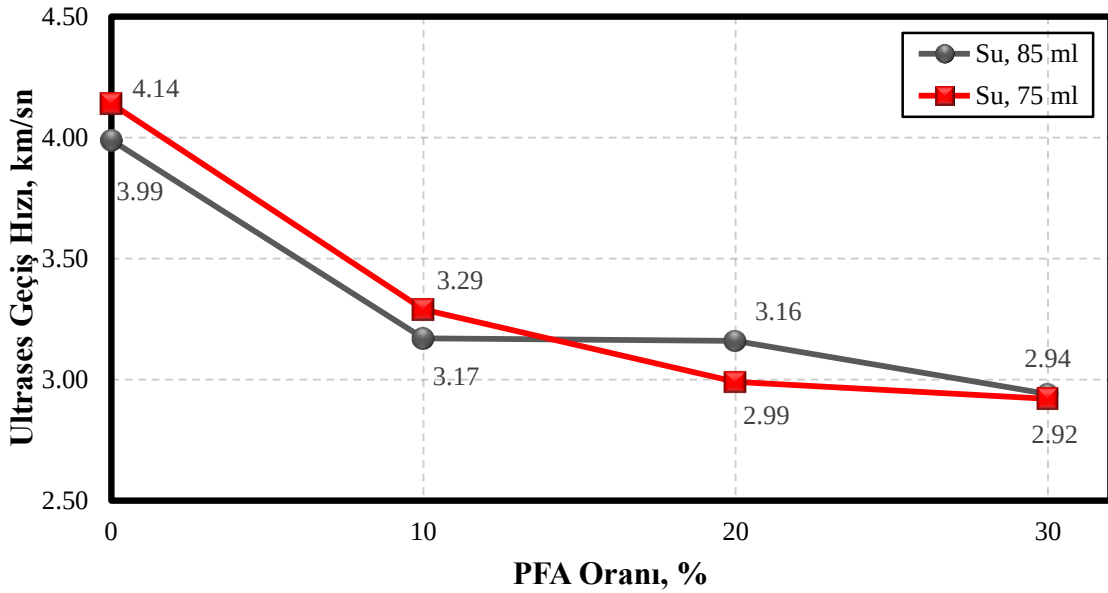


Şekil 5.10. Su emme yüzdesinin PFA oranı ile değişimi.

Şekil 5.10 incelendiğinde geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması, numunelerin su emme yüzdesini genel olarak arttırmıştır. PFA'nın birim hacim ağırlığının oldukça düşük bir değer olması (0.775 kg/dm³; 24 saat 110 °C etüv kurusu ve 75 µm elekten geçmiş) boşluklu bir içyapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması ile kılcal su emme değerleri ve su emme yüzdesi bir artış eğilimi göstermektedir. Ancak bu noktada numunelerde sadece PFA içeriğinin etkisi dışında uygulanan kür sıcaklıklarının ve numunelerdeki su içeriğinin farklı olması da göz önünde bulundurulmalıdır. Kontrol geopolimer harç numunelerinin dışında en yüksek su emme yüzdesine 28 günlük, 160 °C sıcaklık kürü uygulanmış; 75 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (%9.96). Şekil 5.10'da görüldüğü üzere kontrol geopolimer harç numunelerinin dışında en düşük su emme yüzdesine ise 28 günlük, 160 °C sıcaklık kürüne uygulanan 75 ml su ve %10 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde saptanmıştır (%8.06).

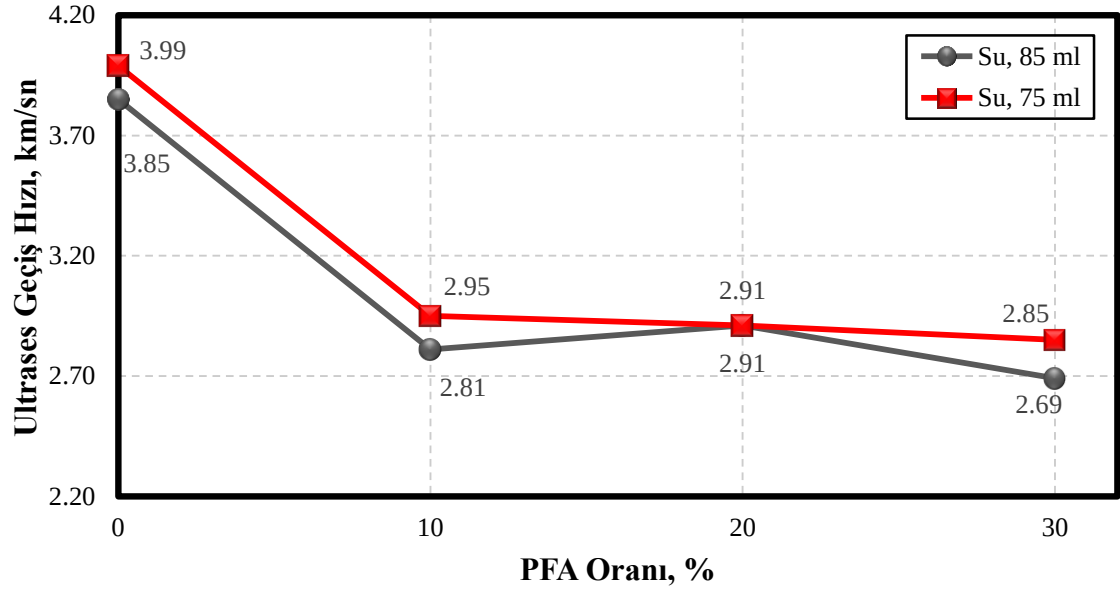
5.2.1.3. PFA oranının ultrases geçiş hızı etkisinin değerlendirilmesi

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen 28 günlük geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızlarının PFA oranı ile değişimi sıcaklık kr tipi uygulamasına göre grafiklerde gösterilmiştir. Geopolimer harç numune içeriğindeki PFA oranının artması ultrases geçiş hız değerlerinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Aynı PFA oranına ancak farklı su oranına sahip geopolimer harç numunelerde ise su oranının değişkenliği ultrases geçiş hızı değerlerini etkilediği saptanmıştır. Ultrases geçiş hızları hesaplanmadan önce geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş süreleri belirlenmiş ve belirlenen bu değerlere hız-zaman formülü uygulanarak ultrases geçiş hızları bulunmuştur.



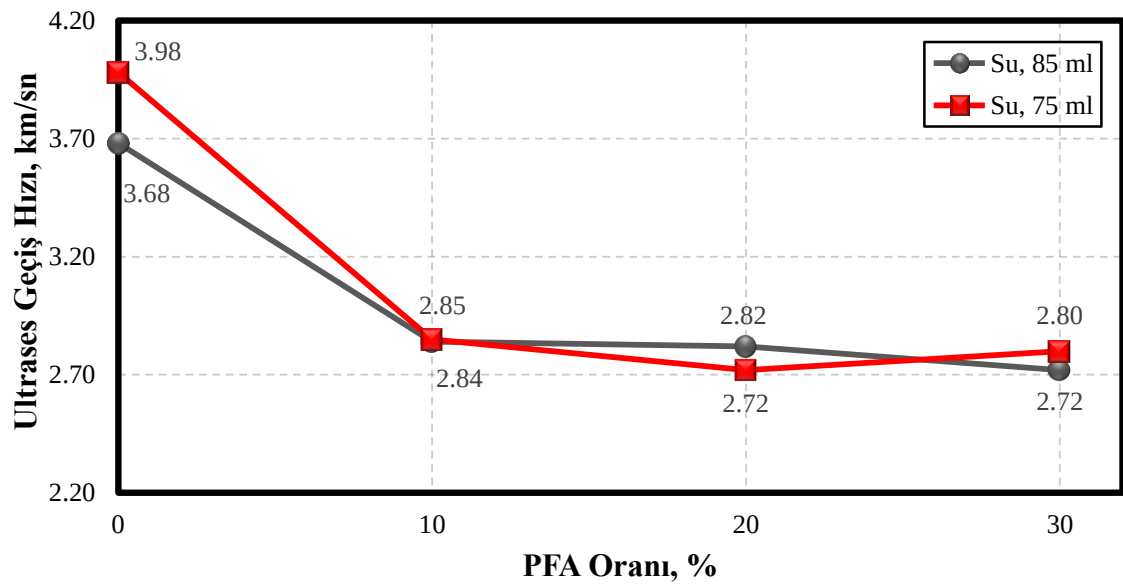
şekil 5.11. 120  C kr sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.

Laboratuvarda etüv içerisinde 72 saat süresince 120  C kür sıcaklığı uygulanan %100 UK içeren kontrol geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızları 85 ml ve 75 ml su içeriğine göre sırasıyla 3.99 km/sn ve 4.14 km/sn arasında şekil 5.11’de görüldüğü üzere bir değişkenlik göstermektedir. 75 ml su içeriği ve %10, %20 ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde; kontrol geopolimer harç numunelerine göre sırasıyla %20.53, %27.77 ve %29.47 oranlarında bir azalma seyretmiştir. 85 ml su içeriği ve %10, %20 ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numuneler ile kontrol geopolimer harç numuneleri ile karşılaştırıldığında ultrases geçiş hızında sırasıyla %20.55, %20.80 ve %26.31 oranında azalma tespit edilmiştir.



Şekil 5.12. 140 °C kür sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.

Geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su oranındaki artışın 72 saat süresince 140 °C sıcaklık kürü uygulanan geopolimer harç numunelerde ultrases geçiş hızlarını olumsuz yönde etkilediği ve azaltma yönünde bir eğilim gösterdiği Şekil 5.12’de ifade edilmiştir. Bununla birlikte en düşük ultrases geçiş hızı değerine %30 PFA içeriğine sahip olan geopolimer harç numunelerde olduğu belirlenmiştir. 75 ml su içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numunelerine göre 75 ml su içeriği ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numuneler %28.57 oranında daha az bir ultrases geçiş hızına ulaşmıştır.

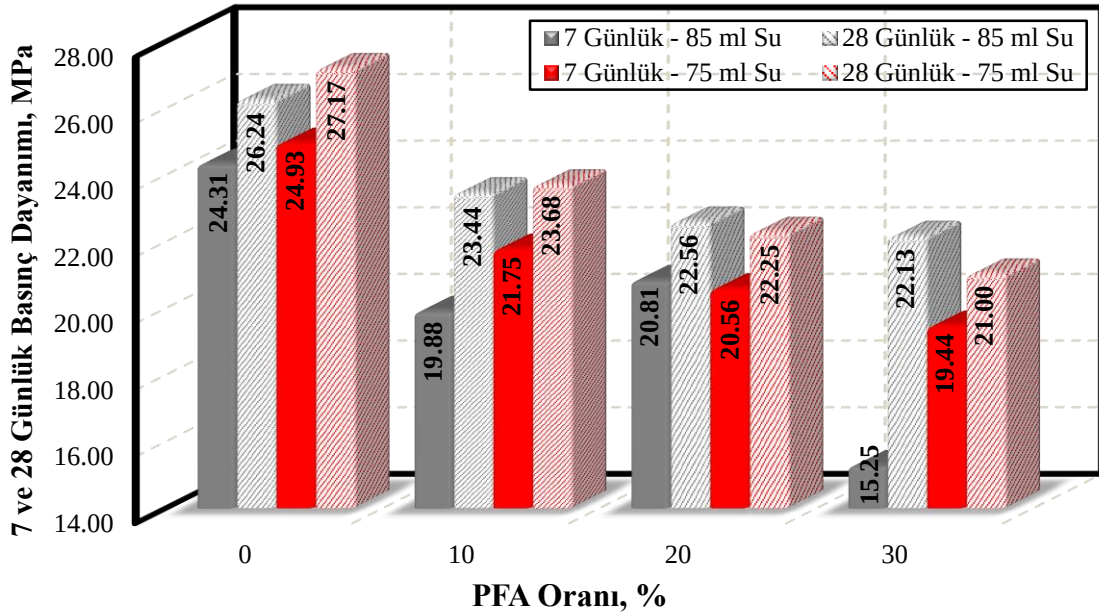


Şekil 5.13. 160 °C kür sıcaklığında ultrases geçiş hızının PFA oranı ile değişimi.

Şekil 5.13’de 72 saat süresince 160 °C kür sıcaklığı uygulanan geopolimer harç numunelerin en düşük ultrases geçiş hızlarına sahip oldukları görülmektedir. Geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su oranının artması %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde ultrases geçiş hızını azaltmıştır. PFA içermeyen kontrol geopolimer harç numuneleri hariç en yüksek ultrases geçiş hızına ise 75 ml su içeriği ve %10 PFA içeren geopolimer harç numunelerde gözlemlenmiştir (2.85 km/sn).

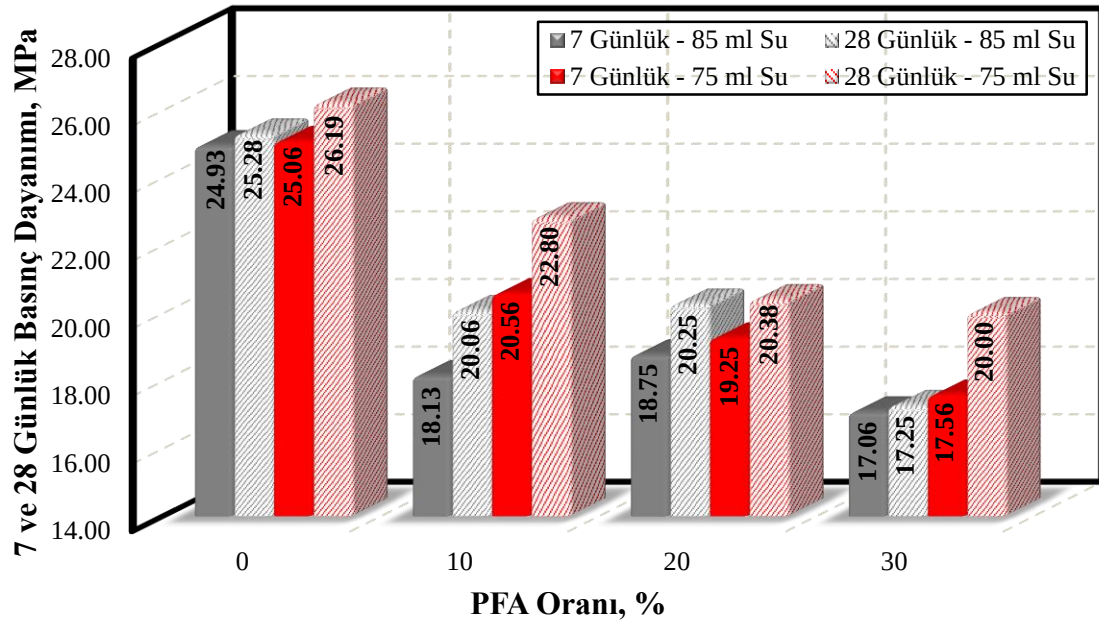
5.2.1.4. PFA oranının basınç dayanımına etkisinin değerlendirilmesi

Bu başlık altında farklı oranda su ve PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin farklı kür sıcaklıkları altındaki 7 ve 28 günlük basınç dayanımları verilmiştir.



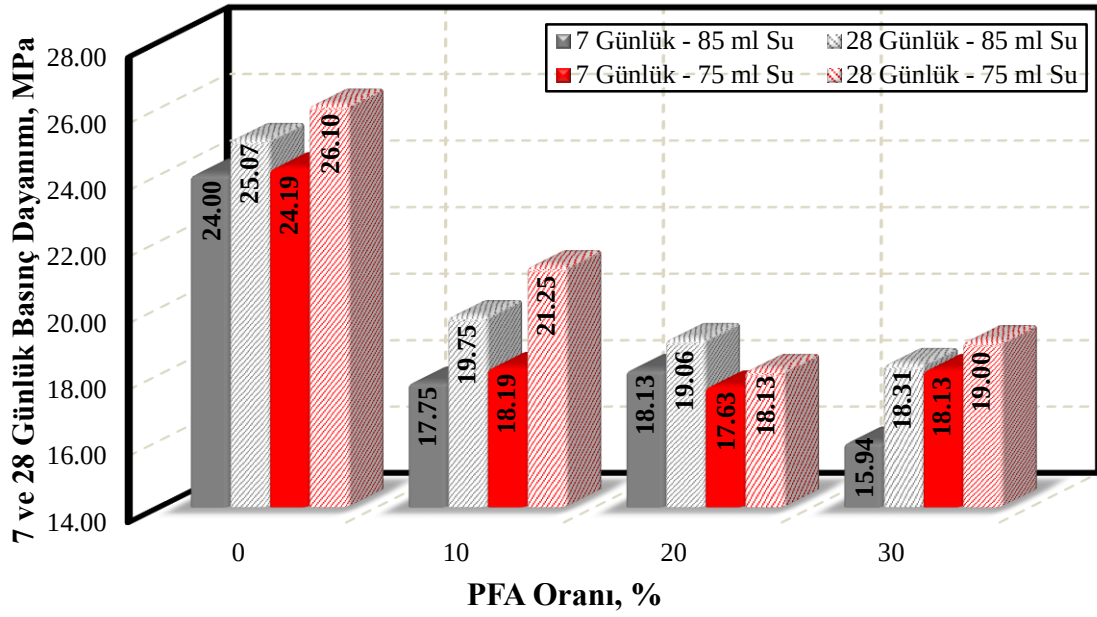
Şekil 5.14. 120 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.

Şekil 5.14’de görüldüğü üzere kontrol geopolimer harç numuneleri hariç en yüksek dayanıma 28 günlük 75 ml su ve %10 PFA içeren numunelerin sahip olduğu belirlenmiştir (23.68 MPa). En düşük dayanıma ise 7 günlük 85 ml su ve %30 PFA içeren geopolimer harç numunelerde görülmüştür (15.25 MPa). Aynı sıcaklık kürü uygulanan geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su ve PFA oranının artması ile 7 ve 28 günlük dayanımlarda azalma eğilimi olduğu belirlenmiştir. %100 UK ve 85 ml su içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numunelerine göre 85 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerinin dayanım değerlerinde %37.37 oranında dramatik bir azalma görülmektedir.



Şekil 5.15. 140 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.

Geopolimer harç numunelerin 72 saat süresince 140 °C sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Geopolimer harç numunelerde PFA içeriğinin artması dayanımlarda bir azalma eğilimi göstermesine neden olmuştur. Ayrıca geopolimer harç numunelerdeki su içeriğinin azalması numunelerin basınç dayanımlarının artması yönünde olumlu bir etki yapmıştır. Tüm geopolimer harç numunelerde kontrol geopolimer harç numuneleri de dahil olmak üzere en yüksek basınç dayanım değerlerine su içeriği daha az olan geopolimer harç numunelerde görülmüştür. Şekil 5.15'te görüldüğü üzere en yüksek basınç dayanımına 28 günlük, 75 ml su ve % 10 PFA içeren geopolimer harç numunelerin olduğu belirlenmiştir (22.80 MPa). En yüksek oranda düşüş 7 günlük, 85 ml su içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numunesinin basınç dayanımını ile 7 günlük, 85 ml su ve %30 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunesi arasında saptanmıştır (%31.56). Bu noktadan yola çıkarak geopolimer harç numunelerde su ve atık içeriğinin artması ile yapısal boşlukların arttığı böylelikle 7 ve 28 günlük sertleşmiş birim ağırlığın azaldığı ve buna paralel olarak numunelerin basınç dayanımlarının düştüğü kanaatine varılmıştır. Aynı PFA ile su içeriğine sahip ve yine aynı kür sıcaklığı uygulanan geopolimer harç numunelerin zaman içerisinde basınç dayanımı kazandığı da görülmektedir. Bununla birlikte çalışmada, geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızlarından yola çıkarak geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları üzerine bir değerlendirme yapmak mümkündür.



Şekil 5.16. 160 °C kür sıcaklığında basınç dayanımının PFA oranı ile değişimi.

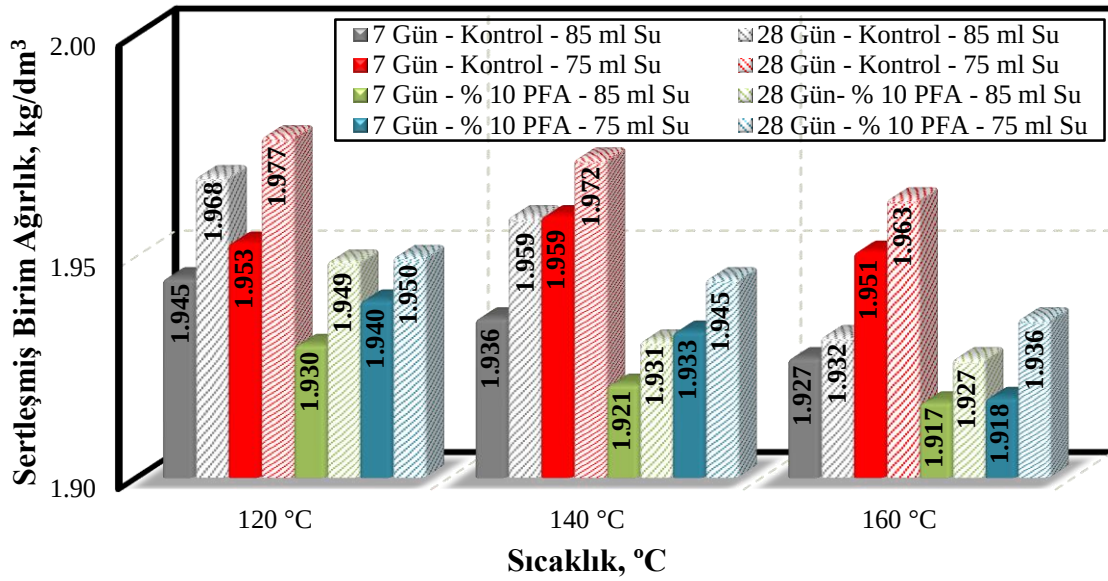
Geopolimer harç numunelerde, Şekil 5.16’da ifade edildiği üzere kontrol geopolimer harç numuneleri hariç 28 günlük en yüksek basınç dayanımına diğer sıcaklık kür tiplerinde de olduğu üzere 75 ml su ve %10 PFA içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde olduğu görülmüştür (21.25 MPa). Ancak bu sıcaklık kür tipinde en düşük basınç dayanımına ise 7 ve 28 günlük, 75 ml su ve %20 PFA içeriğine sahip olangeopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (17.63 MPa, 18.12 MPa). Ama genel eğilimin kontrol geopolimer harç numunelerine göre numunelerde PFA içeriğinin artması ile basınç dayanım değerlerinin bir azalma eğilimi yönünde olduğu belirlenmiştir.

5.2.2. Sertleşmiş Harç Deneylerinde Sıcaklık Etkisinin Değerlendirilmesi

Üretilen geopolimer harç numuneler öncelikle 24 saat süresince laboratuvar ortamında 24 saat hava kürü uygulamasından sonra sırasıyla 72 saat süresince 120 °C, 140 °C ve 160 °C gibi farklı sıcaklıklarda olmak üzere sıcaklık kürü uygulanmıştır. Kür süreleri tamamlandıktan sonra kalıptan çıkartılarak geopolimer harç numuneler 7 ve 28 günlük olmak üzere tekrar laboratuvar ortamına bırakılmıştır. Bu başlık altında geopolimer harç numunelerin sıcaklık altında sertleşmiş birim ağırlık, kılcal su emme, su emme yüzdesi, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım davranışları tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan sonra ulaşılan veriler grafikler yardımı ile ifade edilmiştir.

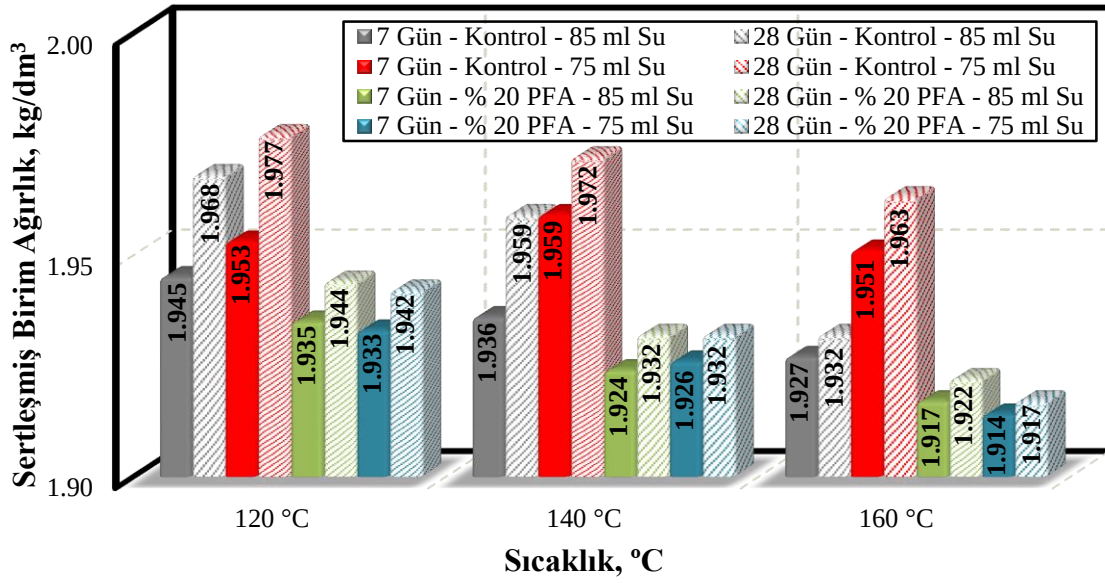
5.2.2.1. Sıcaklığın sertleşmiş birim ağırlığa etkisinin değerlendirilmesi

Belirlenen bir sıcaklıkta 72 saat kür uygulanmış 7 ve 28 günlük geopolimer harç numunelerin içeriğinde PFA'nın artması ile sertleşmiş birim ağırlıklarında azalma yönünde bir eğilim gösterdiği 5.2.2.1. başlığı altında ifade edilmiştir. Bu başlık altında ise farklı tip sıcaklıklarda kür uygulanmış ve belirlenen oranda PFA içeren 7 ve 28 günlük geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlığı üzerine davranışları irdelenmiştir.



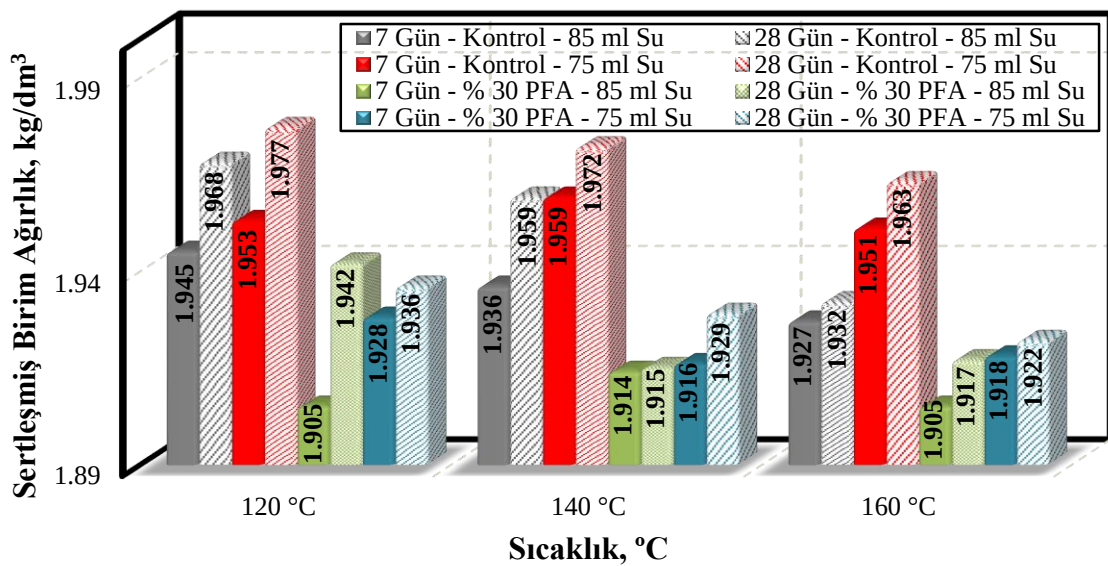
Şekil 5.17. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanmış %100 oranında UK içeren kontrol geopolimer harç numuneleri ile beraber %10 oranında PFA, 75 ml ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin 7 ve 28 günlük olmak üzere sertleşmiş birim ağırlıkları Şekil 5.17'de grafik ile ifade edilmiştir. Kontrol geopolimer harç numuneleri hariç sıcaklığın artması ile sertleşmiş birim ağırlıkların azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. En düşük sertleşmiş birim ağırlığa 7 günlük, 85 ml su içeriğine sahip ve 72 saat süresince 160 °C sıcaklık kürü uygulanan geopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (1.917 kg/dm³). Su içerikleri farklı olan geopolimer harç numuneler incelendiğinde ise 75 ml su içeriğine sahip olan geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlığının 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Geopolimer harç numuneler içeriğindeki su miktarının artması ile numunelerin sertleşmiş birim ağırlıklarının azalması yönünde bir eğilim tespit edilmiştir.



Şekil 5.18. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).

Sertleşmiş birim ağırlık değerlerinin; Şekil 5.18’de de ifade edildiği üzere %20 PFA içeren 7 ve 28 günlük geopolimer harç numunelerde de sıcaklık arttıkça sertleşmiş birim ağırlık azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. 7 günlük, 75 ml su içeriğine sahip olan kontrol geopolimer harç numunelerine göre en düşük sertleşmiş birim ağırlık değerine sahip olan 7 günlük, 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numuneler yaklaşık %2 oranında daha az bir sertleşmiş birim ağırlık değerine sahiptir.



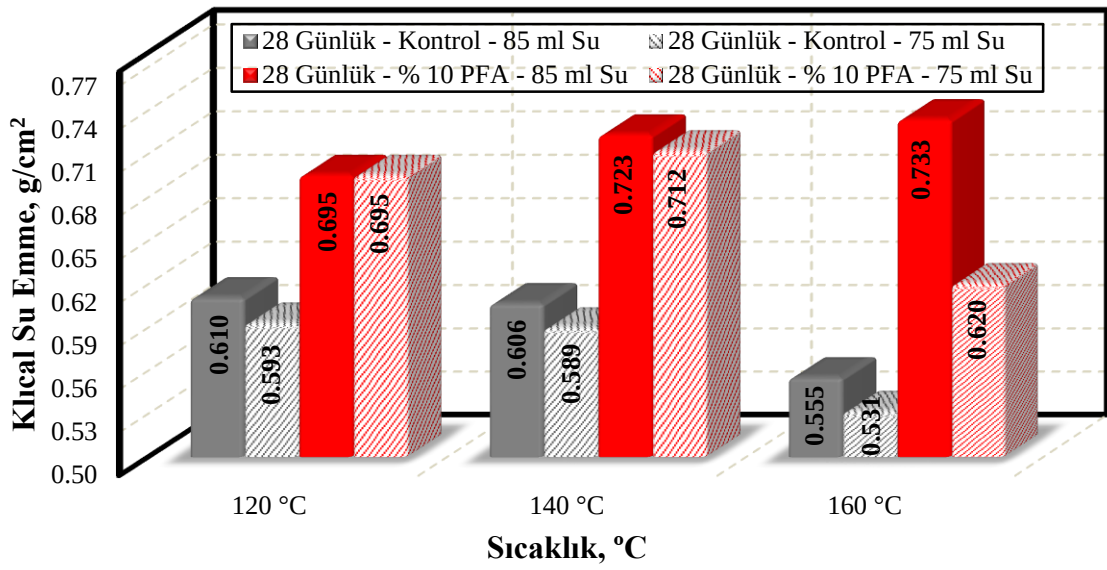
Şekil 5.19. Sertleşmiş birim ağırlığın kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).

İçeriği %30 PFA olan geopolimer harç numunelerde Şekil 5.19’da görüldüğü üzere kür sıcaklığının ve numunelerin su içeriğinin artması sertleşmiş birim ağırlığın azalma eğilimi göstermesine neden olmuştur. Ancak %30 PFA içeren numunelerde en yüksek sertleşmiş birim ağırlığa 28 günlük, 85 ml su içeriğine sahip numunelerde olduğu belirlenmiştir (1.942 kg/dm^3). Farklı tipte sıcaklık kürleri uygulanan 7 ve 28 günlük geopolimer harç numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları su oranı fark etmeksizin %10 ve %20 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerde sıcaklık artışı ile azaldığı görülmektedir. Ancak %30 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerde 7 günlük ve 85 ml su içeriğine sahip ve 140°C sıcaklık kürü uygulanan geopolimer harç numunelerin bir diğer numunelere göre %0.47 oranında fazla olduğu Şekil 5.19’de görülmektedir. Ancak 28 günlük geopolimer harç numuneler incelendiğinde en yüksek sertleşmiş birim ağırlığa 120°C sıcaklık kürü uygulanan geopolimer harç numunelerin sahip olduğu; 160°C sıcaklık kürü uygulanan numunelerin ise 140°C sıcaklık kürü uygulananlara göre sertleşmiş birim ağırlığının daha fazla olduğu fakat bu farkın da ihmal edilebilir bir fark olduğu söylenebilir.

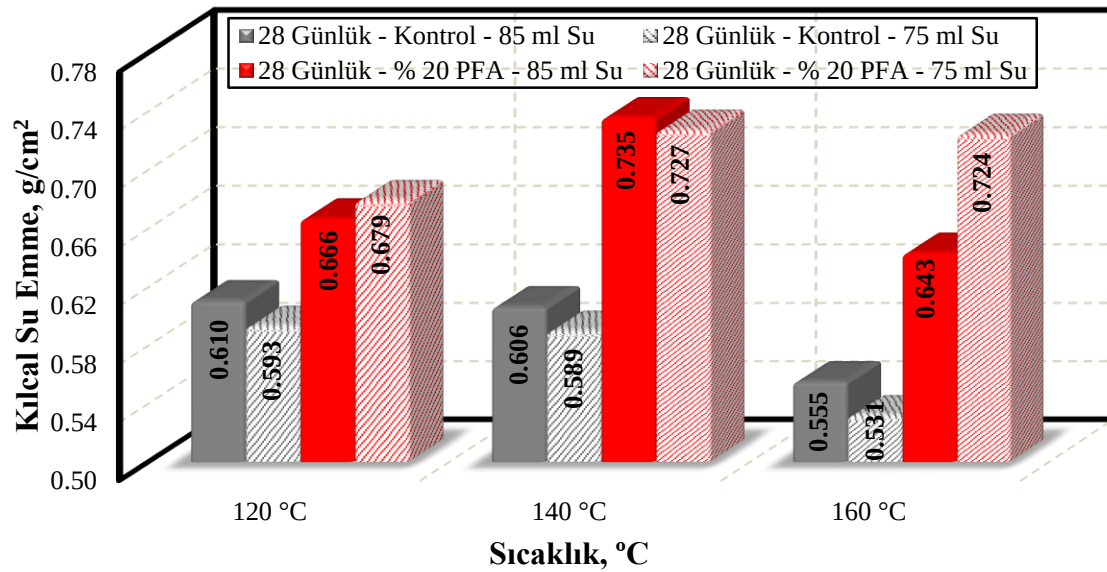
5.2.2.2. Sıcaklığın kılcal su emme değerine etkisinin değerlendirilmesi

Geopolimer harç numunelere öncelikle 24 saat süresince hava kürü uygulanmış sonra sırasıyla 120°C , 140°C ve 160°C sıcaklıklarda olmak üzere 72 saat süresince sıcaklık kürü uygulanmıştır. Etüvden alınan geopolimer harç numuneler 28 gün süresince ($(20\pm 2^\circ\text{C})$ ’de ve $(65\pm 5\%)$ belirli sıcaklığa ve neme sahip ortamda koşullandırıldıktan sonra tekrar 28 gün boyunca su ile yüzeysel temas ettirilmiştir. 28 gün süresi tamamlandıktan sonra geopolimer harç numuneler su ile yüzeysel temas ettirilen kaplardan alınarak tartım işlemi yapılarak ayrı kılcal su emme değerleri ve su emme yüzdeleri hesaplanmıştır.

İçeriğinde %10 oranında PFA ile 75 ml ve 85 ml su miktarına sahip geopolimer harç numunelerin 28 günlük kılcal su emme değerleri Şekil 5.20’de verilmiştir. En yüksek su emme değerine 160°C kür uygulanan 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (0.733 gr/cm^2). 160°C kür koşullarında 28 günlük 85 ml su içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numunelerine göre 28. günde %32.07 oranında bir artış göstermiştir. Kontrol geopolimer harç numunelerinde kür uygulamasındaki sıcaklık artışı numunelerde kılcal su emme değerlerini azaltır iken %10 oranında PFA ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir.

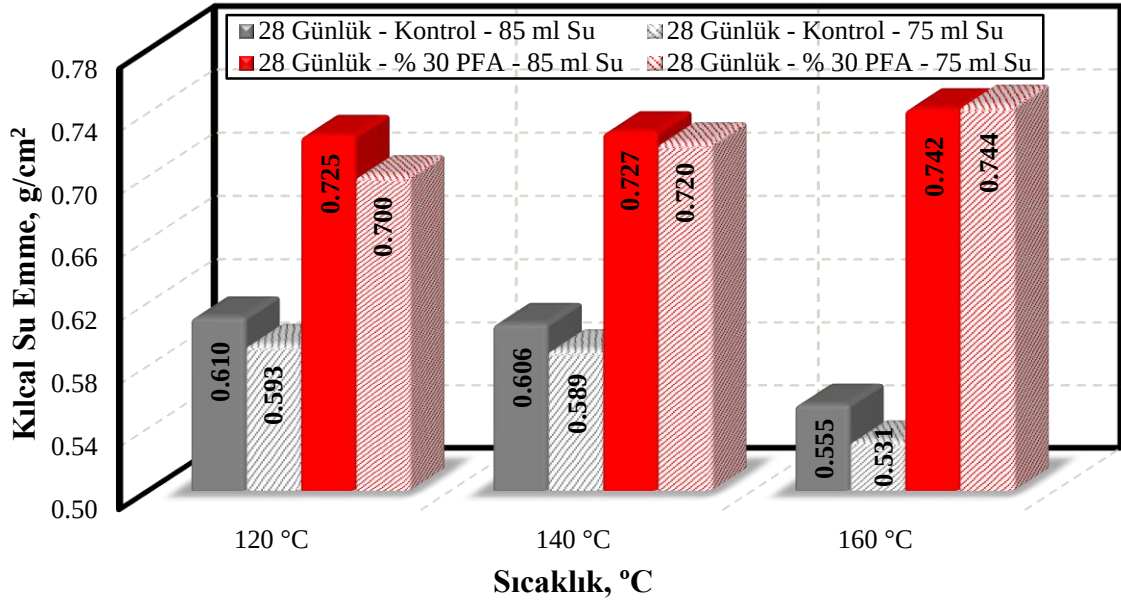


Şekil 5.20. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).



Şekil 5.21. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).

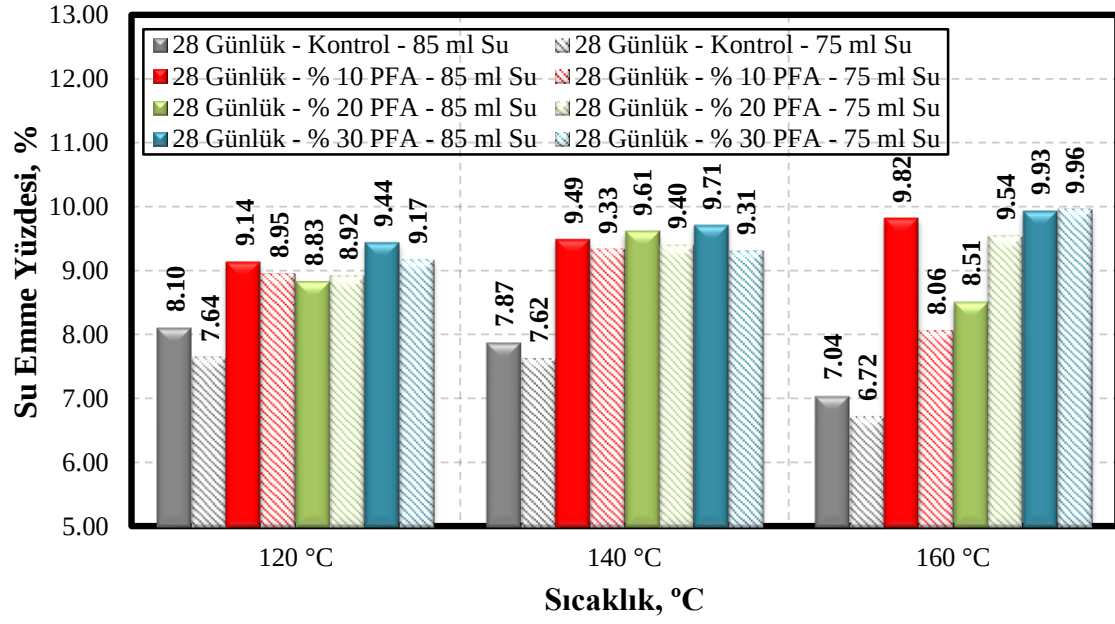
Şekil 5.21 değerlendirildiğinde sıcaklık artışı ile 160 °C kür sıcaklığı uygulanan kontrol geopolimer harç numuneler hariç numunelerde 85 ml su ve %20 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerin en az kılcal su emme değerine sahip olduğu görülmektedir (0.643 kg/dm³). Ancak kontrol geopolimer harç numuneleri hariç numunelerde 140 °C kür sıcaklığı; 120 °C kür sıcaklığı ile karşılaştırıldığında kılcal su emme değerlerinde bir artış gözlemlenir iken 160 °C sıcaklıkta geopolimer harç numunelerin kılcal su emme değerleri su içeriğine göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.22. Kılcal su emme değerlerinin kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).

Uygulana kür sıcaklığındaki artış; Şekil 5.22’de görüldüğü üzere geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su oranı fark etmeksizin %30 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerde kılcal su emme değerlerini de arttırmıştır. Kontrol geopolimer harç numuneleri hariç, en yüksek kılcal su emme değerine 0.744 gr/cm² değeri ile 75 ml su içeren geopolimer harç numunelerin olduğu görülmüştür. 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde; 160 °C sıcaklıkta uygulanan kür koşulları altındaki kılcal su emme değeri 120 °C sıcaklıkta uygulanan kür koşulları altındaki kılcal su emme değerinden %6.28 oranında fazla olduğu belirlenmiştir.

Atık içeren geopolimer harç numuneler farklı sıcaklıklardaki kür uygulamaları altında farklı kılcal su emme davranışları göstermektedir. Geopolimer harç numune içeriğindeki su oranında ki değişkenlik de bu kılcal su emme değerini etkilemektedir. Şayet geopolimer harç numunelerin kılcal su emme değerlerinin düşük olması isteniyorsa eopolimer harç numunelerdeki PFA içeriğinin azaltılması yönünde bir yol izlenebilir. Ancak optimum kılcal su emme değeri belirlenir iken numunelerin su içeriği ve bununla birlikte uygulanan kür sıcaklıkları da dikkate alınmalıdır. Kılcal su emme verileri değerlendirilir iken sadece bir parametre değil farklı parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu parametreler içerisinde kür sıcaklığı, geopolimer harç numunelerin içeriğindeki PFA miktarı ve Geopolimer harç numunelerin içeriğindeki su miktarı ön plana çıkmaktadır.

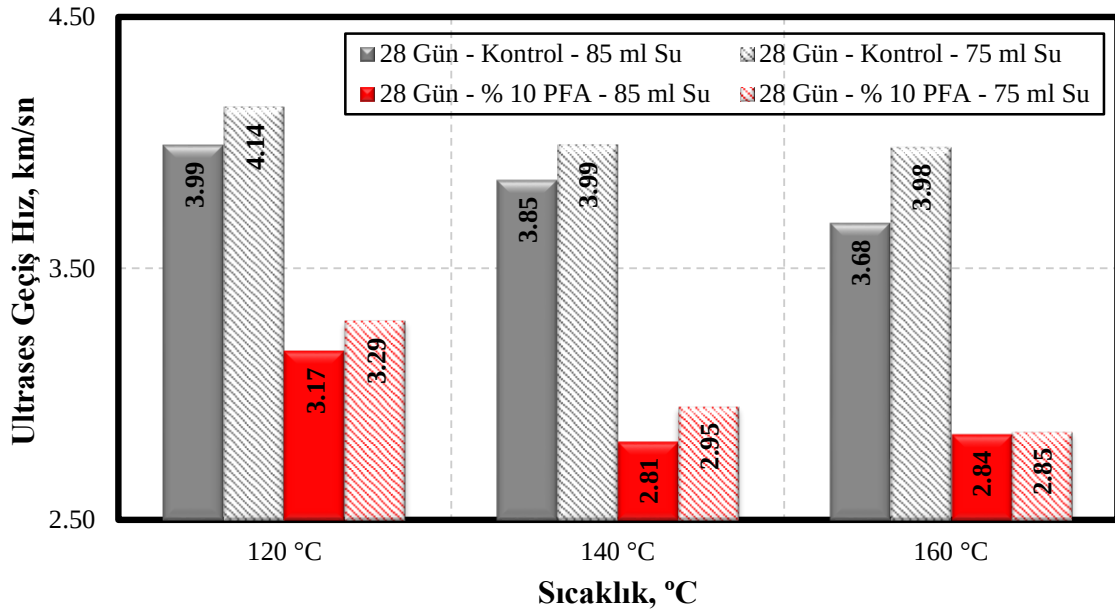


Şekil 5.23. Su emme yüzdesinin kür sıcaklığı ile değişimi.

Tüm geopolimer harç numunelerin 28 günlük su emme yüzdesi hesaplanmıştır. Kontrol geopolimer harç numuneleri hariç Şekil 5.23’de görüldüğü üzere numunelerin su emme yüzdelerinde kür sıcaklığı arttıkça bir artma eğilimi belirlenmiştir. En yüksek su emme yüzdesi değerine 160 °C sıcaklık kürü uygulanan 75 ml su ve %30 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (%9.96). Numune içeriğinde PFA’nın ve uygulanan sıcaklık kürünün artması ile %30 PFA içeren geopolimer harç numunelerde su emme yüzdelerinin arttığı saptanmıştır. Genel olarak 120 °C kür sıcaklığından 140 °C kür sıcaklığı uygulana geopolimer harç numunelerin tamamında su emme yüzdelerinin arttığı belirlenmiş ancak 160 °C kür sıcaklığında eopolimer harç numuneler su içeriği fark etmeksizin su emme yüzdesi değerleri bakımından değişkenlik göstermeye başlamıştır. Bu durum üzerinde çalışılan geopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklık altında daha düşük sıcaklıklara göre davranışlarının farklılık gösterebileceğine işaret etmiştir. Sadece sıcaklık değil PFA’nın oldukça düşük bir sertleşmiş birim ağırlık değerine sahip olması ve sıcaklık altındaki davranışının değişkenlik göstermesi de su emme yüzdesi değerlerinin belirlenmesinde önemli rol oynamıştır. %100 oranında UK içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numuneleri incelendiğinde sıcaklık artışında su emme yüzdesi değerlerinin azalma yönünde bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. PFA içeren geopolimer harç numunelerde istenilen su emme değeri yüzdesinin belirlenebilmesi için uygulanan kür sıcaklığının doğru seçilmesi gerekmektedir.

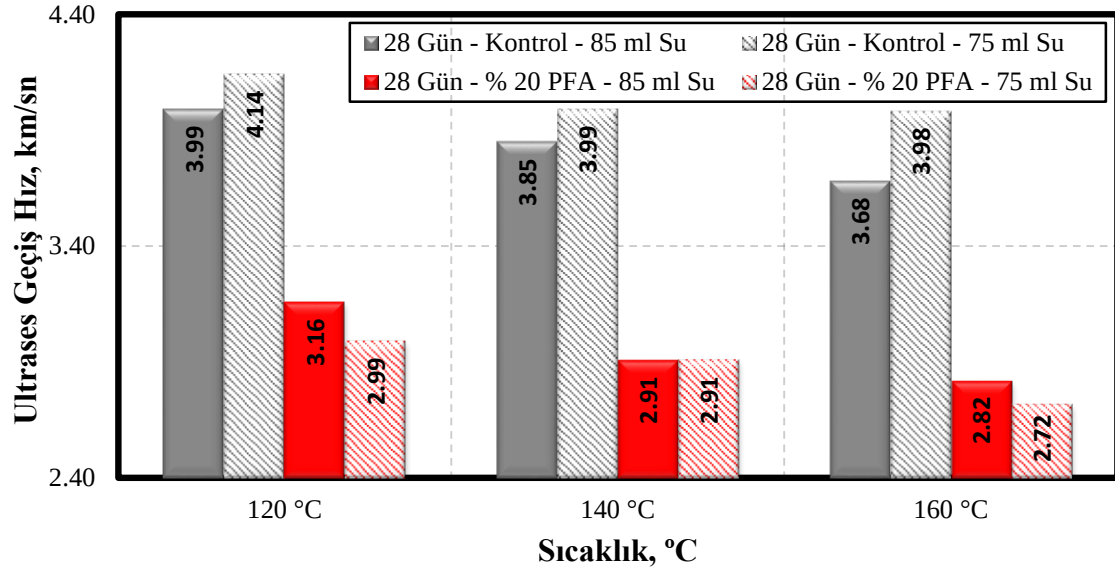
5.2.2.3. Sıcaklığın ultrases geçiş hızına etkisinin değerlendirilmesi

Ultrases geçiş süresi ölçüm cihazı ile yapılan deneyler sonucu 28 günlük geopolimer harç numunelerde elde edilen veriler grafiklere yansıtılmıştır. Ultrases geçiş süresi deneyi beton veya harç numunelerin tahmini dayanımlarının belirlenmesinde tahribatsız bir yöntemdir. Ultrases geçiş süresi deneyi aynı zamanda numunenin mikro yapısındaki boşluk oranı hakkında genel bir bilgi vermektedir. Geopolimer harç numuneler üzerinde tez kapsaamında yapılan deneysel çalışmalarda PFA'nın boşluklu bir yapıya sahip olduğu tespit edilerek geopolimer harç numunelerdeki atık oranının artması ultrases geçiş hızlarının daha yavaş olacağı fikrini vermektedir. Uygulanan farklı sıcaklık kürlerinin numuneler üzerinde ultrases geçiş sürelerini ve hızlarını nasıl etkilediği bu başlık altında incelenmiştir.



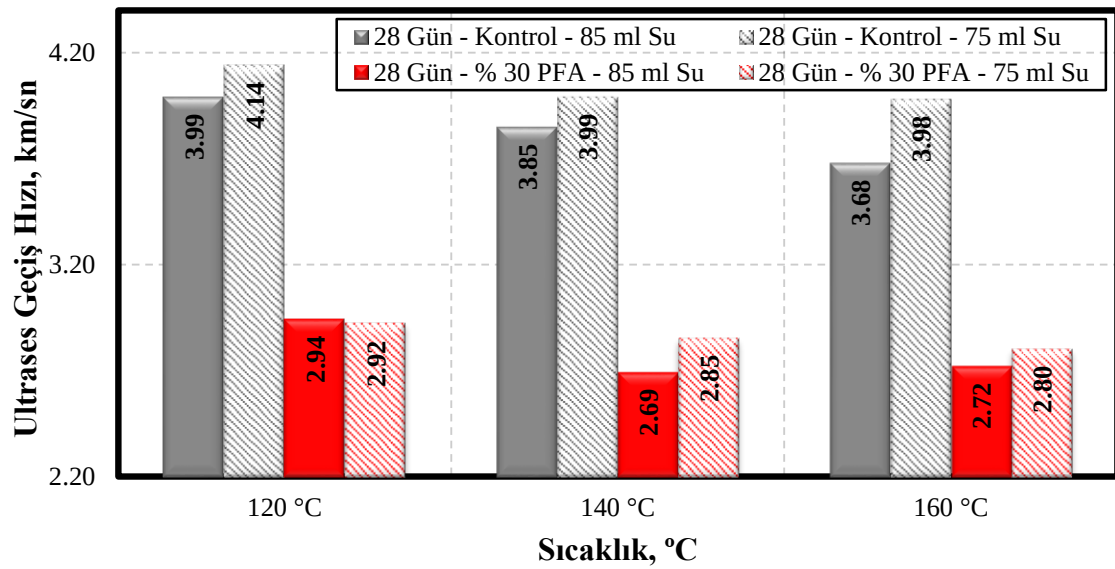
Şekil 5.24. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).

Sıcaklık kür uygulamalarında geopolimer harç numunelerin bazı mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki ettiği saptanmıştır. Şekil 5.24'de görüldüğü üzere sıcaklık artışı ile %10 PFA içeren geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızları azalmıştır. En yüksek ultrases geçiş hızına kontrol geopolimer harç numuneleri hariç 120 °C sıcaklık kürü uygulanan 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde belirlenmiştir (3.29 km/sn). Farklı sıcaklık kürü uygulanan kontrol geopolimer harç numunelerine göre 85 ml su içeren geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızlarının sırasıyla %20.55, %27.01 ve %22.83 oranında azaldığı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.25. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).

Kür sıcaklığındaki artış; %10 PFA içeren geopolimer harç numunelerde olduğu üzere %20 PFA içeren geopolimer harç numunelerde de ultrases geçiş hızlarının azaldığı görülmüştür. Şekil 8.24 incelendiğinde kontrol geopolimer harç numuneleri hariç en yüksek ultrases geçiş hızı değerine 85 ml su içeriğine sahip numunelerin olduğu belirlenmiştir (3.16 km/sn). 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin, aynı oranda su içeriğine sahip kontrol geopolimer harç numunelerine göre ultrases geçiş hızları sıcaklığın artması ile sırasıyla %20.8, %24.41 ve %23.37 oranlarında bir azalma olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.26. Ultrases geçiş hızının kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).

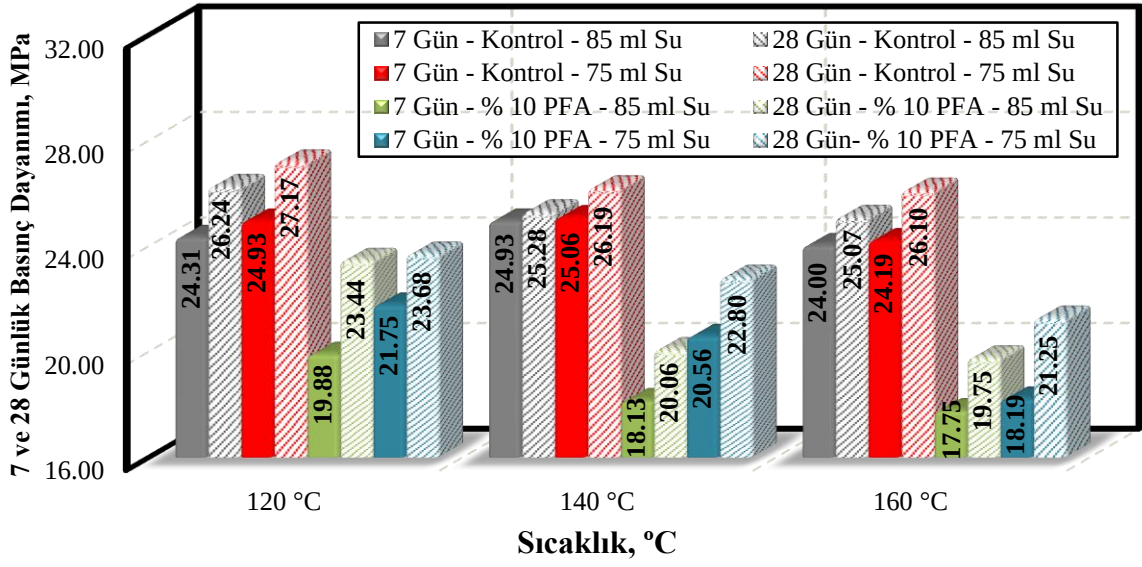
Kür sıcaklığının Şekil 5.26'da görüldüğü üzere 120 °C'den 140 °C'ye arttırılması sonucunda geopolimer harç numunelerde su içeriği fark etmeksizin ultrases geçiş hızlarında azalma görülmüştür. Ancak 140 °C'den 160 °C'ye kadar kür sıcaklığı yükseldiğinde geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızlarında 85 ml su içeren numunelerde %1.1 oranında bir artış, 75 ml su içeren numunelerde ise %1.75 oranında bir azalma belirlenmiştir.

28 günlük tüm geopolimer harç numunelerin ultrases geçiş hızları değerlendirildiğinde kür sıcaklığının artması ile genel olarak bir azalma eğilimi saptanmıştır. Özellikle %10 oranında PFA içeren geopolimer harç numunelerde; numune içeriğindeki su miktarı azaldıkça geçiş hızının arttığı belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerde PFA ve su içeriklerini bakılmaksızın ultrases geçiş hızları %10 atık oranında ortalama 2.99 km/sn, %20 atık oranında ortalama 2.92 km/sn ve %30 atık oranında ortalama 2.82 km/sn olduğu ve bu hız değerlerinin harç kalitesi bakımından kötü harç kalitesinin hemen bitiş sınırında, orta sınıf harç kalitesinin ise hemen başlangıç sınırında olduğu tespit edilmiştir.

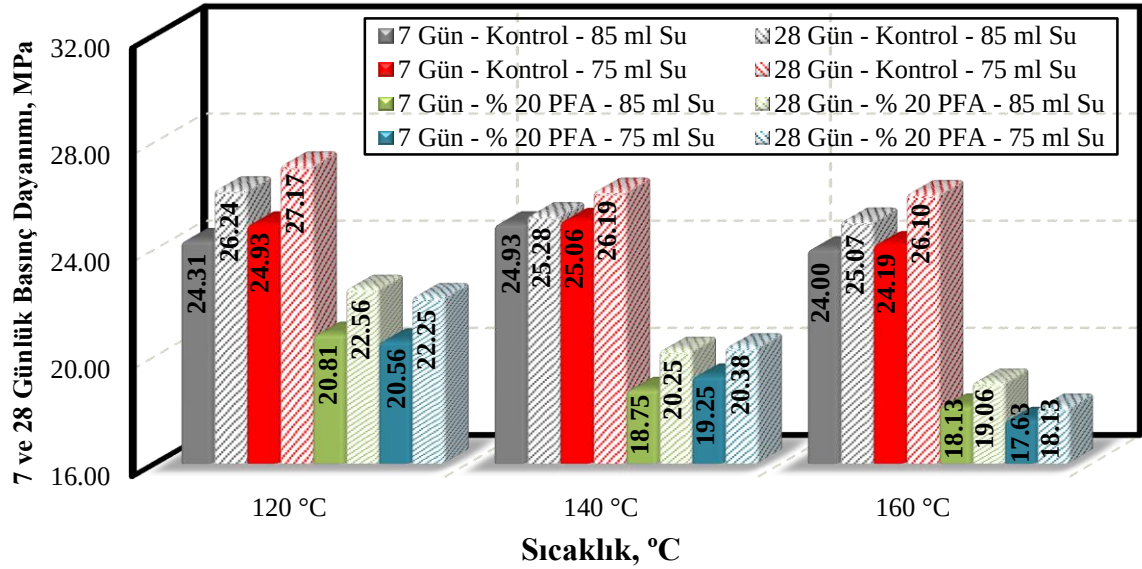
5.2.2.4. Sıcaklığın basınç dayanımına etkisinin değerlendirilmesi

Üretilen geopolimer harç numunelere farklı sıcaklıklarda 72 saat süresince kür uygulaması yapıldıktan sonra 7 ve 28. günlerde basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan kür uygulamalarından sonra geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı üzerine davranışları incelenmiş; kür sıcaklığındaki artışın basınç dayanım değerlerini azalttığı yönünde bir etki gösterdiği tespit edilmiştir.

İçeriğinde %10 oranında PFA ile 75 ve 85 ml su miktarına sahip geopolimer harç numunelerin sırasıyla 120 °C, 140 °C ve 160 °C sıcaklıklarda kür uygulanması ile elde edilen basınç dayanımları Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Kontrol geopolimer harç numuneleri ile birlikte tüm numunelerin ağırlıklı olarak sıcaklık artışı ile basınç dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. 28 günlük geopolimer harç numunelerin 7 günlük geopolimer harç numunelere göre bir basınç dayanım kazandığı ancak numune içeriğindeki su oranının azalması ile basınç dayanımında bir artış belirlenmiştir. Bununla birlikte kontrol geopolimer harç numuneler hariç en yüksek basınç dayanımı değerinin 72 saat süresince 120 °C sıcaklık kürü uygulanan 28 günlük, 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde olduğu tespit edilmiştir (23.68 MPa).

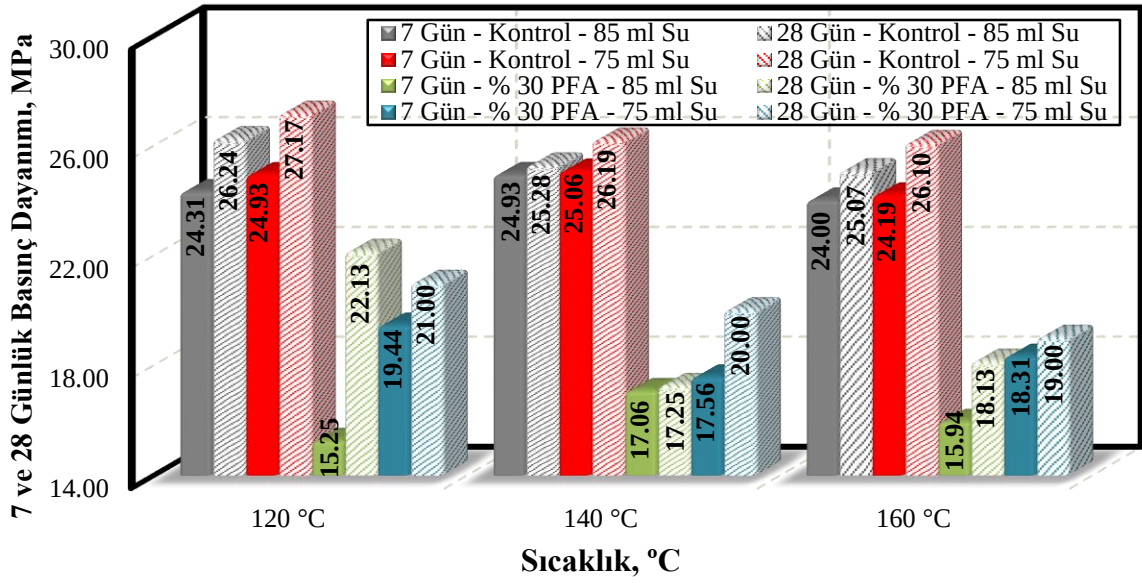


Şekil 5.27. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%10 PFA için).



Şekil 5.28. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%20 PFA için).

Geopolimer harç numunelere uygulanan farklı sıcaklıklarda kür etkisi %20 oranında PFA içeren numunelerde Şekil 5.28’de gösterildiği üzere incelenmiş ve analiz edilmiştir. 72 saat süresince geopolimer harç numunelere uygulanan kür sıcaklığının artması ile kontrol geopolimer harç numuneleri de dahil olmak üzere tüm geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değerlerinde azalma eğilimi belirlenmiştir. 28 günlük geopolimer harç numunelerin içinde en düşük basınç dayanım değerinin, 160 °C sıcaklık kürü uygulanan ve 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde olduğu görülmüştür (18.13 MPa).



Şekil 5.29. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi (%30 PFA için).

En yüksek oranda PFA içeren geopolimer harç numunelerin farklı sıcaklıklarda uygulanan kür koşulları altında basınç dayanımı davranışları Şekil 5.29'da verilmiştir. 28 günlük, 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde uygulanan kür sıcaklığının artması ile basınç dayanım değerlerinde bir azalma eğilimi görülür iken yine 140 °C kür sıcaklığı uygulana 28 günlük ve 85 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerin, 120 °C kür sıcaklığı uygulanan geopolimer harç numunelere göre dramatik bir basınç dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Ancak bu geopolimer harç numuneler 160 °C kür sıcaklığında %14 oranında bir basınç dayanımı kazanarak 18.13 MPa değerine ulaşmıştır. %30 oranında PFA içeren diğer 28 günlük ve 75 ml su içeriğine sahip geopolimer harç numunelerde kür sıcaklığının artması ile basınç dayanım değerinin düştüğü belirlenmiştir.

Belirlenen oranda PFA ile birlikte farklı iki oranda su içeren geopolimer harç numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda 72 saat süresince uygulanan kür sonucu %30 PFA içeren geopolimer harç numuneler hariç 28 günlük geopolimer harç numunelerin sıcaklık arttıkça basınç dayanım değerlerinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı %10 oranında PFA ile 75 ml su içeriğine sahip 120 °C sıcaklık kürü uygulanan 28 günlük geopolimer harç numunelerde görülmüştür (23.68 MPa). 28 günlük geopolimer harç numuneler arasında en düşük basınç dayanımı değerinin ise %20 oranında PFA ile 85 ml su içeriğine sahip ve 140 °C sıcaklık kürü uygulanmış olan geopolimer harç numunelerde olduğu tespit edilmiştir (17.25 MPa).

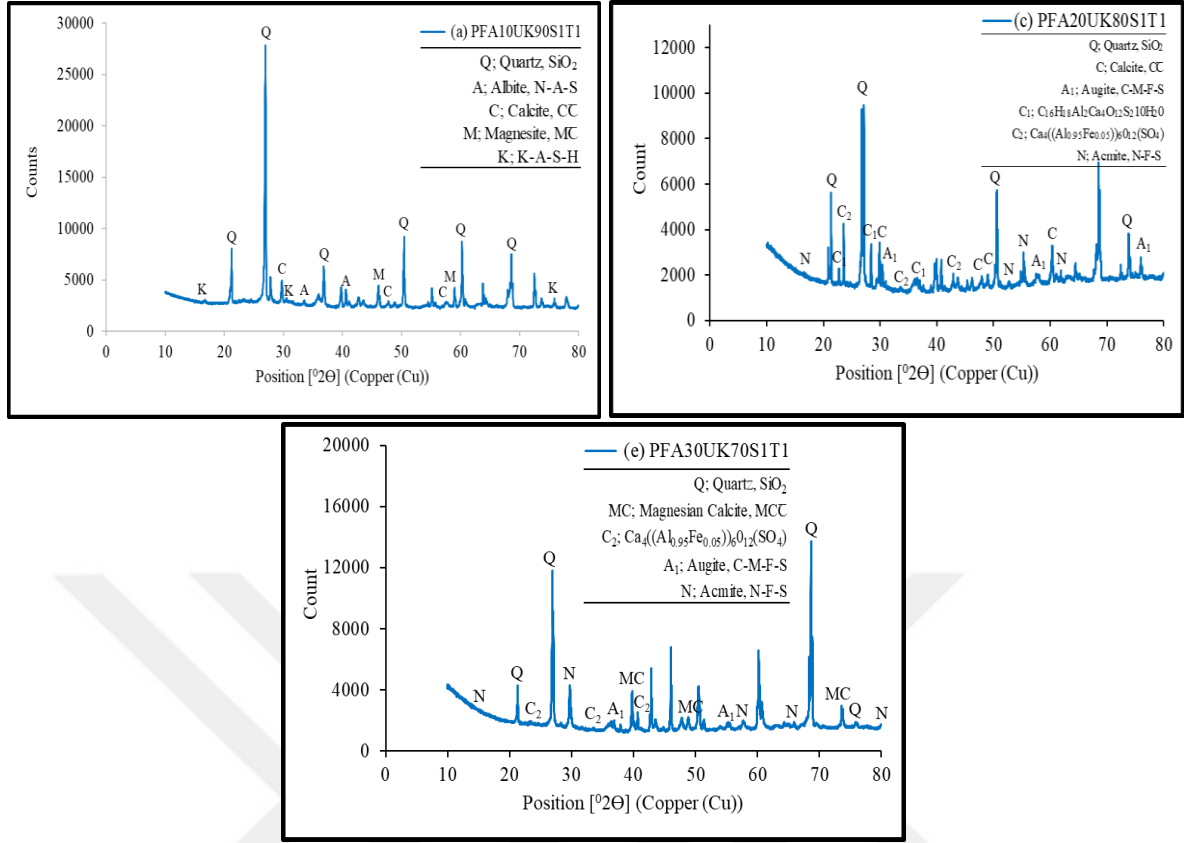
5.3. Mikro yapı analizlerinin değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar sonucu üretilen geopolimer harç numunelerin mikro yapı incelemesi kapsamında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılan X-ışını difraktometresi (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM) uygulamalarından elde edilen verilerin analizleri yapılarak aşağıda başlıklar altında detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

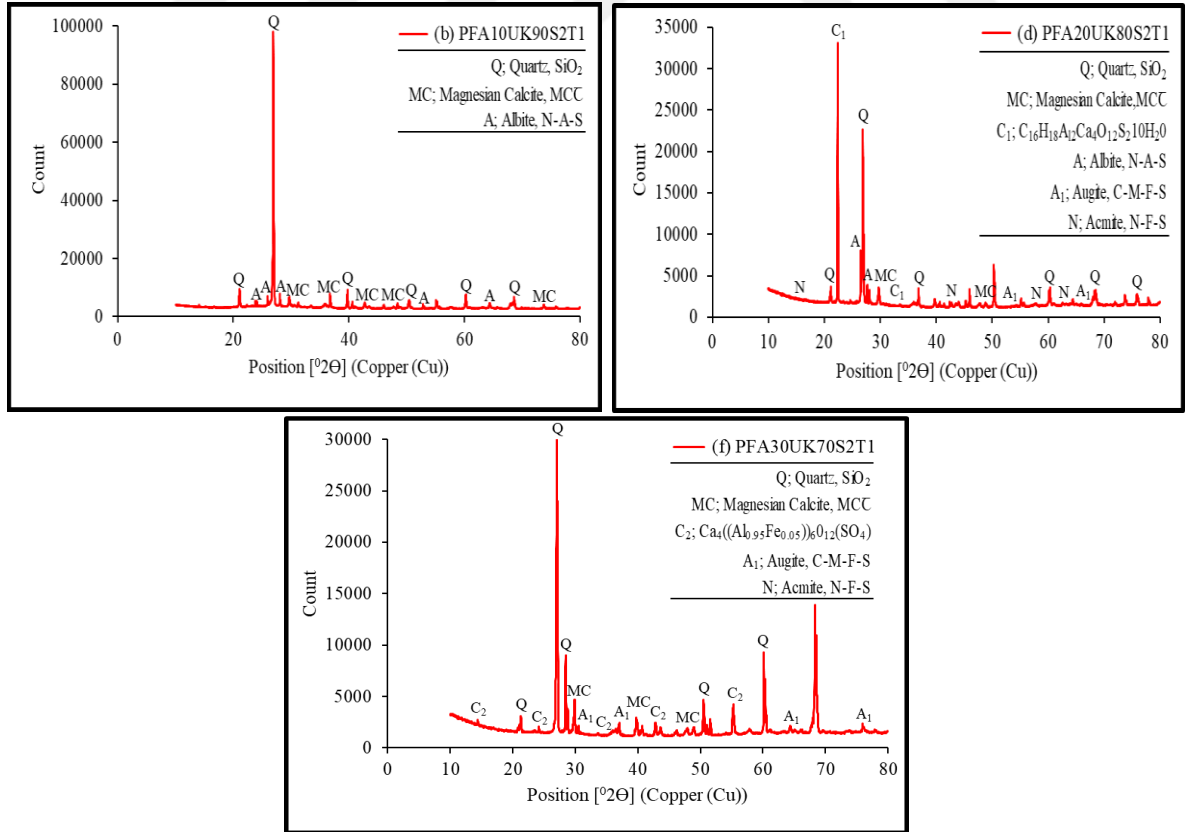
5.3.1. X-ışının difraktometresi (XRD) sonuçlarının değerlendirilmesi

XRD grafiklerinin elde edilebilmesi için öncelikle geopolimer harç numunelerin yeterli sayıda kristalin ve kristal yönlenmelerinin analize dahil edilmesi ve doğru sonuçların elde edilebilmesi için öğütme işlemi gerçekleştirilerek numuneler toz hale getirilmiştir. Bu geopolimer harç numuneler cihaza alındıktan sonra analizlerin tamamlanması her bir numune için 5 dakika sürmüştür. Analizler tamamlandıktan sonra ölçüm için analizler bilgisayara aktarılmış ve bu elde edilen veriler HighScore Plus™ bilgisayar programı kullanılarak veri grafikleri çizilmiştir.

UK, çoğunlukla amorf maddelerden ve mullit, kuvars ve CaO gibi kristal maddelerden oluşur. XRD, kristal malzeme yapılarının analizi için bir deney yöntemidir. Alkali aktivasyon işlemi yoluyla geopolimerizasyon ile üretilen ana ürünler, amorf yapıya sahip alümina-silikat maddelerdir. Analiz sonuçlarında kristal fazda (Ryu vd., 2013) çok sayıda mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$) ve kuvars (SiO_2) pikleri gözlemlenebilir. Tanımlanan fazlar, Na alümino-silikat ve Ca alümino-silikat hidrat fazı olarak belirlenmiştir. Kırınım diyagramında keskin karakteristik kuvars tepesi ise fazların kısmi amorfizasyonu ile alkali silikat camlarının gelişimi ile ilişkilidir. Tek parça geopolimer karışımları için X-ışını kırınım karakteristiği, kullanılan aktivatör malzemesinin yüzdesine bağlı olarak birbirinden farklı çeşitli reaksiyon ürünlerinin (Bashar vd., 2019) yapısal faz oluşumunu ortaya çıkarmıştır. Geopolimerler genellikle amorf olarak kabul edilse de, çok sayıda çalışma, belirli koşullar altında, geopolimer sentezleri, kristal zeolitlerin oluşumuyla sonuçlanır. Herhangi bir alkali aktivatör çözeltisinde bulunan silika miktarı veya silikanın karışım içerisindeki oranı geopolimerizasyon sırasında X-ışını kırınım kristallerinin oluşup oluşmayacağını büyük ölçüde belirlediği saptanmıştır.



Şekil 5.30. PFA10UK90S1T1, PFA20UK80S1T1, PFA30UK70S1T1, XRD analizi.



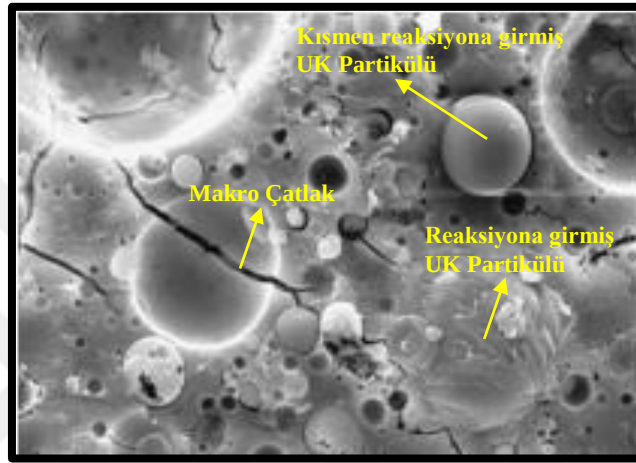
Şekil 5.31 PFA10UK90S2T1, PFA20UK80S2T1, PFA30UK70S2T1, XRD analizi.

Şekil 5.30 ve Şekil 5.31' de 120 °C kür sıcaklığı uygulanan ve farklı oranlarda su ve atık içeren numunelerin XRD faz analizleri verilmiştir. Geopolimer harç numunelerin XRD fazları incelendiğinde diğer numunelerden farklı olarak bir numunede $\text{KAlSi}_3\text{O}_8\text{H}_2\text{O}$ fazı belirlenmiştir. 4 adet geopolimer harç numunede (b, d, e, f) kalsitçe zengin magnezyan kalsit ((Ca, Mg) CO_3) fazı gözlenmiştir. Bir adet geopolimer harç numunede bu fazlar manyezit ve kalsit olarak MgCO_3 ve CaCO_3 olarak ayrı ayrı gözlenmiştir; c numunesinde ise kalsiyum ve magnezyum içeren faz, demir ile birlikte ojit ($\text{CaMgFeSi}_2\text{O}_6$) fazı olarak belirlenmiş ve silikat olarak oluşturmuştur. c, d, e ve f numunelerinin fazlarında $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$ silikat belirlenmiş ancak a ve b geopolimer harç numunelerinin fazlarında Fe yerine Al eklenerek albit fazı oluşturmuştur. Ayrıca c, e ve f geopolimer harç numunelerinin fazlarında $\text{Ca}_4(\text{AlFe})_6\text{O}_{12}(\text{SiO}_4)$ gibi bir sülfat fazının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Şekil 5.30 ve 5.31 genel olarak değerlendirildiğinde, kuvars fazının her geopolimer harç numunede en yüksek faz olduğu belirlenmiştir. Çoğu örnekte magnezyan kalsit fazı bulunur iken; Na_2SiO_3 'tan gelen sodyumun numune fazlarında albite ve $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$ silikat olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Albit, ojit, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$ fazları geopolimer harç numunelerde silikat fazı olarak gözlenmiş ve numunelerin mekanik özelliklerinin değişkenliğinin bu silikat fazlarının geopolimer harç numunelerdeki yoğunluğu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Kontrol geopolimer harç numunesi içeriğinde bulunan yüksek miktarlardaki mullit ve kuvars numunelerde atık oranının artması ile azalma yönünde bir eğilim göstermiştir. Geopolimer harç numunelerin yapılan deneysel çalışmalar sonucu 120 °C ve üzerinde geopolimerizasyon sürecinin etkilendiği ve dolaylı olarak numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde de olumsuz etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle PFA ile üretilen geopolimer harç numunelerin 120 °C ve üzerinde farklı sıcaklıklarda kür uygulanması sonucu özellikle sertleşmiş numune özelliklerinin kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Oluşan fazların, EDS analizleri değerlendirildiğinde ağırlık ve atom oranlarında en fazla görülen elementlerin O, Si, Ca, Al ve Fe olduğu saptanmıştır. Genel olarak geopolimer harç numunelerde ortaya çıkan fazların çoğunluğunun kalsit (CC), magnezit (MC), magnesian kalsit (MCC), ojit (C-M-F-S), albit (N-A-S), acmit (N-F-S), K-A-S-H olduğu belirlenmiştir. Silikat fazlarının yapısında ağırlıklı olarak Na, Fe, Al, Ca ve Mg görülmüş, silika hidratlarda ise K ve Al elemnetlerine rastlanmıştır. Sodyum içerikli silikatlı fazlar hemen hemen her geopolimer harç numunede görülmüş, oluşan bu fazların kaynağının Na_2SiO_3 olduğu düşünülmektedir.

5.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçlarının değerlendirilmesi

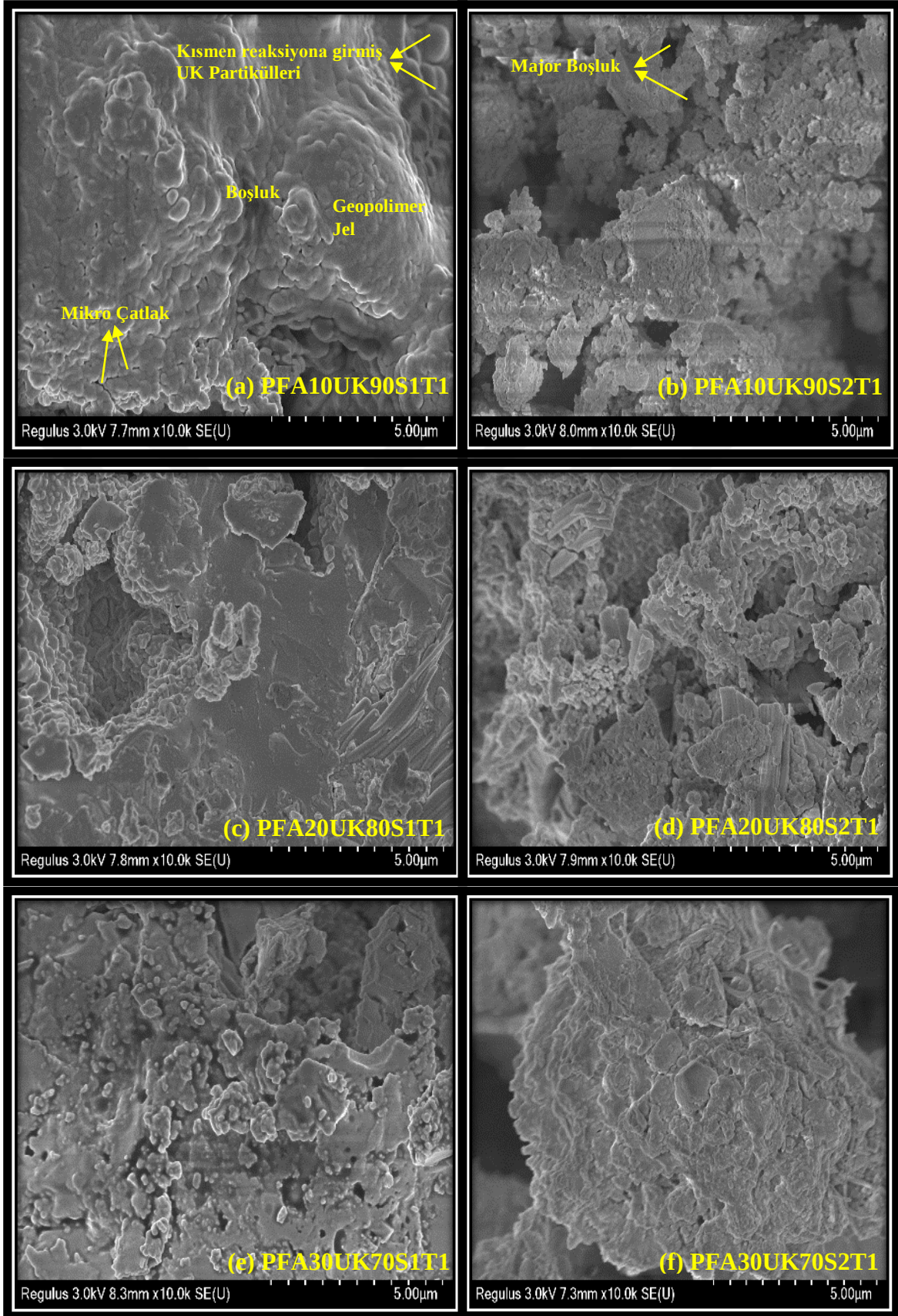
Farklı sıcaklıklarda kür uygulanan PFA ve su içeren bütün geopolimer harç numunelerden alınan kesitler üzerinde SEM uygulaması yapılmıştır. Geopolimer harç numunelerin içeriğindeki değişkenlerin PFA, su ve sıcaklık olduğu için özellikle geopolimer harç numunelerin kimyasal bağ yapıları, boşluk yapısı ve alkali aktivasyon sonucu ortaya çıkan geopolimer harç numunelerin analizleri değerlendirilmiştir.



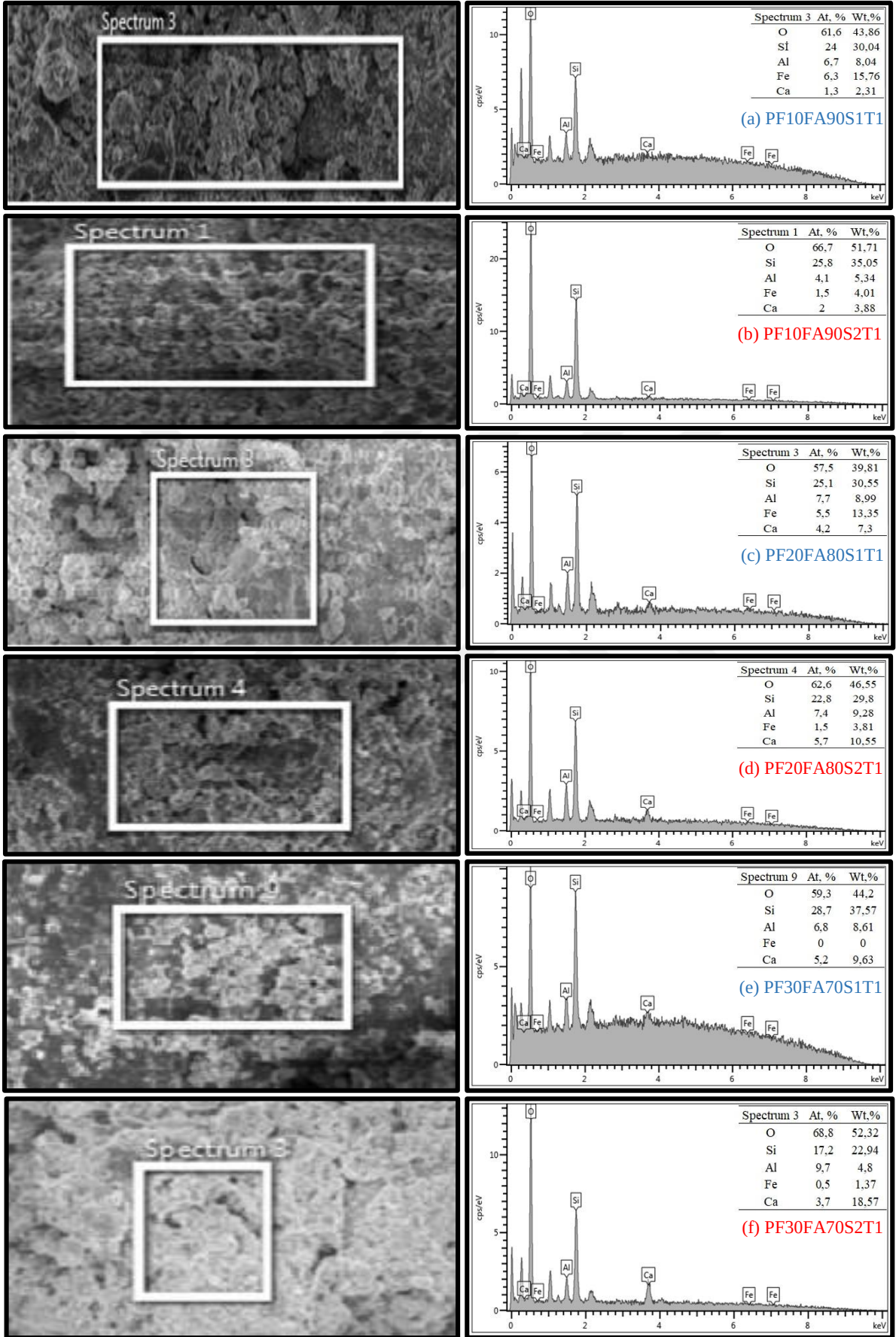
Şekil 5.32. UK100 kontrol geopolimer harç numunesi SEM analizi.

PFA ile su içeren ve 120 °C sıcaklıkta kürlenen tüm geopolimer harç numunelerden alınan partiküllere SEM deneyi uygulanmıştır. Geopolimer harç numunelerdeki değişkenlere göre özellikle kimyasal bağ yapıları gözenekli yapısı analiz edilmiştir. Çözünme tipinden bağımsız olarak, polikondenzasyon; polimerik malzemelerin çekirdeğini temsil eden esas olarak jelatinimsi faz oluşturan temel kimyasal işlemdir (Dimas vd., 2009).

Kür tipi olarak 120 °C sıcaklık uygulanan geopolimer harç numunelerde, PFA oranının %10 oranından %30 oranına kadar artmasıyla gözeneklilikte kademeli bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 5.33 (a) ile Şekil 5.33 (c) karşılaştırıldığında, Şekil 5.33 (c)'de ortaya çıkan daha büyük gözeneklerin PFA oranının artması ile arttığı görülmüştür. %30 PFA oranına sahip geopolimer harç numunelerin büyük oranda gözenekliliği, basınç dayanımının da azalmasına neden olur. Alkali aktivatör tarafından UK yüzeyindeki camsı zarın kırılması saptanmış ve bununla birlikte reaksiyona girmemiş FA partiküllerinin (Aleem ve Arumairaj, 2012) kısmi varlığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.33 (a)'da görüldüğü üzere matraste kısmende olsa reaksiyona giren bazı UK küreleri tespit edilmiştir.



Şekil 5.33. PFA10UK90S1T1, PFA20UK80S1T1, PFA30UK70S1T1, PFA10UK90S2T1, PFA20UK80S2T1, PFA30UK70S2T1, SEM analizi.



Şekil 5.34. 120 °C’de kürlenen numunelerin EDS analizleri.

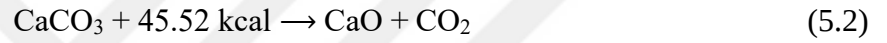
Tek bileşenli geopolimer matrisin basınç dayanım değerindeki azalma, bu gözeneklerin ve çatlakların varlığına bağlı olabileceği şeklinde değerlendirilmiştir. Kısmen reaksiyona giren parçacıklar, küçük şekillerdeki gözeneklere yayılarak yapıda bazı gözenekler geliştirir. UK'daki (Bashar vd., 2019) CaO içeriği ve PFA'daki yüksek CaO içeriğinin varlığı, mikro yapıda bir miktar K-Al, Na-Al, Na-Fe, Ca-Mg-Fe gibi silikatların oluşmasını sağlar. 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kürlenmiş geopolimer numunelerdeki su buharlaşarak harç numuneyi terk ettiğinden gözenekli bir yapı (Kaya vd., 2018) oluşur.

SEM analizleri incelenip nicel bir gözlem değerlendirilmesi yapıldığında; su oranındaki artış ile kalsit oluşumu ile mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenirken, mullit oluşumunun da azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklık artışı, geopolimer harç numune içeriğindeki bileşenlerin oranlarındaki değişimlere rağmen daima Ca ağırlıklı fazların oluşumunun arttığı, mullit tipi fazların oluşumunun azalma yönünde bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerde UK oranında azalma ile birlikte PFA oranının artması mullit fazlarının oluşumunu oldukça azaltarak, ojit, acmit, albit ve özellikle kalsit gibi fazlarının oluşumunu arttırmaya yönelik bir eğilim göstermiştir. Ancak uygulanan kür sıcaklığının artması ile üretilen geopolimer harç numunelerin genel olarak basınç dayanım değerlerinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Kontrol geopolimer harç numunesi baz alındığında numunenin matris yapısında yoğun kuvars ve mullit bileşiklerinin var olması ve buna bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

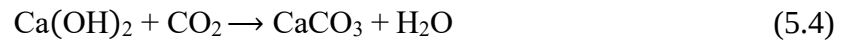
5.4. Sürdürülebilirlik Analizi

Gömülü CO₂, malzemelerin üretim sürecinde çevreye, doğaya yayılan tüm CO₂ anlamına gelmektedir. Hammaddeleri çıkarmak ve taşımak için kullanılan enerji süreci ve bunun yanı sıra üretim sürecinden kaynaklanan tüm emisyonlardan tahmin edilerek hesaplanmaktadır. Gömülü enerji ise bir ürün veya hizmetin üretim süreci ile ilişkili olan enerjidir. Gömülü enerji, hammaddelerin çıkarılması sürecinden başlayarak; işlenmesi, örneğin; her türlü inşaat malzemelerinin imalatı, nakliyesi, dağıtımı, montajı ve yapımı vb. her türlü iş için kullanılan enerjiyi içermektedir. Gömülü CO₂ ve gömülü enereji ile ilgili analiz yapılır iken harcanan işçilik değerleri üzerinden de yine açığa çıkan CO₂ ve kullanılan enerji de elde edilen verilere eklenerek analizler yapılır.

Yapı sektöründe, çoğu analiz endüstriyel malzeme üretimiyle ilişkili olarak CO₂ emisyonunun yoğun olduğu sonucuna varmaktadır (Purnell ve Black, 2012). Özellikle, en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olan (Hossaina ve Poona, 2017) ve çimento üretiminin çevresel etkisi, yüksek sera gazı emisyonları ve yüksek enerji tüketimi ile bağlantılı olarak büyük endişe kaynağı olmaktadır. Şeker üretim sürecinde PFA; CO₂ salınımı (5.1) ve (5.2) denklemlerinde gösterildiği üzere, birinci aşamada; kömür yakılarak gerçekleşmiş ve kömürün yanması ile kireçtaşının da yanma reaksiyonu gerçekleşerek yanmış kireçtaşı elde edilmiştir. Yanmış kireçtaşı daha sonra su ile hidrate olarak ve (5.3) denkleminde görüldüğü üzere görüldüğü gibi Ca(OH)₂ oluşur.



Yukarıda ifade edilen reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan CO₂, karbonatlama kazanlarına pompalanır. Pompalanan CO₂, karbonatlama kazanlarında kireç bazlı ham su ile reaksiyona girer ve (5.4) denkleminde görüldüğü üzere Ca(OH)₂ tamamen çöker. Sistemde CO₂ kullanılmasının temel amacı çözeltideki kireç tuzlarını azaltarak, şeker olmayan ve renk oluşturunca maddeleri uzaklaştırmaktır. Bu nedenle proste CO₂ kullanılır ve böylelikle atmosfere CO₂ salınımı engellenir. Çeşitli kireç tuzları membran filtrelerde CaCO₃ ile birlikte dekantörlerde mekanik çöktme sağlanır ve denklem (5.4)'te açığa çıkan PFA çamur şeklinde sıkılarak bant ile dışarıya atılır.



Yanma sürecinde ise 100 kg CaCO₃'ten elde edilen CO₂ miktarı 44 kg'dır. Kireç fırınına %82 C içeren 9 kg kömür ((9 x 82) / 100 = 7.38 kg C) ile birlikte beslenerek reaksiyonda 100 kg CaCO₃ kullanılmaktadır. 7.38 kg C'den (7.38 / 12) x 44 = 27 kg CO₂ oluşur. Ancak toplam CO₂ miktarı; 100 kg CaCO₃'ün yakılmasıyla açığa çıkan CO₂ miktarı (44 kg) ve kömürün yakılmasıyla açığa çıkan CO₂ miktarı (27 kg) denklem (5.1) ve (5.2)'ye göre (44 + 27 = 71 kg) olacak şekilde hesaplanır (Kavas ve Leblebici, 2004).

Çizelge 5.1. E-enerji ve E-CO₂ analizi.

Malzeme	E-enerji (Mj/ton)	E-CO ₂ (kg CO ₂ /ton)	Kaynak
UK	110	6	(Hossain vd., 2017)
PFA	716.11	24.62*-3.82	
Kireçtaşı	755.2	19.05*	(Chiaia vd., 2014)
Kok Kömürü	296	27*	(Turner ve Collins, 2013)
Na ₂ SiO ₃	5.371	1.514	(Turner ve Collins, 2013)
Standart Kum	81	2,8	(Ameri vd., 2020)
Su	5.7	0.318	(Chiaia vd., 2014)
OPC (Ortalama CEM I PC %94 Klinker)	5500	930	(Hammond vd., 2011)

*Şeker üretim sürecinde reaksiyon sonucu açığa çıkan CO₂ gazları tekrar süreçte kullanılarak atmosfere salınımı engellenmektedir.

Geopolimer harç numunelerde kullanılan malzemelerin gömülü enerji (E-enerji (Mj/ton)) ve gömülü CO₂ (E-CO₂ (kg CO₂/ton)) değerleri ton başına olacak şekilde Çizelge 5.1'de verilmiştir. Geopolimerlerin sürdürülebilirliğini ölçmek için, analizlerde Denklem (5.5) ve Denklem (5.6)'de açıklanan iki faktör E_f ve C_f kullanılmıştır. E_f ve C_f'nin daha düşük değer olması daha iyi bir sürdürülebilirliği gösterir (Xiao vd., 2020).

$$E_f = \frac{\text{gömülü enerji (Mj/ton)}}{f_c} \quad (5.5)$$

$$C_f = \frac{\text{gömülü CO}_2 \text{ (kg CO}_2\text{/ton)}}{f_c} \quad (5.6)$$

f_c (MPa); geopolymer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımını, E_f (Mj/ton.MPa) enerji parametresini, C_f (kg CO₂/ton.MPa) ise CO₂ parametresini ifade etmektedir. Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi OPC'ye yakın değerlere sahip E_f ve C_f parametreleri sürdürülebilirlik analizleri çerçevesinde değerlendirildiğinde OPC ile karşılaştırıldığında sürdürülebilir olabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, PFA'nın kristal şeker üretimi esnasında açığa çıkma sürecinde her bir yanma reaksiyonu (Denklem 5.1. ve Denklem 5.2) sonucunda açığa çıkan CO₂ gazı; kristal şeker üretim sürecinde karbon pompaları yardımı ile süreç içerisine tekrar verilerek kullanılabilmekte ve CO₂'in geri kullanım süreci ile çevreye ve atmosfere verilen CO₂ emisyonu önlenmektedir.

Çizelge 5.2. Numunelerin sürdürülebilirlik analizi.

Numune	E-enerji (Mj/ton)	E-CO ₂ (kgCO ₂ /ton)	E _f (Mj/ton.MPa)	C _f (kgCO ₂ /ton.MPa)
PFA10UK90S1T1	3.667,3	946,68	156,45	40,38
PFA10UK90S2T1	3.665,8	945,50	154,80	39,93
PFA20UK80S1T1	3.742,4	950,23	165,88	42,12
PFA20UK80S2T1	3.742,4	950,23	168,19	42,70
PFA30UK70S1T1	3.802,8	950,15	171,83	42,93
PFA30UK70S2T1	3.818,2	953,98	181,81	45,42
OPC 32,5 (Mahmoodi vd., 2020)	4.230,8	769,23	130,18	23,67

5.5. Sonuçların Makine Öğrenmesi (ML) ile Modellenmesi

Puzolanik malzemelerin beton veya harç karışımlarında kullanılması, beton veya harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin tahminini daha karmaşık hale getirir ve bu nedenle, tahmin denklemlerini geliştirmek için daha gelişmiş hesaplama teknikleri gerekir (Apostolopoulou vd., 2019). Malzeme biliminde, betonun ve harcın basınç dayanımının ve E-modülünün tahmini için birçok araştırmacı, Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi hesaplama tekniklerini benimsemiştir. Veriye dayalı ML tekniklerinin, E-modülü ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerini tahmin etmede ve betonun kalite özelliklerini belirlemede başarılı olduğu kanıtlanmıştır (Dantas vd., 2013), (Song vd., 2020).

Bu tezin temel amacı, hem öğrenme verilerinin hem de deney verilerinin rastgeleliğini hesaba katan regresyon ML modellerinin performansını ölçmektir. ML, örüntü toplama ve eğitim ile deney yapma ve sınıflandırmadan oluşur. Genelleştirilmiş Lineer, Karar Ağacı sınıflandırıcısı, Derin Öğrenme sınıflandırıcısı, Rassal Orman sınıflandırıcısı gibi farklı sınıflandırıcılar, desenlerin sıkıştırma, eğilme ve kesme sınıflarını verilen çatlak modellerinden ayırmak için kullanılmıştır. Bu sınıflandırıcılar arasında, Genelleştirilmiş Lineer modeli ve Derin Öğrenme modeli sınıflandırılmasında basınç dayanımlarının tahmini için en iyi performansı ve doğruluğu kaydetmiştir. Öte yandan, günümüzde beton basınç dayanımının tahmin edilmesinde ML yöntemleri yaygın olarak (Bangaru vd., 2019) çalışılmaktadır. Bunlar, diğerleri arasında yapay sinir ağları, doğrusal regresyon, karar ağaçları ve destek vektör makinelerini içerir. Bu uygulamaların, beton basınç dayanımının daha hızlı ve daha düşük maliyetle tahmin edilmesi açısından önemli bir avantaj sağlayabileceği açıktır.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen geopolimer harç numuneler üzerinde uygulanan basınç dayanım deneyleri sonucu ulaşılan değerler ile tüm değerleri içeren bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu basınç dayanımı verileri farklı algoritmalarından oluşan dört tip tahmin modellemesi üzerinde denenerek en doğru tahmin modellemesine ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu tahmin modellemeleri sırasıyla Genelleştirilmiş Lineer model, Derin Öğrenme modeli, Karar Ağacı modeli ve Rassal Orman modelidir.

5.5.1. Determinasyon katsayısı (R^2)

Deneysel verilerin doğrusal bir eğriye ne kadar iyi uyduğunun en iyi ölçütü, regresyon analiz işlemi içerisinde hesaplanmış olan “determinasyon katsayısıdır (R^2)”. $R^2 = 1$ olması, deneysel verilerin kusursuz bir doğrusal eğri sağlandığının kanıtını ifade eder. Ne kadar çok veri noktası var ise, R^2 ’nin güvenilirliği de bir o kadar yüksektir.

Elde edilen veriler üzerinde regresyon analizi yapıldığında hesaplanan $R^2 = 0.85$ (determinasyon katsayısı) ise, y değişkenindeki toplam varyasyonun %85’i açıklanabilir iken, %15’inin açıklanabilmesi mümkün değildir. Regresyon analizinden yararlanarak, öncelikle incelenen reaksiyonun “hangi reaksiyon derecesine uyduğuna” karar verilir. R^2 değeri, açıklanabilen varyasyonun (SSR); toplam varyasyona (SST) oranı olarak tanımlanmaktadır ($R^2 = SSR / SST$).

En küçük kareler yönteminde ise R^2 (determinasyon katsayısı) aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır.

$$R^2 = 1 - (\sum(Y_j - Y_1)^2 / \sum(Y_j - Y_2)^2) \quad (5.7)$$

Yukarıda verilen denklem (5.7)’de kısaltmalar;

Y_j : Deneysel olarak saptanmış değerler,

Y_1 : Regresyon eşitliğinden hesaplanmış değerler,

Y_2 : Deneysel verilerin ortalaması,

olarak ifade edilmiştir.

5.5.2. Genelleştirilmiş Lineer Modeli (Generalized Linear Model)

Modellemelerde farklı amaçlar için çok sayıda, denetimli öğrenme, yarı denetimli öğrenme ve denetimsiz öğrenme gibi öğrenme amaçları türlerini içeren ML algoritması geliştirilmiştir. Denetimli öğrenme (yani, tahmine dayalı modelleme) bilim ve mühendislik alanlarında öğrenme yaklaşımı kapsamında en yaygın ve sık kullanılanıdır. Tüm denetimli öğrenme algoritmaları arasında doğrusal regresyon en temel olanıdır ve kapsamlı bir şekilde çalışılmış ve halen kullanılmaktadır. Diğer daha karmaşık (derin) ML modelleri (Sinir ağları, evrimsel sinir ağları vb.), genellikle “kara kutu” modelleri olarak kabul edilir (Chen ve Gu, 2019). Doğrusal regresyon modelinde girdi ve çıktı değerleri arasındaki ilişki daha kolay bir yorumlanabilirliğe sahiptir. Doğrusal regresyon hipotezi denklem (5.8)’de görüldüğü üzere hesaplanmaktadır;

$$y = w^T x \quad (5.8)$$

Burada modele bağlı olarak w öğrenilebilir parametreleri veya ağırlıkları gösterir iken (hata oranı dahil w_0), x girdi değişkenlerini gösterir (bir hata oranı terimi için x_0 sabiti kullanılır) ve y değeri ise çıktı değişkenini göstermektedir. Regresyon modelinde hata tahmini için tek kullanılan yöntem olarak ortalama karesel hata yöntemi (MSE) (ortalama karesel hata bir ML modelinin öngördüğü tahmin değerleri ile gerçek değerlerin arasındaki ortalama hatadır.) kullanılır ve aşağıda verilen denklem (5.9)’a göre hesaplanır;

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2 \quad (5.9)$$

N ; ortalama hata değerinin hesaplanması için kullanılan veri noktalarının sayısı (örnekler), y_n örnek n ’nin tahmin değeri, $\hat{y}_n$ ise örneğin gerçek miktarıdır (temel gerçek). Doğrusal regresyon, basitliği ve kolay yorumlanabilir olması nedeniyle çeşitli araştırma problemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte uygulanması ve analiz edilmesi en basit model doğrusal regresyondur. Verilerin yararlı olacak bir şekilde anlaşılmasını sağlamanın yanı sıra, lineer regresyon modeli ayrıca diğer modellerin kolaylıkla değerlendirilebileceği iyi bir temel model olarak çalışır (DeRousseau vd., 2019).

Genelleştirilmiş Lineer model bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri ortaya koymada kullanılan ileri düzey bir istatistiksel modeldir. Üretilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanım verileri üzerinde genelleştirilmiş lineer algoritması ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; R^2 değeri 0.852 olarak saptanmıştır.

Çizelge 5.3. Genelleştirilmiş Lineer modeli sütun ağırlıkları.

Parametreler	Ağırlık
UK	0.773
PFA	0.069
Su	0.004
Sıcaklık	0.006

Çizelge 5.4. Genelleştirilmiş Lineer modeli vizüalizasyonu.

Parametreler	Katsayı ^b	Standart Katsayı ^c
UK	0.033	1.232
PFA	0	0
Su	-0.029	-0.149
Sıcaklık	-0.055	-0.905
Sabit (Kesme Noktası) ^a	17.493	19.416

^a Kesme Noktası, doğrusal bir modelin parçası olarak tahmin edilen sabit bir terimdir. Genellikle bu terim, modele ilişkin herhangi bir ek bilgi vermez.

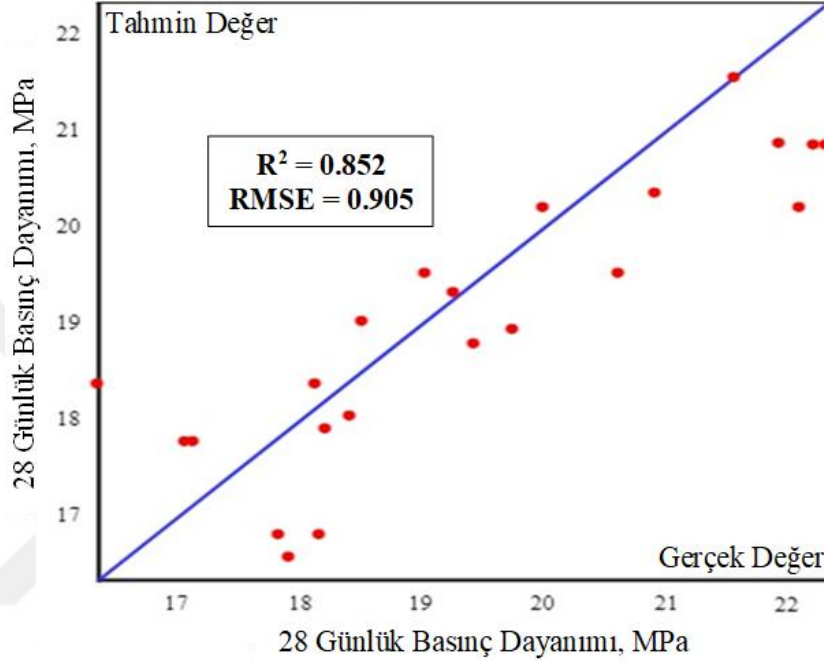
^b Her sütunun genel model tahminleri üzerinde ne kadar etkisi olduğunu ölçer. Katsayılar (ham katsayı) diğer sütunlarla karşılaştırılmaz ('elma-portakal' karşılaştırması).

^c Katsayı sıfırdan ne kadar uzaksa, bu sütun doğru bir tahmin yapılmasına o kadar yardımcı olur. Bir sütunun katsayısını diğeriyle karşılaştırmak için, bu 'standartlaştırılmış' katsayıları kullanılır ("elma-elma" karşılaştırması).

Çizelge 5.5. Genelleştirilmiş Lineer modeli tahminleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
UK	362.81 gr	UK	362.81 gr	UK	362.81 gr
PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr
Su	75 ml	Su	75 ml	Su	75 ml
Sıcaklık	120 °C	Sıcaklık	140 °C	Sıcaklık	160 °C
Basınç Dayanımı Tahmini	20.57 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	19.46 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	18.35 MPa

Genelleştirilmiş Lineer modeli tahminleri çizelgesinde de (Çizelge5.5) görüldüğü üzere tüm içerik oranları sabit tutularak uygulanan kür sıcaklığının artması ile geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da tahmin çizelgesinde olduğu üzere kür sıcaklığının artması ile geopolimer harç numunelerin basınç dayanımında azalma eğilimi gösterdiği saptanmıştır.



Şekil 5.35. Genelleştirilmiş Lineer model grafiği.

Şekil 5.35’de tahmin edilen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon ilişkisi gösterilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığı takdirde ideal tahminin oluşması için tüm basınç dayanım verilerinin (tahmin edilen verilen ve gerçek veriler), Şekil 5.35’deki diyagonal lineer çizgiye yakın olması beklenmektedir. Tüm verilerin Şekil 5.35’deki diyagonal lineer çizgiye yakınlığı tahminlerin doğruluğunu artırır.

5.5.3. Derin Öğrenme Modeli (Deep Learning Model)

Derin öğrenme yöntemi, verilen bir veri seti ile sonuçları tahmin eden birden fazla katmandan oluşan bir ML yöntemidir. Derin öğrenme, ML ve yapay zekâ birbirinden farklı anlamları olan terimlerdir. Derin öğrenme, ML’nin; ML ise yapay zekânın alt dalı olarak özetlenebilir. Derin öğrenme, evrimsel hesaplamanın kullanımı ile önemli ölçüde ilgi görmeye başlamış ve hemen sonra modelleme kullanımında uzun bir geçmişe sahiptir.

Derin öğrenme modelindeki evrimsel uygulamalar, bilgisayarla görme, konuşma ve tanımda başarıyla kullanılmıştır. Ağ topolojisi ve sinir mimarisi ile yüksek derinlikli derin öğrenme modellerinde dengesiz veya yüksek boyutlu veri kümelerinden kaynaklanan büyük karmaşıklıkliğin nedeni aşırı uyum sorununun altında yatan problemlerden kaynaklanır (Telikani vd., 2021). Labortauvarda üretilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanım üzerine derin öğrenme algoritması (Şekil 5.36) ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; hesaplanan determinasyon katsayısının yani R^2 değerinin 0.913 olduğu tespit edilmiştir.

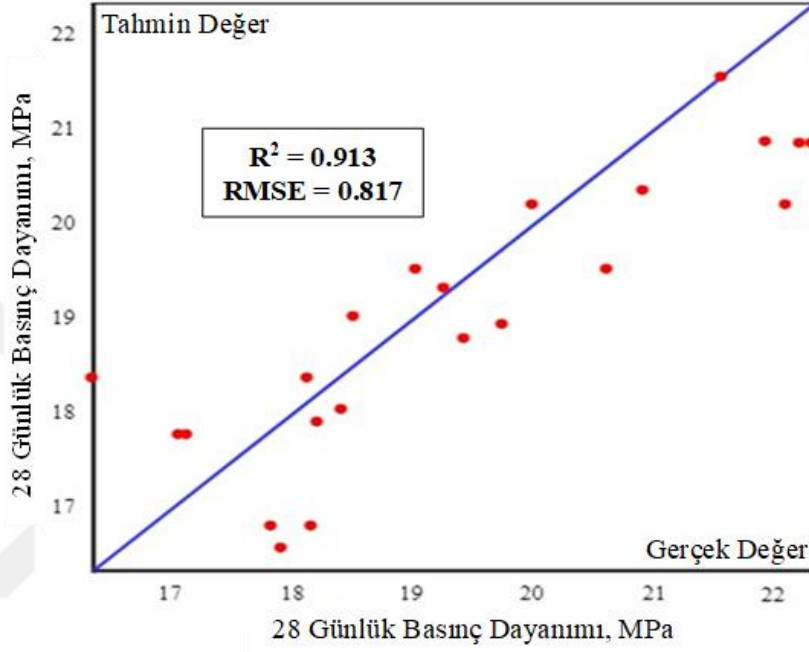
Çizelge 5.6. Derin Öğrenme modeli sütun ağırlıkları.

Parametreler	Ağırlık
UK	0.36
PFA	0.069
Su	0.024
Sıcaklık	0.006

Model Metrics Type: Regression Description: Metrics reported on full training frame model id: rm-h2o-model-production_model-12312 frame id: rm-h2o-frame-production_model-12312 MSE: 0.98165345 RMSE: 0.9907843 R ² : 0.7111209 mean residuel deviance: 0.98195345 mean absolute error: 0.7687201 root mean squared log error: 0.049536375 Status of Neuron Layers (predicting O_CompressiveStrength, regreesion, gaussian distribution, Quadratic loss, 2,851 weight/biases, 38.3 KB, 540 training samples, mini-batch size 1):													
Layers	Units	Type	Dropout	L1	L2	Mean Rate	Rate RMS	Momentum	Mean Weight	Weight RMS	Mean Bias	Bias RMS	
1	4	Input	0.00 %										
2	50	Rectifier	0	0.000010	0.000000	0.002124	0.001705	0.000000	0.000909	0.187546	0.500328	0.010366	
3	50	Rectifier	0	0.000010	0.000000	0.008948	0.021286	0.000000	-0.000114	0.138466	0.999273	0.017977	
4	1	Linear		0.000010	0.000000	0.000342	0.000331	0.000000	0.021283	0.204818	-0.009794	0.000000	
Scoring History:													
Timestamp	Duration	Training Speed	Epochs	Iterations	Samples	Training RMSE	Training Deviance	Training MAE	Training r2				
2021-07-04 10:40:16	0.000 sec	0.00000	0	0.000000	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN				
2021-07-04 10:40:16	0.011 sec	10800 obs/sec	1.00000	1 54.000000	1.12808	1.27257	0.90480	0.62551					
2021-07-04 10:40:16	0.016 sec	12000 obs/sec	2.00000	2 108.000000	1.02543	1.05150	0.82091	0.69057					
2021-07-04 10:40:16	0.021 sec	12461 obs/sec	3.00000	3 162.000000	0.99078	0.98165	0.76872	0.71112					
2021-07-04 10:40:16	0.027 sec	12000 obs/sec	4.00000	4 216.000000	0.99241	0.98487	0.76729	0.71017					
2021-07-04 10:40:16	0.032 sec	12272 obs/sec	5.00000	5 270.000000	1.00900	1.01809	0.79080	0.70040					
2021-07-04 10:40:16	0.037 sec	12461 obs/sec	6.00000	6 324.000000	1.06572	1.13576	0.80373	0.66577					
2021-07-04 10:40:16	0.042 sec	12600 obs/sec	7.00000	7 378.000000	1.07090	1.14683	0.81709	0.66251					
2021-07-04 10:40:16	0.047 sec	12705 obs/sec	8.00000	8 432.000000	1.00752	1.01511	0.80064	0.70128					
2021-07-04 10:40:16	0.052 sec	12789 obs/sec	9.00000	9 486.000000	1.00028	1.00055	0.75340	0.70556					
2021-07-04 10:40:16	0.058 sec	12558 obs/sec	10.00000	10 540.000000	1.08913	1.18620	0.88050	0.65093					
2021-07-04 10:40:16	0.060 sec	12272 obs/sec	10.00000	10 540.000000	0.99078	1.98165	0.76872	0.71112					

Şekil 5.36. Derin Öğrenme modeli vizüalizasyonu.

Şekil 5.37’de tahmin edilen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon ilişkisi gösterilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığı takdirde ideal tahminin oluşması için tüm basınç dayanım verilerinin (tahmin edilen verilen ve gerçek veriler), Şekil 5.37’deki diyagonal lineer çizgiye yakın olması beklenmektedir. Tüm verilerin Şekil 5.37’deki diyagonal lineer çizgiye yakınlığı tahminlerin doğruluğunu artırır.



Şekil 5.37. Derin Öğrenme modeli grafiği.

Çizelge 5.7. Derin Öğrenme modeli tahminleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
UK	362.81 gr	UK	362.81 gr	UK	362.81 gr
PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr
Su	75 ml	Su	75 ml	Su	75 ml
Sıcaklık	120 °C	Sıcaklık	140 °C	Sıcaklık	160 °C
Basınç Dayanımı Tahmini	20.55 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	19.52 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	18.44 MPa

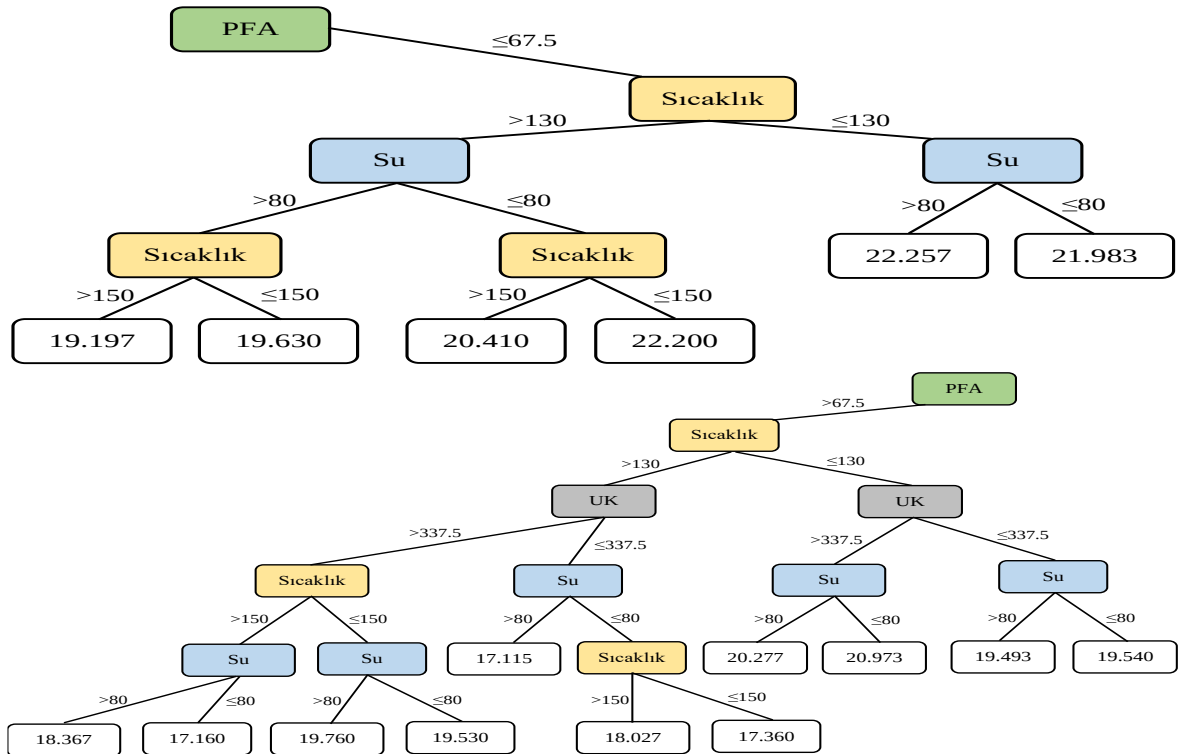
Derin öğrenme modeli tahminleri çizelgesinde de (Çizelge 5.7) görüldüğü üzere tüm içerik oranları sabit tutularak kür sıcaklığı arttırıldıkça geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da tahmin çizelgesinde olduğu üzere kür sıcaklığının artması ile geopolimer harç numunelerin basınç dayanımında azalma eğilimi gösterdiği saptanmıştır.

5.5.4. Karar Ağacı Modeli (Decision Tree Model)

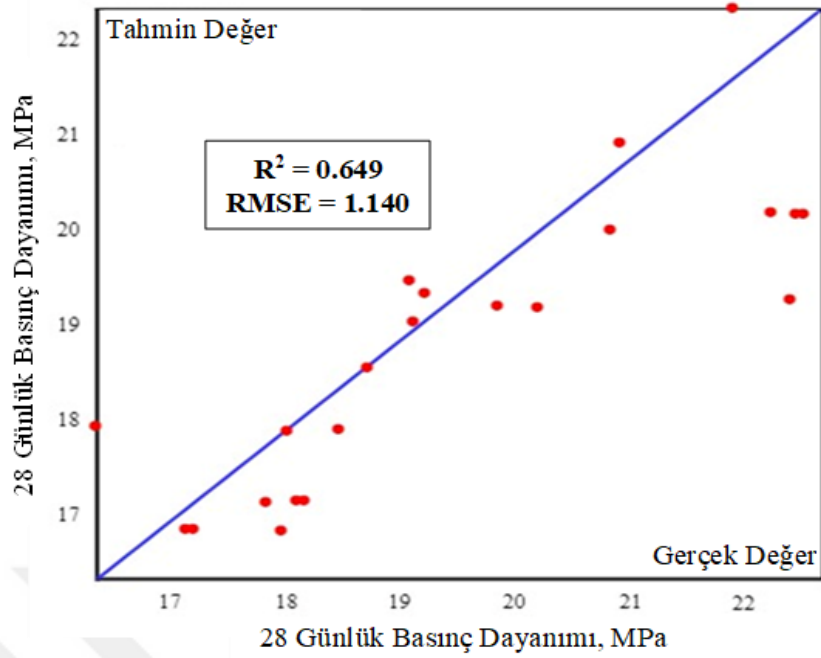
Karar ağacı algoritması, veri madenciliği sınıflandırma algoritmalarından biridir. Önceden tanımlanmış bir hedef değişkene sahiplerdir. Yapıları itibariyle en tepeden en aşağı inen bir strateji sunmaktadırlar. Bir karar ağacı, çok sayıda kayıt içeren bir veri kümesini, bir dizi karar kuralları uygulayarak daha küçük kümelerle bölmek için kullanılan bir yapıdır. Yani basit karar verme adımları uygulanarak, büyük miktarlardaki kayıtları, çok küçük kayıt gruplarına bölerek kullanılan bir yapıdır. Daha yüksek düzeyde doğrusal olmadığı, modelleme esnekliği ve kolay yorumlanabilirliği nedeniyle popülerdir (Chopra vd., 2018). Elde edilen geopolimer numunelerin basınç dayanım verileri üzerinde derin öğrenme algoritması ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; R^2 değeri 0.649 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.8. Karar Ağacı modeli sütun ağırlıkları.

Parametreler	Ağırlık
UK	0.021
PFA	0.007
Su	0.027
Sıcaklık	0.006



Şekil 5.38. Karar Ağacı modeli vizüalizasyonu.



Şekil 5.39. Karar Ağacı modeli grafiği.

Şekil 5.39’da tahmin edilen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon ilişkisi gösterilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığı takdirde ideal tahminin oluşması için tüm basınç dayanım verilerinin (tahmin edilen verilen ve gerçek veriler), Şekil 5.39’daki diyagonal lineer çizgiye yakın olması beklenmektedir. Tüm verilerin Şekil 5.39’daki diyagonal lineer çizgiye yakınlığı tahminlerin doğruluğunu artırır.

Çizelge 5.9. Karar Ağacı modeli tahminleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
UK	362.81 gr	UK	362.81 gr	UK	362.81 gr
PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr
Su	75 ml	Su	75 ml	Su	75 ml
Sıcaklık	120 °C	Sıcaklık	140 °C	Sıcaklık	160 °C
Basınç Dayanımı Tahmini	21.02 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	19.64 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	17.96 MPa

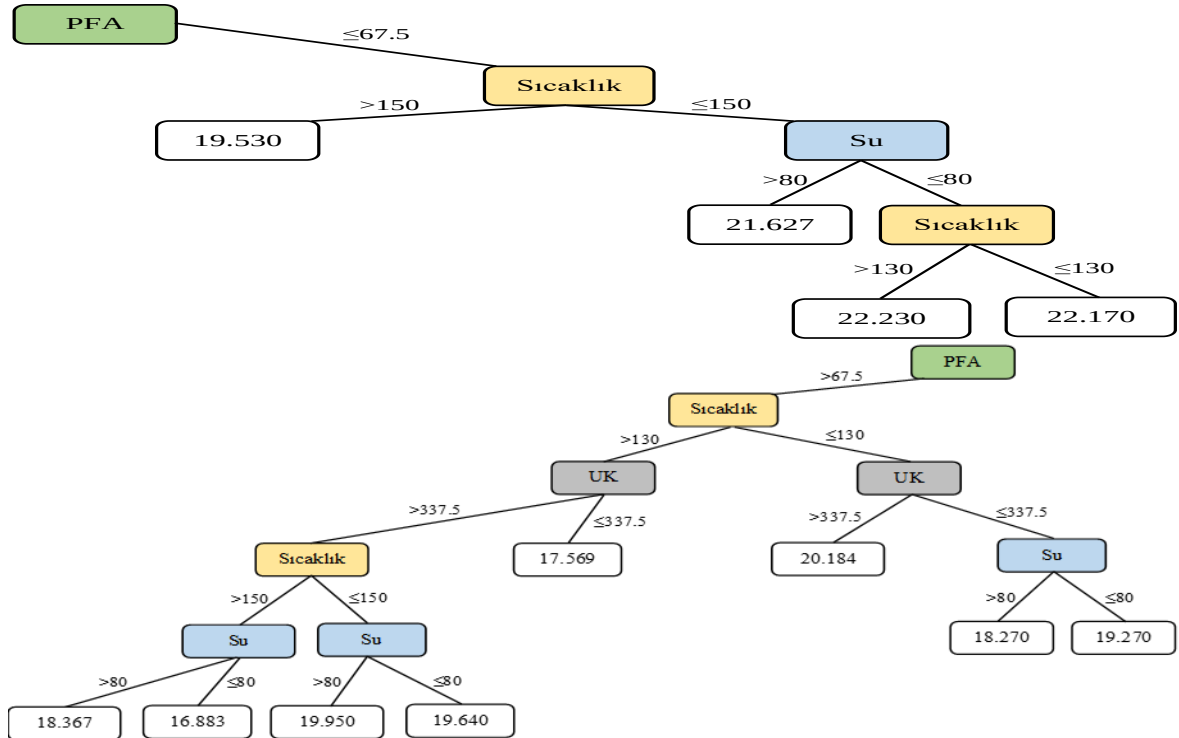
Karar Ağacı modeli tahminleri çizelgesinde de (Çizelge 5.9) görüldüğü üzere tüm içerik oranları sabit tutularak kür sıcaklığı artırıldığında geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da tahmin çizelgesinde olduğu üzere kür sıcaklığının artması ile geopolimer harç numunelerin basınç dayanımında azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

5.5.5. Rassal Orman Modeli (Random Forest Model)

Bir topluluk öğrenme yöntemi olan Random Forest (Rassal Orman) algoritmasının sınıflandırma işlemi esnasında birden fazla karar ağacı üreterek sınıflandırma değerini yükseltmeyi hedefleyen bir algoritmadır. Bireysel olarak oluşturulan karar ağaçları bir araya gelerek karar ormanını oluşturmaktadır. Buradaki karar ağaçları bağlı olduğu veri setinden rastgele seçilmiş birer alt kümedir. Rassal orman modeli, genellikle çıktıyı tahmin etmede daha iyi performans gösteren bir sağlama modelidir. Bu modeldeki her ağacın büyümesi, rastgele bir dizi tahmin edici aracılığıyla gerçekleştirilir ve bu nedenle, rassal orman modeli olarak adlandırılır (Marani ve Nehdi, 2020). Laboratuvarında üretilen geopolimer harç numunelerin basınç dayanım verileri üzerinde rassal orman modeli algoritması ile bir tahmin modeli oluşturulduğunda; R^2 değeri 0.683 olarak tespit edilmiştir.

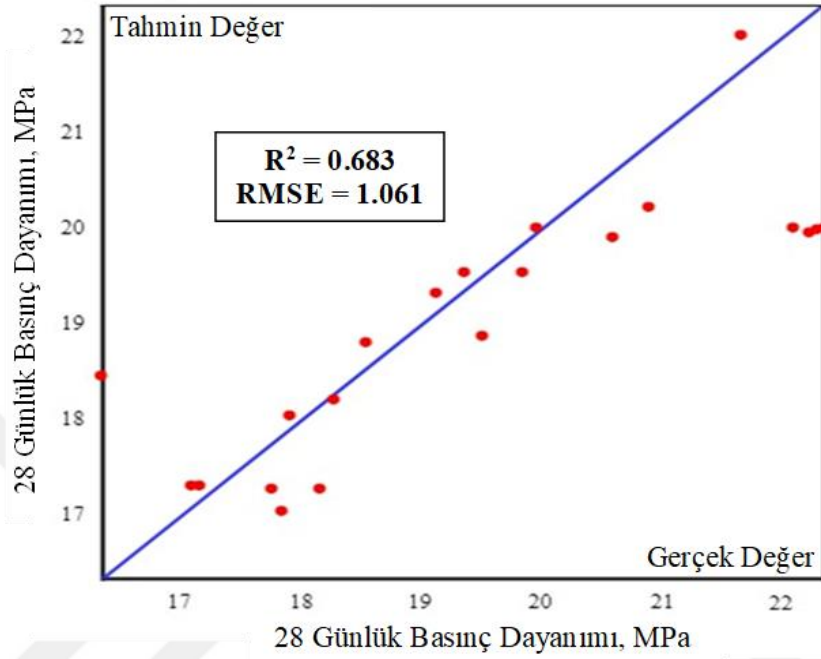
Çizelge 5.10. Rassal Orman modeli sütun ağırlıkları.

Parametreler	Ağırlık
UK	0.018
PFA	0.007
Su	0.026
Sıcaklık	0.006



Şekil 5.40. Rassal Orman modeli örnek bir ağaç vizüalizasyonu.

Rassal Orman modeli sınıflandırma işlemi esnasında Şekil 5.40’da elde edilen veriler yardımı ile toplamda 100 adet karar ağacı üreterek sınıflandırma değerini yükseltmiştir. Bireysel olarak oluşturulan karar ağaçları bir araya gelerek bir karar ormanı oluşturulmuştur.



Şekil 5.41. Rassal Orman modeli grafiği.

Şekil 5.41’ da tahmin edilen basınç dayanımları ile gerçek basınç dayanımları arasındaki korelasyon ilişkisi gösterilmiştir. Bir değerlendirme yapıldığı takdirde ideal tahminin oluşması için tüm basınç dayanım verilerinin (tahmin edilen veriler ve gerçek veriler), Şekil 5.40’daki diyagonal lineer çizgiye yakın olması beklenmektedir. Tüm verilerin Şekil 5.40’daki diyagonal lineer çizgiye yakınlığı tahminlerin doğruluğunu artırır.

Çizelge 5.11. Rassal Orman modeli tahminleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
UK	362.81 gr	UK	362.81 gr	UK	362.81 gr
PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr	PFA	87.19 gr
Su	75 ml	Su	75 ml	Su	75 ml
Sıcaklık	120 °C	Sıcaklık	140 °C	Sıcaklık	160 °C
Basınç Dayanımı Tahmini	20.39 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	19.65 MPa	Basınç Dayanımı Tahmini	18.41 MPa

Rassal Orman modeli tahminleri çizelgesinde de (Çizelge 5.11) görüldüğü üzere tüm içerik oranları sabit tutularak kür sıcaklığı arttırıldığında geopolimer harç numunelerin basınç dayanım değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da tahmin çizelgesinde olduğu üzere kür sıcaklığının artması ile geopolimer harç numunelerin basınç dayanımında azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Genel olarak, laboratuvar koşullarında yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen geopolimer harç numunelerin gerçek ve tahmini basınç dayanım değer verileri arasındaki ilişki değerlendirildiğinde dört adet model içerisinde en yakın tahmin verileri derin öğrenme modeli uygulamasında tespit edilmiştir. Derin öğrenme modelinde hesaplanan determinasyon katsayısının yani R^2 değerinin 0.913 olması gerçek basınç dayanım değerlerine en yakın tahmin verilerinin derin öğrenme modeline ait olduğunu göstermektedir. Derin öğrenme modelinden sonra ise Genelleştirilmiş Lineer modele ait tahmin verilerinin gerçek verilere en yakın değerler olduğu ($R^2 = 0.852$) saptanmıştır.

Çizelge 5.12. ML modelleri ile gerçek ve tahmini basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Model Tipi	UK, gr	PFA, gr	Su, ml	Sıcaklık, °C	R^2	RMSE	Tahmin, MPa	Gerçek, MPa	Hata, %
Genelleştirilmiş Lineer model	362.81	87.19	75	120 °C	0.852	0.905	20.57	20.51	0.29
				140 °C			19.46	19.54	-0.41
				160 °C			18.35	18.47	-0.65
Derin Öğrenme modeli	362.81	87.19	75	120 °C	0.913	0.817	20.55	20.51	0.19
				140 °C			19.52	19.54	-0.10
				160 °C			18.44	18.47	-0.16
Karar Ağacı modeli	362.81	87.19	75	120 °C	0.649	1.140	21.02	20.51	2.43
				140 °C			19.64	19.54	0.51
				160 °C			17.96	18.47	-2.48
Rassal Orman modeli	362.81	87.19	75	120 °C	0.683	1.061	20.39	20.51	-0.59
				140 °C			19.65	19.54	0.56
				160 °C			18.41	18.47	-0.33

Çizelge 5.12’de ifade edildiği üzere farklı kür sıcaklığı uygulanan geopolimer harç numunelerine ait basınç dayanım değerlerinin dört adet tahmin modeli kullanarak elde edilen tahmin verileri gösterilmiştir. Bu tahmin verileri hesaplanırken geopolimer harç içeriğindeki endüstriyel atık (su, Na_2SiO_3 , kum hariç olmak üzere) miktarları değiştirilmiş ve gerçek basınç dayanım değeri ile tahmin edilen basınç dayanım değeri karşılaştırılmıştır. Buna göre R^2 değerinin artması ile gerçek değerlere en yakın tahmin değerlerine ulaşılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir şeker fabrikası atığı olan PFA'nın diğer bir kömür santrali atığı olan UK ile birlikte alkali aktivatör (Na_2SiO_3) kullanılarak geopolimer harç numuneler elde edilmiştir. Çalışmada, ürünler elde edilir iken karışımda farklı oranda PFA, UK ve su kullanılmış daha sonra bu numunelere belirlenen süre boyunca farklı kür sıcaklıkları uygulanmıştır. Geopolimer numunelerinin elde edilmesi sürecinde kullanılan tüm malzemelerin oranı, ön deneysel çalışmalar ve aynı zamanda literatür taraması ile belirlenmiştir. Genel olarak, PFA gibi çok az çalışılan atıkların kullanım sürecinde, bağlayıcı yerine kullanılır iken veya herhangi bir puzolanla birlikte kullanılır iken düşük oranda başlandığı ve daha yüksek orana çıkarıldığı görülmüştür. Bununla birlikte PFA stok sahasından veya yerinden alındığı esnada atığın nemli olduğu gözlenmiştir. Ancak laboratuvarında alınan atık numunelerindeki nem uçurulurken her bir numunede farklı bir nem oranı olduğu saptanmıştır. Geopolimer üretiminde kullanılan atığın her örneğinde farklı nem oranları belirlendiği için öncelikle atığın içeriğindeki nem tamamen uzaklaştırılmış sonra karışımlarda kullanılmıştır. Numunelerin taze ve sertleşmiş halde yapılan deneyler sonucunda bazı fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında ulaşılan veriler yardımıyla sonuç ve öneriler aşağıda ifade edilmiştir.

- Üretilen geopolimer harç numunelerde PFA oranı arttıkça taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları azalma yönünde bir eğilim göstermiştir. PFA birim hacim ağırlığının, numunelerin karışımında kullanılan diğer malzemelere göre oldukça düşük (0.775 kg/dm^3 ; 24 saat 110°C etüv kurusu ve $75 \mu\text{m}$ elekten geçmiş) olması nedeniyle numunelerde atık oranının artması numunelerin birim ağırlıklarını azaltmıştır. Buna paralel olarak numunelerin içeriğindeki su oranının azalması ile taze birim ağırlık değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durumda kontrol numuneleri hariç en yüksek taze birim ağırlığa %10 oranında PFA ve 85 ml su içeren numunelerin olduğu görülmüştür (2.225 kg/dm^3). En düşük taze birim ağırlığa ise %30 oranında PFA ve 75 ml su içeriğine sahip numunelerden elde edilmiştir (2.112 kg/dm^3). Taze birim ağırlık değerlerinde % 30 oranında PFA içeren numunelerde, %10 PFA içeren numunelere göre % 5 oranında bir azalma saptanmıştır. 28 günlük sertleşmiş birim ağırlıkta ise günlük numunelere göre %30 PFA içeren numunelerin %10 PFA içeren numunelere göre sırasıyla 120°C , 140°C ve 160°C kür sıcaklığı uygulanan numunelerde %0.54, %0.82 ve %0.62 oranında azalma belirlenmiştir.

Aynı atık ve su oranına sahip 28 günlük numuneler, 7 günlük numunelere göre sertleşmiş birim ağırlıkları ortalama yaklaşık %0.5 oranında daha fazladır. 28 günlük numuneler arasında en yüksek sertleşmiş birim ağırlığa ise 120 °C sıcaklık kürü uygulanan %10 PFA ve 75 ml su içeriğine sahip numunelerde görülmüştür (1.950 kg/dm³).

- Yayılma değerleri aynı PFA oranına sahip olan numunelerde su miktarı azaldıkça beklenildiği üzere yayılma değerleri azalmıştır. Numune içeriğinde PFA oranı arttıkça yayılma değerlerinde yine azalma görülmüştür. 85 ml su içeren ve %10 oranında atık içeren numunelerin %30 oranında atık içeren numunelere göre %7.32 oranında daha fazla yayılma değerine sahiptir. Kontrol numunelerinde ise 75 ml ve 85 ml su içeriğine sahip numunelerin sırasıyla yayılma değerlerinin 19.33 cm ve 20.21 cm olduğu belirlenmiştir. 85 ml su içeriğine sahip kontrol numunelerinin %30 oranında PFA ve 85 ml su içeren numunelere göre 5.46 cm daha fazla yayılma değerine sahip iken bu değer 75 ml su içeriğine sahip numunelerde 6.11 cm daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- Priz başlangıç ve sonu süreleri değerlendirildiğinde numunelerde PFA oranının artması ile he priz başlangıç hem priz sonu süreleri %100 oranında UK içeren taze geopolimer harçlara göre daha geç gerçekleşmiştir. Buna neden olarak ortamdaki UK'nın azalması gösterilebilir. Bununla birlikte aynı bağlayıcı oranına sahip farklı su oranına sahip numunelerde ise su oranının artması priz sürelerini uzattığı görülmüştür.

- 120 °C ve 160 °C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelerde içeriğindeki PFA oranının artması ile kılcal su emme değerlerinde bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. 140 °C sıcaklık küründe ise %30 oranında PFA içeren numunelerin kılcal su emme değeri diğer oranlarda PFA içeren numunelere göre daha düşüktür. Kontrol numunelerine göre atık içeren tüm numunelerin kılcal su emme değerleri daha fazladır. Ayrıca 160 °C kür sıcaklığına tabi tutulan numunelerin kılcal su emme değerleri diğer kür sıcaklıklarına tabi tutulan numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Su emme değerlerinde ki en yüksek fark %40.05 oranı ile 160 °C kür sıcaklığı uygulanan 75 ml su içeriğine sahip kontrol numuneleri ile %30 oranında atık içeren numunelerin arasında saptanmıştır. Mikro yapısı incelenen numunelerin yapısal boşluklara sahip olduğu ve atık oranının artması ile bu boşluk oranının da arttığı SEM görüntülerinde detaylı olarak analiz edilmiştir. Numunelerde boşluk oranı ile birlikte uygulanan kür sıcaklığının artması ile su emme yüzdesinin arttığı görülmüştür.

Geopolimerden elde edilen herhangi bir yapı malzemesinin su ile temas eden yüzeylerde kullanılabilirliği dikkate alındığında kılcal su emme deneyinin yapılması ve su emme yüzde değerlerinin hesaplanması uygun görülmüştür. Ancak geopolimer harç numunelerin kontrol geopolimer harç numunelere göre su emme yüzdelерinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- 28 günlük numunelerde, numune içeriğindeki atık oranının artması ile ultrases geçiş hızı azalma eğilimi göstermektedir. Ultrases geçiş hızı değerlerinin numunelerde mikro yapısal boşlukların oranı ile değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Yapısal boşluk oranının artması ile numuneye verilen ses dalgalarının boşluklar içerisinde dağılması sonucunda geçiş hızının daha yavaş olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle PFA'nın yapısal boşluklu bir atık malzeme olması ve numunedeki oranının artması ile ultrases geçiş hızı beklenildiği üzere azalmıştır. Aynı kür sıcaklığı uygulanan ancak su içeriği farklı olan numunelerde ise numune içeriğindeki su oranının artması genel olarak numunelerin ultrases geçiş hız değerlerini azaltmıştır. 28 günlük geopolimer numunelerin sertleşme sürecinde su ile bir hidrasyon reaksiyonu olmadığı düşünülürse numune içeriğinde su oranının artması mikro yapısal boşluklarının oluşmasına neden olacağı düşünülmektedir. Bu yüzden su oranının artması ile genel olarak ultrases geçiş hız değerlerinin azalma eğilimi göstermesi beklenebilir bir durumdur. Numuneler üzerinde uygulanan farklı sıcaklık kürü uygulamaları sonucunda ise aynı tip numunelerde sıcaklığın artması ultrases geçiş hız değerlerini azaltarak olumsuz yönde bir etki göstermiştir. En yüksek ultrases geçiş hızı değerine 120 °C sıcaklık kürü uygulana 75 ml su ve %10 oranında atık içeren numunelerde belirlenmiştir (3.29 km/sn).

- Üretilen 28 günlük numunelerin uygulanan farklı kür sıcaklıkları altında basınç dayanımı davranışları değerlendirildiğinde; su içeriği fark etmeksizin genel olarak sıcaklık artışı ile dayanım kayıplarının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak aynı kür sıcaklıklarında numunelerin içeriğindeki su oranları dikkate alındığında su oranı azaldıkça basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımına; 24 saat hava küründen sonra 72 saat süresince 120 °C kür sıcaklığı uygulanan 75 ml su ve %10 oranında atık içeren numunelerde saptanmıştır (23.68 MPa). Betonarme standartlarında depreme dayanıklı bir yapıda kullanılabilecek beton kalitesine ulaşılacağını göstermiştir. Harç numunelerin basınç dayanım değerlerinde; numunelerin içeriğindeki PFA ile su oranının ve uygulanan kür sıcaklığının azalması ile artma eğilimi olduğu görülmüştür. 28 günlük numunelerin basınç dayanımları 7 günlük numunelere göre ortalama 2.00 MPa

daha fazla olduğu 28 günlük numuneler içerisinde en düşük basınç dayanımına ise 140 °C kür sıcaklığına tabi tutulmuş 85 ml su ve %30 oranında atık içeren numunelerde belirlenmiştir. (17.25 MPa). 28 günlük basınç dayanımları kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip kontrol numunesi (27.17 MPa, 120 °C kür sıcaklığı uygulanmış %100 oranında UK, 75 ml su içeriğine sahip numuneler) en yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer numuneden (23.68 MPa, 120 °C kür sıcaklığı uygulanmış %10 oranında PFA, 75 ml su içeriğine sahip numuneler) basınç dayanımının %12.85 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. 28 günlük geopolimer numuneler arasında ise en düşük dayanımın (17.25 MPa), en yüksek dayanıma (23.68 MPa) göre dayanım kaybı oranı yaklaşık %27 oranındadır. Numunelerin basınç dayanım davranışlarında atık oranının ne kadar etkin olduğu açıktır. Atığın numune içeriğinde oransal artışı ve buna paralel olarak numunenin yapısal boşluk yoğunluğunun artışı basınç dayanımını azaltma yönünde olumsuz bir etki yapmıştır. Bu süreçte elde edilen değerler doğrultusunda belirli ve sabit miktarda alkali aktivatörün (Na_2SiO_3) numunelerin kür sıcaklığı ile birlikte su ve atık oranının içeriğine göre dayanım üzerine etkisi de belirlenmiştir. Basınç dayanım değerleri üzerine genel bir değerlendirme yapıldığı takdirde elde edilen değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Karışım suyunun ve kür sıcaklığının artması dayanım değerlerine olumsuz yönde bir etki yaptığı saptanmıştır. Numunelerdeki atık oranının artması ile atığın içeriğindeki CaO belirlenen orandaki su ve çevresel CO_2 ile girdiği reaksiyon sonucu açığa çıkan kalsit oranındaki değişkenlik ve oluşan fazlardaki değişkenlik (silikat, silika hidrat vb.) dayanım değerleri üzerinde etkin olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte kür sıcaklığının artması yapısal fazlar üzerinde olumlu bir etki yaratmadığı görülmüş ve dayanım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

- XRD analizleri değerlendirildiğinde uygulanan kür sıcaklıklarındaki değişimlerin numunelerin sertleşme ve priz alma sürecinde mikro yapısında oluşan faz tiplerini ve içerik oranlarını direk olarak etkilediği gözlemlenmiştir. Kontrol geopolimer harç numunelerinin XRD analizlerinde ortaya çıkan fazların yüksek oranda mullit olması ve uygulanan kür sıcaklığının değişimi ile mullit oranının azalarak farklı fazlara dönmesi ile sertleşmiş harç deneyleri kapsamında yapılan basınç dayanım deneylerinden elde veriler doğrultusunda bu oluşan fazların numune dayanımı üzerine olumsuz yönde bir etki gösterdiği görülmüştür. Yine sertleşmiş harç deneyleri kapsamında yapılan sertleşmiş birim ağırlıklarının uygulanan kür sıcaklıklarındaki artış ile birim

ağırlıklarda azalma yönünde bir eğilim belirlenmiş ve bu azalmanın nedeni hidrasyon sürecinin gerçekleşmemesi sonucu numune içeriğindeki suyun buharlaşması olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte suyun azalması ve birbirine yakın tipte fazların oluşması ve oluşan faz oranının göre veya mikro yapısal bağ farklılıkları dikkate alındığında farklı kür sıcaklığı altında harcın mekanik ve fiziksel özelliklerine olumsuz yönde bir etki gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca numunelerde PFA kimyasal analizinde SiO_2 fazının ağırlıkça oranının oldukça az olduğu görülmüştür. Bu nedenle reaksiyon gerçekleşmesi için gerekli olan reaktif silis Na_2SiO_3 ile F sınıfı UK'dan temin edilerek kullanılmıştır.

- SEM görüntüleri yardımıyla bir mikro yapı analizi yapılacak olursa; numunelerde atık oranının artması ile yapısal boşluk yoğunluklarının arttığı görülmüştür. Bu boşluk yoğunluğunun artması ve oluşan yeni fazlar ile özellikle %30 oranında atık içeren numunelerde dramatik bir şekilde mekanik davranışlarının olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Özellikle %30 oranında PFA ile birlikte 85 ml su içerikli numunelerin uygulanan kür sıcaklıkları altında gerek basınç dayanımı gerekse birim ağırlıkları en düşük değerlere sahip olduğu saptanmıştır. Bu durum, su oranın geopolimer içeriğinde artması ile işlenebilirlik dışında olumlu bir etkisi belirlenememiştir. Oluşan fazların EDS analizleri değerlendirildiğinde ağırlık ve atom oranlarında en fazla görülen elementlerin O, Si, Ca, Al ve Fe olduğu saptanmıştır. Genel olarak geopolimer harç numunelerde ortaya çıkan fazların çoğunluğunun kalsit (CC), magnezit (MC), magnesian kalsit (MCC), ojit (C-M-F-S), albit (N-A-S), acmite (N-F-S), K-A-S-H olduğu belirlenmiştir. Silikat fazlarının yapısında ağırlıklı olarak Na, Fe, Al, Ca ve Mg görülmüş, silikahidratlarda ise K ve Al elemnetlerine rastlanmıştır. Sodyum içerikli silikatlı fazlar hemen hemen her numunede görülmüş, oluşan bu fazların kaynağının Na_2SiO_3 olduğu düşünülmektedir. Geopolimer harç numunelerin içeriğindeki Ca elementi kalsit (CaCO_3) bileşiğinden gelmekte iken, Na elementi ise Na_2SiO_3 bileşiğinden gelmektedir. Ortamdaki silikat ve silika hidratların varlığı numunelerin dayanımı üzerindeki etkinliği göstermektedir. Kalsit (CaCO_3) yoğunluğu, ise atığın içeriğindeki ağırlıkça yüksek oranda CaO bileşiğinin su ile reaksiyon girmesi sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 'nin tekrar dışarıdan CO_2 ile reaksiyona girmesi sonucu oluşmuştur. Farklı tiplerde (UK, PFA, su, standart kum ve Na_2SiO_3) silikat ve silika hidratlar ile kalsitlerin oluşumu beklenildiği üzere gerçekleşmiştir.

- Kullanılan formüller, malzemelerin gömülü enerjileri ve emisyonları ile ilgili farklı literatürlerin incelenmesi ile elde edilmiştir. Literatür çerçevesinde bir değerlendirme yapıldığında alt ve üst sınır şeklinde bir sınırlamaya rastlanmamış ancak malzemelerin birbirleri ile karşılaştırma yapıldığı görülmüştür. Buna göre f_c (MPa), geopolimer harç numunenin 28 günlük basınç dayanımı, E_f (Mj/ton.MPa) enerji parametresini, C_f (kg CO₂/ton.MPa) ise CO₂ parametresini ifade etmektedir. Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi OPC'ye yakın değerlere sahip E_f ve C_f parametrelerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi açısından OPC ile birlikte sürdürülebilir olabileceği görülmüştür. Ayrıca, PFA'nın salınması sırasında her bir yanma reaksiyonu (denklem 5.1. ve denklem 5.2) sonucunda açığa çıkan CO₂ gazı; süreçte tekrar kullanılabilmekte ve bu şekilde atmosfere verilen CO₂ emisyonu da önlenmektedir.

- Laboratuvar koşullarında üretilen geopolimer harç numunelerin genel olarak gerçek ve tahmini basınç dayanım verileri arasındaki ilişki değerlendirildiğinde dört adet model içerisinde en yakın tahmin verileri derin öğrenme model uygulamasında saptanmıştır. Derin öğrenme modelinde hesaplanan determinasyon katsayısı (R^2) değerinin 0.913 olması en yakın tahmin verilerinin derin öğrenme modeline ait olduğunu göstermektedir. Derin öğrenme modelinden sonra ise bir diğer model olan Genelleştirilmiş Lineer modele ait tahmin verilerinin gerçek verilere en yakın değerler olduğu belirlenmiş ve determinasyon katsayısı (R^2) 0.852 olarak hesaplanmıştır.

- Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda bir şeker fabrikası atığı olan PFA'nın yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi sürecinde üretilen geopolimer harcın kullanım alanına göre farklı şekillerde kullanılabileceği düşünülmektedir. Üretilen harcın yapılan deneyler ölçeğinde yoğunluğu ve dayanım sınıfı değerlendirildiğinde sadece bu iki parametre için harcın taşıyıcı hafif beton sınıfı değerlerine sahip olduğu görülmüş, ancak bu standarda girebilmesi için deney yelpazesinin genişletilerek numuneler üzerinde uygulanması gerekmektedir. Bu atığın değerlendirilmesi kapsamında yapılan çalışmadan yola çıkarak numunelerin üretimi sürecinde farklı oranlarda ve farklı puzolanik endüstriyel atıklar ile çalışılabileceği gibi optimum koşullar belirlenip aktif olarak uygulamalarda kullanılabilirliğin sağlanacağı düşünülmektedir. Böylelikle hem üretim ekonomisi anlamında hem çevresel etki anlamında bu atığın geri dönüşümü sağlanarak ülke ve şeker sanayine sağlayacağı birçok yararı olacağı değerlendirilmektedir.

- Genel olarak CaO oranı yüksek bağlayıcılarda alkali aktivasyon yönteminin daha etkili olduğu bilinmektedir. Geopolimerlerde ise N-A-S-H varlığı ve etkisi daha fazladır. Ancak literatürde CaO içeren bağlayıcılarında geopolimer olarak değerlendirilebileceği görülmüş, bu yüzden geopolimer uygulaması tercih edilmiştir. PFA içeriğindeki ağırlıkça yüksek CaO oranı geopolimer üretimine engel olmamıştır. Ancak numunelerde atık oranının artması bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin olumsuz yönde eğilim göstermesine neden olmuştur. Bu durum; atık yoğunluğunun 1 kg/dm^3 değerinin (0.775 kg/dm^3 ; 24 saat 110°C etüv kurusu ve $75 \mu\text{m}$ elekten geçmiş halde) altında olması sonucu numune porozitesini arttırması ve atığın içeriğindeki CaO oranının ağırlıkça fazla olması sonucu açığa çıkan CaCO_3 fazının olumsuz etkisi şeklinde yorumlanabilir. PFA içeriğinde ağırlıkça SiO_2 oranının az olması nedeniyle aktivatör olarak Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Ancak ileriki deneysel çalışmalarda NaOH kullanılması önerilmektedir.

- Çalışmanın en güçlü yönü endüstriyel bir atık olan PFA'nın yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği ve geri dönüşümünün sağlanması hakkında bir fikir edinebilmektir. Bir şeker fabrikası atığı olan PFA sadece Eskişehir Şeker Fabrikası şeker üretim sürecinde yıllık 50,000-60,000 ton aralığında açığa çıkmaktadır. Bu atığın depolanma ve çevresel olumsuz etkileri dikkate alındığında geri dönüşüm kapsamında değerlendirilebilmesi bu çalışmanın en güçlü yönüdür. Yapılan çalışma laboratuvar ortamında atığın bir yapı malzemesi olarak geri dönüşümü sağlanması anlamında başarılı olduğu ancak sektörde uygulanabilirliği hakkında daha kapsamlı ve süreli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

İleri ki dönem yapılacak çalışmalarda PFA'nın farklı tipte alkali aktivatörler ve diğer puzolanik endüstriyel atıklar (SD, YFC vb.) ile geopolimer harç numuneler üretilbilecektir. Bu çalışmada uygulanan kür sıcaklıklarından daha düşük kür sıcaklıkları uygulanması geopolimerizasyon sürecine olumlu yönde bir etki göstereceği düşünülmektedir. PFA içeriğindeki SiO_2 oranının düşük olması reaktif silis gereksinimine işaret etmektedir. Özellikle reaktif silis içeriğine sahip aktivatör veya endüstriyel atıkların kullanılması silikatların oluşumunu olumlu yönde etkileyeceği tahmin edilmektedir. Geopolimer harç numunelerin üretimi sürecinde kullanılacak endüstriyel atıkların $65 \mu\text{m}$ 'lik (çimento tane çapına yakın) elekten geçirilmesi yüzey aktifliğini arttırarak reaksiyon sürecinin daha etkin olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca PFA'nın sadece puzolanik atıklar ile değil çimento ile birlikte karışımlarda kullanılarak vereceği reaksiyonlar da incelenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Atabey, İ.İ., 2017, F Sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 200 s.
- Aleem, M.A., Arumairaj, P.D., 2021, Geopolymer concrete—a review, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies* 1 (2), p.118-122.
- Ameri F. K., Zareei S. A., Behforouz B., 2020, Zero-cement vs. cementitious mortars: An experimental comparative study on engineering and environmental properties, *Journal of Building Engineering* 32, 101620.
- Apostolopoulou, M., Armaghani, D.J., Bakolas, A., Douvika, M.G., Moropoulou, A., Asteris, P.G., 2019, Compressive strength of natural hydraulic lime mortars using soft computing techniques, *Procedia Structural Integrity* 17, p.914-923.
- Arslan, A.A., 2019, Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kür koşullarının etkisinin incelemesi, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, 88 s.
- Bakri, A.M.M.A., Kamarudin, H.K., Bnhussain, M., Nizar, I.K., Mastura, W.I.W., 2011, Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement-a review. *Journal of Asian Scientific Research, Asian Economic and Social Society*, 1(5), p.247-253.
- Bangaru, S.S., Wang, C., Hassan, M., Jeon, H.W., Ayiluri, T., 2019, Estimation of the degree of hydration of concrete through automated machine learning based microstructure analysis – a study on effect of image magnification, *Adv. Eng. Inform.* 42 (February), 100975, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100975>.
- Barsoum, M.W., Ganguly, A., Hug, G., 2006, Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt. *Journal of the American Ceramic Society*, 89, p.3788-3796.
- Bashar, S.M., Haruna, S., Wahab, M.M.A., Liew, M.S., Haruna, A., 2019, Mechanical and microstructural properties of high calcium fly ash one-part geopolymer cement made with granular activator, *Heliyon* 5 (9), e02255.
- Binici, H., Eken, M., Aksoğan, O., 2012, Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri. *Electronic Journal of Construction Technologies*, 8(2), p.12-25.
- Budh, C.D., Warhade, N.R., 2014, Effect of molarity on compressive strength of geopolymer mortar. *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(1), p. 83-86.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bondar, D., 2013, Geopolymer concrete as a new type of sustainable construction materials. In Proceedings of the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (ICSCMT), p.18-21.
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezaniapour, A.A., 2011, Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete. *ACI Materials Journal*, 108(1), p.64-72.
- Chen, C.T., Gu, G.X., 2019, Machine learning for composite materials, *MRS Communications*, 9(2), p.556-566.
- Chiaia, B., Fantilli, A.P., Guerini, A., Volpatti, G., Zampini, D., 2014, Eco-mechanical index for structural concrete, *Construction and Building Materials* 67, p.386-392.
- Chopra, P., Sharma, R.K., Kumar, M.M., Chopra, T., 2018, Comparison of Machine Learning Techniques for the Prediction of Compressive Strength of Concrete, *Advances in Civil Engineering (Hindawi)*, V.2018, p.1-8.
- Dantas, A.T.A., Leite, M.B., Nagahama, K.DJ., 2013, Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks, *Construction Building Materials*, 38, p.717-722.
- Davidovits, J., Davidovits, F., 2001, *The Pyramids: An Enigma Solved*. 2nd Revised Ed., Saint-Quentin France, Éditions J. Davidovits, p. 421.
- De Rousseau, M.A., Laftchiev, E., Kasprzyk, J.R., Rajagopalan, B., Srubar W.V., 2019, A comparison of machine learning methods for predicting the compressive strength of field-placed concrete, *Construction and Building Materials*, 228, 116661.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., Panias, D., 2009, Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology, *Journal of Materials Science* 44, p.3719-3730.
- Djobo, J.N.Y., Elimbi, A., Tchakouté, H.K., Kumar, S., 2016, Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, p.606-614.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Van Deventer, J.S.J., 2007, The role of inorganic polymer technology in the development of 'Green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37, p.1590–1597.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., 2007, Pozolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, p.263-275.
- Felekoğlu, B., Alternatif Yapı Malzemeleri Ders Notları Bölüm. 8, Geopolimerler, Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, p.1-41.
- Ghafoori, N., Najimi, M., Radke, B., 2016, Natural pozzolan-based geopolymers for sustainable construction. *Environmental Earth Sciences*, 75(14), p.1110.
- Görhan, G., Kürklü, G., 2014, Alkali tuz içeriğinin geopolimer cephe kaplama malzemesi özelliklerine etkisi (The effect of alkaline salt content on geopolymer surface materials properties). The 7th. In National Symposium of Roof and Facade, p.3-4.
- Guades, E.J., 2016, Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio. *Construction and Building Materials*, 127, p.484-493.
- Gündeşli, U., 2008, Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Çukurova Üniversitesi, s.82.
- Hammond, G., Jones, C., 2011, Embodied carbon, The inventory of carbon and energy (ICE), University of Bath and Bsria, p. 12, ISBN. 978 0 86022 703 8.
- Hardjito, D., 2003, Geopolymer concrete: Turn waste into environmentally friendly concrete. International conference on recent trends in concrete technology and structures, 10–11 September 2003, Kumaraguru College of Technology, Coimbatore, India, p.129-140.
- Hossaina, Md.U., Poona, C.S., Lob, I.M.C., Chengb, J.C.P., 2017, Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study, *Resources, Conservation and Recycling* 120, p.199-208.
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M.W., 2016, Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 125, p.1229-1240.
- Juenger, M.C.G., Siddique, R., 2015, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, *Cement and Concrete Research*, 78, p. 71.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kaplan, H., Binici, H., 1996, Tras ve traslı çimentolar. Çimento ve Beton Dünyası, 1(1), s.23-30.
- Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., 2018, Investigation of the relationship between strength, curing temperature and void ratio in geopolymer mortar with variance analysis, Sakarya University Journal of Science 22 (2), p.248-256.
- Kavas, M.F., Leblebici, M.J., 2004, Kalite ve işletme kontrol laboratuvarları el kitabı, 224, Türkiye Şeker Fabrikaları Genel Müdürlüğü, p.1-472.
- Keyte, L.M., 2009, Fly ash glass chemistry and inorganic polymer cements. In Geopolymers, Woodhead Publishing, p.15-36.
- Khan, M.I., Azizli, K., Sufian, S., Khan, A.S., Ullah H., Man Z., 2014, Geopolymer as Sustainable Binder of the 21st Century: A Review, World Sustainability Forum 2014 – Conference Proceedings Paper, p.1-7
- Khan, M. Z. N., Hao, Y., & Hao, H. (2016). Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium fly ash. Construction and Building Materials, 125, p.809-820.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y., 2004, Development of sustainable cementitious materials. In Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology. Beijing, China, pp.55-76.
- Li, H., Xu, W., Yang, X., Wu, J., 2014, Preparation of Portland cement with sugar filter mud as lime-based raw material. Journal of Cleaner Production, 66, p.108-111.
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., Sahmaran, M., 2020, Optimization of brick waste-based geopolymer binders at ambient temperature and pre-targeted chemical parameters, Journal of Cleaner Production 68, 122285.
- Marani, A., Nehdi M.L., 2020, Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites, Construction and Building Materials, 265, 120286.
- Mehta, A., Siddique, R., 2016, An overview of geopolymers derived from industrial by-products. Construction and building materials, 127, p.183-198.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mijarsh, M.J.A., Johari, M.M., Ahmad, Z.A., 2015, Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. *Cement and Concrete Composites*, 60, p.65-81.
- Noor-ul-Amin, F.M., Muhammad, K., 2016, Synthesis and characterization of geopolymer from bagasse bottom ash, waste of sugar industries and naturally available china clay. *Journal of Cleaner Production*, 129, p.491-495.
- Özcan, U., Güngör, S., 2019, Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, p.176-182.
- Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., Chindaprasirt, P., 2017, Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), p. 2202-2210.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S., Chindaprasirt, P., 2015, High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*, 98, p.482-488.
- Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J., 2009, University of Melbourne, Australia, Introduction to geopolymers, *Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, p.1-11.
- Purdon, A.O., 1940, The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), p.191-202.
- Purnell, P., Black, L., 2012, Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters, *Cement and Concrete Research* 42, p.874-877.
- Rao, G., Rao, T.G., 2015, Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(11), p.2067-3074.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S., 2013, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and Building Materials* 47, p.409-418.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Saloma, S., Hanafiah, H., Elysandi, D.O., Meykan, D.G., 2017, Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor. In AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC. 1903(1), p.1-11.
- Saloma, S., Hanafiah, H., Mawarni, A., 2016, Geopolymer Mortar with Fly Ash. MATEC Web of Conferences, 78, p.1-6.
- Saloma, S., Hanafiah, H., Pratiwi, K.I., 2016, Effect NaOH Concentration on Bagasse Ash Based Geopolymerization. In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 78(1), pp1-10.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P., 2003, Alkali-Activated Cements and Concretes, 1st ed., p.392, <https://doi.org/10.1201/9781482266900>.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya S.K., 2015, Geopolymer concrete: A review of some recent developments. Construction and Building Materials, 85, p.78-90.
- Song, Y., Huang, Z., Shen, C., Shi, H., Lange, D.A., 2020, Deep learning-based automated image segmentation for concrete petrographic analysis, Cement and Concrete Research, 135, 106118.
- Sun, L., Koopialipoor, M., Armaghani D.J., Tarinejad, R., Tahir, M.M., 2019, Applying a meta-heuristic algorithm to predict and optimize compressive strength of concrete samples, Eng. Comput., <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00875-1>.
- Telikani, A., Amirhessam, T., Wolfgang, B., Gandomi, A.H., 2021, Evolutionary Machine Learning: A Survey, ACM Computing Surveys, 54(8), 161, p.1-35.
- Tokay, H., 2019, Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi. Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, 72.
- Topçu, İ.B., 1995, Çelik Endüstrisi Atıklarının Çimento ile Katılaştırılması, İMO Ankara Şubesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, p.263-272.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M., 2001, Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2), p.11-23.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Topçu, İ.B., Sofuoğlu, T., 2017, Properties of mortars produced with PKF press filter waste, Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), Vol(2), p.347-360.
- Topçu, İ.B., Sofuoğlu, T., 2020, Pres filtre atığı ve uçucu kül ile elde edilen geopolimer harçların farklı koşullar altında birim ağırlığı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 7(2), p.806-823.
- Topçu, İ.B., Sofuoğlu, T., 2021, Properties of geopolymers produced with sugar press filter waste and fly ash under certain curing conditions, Journal of Building Engineering, 44, 102938, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102938>.
- Topçu, İ.B., Sofuoğlu, T., 2021, Properties of Geopolymers Produced with Sugar Plant Waste, First International Geopolymeric Composites Congress, Proceedings of GEC-2021, ISSN 2792-0267, p.49-60.
- Topçu, İ.B., Toprak, M.U., 2009, Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2), p.153-164.
- Turner, L.K., Collins, F.G., 2013, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials 43, p.125-130.
- Urhan, S., 2000, Temel yapı malzemesi çimentonun öyküsü. Metalurji-Malzeme 2000, 24(124), s. (yayınlanmamış).
- Wazien, A.W., Abdullah, M.M.A.B., Razak, R., Rozainy, M.A.Z.M.R., Tahir, M.F.M., 2016, Strength and density of geopolymer mortar cured at ambient temperature for use as repair material. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 133(1), p.1-8.
- Vejmelkova, E., Konakova, D., Kulovana, T., Keppert, M., Zumar, J., Rovnanikova, P., Kersner, Z., Sedlmajer, M., Cerny, R., 2015, Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. Cement & Concrete Composites, 55, p. 259.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Xiao, R., Ma, Y., Jiang, X., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Y., Huang, B., He, Q., 2020, Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental impacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature, Journal of Cleaner Production 252, p.119610.

Ziolkowski, P., Niedostatkiewicz, M., 2019, Machine learning techniques in concrete mix design, Materials 12 (8), p.1256.

