



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ SİLİS DUMANLI HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE UÇUCU KÜLÜN VE ÇELİK FİBERİN ETKİSİ

SUVAT DENİZ

NİSAN 2025

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ SİLİS DUMANLI HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE UÇUCU KÜLÜN VE ÇELİK FİBERİN ETKİSİ

SUVAT DENİZ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Nisan 2025

Suvat DENİZ tarafından **Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR** danışmanlığında hazırlanan “**Alkali ile Aktive Edilmiş Silis Dumanlı Harçların Özellikleri Üzerine Uçucu Külün ve Çelik Fiberin Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Suvat DENİZ

ÖZET

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ SİLİS DUMANLI HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE UÇUCU KÜLÜN VE ÇELİK FİBERİN ETKİSİ

DENİZ, Suvat

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Nisan 2025, 108 sayfa

Bu çalışmada, ortam sıcaklığında kür edilen alkali ile aktive edilmiş silis dumanı (SD) esaslı harçların mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerine uçucu kül (UK), çelik fiber (ÇF) ve yüksek sıcaklığın etkileri araştırılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçlarda silis dumanı yerine UK ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksitten (SH) ve sodyum silikattan (SS) oluşmakta olup, SH/SS oranları ise 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların özelliklerini karşılaştırmak amacı ile aynı su/bağlayıcı oranına sahip Portland Çimento (PC) esaslı kontrol harçları üretilmiştir. Ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol harçlarının birim ağırlık (ρ_a), ultrasonik geçiş hızı (U_{pv}), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve basınç dayanımı (f_c) sonuçlarına ek olarak mikroyapısal analizler de gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum SH/SS oranının 0.3 veya 0.4 olduğu belirlenmiştir ve SH/SS oranının 0.3 olduğu karışımlara hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranında ÇF ilavesi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda optimum UK ve ÇF oranının sırasıyla %15 ve %1 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, SD esaslı alkali ile aktive edilmiş harçlar, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında matrisin gözenekli bir yapıya dönüşmesi ve ÇF'nin oksitlenerek özelliklerini kaybetmesi nedeniyle mekanik özelliklerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Alkali ile aktive edilmiş harçlar, silis dumanı, C sınıfı uçucu kül, çelik fiber, yüksek sıcaklık

SUMMARY

EFFECT OF FLY ASH AND STEEL FIBER ON THE PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED SILICA FUME MORTARS

DENİZ, Suvat

Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

April 2025, 108 pages

In this study, the effects of fly ash (FA), steel fiber (SF), and high temperature on the mechanical and microstructural properties of silica fume (SF) based alkali-activated mortars cured at ambient temperature were investigated. FA was used as a partial replacement for SF in alkali-activated mortars at replacement ratios of 10%, 15%, 20%, and 25% by weight. The alkali activators used in the mixtures consisted of sodium hydroxide (SH) and sodium silicate (SS), with SH/SS ratios of 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6. To compare the properties of alkali-activated mortars, Portland cement (PC) based control mortars with the same water/binder ratio were produced. The unit weight (ρ_a), ultrasonic pulse velocity (U_{pv}), flexural strength (f_{fs}), compressive strength (f_c), and microstructural analyses were conducted on both control and alkali activated mortars exposed to ambient and high temperatures. The results indicated that the optimum SH/SS ratio was 0.3 or 0.4, and steel fibers were added to these mixtures where the SH/SS ratio was 0.3 at volume fractions of 0.5%, 1%, and 1.5%. It was concluded that the optimal FA and SF ratios were 15% and 1%, respectively. Furthermore, when exposed to high temperatures, SF based alkali activated mortars exhibited a significant reduction in mechanical properties due to the porous transformation of the matrix and the oxidation of steel fibers, which led to the loss of their properties.

Keywords: Alkali activated mortars, silica fume, class C fly ash, steel fiber, high temperature

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ortam sıcaklığında kür edilen silis dumanı (SD) esaslı alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde uçucu kül (UK), çelik fiber (ÇF) ve yüksek sıcaklığın etkileri incelenmiştir. Harç karışımlarında, bağlayıcı olarak SD'nin yerine farklı oranlarda (%10, %15, %20, %25) UK kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) kullanılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçlarda çeşitli SH/SS oranları (0.3, 0.4, 0.5, 0.6) kullanılmıştır. Optimum SH/SS oranı belirlendikten sonra ise bu karışımlara hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında ÇF ilave edilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların özellikleri Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçları ile kıyaslanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak her aşamada destek olan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmamda görüş ve önerilerini aldığım Prof. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na, Prof. Dr. Metin Hakan SEVERCAN'a ve Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN'e teşekkürlerimi sunarım. Deneyler sırasında katkılarıyla çalışmalarına destek veren kıymetli hocam Sayın Metehan BULUT'a şükranlarımı iletmek isterim. Ön lisans ve lisans eğitimim boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli dostlarım Sayın Selim MIZRAK'a, Mustafa ÖZŞAHİN'e ve Özge YOLDAŞ'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatı boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme minnettarım.

Bu çalışma, MMT2023/9-BAGEP numaralı “Alkali ile Aktive Edilmiş Silis Dumanlı Harçların Özellikleri Üzerine Uçucu Külün Etkisi” isimli BAP projesi ile desteklenmiş olup, projeye destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
BÖLÜM II	4
ALKALİ AKTİVASYON	4
2.1 Alkali ile Aktivasyonun Tanımı ve Tarihi Gelişimi	4
2.2 Alkali Aktivatörlerin Kullanım Alanları.....	5
2.3 Alkali Aktivatör Çeşitleri.....	6
2.3.1 Sodyum hidroksit	6
2.3.2 Sodyum silikat.....	7
2.3.3 Sodyum karbonat	8
2.3.4 Sodyum sülfat.....	8
BÖLÜM III	9
SİLİS DUMANI	9
3.1 Silis Dumanının Oluşumu ve Genel Yapısı	9
3.2 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	9
3.3 Silis Dumanının Kullanım Alanları	11
3.4 Silis Dumanının Hidratasyon Isısına Etkisi	12
3.5 Silis Dumanının Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi	13
BÖLÜM IV	15
UÇUCU KÜL	15
4.1 Uçucu Külün Oluşumu ve Genel Yapısı.....	15
4.2 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	16

4.3 Uçucu Külün Kullanım Alanları	18
4.4 Uçucu Külün Hidratasyon Isısına Etkisi	19
4.5 Uçucu Külün Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi	20
BÖLÜM V	22
YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	22
5.1 Alkaliler ile Yapılmış Çalışmalar	22
BÖLÜM VI	31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
6.1 Kullanılan Malzemeler	31
6.1.1 Çimento	31
6.1.2 Silis dumanı	34
6.1.3 Uçucu kül	34
6.1.4 Bazalt kumu	35
6.1.5 Alkali aktivatörler	36
6.1.6 Süperakışkanlaştırıcı ve karışım suyu	36
6.1.7 Çelik fiber	36
6.2 Karışım Oranları	36
6.3 Numunelerin Üretimi	38
6.4 Yüksek Sıcaklık Uygulaması	38
6.5 Yapılacak Deneyler	39
6.5.1 Taze harç deneyleri	39
6.5.1.1 Yayılma ve Taze birim ağırlık	39
6.5.2 Sertleşmiş harç deneyleri	40
6.5.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık	40
6.5.2.2 Ultrases geçiş hızı	40
6.5.2.3 Eğilme dayanımı	41
6.5.2.4 Basınç dayanımı	42
6.6 Yüksek Sıcaklıklar Sonrasındaki Deneyler	42
6.7 XRD Analizleri	43
6.8 FTIR Analizleri	43
6.9 SM Analizleri	43
6.10 FESEM ve EDX Analizleri	43
BÖLÜM VII	44
DENEYSEL SONUÇLAR	44

7.1 Taze Harç Deney Sonuçları	44
7.1.1 Yayılma ve Taze birim ağırlık	44
7.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları	45
7.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık	45
7.2.1.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları.....	45
7.2.1.2 Çelik fiber içeren numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları.....	46
7.2.3 Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları	47
7.2.3.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızları	47
7.2.3.2 Çelik fiber içeren numunelerin ultrases geçiş hızları	48
7.2.4. Eğilme dayanımı	49
7.2.4.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin eğilme dayanımları	49
7.2.4.2 Çelik fiber içeren numunelerin eğilme dayanımları	51
7.2.5 Basınç dayanımı	53
7.2.5.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin basınç dayanımları.....	53
7.2.5.2 Çelik fiber içeren numunelerin basınç dayanımları.....	55
7.3 Yüksek Sıcaklıklar Sonrasındaki Deney Sonuçları	57
7.3.1 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki sertleşmiş birim ağırlık.....	57
7.3.1.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları.....	57
7.3.1.2 Çelik fiber içeren numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları.....	58
7.3.2 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki ultrases geçiş hızı	59
7.3.2.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızları	59
7.3.2.1 Çelik fiber içeren numunelerin ultrases geçiş hızları	61
7.3.3 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki eğilme dayanımı	62
7.3.3.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin eğilme dayanımları	62
7.3.3.2 Çelik fiber içeren numunelerin eğilme dayanımları	64
7.3.4 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki basınç dayanımı.....	65
7.3.4.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin basınç dayanımları.....	65
7.3.4.2 Çelik fiber içeren numunelerin basınç dayanımları.....	67
7.4 Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler	68
7.4.1 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	68
7.4.2 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki	71
7.5 XRD Analizleri	73
7.6 FTIR Analizleri.....	74
7.7 SM Analizleri.....	76

7.8 FESEM ve EDX Analizleri.....	79
BÖLÜM VIII	83
SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR	86
ÖZ GEÇMİŞ.....	107
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	108



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alkali aktivatörlerin gruplandırılması	6
Çizelge 3.1. Silikon oranına göre silis dumanı içerisindeki SiO ₂ miktarları	9
Çizelge 3.2. Silis dumanının puzolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının doğal puzolan ve uçucu kül ile karşılaştırılması	10
Çizelge 3.3. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu	11
Çizelge 4.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	17
Çizelge 4.2. Çimento ve beton üretiminde kullanılabilecek uçucu küllerin sınır değerleri	19
Çizelge 6.1. PC, SD ve UK'nın özellikleri	32
Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan çelik fiberin özellikleri	36
Çizelge 6.3. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Silis dumanı katkılı çimento hamurlarında hidrasyon ısısı	13
Şekil 4.1. Küresel uçucu kül parçacıklarını gösteren SEM görüntüsü	15
Şekil 4.2 F ve C sınıfı uçucu külün SEM görüntüleri	17
Şekil 4.3 Uçucu kül içeren çimento hamurlarında hidrasyon ısısı	20
Şekil 6.1. PC, SD ve UK'nın üçlü diyagramı	33
Şekil 6.2. PC, SD ve UK'nın tane dağılım analizleri	33
Şekil 6.3. PC, SD ve UK'nın XRD analizleri	33
Şekil 6.4. PC, SD ve UK'nın FTIR analizleri	34
Şekil 6.5. Bazalt kumunun elek analizi	35
Şekil 6.6. Numunelere uygulanan sıcaklık ve ısınma süresi	39
Şekil 7.1. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri .	46
Şekil 7.2. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri	47
Şekil 7.3. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri	478
Şekil 7.4. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri ..	479
Şekil 7.5. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri .	51
Şekil 7.6. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri	52
Şekil 7.7. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri ..	54
Şekil 7.8. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri	54
Şekil 7.9. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi	58
Şekil 7.10. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi	59
Şekil 7.11. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi	60
Şekil 7.12. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi	62
Şekil 7.13. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi	63

Şekil 7.14. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi.....	65
Şekil 7.15. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi.....	63
Şekil 7.16. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi.....	65
Şekil 7.17. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasındaki ilişki.....	69
Şekil 7.18. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasındaki ilişki	70
Şekil 7.19. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasındaki ilişki.....	71
Şekil 7.20. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasındaki ilişki	72
Şekil 7.21. a) PC esaslı YDH (KH) ve b) 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki XRD analizleri.....	74
Şekil 7.22. a) PC esaslı YDH (KH) ve b) 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FTIR analizleri	76
Şekil 7.23. ÇF içermeyen PC esaslı YDH (KH), 15UK-0.4 ve 25UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki SM görüntüleri	78
Şekil 7.24. ÇF içeren PC esaslı YDH (KH), 15UK-0.3 ve 25UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki SM görüntüleri ..	78
Şekil 7.25. ÇF içermeyen PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FESEM/EDX analizleri.	82
Şekil 7.26. ÇF içeren PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FESEM/EDX analizleri.	82

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 6.1. a) Karışım malzemeleri, b) kalıplanmış karışımlar, c) 1000 °C'deki numuneler, d) 1000 °C'den sonra numuneler, e) f_{fs} testi ve f) f_c testi. ..	32
Fotoğraf 6.2 Yayılma deneyi	40
Fotoğraf 6.3 U_{pv} deneyinin yapılışı.....	41
Fotoğraf 6.4 f_{fs} deneyinin yapılışı	41
Fotoğraf 6.5 f_c deneyinin yapılışı.....	42



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
μm	Mikro metre
ρ_a	Birim ağırlık
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum hidroksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
Ca_3SiO_5	Haturit
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Alçıtaşı
3CaSiO_2	Alit
$\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2$	Kalsiyum manganat
Ca_2SiO_4	Larnit
CaSO_4	Anhidrit
$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$	Brownmillerite
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Anortit
$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Diyopsit
Fe_2O_3	Hematit
f_c	Basınç dayanımı
f_s	Eğilme dayanımı
KOH	Potasyum hidroksit
$(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Analbit
NaOH	Sodyum hidroksit
Na_2SiO_3	Sodyum silikat
Na_2SO_4	Sodyum sülfat
U_{pv}	Ultrases geçiş hızı

Kısaltmalar	Açıklama
AAB	Alkali ile Aktive Edilmiş Bağlayıcılar
AAYDH	Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Dayanımlı Harç
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BK	Bazalt Kumu
C-A-S-H	Kalsiyum Alümina Silikat Hidrat
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
CEM I	Portland Çimentosu
cm	Santimetre
ÇF	Çelik Fiber
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
g	Gram
KH	Kontrol Harcı
kV	Kilovolt
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N-A-S-H	Sodyum Alümina Silikat Hidrat
PÇ	Portland Çimentosu
s	Saniye
SD	Silis Dumanı
SH	Sodyum Hidroksit
SM	Stereo mikroskop
SS	Sodyum Silikat
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül
XRD	X ışını Kırınımı
YDH	Yüksek Dayanımlı Harç

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Giriş

Portland çimentosu (PC), bileşenindeki malzemelerinin kolay temini, uygulama kolaylığı ve uygulamadaki çok yönlülüğü nedeniyle beton üretiminde temel bağlayıcı malzeme olarak tercih edilmektedir (Sarıdemir ve Çelikten 2023; Tushar vd., 2022). Ancak, son yıllarda artan iklim değişikliği ve küresel ısınma nedeniyle PC, üretimi sürecinde ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi, CO₂ emisyonları ve doğal kaynakların tükenmesiyle eleştirilmektedir (Ramezaniapour ve Moeini 2018). Bu nedenle, beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan PC'nin yerini alabilecek çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi ve yapı malzemeleri endüstrisinde PC kullanımından kaynaklı CO₂ emisyonunun azaltılması gerekmektedir (Cong ve Mei 2021; Çelikten vd., 2020; Xie vd., 2020). Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar (AAB), iyi dayanıklılık ve erken yüksek mukavemet gibi üstün performansları nedeniyle PC esaslı bağlayıcıların yerini alabilecek oldukça umut verici bir yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir (Yip vd., 2005). AAB'ler, alümino-silikat bazlı malzemelerden ve alkali aktivatörlerden üretilen yapı malzemeleridir. AAB'ler olarak kullanılan malzemeler kaolin, metakaolin, kırmızı çamur ve bazik pomza gibi doğal kaynaklardan veya silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) gibi çeşitli endüstriyel yan ürünlerden oluşmaktadır (Cong ve Mei 2021; Luo vd., 2012; Yip vd., 2005). AAB'lerin üretiminde genellikle sodyum silikat (Na₂SiO₃), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum silikat (K₂SiO₃) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi aktivatörler sıklıkla kullanılmaktadır (Sumesh vd., 2017; Zhang vd., 2018).

Son yıllarda, alkali ile aktive edilmiş harç ve beton üretimlerinde, çimento yerine tamamen endüstriyel yan ürünlerin kullanılması, cazip bir araştırma alanı haline gelmiştir (Gunasekara vd.; 2016; Pilehvar vd., 2018; Yazdi vd., 2018). Alkali ile aktive edilmiş harç ve betonlar, alüminyum (Al) ve silisyumun (Si) içeren malzemelerin alkali ortamda reaksiyona sokulmasıyla meydana gelen alümino-silikat kaynaklı malzemelerdir (Davidovits 1991). Alkali ile aktive edilmiş harç ve betonların bileşikleri, öncüllerde bulunan Al ve Si polikondenzasyonu ile meydana gelir. Yani, yapı, güçlü alkali çözeltide alümino-silikat reaktanların çözülmesiyle amorf formda tekrarlanan polimerik Si-O-Al-

O bağların üretilmesiyle oluşur (Alanazi vd., 2019; Davidovits 2005). Polimerik bağlar, alkali ile aktive edilmiş harç ve betonlara dayanım özellikleri kazandırır. Bu özellikler alkali aktivatörlerin ve bağlayıcıların özelliklerine bağlıdır (Topark-Ngarm vd., 2015). Özellikle bağlayıcıların kalsiyum içeriği ortaya çıkacak hidratasyon ürünleri üzerinde etkilidir. Alkali aktivatörlerle, düşük kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcıların temel reaksiyon ürünleri sodyum alümino silikat hidrat (N-A-S-H) iken, yüksek kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcıların temel reaksiyon ürünleri kalsiyum-(alümino)-silikat-hidrattır (C-(A)-S-H) (Çelikten vd. 2019; Fernández-Jiménez ve Palomo 2005). Orta seviyede kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcıların temel reaksiyon ürünleri ise N-A-S-H ve C-(A)-S-H'dır (Çelikten vd., 2019; Puertas vd., 2000; Yip vd., 2005).

Yüksek miktarda SiO_2 içeren silis dumanı (SD), silisyum metal veya silisyum metal alaşımlarının üretiminden meydana gelen endüstriyel bir yan üründür. Amorf ve çok ince taneli bir malzeme olduğu için oldukça reaktif bir puzolanik etkiye sahiptir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, sulu bir ortamda kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girdiğinde hidrolik bağlayıcı özelliği gösterir. Aynı zamanda son derece küçük partikül boyutları nedeniyle dolgu etkisi oluşturur (Mardani-Aghabaglou vd., 2014). Bu etkilerinden dolayı sadece mekanik özellikleri arttırmakla kalmaz, aynı zamanda ince partikül boyutuna sahip olması sebebiyle agrega ve bağlayıcı arasındaki ara yüzey geçiş bölgesini de iyileştirir (Cheah vd., 2019; Dybel ve Furtak 2017). Ayrıca taze karışımın terleme ve segregasyon oluşumunu azaltır (Dybel ve Furtak 2017; Cheah vd., 2019).

Uçucu kül (UK), elektrik enerjisi üretimi için termik santrallerde buhar jeneratörü kazanlarını ısıtmak için yakıt olarak kullanılan pulverize kömürden elde edilen bir yan üründür. Çok ince olan ve yakıt gazları ile birlikte bacadan dışarı hareket eden UK, elektrostatik veya elektromekanik yöntemlerle tutularak depolanır. UK temel olarak SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO 'dan oluşur. Amorf ve ince taneli malzeme oldukları için puzolanik etkiye sahiptirler (Chen vd., 2022). UK'lar CaO içeriklerine göre C sınıfı ve F sınıfı olarak alt gruplara ayrılabilir. CaO içeriği %10'dan az olan UK, F sınıfı veya düşük kalsiyumlu UK olarak adlandırılır. CaO içeriği %10'dan fazla olan UK ise, C sınıfı veya yüksek kalsiyumlu UK olarak adlandırılır. Düşük kalsiyumlu veya F sınıfı UK AAB'lerin sentezinde alümino-silikat kaynağı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Düşük kalsiyumlu veya F sınıfı UK ile üretilen AAB'lerin polikondensasyon sürecini hızlandırmak için daha uzun priz ve sertleşme aşamalarına ihtiyaç duyulması nedeniyle,

priz sürelerini ve erken sertleşme yaşlarını kısaltmak için termal kütleme gerekmektedir (Nath ve Sarker 2014; Pangdaeng vd., 2014). Yeterince ince taneli ve amorf yapıda olan yüksek kalsiyumlu veya C sınıfı UK ile üretilen AAB'lerin polikondenzasyon süreci, termal kütleme olmaksızın yeterli priz süresiyle ve erken sertleşme meydana getirebilir (Phoo-ngernkham vd., 2015).

Bu çalışmasının temel amacı, ortam kürü uygulanmış PC esaslı kontrol harçları ile SD yerine %10, %15, %20 ve %25 oranlarında C sınıfı UK ikame edilerek üretilen SD esaslı alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemektir. Alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve mikroyapı özellikleri için, NaOH/Na₂SiO₃ (SH/SS) oranı 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 olan dört farklı karışım grubu hazırlanmış ve üretilmiştir. Üretilen harçlara uygulanan mekanik testler sonucunda optimum SH/SS oranı tespit edilmiş olup, bu harçlara hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında çelik fiber (ÇF) ilave edilmiştir. Ortam (25 °C) ve yüksek sıcaklıklara (250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C) maruz bırakılan harçlar üzerinde birim ağırlık (ρ_a), ultrases geçiş hızı (U_{pv}), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve basınç dayanımı (f_c) testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mikroyapı incelemeleri, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), stereo mikroskop (SM), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM II

ALKALİ AKTİVASYON

2.1 Alkali ile Aktivasyonun Tanımı ve Tarihi Gelişimi

Alkali aktivatörler, alkali metal katyonları içeren, tepkime esnasında karışımın pH'ını artıran ve katı toz bağlayıcının çözünmesini hızlandıran çözücülerdir (Wagh, 2004). Alkali aktivasyonun önemli hususlarından biri feldspat ve kil gibi doğal olarak bulunabilen malzemelerin yanı sıra alüminasilikat içeren sanayi atıklarının bağlanabilmesine olanak sağlamasıdır. Genel olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) potasyum hidroksit (KOH) aktivatör olarak kullanılmaktadır (Temuujin vd., 2009). Potasyum içeren aktivatörler, sodyum içeren aktivatörlerle kıyasla daha pahalıdır. Bundan dolayıda, sodyum içeren aktivatörlerin çalışmalarda kullanımı daha yaygındır (Zhang vd., 2020).

Alkalilerle aktive edilmiş malzemeler ile ilgili çalışmalar yaklaşık yüzyıl öncesine kadar dayanmaktadır. Alman mühendis Kühl, PC esaslı bağlayıcılara alternatif arayışı neticesinde, 1908'de ilk çalışmalarına başlamıştır. Bu çalışmalarda alüminyum ve silisyum bakımından zengin cüruf ile farklı alkali aktivatörlerin kombinasyonlarını oluşturmuştur. Bu kombinasyonlar sonucunda meydana gelen bağlayıcının PC özelliklerine benzer nitelikte performansa sahip olduğunu belirtmiş ve bu malzemenin patentini almıştır.

1940 yılında geniş kapsamlı yapılan bir çalışmada, çeşitli yüksek fırın cürufu bağlayıcılarını aktive etmek için farklı aktivatörler (NaOH gibi kostik alkali ve diğer alkali tuzlar) kullanılmıştır. Aktivasyonunu sağladığı bağlayıcının mukavemet gelişimini incelemiş ve bu bağlayıcının basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını, PC içeren bağlayıcılarla kıyaslamıştır (Purdon, 1940).

1950'li yıllarda Sovyetler Birliği ve Çin'in PC kıtlığı çekmesi nedeniyle, araştırmacılar alternatif bağlayıcı malzemelere yönelmişlerdir. Bu yönelme sonucunda bağlayıcı olabilecek malzemelerin alkalilerle aktivasyonu üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu

Çalışmaların öncüsü de metalürjik cürufların, alkaliler ile aktivasyonu konusundaki araştırmalardır (Glukhovsky, 1959; Kızıltepe, 2018).

Alkalilerle aktivasyon alışmaları, Davidovits'in katkılarıyla 1981 yılından itibaren oldukça yol kat etmiş ve hız kesmeden gelişimine devam etmiştir. Ayrıca Davidovits'in ürettiğı bağlayıcılar, polimerik özelliğinden dolayı "Geopolimer" adını almıştır (Davidovits, 1994).

1995 yılında Krivenko'nun yaptığı çalışma sonucunda, sulu ortamda yeterli alkali konsantrasyon sağlandığında, alkali aktivatör ve metal tuzlarının, silikatlar, alüminatlar ve alümina silikatlar ile tepkimeye girebileceğini ortaya koymuştur (Krivenko, 1995; Shi vd., 2006).

2.2 Alkali Aktivatörlerin Kullanım Alanları

Prekast ve yerinde döküm gibi uygulamalara sahip olan alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların, konvansiyonel betona kıyasen daha hassas kütleme ihtiyacı, nitelikli işçilik ve karışım da gereken hassasiyet gibi nedenlerden dolayı prekast uygulamalarında kullanımının daha uygun olduğu görülmüştür (Kabay vd., 2021).

Alkalilerle aktive edilmiş malzemelerin saha uygulamaları giderek yaygınlaşırken, Rusya ve Ukrayna'da yerinde döküm uygulamaları için standartlar ortaya konmuştur (Krivenko, 1997). Çin'de ilk saha uygulaması, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu aktive edilerek gerçekleştirilmiştir. 2014 yılında gerçekleşen bu saha uygulaması, 2017 yılında makale olarak literatürdeki yerini almıştır (Yang vd., 2018).

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin birçok projede çeşitli amaçlarla kullanımı mevcuttur. Bu malzemelerin kullanım alanlarının bazıları aşağıdaki gibidir (Ömür, 2022).

- Prestak yapı elemanlarının üretiminde kullanılabilir.
- Yapısal betonların üretiminde kullanılabilir.
- Beton yol kaplama uygulamalarında kullanılabilir.
- Bims, tuğla ve kiremit gibi blok malzemelerin üretiminde kullanılabilir.

- Zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabilir.
- Yüksek sıcaklığa dayanıklı beton üretiminde kullanılabilir.
- Hafif beton üretiminde kullanılabilir.
- Gaz beton üretiminde kullanılabilir.
- Nükleer ve zehirli maddelerin katılaştırılması ve depolanmasında kullanılabilir.
- Asitli ve sülfatlı ortamlarda kullanılabilir.

2.3 Alkali Aktivatör Çeşitleri

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, volkanik kül ve metakaolin gibi puzolanik özellik taşıyan birçok malzeme alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek bağlayıcı malzeme olarak üretimi sağlanabilmektedir (Davidovits, 2008). PC'ye alternatif bir bağlayıcı olarak karşımıza çıkan malzemeleri aktive etmek için kullanılan alkali aktivatörler, kimyasal kombinasyonuna göre gruplara ayrılmaktadır. Bu gruplar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu gruplarda Na, Li ve K elementlerini temsil etmek üzere "M" simgesi kullanılmıştır (Glukhovsky, 1994).

Çizelge 2.1. Alkali aktivatörlerin gruplandırılması

Alkali Aktivatörler	Formül
Alkali Hidroksitler (Kostik)	MOH
Kuvvetsiz Asit, Silis İçermeyen Tuzlar	M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4
Silikatlar	$M_2O.nSiO_2$
Alüminatlar	$M_2O.nAl_2O_3$
Alüminasilikatlar	$M_2O.nAl_2O_3.(2-6)SiO_2$
Kuvvetli Asit, Silis İçermeyen Tuzlar	M_2SO_4

2.3.1 Sodyum hidroksit

Farklı şekillerde temin edilebilen ve ucuz olması nedeniyle yaygın kullanıma sahip sodyum hidroksit (NaOH), kostik adıyla da bilinmektedir (Provis and Van Deventer, 2009). NaOH, sodyum klorürün (NaCl) elektroliziyle üretilmekte ve bu sırada klor gazı açığa çıkmaktadır. Ayrıca çözeltide bulunan suyun buharlaşması sonucu katı halde NaOH elde edilebilmektedir (Görür, 2015). Beyaz şeffaf renkli, yüksek derecede uçuculuğa sahip olan NaOH neme karşı duyarlı olduğu gözlemlenmiştir (Elibol, 2012).

NaOH'ın su ile tepkimeye girmesi neticesinde sıcaklığı hızla 50 °C'ye ulaşabilmekte ve bu sıcaklık yaklaşık 15 dakika kadar devam edebilmektedir. Ayrıca bazik özellik taşımasından dolayı sulu hali yumuşak ve kaygan yapıdadır (Akça, 2022).

Su içerisinde çok iyi çözünebilen NaOH, 111 g/100 ml çözelti için 20°C'de yaklaşık 2.13 g/cm³ yoğunluğa sahip olmaktadır. Ancak bu yoğunluk su miktarına göre değişiklik göstermektedir. Su ile tepkimesi esnasında ortaya çıkan yüksek ısı suyun buharlaşmasına ve dolayısıyla konsantrasyonun artmasına ve viskozitenin azalmasına neden olmaktadır. Kaynama ve erime sıcaklıkları sırasıyla 1388 °C ve 318 °C civarındadır. Molar kütesinin ise yaklaşık 39.9971 g/mol olduğu bilinmektedir (Elibol, 2012). KOH özelliklerine benzerlik göstermesine karşın NaOH'ın yakıcılık özelliğinin daha az olduğu bilinmektedir (Canbaz, 2007).

2.3.2 Sodyum silikat

Görünümü genel olarak renksiz olan sodyum silikat (Na₂SiO₃), cam suyu ya da sıvı cam olarak bilinmektedir. Ayrıca en geniş silikatlar grubu olan Na₂SiO₃ doğada bulunan toplam mineral miktarının %90'ını kapsamaktadır. Temel yapısı itibariyle silikatlar, orta noktada Si atomu ve buna bağlanmış olan O atomları bulunmaktadır (Kantarcı, 2013). Genel kimyasal formülleri Na₂O.nSiO₂ şeklinde ifade edilen sodyum silikatlar, su ile karıştığında viskoz özellik göstermektedir. Yaygın olarak tekstil, kağıt üretimi, otomotiv sektörü, temizlik ürünleri, seramik ve mürekkep üretimi gibi endüstriyel sektörlerde kullanılmaktadır (Elibol, 2012). Alkali ve silis oranlarına göre farklı özellik gösteren Na₂SiO₃, bu özelliklere göre farklı uygulamalar için temin edilme imkanları bulunmaktadır (Davidovits, 2008).

Çevreye zararının az olması nedeniyle yaygın kullanılan Na₂SiO₃, zemin partiküllerini birbirine bağlayan ve aralarındaki boşlukları dolduran bir enjeksiyon malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Uysal, 2022).

Ortalama yoğunluğu yaklaşık olarak 1.36 g/cm³ olan ve piyasadan temin edilebilen Na₂SiO₃'nin, silika/alkali oranı 3 ile 7 arasında değişiklik göstermektedir. Silika/alkali oranının 3 ile 4 arasında olması durumunda, bir takım asit ya da asit tuzu ilavesiyle jel kıvamı elde edilebilmektedir ve enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilir.

(Nonveiller, 2013). Al_2O_3 ve SiO_2 ile hızla tepkimeye girerek daha yüksek oranda jelin çökmesini sağlayan Na_2SiO_3 , aktivatör çözeltisi içindeki çözünebilir silikat miktarının artmasına ve dolayısıyla daha güçlü bağlayıcıların elde edilmesini sağlamaktadır (Kızıltepe, 2018).

2.3.3 Sodyum karbonat

Doğada yaygın olarak bulunan sodyum karbonat (Na_2CO_3), dünya genelinde oldukça yüksek oranda rezerve sahip aktivatörlerdendir (Provis ve Van Deventer, 2014). Bu nedenle sentetik alkali hidroksit ve silikatlara oranla, daha az maliyete sahip ve çevresel olarak daha az zararlı bir alternatif bağlayıcı olarak görülmektedir (Luukkonen vd., 2018).

Na_2CO_3 ile aktive edilmiş malzemelerin her ne kadar erken dönemde dayanımlarının düşük olduğu görülse de, ilerleyen zamanlarda dayanımların arttığı görülmüştür (Fernandez vd., 1994).

Beyaz renkte ve suda çözünebilir Na_2CO_3 , soda üretme tekniği ile karbonat tuzlarından elde edilmektedir (Kostick, 2011a). Daha çevreci bir yaklaşımla elde edilebilmesine rağmen, alkalilik derecesinin düşük olmasından dolayı, aktivatör olarak kullanımı kısıtlıdır (Provis ve Van Deventer, 2014).

2.3.4 Sodyum sülfat

Beyaz, katı ve kristal yapıda bulunan sodyum sülfat, Na_2SO_4 kimyasal formülü ile bilinmektedir. Diğer aktivatörlere kıyasla, kolaylıkla üretilmektedir. Fakat doğada bulunmayan bir kimyasal olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstride üretilen ürünlerin yan ürünü olarak elde edilebilen sodyum sülfatlar, alümina/silikat esaslı malzemelerin bağlanmasında kullanılmaktadır (Kostick, 2011b).

BÖLÜM III

SİLİS DUMANI

3.1 Silis Dumanının Oluşumu ve Genel Yapısı

Silisyum metalinin ya da demir silisyum alaşımlarının elektrik ark fırınlarında elde edilmesi için yüksek saflıkta kuvars, elektrik ark fırınlarında 2000 °C civarındaki sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmektedir. Bu indirgenme sırasında çoğunluğu SiO olan gazlar oluşmaktadır. Gaz olarak meydana gelen SiO fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmekte ve hızlı bir şekilde soğutularak yoğunlaştırılmaktadır. Böylece amorf yapıdaki SiO₂'ye dönüşmektedir. Bu şekilde atık bir yan ürün olarak elde edilen amorf ve çok ince taneli yaklaşık %85'den daha fazla SiO₂ içeren malzemeye silis dumanı denmektedir. Ortaya çıkan bu ürün yüksek miktarda puzolanik aktiviteye sahip olmaktadır (Koca, 1996; Akçaözoğlu, 2007).

Standartlara göre, silis dumanı içeriğindeki, minimum SiO₂ miktarı %80 ve kızdırma kayıp miktarının maksimum %5 olması gerekmektedir. Silis dumanı içeriğindeki silikon miktarı arttıkça, SiO₂ miktarının da arttığı gözlemlenmekte ve silikon oranına göre alaşım farklı isimler almaktadır. Çizelge 3.1'de silis dumanının silisyum dioksit oranları ile silikon alaşımlarının üretim ilişkisi görülmektedir (ACI Committee 234, 1996; Yazıcı, 1996; Özbek, 1998; Yeğinobalı, 2011; Akçaözoğlu, 2007; Baradan vd., 2012).

Çizelge 3.1. Silikon oranına göre silis dumanı içerisindeki SiO₂ miktarları

Alaşım tipi	Silis dumanı içerisindeki SiO ₂ miktarı (%)
%50 Ferrosilikon	61-84
%75 Ferrosilikon	84-91
%98 Silikon metal	87-98

3.2 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Açık gri renkten koyu gri renge doğru değişebilen silis dumanının koyuluk derecesi, içeriğindeki karbon oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Malhotra, 1997). Ayrıca silis dumanının suyla karışması sonucu renginin koyulaştığı ve neredeyse siyaha

dönüştüğü bilinmektedir (Akçaözoğlu, 2007). Çok ince tanelerden oluşan silis dumanının, tane boyutları genellikle 0.1 µm ile 0.2 µm aralığındadır. 45 µm elekten elendiğinde, elek üstünde kalan taneler büyük boyutlu taneler olarak ifade edilmektedir ve miktarı %6'yı geçmemektedir. Silis dumanı taneleri Portland çimentosuyla kıyaslandığında ortalama 100 kat daha küçüktür (Erdoğan, 2003). Silis dumanının özgül yüzey alanı yaklaşık 130 000 ile 280 000 cm²/g aralığında ve özgül ağırlığı ise yaklaşık 2.2 ile 2.4 aralığında değişebilmektedir (Ekinci ve Yeğinobalı, 1996; Erdoğan, 2003; Kurt, 2007; Baradan vd., 2012; Soysat, 2019).

Silis dumanının gevşek haldeki birim hacim ağırlığı yaklaşık 200 ile 300 kg/m³ aralığındadır ve gevşek birim ağırlığının düşük olmasından dolayı, depolama ve taşıma gibi işlemlerde itinalı olunmalıdır (Yeğinobalı, 1993; Şahin, 2013). Özellikle depolama ve taşıma işlemlerinin maliyetini azaltmak için yoğunlaştırılır. Yoğunlaştırma işlemi silis dumanı silolara yerleştirildikten sonra siloya alttan basınçlı hava uygulanarak gerçekleştirilir. Bu yoğunlaştırma işlemi sonrasında silis dumanının birim hacim ağırlığı yaklaşık 400 ile 600 kg/m³ aralığındadır. Diğer bir depolama ve taşıma maliyet azaltma yöntemi, silis dumanının su ile karıştırılması şeklinde olmaktadır. Bu yöntemde genelde ağırlıkça %40 ile %60 arasındaki bir oranda su ve gerekli durumlarda akışkanlaştırıcı katkıları ilave edilmektedir. Silis dumanının su ile yoğunlaştırılmış birim hacim ağırlığı yaklaşık 600 ile 700 kg/m³ aralığındadır (Baradan vd., 2012; Şahin, 2013).

Silis dumanının çok ince tane boyutlarına sahip olması nedeniyle, suya olan gereksinimi oldukça yüksektir. Bundan dolayı yüksek oranda su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ile karışımlarda kullanılmaktadır. Silis dumanının puzolanik aktivitesi ve suya olan gereksiniminin uçucu kül ve doğal puzolanlarla karşılaştırılması Çizelge 3.2'de verilmiştir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.2. Silis dumanının puzolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının doğal puzolan ve uçucu kül ile karşılaştırılması

	ASTM C618 Sınırları			
	Doğal Puzolan	F Sınıfı Uçucu Kül	C Sınıfı Uçucu Kül	Silis Dumanı
Dayanım aktivitesi 28 günde kontrol numunesine oranla minimum (%)	75	75	75	110
Su ihtiyacı kontrol numunesine oranla maksimum (%)	115	105	105	134

Yüksek silis içeriği ve çok ince tane boyutu nedeniyle yüksek puzolanik aktiviteye sahip olan silis dumanı, çimentolu ortamda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ekstra C-S-H jeli meydana getirmektedir. Bu jelin çimento hamurunda oluşan C-S-H jelinden farklı olarak, az yoğunluğa ve yüksek geçirimliliğe sahip olduğu ifade edilmektedir. Dolayısıyla silis dumanı, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarını azaltmakta, kimyasal etkilere daha dayanıklı ve yüksek dayanımlı bir matris yapısının oluşmasına imkan sağlamaktadır (Yeğinobalı, 1993).

Esas bileşeni, gaz halindeki SiO_2 'nin havayla temas etmesiyle kristalize olmayan amorf haldeki SiO_2 olan silis dumanının diğer önemli bileşenleri yanmamış C (karbon) kalıntıları ve kızdırma kaybıdır. Silis dumanındaki SiO_2 puzolanik reaksiyona katkı sağlayan en büyük bileşendir. Ayrıca silis dumanı içeriğindeki $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ toplamının yüksek olması puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır. Kızdırma kaybının büyük bir kısmı ise yanmamış kömür parçacıklarından kaynaklanmaktadır. Bazı standartlara göre silis dumanındaki kızdırma kaybının %6'yı geçmemesi istenmektedir. Ayrıca silis dumanının içeriğinde Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O ve S gibi bileşenlerde bulunmaktadır (Akçaözoğlu, 2007; Soysat, 2019). Üretimi yapılan metalin veya alaşımın çeşidine göre kimyasal özelliği değişebilen silis dumanının kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te verilmektedir (Yazıcı, 1996; Erdoğan, 2003; Baradan vd., 2012).

Çizelge 3.3. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (Erdoğan, 2003)

Bileşen (%)	Amerika	Norveç	Kanada	Türkiye
SiO_2	90- 93	90- 96	89- 95	93- 95
C	1.3-2.6	0.5- 1.4	2.1-4.2	0.8-1.0
Fe_2O_3	0.4-0.7	0.2- 0.8	0.1-3.1	0.4-1.0
Al_2O_3	0.5-1.6	0.5-3.0	0.1-0.7	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	0.3-1.0	1.0-1.5
CaO	0.5- 0.8	0.1 – 0.5	0.1-1,0	0.6-1.0
Na_2O	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.2	0.1-0.4
K_2O	1.0-1.2	0.4-1.0	0.5-1.4	0.5-1.0
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.2	0.1-0.3
Kızdırma kaybı	1.4-2.8	0.7-2.5	2.3-4.4	0.5-1.0

3.3 Silis Dumanının Kullanım Alanları

Silis dumanının, köprü, otoyol ve baraj gibi uzun ömürlü tasarlanan yapılarda çimento yerine belirli oranlarda kullanımı oldukça yaygındır (Mehta ve Aitcin, 1990). Genel olarak silis dumanının kullanıldığı yerler aşağıda verilmiştir (Şahin, 2013).

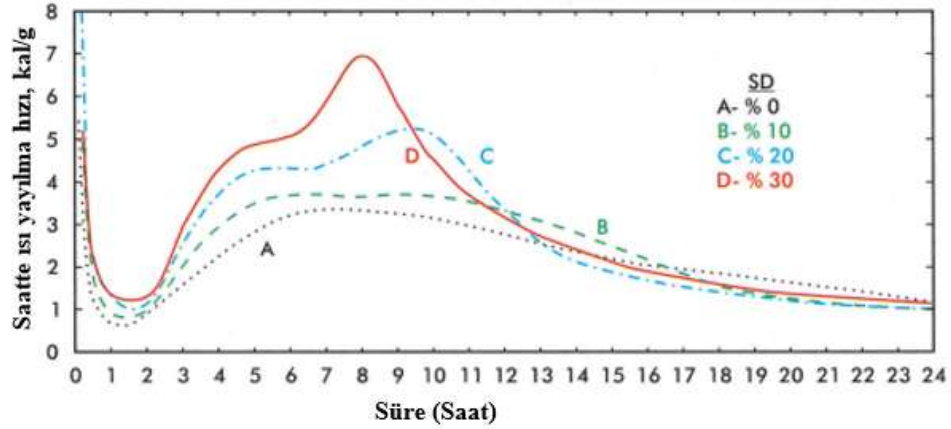
- Silis dumanı özellikle yüksek dayanımlı betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı hafif agregalı betonlarda dayanımı arttırmak için kullanılabilir.
- Silis dumanı geçirimsizliğin önemli olduğu yapılarda kullanılan betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı erken yaşlarda yüksek dayanım istenen betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı ağır trafik yüklerine maruz kalan yol kaplamalarında kullanılan betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı kimyasal etkilere maruz kalan yer altı yapılarında kullanılan betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı kayaçların dayanımını arttırmak için kullanılan püskürtme betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı baraj, köprü, tünel ve otoyol gibi uzun ömürlü yapılarda kullanılan betonların üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı zemin stabilizasyonunda kullanılabilir.
- Silis dumanı çimento üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı yüksek dayanım gerektiren hazır beton üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı petrol endüstrisinde kullanılabilir.
- Silis dumanı suni gübre üretiminde kullanılabilir.
- Silis dumanı refrakter malzeme üretimi endüstrisinde kullanılabilir.
- Silis dumanı yüksek dayanımlı prefabrik yapı endüstrisinde kullanılabilir.

3.4 Silis Dumanının Hidratasyon Isısına Etkisi

Silis dumanının hidratasyon ısısına etkisi değişkenlik gösterebilmektedir. Birçok çalışmada, çimento yerine silis dumanı eklenmesiyle, ilk günlerde hidratasyon ısısının arttığı, ileriki günlerde ise hidratasyon ısısının azaldığı ifade edilmektedir. Çimentoya göre silis dumanının özgül yüzey alanının oldukça yüksek olması, hidratasyon ısısının artmasında etkili olmaktadır.

Çimento yerine ağırlıkça %10'a kadar silis dumanı kullanılarak üretilen betonların 72 saat içerisindeki hidratasyon ısısının, silis dumanı kullanılmamış betona göre, daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Fakat silis dumanı kullanılan betonlarda, silis dumanı

kullanılmamış betonlara göre ortalama %8 ile %10 arasında daha az hidrasyon ısısı açığa çıktığı da ifade edilmiştir (Erdoğan, 2003). Silis dumanının hidrasyon ısısı üzerindeki etkisi, çimento yerini ne oranda kullanıldığına ve akışkanlaştırıcı kullanım durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Malhotra, 1993). Şekil 3.1’de silis dumanı katkılı çimento hamurlarında meydana gelen hidrasyon ısısı verilmektedir.



Şekil 3.1 Silis dumanı katkılı çimento hamurlarında hidrasyon ısısı (Yeğınobalı, 2011)

3.5 Silis Dumanının Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi

Yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmaları nedeniyle harç ve beton üretiminde kullanımı artan silis dumanının, dayanıklılığın önemli olduğu yüksek performanslı harç ve betonlarda tercih edildiği görülmektedir. Özellikle yüksek dayanım ve dayanıklılık istenen harç ve betonların üretimi için silis dumanı çimento ile yer değiştirilerek belirli oranlarda kullanılmaktadır. Silis dumanının harç ve betonların üretiminde değerlendirilmesi ile atık bir yan ürünün geri kazanılması sağlanmaktadır ve oluşturacağı çevre kirliliği önlenmektedir. Çimento tane boyutlarından 100 kat daha fazla inceliğe sahip silis dumanı, harç ve betonların matrisindeki mikroboşlukları ve agrega ile matris arasındaki arayüzey geçiş bölgesini doldurmaktadır. Böylece harç ve betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir ve dayanımını, dayanıklılığını ve geçirimsizliğini arttırmaktadır. Ayrıca, silis dumanındaki aktif olan yüksek SiO_2 içeriği, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ekstra kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) meydana getirmektedir. Böylece harç ve betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini arttırmaktadır (Erdoğdu vd., 1996). Özellikle, süper akışkanlaştırıcılar ile kullanıldığında yüksek performans sergileyen silis dumanlı harç ve

betonların, basınç dayanımındaki artışın sebebi agrega ile matris arayüzey geçiş bölgelerindeki kuvvetli bağlanmadan kaynaklanmaktadır. Öte yandan silis dumanının ince tane boyutu gereği daha kaliteli ve sıkı yapıda matris meydana getirdiği ifade edilmektedir (Topçu ve Aydın, 1998; Topçu ve Canbaz, 2005).

Silis dumanının akışkanlaştırıcılar ile beraber kullanımı sayesinde beton dayanımlarında artışlar olmaktadır. Bu durum boşluk oranının azalması ve silis dumanının arayüzey geçiş bölgesini iyileştirmesi ile açıklanmaktadır. Silis dumanı, çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ekstra C-S-H jeli oluşturmaktadır. Bu sayede çimento hamurunun daha yoğun hale gelmesiyle tanecikler arası boşluk boyutu azalmakta ve agrega çimento hamuru arayüzey bölgesindeki bağ dayanımı artmaktadır. Böylece yüksek dayanımlı ve dayanıklı harç ve betonlar elde edilmektedir (Yeğinobalı, 2011; Mazloom vd., 2004). Ayrıca harç ve betonların üretildiği ortamın sıcaklığına bağlı olarak, silis dumanı, harç ve betonların dayanımının hızlı bir şekilde artmasını sağlamaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, silis dumanı prefabrik ve öngerilmeli betonların üretimi için oldukça avantaj sağlamaktadır (Yeğinobalı, 2011). Dahası, silis dumanı, yüksek dayanım sağlamasıyla, aşınma direncinin önemli olduğu yapılarda kullanılan harç ve betonların aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır (Atiş vd., 2004).

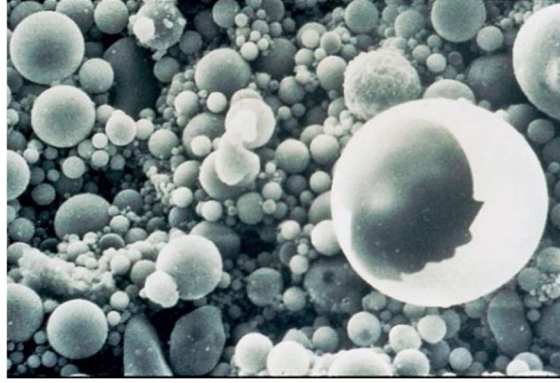
Silis dumanının harç ve betonların üretiminde kullanılması taze harç ve betonların terlemesini, ayrışmasını ve hidrasyon ısını azaltmaktadır. Sertleşmiş harç ve betonların ise dayanımını ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca alkali-silika reaksiyonu oluşumunu da azaltmaktadır. Silis dumanının harç ve betonların üretiminde kullanılmasının bazı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Silis dumanının harç ve betonların üretiminde kullanılması karışım suyu ihtiyacını artırmaktadır. Bundan dolayı da genellikle su azaltıcı akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca silis dumanının harç ve betonların üretiminde kullanılması terlemeyi azalttığı için betonun yüzeyinin düzeltilmesini zorlaştırmakta ve plastik büzülme çatlaklarına neden olmaktadır. Silis dumanının bu olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için harç ve betonların üretiminde kullanılan silis dumanı ile birlikte akışkanlaştırıcıların kullanılması önerilmektedir (Erdoğan, 2003; Akçaözoğlu, 2007).

BÖLÜM IV

UÇUCU KÜL

4.1 Uçucu Külün Oluşumu ve Genel Yapısı

Termik santrallerde, buhar kazanlarının ısıtılmasıyla enerji üretmek için yakılan pulverize taşkömürün veya linyit kömürünün yanmasıyla çok ince taneli oluşan ve bacalardan elektro-filtreleme yoluyla elde edilen atık yan ürüne uçucu kül denmektedir. Ağır ve iri taneli oluşunlar ise taban külü olarak adlandırılmakta ve ocağın tabanında toplanmaktadır. Eğer uçucu küller elektro-fitreme yoluyla tutulmazlarsa, yakıt gazları ile birlikte uçarak bacadan dışarı çıkarlar, çevreyi olumsuz etkilerler ve termik santralinin çevresini kısa sürede kaplanmasını sağlarlar. Bacadan dışarıya çıkacak uçucu küller elektrostatik veya elektromekanik yöntemler ile tutulduktan sonra, depolanacak silolara yönlendirilir. Bu silolardan, taşıma bantlarıyla, termik santrallerin uzağındaki uygun bir alanda atık malzeme olarak depolanır (Erdoğan, 2003). Atık bir malzeme olarak ortaya çıkan uçucu kül parçacıklarının küresel şekilde olduğunu gösteren SEM analizi Şekil 4.1’de verilmiştir (Thomas, 2007).



Şekil 4.1. Küresel uçucu kül parçacıklarını gösteren SEM görüntüsü (Thomas, 2007).

Elektrik enerjisi üretimi sırasında kömürün yanması sonucu termik santrallerden elde edilen uçucu külün çevreye olan zararıyla beraber; toplanması, depo edilmesi ve bertaraf edilmesi büyük maliyetleri beraberinde gerektirmektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için araştırmacılar, çimento yerine bu tür atık ürünlerin kullanılması çalışmalarına yönelmişlerdir (Uzbaş, 2019).

Uçucu küllerin özellikleri bulundukları bölgeye göre ve yakıt olarak kullanılan kömürün özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Yakılan kömür tipi, kömürün öğütülme derecesi, hangi tür kazanda yakıldığı, ne tür yöntemle toplandığı gibi birçok etkene göre uçucu küller farklılık göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı uçucu küller homojenlik göstermemekte ve sabit bir özelliğe sahip olmamaktadır. Bu da uçucu küller üzerinde yapılan çalışmaların istenilen seviyeye ulaşmasını engellemektedir (Güler vd., 2005).

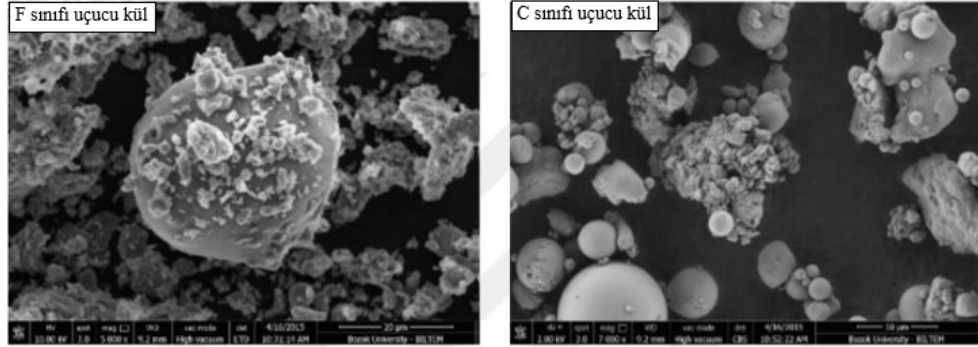
Uçucu küllerin yaklaşık %60 ile %90 arasında bir bölümü, küresel silisli ve alüminli amorf yapıya sahiptir. Geri kalan bölümü ise, kuvars, mullit, hematit ve magnetit gibi kristal yapılara sahiptir. Uçucu küller amorf yapıda ve çok ince taneli oldukları için ince taneli doğal puzolanlara benzer puzolanik özellik göstermektedir. Yani uçucu küller $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile sulu ortamda karıştırıldığında, hidrolik bağlayıcı özelliği göstermektedir. Bu özelliğinden dolayı, uçucu küller hem çimento üretiminde hem de beton üretiminde çimento yerine doğrudan kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

4.2 Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu küller içerdiği kimyasal bileşenleri göre C ve F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır (ASTM C618, 2019). Yani, CaO bileşimi %10'dan az olan uçucu küller F sınıfı uçucu kül veya düşük kalsiyumlu uçucu kül, CaO bileşimi %10'dan fazla olan uçucu küller ise C sınıfı uçucu kül veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılır (Erdoğan, 2003). Uçucu küller ciddi miktarda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ve CaO bileşikleri içermektedir (Bhatt vd., 2019). Bitümlü veya antrasit kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan F sınıfı uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %70'den yüksektir ve CaO içeriği %10'dan azdır. Bu uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir. Düşük bitümlü veya linyit kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan C sınıfı uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %50'den yüksektir ve CaO içeriği %10'dan fazladır. Bu uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcılık özelliğe de sahiptir (Erdoğan, 2003; Aruntaş, 2006; Türker vd., 2009). F ve C sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüleri Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Genellikle uçucu küller küresel şekilli amorf katı parçacıklardan oluşmaktadır. Uçucu küllerin tane boyutları yaklaşık 1 μm ile 150 μm arasında değişmektedir. Özgül ağırlıkları ise 2.1 ile 2.7 arasında değişmektedir. Uçucu küller genelde koyu gri renge sahiptirler. Uçucu küllerin rengi yanma durumuna ve C içeriğine göre değişiklik gösterirken (Girgin,

2016), inceliği kömürün öğütülme derecesi ve bacalardan toplanma yöntemi gibi durumlara göre değişmektedir (Güler vd., 2005). Uçucu küllerin özgül yüzey alanları genellikle $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ ile $3800 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişkenlik göstermektedir (Görhan vd., 2008).



Şekil 4.2 F ve C sınıfı uçucu külün SEM görüntüleri (Özcan, 2020)

Uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin içeriği, pulverize olarak kullanılan yakıt kömürünün cinsine ve yakma derecesine göre değişmektedir. F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu çizelgeden de görüleceği gibi birçok uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %70’in üzerine çıkmaktadır. Uçucu küllerin sınıflandırılmasında ve bağlayıcılık özelliği göstermesinde, uçucu külün CaO içeriği önemli rol oynamaktadır. CaO oranı %10’dan daha düşük olduğu için F sınıfı uçucu küller sadece puzolanik özellik gösterirken, CaO oranı %10’dan daha yüksek olduğu için C sınıfı uçucu küller hem puzolanik özellik hem de bir miktar bağlayıcılık özelliği göstermektedir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 4.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Erdoğan, 2003)

Kimyasal Kompozisyon %	F sınıfı uçucu kül	C sınıfı uçucu kül
	CaO < %10	CaO > %10
SiO_2	43.6-64.4	23.1-50.5
Al_2O_3	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe_2O_3	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29.0
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na_2O	0-2.8	0.4-1.9
Kızdırma kaybı	0.4-7.2	0.3-1.9

Uçucu küllerin kimyasal içeriklerinde, oranlarının yüksek olması istenmeyen bir miktar SO_3 , MgO, alkali ve karbon bulunmaktadır. MgO içeriğinin yüksek olması harç ve

betonlarda genleşmeye neden olabilir. SO_3 içeriğinin yüksek olması ise etrenjit oluşumuna neden olur. Bu oluşum da çok büyük genleşmelere sebep olur. Yüksek alkali içeriği ise reaktif silika içeren agregalar ile reaksiyon girme olasılığını artırır ve harç ve betonlarda genleşmeye neden olabilir (Erdoğan, 2003).

4.3 Uçucu Külün Kullanım Alanları

Küresel çapta meydana gelen iklim krizi nedeniyle, üretimi esnasında çevre kirliliği oluşturan malzemelerin kullanımını azaltmaya yönelik çalışmalar ve bu malzemelerin yerine geçebilecek alternatif kaynak arayışı giderek artmaktadır. Bundan dolayı, endüstriyel bir atık olan uçucu küllerin puzolanlı ve kompoze çimento üretiminde ve beton üretiminde kullanılan çimento yerine belirli oranlarda kullanılabileceği görülmektedir. Atık ürünlerin bu şekillerde geri kazanılması hem çevre kirliliğini azaltacak hem de ekonomik fayda sağlayacaktır (Aruntaş, 2006). Uçucu küllerin başlıca kullanım alanları aşağıda verilmektedir (Kaya, 2010).

- Uçucu kül puzolanlı ve kompoze çimento üretiminde kullanılabilir.
- Uçucu kül beton üretiminde çimento yerine belirli oranlarda kullanılabilir.
- Uçucu kül sinterlenmiş hafif agrega üretiminde kullanılabilir.
- Uçucu kül tuğla üretiminde kullanılabilir.
- Uçucu kül seramik ve cam üretiminde kullanılabilir.
- Uçucu kül baraj ve kütle betonların üretiminde kullanılabilir.
- Uçucu kül zemin stabilizasyonunda kullanılabilir.
- Uçucu kül petrol endüstrisinde kullanılabilir.
- Uçucu kül dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.
- Uçucu kül enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilir.

Dahası uçucu küller, ince tane boyutu, düşük yığın yoğunluğu, yüksek oranda su tutabilme özelliği ve fosfor, kükürt, potasyum, kalsiyum, magnezyum, bakır, mangan ve çinko gibi elementler bulundurması nedeniyle toprak iyileştirme çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca alkali yapıları dolayısıyla pH değerini düzenlemek amacıyla da kullanılmaktadır (Yao vd., 2015).

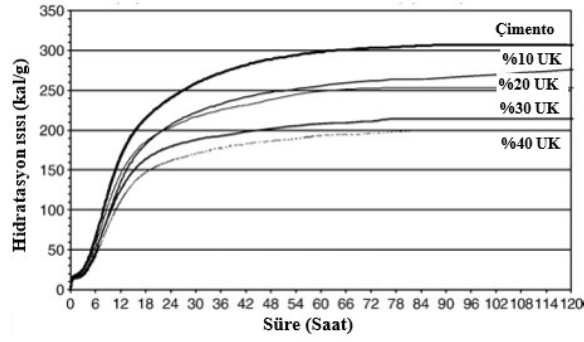
Uçucu küllerin çimento üretiminde kullanılabilmesi için, çok ince tane boyutlu, zengin Al_2O_3 ve SiO_2 içeriğine sahip olması, düşük alkali ve %3'den az yanmamış karbon içeriklerine sahip olması gerekir (Mishra vd., 2003; Atakay, 2006). Uçucu küllerin çimento üretiminde kullanılabilmesi için standartlarda belirtilen bazı sınır değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir (Erdoğan, 2003; ASTM C618, 2019).

Çizelge 4.2. Çimento ve beton üretiminde kullanılabilecek uçucu küllerin sınır değerleri

	TS 639	ASTM C618	
		F sınıfı uçucu kül	C sınıfı uçucu kül
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	70	70	70
Maksimum SO_3 (%)	5	5	5
Maksimum MgO (%)	5	—	—
Maksimum Na_2O (%)	1.5	1.5	1.5
Maksimum nemlilik (%)	3	3	3
Maksimum kızdırma kaybı (%)	10	6	6

4.4 Uçucu Külün Hidratasyon Isısına Etkisi

Betonda hidratasyon ısını etkileyen en önemli parametre çimentodur. Betonda çimentonun su ile tepkimesi sonucu ortaya çıkan ısı, hidratasyon ısısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Priz ve sertleşme sırasında açığa çıkan bu ısı, betonun sıcaklık derecesinde artışa neden olmaktadır. Çimentonun uygun seçilmesi, beton dökümünün yavaş yapılması, beton içerisindeki çimento oranının azaltılması, çimento yerine kısmi olarak mineral katı malzemelerinin kullanılması, beton içerisindeki agreganın ve suyun soğutulması gibi tedbirler hidratasyon ısısının düşürülmesi için alınan önlemlerdir. Bu önlemler dikkate alındığında beton üretiminde uçucu küllü çimento kullanılması veya çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül kullanılması hidratasyon ısısını düşürecektir (Akyüncü, 2012). Portland çimentosu ve %10, 20, 30 ve 40 uçucu kül içeren çimento hamurlarının zamanla hidratasyon ısılarındaki değişimler Şekil'4.3'te görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi çimento yerine kullanılan uçucu kül miktarı artıkça, hidratasyon ısılarının düştüğü görülmektedir (Snelson vd., 2008).



Şekil 4.3 Uçucu kül içeren çimento hamurlarında hidratasyon ısı (Snelson vd., 2008)

4.5 Uçucu Külün Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi

Harç ve beton içerisindeki suyun azaltılması ve bağlayıcı oranının artırılması amacıyla kullanılan uçucu kül, işlenebilirlik yönünden avantaj sağlamaktadır. Uçucu kül katkılı harç ve betonların su ihtiyacı uçucu külün inceliğine bağlıdır. Uçucu küllerin inceliği arttıkça su ihtiyacı artmaktadır (Erdoğan, 2003). Yapılan çalışmalar, uçucu kül katkılı harç ve betonlarda su ihtiyacının azaldığını ve işlenebilirliğin arttığını göstermektedir (Sivasundaram vd., 1989). Harç ve beton karışımlarında kullanılan uçucu küllerin ince taneli olması, kohezyonun artmasını ve segregasyonun azalmasını sağlayarak erken rötreyi önler (Anuk, 2004). Uçucu kül tanelerinin küresel şekilli olması, taneler arasındaki sürtünmeyi azaltmakta ve harç ve betonun akıcılıklarını arttırmaktadır. Harç ve beton karışımlarına uçucu kül ilave edilmesi priz süresini uzatmaktadır. Priz süresi, uçucu külün inceliğine ve cinsine göre değişiklik göstermektedir. F sınıfı uçucu küllerin, C sınıfı uçucu küllere göre daha uzun priz süresi gösterdiği görülmüştür (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin taze harç ve betonların özelliklerine etkileri olduğu gibi sertleşmiş harç ve betonların özelliklerine de etkisi bulunmaktadır. Sertleşmiş harç ve betonların özelliklerine uçucu külün etkisinin ilave biçimine, puzolanik aktivitesine, tane boyutuna, fiziksel ve kimyasal niteliklerine, ortam sıcaklığına ve diğer birçok etkene bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Karateke, 2009). İlk günlerde uçucu kül katkılı harç ve betonların dayanımlarının, uçucu külsüz harç ve betonlara göre, daha düşük olduğu, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu görülmektedir. İlk günlerdeki dayanıma katkısı C sınıfı uçucu küllerin, F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksektir. Uçucu kül katkılı harç ve betonların kimyasal etkilere dayanıklılığı ve geçirimsizliği, uçucu külsüz harç ve betonlara göre daha yüksektir. Uçucu küllerin atık bir yan ürün olması sebebiyle, Portland

imentosuna göre daha ekonomik ve çevreci harç ve betonların üretilmesine olanak sağladığı görülmektedir. Uçucu külün harç ve betonların üretiminde kullanılmasının bazı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Uçucu kül katkıısı, harç ve betonların priz süresini biraz arttırmaktadır. Bundan dolayı da ilk günlerdeki dayanımları biraz düşürmektedir ve daha uzun süreyle kr edilmeleri ve kalıp alma süresinin daha uzun tutulması gerekmektedir (Erdoğan, 2003). Uçucu küllerin, beton dayanımı ve dayanım kazanma hızı üzerinde etkileri nedeniyle, snme ve rötre üzerine de etkileri bulunmaktadır. Uçucu kül oranının artışı, snme ve rötreyi, erken yaşlarda artırırken, ileriki yaşlarda düşürmektedir (ACI Committee, 1987).



BÖLÜM V

YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

5.1 Alkaliler ile Yapılmış Çalışmalar

Sukontasukkul vd. (2020), çalışmasında, çevresel ve hızlandırılmış kür koşullarında C sınıfı uçucu kül yerine %0, %10, %20 ve %30 silis dumanı ikamesiyle üretilen geopolimerlerin yayılma, priz süresi, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçlarını araştırmıştır. Yazarlar, silis dumanı içeriğinin etkisinin büyük ölçüde kür koşullarına bağlı olduğunu ve çevresel kür için optimum silis dumanı içeriğinin %10 olarak gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Dahası, silis dumanı takviyesinin hızlandırılmış kür için mekanik özellikler üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Sayed ve Zeedan (2012), çalışmalarında, alkali aktivatör olarak hem NaOH hem de Na_2SiO_3 kullanarak çimentosuz bağlayıcı malzeme üretmek için ferrosilikon alaşımı cürufu ve silis dumanını kullanmışlardır. Araştırmacılar, üretilen bağlayıcı malzemelerin özelliklerine silis dumanı/cüruf oranı, alkali aktivatör yüzdesi, su/bağlayıcı oranı, süper akışkanlaştırıcının miktarı ve kür koşullarının etkilerini incelemişlerdir. Yazarlar, bu değişkenlerin etkinliğini değerlendirmek için polimerik bağlayıcı malzeme üzerinde basınç dayanımı ve mineralojik analizler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, %25 silis dumanı/%75 cüruf oranının en etkili oran olduğunu ve NaOH ve Na_2SiO_3 alkali aktivatörlerin optimum değerlerinin %5 olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca süper akışkanlaştırıcı kullanımının karışım suyunu azalttığını ve bağlayıcı malzemelerin işlenebilirliği için önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Aydın ve Baradan (2013), yaptıkları araştırma kapsamında, çelik fiberlerin uzunluk ve hacim fraksiyonunun, çelik fiber takviyeli alkali ile aktive edilen dört farklı cüruf/silis dumanı oranlı harçların mekanik özellikleri ve kuruma büzülme davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Karışımlarda, 6 mm ve 13 mm olmak üzere iki farklı uzunlukta ve %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 olmak üzere dört farklı hacim fraksiyonuna sahip çelik fiberler kullanıldıklarını ifade etmişlerdir. Ayrıca, karşılaştırmak için Portland çimento esaslı 13 mm uzunlukta ve %1.5 çelik fiber takviyeli kontrol harcı hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre, alkali ile aktive edilen harçların mekanik performanslarının Portland

çimentolu kontrol harcından önemli ölçüde daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, alkali ile aktive edilen harçların bu üstün performansını, Portland çimentolu kontrol harcının matrisine kıyasla fiberler ve alkali ile aktive edilen harçların matrisi arasındaki daha yüksek bağ özelliklerine bağlamışlardır. Dahası, alkali ile aktive edilen harçların mekanik performansının, fiber uzunluğunun 6 mm'den 13 mm'ye yükselmesi ile büyük ölçüde iyileştiğini, ayrıca artan fiber oranıyla alkali ile aktive edilen harçlarının kuruma büzülmesinin azaldığını belirtmişlerdir.

Ramezaniapour ve Moeini (2018), çalışmalarında, nanosilis ve silis dumanı içeren alkali ile aktifleştirilmiş cüruf kaplama harçlarının mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu yerine harç karışımlarına %2 ve %4 dozajlarında nanosilis ve %5, %7.5 ve %10 dozajlarında silis dumanı ekleyen araştırmacılar, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufunu etkinleştirmek için sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ve sodyum silikat karışımları kullanmışlardır. Değişkenlerin alkali ile aktifleştirilmiş cürufu harçların mekanik, dayanıklılık ve bağ dayanımı performansları üzerindeki etkisini değerlendirmek için tek, ikili ve üçlü karışimli alkali ile aktifleştirilmiş cürufu harçların akışkanlık, basınç dayanımı, emicilik, klor geçirgenliği ve bağ dayanımı testlerini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, nanosilis eklenmesinin alkali ile aktifleştirilmiş cürufu harçların performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini, silis dumanı ilavesinin ise %5'ten fazla performans iyileştirmesine katkıda bulunmadığını ifade etmişlerdir.

Cheah vd. (2019), yaptıkları çalışmada, küçük dozlarda düşük alkaliniteli sodyum karbonat ve sodyum silikat ile aktive edilen toz haline getirilmiş yakıt külü, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve silis dumanı arasındaki etkileşimi araştırmışlardır. Yazarlar ürettikleri harçların tutarlılık ve ayar davranışlarını, mekanik dayanımlarını ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar, mevcut bir çalışmadaki sıradan Portland çimentolu harçların sonuçları ile sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş geopolimer harçların sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Dahası sodyum karbonat ile aktifleştirilmiş geopolimerin mekanik özelliklerinin, sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş geopolimerinki ile karşılaştırılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlara, en yüksek mekanik özellikleri %4 silis dumanı içeren geopolimer harçlardan elde edildiğini ifade etmişlerdir. Dahası yazarlar, sodyum karbonatla aktifleştirilmiş bağlayıcı sistemin, büyük ölçüde birbirine

bağlı bir kalsiyum karbonat kristallerinden ve C-A-S-H jellerinden oluştuğunu belirtmişlerdir.

Billong vd. (2020), yaptıkları çalışmada, metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer üretiminde silis dumanı bazlı sodyum silikat kullanımının etkinliğini araştırmışlardır. Yoğunlaştırılmamış silis dumanını, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı 2 olan bir sodyum silikat alternatifi çözeltisi elde etmek için 10 molarlık bir sodyum hidroksit çözeltisi içinde uygun şekilde çözündürmüşlerdir. Yazarlar, sodyum silikat alternatifi çözeltisini, 23 ± 2 °C ortam sıcaklığında sırasıyla 1.5 ve 0.7 alkali aktivatör/öncü malzeme oranlarına sahip metakaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer pastaları hazırlamak için alkali aktivatör olarak 1:1 hacim oranında 10 molar sodyum hidroksit solüsyonu ile birlikte kullanmışlardır. Yazarlar, taze hamurlar üzerinde priz süresi ve 3, 7 ve 28 günlük sertleştirilmiş hamurlar üzerinde yoğunluk, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve su emme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, standart ticari sodyum silikata kıyasla sodyum silikat alternatifi çözeltinin kullanılması durumunda fiziksel, mekanik ve termogravimetrik özelliklerde benzer veya biraz daha iyi performans gösterdiğini ve sodyum silikat alternatifi çözeltinin geopolimer üretiminde etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Schade vd. (2022), çalışmalarında, ince öğütülmüş yüksek düzeyde alkali ile aktifleştirilmiş cüruf/silis dumanı karışımlı çimento esaslı bağlayıcı malzemedeki C-A-S-H-miktarının ve hidrotalsit faz içeriğinin nicel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, C-A-S-H fazlarını belirlemek için ^{29}Si ve ^{27}Al sihirli açılı döndürme nükleer manyetik rezonans spektroskopisini, bağlı K/Si oranını belirlemek için enerji dağılım analizi (EDX) teknolojisi ile birleştirmişlerdir. Ayrıca yazarlar, hidrotalsit miktarını tanımlamak için ^{27}Al sihirli açılı döndürme nükleer manyetik rezonans spektroskopisini kullanmışlardır. Yazarlar, geliştirdikleri model yardımıyla, aktivatöre bağlı olarak alkali ile aktifleştirilmiş cüruf/silis dumanı katkılı çimento esaslı malzemenin hidratasyon fazlarını hesaplamışlardır. Yazarlar, aktivatörde artan SiO_2 ile daha uzun zincirli Al birimleri oluştuğunu ve SiO_2 içeriğindeki artış nedeniyle, C-(K)-A-S-H yapılarına daha fazla Si atomunun dahil edildiğini ifade etmişlerdir.

Chindaprasirt vd. (2014), yaptıkları çalışmada, alkali ile aktifleştirilmiş akışkan yataklı yakma teknolojisi ile elde edilmiş uçucu küllü ve silis dumanlı kompozitin dayanım,

sülfat ve sülfürik aside karşı direncini araştırmışlardır. Karışımlarda, ana malzemeyi artan reaktivite ile homojen hale getirmek için akışkan yataklı yakma teknolojisi ile elde edilmiş uçucu kül yerine %1.5, %3.75 ve %5.0 oranlarında silis dumanı kullanmışlardır. Yazarlar, silis dumanı ilavesiyle kompozitin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının 6.55 ile 7.54 arasında olduğunu ve kompozitin dayanım, sülfat ve aside karşı direncinin iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Dahası, %3.75 silis dumanı içeren kompozitin optimum dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar, %5 magnezyum sülfat çözeltisine ve %3 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmış %3.75 silis dumanı içeren kompozitin basınç dayanımlarının kontrolden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar, akışkan yataklı yakma teknolojisi ile elde edilmiş uçucu küllün yüksek kalsiyum içeriğinin dayanım kayıplarına neden olduğunu ve silis dumanının dahil edilmesiyle kompozitin dayanıklılığının arttığını belirtmişlerdir.

Hot vd. (2015), çalışmalarında, kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanının özelliklerini ve çimento bazlı ve alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde olası kullanımını araştırmışlardır. Yazarlar, kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanının kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklerini analiz etmişlerdir. Dahası kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanının çimento ikamesi olarak etkisini gözlemlemek için, silikon metali veya ferrosilikon yan ürünü alaşımlarının ve kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanından oluşan çimento macunlarının ve harçlarının reolojik ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yazarlar, bu iki tip silis dumanının, çimentolu malzemelerin taze ve sertleşmiş özelliklerini aynı şekilde etkilemediğini belirtmişlerdir. Çimentonun bir kısmının kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanı ile değiştirilmesinin, silikon metali veya ferrosilikon yan ürünü alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanının yaptığı gibi basınç dayanımını iyileştirmediğini, ancak iyi bir reolojik davranış kazandırdığını ifade etmişlerdir. Yazarlar, %100 kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanlı harçların alkali aktivasyonunu da araştırmışlardır. Sonuçların, bu yan ürünün incelenmeye değer olduğunu ve inşaat malzemelerinde kullanılabileceğini gösterdiğini ifade etmişlerdir. Hatta 5 molar KOH çözeltisi ile aktive edilen %100 kalsiyum-silikon alaşımlarının yan ürünü olan silis dumanlı harcın 20 °C ve 100% bağıl nem kür koşulu için 47 MPa'lık bir basınç dayanımı değerine ulaştığını belirtmişlerdir.

Rostami ve Behfarnia (2017), çalışmalarında, cürufun silis dumanı ile ikamesinin alkali ile aktifleştirilmiş cürufllu betonun basınç dayanımı ve geçirgenliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Alkali ile aktifleştirilmiş cürufllu beton karışımlarında, cüruf yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 olmak üzere silis dumanı ikamesi kullanmışlardır. Ürettikleri alkali ile aktifleştirilmiş cürufllu betonlara uyguladıkları su kürü ve plastik örtü altında kür olmak üzere iki tür kür koşulunun etkilerini incelenmişlerdir. Yazarlar, silis dumanı ikamesinin basınç dayanımı değerlerini arttırdığını ve alkali ile aktifleştirilmiş cüruf betonun geçirgenliğini azalttığını ve su kürü uygulamasının en uygun kür türü olduğunu ifade etmişlerdir.

Wetzel ve Middendorf (2019), çalışmalarında, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf bazlı taze ve sertleştirilmiş ultra yüksek performanslı betonun özellikleri üzerine silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Ultra yüksek performanslı beton ilkelerine dayalı olarak, dayanım ve dayanıklılığı artırmak için Portland çimentosu içermeyen, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf bazlı ve silis dumanı içeren bir malzeme optimizasyonu yapmışlardır. Optimize işleminin öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna dayandığını ve aktivatör olarak potasyum ve sodyum silikat ile potasyum ve sodyum hidroksit kombinasyonlarının kullanıldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, karışımın paketleme yoğunluğunu arttırmak için inorganik ince taneli malzeme olarak silis dumanı ve metakaolin kullanmışlardır. Agregası olarak ise 0-2 mm kuvars kumu ve kuvars tozu kullanmışlardır. Yazarlar, silis dumanının kademeli olarak arttırılmasıyla reolojik özelliklerin geliştiğini ifade etmişlerdir. Basınç dayanımı değerlerinin bir ultra yüksek performanslı beton ilkelerinin dayanım aralığı ile karşılaştırılabilir değerlere ulaştığını belirtmişlerdir. Dahası düşük kılcal gözenekliliğin cürufun az miktarda metakaolin ile ikame edilmesiyle daha da azaltılabileceğini, bu durumda reaksiyon ürünlerine alüminyum eklenmesi nedeniyle daha yüksek bir polimerizasyon derecesine yol açacağını belirtmişlerdir. Yazarlar, yüksek alkali malzemede etkili bir süper akışkanlaştırıcı kullanılamamakla birlikte, düşük su/bağlayıcı oranı ve iyi bir işlenebilirliğin belirli miktarlarda silis dumanı kullanılarak elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Bostancı (2020), yaptığı araştırmada, atık cam tozu ilavesinin alkali ile aktifleştirilmiş silis dumanı bazlı harçların özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Karışımlara, bu amaçla, atık cam tozunu alkali ile aktifleştirilmiş silis dumanı bazlı harç karışımlarında

ağırlıkça %0, %15, %30 ve %45 oranlarında kumun kısmi ikamesi olarak dört farklı oranda kullanmıştır. 2, 7 ve 28 gün kür uyguladığı 40×40×160 mm prizmatik test numuneleri üzerinde yer değiştirme kontrollü basınç ve eğilme dayanımı testleri yapmıştır. Deneysel sonuçlarda, atık cam tozunun %30'luk bir yer değiştirme seviyesinde, alkali ile aktifleştirilmiş silis dumanı bazlı harçların gözenek yapısında kararlı makro ve geçici kılcal-mikro gözeneler oluştuğunu, harçların eğilme dayanımının %12.65 oranında iyileştirdiğini ve termal iletkenlik katsayısının %30.88 oranında azaldığını ifade etmiştir.

Cong ve Mei (2021), çalışmalarında, kalsiyum karbür kalıntısı ve alçıtaşı ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf bazlı geopolimerin iyileştirilmesi için silis dumanı kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu karışımını, tek parçalı geopolimer hazırlamak için kalsiyum karbür kalıntısı ile aktive etmişlerdir. Dahası, karşılaştırma yapmak için sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilmiş geleneksel iki parçalı bir geopolimer de hazırlamışlardır. En yüksek basınç dayanımına sahip kalsiyum karbür kalıntısı ile aktive edilen geopolimerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için silis dumanı ilave etmişlerdir. Yazarlar, aktivatör tipi/miktarı, silis dumanı değiştirme oranı ve kür yaşının geopolimer bağlayıcıların özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Kalsiyum karbür kalıntısının geopolimer bağlayıcıların hazırlanması için bir aktivatör olarak yüksek potansiyele sahip olduğunu ve ağırlıkça %12 kalsiyum karbür kalıntısı ile aktive edilen geopolimerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Yazarlar, kalsiyum karbür kalıntısı ile aktive edilen geopolimerlerin dayanımlarının, NaOH ile aktive edilen geopolimer ile karşılaştırılabilir olduğunu ve silis dumanı ilavesinin kalsiyum karbür kalıntısı ile aktive edilen geopolimerlerin dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Dong vd. (2021), çalışmalarında, silis dumanı ilave edilmiş alkali ile aktive edilen kalsine edilmemiş Pisha Kumtaşı bazlı geopolimer çimentonun dayanım, su direnci, büzülme ve hidratasyon özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Ağırlıkça %10 silis dumanı ve ağırlıkça %3 NaOH ile üretilen Pisha Kumtaşı bazlı geopolimer çimentonun 28 günlük basınç dayanımının 44.8 MPa değerine ulaştığını ve büzülmesinin %0.36 olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar, Pisha Kumtaşı bazlı geopolimer çimentoya silis dumanı eklenmesinin, Si-Al jellerinin oluşumunu önemli ölçüde iyileştirdiğini ve Si-Al jellerinde Si/Al oranının yükseldiğini ifade etmişlerdir. Si/Al oranının yükselmesiyle Pisha Kumtaşı

bazlı geopolimer çimentonun daha iyi mekanik özellikler ve su direnci kazandığını belirtmişlerdir.

Gupta (2021), çalışmasında, cüruf yerine %60 silis dumanı ikame ederek öğütülmüş yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer kompozit geliştirmeyi amaçlamıştır. Yazar karışımlarda, 0.5, 1.5 ve 2.5 oranlarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kullanmıştır. Yazar, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı arttıkça geopolimer kompozitin basınç dayanımının arttığını ve en yüksek basınç dayanımı değerini 2.5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranından elde ettiğini belirtmiştir.

Jena ve Panigrahi (2021), çalışmalarında, uçucu küllü geopolimer beton karışımlarında iri agrega olarak ferrokrom cürufu veya krom dolgusu, bağlayıcı olarak uçucu kül yerine %0, %5, %10 ve %15 oranlarda silis dumanı kullanmışlardır. Ürettikleri geopolimer betonların işlenebilirlik, yoğunluk, su emme, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerini belirlemişlerdir. Yazarlar, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerinin birbirlerine benzer olduğunu ifade etmişlerdir ve en yüksek basınç dayanımı değerini iri agrega olarak %30 ferrokrom cürufu ve uçucu kül yerine %10 silis dumanı kullanılan uçucu küllü geopolimer beton karışımlarından elde edildiğini belirtmişlerdir.

Premkumar vd. (2022), çalışmalarında, silis dumanı ve geri dönüştürülmüş beton agregasının yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer beton karışımlarında, değişik sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranlarında, yüksek fırın cürufu yerine farklı oranlarda silis dumanı kullanmışlardır. Yazarlar, yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer betonda, silis dumanı oranı arttıkça çökme değerinin azaldığını, ancak yüzde 40 silis dumanı içeren ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2.5 olan karışımda, en yüksek mekanik performansların elde edildiğini belirtmişlerdir.

Saludung vd. (2021), çalışmalarında, alkali ile aktifleştirilmiş cürufun çiçeklenme oluşumu ve alkali sızması üzerine silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Yazarlar karışımlarda, cüruf yerine %0, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi kullanmışlardır. Yazarlar, %100 yüksek fırın cürufu ile üretilen numunede, en hızlı çiçeklenme oluştuğunu ve alkali sızma oranının en yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Dahası yazarlar, alkali ile aktifleştirilen cürufa silis

dumanı eklenmesinin, alkali hareketliliğini azalttığını ve bu durumda çiçeklenme oluşumunun azalmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Velraj Kumar vd. (2022), çalışmalarında, kendiliğinden yerleşen geopolimer betonda yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının performansını incelemişlerdir. Yazarlar birinci grup karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak, uçucu kül yerine %10 silis dumanı ve birinci grup karışımlarda, yüksek fırın cürufu yerine %30 uçucu kül ve aktivatör olarak 12 molar sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Dahası yazarlar, ince agrega olarak nehir kumu yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kendi ürettikleri imalat kumu kullanmışlardır. Yazarlar, geopolimer beton karışımının taze özelliklerinden çökme, T_{50cm} çökme akışı, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu testlerini ve sertleşmiş geopolimer beton özelliklerinden basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı testlerini gerçekleştirmişlerdir. Dahası yazarlar, kendiliğinden yerleşen geopolimer beton kırışların eğilme davranışını belirlemek için iki nokta yüklemeyle deneysel analizler gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, kendiliğinden yerleşen geopolimer betonlarda, ince agrega olarak nehir kumu yerine, kendi ürettikleri imalat kumu kullanımının artmasıyla hem geopolimer betonun taze özelliklerinin hem de sertleşmiş özelliklerinin daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Luga (2015), yaptığı çalışmada, NaOH ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımlarıyla ürettiği numunelerin özelliklerini araştırmıştır. Yazar, 50 °C ile 100 °C arasında değişiklik gösteren sıcaklık değerlerinde kür uygulanan numunelerin eğilme ve basınç değerlerinin yanı sıra, yayılma sonuçlarına göre optimum karışım oranlarını belirlemiştir. 28 günlük deneysel çalışmalar sonucunda, şahit numunelerde PC 42.5 için 54.7 MPa ve PC 52.5 için 62.4 MPa basınç dayanımı değerleri elde edildiğini, 3 günlük deneysel çalışmalar sonucunda, yüksek fırın cürufu bazlı numunede 75.5 MPa, uçucu kül bazlı numunede 74.1 MPa ve yüksek fırın cürufu-uçucu kül karışımı bazlı numunede 66.5 MPa basınç dayanımı değerleri elde ettiğini ifade etmiştir. Ayrıca yazar, bu çalışma sonucunda, Portland çimentolarıyla üretilen numunelere göre, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımlarıyla üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının, rötrelerinin, sıcaklık dayanımlarının, aşınma dirençlerinin ve sülfürik asit (H_2SO_4) dirençlerinin daha iyi olduğunu belirtmiştir. Diğer yandan, geopolimer numunelerin hidroklorik asit (HCl), donma-çözünme ve bazik ortama karşı dirençlerinin zayıf olduğunu ifade etmiştir.

Bajpai vd. (2020), yaptıkları araştırmada, aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak uçucu kül ve silis dumanı bazlı geopolimer betonun çevresel etki değerlendirmesini yapmışlardır. Yazarlar, eşit su/bağlayıcı oranı ve 28 günlük basınç dayanımı 35 MPa'dan fazla olan her bir beton için, bir karışım tasarımı analizi gerçekleştirmişlerdir. Yaşam döngüsü değerlendirme sonuçlarının, alkali aktivatörlerin ve çimentonun sırasıyla geopolimer ve çimentolu beton için olumsuz çevresel etkilerin başlıca kaynakları olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Jeopolimer betonların küresel ısınma potansiyeline etkisinin, geleneksel çimentolu betonundan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Dahası, sodyum silikat olmadan aktive edilen uçucu kül+silis dumanı esaslı geopolimer betonu en düşük çevresel etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül+silika dumanı esaslı geopolimer beton kullanımıyla birim hacim başına %10.87 ile %17.77 oranları arasında maliyete azalma elde edildiğini ve geopolimer betonun maliyet ve çevresel faydaları açısından sürdürülebilirliğinin, silis dumanı kullanımıyla daha da arttığını ifade etmişlerdir. Uçucu kül+silis dumanı karışımlı geopolimerin inşaat sektöründe kullanımının sürdürülebilirliği artırmak için büyük bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, betonda endüstriyel yan ürünlerin kullanımıyla atık yönetiminin etkin bir şekilde yapılabildiğini belirtmişlerdir.

Das vd. (2020), çalışmalarında, çevresel kür etkilerine tabi tutulan F sınıf uçucu kül bazlı geopolimer betonların bazı özellikleri üzerine kireç ve silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, geopolimer betonların priz sürelerinin ve çökme değerlerinin artan silis dumanı içeriğiyle geliştiğini ve artan kireç içeriğiyle azaldığını bildirmişlerdir. Dahası, yazarlar, en yüksek basınç dayanımı değerinin F sınıf uçucu kül yerine %7.5 kireç ve %2 silis dumanı kullanılarak elde edildiğini bildirmişlerdir.

Yang vd. (2021), çalışmalarında, Na_2SO_4 ile aktive edilen C sınıf uçucu külün özelliklerinde aktivatör dozajının ve silis dumanının etkinliğini araştırmışlardır. Yazarlar, iki grupta hazırlanan karışımların yarısında %80 uçucu kül ve %20 Portland çimentosu, diğer yarısında ise %70 uçucu kül, %10 silis dumanı ve %20 Portland çimentosu kullanmışlardır. Araştırmacılar, silis dumanı içeriğinin ve bağlayıcı kütlesine göre %2.5 alkali dozajının, Na_2SO_4 ile aktive edilen yüksek hacimli C sınıf C uçucu külün dayanım gelişimini büyük ölçüde hızlandığını ve artırdığını bildirmişlerdir.

BÖLÜM VI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin bilgileri ile bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki başlıklar altında anlatılmıştır. Bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı (SD) ve C sınıfı uçucu kül (UK), aktivatör olarak ise Na_2SiO_3 (SS) ve NaOH (SH) kullanılmıştır. SD esaslı alkali ile aktive edilmiş yüksek dayanımlı harçlara (AAYDH) ek olarak Portland çimentosu (PC) kullanılarak yüksek dayanımlı harç (YDH) yani kontrol harcı (KH) üretilmiştir. SD esaslı AAYDH üretiminde, bağlayıcı malzeme olarak SD yerine dört farklı oranda UK ikame edilmiş ve dört farklı SH/SS oranı kullanılmıştır. Üretilen harçların özelliklerinden olan birim ağırlık (ρ_a), basınç dayanımı (f_c), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve ultrases geçiş hızı (U_{pv}) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu özellikler PC esaslı YDH'in (KH'nin) özellikleri ile kıyaslanmıştır. Dahası, SD esaslı AAYDH'ler ve PC esaslı YDH yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve yüksek sıcaklıklardan sonra birim ağırlık (ρ_a), basınç dayanımı (f_c), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve ultrases geçiş hızı (U_{pv}) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına göre en iyi mekanik performansı sergileyen SH/SS oranına sahip SD esaslı AAYDH'lerin karışım grubu ve PC esaslı YDH karışımına üç farklı oranda çelik fiber ilave edilmiştir. Çelik fiber içeren karışımların hem yüksek sıcaklıklar öncesi hem de yüksek sıcaklıklar sonrası birim ağırlık (ρ_a), basınç dayanımı (f_c), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve ultrases geçiş hızı (U_{pv}) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir.

6.1 Kullanılan Malzemeler

6.1.1 Çimento

PC esaslı YDH (KH) üretiminde TS EN 197-1 (2012) standardına uygun CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PC) kullanılmıştır. Çimento Ankara OYAK çimento fabrikasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.13 ve BET özgül yüzey alanı $1.834 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dır. Karışımlarda kullanılan çimentonun görüntüsü Fotoğraf 6.1a'da verilmiştir. Kimyasal özellikleri ise Çizelge

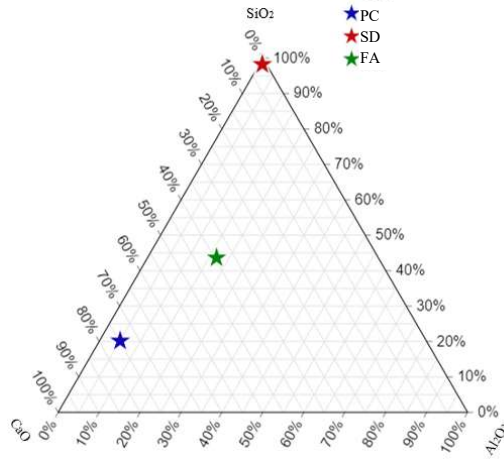
6.1’de sunulmuştur. Çimentonun SiO_2 , CaO ve Al_2O_3 içeriğini gösteren üçlü diyagramı ve tane boyutu dağılımı sırasıyla Şekil 6.1 ve 6.2’de verilmiştir. Ayrıca, PC’nin XRD ve FTIR analizleri sırasıyla Şekil 6.3 ve 6.4’de verilmiştir. Şekil 6.3’de görüldüğü üzere, PC’nin XRD piklerinde hatrurit (Ca_3SiO_5) (H), alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (G), alit (3CaSiO_2) (Alt), kalsiyum manganat ($\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2$) (CMn), larnit (Ca_2SiO_4) (L) ve kalsit (CaCO_3) (Cc) mineralleri tespit edilmiştir. Şekil 6.4’de görüldüğü üzere, PC’nin FTIR bantları 2360 cm^{-1} , 2341 cm^{-1} , 1418 cm^{-1} , 1124 cm^{-1} , 874 cm^{-1} , 713 cm^{-1} , 669 cm^{-1} , 600 cm^{-1} 515 cm^{-1} ve 440 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir.



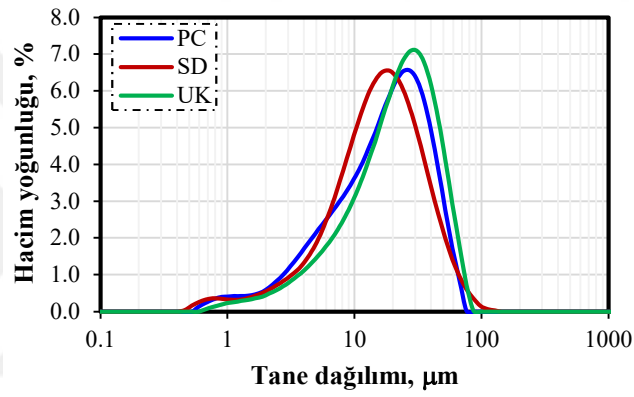
Fotoğraf 6.1. a) Karışım malzemeleri, b) kalıplanmış karışımlar, c) 1000 °C’deki numuneler, d) 1000 °C’den sonra numuneler, e) f_{fs} testi ve f) f_c testi.

Çizelge 6.1. PC, SD ve UK’nın özellikleri

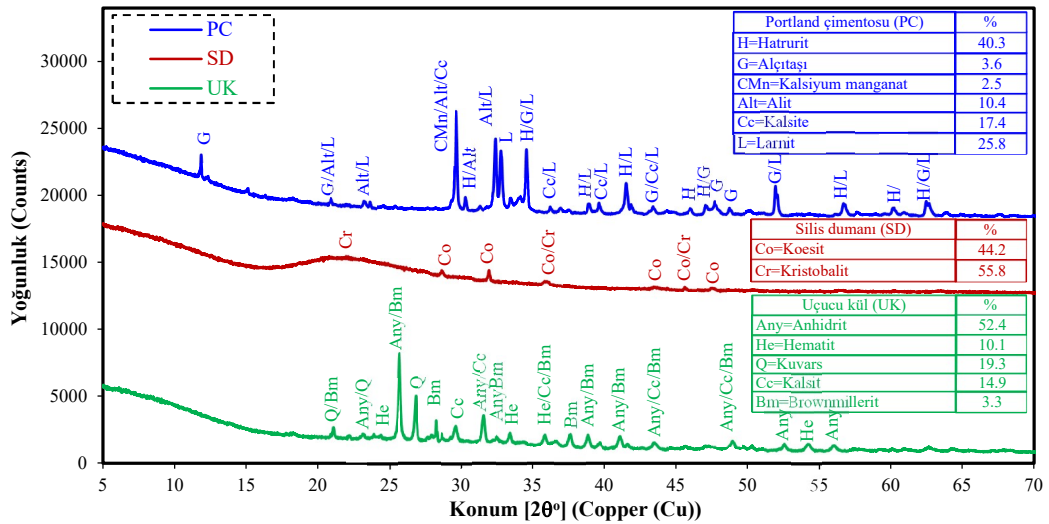
Kimyasal bileşenler (%)	PC	SD	UK
Fe_2O_3	3.80	0.66	5.54
Mn_3O_4	0.12	0.17	0.15
TiO_2	0.28	0.16	0.65
CaO	64.22	0.88	31.75
K_2O	0.62	1.33	0.97
SO_3	2.84	0.23	9.61
P_2O_5	0.12	0.15	0.42
SiO_2	18.06	86.84	31.55
Al_2O_3	4.27	0.80	13.53
MgO	1.67	5.02	2.24
Na_2O	0.35	1.03	0.04
Kızdırma kaybı	3.65	2.73	3.55
Fiziksel özellikler			
Priz başlama süresi, dakika	$60 \geq$		
Özgül ağırlık	3.13	2.52	2.58
Özgül yüzey alanı (Blaine), m^2/kg	360		
Özgül yüzey alanı (BET), m^2/g	1.834	22.710	5.486



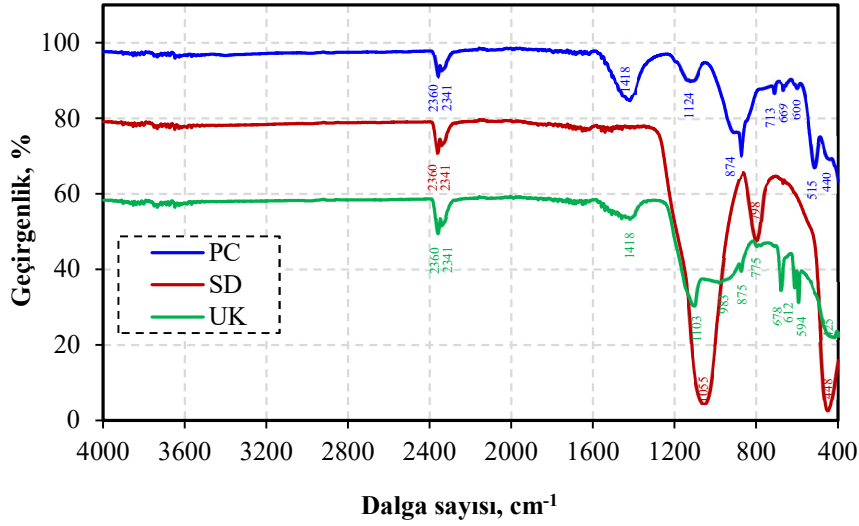
Şekil 6.1. PC, SD ve UK'nın üçlü diyagramı



Şekil 6.2. PC, SD ve UK'nın tane dağılım analizleri



Şekil 6.3. PC, SD ve UK'nın XRD analizleri



Şekil 6.4. PC, SD ve UK'nın FTIR analizleri

6.1.2 Silis dumanı

Deneysel çalışmalarda SD esaslı AAYDH'lerin üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan SD, Antalya Etibank Elektrometalürji fabrikasından temin edilmiştir. SD'nin özellikleri Çizelge 6.1'de sunulmuştur. SD esaslı AAYDH'lerin üretiminde kullanılan SD'nin görünümü Fotoğraf 6.1a'da görülmektedir. SD'nin özgül ağırlığı 2.52 iken, BET özgül yüzey alanı 22.710 m²/g'dır. Dahası, SD'nin SiO₂, CaO ve Al₂O₃ içeriğini gösteren üçlü diyagramı Şekil 6.1a'da, tane boyutu dağılımı ise Şekil 6.2'de sunulmuştur. SD'nin XRD ve FTIR analizleri ise sırasıyla Şekil 6.3 ve 6.4'te sunulmuştur. Şekil 6.3'deki SD'nin XRD analizi sonuçlarında, kristobalit (SiO₂) (Cr) ve koezit (SiO₂) (Co) pikleri elde edilmiştir. Şekil 6.4'de gözlemlenen FTIR analizi sonuçlarında ise 1055 cm⁻¹, 798 cm⁻¹ ve 448 cm⁻¹ bantları tespit edilmiştir.

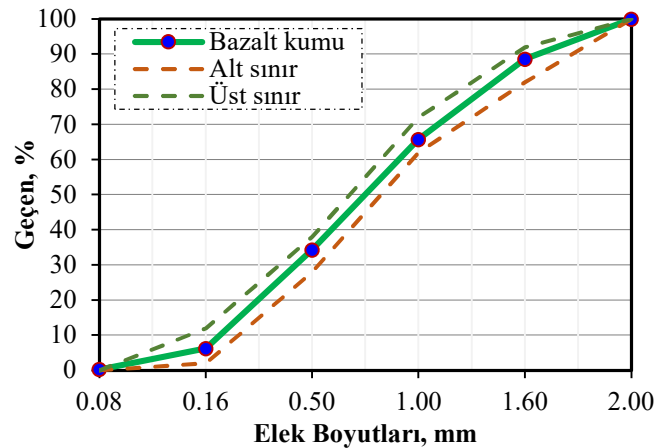
6.1.3 Uçucu kül

SD esaslı AAYDH üretiminde kullanılan UK, Afşin-Elbistan Termik Santrali'nden temin edilmiş olup, görüntüsü Fotoğraf 6.1a'da, özellikleri ise Çizelge 6.1a'da verilmiştir. UK'nın özgül ağırlığı 2.58 iken, BET özgül yüzey alanı 5.486 m²/g'dır. UK'nın kimyasal içeriği incelendiğinde CaO içeriğinin %32.12 ile oldukça yüksek bir değere sahip olduğu ve bu sebeple SD esaslı AAYDH üretiminde kullanılan UK'nın ASTM C618-19 standardına göre yüksek Ca içeriğine sahip C sınıfı UK olduğu görülmektedir. UK'nın

SiO₂, CaO ve Al₂O₃ içeriğini gösteren üçlü diyagramı Şekil 6.1’de, tane boyutu dağılımı ise Şekil 6.2’de verilmiştir. SD’nin XRD ve FTIR analizleri ise sırasıyla Şekil 6.3 ve 6.4’te sunulmuştur. Şekil 6.3’ten anlaşılabacağı üzere XRD piklerinde hematit (Fe₂O₃) (He), anhidrit (CaSO₄) (Any), kuvars (SiO₂) (Q), brownmillerite (Ca₂(Al,Fe)₂O₅) (Bm) ve kalsit (CaCO₃) (Cc) tespit edilmiştir. UK’nın FTIR analizi sonuçlarına göre ise 1418 cm⁻¹, 1103 cm⁻¹, 875 cm⁻¹, 775 cm⁻¹, 678 cm⁻¹, 612 cm⁻¹, 594 cm⁻¹ ve 425 cm⁻¹ bantları tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, 450 cm⁻¹ ile 670 cm⁻¹ aralığındaki ve 1055 cm⁻¹’deki bantlar Si–O–Si, 2340 cm⁻¹ ile 2360 cm⁻¹ aralığındaki bantlar CO₂, 1418 cm⁻¹ ve 860 cm⁻¹ ile 880 cm⁻¹ aralığındaki bantlar CO₃²⁻, 1100 cm⁻¹ ile 1200 cm⁻¹ aralığındaki bantlar ise SO₄ titreşimlerini temsil ettiği görülmektedir (Lodeiro vd., 2009; Criado vd., 2005; Ylmén vd., 2009)

6.1.4 Bazalt kumu

Tüm harç numunelerinin üretiminde bazalt kumu (BK) kullanılmıştır. Niğde Altunhisar bölgesinden elde edilen bazalt agregaları önce şehir şebeke suyu ile yıkanmıştır. Yıkanmış bazalt agregaları, agrega kırıcıda kırılmıştır. Kırılan agregalar 105 °C’deki etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kurutulmuş agregalar TS EN 196-1 (2016)’de belirtilen ebatlardaki eleklerden elendikten sonra, TS EN 196-1 (2016)’de belirtilen sınırlara uygun olarak 2 mm’nin altındaki eleklerden elenmiştir. Elenen agregalar TS EN 196-1 (2016),’de belirtilen oranların sınırları arasında karıştırılarak BK olarak elde edilmiştir. Elde edilen BK’nın elek analizi Şekil 6.5’de ve görüntüsü ise Fotoğraf 6.1a’da verilmiştir. Karışımlarda kullanılan BK’nın yoğunluğu 2.77 g/cm³’dür.



Şekil 6.5. Bazalt kumunun elek analizi

6.1.5 Alkali aktivatörler

SD esaslı AAYDH'lerin üretiminde alkali aktivatör olarak sıvı haldeki sodyum silikat (SS) (Na_2SiO_3) ve katı haldeki sodyum hidroksit (SH) (NaOH) kullanılmıştır. Bu malzemelerin görüntüsü Fotoğraf 6.1a'da verilmiştir. Her iki malzeme de Yetiş Kimya Temizlik Kozmetik Limited Şirketi'nden temin edilmiştir. Tüm SD esaslı AAYDH'lerin su/bağlayıcı oranını sabit tutmak için kullanılan sıvı sodyum silikatta bulunan su karışım hesaplarında dikkate alınmıştır. Katı NaOH , karışım suyunda ve sıvı sodyum silikatta tamamen çözüldükten sonra karışımlarda kullanılmıştır. Sodyum silikatın yoğunluğu 1.41 g/cm^3 iken, su, SiO_2 ve Na_2O içerikleri sırasıyla %62.5, %26 ve %11.5'dir. Katı sodyum hidroksitin saflığı %97 iken, katı parçacıklarının yoğunluğu 2.12 g/cm^3 'tür.

6.1.6 Süperakışkanlaştırıcı ve karışım suyu

Polikarboksilik eter bazlı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı (SA), SD esaslı AAYDH'lerin ve PC esaslı YDH'nin işlenebilirliğini ayarlamak için kullanılmıştır. SA, karışımlarda kullanılan su miktarını azaltılarak taze haldeki numunelerin yeterli yayılma değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Karışım suyu ise içilebilir şehir şebeke suyudur.

6.1.7 Çelik fiber

Bu çalışmada, Kemerix Şirketi'nden temin edilen, 0.55 mm çapında ve 35 mm uzunluğunda kancalı çelik fiber (ÇF) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çelik fiberlerin özellikleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan çelik fiberin özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (mm)	En boy oranı	Çekme dayanımı (MPa)	Fiber miktarı (birim başına kg)	Yoğunluk (g/cm^3)
35	0.55	64	1500	8738	7.85

6.2 Karışım Oranları

Bu çalışmada, farklı UK ve $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (SH/SS) oranlarına sahip SD esaslı AAYDH'lere (10/15/20/25UK-0.3/0.4/0.5/0.6) ek olarak kontrol harcı (KH) olan PC

esaslı YDH üretilmiştir. SD esaslı AAYDH’lerde SD yerine %10, %15, %20 ve %25 oranlarında UK kullanılmıştır. Bu AAYDH’lerde, katı haldeki SH/SS oranları 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 olan aktivatörlerle dört farklı grupta hazırlanmıştır. Tüm karışımların su/bağlayıcı oranları 0.32, katı haldeki aktivatör/bağlayıcı oranları ise 0.25 olarak belirlenmiştir. Ayrıca en iyi mekanik özellikleri gösteren SD esaslı AAYDH’lerden SH/SS oranı 0.3 olan karışım grubuna ve kontrol harcı olarak üretilen PC esaslı YDH’ye hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında çelik fiber (ÇF) ilavesi yapılmıştır. PC esaslı YDH (KH) karışımları çelik fiber içeriğine göre (0.5/1.0/1.5-KH) kodlanırken, SD esaslı AAYDH karışımları ise çelik fiber içeriği, UK içeriği ve SH/SS oranlarına göre (0.5/1.0/1.5-10/15/20/25UK-0.3) kodlanmıştır. Çizelge 6.3’te harç karışımlarında kullanılan malzemelerin miktarları, karışım kodları ve anlamları verilmiştir.

Çizelge 6.3. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

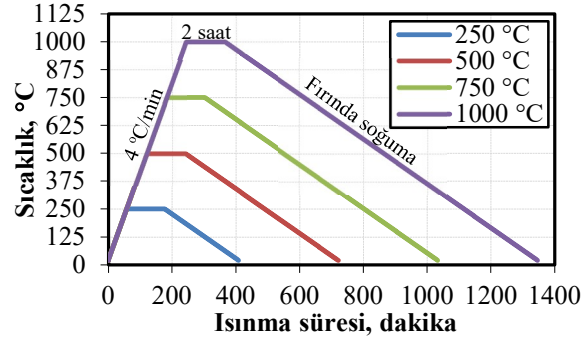
Gruplar	Anlamı	Karışım kodu	PC (g)	SD (g)	UK (g)	ÇF (g)	SA (g)	SH (g)	SS (g)	Su (g)	BK (g)
1	Kontrol harcı	KH	450				20.25			144	1350
	0.5-Kontrol harcı	0.5-KH	450				20.25			144	1350
	1.0-Kontrol harcı	1.0-KH	450				20.25			144	1350
	1.5-Kontrol harcı	1.5-KH	450				20.25			144	1350
2	%90SD+%10UK-0.3	10UK-0.3		405.0	45.0		33.75	26	228	3	1350
	%85SD+%15UK-0.3	15UK-0.3		382.5	67.5		33.75	26	228	3	1350
	%80SD+%20UK-0.3	20UK-0.3		360.0	90.0		33.75	26	228	3	1350
	%75SD+%25UK-0.3	25UK-0.3		337.5	112.5		33.75	26	228	3	1350
3	%90SD+%10UK-0.4	10UK-0.4		405.0	45.0		33.75	32.3	212	13	1350
	%85SD+%15UK-0.4	15UK-0.4		382.5	67.5		33.75	32.3	212	13	1350
	%80SD+%20UK-0.4	20UK-0.4		360.0	90.0		33.75	32.3	212	13	1350
	%75SD+%25UK-0.4	25UK-0.4		337.5	112.5		33.75	32.3	212	13	1350
4	%90SD+%10UK-0.5	10UK-0.5		405.0	45.0		33.75	37.6	197	22	1350
	%85SD+%15UK-0.5	15UK-0.5		382.5	67.5		33.75	37.6	197	22	1350
	%80SD+%20UK-0.5	20UK-0.5		360.0	90.0		33.75	37.6	197	22	1350
	%75SD+%25UK-0.5	25UK-0.5		337.5	112.5		33.75	37.6	197	22	1350
5	%90SD+%10UK-0.6	10UK-0.6		405.0	45.0		33.75	42	184	30	1350
	%85SD+%15UK-0.6	15UK-0.6		382.5	67.5		33.75	42	184	30	1350
	%80SD+%20UK-0.6	20UK-0.6		360.0	90.0		33.75	42	184	30	1350
	%75SD+%25UK-0.6	25UK-0.6		337.5	112.5		33.75	42	184	30	1350
6	0.5-%90SD+%10UK-0.3	0.5-10UK-0.3		405.0	45.0	30.144	33.75	26	228	3	1350
	0.5-%85SD+%15UK-0.3	0.5-15UK-0.3		382.5	67.5	30.144	33.75	26	228	3	1350
	0.5-%80SD+%20UK-0.3	0.5-20UK-0.3		360.0	90.0	30.144	33.75	26	228	3	1350
	0.5-%75SD+%25UK-0.3	0.5-25UK-0.3		337.5	112.5	30.144	33.75	26	228	3	1350
7	1.0-%90SD+%10UK-0.3	1.0-10UK-0.3		405.0	45.0	60.288	33.75	26	228	3	1350
	1.0-%85SD+%15UK-0.3	1.0-15UK-0.3		382.5	67.5	60.288	33.75	26	228	3	1350
	1.0-%80SD+%20UK-0.3	1.0-20UK-0.3		360.0	90.0	60.288	33.75	26	228	3	1350
	1.0-%75SD+%25UK-0.3	1.0-25UK-0.3		337.5	112.5	60.288	33.75	26	228	3	1350
8	1.5-%90SD+%10UK-0.3	1.5-10UK-0.3		405.0	45.0	90.432	33.75	26	228	3	1350
	1.5-%85SD+%15UK-0.3	1.5-15UK-0.3		382.5	67.5	90.432	33.75	26	228	3	1350
	1.5-%80SD+%20UK-0.3	1.5-20UK-0.3		360.0	90.0	90.432	33.75	26	228	3	1350
	1.5-%75SD+%25UK-0.3	1.5-25UK-0.3		337.5	112.5	90.432	33.75	26	228	3	1350

6.3 Numunelerin Üretimi

Tüm harçlar, TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak, Hobart mikserinde karıştırılarak üretilmiştir. Harçların üretiminde ilk olarak bağlayıcı malzemeler ve su karıştırma kabına yerleştirildikten sonra, mikser 30 saniye boyunca düşük hızda (140 devir/dakika) çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda bazalt kumunun tamamı hazneye eklenmiş ve mikser 30 saniye daha yüksek hızda (285 devir/dakika) çalıştırılmıştır. Daha sonra karıştırıcı durdurularak 90 saniye beklenmiştir. Bu bekleme süresi boyunca, kabın çeperine ve tabanına yapışan harç sıyrılıp kabın ortasında toplanmıştır. Karıştırma işlemine yüksek hızda 60 saniye daha devam edilmiştir. Çelik fiber içeren harç karışımlarında ise çelik fiber taze karışımlara %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında eklenerek yaklaşık 1 dakika boyunca tekrar karıştırılarak hazırlanmıştır. Karıştırma işleminden sonra hem çelik fiber içermeyen hem de çelik fiber içeren karışımların yayılma çapları ölçülmüş ve taze birim ağırlık değerleri tartıldıktan sonra karışımlar iki aşamada 40×40×160 mm prizmatik çelik kalıplara yerleştirilmiş ve her aşama titreşimli tabla üzerinde sıkıştırılmıştır. Kalıplara yerleştirilen karışımların üzeri kapatılarak 24 saat boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiş, bu süre sonunda kalıplardan alınan numuneler kodlanarak poşetlere yerleştirilerek test zamanına kadar laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir.

6.4 Yüksek Sıcaklık Uygulaması

Poşetler içerisinde 90 gün kür edilen PC esaslı YDH ve SD esaslı AAYDH karışımlarından üretilen 40×40×160 mm boyutundaki her bir sıcaklık için üç prizma numunesi 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Bu sıcaklıklardan 1000 °C'ye maruz kalan numunelerin sıcaklık anındaki ve sıcaklık sonrası görünümü Fotoğraf 6.1c ve d'de verilmiştir. Şekil 6.6'da da numunelere uygulanan sıcaklık ve ısınma süresi gösterilmiştir. Her sıcaklık için gruplanan numuneler, yüksek sıcaklık fırınına yerleştirildikten sonra, 4 °C/dakika sıcaklık artışı ile hedef sıcaklığa ulaştırılmış ve numuneler hedef sıcaklıkta 2 saat tutulmuştur. Bu sürenin sonunda fırın kapatılmış üzerindeki havalandırma kapağı açılmış ve numuneler fırın ortamında soğutulmuştur. Soğuyan numuneler üzerinde mekanik özellikler ve mikroyapı analizleri yapılmıştır.



Şekil 6.6. Numunelere uygulanan sıcaklık ve ısınma süresi

6.5 Yapılacak Deneyler

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin birim ağırlık (ρ_a), ultrases geçiş hızı, (U_{pv}), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve basınç dayanımı (f_c) deneylerinde her deney için üç adet numune kullanılmış ve deney sonuçları üç numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, numunelerin kimyasal yapı ve mikroyapılarındaki değişimleri incelemek için XRD, FTIR, SM ve FESEM/EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.5.1 Taze harç deneyleri

6.5.1.1 Yayılma ve Taze birim ağırlık

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin yayılma deneyleri ASTM C230/C230M-21 (2021) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Yayılma deneylerinde, yayılma tablasının üzerine bir yayılma hunisi yerleştirilmiştir. Daha sonra, bu huninin içi taze karışımlarla doldurulmuş ve huninin üst kısmındaki fazla olan taze harç sıyrılarak huninin üzeri düzeltilmiştir. Son olarak, yayılma tablası hunisi çıkarılıp yayılma tablası 25 kez düşürüldükten sonra, taze karışımların yayılma çapları ölçülmüştür. PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin yayılma deneyinin görünümü Fotoğraf 6.2'de sunulmuştur.



Fotoğraf 6.2 Yayılma deneyi

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin taze birim ağırlık (ρ_a) değerleri TS EN 12350-6 (2019) standardına göre belirlenmiştir. Taze birim ağırlık değerleri, taze haldeki harç karışımlarının 40×40×160 mm boyutundaki kalıplara yerleştirmesinden sonraki ağırlıklarının tartılmasıyla, bu tartıdan boş kalıpların ağırlıklarının çıkarılmasıyla ve kalıbın hacmine bölünmesiyle belirlenmiştir.

6.5.2 Sertleşmiş harç deneyleri

6.5.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş birim ağırlık (ρ_a) değerleri TS EN 12390-7 (2021) standardına göre belirlenmiştir. PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş birim ağırlık değerleri, üç adet 40×40×160 mm'lik numunenin ağırlıklarının tartılması ve bu üç numunenin ağırlıklarının ortalamasının hacmine bölünmesiyle elde edilmiştir.

6.5.2.2 Ultrases geçiş hızı

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin ultrases geçiş hızı (U_{pv}) deneyleri ASTM C597-09 (2009) standardına uygun olarak 40×40×160 mm numuneler üzerinde gerçekleştirmiştir. Deneyde, 54 kHz darbe frekansına ve 0.10 μ s hassasiyete sahip ultrasonik tahribatsız dijital test cihazı kullanılmıştır. Harç numunelerine uygulanan U_{pv} deneyi örneği Fotoğraf 6.3'te görülmektedir. DeneySEL hataları en aza indirmek için ilk olarak numunelerin ölçüm yapılacak yüzeyleri titizlikle temizlenmiştir. Sonrasında, cihazın alıcı ve verici probaları, temizlenmiş ve jel uygulanmış yüzeylere bastırılmıştır. Bu

yöntemle, 160 mm uzunluğundaki numunelerde ses dalgasının geçiş süresi kaydedilmiştir. Kaydedilen süre ile probalar arasındaki mesafeyi esas alınarak, cihaz U_{pv} değerlerini otomatik olarak hesaplamıştır. U_{pv} değerleri üç ölçüm sonucuna göre belirlenmiştir.



Fotoğraf 6.3 U_{pv} deneyinin yapılışı

6.5.2.3 Eğilme dayanımı

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin eğilme dayanımı (f_{fs}) deneyleri, TS EN 196-1 (2016) ve TS EN 1015-11 (2007) standartlarına uygun olarak, mesnetler arasındaki mesafe 100 mm olacak şekilde 40×40×160 mm numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan yükleme hızı ise 50 N/s olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin her bir karışımının üç numunesi eğilme dayanımı testine tabi tutulmuş ve üç numunenin ortalamasından eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir. PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin eğilme dayanımı deneylerinin yapılışına ilişkin örnekler Fotoğraf 6.4'te görülmektedir.



Fotoğraf 6.4 f_{fs} deneyinin yapılışı

6.5.2.4 Basınç dayanımı

PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin basınç dayanımı (f_c) deneyleri, TS EN 196-1 (2016) ve TS EN 1015-11 (2007) standartlarına uygun olarak, eğilme deneyinde ikiye ayrılan numunelerin altına ve üzerine 40×40×3 mm çelik levhalar yerleştirilerek, 40×40×40 mm numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan yükleme hızı ise 2500 N/s olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin her bir karışımının üç numunesi basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve üç numunenin ortalamasından basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin basınç dayanımı deneylerinin yapılışına ilişkin örnekler Fotoğraf 6.5'te görülmektedir.



Fotoğraf 6.5 f_c deneyinin yapılışı

6.6 Yüksek Sıcaklıklar Sonrasındaki Deneyler

90 gün boyunca plastik torbalarda kür edilen PC esaslı YDH'ler ve SD esaslı AAYDH'ler, uygulanacak 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara, 4 °C/dakikalık ısıtma hızıyla ulaşmıştır. 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara iki saat maruz bırakılan PC esaslı YDH'ler ve SD esaslı AAYDH'ler üzerinde birim ağırlık (ρ_a), ultrases geçiş hızı (U_{pv}), eğilme dayanımı (f_{fs}) ve basınç dayanımı (f_c) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kalan PC esaslı YDH'lerdeki ve SD esaslı AAYDH'lerdeki mikroyapısal değişimleri belirlemek ve gözlemlemek için XRD, FTIR, SM ve FESEM/EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.7 XRD Analizleri

XRD analizleri 25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarına maruz kalmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, seçilen harç numunelerinden alınan parçalar, kurutulduktan ve toz haline getirildikten sonra, 5° ile 70° tarama aralığında, 3° dakika⁻¹ tarama hızı ve 2Teta (2θ°) test parametreleri ile Cu-Kα radyasyonu ($k_{\alpha 1}=1.5418 \text{ Å}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.8 FTIR Analizleri

FTIR analizleri 25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarına maruz kalmış numunelerden elde edilen toz halindeki numuneler üzerinde, potasyum bromür (KBr) pelet yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analizler, 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında, 4 cm⁻¹ çözünürlükle ve her ölçümde 64 tarama ortalamasıyla gerçekleştirilmiştir.

6.9 SM Analizleri

SM analizleri 25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarına maruz kalmış numunelerden taş kesme makinesiyle 4x4x0.5 cm boyutlarında kesilmiş numunelerin yüzey morfolojisini incelemek için, 10X büyütme oranında ve ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

6.10 FESEM ve EDX Analizleri

FESEM ve EDX analizleri, 25 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarına maruz kalmış numunelerden elde edilen küçük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. FESEM analizleri, matris, arayüz bölgesi ve agregadaki yapısal değişiklikleri gözlemlemek için yapılmıştır. EDX analizleri ise harçların matris yapısındaki kimyasal değişimleri incelemek amacıyla kullanılmıştır. Net görüntüler elde etmek için altınla kaplanmış parça numunelerin FESEM analizleri, 10 kV'lık elektron yüksek gerilimi, 10–16 mm'lik çalışma mesafesi ve 5.00 KX'lik büyütme ile gerçekleştirilmiştir. EDX alan analizleri ise FESEM analizlerinde belirlenen alanlarda farklı kV ve büyütmeyle gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM VII

DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 Taze Harç Deney Sonuçları

7.1.1 Yayılma ve Taze birim ağırlık

ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin yayılma değeri 16 cm iken, SD esaslı AAYDH'lerin yayılma değerleri 11 cm ile 12 cm arasında değişim göstermiştir. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin yayılma değeri ÇF içeriği artıkça 16 cm'den 13.5 cm'ye kadar düşerken, SD esaslı AAYDH'lerin yayılma değerleri ÇF içeriği artıkça 12 cm'den 9 cm'ye kadar düşmüştür. PC esaslı YDH'lere göre SD esaslı AAYDH'lerin yayılma değerleri daha düşüktür. SD esaslı AAYDH'lerin yayılma değerlerinde SD yerine kullanılan C sınıfı UK içeriği artıkça da bir azalma gözlemlenmiştir.

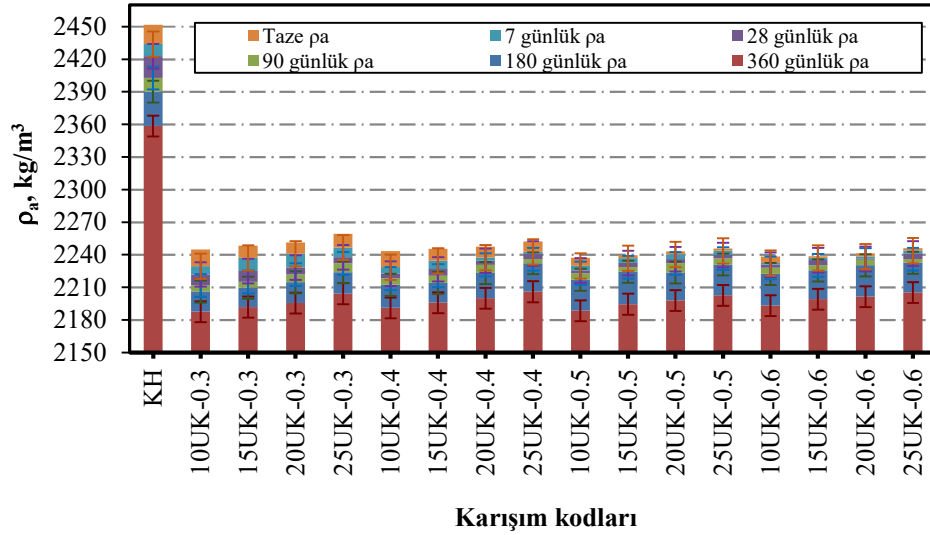
ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin (KH'nin) ve SD esaslı AAYDH'lerin taze birim ağırlık (ρ_a) değerleri Şekil 7.1'de sunulurken, ÇF içeren PC esaslı YDH ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri ise Şekil 7.2'de sunulmuştur. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin taze ρ_a değeri 2452 kg/m³ iken, SD esaslı AAYDH'lerin taze ρ_a değerleri 2234 kg/m³ ile 2258 kg/m³ arasında değişim göstermiştir. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin taze ρ_a değerleri 2450 kg/m³ ile 2480 kg/m³ arasında değişim gösterirken, bu durum ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerde 2240 kg/m³ ile 2330 kg/m³ arasında değişim göstermiştir. PC esaslı YDH'lere göre, SD esaslı AAYDH'lerin taze ρ_a değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SD esaslı AAYDH'ler karşılaştırıldığında ise C sınıfı UK ve ÇF içeriğinin artışı ile birlikte taze ρ_a değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. C sınıfı UK içeriğinin artmasıyla taze ρ_a değerlerindeki artışın en önemli nedenlerinden biri C sınıfı UK'nın özgül ağırlığının SD'den daha yüksek olmasıdır. ÇF içeriğinin artmasıyla taze ρ_a değerlerindeki artmanın nedeni ise bilindiği gibi ÇF'nin özgül ağırlığının diğer karışım malzemelerine göre çok yüksek olmasındandır.

7.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

7.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık

7.2.1.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları

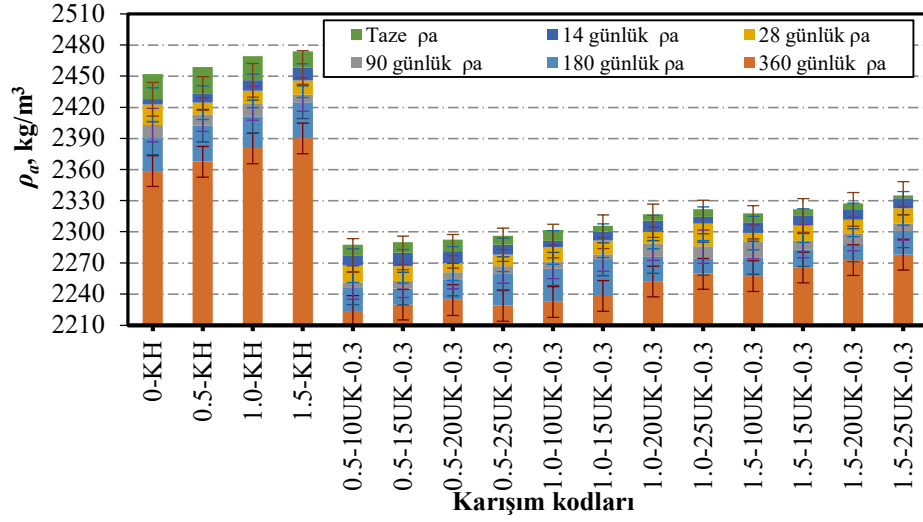
ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük sertleşmiş birim ağırlık (ρ_a) değerleri Şekil 7.1'de sunulmuştur. Şekil 7.1'den de görüleceği üzere, SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerleri, tüm yaşlarda PC esaslı YDH'nin sertleşmiş ρ_a değerinden daha düşüktür. Bu düşüşün sebebi, bağlayıcı olarak kullanılan SD ve C sınıfı UK'nın özgül ağırlıklarının PC'den daha düşük olmasındandır. Diğer bir neden ise SD esaslı AAYDH'lerin PC esaslı YDH'ye göre daha gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır. Gözenek yapısı AAB'lerin özelliklerini etkilemede önemli bir role sahiptir. Bu gözeneklilik, yüksek su/çimento oranına sahip PC bazlı bağlayıcılarda da görülmektedir. Nispeten daha yüksek gözeneklilik, PC bazlı bağlayıcıların ve AAB'lerin yoğunluk, mukavemet, termal iletkenlik ve geçirgenlik gibi özelliklerini gözenek yapısıyla yakından ilişkili hale getirmektedir (Chen vd., 2019; Chen vd., 2022; Ma vd., 2013). AAB'lerdeki gözenekler genellikle PC bazlı bağlayıcılardaki gözeneklerden daha küçük ve birbirinden bağımsızdır (Chen vd., 2022; Provis vd., 2011; Rovnaník, 2010). Kür günü arttıkça, PC esaslı YDH ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri Şekil 7.1'den de görülebileceği gibi azalmaktadır. Taze ρ_a değerine göre, 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük PC esaslı YDH'nin ρ_a değerleri sırasıyla %0.72, %1.19, %2.00, %2.51 ve %3.80 oranında azalmıştır. Taze ρ_a değerlerine göre, 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri ise sırasıyla %0.07-%0.68, %0.17-%1.03, %0.26-%1.48, %0.49-%1.72 ve %1.77-%2.55 oranları arasında azalmıştır. Bu azalma oranları, PC esaslı YDH'nin ρ_a değerlerinin, SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerinden daha fazla azaldığını göstermektedir. SD esaslı AAYDH'lerin C sınıfı UK içeriği ve SH/SS oranı arttıkça, sertleşmiş ρ_a değerlerindeki azalma daha azdır. PC esaslı YDH'nin taze, 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük ρ_a değerlerine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranlarında SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri %7.86-%8.76, %7.70-%8.39, %7.49-%8.29, %6.86-%7.95, %6.59-%7.70 ve %6.47-%7.25 aralığında azalmıştır. SH/SS oranlarındaki değişimler, SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerindeki değişimler üzerinde fazla bir etkiye sahip olmamıştır.



Şekil 7.1. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri

7.2.1.2 Çelik fiber içeren numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları

ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük sertleşmiş ρ_a değerleri Şekil 7.2'de sunulmuştur. %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerleri 2360 kg/m³ ile 2460 kg/m³ arasında değişim gösterirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerleri 2220 kg/m³ ile 2330 kg/m³ arasında değişim göstermiştir. Şekil 7.2'den de anlaşılabacağı üzere, %0.5, %1 ve %1.5 içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerleri, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ρ_a değerlerinden daha düşüktür. 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük PC esaslı YDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerlerine göre, 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin sertleşmiş ρ_a değerlerindeki düşüşler sırasıyla %5.13-%6.41, %5.02-%6.50, %5.11-%6.71, %5.12-%6.54 ve %4.69-%6.22 arasında değişmektedir. Ayrıca, ÇF'in özgül ağırlığının 7.85 olmasından, karışımlardaki ÇF içeriği arttıkça sertleşmiş ρ_a değerleri de artmaktadır. Ancak, kür yaşının artışı ile birlikte sertleşmiş ρ_a değerleri azalmaktadır. Meydana gelen bu azalmalar, PC esaslı YDH'lerde %0.22 ile %2.86 arasında değişirken, 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde %0.27-%2.78 arasında değişmektedir. Artan kür yaşı ile birlikte numunelerde gözlenen düşüşün nedenlerinden biri numunelerin gözeneklerindeki serbest suyun zamanla buharlaşmasındandır.



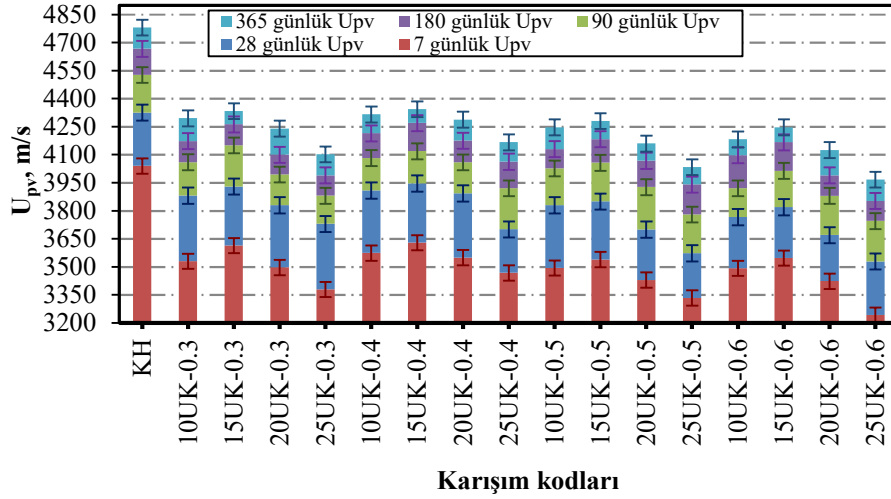
Şekil 7.2. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri

7.2.3 Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları

7.2.3.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızları

ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri Şekil 7.3'te görülmektedir. PC esaslı YDH'nin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri 4040 m/s ile 4780 m/s arasında değişirken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranlarına sahip SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri 3242 m/s ile 4343 m/s arasında değişmektedir. Kür günü arttıkça, PC esaslı YDH ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri Şekil 7.3'de görüldüğü gibi artmıştır. PC esaslı YDH'nin 7 günlük U_{pv} değerine göre 28, 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri sırasıyla %7.07, %12.05, %15.51 ve %18.32 oranlarında artarken, SD esaslı AAYDH'lerin 7 günlük U_{pv} değerlerine göre 28, 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri sırasıyla %6.71-%10.38, %12.25-%15.26, %16.55-%18.82 ve %19.68-%22.34 oranları arasında artmıştır. Bu artış oranlarından da görüldüğü üzere, SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerindeki artış ilerleyen yaşlarda daha yüksektir. Whitehurst (1951) tarafından yoğunluğu yaklaşık olarak 2400 kg/m³ olan betonlar için ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesi değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu yöntemle göre U_{pv} değeri 4500 m/s değerinin üzerinde ise beton “mükemmel” kalitede, 3500 m/s ile 4500 m/s değerleri arasında ise “iyi” kalitede, 3000 m/s ile 3500 m/s değerleri arasında ise “şüpheli” kalitede, 2000 m/s ile 3000 m/s değerleri arasında ise “zayıf” kalitede ve 2000 m/s değerinin altında ise “çok zayıf” kalitededir. Whitehurst (1951) tarafından

önerilen beton kalite sınıflandırmasına göre PC esaslı YDH'nin 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri 4500 m/s değerinin üzerinde olduğu için mükemmel kalitedeyken, SD esaslı AAYDH'lerin 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri 3500 m/s ile 4500 m/s değerleri arasında olduğu için "iyi" kalitededir.

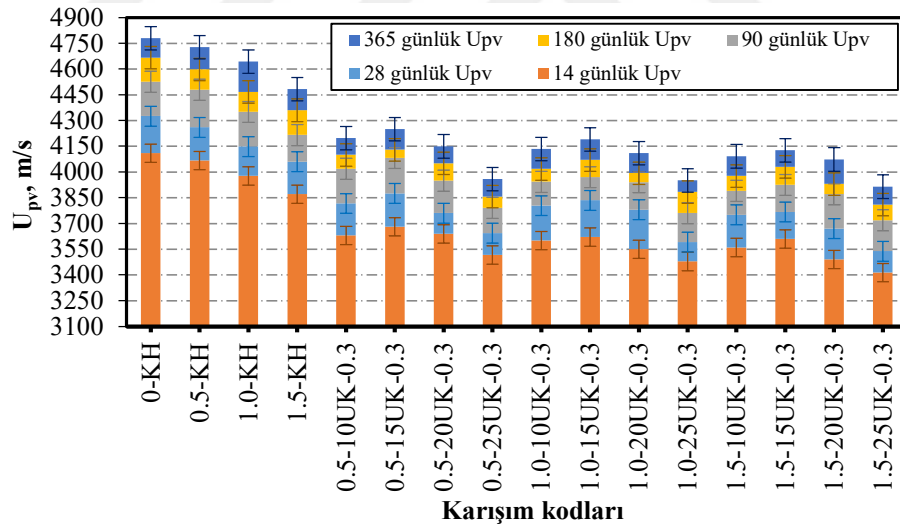


Şekil 7.3. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri

7.2.3.2 Çelik fiber içeren numunelerin ultrases geçiş hızları

ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük U_{pv} değerleri Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Bu yaşlarda, %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerleri yaklaşık olarak 3900 m/s ile 4800 m/s arasında değişirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri 3400 m/s ile 4250 m/s arasında değişmektedir. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri artan kür günü ile birlikte artmaktadır. 14 günlük kür gününe göre PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerindeki artış %4.37 ile %16.76 arasında değişirken, SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerindeki artış %3.26 ile %16.05 arasında değişmiştir. PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerleri, tüm kür günlerinde SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerinden daha yüksektir. Ayrıca, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerine göre ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri yaklaşık %10 civarında daha düşüktür. Bu durum, PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerine göre ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin gözenekliliğinin nispeten daha yüksek olmasıyla açıklanabilir (Provis vd., 2012). ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde, UK içeriği dikkate alındığında, en düşük U_{pv}

değeri %25 UK içeren SD esaslı AAYDH’de gözlenirken, en yüksek U_{pv} değeri %15 UK içeren SD esaslı AAYDH’de gözlenmiştir. Ayrıca, ÇF oranı arttıkça, PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerleri azalmaktadır. ÇF oranındaki artışla birlikte PC esaslı YDH’lerin U_{pv} değerlerindeki düşüş ortalama %3.61 iken, SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerlerindeki düşüş ortalama %1.83’tür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Yazıcı vd. (2007) çalışmalarında, farklı en-boy oranlarına sahip ÇF’lerin karışımlara hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında eklenmesinin ÇF içeren betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Karışımlardaki ÇF içeriği arttıkça U_{pv} değerlerinin olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu durumu, karışımlara ÇF eklenmesiyle sıkışan hava boşluklarının sayısının artmasıyla açıklamışlardır. Ayrıca, başka çalışmalarında, ÇF’lerin karışımlara düzensiz bir şekilde yerleşmesi sonucu olarak ultrases dalgalarının ÇF’lerin içlerinden geçerek doğrudan sona gitmek yerine, ÇF’ler tarafından başka bir yöne yönlendirilmesiyle U_{pv} değerlerinin olumsuz etkilendiği ifade edilmektedir (Banthia vd., 1994, Abbas vd., 2013). Nik ve Omran (2013) ise, ÇF eklenmesiyle U_{pv} değerlerinde önemli bir değişikliğin olmadığını belirtmişlerdir.



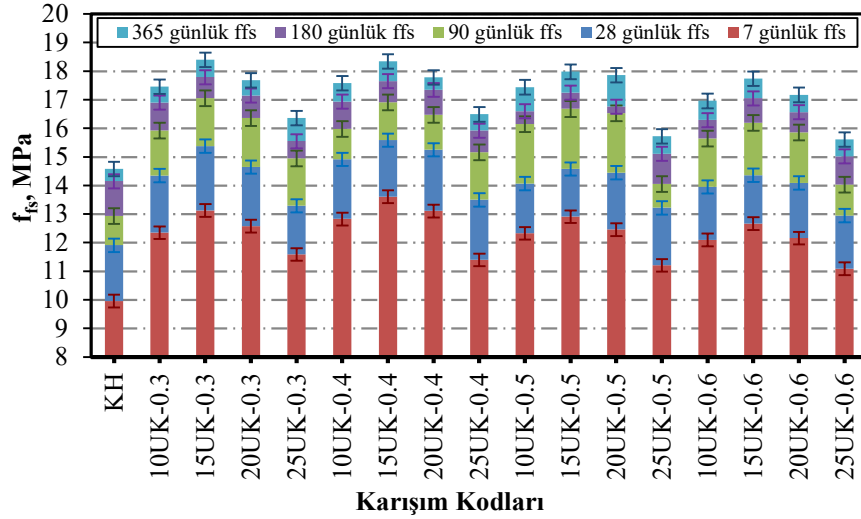
Şekil 7.4. ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerleri

7.2.4. Eğilme dayanımı

7.2.4.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin eğilme dayanımları

ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerleri Şekil 7.5’de sunulmuştur.

PC esaslı YDH'nin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerleri 9.96 MPa ile 14.58 MPa arasında değişirken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerleri 11.09 MPa ile 18.40 MPa arasında değişmektedir. Ayrıca, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 7 günlük f_{fs} değerleri 11.09 MPa ile 13.61 MPa, 28 günlük f_{fs} değerleri 13.22 MPa ile 15.59 MPa, 90 günlük f_{fs} değerleri 14.04 MPa ile 17.05 MPa, 180 günlük f_{fs} değerleri 15.02 MPa ile 17.79 MPa ve 365 günlük f_{fs} değerleri 15.61 MPa ile 18.40 MPa arasında değişmektedir. Yukarıdaki değerlerden ve Şekil 7.5'de görüldüğü gibi, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri tüm yaşlarda PC esaslı YDH'nin f_{fs} değerlerinden daha yüksektir. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri, kür günü arttıkça Şekil 7.5'de gösterildiği gibi artmıştır. Bu artışlar PC esaslı YDH'nin 7 günlük f_{fs} değerlerine göre 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerlerinde %19.58, %29.82, %42.07 ve %46.39 iken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 7 günlük f_{fs} değerlerine göre 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerlerinde %12.94-%18.42, %24.25-%32.66, %29.68-36.33 ve %34.75-%44.65 arındadır. 0.3 ve 0.4 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki artışlar, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki artıştan daha fazladır. 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde en yüksek f_{fs} değerleri 0.3 veya 0.4 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde görülürken, en düşük f_{fs} değerleri 0.6 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde görülmektedir. SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri uçucu kül içeriğine göre kıyaslandığında, %10, %15, %20 ve %25 C sınıfı UK içeriği ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde en yüksek f_{fs} değerleri %15 C sınıfı UK içeriğinde görülürken, en düşük f_{fs} değerleri %25 C sınıfı UK içeriğinde görülmüştür. Okoye vd. (2016) çalışmalarında, F sınıf UK yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 SD kullandıkları geopolimer karışımların özelliklerini araştırmışlardır. Yazarlar, F sınıf UK'nın yerine kullanılan SD oranı arttıkça, f_{fs} değerlerinin sürekli olarak arttığını belirtmişlerdir. Dahası, yazarlar %30 ve %40 SD ile modifiye edilmiş F sınıfı UK esaslı geopolimerlerin f_{fs} değerlerinin PC esaslı harcın f_{fs} değerinden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Duan vd. (2017) ve Chindaprasirt vd. (2014) çalışmalarında, $Ca(OH)_2$ ve SD arasındaki puzolanik reaksiyonun hamurda daha fazla C-(A)-S-H oluşturduğunu ve bunun da geopolimerlerin dayanımını artırdığını ifade etmişlerdir.

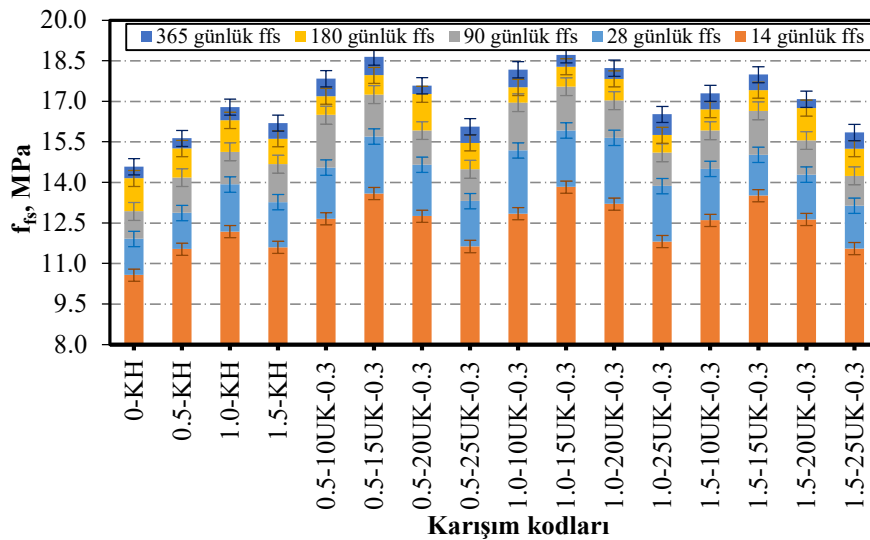


Şekil 7.5. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri

7.2.4.2 Çelik fiber içeren numunelerin eğilme dayanımları

ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} değerleri Şekil 7.6'da verilmiştir. %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerleri 10.57 MPa ile 16.79 MPa arasında değişirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri numune yaşına ve ÇF oranına bağlı olarak 11.55 MPa ile 18.72 MPa arasında değişmektedir. Artan kür günü ile birlikte hem %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin hem de %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri artmaktadır. %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerindeki artışlar %11.62 ile %39.62 arasında gözlenirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki artışlar %11.18 ile %41.51 arasında gözlenmiştir. %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerine göre %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerinde ortalama %13.74, %7.62 ve %6.60 artış görülmüştür. ÇF içeriğinden bağımsız olarak, bu artış, SD'nin yüksek silika içeriğinin, reaksiyon ürünleri için çekirdeklenme bölgeleri sağlayan daha yoğun bir mikro yapıya neden olmasıyla açıklanabilir (Gebregziabihher vd., 2015). ÇF içeren PC esaslı YDH'lerde ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde en yüksek f_{fs} değerleri %1 ÇF içeren karışımlarda görülmüştür. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki artışın nedeni, ÇF'lerin köprüleme mekanizması oluşturmasıyla açıklanabilir (Kang vd., 2010). Karışımlarda %1.5 ÇF

içeriği kullanıldığında PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerinde azalan bir eğilim görülmüştür. ÇF'lerin matris içerisindeki dağılımı ve yönü, AAB'lerin f_{fs} değerlerinin azalmasında veya artmasında önemli bir role sahiptir (Holschemacher vd., 2010). Bu bağlamda, karışımlarda %1.5 ÇF kullanılmasıyla f_{fs} değerlerindeki azalmanın nedeni, karışıma eklenen ÇF miktarının artması sonucu, çelik fiberin aglomerasyon eğilimi göstererek matris içerisinde düzgün bir şekilde dağılmaması ile ilgili olabilir. Boulekbache vd. (2010) çalışmalarında, yüksek hacimde ÇF içeriğine sahip bir karışımın işlenebilirliğinin zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, zayıf işlenebilirliğin çelik fiberlerin aglomerasyonuna ve f_{fs} değerlerinde azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri C sınıfı UK oranına bağlı olarak incelendiğinde, en yüksek f_{fs} değerleri %15 C sınıfı UK içeren SD esaslı AAYDH'lerden elde edilirken, en düşük f_{fs} değerleri %25 C sınıfı UK içeren SD esaslı AAYDH'lerden elde edilmiştir. Yüksek oranda UK kullanılan ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki azalma, sistemdeki yüksek Ca içeriğinin artmasından kaynaklanabilmektedir. Benzer şekilde, Das vd. (2020) çalışmalarında, karışımlarda yüksek Ca içerikli bağlayıcı kullanımının artmasıyla dayanım değerlerinin azaldığını ifade etmiştir. Bu açıklamadan da anlaşılacağı üzere, mevcut çalışmanın bulguları ile literatürde belirtilen araştırmaların bulgularının uyumlu olduğu görülmektedir.

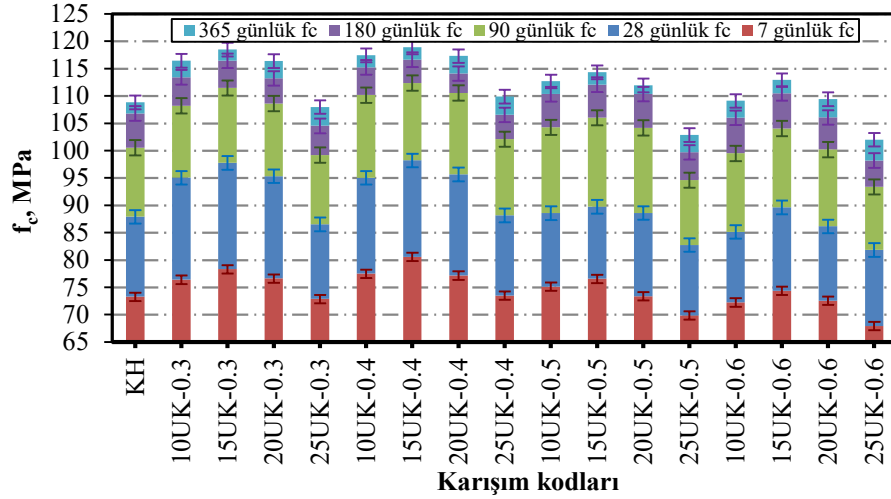


Şekil 7.6. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri

7.2.5 Basınç dayanımı

7.2.5.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin basınç dayanımları

ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c değerleri Şekil 7.7'de verilmiştir. 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük PC esaslı YDH'nin f_c değerleri 73.28 MPa ile 108.85 MPa aralığında değişirken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri 67.95 MPa ile 118.91 MPa arasında değişmektedir. Yukarıdaki değerlerden de görülebileceği gibi, tüm harçların uzun dönem f_c değerleri yaklaşık 68 MPa ile 119 MPa arasında değişmektedir. Ayrıca, kür günü arttıkça, PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri Şekil 7.7'de görüldüğü gibi artmaktadır. Bu artışlar, 7 günlük f_c değerlerine göre 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c değerlerinde PC esaslı YDH için %22.70, %37.22, %45.76 ve %48.53 iken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'ler için %17.24-%25.73, %35.39-%43.27, %44.75-%50.39 ve %47.23-%52.53 arasındadır. Bu artış oranlarından da görülebileceği gibi 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki artış, PC esaslı YDH'nin f_c değerindeki artıştan çoğunlukla daha yüksektir. Ayrıca, tüm yaşlarda, %25 C sınıfı UK içeren SD esaslı AAYDH'lerin ve 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin bazıları hariç, tüm SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri PC esaslı YDH'den daha yüksektir. 0.3 ve 0.4 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri birbirine yakınken, artan SH/SS oranı ile f_c değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Yani, 0.3 ve 0.4 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 7 günlük f_c değerleri 72.88 MPa ile 80.59 MPa, 28 günlük f_c değerleri 86.53 MPa ile 98.22 MPa, 90 günlük f_c değerleri 99.20 MPa ile 112.38 MPa, 180 günlük f_c değerleri 105.54 MPa ile 116.65 MPa ve 365 günlük f_c değerleri 107.99 MPa ile 118.91 MPa arasında değişmektedir. SH/SS oranına göre, SD esaslı AAYDH'lerin en düşük f_c değerleri 0.6 SH/SS oranlarında görülürken, en yüksek f_c değerleri 0.3 veya 0.4 SH/SS oranlarında görülmektedir. Ayrıca, %15 C sınıfı UK içeriğine kadar, tüm SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri yükselme eğilimindeyken, daha sonraki C sınıfı UK içeriklerinde f_c değerleri düşme eğilimindedir. C Sınıfı UK içeriğine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'ler için en düşük f_c değerleri %25 C Sınıfı UK içeriğinde görülürken, en yüksek f_c değerleri %15 C sınıfı UK içeriğinde görülmektedir.



Şekil 7.7. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri

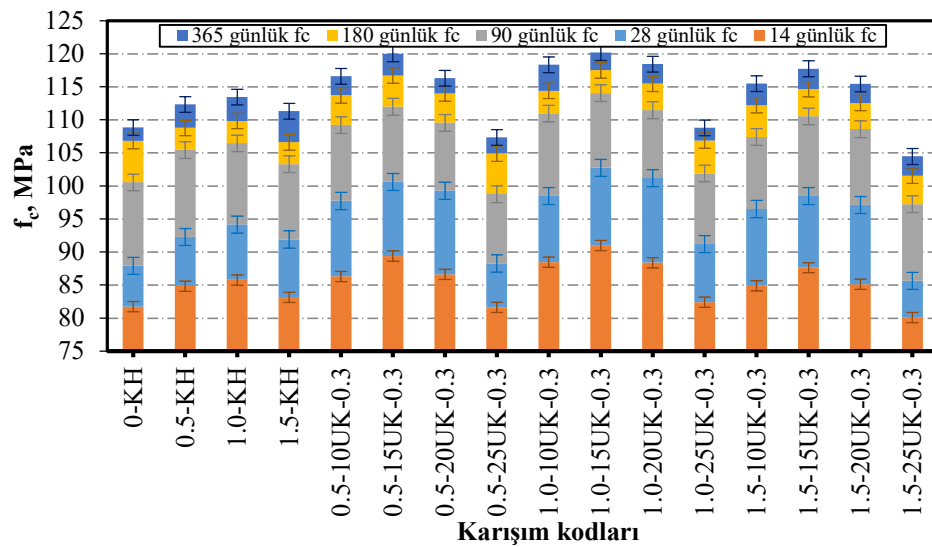
Literatür çalışmaları incelendiğinde, C sınıfı UK ile modifiye edilmiş SD esaslı AAYDH'lerde yüksek dayanımın elde edildiği ve yüksek miktarlarda SD kullanıldığı çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu çalışma bu alandaki boşluğu doldurmaktadır. Benzer çalışmalarda, Okoye vd. (2016), F sınıfı UK'nın ağırlıkça %5 ile %40 arasında SD ikame oranlarıyla değiştirilmesiyle üretilen geopolimer karışımlarının f_c değerlerinin SD ikame oranının artmasıyla yükseldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, SD ile modifiye edilmiş F sınıfı UK esaslı geopolimerlerin PC esaslı harçtan daha yüksek f_c değerlerine ulaştığını ifade etmişlerdir. Yavuz vd. (2022), C ve F sınıfı UK yerine %25 ve %50 SD kullanılarak üretilen geopolimerlerin en yüksek f_c değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca %100 SD esaslı geopolimerin tüm f_c değerlerinin nispeten düşük olduğunu, C ve F sınıfı UK kullanıldığında ise bu değerlerin arttığını belirtmişlerdir. Dahası araştırmacılar, %50 C ve F sınıfı UK yerine %50 SD kullanılarak üretilen geopolimerlerin f_c değerlerinin neredeyse birbirine yakın olduğunu belirtmişlerdir. Geopolimer harçlar ve betonlar daha gözenekli bir yapıya sahiptir. Küresel ince amorf SiO_2 partiküllerinden (nano boyutlu) oluşan SD, bu gözeneklere girerek mikroyapıyı daha kompakt hale getirmektedir. Ayrıca, amorf SiO_2 partikülleri nedeniyle geopolimer matris içinde daha fazla miktarda N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazları oluşabilmektedir. Geopolimer harçların ve betonların matrisinde yoğun mikroyapı ve daha fazla N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının oluşması mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Okoye vd., 2016). Ayrıca, SD son derece reaktif ve ince puzolan malzeme olduğundan, bu çalışmada kullanılan C sınıfı UK'nın bileşiminde bulunan yüksek CaO bileşeni ve aktivatördeki alkaliler arasındaki reaksiyondan kaynaklanan

Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer ve daha fazla C-(A)-S-H fazı oluşturur. SD partiküllerinin varlığından oluşan C-(A)-S-H fazları ve kompakt mikroyapı, geopolimer harçların ve betonların mekanik özelliklerini artırmaktadır (Duan vd., 2017; Zhang vd.,2020).

7.2.5.2 Çelik fiber içeren numunelerin basınç dayanımları

ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c değerleri Şekil 7.8'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerleri 81.73 MPa ile 113.45 MPa arasında değişirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri 80.08 MPa ile 120.19 MPa arasında değişmektedir. Kür günlerinin artışı ile ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri artmaktadır. %0, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerindeki artışlar %8.73 ile %33.86 arasında değişirken, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki artışlar %6.69 ile %36.00 arasında değişmektedir. %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki artışlar %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lere kıyasla genellikle daha fazladır. %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri, aynı oranlarda ÇF içeren PC esaslı YDH'lere kıyasla sırasıyla ortalama %2.73, %3.12 ve %1.96 daha fazla artmıştır. Bu artış, SD'nin alkali aktivasyon reaksiyonunun çekirdeklenme bölgelerinde önemli bir rol oynaması, reaksiyon hızı ve daha yoğun alkali aktivasyon ürünleri oluşturması ile açıklanabilir (Rashad ve Khalil 2013). Ayrıca, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri UK içeriğine bağlı olarak incelendiğinde, en yüksek f_c değerleri %15 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerden elde edilirken, en düşük f_c değerleri %25 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerden elde edilmiştir. %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerine göre, %15 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri ortalama %6.85 oranında artarken, %25 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri ortalama %4.58 oranında azalmıştır. %25 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüş, SD oranındaki azalmadan kaynaklanabilir (Okoye vd., 2016). ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri %1 ÇF içeriğine kadar artmaktadır ve %1.5 ÇF içeriğinde ise azalmaktadır. %0.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerine göre, %1 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri ortalama %1.61 artarken, %1.5 ÇF içeren SD esaslı

AAYDH'lerin f_c değerleri ortalama %2.22 azalmıştır. Benzer eğilimler %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerinde de gözlenmiştir. Atış ve Karahan (2009) yaptıkları çalışmada, hacimce %0, %0.25, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF ve farklı oranlarda UK içeren betonların f_c değerlerini incelemişlerdir. Genel olarak ÇF içeriği ile f_c değerlerinde küçük artışlar gözlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, beton karışımlarında daha yüksek miktarlarda ÇF kullanımının, ÇF'nin homojen dağılımındaki zorluklar nedeniyle f_c değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerinin artan ÇF içeriği ile azalmasının bir diğer nedeni de taze karışımların çok düşük su/bağlayıcı oranı (su/bağlayıcı=0.32) nedeniyle düşük işlenebilirliğe sahip olmasıdır. Koenig vd. (2019), ÇF ve makro polipropilen fiber takviyeli betonların f_c değerlerini PC, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf ve UK bazlı betonlar üzerinde incelemişlerdir. Yazarlar, f_c değerlerinin ÇF ve makro polipropilen fiber içeriklerinden çok fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar, PC bazlı betonların f_c değerlerinde sadece hafif bir artış, alkali ile aktive edilmiş UK ve cüruf betonlarının f_c değerlerinde ise hafif bir düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, artan ÇF ve makro polipropilen fiber içerikleri ile alkali ile aktive edilmiş cüruf ve UK betonların f_c değerlerindeki düşüşün, alkali ile aktive edilmiş cüruf ve UK betonların daha yüksek toplam gözenekliliğe sahip olmalarından ve artan viskozitelerinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, yazarlar viskozite ve gözeneklilikteki artışın düşük su/bağlayıcı oranı (0.27-0.35) ve yüksek bağlayıcı dozajından (450 kg/m^3) kaynaklandığını da belirtmişlerdir.



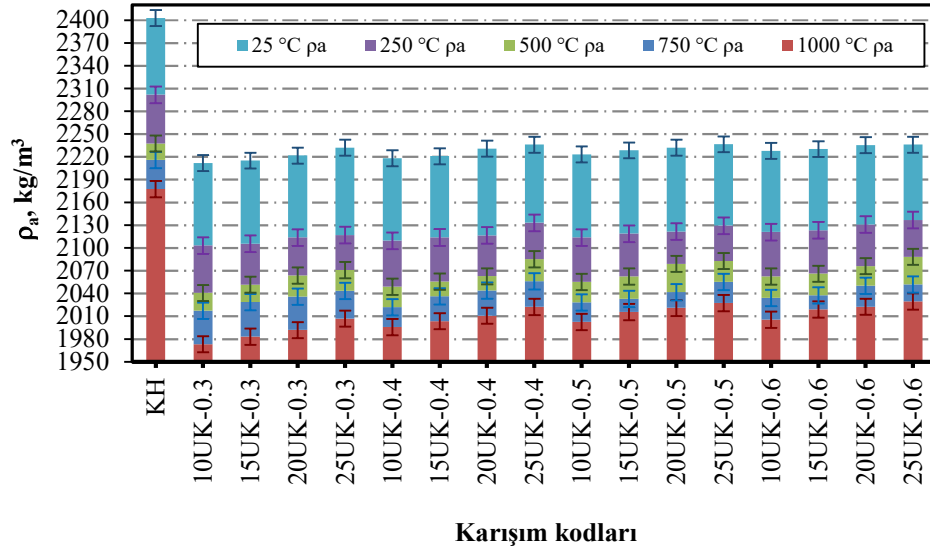
Şekil 7.8. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri

7.3 Yüksek Sıcaklıklar Sonrasındaki Deney Sonuçları

7.3.1 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki sertleşmiş birim ağırlık

7.3.1.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 7.9'da görülmektedir. 25 °C oda sıcaklığındaki ρ_a değerine göre, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kalan PC esaslı YDH'nin ρ_a değerleri sırasıyla %4.21, %6.88, %7.78 ve %9.37 oranlarında azalırken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri %4.53-%5.16, %6.69-%7.73, %8.04-%8.79 ve %9.32-%10.79 oranları arasında azalmıştır. Ayrıca, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C'de, PC esaslı YDH'nin ρ_a değerlerine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri sırasıyla %7.17-%8.63, %6.67-%8.79, %7.20-%8.95 ve %6.80-%9.39 oranları arasında daha düşüktür. Bu düşüşlerden de görüldüğü üzere, tüm yüksek sıcaklıklarda SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri, PC esaslı YDH'nin ρ_a değerlerinden daha fazla etkilenmiştir. Sıcaklık arttıkça bu etkilenme oranı daha da artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, PC esaslı YDH'nin ρ_a değerlerine kıyasla SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerindeki düşüşler, C sınıfı UK içeriğindeki ve SH/SS oranındaki artışlarla bir miktar azalmıştır. 450 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda ρ_a ve mekanik özelliklerdeki düşüşün nedenleri, hidrat ürünlerindeki zayıf bağlı suyun, kapiler boşluklardaki suyun ve matris boşluklarındaki serbest suyun buharlaşmasındandır. 750 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda ρ_a değerlerinin ve mekanik özelliklerin düşmesinin nedenleri yukarıdaki nedenlere ek olarak CaCO_3 'ün dekarbonasyonu (Sarıdemir ve Bulut 2021; Bahafid vd., 2017), Ca(OH)_2 'nin 400 °C ile 550 °C'de CaO ve H_2O olarak ayrışması (Saha vd., 2019; Salahuddin vd., 2019), Ca(OH)_2 'nin dehidroksilasyonu, alkali ile aktive edilmiş matrisin ve çimento matrisinin dehidrasyonundan olduğu düşünülmektedir (Lim ve Mondal 2014). 750°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ρ_a değerlerindeki ve mekanik özelliklerdeki düşüşün nedenleri yukarıdaki nedenlere ek olarak C-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H formlarının bozulması ve dehidrasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir (Sarıdemir ve Bulut 2021; Bahafid vd., 2017) .

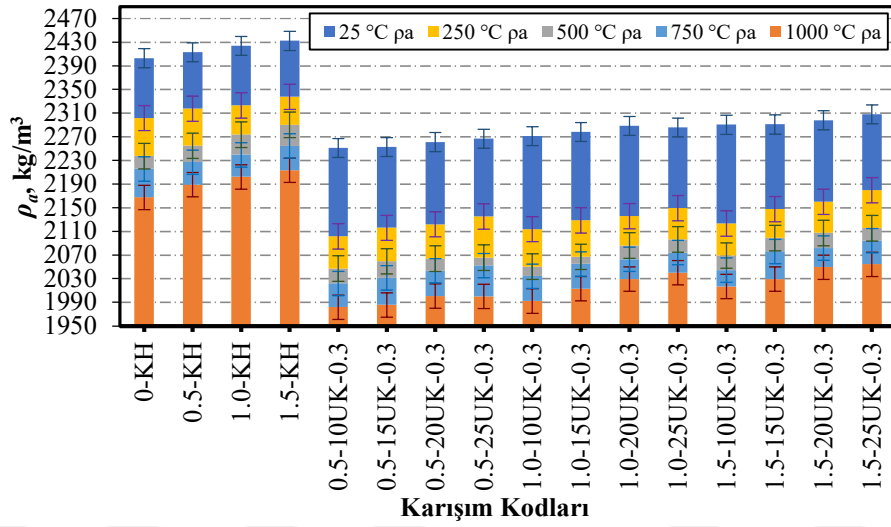


Şekil 7.9. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.1.2 Çelik fiber içeren numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri Şekil 7.10'da verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri maruz kaldıkları sıcaklık arttıkça azalmıştır. 250 °C'de, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ρ_a değerlerindeki düşüşler %3.89 ile %4.21 arasında değişirken, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerindeki düşüşler %5.57 ile %7.30 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, 500 °C'de, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ρ_a değerlerindeki düşüşler %5.84 ile %6.88 arasında değişirken, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerlerindeki düşüşler %8.29 ile %9.72 arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklarda ρ_a değerlerindeki düşüşler, kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşması ve OH gruplarının dehidroksilasyonundan kaynaklanmaktadır (Jiang vd. 2020). 750 °C'de, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ρ_a değerleri ortam sıcaklığındaki değerlere kıyasla %7.31 ile %7.78 arasında azalırken, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a değerleri %9.25 ile %10.74 arasında azalmıştır. 1000 °C'de, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ρ_a değerlerindeki azalmalar %8.59 ile %9.37 arasında değişirken, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin ρ_a

değerlerindeki azalmalar %10.31 ile %11.84 arasında değişmektedir. 750 ve 1000 °C’de C-S-H, C-(A)-S-H ve N-A-S-H jellerinin dehidrasyonu ve ayrışması sonucu yapılarındaki bağlı suyun buharlaşması ρ_a değerlerinde azalmaya neden olmaktadır (Sarıdemir ve Yıldırım 2022). Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerde ÇF oranı arttıkça ρ_a sonuçlarında daha az düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni, ÇF’lerin çatlak büyümesi üzerinde belirli bir engelleyici etkiye sahip olması, suyun buharlaşmasını önlemesi ve kütle kaybını azaltmasıdır (Chen vd., 2016).



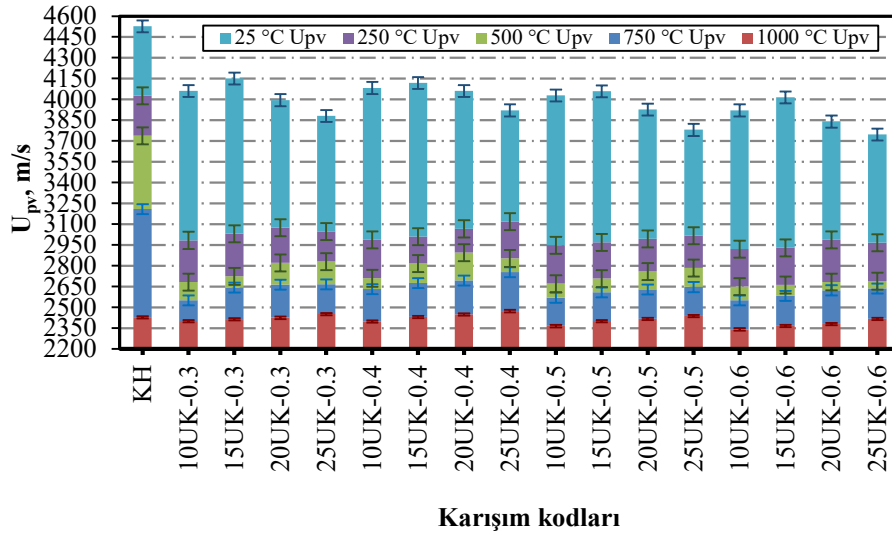
Şekil 7.10. ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin ρ_a değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.2 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki ultrases geçiş hızı

7.3.2.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerlerindeki değişimler Şekil 7.11’de gösterilmiştir. Oda sıcaklığındaki (25 °C) U_{pv} değerlerine göre, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklara maruz kalan PC esaslı YDH’nin U_{pv} değerleri sırasıyla %11.07, %17.45, %29.11 ve %46.34 azalırken, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerleri sırasıyla %20.19-%26.99, %27.08-%34.35, %29.62-%37.19 ve %35.48-%41.84 arasında azalmıştır. Bu azalma oranlarından görüldüğü üzere, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin U_{pv} değerleri 250 °C, 500 °C ve 750 °C’de daha fazla

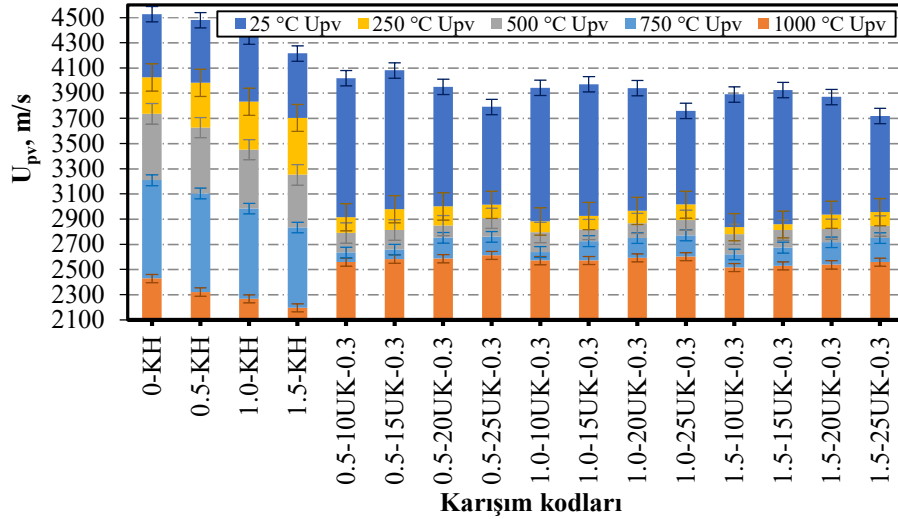
etkilenirken, PC esaslı YDH'nin U_{pv} değeri 1000 °C'de daha fazla etkilenmiştir. Özellikle 250 °C ve 500 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, PC esaslı YDH'ye göre 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri daha fazla etkilenmiştir. Dahası, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, PC esaslı YDH'nin U_{pv} değerlerine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri sırasıyla %22.54-%27.46, %22.55-%29.07 ve %14.20-%20.54 arasında daha düşüktür. Ancak 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin bazı U_{pv} değerleri, PC esaslı YDH'nin U_{pv} değerine göre tam tersi durum göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerinin düşmesinde UK içeriği çok etkili olmamıştır. Ancak, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin karışımlarında kullanılan C sınıfı UK içeriği arttıkça U_{pv} değerlerindeki azalmalar biraz yavaşlamıştır. Yermak vd. (2017) ve Behnood ve Ghandehari (2009) çalışmalarında belirtildiği gibi, yüksek sıcaklıklara bağlı olarak matrisin ısıl genişmesi ve susuz kalması ekstra mikro çatlaklar ve boşluklar meydana getirir. Bu şekilde oluşan mikro çatlaklar ve boşluklar, ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 7.11. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.2.1 Çelik fiber içeren numunelerin ultrases geçiş hızları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri, Şekil 7.12'de görüldüğü gibi, sıcaklık artışı ile birlikte giderek azalmıştır. 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerindeki azalmalar sırasıyla %11.07-%12.28, %17.45-%22.85, %29.11-%32.78 ve %46.34-%48.18 arasındadır. Aynı şekilde incelendiğinde, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kalan 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerindeki azalmalar sırasıyla %19.79-%27.47, %23.09-%31.03, %26.05-%34.84 ve %30.76-%36.70 arasındadır. Sıcaklık artışıyla birlikte U_{pv} değerlerindeki azalmaların nedeni, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin boşluk yapısının artması ve hidrasyon ürünlerinin ve matris arayüzey geçiş bölgesinin bozulması sonucu dalga geçiş süresinin uzamasıyla açıklanabilir (Sarıdemir ve Yıldırım 2022). Özellikle 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarındaki U_{pv} değerleri incelendiğinde, 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerindeki kayıplar, PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerindeki kayıplara göre daha fazladır. PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin maruz kaldığı sıcaklık 1000 °C'ye ulaştığında ise tam tersi bir eğilim meydana gelmektedir. Yani, 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerindeki azalmalar, 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerindeki azalmalardan daha yüksektir. 1000 °C'de, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerleri, %0.5, %1 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin U_{pv} değerlerinden sırasıyla yaklaşık olarak %11.4, %14.0 ve %15.5 daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerinde meydana gelen azalmalar üzerinde ÇF içeriğinin önemli bir etkisi görülmemiştir. U_{pv} değerleri birçok faktörlerden etkilenebilir. Bunlardan biri de yüksek sıcaklıktır. Gong vd. (2017) yüksek sıcaklıklardan numunelerin U_{pv} değerlerinin büyük ölçüde etkilendiğini ve ÇF içeriğinin bu etki üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Ayrıca, yazarlar numunelerin U_{pv} değerlerindeki düşüşün temel nedenini, sıcaklık artışıyla oluşan kimyasal bozulmayla ve mikro çatlaklar nedeniyle gözenekliliğin artmasıyla açıklamışlardır.



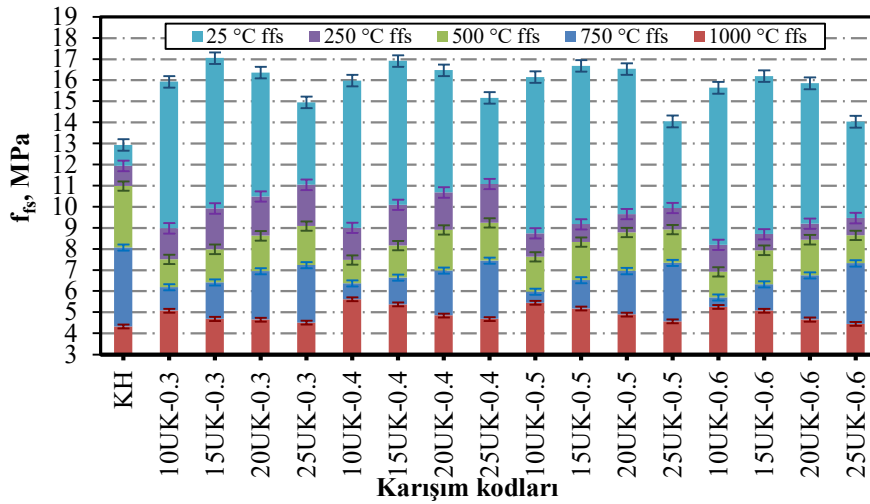
Şekil 7.12. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin U_{pv} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.3 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki eğilme dayanımı

7.3.3.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin eğilme dayanımları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C'ye maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki değişimler Şekil 7.13'de gösterilmiştir. Oda sıcaklığına (25 °C) maruz kalmış PC esaslı YDH'nin f_{fs} değerine göre, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan PC esaslı YDH'nin f_{fs} değerlerindeki düşüşler sırasıyla %7.66, %15.08, %37.55 ve %66.35'dir. Benzer şekilde, oda sıcaklığına (25 °C) maruz kalmış 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerine göre, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler sırasıyla %26.12-%45.88, %36.51-%55.79, %47.76-%63.55 ve %64.85-%72.52 arasındadır. Özellikle, 250 °C yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüş PC esaslı YDH'nin f_{fs} değerlerindeki düşüşten daha fazladır. Dahası, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda daha fazla etkilenirken, PC esaslı YDH'nin f_{fs} değeri 1000 °C sıcaklıkta daha fazla etkilenmiştir. Yani, PC esaslı YDH'nin 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklardaki f_{fs} değerlerine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri

sırasıyla %7.20-%31.37, %15.85-%37.02 ve %7.74-%29.41 arasında daha düşüktür. Ancak 1000 °C’de, PC esaslı YDH’nin f_{fs} değerlerine göre, SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} değerleri tam tersi bir durum göstermiştir. PC esaslı YDH’nin 1000 °C sıcaklıktaki f_{fs} değerlerine göre, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin 1000 °C sıcaklıktaki f_{fs} değerleri %2.77 ile %29.83 arasında daha yüksektir. C sınıfı UK içeriğinin ve SH/SS oranının, yüksek sıcaklıklara maruz kalan SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} değerlerinin azalması üzerinde çok az etkisi görülmüştür. Yani, C sınıfı UK içeriği ve SH/SS oranı arttıkça, SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler biraz daha az olmuştur. Ancak, bu düşüşler üzerinde C sınıfı UK içeriğindeki artışın SH/SS oranındaki artıştan daha etkili olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda f_{fs} değerlerindeki azalmanın nedeni, gözenek yapısının PC esaslı YDH’nin ve SD esaslı AAYDH’lerin mekanik özelliklerini etkilemede önemli bir rol oynamasıdır (Chen vd., 2022). Harçlar yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, matrislerinin mikroyapısındaki su buharlaşır ve mikroyapıyı oluşturan hidrasyon ürünleri bozulmaya başlar. Bu durum porozitede önemli bir artışa, agrega ve matris arasındaki bağ ve aderansın önemli ölçüde zayıflamasına ve ara yüzey geçiş bölgesinde ciddi hasara neden olur. Bu nedenlerin bir sonucu olarak mekanik özelliklerde azalmalar meydana gelir (Kuang vd., 2023).

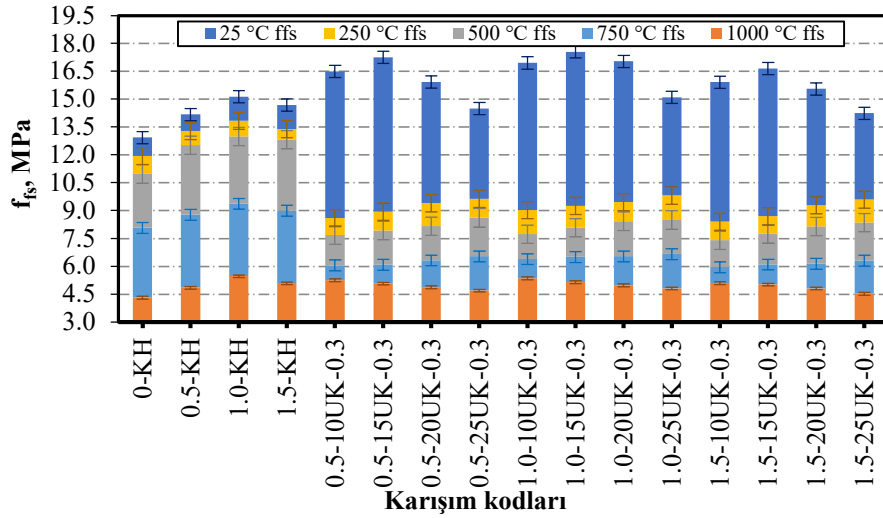


Şekil 7.13. ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.3.2 Çelik fiber içeren numunelerin eğilme dayanımları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri, Şekil 7.14'de görüldüğü gibi değişmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} sonuçları giderek azalmıştır. 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerindeki azalmalar %6.28 ile %66.55 arasında değişirken, ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki azalmalar %32.65 ile %70.76 arasında değişmiştir. 250 °C ile 500 °C, arasındaki sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler $Ca(OH)_2$ 'nin ayrışmasına ve OH gruplarının dehidroksilasyonuna bağlanabilir (Fares vd. 2010). Genellikle, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler C-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H jellerinin dehidrasyonu ve ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Çelikten vd., 2019; Sedaghatdoost vd., 2019). 250 °C, 500 °C, 750 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşlerden ortalama %32.05, %36,83 ve %30.37 daha fazladır. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ise, ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşler, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_{fs} değerlerindeki düşüşlere yakındır. Bu durum, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin matrisinde daha fazla kimyasal büzülmenin oluşmasıyla birlikte mikro çatlakların ve gözeneklerin oluşumu ile açıklanabilir. Mikro çatlaklar, gözenekler ve kimyasal büzülme oluşumu f_{fs} değerlerini azaltmakta ve matris yapısını kırılgan hale getirmektedir (Ya-min vd., 2015). Yüksek sıcaklıklar ile ilgili benzer bir çalışmada, Türker vd. (2016), hem ortamda hem de sıcaklıkla kür ettikleri alkali ile aktive edilmiş harçların f_{fs} değerlerinin PC esaslı harçların f_{fs} değerlerinin daha düşük olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek reaksiyon hızının kimyasal büzölmeye ve matriste mikro çatlakların oluşmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerleri UK içeriğine göre değerlendirildiğinde, en yüksek f_{fs} değerleri %15 UK içeren SD esaslı AAYDH'lerde gözlenirken, UK içeriğinin daha fazla artmasıyla f_{fs} değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. Wattimena vd. (2017) aşırı Ca seviyelerinin polimerizasyon sürecini bozabileceğini ve mikroyapıyı olumsuz etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda, %0.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs}

değerlerine göre, %1 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerinde ortalama %2.85'lik bir artış gözlenirken, %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerinde ortalama %2.18'lik bir düşüş gözlenmiştir. Genel olarak ÇF ilavesi, ÇF'nin köprüleme etkisinden dolayı f_{fs} değerlerini artırmaktadır. Bununla birlikte, yüksek miktarda ÇF kullanımı, ÇF ve matris arasındaki arayüzey geçiş bölgesinin zayıflamasına neden olarak f_{fs} değerlerinde bir düşüşe neden olan bir topaklanma etkisi yaratabilir (Abdollahnejad vd., 2017).



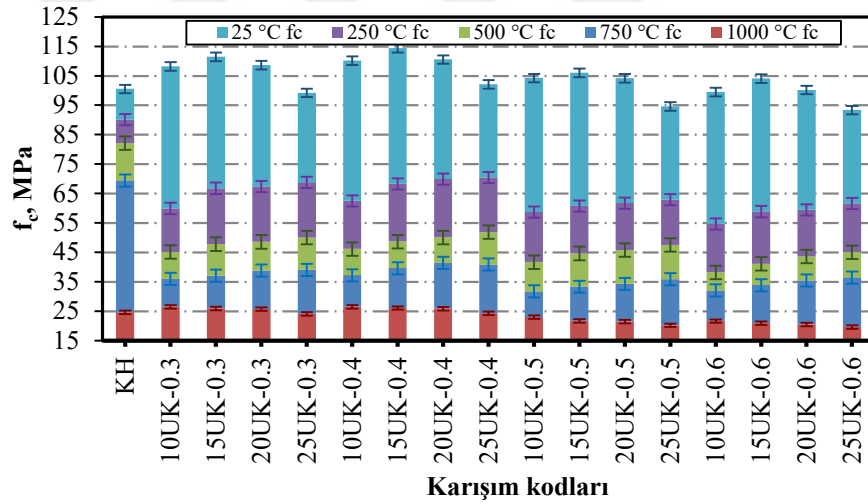
Şekil 7.14. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.3.4 Yüksek sıcaklıklar sonrasındaki basınç dayanımı

7.3.4.1 Çelik fiber içermeyen numunelerin basınç dayanımları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C'ye maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki değişimler Şekil 7.15'de verilmiştir. Oda sıcaklığındaki 90 günlük f_c değerlerine göre, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklar maruz kalan 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşler sırasıyla %30.60-%45.62, %49.18-%61.61, %59.95-%69.56 ve %75.55-%79.83 arasında iken, PC esaslı YDH'nin f_c değerlerindeki düşüşler %10.37, %18.22, %30.97 ve %75.56'dır. Bu düşüş oranlarından da görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıklarda 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri, PC esaslı YDH'nin

f_c değerlerinden daha fazla düşmüştür. PC esaslı YDH'nin f_c değerlerindeki düşüşlerle karşılaştırıldığında, SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşler 250 °C'de yaklaşık 4 kat, 500 °C'de yaklaşık 3 kat ve 750 °C'de yaklaşık 2 kat daha fazladır. 1000 °C'de ise, PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşler birbirine çok yakındır. Dahası, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda PC esaslı YDH'nin f_c değerlerine göre 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri sırasıyla %21.18-%39.34, %36.83-%53.69, %40.33-%54.28 ve %7.82-%20.02 arasında daha düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda, C sınıfı UK içeriğinin 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerini azaltmada çok az etkisi görülürken, SH/SS oranının artırılmasının neredeyse hiçbir etkisi görülmemiştir. Yani, C sınıfı UK içeriği arttıkça, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşler biraz daha azdır.



Şekil 7.15. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

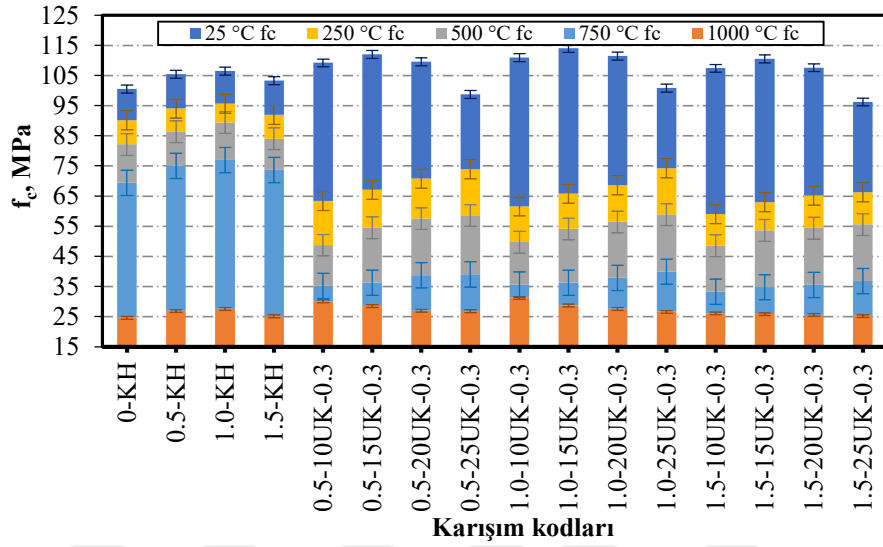
250°C'ye kadar olan sıcaklıklarda f_c değerlerindeki düşüşün nedenleri, agrega ve matris arasındaki arayüzey bölgesinin zayıflaması, hidrat ürünlerindeki zayıf bağlı suyun, kapiler suyun ve matristeki bağımsız suyun buharlaşmasıyla boşluk sayısının artması ve büyümesinden kaynaklanmaktadır (Fares vd., 2010). 500°C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda f_c değerlerindeki düşüşün nedenleri, yukarıdaki nedenlere ek olarak, Ca(OH)_2 'in 400 °C ile 550 °C arasındaki sıcaklıklarda CaO ve H_2O olarak ayrışmasından kaynaklanmaktadır. 750 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda f_c değerlerindeki düşüşün nedenleri, CaCO_3 'ün dekarbonasyonu, Ca(OH)_2 'nin dehidroksilasyonu, C-S-H, N-A-S-H

ve C-(A)-S-H hidratasyon ürünlerinin ayrışmaya başlamasıdır. 750°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda f_c değerlerindeki düşüşün nedenleri, C-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının dehidrasyonu ve ayrışması, termal çatlakların ve büyük gözeneklerin oluşmasıdır (Cai vd., 2022; Sarıdemir ve Bulut 2021; Bahafid vd., 2017).

7.3.4.2 Çelik fiber içeren numunelerin basınç dayanımları

25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri, Şekil 7.16'da gösterilmektedir. Şekil 7.16'da görülebileceği gibi, yüksek sıcaklıklarda %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerine kıyasla, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri daha fazla azalmıştır. Bu azalmalar PC esaslı YDH'ler için %10.11 ile %75.56 arasında iken, 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'ler için %25.24 ile %76.70 arasındadır. Yukarıda da belirtildiği gibi, 250 °C ve 500 °C'deki düşüşlerin nedenleri, boşluklardaki ve hidratasyon ürünlerindeki tam olarak bağlanmayan suyun buharlaşması, PC esaslı YDH'lerin hidratasyon ürünlerinden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin ayrışması ve OH gruplarının dehidroksilasyonu ile ifade edilmektedir (Jiang vd. 2020). 750 °C ve 1000 °C'deki düşüşlerin nedenleri ise, PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin hidratasyon ürünlerinden C-S-H, C-(A)-S-H ve N-A-S-H fazlarının ayrışması ve dehidrasyonu ile ifade edilmektedir (Çelikten vd., 2019; Sedaghatdoost vd., 2019). 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz kalan ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerleri, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerine kıyasla önemli bir düşüş göstermiştir. 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşler, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşlerden ortalama %29.17, %37.40 ve %51.35 daha fazladır. 1000 °C'de, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki azalmalar birbirine çok yakındır. Özellikle ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüşün nedeni, matris fazlarının 750 °C ve 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda eriyerek gözenekli/süngerimsi bir yapı oluşturmalarıdır. Bu yapı, yüksek sıcaklıklarda alüminosilikat fazlarının yeniden kristalleşmesi, dönüşümü ve sinterleme yoğunlaşması sonucu oluşur (Lee vd., 2017). Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle, ÇF içeriğindeki artışın ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c değerlerindeki düşüş üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Cheng vd. (2023), 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, ÇF içeren alkali aktive

edilmiş cüruf betonların f_c değerlerinin sırasıyla %38.8, %58.2, %75.8 ve %90.1 oranında azaldığını ifade etmişlerdir. Yazarlar, ÇF içeriğinin yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle f_c değerlerindeki düşüşler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar, çelik fiberlerin 800 °C’de oksitlenerek işlevlerini kaybettiğini ve matristeki mikroyapı değişikliklerinin f_c değerlerinde düşüşe yol açtığını belirtmişlerdir.



Şekil 7.16. ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin f_c değerlerine yüksek sıcaklıkların etkisi

7.4 Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler

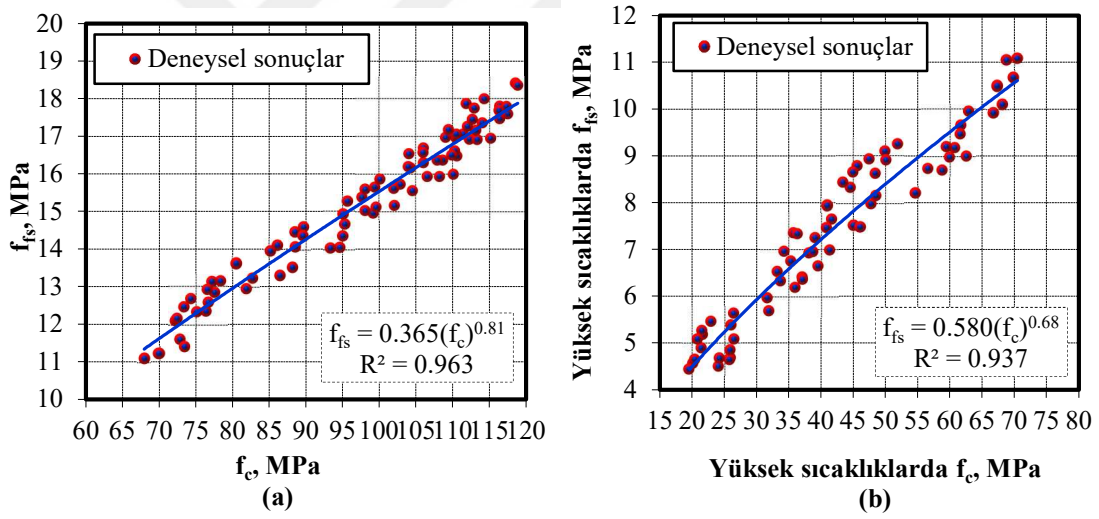
7.4.1 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

PC esaslı ve alkali ile aktive edilen harçların veya betonların özelliklerini karışımlarda kullanılan malzemeler, malzeme miktarı, su/bağlayıcı oranı, gözenek ve nem içerikleri ve kür günü gibi birçok faktör etkilemektedir. Bu nedenle, birçok araştırmacı harçların ve betonların f_c ile f_{fs} değerleri arasında korelasyonlar önermiştir (Rashid vd., 2002; Xu vd., 2009; Yusuf vd., 2016; Sarıdemir 2017; Tawfik vd., 2021). Önerilen bu korelasyonlar genellikle Denklem 7.1’deki denkleme benzemektedir.

$$f_{fs} = a(f_c)^b \quad (7.1)$$

Bu denklemdeki, f_{fs} : harçların veya betonların eğilme dayanımını (MPa), f_c : harçların veya betonların basınç dayanımını (MPa), a ve b sabit sayıları ifade etmektedir.

Bu denklemden esinlenerek, Şekil 7.17a’da görüldüğü gibi, ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin, 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c ile f_{fs} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Şekil 7.17b’de ise 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C’ye maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin f_c ile f_{fs} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Elde edilen korelasyonlar sırasıyla Denklem 7.2 ve 7.3’te verilmiştir. Oluşturulan korelasyonlardan elde edilen R^2 değerleri 0.965 ve 0.950’dir. Yüksek R^2 değerleri, hem kür günlerinde hem de yüksek sıcaklıklarda ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin f_c ve f_{fs} değerleri arasında yüksek ilişkiler olduğunu göstermektedir.

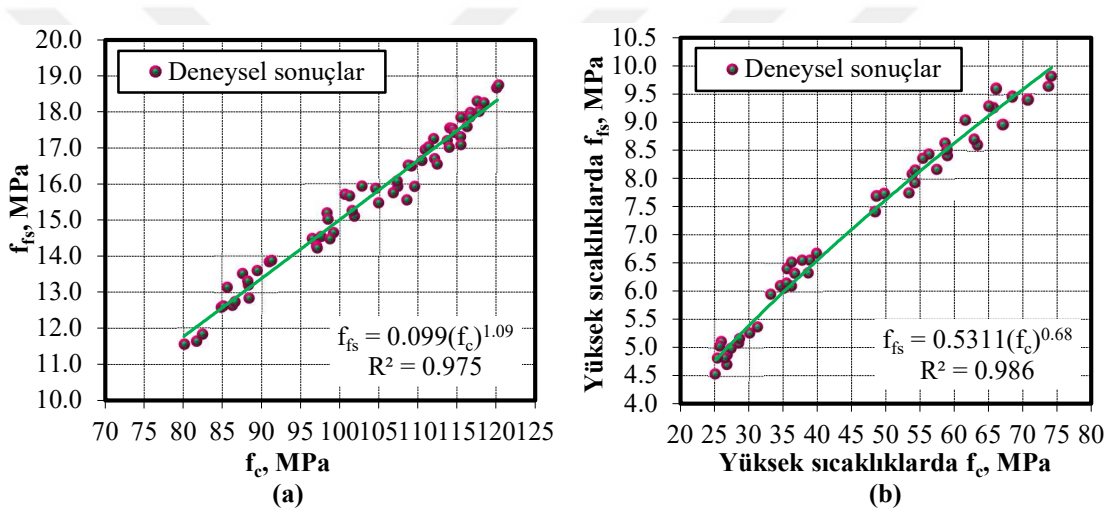


Şekil 7.17. ÇF içermeyen PC esaslı YDH’nin ve SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasındaki ilişki

$$f_{fs} = 0.365(f_c)^{0.81} \quad (\text{Farklı günlerde}) \quad (7.2)$$

$$f_{fs} = 0.580(f_c)^{0.68} \quad (\text{Yüksek sıcaklıklarda}) \quad (7.3)$$

Şekil 7.18a’da görüldüğü gibi %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_{fs} ve f_c değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Şekil 7.18b’de ise 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C’ye maruz bırakılan %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Elde edilen korelasyonlar sırasıyla Denklem 7.4 ve 7.5’te verilmiştir. Ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasında yüksek korelasyonlar bulunmuştur. Bu korelasyonlardan elde edilen R^2 değerlerinin 0.975 ve 0.986 olması, bu yüksek korelasyonları kanıtlamaktadır.



Şekil 7.18. ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve SD esaslı AAYDH’lerin f_{fs} ve f_c değerleri arasındaki ilişki

$$f_{fs} = 0.099(f_c)^{1.09} \quad (\text{Farklı günlerde}) \quad (7.4)$$

$$f_{fs} = 0.5311(f_c)^{0.68} \quad (\text{Yüksek sıcaklıklarda}) \quad (7.5)$$

Yukarıdaki korelasyonlardan ve korelasyon sonuçlarından da görüldüğü üzere, farklı kür günlerine ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan hem ÇF içermeyen hem de ÇF içeren PC esaslı YDH’lerin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH’lerin f_c ile f_{fs} değerleri arasında yüksek korelasyonlar bulunmaktadır.

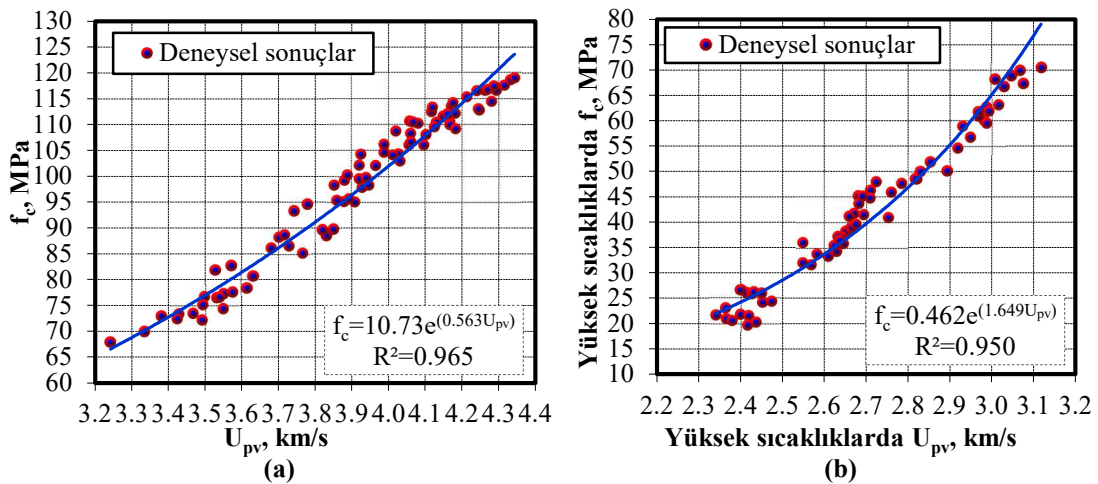
7.4.2 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Birçok çalışmada, harçların veya betonların f_c ve U_{pv} değerleri arasında Denklem 7.6'da verilen denkleme benzer korelasyonlar gerçekleştirilmiştir (Demirboğa vd. 2004; Tharmaratnam ve Tan 1990; Hamid vd., 2010).

$$f_c = ae^{(bU_{pv})} \quad (7.6)$$

Bu denklemdeki, f_c : harçların veya betonların basınç dayanımını (MPa), U_{pv} : harçların veya betonların ultrases geçiş hızını (km/s), a ve b sabit sayıları ifade etmektedir.

Bu çalışmada da Şekil 7.19a'da görüldüğü gibi, ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin, 7, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c ile U_{pv} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Şekil 7.19b'de ise 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C'ye maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'lerin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c ile U_{pv} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyonlardan elde edilen formüller Denklem 7.7 ve 7.8'de verilmiştir. Korelasyonlardan elde edilen R^2 değerleri 0.965 ve 0.950'dir. Yüksek R^2 değerleri, ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin f_c ile U_{pv} değerleri arasında yüksek ilişkiler olduğunu göstermektedir.

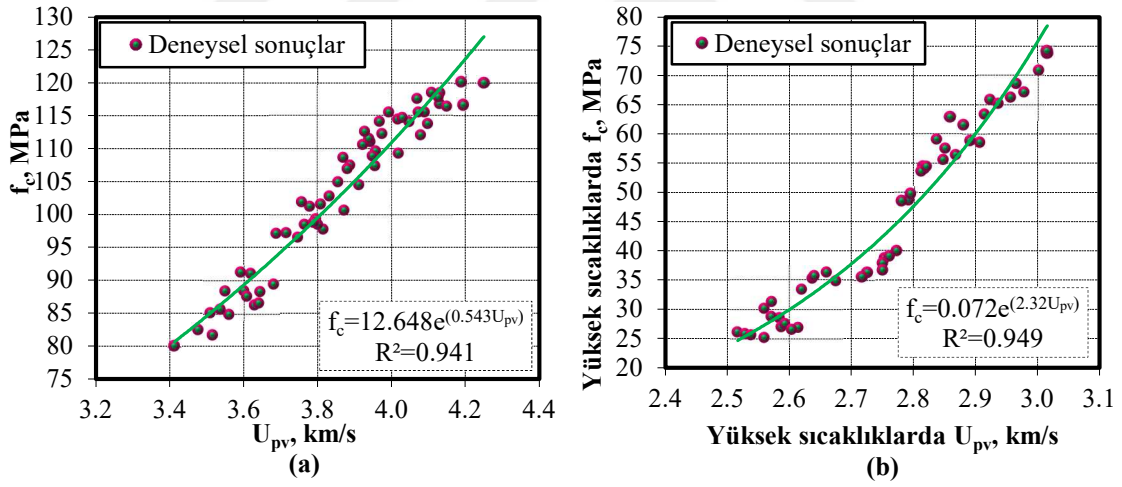


Şekil 7.19. ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasındaki ilişki

$$f_c = 10.73e^{(0.563U_{pv})} \quad (\text{Farklı günlerde}) \quad (7.7)$$

$$f_c = 0.462e^{(1.649U_{pv})} \quad (\text{Yüksek sıcaklıklarda}) \quad (7.8)$$

Şekil 7.20a'da görüldüğü gibi %0, %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve %0.5, %1.0 ve %1.5 ÇF içeren 0.3 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin 14, 28, 90, 180 ve 365 günlük f_c ve U_{pv} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Şekil 7.20b'de ise 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C'ye maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasında korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyonların formülleri Denklem 7.9 ve 7.10'da verilmiştir. Ortam ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasında yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. R^2 değerlerinin 0.941 ve 0.949 olması, bu yüksek korelasyonları doğrulamaktadır.



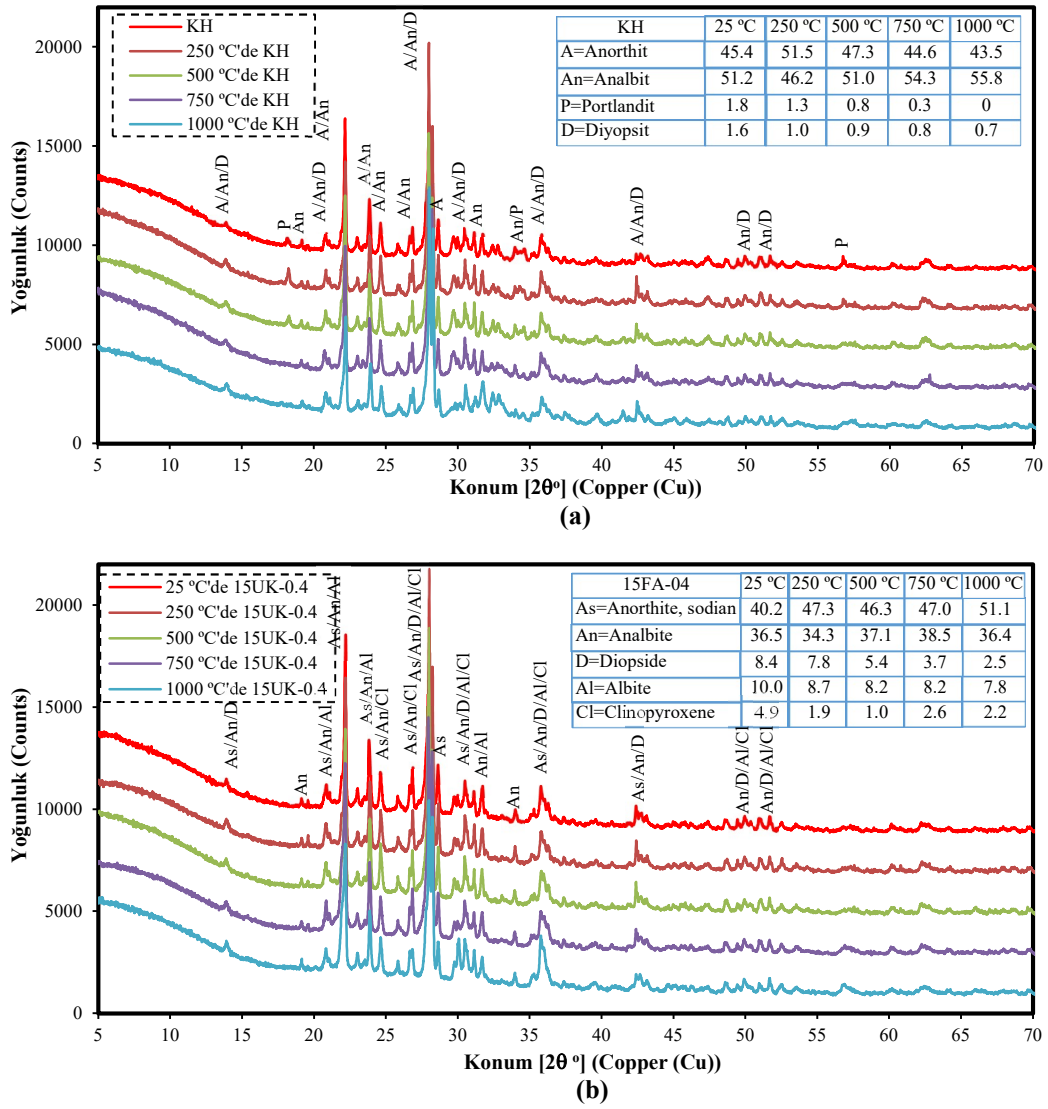
Şekil 7.20. ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri arasındaki ilişki

$$f_c = 12.648e^{0.543(U_{pv})} \quad (\text{Farklı günlerde}) \quad (7.9)$$

$$f_c = 0.072e^{2.32(U_{pv})} \quad (\text{Yüksek sıcaklıklarda}) \quad (7.10)$$

7.5 XRD Analizleri

25 °C (çevresel sıcaklık), 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan PC esaslı YDH'nin (KH'nin) ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin XRD analizleri ile tanımlanan mineralojik yapıları Şekil 7.21'de verilmiştir. 25 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, PC esaslı YDH'den elde edilen toz örneklerde anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), analbit ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), diyopsit ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) ve portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pikleri görülürken, 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'den elde edilen toz örneklerde anortit sodian ($(\text{Na})\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), analbit ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), diyopsit ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve klinopiroksen (ABSi_2O_6) ($\text{A} = \text{Ca}^{+2}$ ve Na^+ ; $\text{B} = \text{Mg}^{+2}$, Fe^{+2} , Fe^{+3} ve Al^{+3}) pikleri görülmüştür. Rietveld X-ışını kullanılarak yapılan kantitatif faz analizleri ile PC esaslı YDH'nin ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin XRD analizlerinin sonuçları, bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri ve XRD analizlerinin sonuçları ile uyumludur. PC esaslı YDH'nin yapısındaki anortit ve analbit pikleri C-S-H jelinin varlığına işaret ederken, 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin bileşiğindeki anortit sodian, analbit ve albit pikleri N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının varlığına işaret etmektedir. Şekil 7.21a'da görüldüğü gibi, PC esaslı YDH'nin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, Rietveld X-ışını kantitatif faz analizlerine göre, anortit ve analbit piklerinin toplam yüzdeleri artarken, portlandit ve diyopsit piklerinin toplam yüzdeleri azalmıştır. Benzer şekilde, Şekil 7.21b'de görüldüğü gibi, 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, Rietveld X-ışını kantitatif faz analizlerine göre, anortit ve analbit piklerinin toplam yüzdeleri artarken, albit, diyopsit ve klinopirokse piklerinin toplam yüzdeleri azalmıştır. Yüksek sıcaklıklarda Portlandit pikiindeki düşüşün nedenleri, portlanditin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yaklaşık olarak 400 °C ile 550 °C arasındaki sıcaklıklarda CaO ve H_2O olarak ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Bahafid vd., 2017; Saha vd., 2019). Yüksek sıcaklıklarda diyopsit pikiindeki azalmanın nedenleri ise, diyopsitin ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) yüksek sıcaklıklarda CaSiO_3 ve MgSiO_3 olarak ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Özellikler, yüksek sıcaklıklarda C-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının yapısındaki tam olarak bağlanmamış suyun buharlaşması ve bu fazların bozulmaya başlaması kristalin fazların miktarlarındaki azalmanın ana nedenlerindendir ve kristalin piklerinde azalmaya neden olmaktadır.

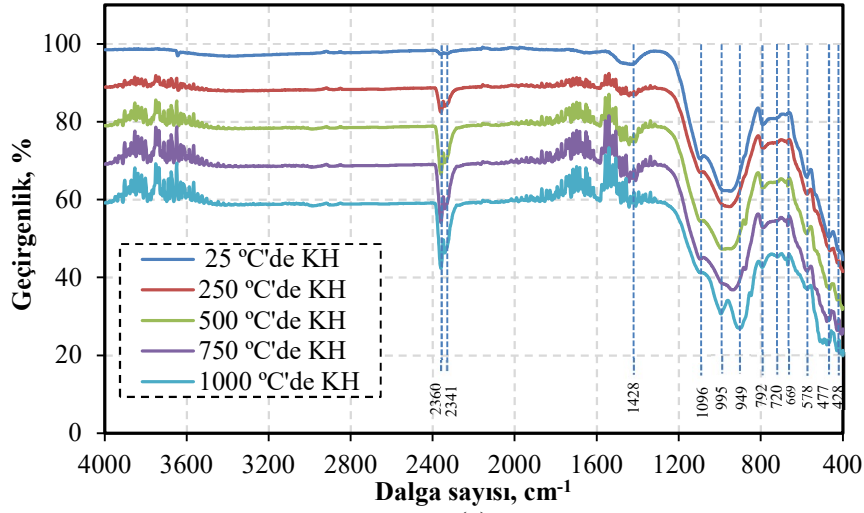


Şekil 7.21. a) PC esaslı YDH (KH) ve b) 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki XRD analizleri

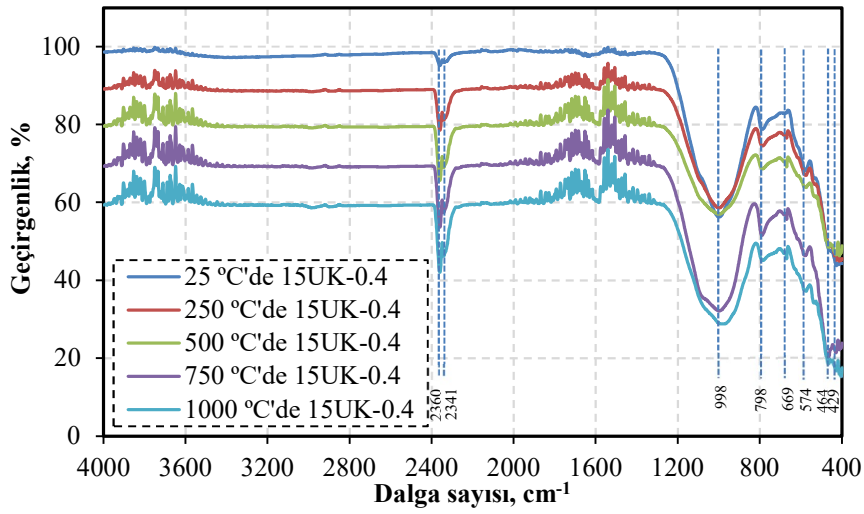
7.6 FTIR Analizleri

FTIR analizi, moleküllerin yapısındaki bağların tanımlanması için yapılmaktadır. FTIR analizinin temeli, molekül bağlarına uygulanan kızılötesi ışınların, titreşim ve dönme hareketleriyle soğurulması esasına dayanır. Böylece herhangi bir malzemenin moleküler bileşimi ve yapısı, çeşitli dalga boylarındaki kızılötesi ışığın enerjisinin emilmesiyle ölçülür. Bu çalışmada da, 25 °C (çevresel sıcaklık), 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan PC esaslı YDH'den (KH'den) elde edilen toz numuneler üzerinde gerçekleştirilen FTIR analizleri Şekil 7.22a'da verilirken, 25 °C (çevresel sıcaklık), 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan 15UK-0.4

olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'den elde edilen toz numuneler üzerinde gerçekleştirilen FTIR analizleri Şekil 7.22b'de verilmiştir. Şekil 7.22a ve b'den görüldüğü gibi, 2360 cm^{-1} ve 2341 cm^{-1} 'deki PC esaslı YDH'nin ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin CO_2 'e ait FTIR bantları aynıdır. PC esaslı YDH'nin ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin 1600 cm^{-1} ve 400 cm^{-1} arasındaki bazı FTIR bantları aynı olmasına rağmen, bu aralıkta farklı bantlar da bulunmaktadır. PC esaslı YDH'nin FTIR bantları 1428 cm^{-1} , 1096 cm^{-1} , 995 cm^{-1} , 949 cm^{-1} , 792 cm^{-1} , 720 cm^{-1} , 669 cm^{-1} , 578 cm^{-1} , 477 cm^{-1} ve 428 cm^{-1} 'de görülürken, 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin FTIR bantları 998 cm^{-1} , 798 cm^{-1} , 669 cm^{-1} , 574 cm^{-1} , 464 cm^{-1} ve 429 cm^{-1} 'de görülmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada, alüminosilikat esaslı malzemeler için en önemli bantların 850 cm^{-1} ve 1350 cm^{-1} arasında olduğu belirtilmiştir. Bu aralıktaki bantlar, Si-O-Al, Si-O-Si ve Si-O-Na/K gibi çeşitli bağları temsil etmektedir (Lee vd., 2003; Irfan Khan vd., 2015). PC esaslı YDH'nin 1428 cm^{-1} ve 669 cm^{-1} 'deki FTIR bantları CO_3^{2-} 'nin varlığını, 720 cm^{-1} 'deki bandı ise portlanditin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) varlığını ifade etmektedir (Sikandar vd., 2023). Ayrıca, PC esaslı YDH'nin 1096 cm^{-1} , 949 cm^{-1} , 578 cm^{-1} ve 477 cm^{-1} 'deki FTIR bantları Si/Al-O-Si bağının varlığını, 995 cm^{-1} , 792 cm^{-1} ve 428 cm^{-1} 'deki FTIR bantları ise Si-O-Si bağının varlığını temsil etmektedir (Lee vd. 2003; Irfan Khan vd., 2015; Sikandar vd., 2023). 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin 998 cm^{-1} 'deki ana FTIR bandı, polimerizasyon süreci sonucu oluşan alüminosilikat minerallerin Si-O-Na bağının asimetrik titreşimlerini ifade etmektedir (Lee vd., 2003; Irfan Khan vd., 2015). Ayrıca, 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin 798 cm^{-1} , 574 cm^{-1} ve 464 cm^{-1} 'deki FTIR bantları Si/Al-O-Si bağının varlığını, 669 cm^{-1} ve 429 cm^{-1} 'deki FTIR bantları ise Si-O-Si bağının varlığını temsil etmektedir (Alghamdi vd., 2018). Si-O-Si ve Si/Al-O-Si bağlarının varlığı, PC esaslı YDH'nin hidratasyon ürünlerinden olan C-S-H ve C-A-S-H jellerini gösterirken, Si/Al-O-Si ve Si-O-Na bağlarının varlığı ise 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin hidratasyon ürünlerinden olan N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarını göstermektedir. PC esaslı YDH'nin ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin bazı FTIR bantları, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan PC, SD ve UK'nın bazı FTIR bantları ile uyumlu iken, bazı bantlarda farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların nedeni, hidratasyon sonucu oluşan C-S-H, C-A-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H jellerinin yapısındanadır.



(a)



(b)

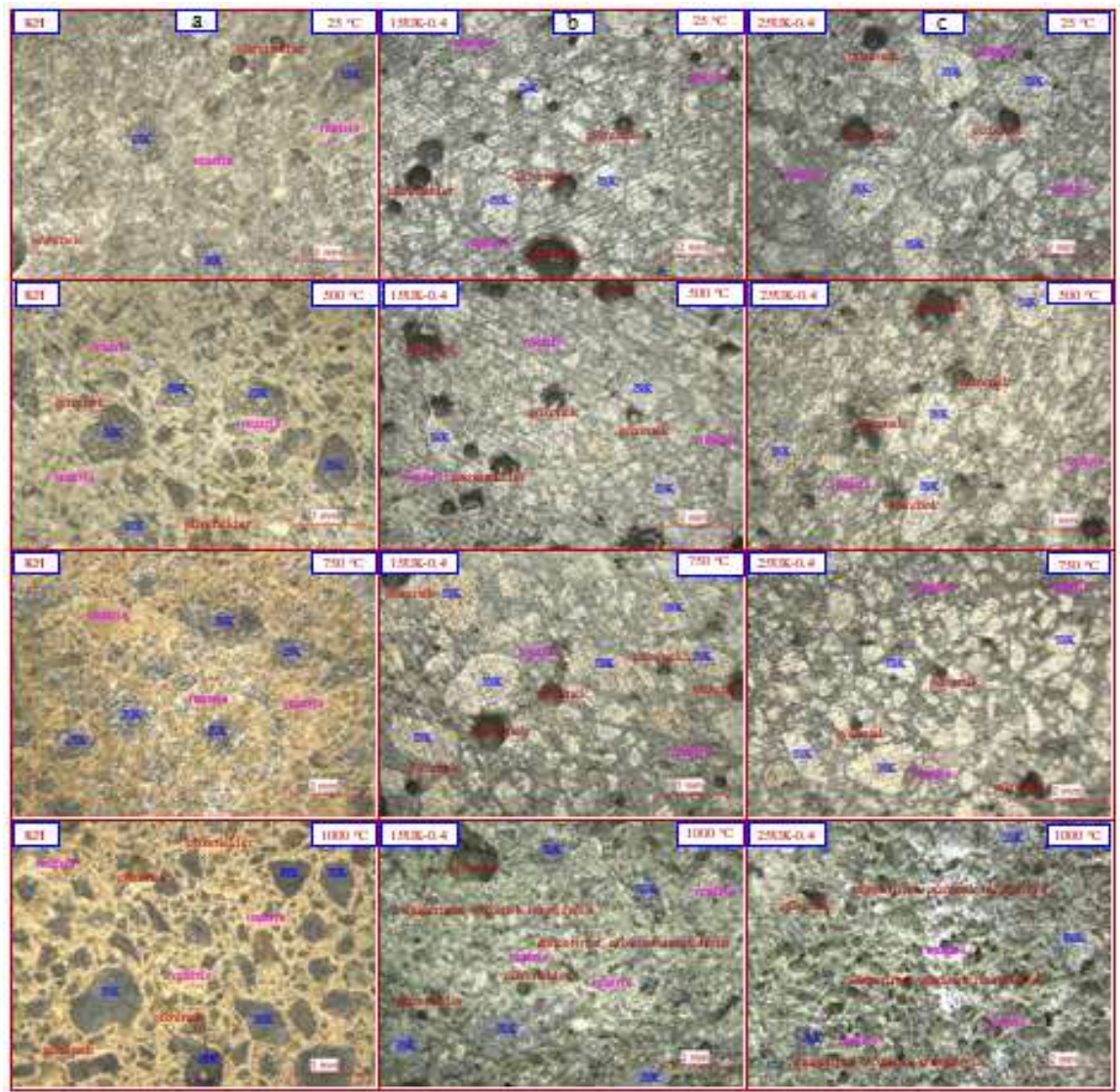
Şekil 7.22. a) PC esaslı YDH (KH) ve b) 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FTIR analizleri

7.7 SM Analizleri

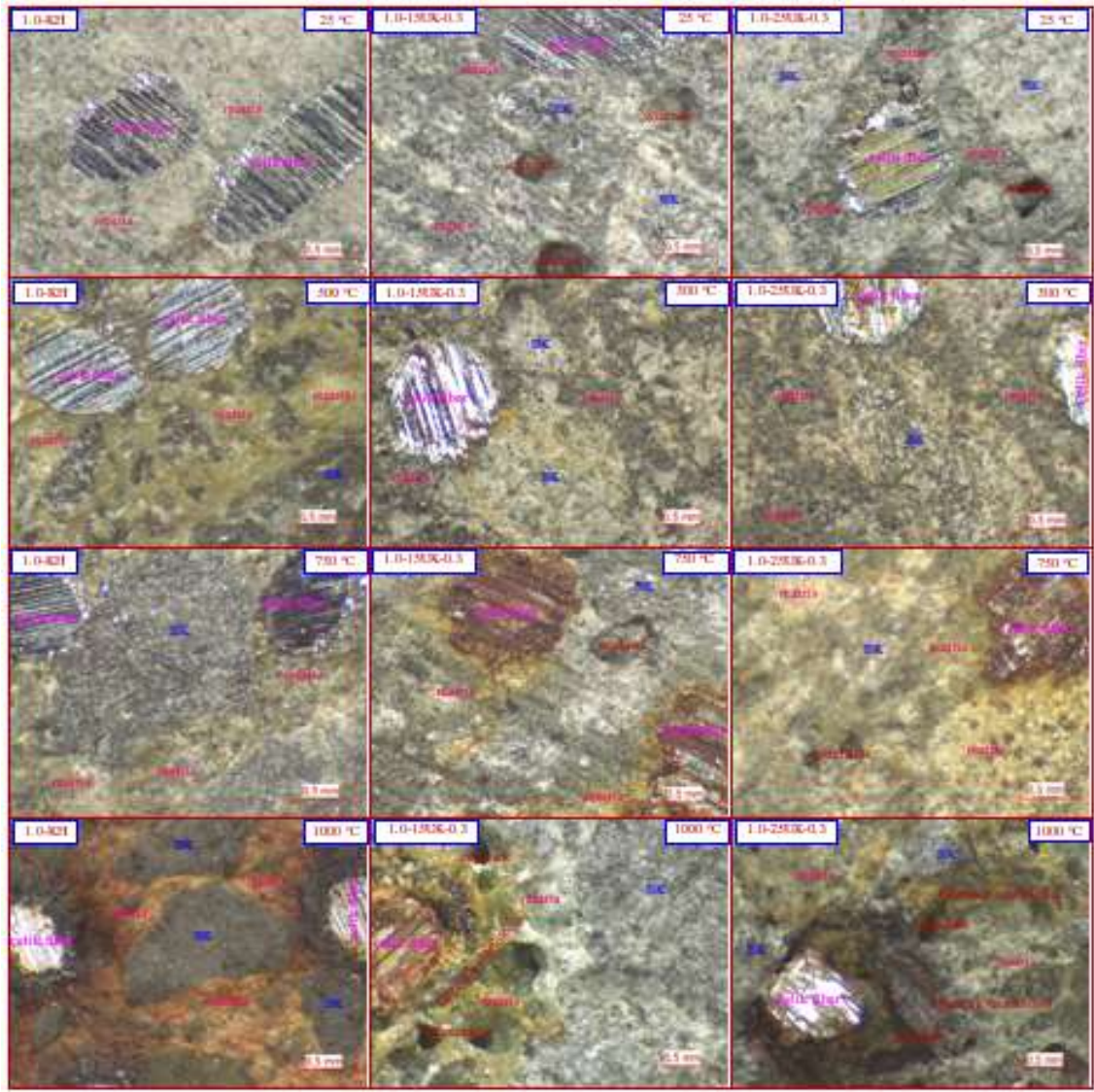
SM sabit dürbün mantığı ile çalışan ışık mikroskopundan farklı olarak, 3 boyutlu görüntü elde etmek için kullanılan bir mikroskop türüdür. SM analizi, numune içerisinden geçebilen ışığın yerine, numune yüzeyinden ışığın yansıtılmasıyla yaklaşık 10X ile 40X arasında değişen tipik büyütmeyle numunenin yüzeyinin incelenmesidir. SM analizi, genellikle katı numunelerde yapılır. Bu analiz ile numune yüzeyindeki çatlaklar, boşluklar, farklı faz yapıları ve farklı oluşumlar gözlemlenebilir. Bu çalışmada da, 4×4×0.5 cm boyutlarında taş kesme makinesinde kesilen numunelerin yüzeylerindeki çatlaklar, boşluklar, farklı yapılar ve farklı oluşumlar SM analizi ile 10X büyütme ile incelenmiştir.

25 °C (çevresel sıcaklık), 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan 4×4×16 cm boyutlarındaki numunelerden taş kesme makinesi ile kesilen 4×4×0.5 cm boyutlarındaki ÇF içermeyen PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.4 ve 25UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matris, agrega ve ara yüzey geçiş bölgesindeki değişiklikler SM analizleri ile Şekil 7.23'te görüldüğü gibi incelenmiştir. Benzer şekilde, 25 °C (çevresel sıcaklık), 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan 4×4×16 cm boyutlarındaki numunelerden taş kesme makinesi ile kesilen 4×4×0.5 cm boyutlarındaki ÇF içeren PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.3 ve 25UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matris, agrega ve ara yüzey geçiş bölgesindeki değişiklikler SM analizleri ile Şekil 7.24'te görüldüğü gibi incelenmiştir. Birçok çalışmada, harçların ve betonların her zaman karıştırma ve dökme işlemi sırasında oluşan küçük hacimli küresel hava kabarcıkları içerdiği belirtilmiştir (He vd., 2023; He ve Lu 2024). Bu çalışmada da, hem ÇF içermeyen hem de ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin SM analizleri ile küçük küresel gözenekler görülmüştür. Benzer şekilde, hem ÇF içermeyen 15UK-0.4 ve 25UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerde hem de ÇF içeren hem 15UK-0.3 ve 25UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerde SM analizleri ile küçük küresel gözenekler görülmüştür. ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matris yapılarına göre alüminosilikat esaslı ham maddelerin ve aktivatörlerin polimerizasyon işlemi nedeniyle ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matrislerinde daha fazla küresel gözenek görülmektedir (Chen vd. 2022). ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, Şekil 7.23 ve 7.24'te görüldüğü gibi, matris ve ara yüzey geçiş bölgelerindeki (matris ile agrega ve matris ile ÇF arasındaki) gözenekler, renk değişimleri ve bozulmalar artarken, agregada bunlar görülmemiştir. Özellikle, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matrisleri, her farklı yüksek sıcaklık uygulamasından sonra, farklı bir renk değişimine uğramıştır. ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matrislerinin yüksek sıcaklıklarda oluşan renk değişimleri, fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun kaybı ve hidratasyon ürünlerinin ayrışması sonucunda oluşmaktadır. ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matrislerindeki renk değişimleri, 750 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda neredeyse hemen hemen aynıdır. Ancak, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklara maruz kalan ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matrislerinde renk değişimleri gözlenmiştir. Bu renk değişimlerinin sebeplerinden birisi matris fazlarının eriyip süngerimsi bir yapıya dönüşmesidir. Bu renk değişimlerinin diğer bir sebebi ise yüksek sıcaklıklarda matrisin bozulması sonucu oluşan (OH)⁻ iyonlarından

çözünen oksijenle ve ince kesit elde etmek için ıslak elmas testere makinesinde kullanılan suyla ÇF'den salınan demir iyonlarının (Fe^{2+}) oksidasyonu sonucu oluşan ferrik oksit ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$) bileşenidir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda oluşan erime ve gözeneklilik, matris ile agrega ve matris ile ÇF arasındaki ara yüzey geçiş bölgelerinin zayıflamasına, numunelerin hacimlerinde artmaya ve numunelerin yüzeylerinde çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle, 1000 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan ÇF içeren PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin matrisleri ile ÇF'lerinin ara yüzey geçiş bölgelerinde büyük boşlukların olduğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda oluşan erime ve gözeneklilik, yüksek sıcaklıklarda sinterleme yoğunlaşması, yeniden kristalleşme ve alüminosilikat fazlarının dönüşüm sürecinden kaynaklanmaktadır (Lee vd., 2017)



Şekil 7.23. ÇF içermeyen PC esaslı YDH (KH), 15UK-0.4 ve 25UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki SM görüntüleri



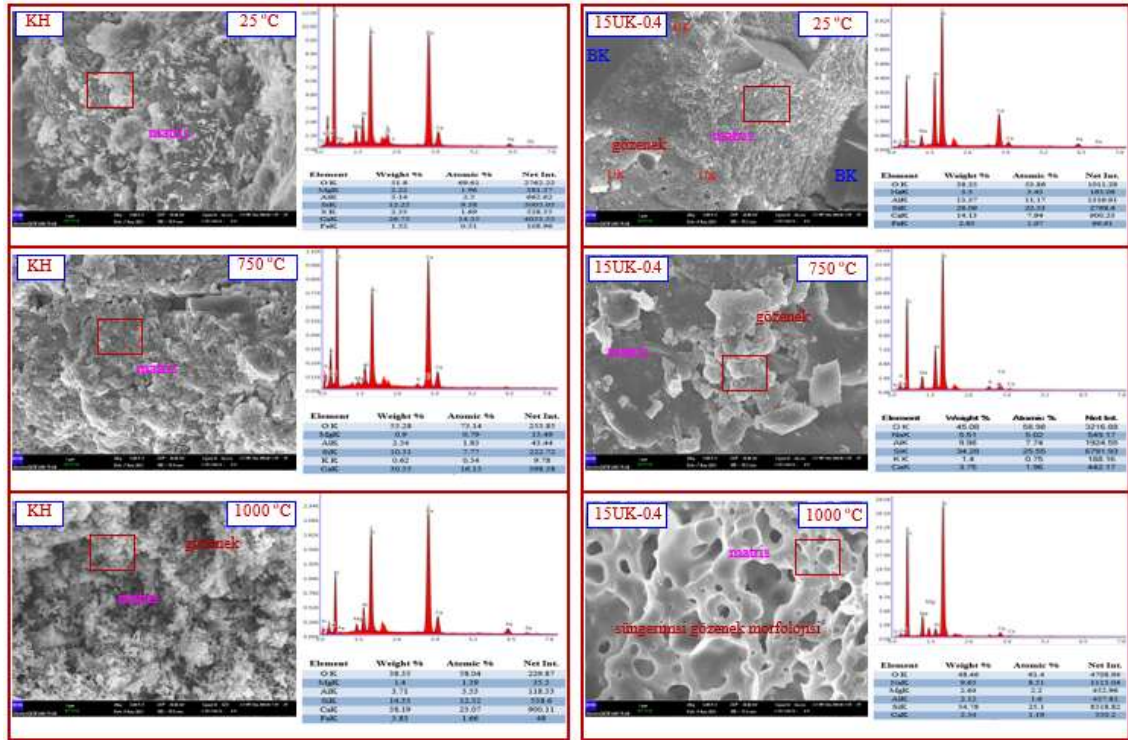
Şekil 7.24. ÇF içeren PC esaslı YDH (KH), 15UK-0.3 ve 25UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki SM görüntüleri

7.8 FESEM ve EDX Analizleri

FESEM analizi, odaklanmış bir elektron demetiyle numune yüzeyinin taranması sonucu numunenin görüntüsünün elde edildiği yöntemdir. FESEM analizi ile numunenin yüzey görüntüsü farklı büyütmelemlerle incelendiği gibi numune yüzeyinin kimyasal bileşiminin analizi için de çeşitli yöntemler sunmaktadır. FESEM analizi ile mikroyapının karakterizasyonu, malzemenin yüzeyi ve yüzeyinde bulunan çatlak ve boşlukların yapısı, faz değişimlerinde ara yüzey araştırmaları, kalitatif veya yarı kantitatif olarak kimyasal değişimler incelenmektedir. Bu çalışmada da, 25 °C (çevresel sıcaklık), 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'den (KH'den) ve 15UK-

0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'den elde edilen küçük parçaların matrislerindeki değişimler ve gözenekler Şekil 7.25'de görüldüğü gibi 5.00KX büyütme oranında FESEM analizleriyle incelenirken, 25 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'den (KH'den) ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'den elde edilen küçük parçaların matrislerindeki değişimler ve gözenekler Şekil 7.26'da görüldüğü gibi 2.00KX ve 5.00KX büyütme oranlarında FESEM analizleriyle incelenmiştir. Çevresel sıcaklıkta, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve ÇF içermeyen 15UK-0.4 ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrislerinin kompakt ve yoğun yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu sıcaklıkta, ÇF içermeyen 15UK-0.4 ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrislerinde tepkimeye girmemiş UK taneleri ve küresel mikro-gözenekler görülmektedir. UK esas olarak alüminosilikat bazlı içi boş küresel parçacıklardan oluşmakta ve bu içi boş küresel parçacıklar yüksek sıcaklıklarda kısmen eridiğinde, matris yapısında oldukça dağınık küçük boyutlu gözenekler oluşturmaktadır. ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, tepkimeye girmemiş UK parçacıkları azalmaktadır ve UK parçacıkları yüksek sıcaklıklarda eriyerek camsı faza dönüşmektedir. FESEM görüntüleri, 750 °C ve 1000 °C yüksek sıcaklıklarda, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin morfolojisinde ciddi değişimlerin olduğunu göstermektedir. FESEM analizleri ile 750 °C'de ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matris yapılarında gözenekler ve mikro-çatlaklar gözlenirken, 1000 °C'de matris yapılarının tamamen bozulduğu, düzensiz gözenekli ve heterojen bir hale dönüştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin hidratasyon ürünlerinden Ca(OH)_2 ve CaCO_3 'ün tamamen bozunması ve C-S-H jellerinin bozulmaya başlamasıyla açıklanabilir (Handoo vd., 2002). Benzer şekilde, FESEM analizleri ile 750 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matris yapılarında camsı faz oluşumu gözlenirken, 1000 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matris yapılarındaki alüminosilikat bazlı malzemelerin erimesi sonucu sinterleme yoğunlaşması, yeniden kristalleşme ve dönüşüm sürecine bağlı olarak süngerimsi yapı oluşumu gözlenmiştir (Lee vd., 2017; Handoo vd., 2002). Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin matris yapılarında oluşan yoğun süngerimsi yapı, alüminosilikat fazlarının geniş çapta yeniden kristalleşme oluşumuyla yakından ilişkilidir (Cai vd., 2021). Yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan süngerimsi yapı, ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin

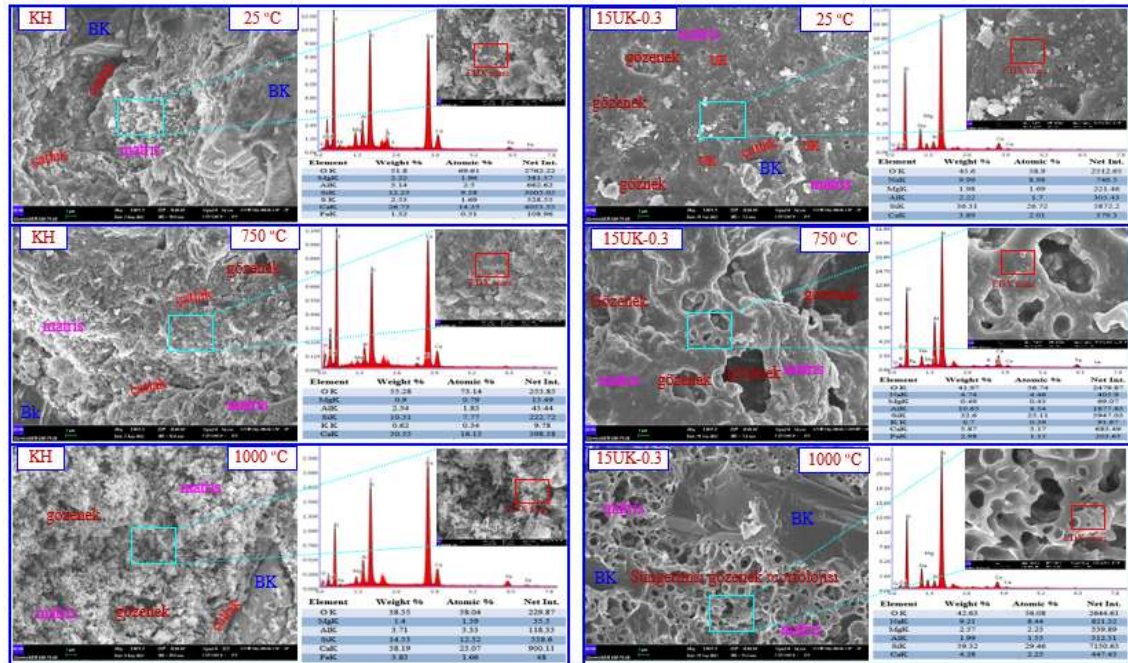
dayanım özelliklerini önemli ölçüde zayıflatmakta ve dayanım özelliklerinde önemli azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 7.25. ÇF içermeyen PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FESEM/EDX analizleri

25 °C (çevresel sıcaklık), 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içermeyen PC esaslı YDH'nin (KH'nin) ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin matris yapılarındaki kimyasal elementler Şekil 7.25'deki FESEM görüntülerinde işaretlenen bölgelerde EDX alan analizleriyle incelenirken, 25 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içeren PC esaslı YDH'nin (KH'nin) ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin matris yapılarındaki kimyasal elementler Şekil 7.26'deki FESEM görüntülerinde işaretlenen bölgelerde EDX alan analizleriyle incelenmiştir. EDX analizleri ile ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin işaretlenen bölgelerinde O, Mg, Al, Si, S, K, Ca ve Fe elementleri tespit edilirken, ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin işaretlenen bölgelerinde O, Na, Al, Si, Ca, Fe, K ve Mg elementleri tespit edilmiştir. EDX analizlerinden görüldüğü üzere, tüm sıcaklıklarda ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matrislerinde Ca elementinin ağırlık yüzdesi daha yüksekken, ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı

AAYDH'lerin matrislerinde Si ve Na elementlerinin ağırlık yüzdeleri daha yüksektir. ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrislerindeki Na, Al, Si ve Ca elementleri N-A-S-H ve C-(A)-S-H hidratasyon ürünlerini gösterirken, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin matrislerindeki Si ve Ca elementleri Ca(OH)_2 ve C-S-H hidratasyon ürünlerini göstermektedir. Ayrıca, ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrislerindeki Na ve Si elementlerinin daha yüksek ağırlık yüzdelerine sahip olması, daha fazla N-A-S-H fazının oluştuğunu göstermektedir. EDX analizleri yarı-kantitatif veri sağladığı için, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin hidratasyon ürünlerinden olan Ca(OH)_2 ve C-S-H hakkında ve ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin hidratasyon ürünlerinden olan N-A-S-H ve C-(A)-S-H hakkında yaklaşık bilgi sağlamaktadır (Sarıdemir vd., 2022). ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve ÇF içermeyen 15UK-0.4 olarak kodlanan ve ÇF içeren 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin EDX analiz sonuçları, XRD analiz sonuçları ve karışımlarda kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşenleri ve XRD analiz sonuçları ile uyumludur.



Şekil 7.26. ÇF içeren PC esaslı YDH (KH) ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin çevresel ve yüksek sıcaklıklardaki FESEM/EDX analizleri

BÖLÜM VIII

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerin özellikleri üzerine SD yerine %10, %15, %20 ve %25 oranlarında kullanılan C sınıfı UK'nın, hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında kullanılan ÇF'nin ve 25 °C (çevresel sıcaklık), 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıkların etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, SD esaslı AAYDH'lerin özellikleri ile karşılaştırmak için KH olarak üretilen PC esaslı YDH'nin özellikleri üzerine hacimce %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında kullanılan ÇF'nin ve 25 °C (çevresel sıcaklık), 250 °C, 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıkların etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalara dayanarak ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin mekanik ve mikroyapısal özellikler ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerin yayılma, ρ_a ve U_{pv} değerleri, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin yayılma, ρ_a ve U_{pv} değerlerine göre daha düşüktür. Ayrıca, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, hidrat ürünlerindeki zayıf bağlı suyun, matris boşluklarındaki serbest suyun ve kapiler suyun buharlaşması nedeniyle kısa ve uzun süreli ρ_a ve U_{pv} değerleri azalmıştır.
- ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin tüm kür yaşlarında yüksek f_{fs} ve f_c değerleri elde edilmiştir. ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} ve f_c değerleri kür günlerinin artmasıyla artmıştır. 7, 28, 90, 180 ve 365 kür günlerinde, ÇF içermeyen PC esaslı YDH'lerden yaklaşık 10 MPa ile 15 MPa arasında f_{fs} değerleri ve 73 MPa ile 108 MPa arasında f_c değerleri elde edilirken, ÇF içermeyen SD esaslı AAYDH'lerden yaklaşık 11 MPa ile 19 MPa arasında f_{fs} değerleri ve 68 MPa ile 119 MPa arasında f_c değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, 14, 28, 90, 180 ve 365 kür günlerinde, ÇF içeren PC esaslı YDH'lerden yaklaşık 11 MPa ile 17 MPa arasında f_{fs} değerleri ve 82 MPa ile 113 MPa arasında f_c değerleri elde edilirken, ÇF içeren SD esaslı AAYDH'lerden yaklaşık 12 MPa ile 19 MPa arasında f_{fs} değerleri ve 80 MPa ile 120 MPa arasında f_c değerleri elde edilmiştir.

- ÇF içermeyen 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde, en yüksek f_{fs} değerleri 0.3 veya 0.4 SH/SS oranları ile üretilen SD esaslı AAYDH'lerde, en yüksek f_c değerleri ise 0.4 SH/SS oranı ile üretilen SD esaslı AAYDH'de gözlenmiştir.
- ÇF içermeyen ve ÇF içeren SD yerine %10, %15, %20 ve %25 oranlarında C sınıfı UK kullanılan SD esaslı AAYDH'lerde, en yüksek f_{fs} ve f_c değerleri SD yerine %15 oranında C sınıfı UK kullanılan SD esaslı AAYDH'de gözlenmiştir.
- %15 C sınıfı UK içeriği ve 0.3 veya 0.4 SH/SS oranları SD esaslı AAYDH'lerden elde edilen f_{fs} ve f_c değerleri için optimumdur.
- ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} ve f_c değerleri %1.0 ÇF içeriğine kadar artma eğilimi gösterirken, %1.5 ÇF içeriğinde azalma eğilimi göstermiştir. Yüksek miktarda ÇF içeriğinin PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_{fs} ve f_c değerlerini azaltmasının nedeni, yüksek miktarda kullanılan ÇF içeriğinin matris ve ÇF arasındaki geçiş bölgesini zayıflatan bir topaklanma etkisi oluşturmaktadır.
- ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, mekanik özellikleri azalmıştır. Bu azalmalar, özellikle, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin mekanik özelliklerine göre SD esaslı AAYDH'lerin mekanik özelliklerinde daha fazladır. Yüksek sıcaklıklardan dolayı, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin mekanik özelliklerindeki azalmaların nedenleri, hidrat ürünlerindeki zayıf bağlı suyun, matris boşluklarındaki serbest suyun ve kapiler boşluklardaki suyun buharlaşması, Ca(OH)_2 'in dehidroksilasyonu ve ayrışması, CaCO_3 'ün dekarbonizasyonu ve C-S-H, N-A-S-H ve C-(A)-S-H hidratasyon ürünlerinin bozulmaya başlamasıdır.
- Farklı kür günlerine ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'lerin ve SD esaslı AAYDH'lerin f_c ve U_{pv} değerleri ile f_c ve f_{fs} değerleri arasında güçlü korelasyonlar gözlenmiştir. Bu güçlü korelasyonları elde edilen yüksek R^2 değerleri doğrulamaktadır.

- XRD analizleri ile çevre ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan PC esaslı YDH'nin (KH'nin) yapısında Ca(OH)_2 ve C-S-H fazlarının varlığını gösteren portlandit, anortit ve analbit pikleri tespit edilirken, çevre ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin yapısında N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının varlığını gösteren sodyum anortit, analbit ve albit pikleri tespit edilmiştir. XRD analizleri PC esaslı YDH'nin ve 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'nin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, anortit ve analbit toplam yüzdelerinin arttığını, portlandit, diyopsid albit ve klinopiroksen toplam yüzdelerinin ise azaldığını göstermiştir. Bu azalmalar, bazı hidratasyon ürünlerinin yüksek sıcaklık etkisiyle bozulmaya başladığını göstermektedir.
- FTIR analizleri ile çevre ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan PC esaslı YDH'de (KH'de) belirlenen bantlardaki Si-O-Si ve Si/Al-O-Si bağlarının varlığı, C-S-H hidratasyon ürününü temsil ederken, çevre ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 15UK-0.4 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'de belirlenen bantlardaki Si/Al-O-Si ve Si-O-Na bağlarının varlığı, N-A-S-H ve C-(A)-S-H hidratasyon ürünlerini temsil etmektedir.
- SM ve FESEM analizleri ile yüksek sıcaklıklarda ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'nin (KH'nin) matrisinde renk değişimleri ve bozulmalar gözlenirken, 750 °C ve 1000 °C'de 15UK-0.4 ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrisinde sinterleme yoğunlaşması, yeniden kristalleşme ve aluminosilikat fazların dönüşümüyle oluşan cam fazı nedeniyle hacimsel genişleme ile süngerimsi bir yapı gözlenmiştir. Dahası, ÇF içermeyen ve ÇF içeren PC esaslı YDH'nin (KH'nin) matrisine göre, 15UK-0.4 ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'lerin matrislerinin daha gözenekli olduğu SM ve FESEM analizleri ile gözlenmiştir. Ayrıca, SM analizleri ile ÇF içeren PC esaslı YDH'de (KH'de) ve 15UK-0.3 olarak kodlanan SD esaslı AAYDH'de kullanılan ÇF'lerin etrafında, maruz kaldıkları yüksek sıcaklık arttıkça, daha fazla oksidasyon tespit edilmiştir. Özellikle, SM analizleri ile 1000 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan ÇF içeren PC esaslı YDH'nin ve SD esaslı AAYDH'lerin matrisleri ile ÇF'lerinin ara yüzey geçiş bölgelerinde büyük boşlukların olduğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşan süngerimsi yapı, bozulma, oksidasyon ve boşluklar, matris ile agrega veya ÇF arasındaki ara yüzey geçiş bölgesini zayıflattığı için mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

KAYNAKLAR

Abbas, A.A., “The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete”, *Am. J. Civ. Eng.*, 1(3), 102-110, 2013.

Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Mastali, M., Dalvand, A., “A comparative study on the effects of recycled glass fiber on drying shrinkage rate and mechanical properties of the self-compacting concrete and fly ash/slag geopolymer concrete”, *J. Mater. Civil Eng.*, 29(8), 04017076, 2017.

ACI Committee 232, Report on the use of raw or processed natural pozzolans in concrete, *American Concrete Institute*, USA, 2012.

ACI Committee 234 (ACI 234R-96), Guide for the use of silica fume in concrete, *American Concrete Institute*, USA, 1996.

ACI Committee, Use of fly ash in concrete, *American Concrete Institute*, USA, 1987.

Akça, U., Yüksek fırın cürufu ile birlikte bazik pomza kullanılan alkali ile aktive edilmiş harçların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2022.

Akçaözoğlu, K., Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2007.

Akyüncü, V., F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin karşılaştırılarak incelenmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2012.

Alanazi, H., Hu, J., Kim, Y.R., “Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature”, *Constr. Build. Mater.*, 197, 747–756, 2019.

Alghamdi, H., Dakhane, A., Alum, A., Abbaszadegan, M., Mobasher, B., Neithalath, N., “Synthesis and characterization of economical, multi-functional porous ceramics based on abundant aluminosilicates”, *Mater. Des.*, 152, 10–21, 2018.

Anuk, O., CEM I 42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda F tipi uçucu külün etkinliği, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 2004.

Aruntaş, H.Y., “Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyelleri”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 193-203, 2006.

ASTM C230/ C230M-21, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2021.

ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete, *American Society For Testing Materials*, USA, 2009.

ASTM C618-19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *ASTM International*, USA, 2019.

Atakay, O., Uçucu küllerin katkılı çimento üretiminde kullanılması-tane inceliği ve katkı miktarının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2006.

Atış, C. D., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U. K. ve Demir, A., “Silis dumanı kullanımının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 426, 121-124, 2004.

Atış, C.D., Karahan, O., “Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 23(1), 392-399, 2009.

Aydın, S., Baradan, B., “The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars”, *Compos.: Part B*, 45, 63–69, 2013.

Bahafid, S., Ghabezloo, S., Duc, M., Faure, P., Sulem, J., “Effect of the hydration temperature on the microstructure of Class G cement: C-S-H composition and density”, *Cem. Concr. Res.*, 95, 270–281, 2017.

Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K.S., Singh, M., “Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete”, *J. Clean. Prod.*, 254, 120147, 2020.

Banthia, N., Trottier, J., “Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part I: Bond-slip mechanisms”, *ACI Mater. J.*, 91(5), 435-446, 1994.

Baradan, B., Yazıcı H., Aydın S., Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, 2012.

Behnood, A., Ghandehari, M., “Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures”, *Fire Saf. J.*, 44, 1015–1022, 2009.

Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., Techapaphawit, S., “Physical, chemical and geotechnical properties of coal fly ash: A global review”, *Case Stud. Constr. Mater.*, 11, e00263, 2019.

Billong, N., Oti, J., Kinuthia, J., “Using silica fume based activator in sustainable geopolymer binder for building application”, *Constr. Build. Mater.*, 275, 122177, 2021.

Bostanci, L., “Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars”, *J. Build. Eng.*, 29, 101154, 2020.

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S., “Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material”, *Constr. Build. Mater.*, 24(9), 1664-1671, 2010.

Cai, R., Wu, T., Fu, C., Ye, H., “Thermal degradation of potassium-activated ternary slag-fly ash-silica fume binders”, *Constr. Build. Mater.*, 320, 126304, 2022.

Cai, R., Ye, H., “Clinkerless ultra-high strength concrete based on alkali-activated slag at high temperatures”, *Cem. Concr. Res.*, 145, 106465, 2021.

Canbaz, M., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların özellikleri, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s. 22, 2007.

Çelikten, S., Sarıdemir, M., Akçaözoğlu, K., “Effect of calcined perlite content on elevated temperature behaviour of alkali activated slag mortars”, *J. Build. Eng.*, 32, 101717, 2020.

Çelikten, S., Sarıdemir, M., Deneme, İ.O., “Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+fly ash mortars exposed to high temperature”, *Constr. Build. Mater.*, 217, 50–61, 2019.

Cheah, C.B., Tan, L.E., Ramli, M., “The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume”, *Compos.: Part B*, 160, 558–572, 2019.

Chen, G.M., Yang, H., Lin, C.J., Chen, J.F., He, Y.H., Zhang, H.Z., “Fracture behaviour of steel fibre reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, 128, 272-286, 2016.

Chen, S., Ruan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Zhang, M., Tian, Y., Yan, D., “Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review”, *Constr. Build. Mater.*, 328, 127064, 2022.

Chen, S., Wu, C., Yan, D., “Binder-scale creep behavior of metakaolin-based geopolymer”, *Cem. Concr. Res.*, 124, 105810, 2019.

Chen, X., Zhang, J., Lu, M., B., Gao, S., Bai, J., Zhang, H., Yang, Y., “Study on the effect of calcium and sulfur content on the properties of fly ash based geopolymer”, *Constr. Build. Mater.*, 314, 125650, 2022.

Cheng, H., Chen, P., Cao, S., Li, Y., “Stress–strain model of steel fibre-reinforced alkali-activated slag cementitious material after high-temperature exposure”, *J. Build. Eng.*, 79, 107743, 2023.

Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., Rattanasak, U., “Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite”, *Adv. Pow. Tech.*, 25, 1087–1093, 2014.

Cong, P., Mei, L., “Using silica fume for improvement of fly ash/slag based geopolymer activated with calcium carbide residue and gypsum”, *Constr. Build. Mater.*, 275, 122171, 2021.

Criado, M., Palomo, A., Fernandez-Jimenez A., “Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products”, *Fuel*, 84, 2048–2054, 2005.

Das, S.K., Mustakim, S.M., Adesina, A., Mishra, J., Alomayri, T.S., Assaedi, H.S., Kaze, C.R., “Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash”, *J. Build. Eng.*, 32, 101780, 2020.

Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry & Applications 2nd ed.”, *Geopolymere Institute*, 2008.

Davidovits, J., “Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer”, *Geopolymer Institute*, 2005.

Davidovits, J., “Properties of geopolymer cements”. *In First International Conference on Alkaline Cements And Concretes*, 1, 131-149, 1994.

Davidovits, J., “Geopolymers - inorganic polymeric new materials”, *J. Therm. Anal.*, 37, 1633-1656, 1991.

Demirboga, R., Türkmen, I., Karakoç, M.B., “Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixture concrete”, *Cem. Concr. Res.*, 34, 2329–2336, 2004.

Dong, J., Zhang, T., Liu, H., Wang, K., Liu, J., Wang, Z., “Silica fume-reinforced alkali-activated uncalcined Pisha Sandstone-based geopolymer cement”, *Constr. Build. Mater.*, 269, 121296, 2021.

Duan, P., Yan, C., Zhou, W., “Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle”, *Cem. Concr. Compos.*, 78, 108-119, 2017.

Dybeł, P., Furtak, K., “Influence of silica fume content on the quality of bond conditions in high-performance concrete specimens”, *Archiv. Civ. Mech. Eng.*, 17(4), 795–805, 2017.

Ekinci, C.E., Yeğınobalı, M.A., Silis dumanı katkılı betonların çarpma dayanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, İstanbul, 279-289, 1996.

Elibol, C., Alkalilerle aktive edilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2012.

Erdoğan, T., Beton. *ODTÜ Yayınları*, Ankara, 2003.

Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş. ve Doğan, A., “Silis dumanının katkılı çimento ile kullanımı”, 4.Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 257-266, İstanbul, 1996.

Fares, H., Remond, S., Noumowe, A., Cousture, A., “High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties”, *Cem. Concr. Res.*, 40(3), 488–496, 2010.

Fernández-Jiménez, A. Palomo, A., “Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator”, *Cem. Concr. Res.*, 35 (10), 1984–1992, 2005.

Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G. and Puertas, F., “Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour”, *Cem. Concr. Res.*, 29(8), 1313-1321, 1999.

Gebregziabih, B.S., Thomas, R., Peethamparan, S., “Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag”, *Cem. Concr. Compos.*, 55, 91–102, 2015.

Girgin, S., NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2016.

Glukhovsky, V. D., Soil Silicates. *Gostroiizdat Publish*, Kiev, 1959.

Glukhovsky, V. D., Ancient, modern and future concretes. *In Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1-9. 1994.

Gong, J., Deng, G., Shan, B., “Performance evaluation of RPC exposed to high temperature combining ultrasonic test: A case study”, *Constr. Build. Mater.*, 157, 194-202, 2017.

Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., “Uçucu kül bölüm II: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 33-42, 2008.

Görür, E.B., Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2015.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 2005.

Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S., “Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes”, *Constr. Build. Mater.*, 124, 352-362, 2016.

Gupta, A., “Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica fume”, *Mater. Today Proc.*, 44, 23–28, 2021.

Hamid, R., Yusof, K.M., Zain, M.F.M., “A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume”, *Constr. Build. Mater.*, 24, 94–98, 2010.

Handoo, S.K., Agarwal, S., Agarwal, S.K., “Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures”, *Cem. Concr. Res.*, 32, 1009-1018, 2002.

He R., Lu, N., “Hydration, fresh, mechanical, and freeze-thaw properties of cement mortar incorporated with polymeric microspheres”, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 7(92), 1-20, 2024.

He, R., Nantung, T., Olek, J., Lu, N., “Field study of the dielectric constant of concrete: A parameter less sensitive to environmental variations than electrical resistivity”, *J. Build. Eng.*, 74, 106938, 2023.

Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y., “Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete”, *Mater. Des.*, 31(5), 2604–2615, 2010.

Hot, J., Cyr, M., Augeard, E., Eekhout, M., “An investigation of CaSi silica fume characteristics and its possible utilization in cement-based and alkali-activated materials”, *Constr. Build. Mater.*, 101, 456–465, 2015.

Irfan Khan, M., Khairun A., Suriati, S., Zakaria M., “Sodium silicate-free geopolymers as coating materials: Effects of Na/Al and water/solid ratios on adhesion strength”, *Ceram. Inter.*, 41, 2794–805, 2015.

Jena, S., Panigrahi, R., “Feasibility study of the properties of geopolymer concrete with ferrochrome slag and silica fume”, *Mater. Today Proc.*, 38, 2476–2480, 2021.

Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y., Huang, B., “A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures”, *J. Clean. Prod.*, 270, 122500, 2020.

Kabay, N., Miyan, N. and Özkan, H., “Basic oxygen furnace and ground granulated blast furnace slag based alkali-activated pastes: Characterization and optimization”, *J. Clean. Prod.*, 327, 129483, 2021.

Kang, S.T., Lee, Y., Park, Y.D., Kim, J.K., “Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber”, *Compos. Struct.*, 92(1), 61-71, 2010.

Kantarcı, F., Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, 2013.

Karateke, S. K., F tipi uçucu kül kullanılmış betonların kül etkinlik katsayıları, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2009.

Kaya, G., Farklı konsantrasyonlarda uçucu kül kullanımının çimento özellikleri üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziozmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tokat, 2010.

Kızıltepe, C. Ç., Kolemanit zenginleştirme atıklarının alkali aktivasyon potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, s 124, İzmir, 2018.

Koca, C., “Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı”, *4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı*, s.381-394, İstanbul, 1996.

Koenig, A., Wuestemann, A., Gatti, F., Rossi, Fuchs, L. F., Fessel, D., Dathe, F., Dehn, F., Minelli, F., “Flexural behaviour of steel and macro-PP fibre reinforced concretes based on alkali-activated binders”, *Constr. Build. Mater.*, 211, 583-593, 2019.

Kostick, D.S., “Mineral Commodity Summaries – Soda Ash”, *U.S. Geological Survey*, 2011a.

Kostick, D.S., “Mineral Commodity Summaries – Sodium Sulfate”, *U.S. Geological Survey*, 2011b.

Krivenko, P.V., Special Alkaline Cements, in Russian, *Budivel'nyk Publish.*, Kiev, 1995.

Krivenko, P., “Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability”, *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden, s. 6, 1997.

Kuang, F., Long, Z., Kuang, D., Guo, R., Sun, J., “Experimental study on high temperatures performance of rubberized geopolymer mortar”, *J. Build. Eng.*, 76, 107091, 2023.

Kurt, E. B., Silis dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 115, 2007.

Lee, N.K., Koh, K.T., An, G.H., Ryu, G.S., “Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures”, *Ceram. Int.*, 43(2), 2471–2480, 2017.

Lee, W. K. W., van Deventer, J. S. J., “Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates”, *Langmuir*, 19, 8726-8734, 2003.

Lim, S., Mondal, P., “Micro-and nano-scale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials”, *Mater. Charact.*, 92, 15–25, 2014.

Lodeiro, I. G., Macphee, D.E., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., “Effect of alkalis on fresh C–S–H gels FTIR analysis”, *Cem. Concr. Res.*, 39, 147–53, 2009.

Luga, E., Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu jeopolimer harçların özellikleri, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2015.

Luo, X., Xu, J., Bai, E., Li, W., “Systematic study on the basic characteristics of alkali-activated slag-fly ash cementitious material system”, *Constr. Build. Mater.*, 29, 482–486, 2012.

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P. and Illikainen, M., “One-part alkali-activated materials: A review”, *Cem. Concr. Res.*, 103, 2018.

Ma, Y., Hu, J., Ye, G., “The pore structure and permeability of alkali activated fly ash”, *Fuel*, 104, 771–780, 2013.

Malhotra, V.M., “Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete: a review”, *Concrete International*, 15(4), 23-28, 1993.

Malhotra, V.M., Mineral Admixtures. Concrete Construction Engineering Handbook, *Nawy Edward G. CRC Press*, New York, 27-36, 1997.

Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.İ., Ramyar, K., “Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point”, *Constr. Build. Mater.*, 70, 17-25, 2014.

Mazloom, M., Ramezaniapour, A.A. ve Brooks, J.J., “Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete”, *Cem. Concr. Comp.*, 26, 347-357, 2004.

Mehta, P. K., Aïtcin, P. C., “Principles underlying production of high-performance concrete”. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 12(2), 70-78, 1990.

Mishra, S. R., Kumar, S., Park, A., Rho, J., Losby, J., & Hoffmeister, B. K., “Ultrasonic characterization of the curing process of PCC fly ash–cement composites”. *Materials Characterization*, 50(4-5), 317-323, 2003.

Nath, P., Sarker, P.K., “Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition”, *Constr. Build. Mater.*, 66, 163–171, 2014.

Nik, A.S., Omran, O.L., “Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO₂ using ultrasonic pulse velocity”, *Constr. Build. Mater.*, 44, 654–662, 2013.

Nonveiller, E., Grouting Theory and Practice., *The Netherlands: Elsevier Science Publishers*, Amsterdam, 2013.

Okoyea, F.N., Durgaprasad, J., Singh, N.B., “Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete”, *Ceram. Int.*, 42, 3000–3006, 2016.

Ömür, T., Alkali aktivatör ve kum oranının alkalilerle aktifleştirilmiş cürufun özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, s. 105, İstanbul, 2022.

Özbek, R., Silis dumanın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s. 86, 1998.

Özcan Z, Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı harçların özellikleri, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2020.

Özcan, U. ve Güngör, S., “Sürdürebilir bir yöntem/betonda puzolan kullanımı”, *Avrupa Bilim ve Teknolojisi*, 176-182, 2019.

Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, Chindaprasirt, V.P., “Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive”, *Mater. Des.*, 53, 269–274. 2014.

Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., Chindaprasirt, P., “Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer”, *Constr. Build. Mater.*,. 91, 1–8, 2015.

Pilehvar, S., Cao, V.D., Szczotok, A.M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies R., Kjøniksen, A.L., “Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials”, *Constr. Build. Mater.*,. 173, 28-39, 2018.

Premkumar, R., Hariharan, P., Rajesh, S., “Effect of silica fume and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of GGBS based geopolymer concrete”, *Mater. Today Proc.*, 60(1), 211-215, 2022.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S., “Alkali activated materials: state-of-the-art report”, *RILEM TC 224-AAM*,13 *Springer Science & Business Media*, 2013.

Provis, J.L. and Van Deventer, J.S.J, Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications, *Elsevier Woodhead Published Limited*, UK., 2009.

Provis, J.L., Ismail, I., Myers, R.J., Rose, V., Van Deventer J.S., “Characterising the structure and permeability of alkali-activated binders”, *Int. RILEM Conf. Adv. Constr. Mater. Through Sci. Eng.*, 493–501,2011.

Provis, J.L., Myers, R.J., White, C.E., Rose, V., Van Deventer, J.S., “X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders”, *Cem. Concr. Res.*, 42(6), 855-64, 2012.

Puertas, F., Mart´inez-Ramírez, S., Alonso, S., Vázquez, T., “Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products”, *Cem. Concr. Res.*, 30 (10), 1625–1632, 2000.

Purdon, A.O., “The action of alkalis on blast-furnace slag”. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), 191-202, 1940.

Ramezaniyanpour, A.A., Moeini, M.A., “Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume”, *Constr. Build. Mater.*, 163, 611–621, 2018.

Rashad, A. M., Khalil, M.H., “A preliminary study of alkali-activated slag blended with silica fume under the effect of thermal loads and thermal shock cycles”, *Constr. Build. Mater.*, 40, 522-532, 2013.

Rashid, M.A., Mansur, M.A., Paramasivam, P., “Correlations between mechanical properties of high-strength concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 14 (3), 203-38, 2002.

Rostami, M., Behfarnia, K., “The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 134, 262–268, 2017.

Rovnaník, P., “Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer”, *Constr. Build. Mater.*, 24, 1176–1183, 2010.

Saha, A.K., Sarker, P.K., Golovanevskiy, V., “Thermal properties and residual strength after high temperature exposure of cement mortar using ferronickel slag aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, 199, 601–612, 2019.

Şahin, A., Atık lastik ve bentonit eklenmiş silis dumanının geçirimsiz örtü malzemesi olarak kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 2013.

Salahuddin, H., Nawaz, A., Maqsoom, A., Mehmood, T., Zeeshan, B. A., “Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 202, 415–425, 2019.

Saludung, A., Azeyanagi, T., Ogawa, Y., Kawai, K., “Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag”, *J. Clean. Prod.*, 315, 128210, 2021.

Sarıdemir, M., “Modelling the flexural strength of mortars containing different mineral admixtures via GEP and RA”, *Comput. Concr.*, 19 (6), 717-724, 2017.

Sarıdemir, M., Bulut, M., “Effects of ground basaltic pumice and high temperatures on the properties of HSMs”, *J. Build. Eng.*, 41, 102772, 2021.

Sarıdemir, M., Bulut, M., Akça, U., “Effects of different curing conditions on the long-term properties of alkali activated GBP + GBFS mortars exposed to high temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, 321, 125732, 2022.

Sarıdemir, M., Çelikten, S., “Effects of Ms modulus, Na concentration and fly ash content on properties of vapour cured geopolymer mortars exposed to high temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, 363, 129868, 2023.

Sarıdemir, M., Yıldırım, A., “Effect of elevated temperatures on properties of high strength mortars containing ground calcined diatomite with limestone sand”, *J. Build. Eng.*, 56, 104748, 2022.

Sayed, M., Zeedan, S.R., “Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume”, *HBRC Journal*, 8, 177–184, 2012.

Schade, T., Bellmann, F., Middendorf, B., “Quantitative analysis of C-(K)-A-S-H-amount and hydrotalcite phase content in finely ground highly alkali-activated slag/silica fume blended cementitious material”, *Cem. Concr. Res.*, 153, 106706, 2022.

Sedaghatdoost, A., Behfarnia, K., Bayati, M., Sadegh Vaezi, M., “Influence of recycled concrete aggregates on alkali-activated slag mortar exposed to elevated temperatures”, *J. Build. Eng.*, 26, 100871, 2019.

Shi, C., Krivenko, P.V. and Roy, D.M., Alkali-Activated Cements and Concretes, *Taylor and Francis*, Abingdon, 2006.

Sikandar, M.A., Mubeen, G., Baloch, Z., El-barbary, A.A., Hamad, M., “Comparative study on the performance of photochromic cement, epoxy, and polyester mortars”, *J. Build. Eng.*, 70, 106394, 2023.

Sivasundaram, V., Carette, G. G. ve Malhotra, V. M., “Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of low-calcium fly ash, Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash”, *Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, s. 45-73, 18-23 June, 1989.

Snelson, D. G., Wild, S., O'Farrell, M., “Heat of hydration of Portland cement–metakaolin–fly ash (PC–MK–PFA) blends”, *Cem. Concr. Res.*, 38, 832–840, 2008.

Soysat, F., Çelik fiber ve polipropilen fiberle güçlendirilmiş yüksek performanslı beton özellikleri üzerine silis dumanı ve metakaolinin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2019.

Sukontasukkul, P., Chindaprasirt, P., Pongsopha, P., Phoo-Ngernkham, T., Tangchirapat, W., Banthia, N., “Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiberreinforced geopolymer”, *J. Sustain Cem.-Based Mater.*, 9 (4), 218-232, 2020.

Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M.Z., Mo, K.H., Alnahhal, M.F., “Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar-A review”, *Constr. Build. Mater.*, 148, 62–84, 2017.

Tawfik, T.A., AlSaffar, D.M., Tayeh, B.A., Metwally, K.A., ElKattan, I.M., “Role of expanded clay aggregate, metakaolin and silica fume on the of modified lightweight concrete properties”, *Geosystem Eng.*, 24(3), 145-56, 2021.

Temuujin, J. Van Riessen, A. Williams, R., “Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes”, *J. Hazard. Mater.*, 167(1-3), 82-88, 2009.

Tharmaratnam, K., Tan, B.S., “Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar”, *Cement Concr. Res.*, 20, 335–345, 1990.

Thomas M, Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portland Cement Association*, 2007.

Topark-Ngarm, P., Chindapasirt, P., Sata, V., “Setting time, strength, and bond of high-calcium fly ash geopolymer concrete”, *J. Mater. Civil Eng.*, 27 (7), 04014198, 2015.

Topçu, İ. B. ve Aydın, Ş., “Akışkanlaştırıcı katkıların beton özelliklerine etkisi”, *Hazır Beton Dergisi*, 49-53, 1998.

Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., “Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi atığı silis dumanının hazır betonda kullanımı”, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, 2005.

TS 639, Uçucu küller-çimentoda kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1975.

TS EN 12350 – 6, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2019.

TS EN 12390-7, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlesinin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2021.

TS EN 1015-11, Kagir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2020.

TS EN 196 -1, Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2016.

TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

Türker P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğınobalı A., Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, **TÇMB Yayınları**, Ankara, 2009.

Türker, H.T., Balçıkanlı, M., Durmuş, İ. H., Özbay, E., Erdemir, M., “Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level”, **Constr. Build. Mater.**, 104, 169-180, 2016.

Tushar, Q., Bhuiyan, M.A., Zhang, G., Maqsood, T., Tasmin, T., “Application of a harmonized fibere cycle assessment method for supplementary cementitious materials in structural concrete”, **Constr. Build. Mater.**, 316, 125850, 2022.

Uysal, M., Sodyum silikat-borik asit karışımı ile enjeksiyon yapılan organik zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Bursa, 2022.

Uzbaş B, Çimento esaslı silis dumanlı uçucu küllü kompozitlerin SEM ve XRD destekli görsel analizlerin yapay sinir ağları ile modellenmesi, Doktora Tezi, **Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 2019.

Velraj Kumar, Dr.G., Muralikrishnan, R., Mohan, A., Thirumal, R.B., John, P.N., “Performance of GGBFS and silica fume on self compacting geopolymer concrete using partial replacements of R-Sand”, **Mater. Today Proc.**, 59(1), 909-917, 2022.

Wagh, A.S., Chemically Bonded Phosphate Ceramics, **Elsevier**, Oxford, 2004.

Wang, S. D., Scrivener, K. L. and Pratt, P. L., “Factors affecting the strength of alkali-activated slag”, **Cem. Concr. Res.**, 24(6), 1033-1043, 1994.

Wattimena, O., Antoni K., Hardjito, D., “A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer”, **AIP Conference Proceedings**, 1887, 020041, 1–12, 2017.

Wetzel, A., Middendorf, B., “Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag”, *Cem. Concr. Compos.*, 100, 53–59, 2019.

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures”, *J. Am. Concr. Inst.*, 47, 433–444, 1951.

Xie, T.Y., Visintin, P., Zhao, X.Y., Gravina, R., “Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach”, *Constr. Build. Mater.*, 256, 119380, 2020.

Xu, B.W., Shi, H.S., “Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 23(12), 3468-3474, 2009.

Ya-min, G., Yong-hao, F., Duo, Y., Yong-fan, G., Chen-hui, Z., “Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below-and about-normal temperature”, *Constr. Build. Mater.*, 79, 1–8, 2015.

Yang, G., Wu, T., Fu, C., Ye, H., “Effects of activator dosage and silica fume on the properties of Na₂SO₄-activated high-volume fly ash”, *Constr. Build. Mater.*, 278, 122346, 2021.

Yang, K., Yang, C., Zhang, J., Pan, Q., Yu, L. and Bai, Y., “First structural use of site-cast, alkali-activated slag concrete in China,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 171(10), 800–809, 2018.

Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., ve Xi, Y. Q., “A comprehensive review on the applications of coal fly ash”. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121, 2015.

Yavuz, E., Kul Gul, N.I., Kockal, N.U., “Characterization of class C and F fly ashes based geopolymers incorporating silica fume”, *Ceram. Int.*, 48, 32213–32225, 2022.

Yazdi, M.A., Liebscher, M., Hempel, S., Yang, J., Mechtcherine, V., “Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature”, *Constr. Build. Mater.*, 191, 330-341, 2018.

Yazıcı, Ş., İnan, G., Tabak, V., “Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC”, *Constr. Build. Mater.*, 21(6), 1250-1253, 2007.

Yazıcı, Ş., The mechanical properties and durability of high strength concrete with silica fume and fly ash, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1996.

Yeğınobalı A, Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri*, Ankara, s.149-167, 1993.

Yeğınobalı, A., “Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, s. 62, 2011.

Yermak, N., Pliya, P., Beaucour, A.L., Simon, A. Noumowé, A., “Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties”, *Constr. Build. Mater.*, 132, 240–50, 2017.

Yip, C.K., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J., “The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation”, *Cem. Concr. Res.*, 35(9), 1688–1697, 2005.

Ylmén, R., Jäglid, U., Steenari B. M., Panas, I., “Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques”, *Cem. Concr. Res.*, 39, 433–439, 2009.

Yusuf, I.T., Alaro, Y., Wahab, J., Salami, A., “An appropriate relationship between flexural strength and compressive strength of palm kernel shell concrete”, *Alexandria Eng. J.*, 55 (2), 1553-1562, 2016.

Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wanga, Q., Sarker, P.K., Shi, X., “Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength”, *Constr. Build. Mater.*, 262, 120924, 2020.

Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y., “Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review”. *J. Clean. Prod.*, 258, 120896, 2020.

Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., Zhang, J., “A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar”, *Compos. Part B.*, 152, 79–95, 2018.



ÖZ GEÇMİŞ

//**** tarihinde Diyarbakır’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Diyarbakır’da tamamladı. **** yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden ****’da mezun oldu. **** yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 2 (iki) adet uluslararası SCI makale üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Sarıdemir, M., Çelikten, S., Bulut, M., Deniz, S., “Comparative analysis of long-term and high temperature performances of OPC based high strength mortar and silica fume based high strength geopolymer mortars”, ***Structures***, 68, 107080, 2024.

Sarıdemir, M., Bulut, M., Deniz, S., Deneme İ. Ö., “Long-term properties of steel fiber reinforced silica fume based AAMs at ambient and high temperatures”, ***Construction and Building Materials***, 416, 135046, 2024.

