

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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

BENZER İNCELİĞE SAHİP UÇUCU KÜL, YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU VE TABAN KÜLÜ İÇEREN ÇİMENTO BAĞLAYICILI
KOMPOZİT SİSTEMLERİN
DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

Çağrı Göktuğ ŞENGÜL

Ekim 2020

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Çağrı Göktuğ ŞENGÜL tarafından hazırlanan **BENZER İNCELİĞE SAHİP UÇUCU KÜL, YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE TABAN KÜLÜ İÇEREN ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİT SİSTEMLERİN DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ** adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. İlhami DEMİR	_____
Üye (Danışman)	: Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM	_____
Üye	: Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE	_____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BENZER İNCELİĞE SAHİP UÇUCU KÜL, YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE TABAN KÜLÜ İÇEREN ÇİMENTO BAĞLAYICILI KOMPOZİT SİSTEMLERİN DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİ

ŞENGÜL, Çağrı Göktuğ

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM

2020, 110 Sayfa

Gelişen sanayi ile birlikte endüstriyel alandaki üretimin yoğunlaşması sonucu birçok atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı yığınlar halinde biriktirilerek çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla atık maddelerin çeşitli sektörlerde kullanılması gerekmektedir. Enerji sarfiyatı yüksek olan çimento sektörü, aynı zamanda dünya sera gazı salınımında önemli bir paya sahiptir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, taban külü ve doğal puzolan gibi çimento yerine kullanılabilecek puzolanlar yardımıyla gerçekleştirilen katkılı çimento üretimi, enerji sarfiyatını, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ve ekolojik olumsuzlukları indirmek için uygulanabilecek yöntemlerden biridir. Bahsedilen endüstriyel atıkların çimento üretiminde kullanılması CO₂ emisyonunu, enerji sarfiyatını ve buna bağlı olarak da çimento üretiminden kaynaklanan ekolojik olumsuzlukların etkisini azaltacaktır. Çimento üretimini daha ekonomik hale getirerek çevresel koşullara asgari düzeyde etki edecek çimento üretim sürecini gerçekleştirebilmek amacıyla bu çalışmada belirli bir blaine incelik değerinde ($\cong 3300 \text{ cm}^2/\text{gr}$) öğütülen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külünün çimento harçlarına ikame edilerek çimento harçlarının basınç dayanımı, boyca uzama miktarları, klorür iyonu geçirimsizliği ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla mikro yapısı incelenmiştir.

Sonuç olarak belirli bir blaine incelik değerinde öğütülen çimento bağlayıcı kompozitlerin çimento harcında dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi

karşılaştırılmış ve yüksek fırın cürufunun bu özellikleri maksimum oranda iyileştirdiği görülmüştür. Uçucu külün dayanım ve dayanıklılık değerleri yüksek fırın cürufu ikameli numunelere göre daha düşük olmakla birlikte dayanıklılık özellikleri bakımından yüksek fırın cürufuna yakın değerler vermektedir. Taban külünün dayanım değerleri çalışmada kullanılan diğer çimento bağlayıcı kompozitlere nazaran az olsa da çimento harcının dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çimento Harcı, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Taban Külü, Özgül Yüzey Alanı, Basınç ve Eğilme Dayanımı, Klor Geçirimsizliği



ABSTRACT

MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CEMENTITIOUS COMPOSITE SYSTEMS HAVING SIMILAR FINENESS OF FLY ASH, GRANULATED BLAST FURNACE SLAG AND BOTTOM ASH

ŞENGÜL, Çağrı Göktaş

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özer SEVİM

2020, 109 Pages

In addition to the developing industry, many waste materials are released as a result of production in the industry. A large part of these waste materials are stored and unfortunately this causes environmental pollution. In order to prevent this situation, these materials should be used in various sectors. The cement industry, where energy consumption is very high, also plays an important role in the global greenhouse gas emissions. The production of blended cement with the help of pozzolans that can be used instead of cement such as fly ash, blast furnace slag, bottom ash and natural pozzolan is one of the methods that can be applied to reduce energy consumption, industrial waste and ecological negativity. By using the industrial wastes in cement productions mentioned above, it is aimed to reduce the impact of CO₂ emission, energy consumption and ecological negativities arising from cement production. In this study, we aimed to ensure the cement production process that will affect the environmental conditions at a minimum level by making the cement production more economical. To this end, the fly ash, blast furnace slag, and bottom ash grounded within a certain amount of blaine fineness ($\cong 3300 \text{ cm}^2/\text{g}$) are substituted into the cement mortars. The microstructure of cement mortars was evaluated by scanning electron microscopy (SEM) and the compressive strength, the length change, rapid chloride ion permeability of cement mortars was studied.

According to the results obtained from the experiments, the effect of pozzolans grounded in a certain amount of blaine fineness on the strength and durability

properties in cement mortar was compared and it was observed that blast furnace slag improved these properties at a maximum rate. The strength and durability values of fly ash are lower than the blast furnace slag replacement samples, but it gives values close to the blast furnace slag in terms of durability properties. Although the strength values of the bottom ash are less than the other cement binding composites used in the study, it has been observed that it has a positive effect on the durability properties of the cement mortar.

Keywords: Cement Mortar, Blast Furnace Slag, Fly Ash, Bottom Ash, Specific Surface Area, Compressive and Flexural Strength, Rapid Chloride Permeability Test



TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM'e, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm Sayın hocam Prof. Dr. İlhami DEMİR'e, tezimin geliştirilmesinde büyük öneme sahip olan hocam Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE'ye ve büyük fedakarlıklarla bana destek olan arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet FİLAZİ ve Dr. Öğr. Üyesi Selahattin GÜZELKÜÇÜK'e teşekkür ederim. Son olarak yüksek lisans çalışmalarım sırasında beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim babam Hulusü ŞENGÜL, annem Mücella ŞENGÜL, kardeşim Çağla İlayda ŞENGÜL ve nişanlım Dr. Merve ERYOL'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	7
2. PUZOLANİK MALZEMELER	7
2.1. Puzolanların Tanımı ve Genel Özellikleri	8
2.2. Puzolanik Reaksiyon ve Puzolanik Aktivite.....	10
2.3. Puzolanların Sınıflandırılması	12
2.3.1. Doğal Puzolanlar.....	13
2.3.2. Yapay Puzolanlar	16
2.3.2.1. Yüksek Fırın Cürufu	18
2.3.2.2. Uçucu Kül	24
2.3.2.3. Taban Külü	36
3. DENEYSEL PROGRAM	40
3.1. Çalışma Sırasında Kullanılan Malzemeler	40
3.1.1. Çimento	40
3.1.2. Su	41
3.1.3. CEN Standart Kumu	41
3.1.4. Yüksek Fırın Cürufu	42
3.1.5. Uçucu Kül	43
3.1.6. Taban Külü.....	44
3.2. Metot.....	45
3.2.1. Numunelerin Adlandırılması.....	45

3.2.2. Mekanik Deneyler.....	46
3.2.3. Boy Uzama ve Sülfata Dayanıklılık Deneyleri	50
3.2.4. Harç Numunelerinin Klor Geçirgenliği	50
3.2.5. Elektron Tarayıcı Mikroskop (SEM) ile Mikroyapı İncelemesi	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	54
4.1. Eğilme ve Basınç Dayanımları	54
4.1.1. Eğilme Dayanımları	54
4.1.2. Basınç Dayanımları	58
4.2. Harç Çubuklarının Sülfata Karşı Boyca Uzaması	64
4.3. Klor Geçirgenliği	74
4.4. Mikroyapı İncelemesi	79
4.4.1. Katkısız Numunelerin Mikroyapısı	80
4.4.2. Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin Mikroyapısı	82
4.4.3. Uçucu Kül İkameli Numunelerin Mikroyapısı	86
4.4.4. Taban Külü İkameli Numunelerin Mikroyapısı	90
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Puzolanların Sınıflandırılması.....	13
2.2. Yüksek Fırın Şeması	20
2.3. Granülasyon Yöntemi Şematik Gösterimi	21
2.4. Peletleme Yöntemi Şematik Gösterimi	22
3.1. Kullanılan Çimentonun (a) SEM Görüntüsü (b) EDS Analizi	41
3.2. Yüksek Fırın Cürufunun (a) SEM Görüntüsü (b)EDS Analizi.....	43
3.3. Uçucu Külünün (a) SEM Görüntüsü (b)EDS Analizi.....	44
3.4. Taban Külünün (a) SEM görüntüsü (b)EDS Analizi	45
3.5. Dökümü Tamamlanan Harç Numuneleri	48
3.6. Kür Havuzu	48
3.7. Çimento Presi ve Kırılan Numune Örneği	49
3.8. ASTM C1012' ye Göre Üretilen ve Kürde Bekletilen Numuneler.....	50
3.9. Hızlı Klorür İyonu Geçirimsiliği Deneyi İçin Üretilen Numuneler	51
3.10. Hızlı Klorür İyonu Geçirimsiliği Deney Hücresine Alınan Numuneler.....	52
3.11. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	53
4.1. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 7 Günlük Eğilme Dayanımı .	54
4.2. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 28 Günlük Eğilme Dayanımı	56
4.3. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 90 Günlük Eğilme Dayanımı	57
4.4. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 7 Günlük Basınç Dayanımı..	59
4.5. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 28 Günlük Basınç Dayanımı	60
4.6. YFC, UK, TK İkameli Çimento Harçlarının 90 Günlük Basınç Dayanımı	62
4.7. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe 7 Günlük Boyca Uzama Değerleri.....	69
4.8. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe 28 Günlük Boyca Uzama Değerleri.....	71
4.9. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe 90 Günlük Boyca Uzama Değerleri	73
4.10. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin 7 Günlük Klor Geçirimsiliği (%) Değişimi	76

4.11. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin 28 Günlük Klor Geçirirnililiği (%)	
Değişimi	77
4.12. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin 90 Günlük Klor Geçirirnililiği (%)	
Değişimi	78
4.13. Katkısız Numuneler İçin 7 Günlük SEM Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x	
.....	81
4.14. Katkısız Numuneler İçin 28 Günlük SEM Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x	
.....	81
4.15. Katkısız Numuneler İçin 90 Günlük SEM Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x	
.....	82
4.16. %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 7 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	83
4.17. %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 28 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	83
4.18. %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 90 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	84
4.19. %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 7 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	85
4.20. %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 28 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	85
4.21. %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numuneler İçin 90 Günlük SEM	
Görüntüleri (a) 2000x (b) 5000x.....	86
4.22. %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 7 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	87
4.23. %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 28 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	87
4.24. %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 90 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	88
4.25. %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 7 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	89
4.26. %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 28 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	89
4.27. %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 90 Günlük SEM Görüntüleri	

(a) 2000x (b) 5000x	90
4.28. %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 7 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	91
4.29. %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 28 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	91
4.30. %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 90 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	92
4.31. %20 Taban Külü İkameli Numunelerin 7 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	93
4.32. %20 Taban Külü İkameli Numunelerin 28 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	93
4.33. %20 Taban Külü İkameli Numunelerin 90 Günlük SEM Görüntüleri	
(a) 2000x (b) 5000x	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

	<u>Sayfa</u>
2.1. Puzolanik Katkıların Betona Olumlu ve Olumsuz Etkileri.....	10
2.2. Doğal Puzolanların Genel Kimyasal Kompozisyonu	14
2.3. Doğal Puzolanların Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilmesi İçin Gereken Kimyasal ve Fiziksel Değerler	15
2.4. Kömüre Dayalı Termik Santraller.....	17
2.5. Yüksek Fırın Cürufunun Ülkelere Göre Kimyasal Kompozisyonu.....	19
2.6. Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Kullanılmasının Avantajları ve Dezavantajları	24
2.7. ASTM C 618'e Göre Uçucu Kül Sınıfları	27
2.8. Ülkemizde Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonu.....	30
2.9. Ülkemizde Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonu	31
2.10. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkisi.....	36
2.11. Taban Külünün Ortalama Kimyasal Kompozisyonu	39
3.1. Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	40
3.2. CEN Referans Kumunun Tane Büyüklüğü Dağılımı.....	41
3.3. Kullanılan Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	42
3.4. Kullanılan Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	43
3.5. Kullanılan Taban Külünün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	44
3.6. Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Taban Külü İkameli Örneklerin Adlandırılması.....	45
3.7. Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Taban Külü İkameli Harçlarda Kullanılan Malzeme Miktarları.....	46
3.8. Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizliği Coulomb Değeri Sınıfları	52
4.1. YFC İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe Boyca Uzama Değerleri.....	64
4.2. UK İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe Boyca Uzama Değerleri.....	66
4.3. TK İkameli Numunelerin NS ve SS Küründe Boyca Uzama Değerleri	67
4.4. TK, UK, YFC İkameli Numunelerin Klor Geçirimsizliği Sonuçları (C).....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
C	Coulomb
Ca	Kalsiyum
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
Ca(SO ₄)	Kalsiyum Sülfat
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
C ₂ S	Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	Trikalsiyum Alüminat
C ₃ S	Trikalsiyum Silikat
CaO	Kalsiyum Oksit
CH	Sönmüş Kireç
CO ₂	Karbondioksit
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit
MPa	Megapaksal
MgO	Magnezyum Oksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
Na ₂ O+K ₂ O	Alkali Oksitler
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
NS	Normal Su
SS	Sülfatlı Su
PÇ	Portland Çimentosu
S	Kükürt
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Oksit

SO ₃	Kükürt
TiO ₂	Titanyumdioksit
TK	Taban Külü
UK	Uçucu Kül
V	Volt
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
KN	Kontrol Numune



1. GİRİŞ

Ülkemizde artan nüfus, hızla gelişen sanayi ve teknolojiye bağlı olarak yoğun enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Enerji ihtiyacındaki bu artış endüstriyel alandaki üretimde birçok atık malzeme açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı geri dönüşüme uğramayarak depo edilmekte dolayısıyla çevre kirliliğine yol açmaktadır. Endüstriyel atıkların geri düşümünün sağlanması ile çeşitli sektörlerde kullanılması, sanayileşen ülkemizde hem çevre kirliliğinin önlenmesine hem de ekonomiye katkı sağlayacaktır.

Atık malzeme ve yan ürünlerinin kullanılarak değerlendirilmesi, çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını engelleyerek doğanın tahrip edilmesini önlemekte, ayrıca malzemelerin atılmak üzere biriktirilmesi durumunda, çevresel gelecek problemlerini en aza indirmektedir. İnşaat mühendisliği, endüstriyel atıkların ve yan ürünlerinin değerlendirilmesi açısından, yüksek hacimlerde malzeme kullanımına olanak vermektedir. Bir de inşaat mühendisliği uygulamalarında stabilitenin sağlanması için malzemelerin kompakt hale getirilmesi gerektiğinden, çevre kirliliği problemi minimuma inmektedir [1].

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de son yıllardaki bilimsel çalışmalar sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunması ekseninde yoğunlaşmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın ana mantığı doğal kaynakları yok etmeden, var olan kaynakların düzgün bir biçimde kullanılmasını sağlayarak gelecek nesillerin gereksinimlerinin giderilmesine ve kalkınmasına olanak verecek şekilde planlamasıdır [2].

Türkiye çimento üretiminde dünyada 5. sırada Avrupa'da ise 1. Sırada bulunmaktadır. Bu denli yüksek üretim kapasitesine sahip bir sektörde geri dönüşüm ve yenilenebilir sistemlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Çimento üretiminin çevre kirliliği hususunda büyük etkisi bulunmaktadır. Çimento üretimi sırasında yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır ve buna bağlı olarak da enerji üretiminde artış söz konusudur. Bu nedenle üretim sırasında doğaya salınan CO₂ gazı miktarı artmaktadır. Bu da kızıllötesi ışıktan dolayı gerçekleşecek olan sera etkisine neden olmaktadır.

Çimento endüstrisinin çevre üzerindeki en olumsuz etkisi olan CO₂ emisyonu klinker üretiminde kullanılan hammaddelerin ve fosil yakıtların kalsinasyonundan kaynaklanır. Çimento endüstrisi, dünyadaki toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumludur [3,4]. Bu emisyonu azaltabilmenin başlıca yöntemlerinden birisi de çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılabilirlik özelliklerini koruyarak, çimentoya katkı maddeleri ikame etmektir. İkame edilen katkı maddeleri klinker/çimento oranını azaltarak CO₂ emisyonunu azaltacak ve daha çevreci çimento üretim süreci sağlanacaktır.

Bu kapsamda çimento katkısı olabilecek malzemelerin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Katkı olarak puzolanlar fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından çimento harçlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan fakat ince taneli olarak, su ve kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanır [5,6]. Puzolanların kimyasal yapısı incelendiğinde; silis, alümin, demir oksit, kalsiyum oksit, alkali ve karbon gibi maddeler bulunmaktadır ve bu maddeler malzeme kaynağına göre değişkenlik göstermektedir. Puzolanlar, doğal puzolanlar (doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış çamur, şeyller, diatomlu toprak) ve yapay puzolanlar (endüstri yan ürünleri, uçucu küller, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, taban külü) olarak iki ana başlıkta toplanabilir.

Puzolan ismi, İtalya'daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan "Pozzuoli" isimli kasabanın isminden alınmıştır. Milattan önce 100'lü yıllarda, Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle, su altında sertleşme gösterebilen bu malzeme "puzolan" ismiyle anılmaya başlanmıştır. Volkanik küllerin ve ince taneli volkanik tüflerin kireçle ve suyla birleştirilmesi ile oluşturulan hidrolik bağlayıcılar Romalılar ve eski Yunanlılar tarafından yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu malzemeleri taş parçaları ile karıştırılarak beton benzeri yapı malzemeleri üretmişlerdir [7,8].

1.1. Literatür Taraması

Yapılan literatür incelemesi sonrasında benzer özgül yüzey alanına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli çimento bağlayıcılı kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmediği görülmüştür. Özgül yüzey alanının azaltılıp artırılması ile alakalı olarak bazı literatür çalışmaları aşağıda sunulmuştur.

Şengül ve arkadaşları (2007) çalışmalarında çimentoya %40, %60 ve %80 oranlarında ince öğütülmüş 5000 cm²/gr blaine inceliğine sahip yüksek fırın cürufu ile 6040 cm²/gr blaine inceliğine sahip uçucu kül ikame edilerek beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerin ilk bölümü ince öğütülmüş F tipi uçucu kül ile ikinci bölümü ise ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesi ile üretilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek fırın cürufu ikame edilen betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin azaldığı görülmüştür. Yüksek fırın cüruf içeren betonların elektriksel özdirençleri de sadece portland çimentosu ile üretilen numunelere göre büyük oranda artış gösterdiği belirlenmiştir. Çimentoya %40 oranında uçucu kül ikame edilmesi durumunda numunelerin basınç dayanımlarının yaklaşık değerlerde olduğu görülmüştür. Betonda ince öğütülmüş uçucu kül kullanımının da klor geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür [9].

Li ve Zhao (2003) çalışmalarında yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün çimentoya göre farklı oranlarda öğütülerek çimentoya katkı olarak eklenmesi ile yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. Yapılan çalışma kapsamında üretilen numunelerin mikroyapısı ve H₂SO₄ direnci incelenmiştir. Sonuç olarak uçucu külün katkı olarak kullanıldığı beton numunelerde incelenen özelliklerin daha uzun süreçte pozitif etkiler doğurduğu, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün birlikte kullanıldığı beton numunelerde ise hem kısa vadede hem de uzun vadede pozitif gelişmeler olduğu belirtilmiştir [10].

Zhang ve arkadaşları (2004) çalışmalarında blaine inceliği 3460 cm²/gr olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu çimentoya %50 oranında ikame etmiş ve blaine inceliği 8380 cm²/gr olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu çimentoya %50 oranında ikame ederek iki farklı karışım elde etmiştir. Elde edilen karışımlardan 80×20×20 mm boyutlarında numuneler üretmiş ve üretilen numunelerin

karbonatlaşma etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen karbonatlaşma verilerine göre çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun, normal incelikte olan granüle yüksek fırın cürufuna göre karbonatlaşmaya daha dayanıklı olduğu ve cürufun ince öğütülmesinin sertleşmiş çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getirmesini sağladığı belirtilmiştir [11].

Gökçe ve arkadaşları (1996) çalışmalarında uçucu kül tanelerinin büyümesine özgül yüzey alanının küçülmesine bağlı olarak taze betonda su ihtiyacında artma meydana geldiği görülmüştür. Su ihtiyacındaki artışı ikame oranı %8'e varana kadar devam etmiştir. İkame oranı %10 olduğunda ise incelik faktörünün su ihtiyacına etkisi gözlemlenmemiştir. İkame oranı artmasına bağlı olarak da uçucu külün inceliğinin su ihtiyacına olan etkisi daha net görülmüştür [12].

İnan (2007) yaptığı çalışmada klinkere %0 (kontrol), %6 ve %21 oranlarında kalker ikame etmiştir. Klinker ikame edilen kalkerle birlikte öğütülmüştür. Klinkerin blaine incelik değerinin 3300 cm²/gr değerine gelmesi için gerekli öğütme süresi belirlenmiştir. Bu kapsamda sabit öğütme süresinde kalker katkılı çimentoların blaine incelik değerinde artışa neden olmuştur. Bu çimentolardan hazırlanan harçların basınç dayanımları kalker oranındaki artışa bağlı olarak azalış göstermiştir. Sonuç olarak yalnızca blaine incelik değerine bakılarak kalker katkılı çimentoların basınç dayanımları konusunda değerlendirme yapmanın hataya neden olabileceği görülmüştür [13].

Dinçer ve İsmail H. Çağatay (2004) yaptığı çalışmada Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen uçucu külün %0 (kontrol), %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında çimentoya ikame edilerek beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada yapılan deneyler sonucunda betonun mekanik özelliklerinin %20 uçucu kül ikamesine kadar pozitif yönde olduğu ancak ikame oranı %20' den sonra uçucu kül ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımında azalış görülmüştür. Uçucu kül ikame miktarı %20'ye kadar olan numunelerde basınç dayanımları 90 güne kadar kontrol numunenin beton dayanımına yaklaştığı, 180 günden sonra basınç dayanımının şahit numunenin üzerine çıktığı görülmüştür. Uçucu kül ikamesi ile incelik oranı yüksek malzeme miktarı arttığı için kül katkısı ile birlikte

betonun kompasitesinde (doluluk oranında) artış görülmüştür, basınç dayanımında da azalma olmasına rağmen elastisite modülünde bu azalma gözlemlenmemiştir [14].

Birinci ve Çağatay (2004), yaptıkları çalışma kapsamında klinker, bazaltik pomza ve granüle yüksek fırın cürufunu iki farklı incelikte öğütterek klinkere ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında katkı olarak kullanmış ve harç numuneleri üretmişlerdir. Çalışma kapsamında katkı miktarının sülfat direncine etkisi ve incelik ile sülfat direncinin ilişkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda incelik ve öğütme yöntemleri sabit tutulduğunda katkı oranındaki artışa bağlı olarak sülfat direncinin arttığı ve %30 katkılı üçlü karışımın sülfat direncinin en yüksek olduğu belirtilmiştir [15].

Massaza (1980) tarafından yapılan çalışmada portland çimentosu ile İtalyan doğal puzolanların kullanılarak çimento harcında basınç dayanım değerleri araştırılmıştır. Doğal puzolan ikamesi yapılan çimento harçlarının ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı ancak %30 gibi yüksek oranda ikame edilen doğal puzolan ikameli harçların bile bir yılda ikamesiz numunelerin dayanım değerlerine ulaştığı ve geçtiği görülmüştür. Sonuç olarak 3000-4000 cm²/gr blaine incelik değerine sahip doğal puzolan ikamesinde çimento harcında meydana gelen dayanım kaybının belirli bir süre zarfında yok olabileceği ve bu sürenin puzolan tipi ile ikame oranına bağlı olduğu belirtilmiştir [16].

Özkan (2006) çalışmasında granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane yüksek fırın cürufu ile klinker, alçı karışımı ayrı ayrı ve birlikte yer değiştirmek suretiyle 22 farklı çimento üretilmiştir. Üretilen 22 farklı çimento üzerinde incelik, özgül ağırlık, hacim sabitliği, priz süreleri, basınç ve eğilme dayanımı, sülfata ve yüksek sıcaklığa dayanıklılığını belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. İkame edilen malzemelerin beton üzerindeki etkilerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda %50 granüle yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu katkılı harç ile betonların pozitif sonuçlar verdiği görülmüştür. Katkılı betonlar özellikle sülfata ve yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür [17].

Kurama ve arkadaşlarının (2008) çalışmasında taban külünün betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çimentoya %25 oranında taban külü ikame edilerek

betonun mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Taban külüne öğütme, ayrıştırma ve elektrostatik ayrıştırma işlemleri uygulanmıştır. Yapılan çalışma doğrultusunda çimentoya %10'a kadar taban külü ikamesi kullanılması betonun mekanik özelliklerinde artışa neden olmuş ve beton teknolojisinde taban külünün yapı malzemesi olarak kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir [18].

Jaturapitakkul ve arkadaşlarının (2003) yaptıkları çalışmada taban külünün puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği hususu değerlendirilmiştir. Çalışmada taban külü $6355 \text{ cm}^2/\text{gr}$ blaine incelik değerine kadar öğütülmüş ve $3270 \text{ cm}^2/\text{gr}$ blaine incelik değerine sahip çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. Taban külünün yapısı incelenmiş ve büyük tanecikli poroz ve düzensiz yapısı öğütme işlemi sonucunda partikül boyutu azaltılarak düşük poroziteli bir yapı kazandırılmıştır. Çalışma sonucunda öğütülmüş taban külünün puzolanik materyal olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür [19].

Kula ve arkadaşlarının (2001) yaptığı çalışmada taban külü, kolemanit atığı ve uçucu külün çimentoya ikame edilerek priz başlangıç süreleri, hacim genleşmeleri ve basınç dayanım değerleri gibi özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sırasıyla çimentoya ikame edilen blaine incelik değerleri $3602 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $6418 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $7200 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olan kolemanit atığı, uçucu kül ve taban külü referans numuneler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında ikame edilen materyallerin numunelerin mekanik özelliklerinde belirgin etkiler doğurduğu gözlemlenmiştir. İkame oranı %25 olan taban külü ve uçucu külün referans numunelere göre değerlendirildiğinde mekanik özelliklerinde artış meydana geldiği görülmüştür [20].

Slanicka (1991) yaptığı çalışmada benzer kimyasal ve minerolojik özelliklere sahip uçucu küllerin, farklı blaine incelik değerlerinde betonda kullanılmasının dayanım özelliklere olan etkisini araştırmıştır. Blaine incelik değeri $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olan çimento kullanılarak, blaine incelik değeri $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $3900 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $4800 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $9300 \text{ cm}^2/\text{gr}$, $4900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ve $1800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olan uçucu küller katkıları ile beton üretimi yapılmıştır. Çalışmada blaine incelik değerinin betonun mekanik özelliklerinde belirgin farklılıklara neden olduğu görülmüştür [21].

1.2.Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada endüstriyel atıklar olan puzolanik özellikli uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külünün çimento harçlarındaki dayanıklılığa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada halkalı öğütücüde belirli bir blaine incelik değerinde ($\cong 3300 \text{ cm}^2/\text{gr}$) öğütülen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külü çimento harçlarına %5, %10, %15, %20 oranlarında ikame edilerek tüm çimento harçları 7, 28, 90 güne kadar $23\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sürekli suda kür edilmiş ve eğilme, basınç dayanım deneyleri, boyca hacimsel genleşme deneyleri yapılarak, değerleri incelenmiştir. Ayrıca aynı kür sürelerinde harçlarda klorür iyonu geçirimsizliği incelenmiştir. Su küründe bekletilen %5 ve %20 oranında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külü ikameli 7, 28 ve 90 günlük numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla mikroyapısı incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek benzer özgül yüzey alanına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban kül ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin çimento harçlarında mekanik ve dayanıklılık etkisi araştırılmıştır.

2. PUZOLANİK MALZEMELER

2.1. Puzolanların Tanımı ve Genel Özellikleri

Puzolanlar genel anlamda tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak çimento ve kireç gibi herhangi bir bağlayıcı madde ile birleştğinde bağlayıcılık özelliği kazanan malzemeler olarak adlandırılabilir. ASTM C618'e göre [5] puzolanların nemli ortamda ve öğütülerek ince bir yapıya getirildiğinde kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazandığı belirtilmiştir. Puzolanların tarihi çok eski dönemlere dayanmaktadır. Eski Yunan ve Roma'da puzolanların bağlayıcılık özelliği keşfedilmiş ve yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. M.Ö. 2000'li yıllarda Romalı Mimar Vitruvius, volkanik küllerin ve söndürülmüş kirecin suyla birleştirilmesi sonucu hidrolik bağlayıcılık özelliği kazandığını söylemiştir [8].

Puzolanlar içlerinde silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), magnezyum oksit (MgO), karbon (C), kalsiyum oksit (CaO) ve alkaliler gibi bileşikler bulundurmaktadır. Fiziksel olarak bağlayıcı madde olmadan suyla birleştiklerinde herhangi bir kimyasal reaksiyona girmez ve kuruyunca tekrar eski hallerine dönerler. Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık özelliğinin yeterli oranda olabilmesi için belirli kriterler gereklidir. Bu kriterlerin en başında içerdiği silika ve alümin miktarının yüksek olması gelmektedir. Ayrıca çimento endüstrisinde kullanılabilecek puzolanik özelliğe sahip malzemelerin silis kökenli olup, belirli incelikte olması ve kalsine (ısıtılma işlemi) sonucu oluşması gerekmektedir [22].

Betonda puzolanik katkıları, beton karışımındaki çimento miktarını azaltarak, azaltılan çimento kadar puzolanik katkı eklenmesi şeklinde yani ikame edilerek kullanılmaktadır. Puzolanların bu şekilde kullanılması ile betondaki bağlayıcı malzeme niteliği çimento ve puzolanik katkıdan oluşmaktadır. Betonu oluşturan birleşenler bir araya getirilip karıştırıldıktan bir süre sonra çimentonun su ile reaksiyona girmesi sonucu betonun plastiklik özelliği kaybolur ve sert bir yapıya dönüşür, bu dönüşümde çimento-su arasında oluşan reaksiyona hidrasyon denilmektedir. Çimento ve puzolanik katkıların bağlayıcı olarak kullanıldığı betonlarda su temasıyla birlikte çimento hidrasyonu başlamakta, kalsiyum hidroksit

(CH) ve kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri ortaya çıkmaktadır. Pozolanik katkı malzemesi de hidratasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksitle (CH) reaksiyona girerek kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadır. Çimentodaki bağlayıcılık özelliğini yaratan da bu kalsiyum-silika-hidrat jelleridir. Çimentonun özgül ağırlığı pozolanların özgül ağırlığından fazladır, bu durum betondaki bağlayıcı hacminin fazla olmasına neden olmakta ve betonun hareket kabiliyetini kolaylaştırarak işlenebilirliğini arttırmaktadır.

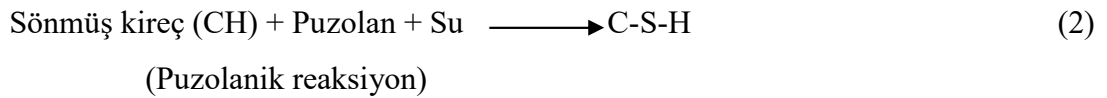
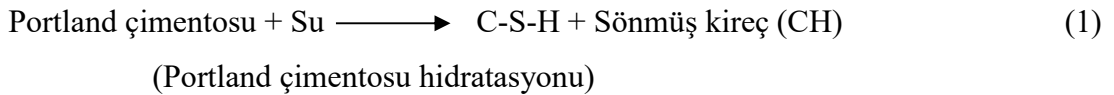
Beton karışımında çimento miktarının azalması ile hidratasyon sonucu oluşan ve yüksek miktarda ısı açığa çıkmasına neden olan trikalsiyum alüminat (C_3A) miktarı azalmaktadır. Trikalsiyum alüminat (C_3A) oranının azalması ile betonun deniz suyu, yağmur suyu ve yeraltı suyu gibi dış etkenler sonucu oluşan sülfat ile tepkimeye girmesini engelleyerek betonu dayanıklı hale getirmektedir. Betona bu dış etkiler ile nüfuz eden sülfat (SO_4) trikalsiyum alüminat (C_3A) ile tepkimeye girerek hacimsel artışa neden olur ve betonun durabilite özelliklerini olumsuz etkiler. Ayrıca Pozolanik katkıların çok ince taneli olması betondaki boşlukların azalmasına ve buna bağlı olarak betonun geçirgenliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum da durabilite açısından betonun dayanıklılığını arttırmaktadır. Pozolanik katkıların betonun yapısında kullanılmasının olumlu etkileri ve olumsuz etkileri çizelge 2.1.'de özet olarak belirtilmiştir [22].

Çizelge 2.1. Pozolanik Katkıların Betona Olumlu ve Olumsuz Etkileri

<i>Pozolanik Katkıların Betona Olumlu Etkileri</i>	<i>Pozolanik Katkıların Betona Olumsuz Etkileri</i>
-Hidratasyon ısını azaltmaktadır.	-Soğuk havalarda priz zamanını uzatır
-Hidratasyon hızını azaltmaktadır.	-Yavaş dayanım kazanır.
-Su geçirgenliğini azaltmaktadır.	-Uzun kür süresi isteyebilir.
-İşlenebilirlik düzeyini arttırmaktadır.	-Daha fazla hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmasını gerektirebilir.
-Alkali silika reaksiyonunu azaltır.	-Fazla su ihtiyacı olabilmektedir.
-Sülfata karşı dayanıklılık sağlar.	-Beton renginde farklılıklara neden olabilir.
-Ekonomik olarak avantajlıdır.	
-Segregasyonu azaltmaktadır.	
-Durabilite özelliklerini iyileştirir.	

2.2. Pozolanik Reaksiyon ve Pozolanik Aktiflik

Çimento karma oksitlerinden C_3S ve C_2S su ile birleşmesi sonucu bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli ve betona alkali oranını artıran sönmüş kireç (CH) oluşmaktadır. Pozolanların C-S-H (kalsiyum silikat hydrate) oluşturarak bağlayıcılık özelliği kazanabilmesi için çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan sönmüş kirece (CH) ihtiyaç vardır. Pozolanik reaksiyon, çimento hidratasyonu sonucu oluşan sönmüş kirecin su ve pozolanik malzemelerle reaksiyona girerek C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jelleri oluşturmasıdır. Çimento hidratasyonu ve pozolanik reaksiyonu şu denklemlerle gösterebiliriz;



Denklem 1 ve 2'ye göre çimento hidratasyonu, bağlayıcı hamurdaki sönmüş kireç (CH) miktarını arttıran, puzolanik reaksiyon ise artan sönmüş kireci (CH) tüketen reaksiyon olarak nitelendirilebilir. Hidratasyon sonucu oluşan sönmüş kireç (CH) betonda istenmeyen bir bileşiktir. Beton yapısı içerisinde bulunan bu bileşik suda çözünür ve beton yapısında boşluklar oluşmasına neden olur. Beton yapısında boşlukların oluşması betonun hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerini negatif yönde etkiler. Puzolanik reaksiyon sonucu betonun yapısında istenmeyen sönmüş kireç (CH) puzolanik katkılar ile reaksiyona girerek betonun bağlayıcılık özelliğini oluşturan C-S-H (kalsiyum silikat hidrate) jellerine dönüşmektedir [23].

Puzolanik aktivite terimi genel olarak puzolanın bünyesindeki aktif silisin bağlayabileceği maksimum kalsiyum hidroksit (CH) miktarını ve hızını belirtmektedir. Puzolanik aktivite çimento veya kirecin suyla birleşmesi sonucu oluşan alkali özellikli ortam içerisinde, puzolanların oluşturduğu kimyasal reaksiyonu içinde barındıran bir mekanizmadır.

Puzolanların betonda ve çimentoda katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için puzolanik aktiflik değerinin yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Puzolanik malzemenin yeterli aktifliği gösterebilmesi yeterince ince taneli, amorf yapıya sahip, yeterli miktarda silis alümin ve demir oksit içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktiflik değerinin belirlenmesinde kimyasal, fiziksel, mekanik ve analitik yöntemler bulunmaktadır [24].

Puzolanik aktivite düzeyi ASTM C311'e [25] göre tayin edilen aktivite indeksine göre değerlendirilir. Bu standarda göre 500 g Portland çimentonun 1375 g kum ve 242 ml su kullanılarak kontrol grubu harcı hazırlanır. Sonrasında 400 g çimento, 100 g puzolan (%20 ikame), 1375 g kum ve kontrol karışımındaki kıvamı sağlayacak şekilde su kullanılarak oluşturulan harçlardan 5×5×5 cm boyutunda küp numuneler üretilir. Bu numunelerin 23 ± 2 °C suda kür edilmiş 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımları bulunur ve dayanım aktivite indeksi şu şekilde hesaplanır:

- I. A: Puzolan ikameli karışıma ait örneklerin ortalama basınç dayanımı
- II. B: Kontrol karışımına ait örneklerin ortalama basınç dayanımı

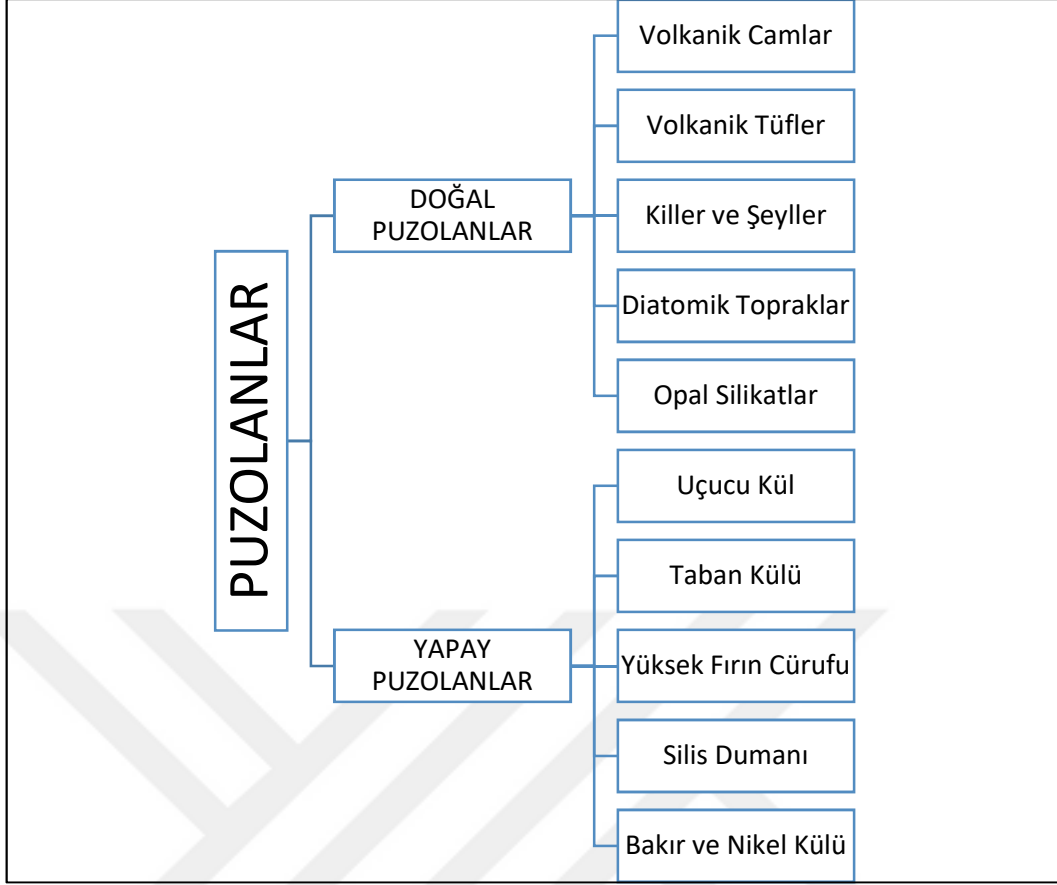
III. $\text{Dayanım aktivite indisi} = (A/B) \times 100$

2.3. Puzolanların Sınıflandırılması

Gelişen beton teknolojisi ile puzolanlar doğal ve yapay olarak betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini arttıran, betonda kullanılan çimento miktarından tasarruf edilerek ekonomik açıdan avantaj sağlayan katkı malzemeleridir. Yapı malzemelerinde kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır.

Puzolanik katkılar çimentoyla benzeşmekle birlikte tek başına bağlayıcılık özellikleri olmadıkları için çimentodan ayrılmakta ve ikincil bağlayıcı malzemeler olarak nitelendirilmektedir. Bu malzemeler çimento hidratasyon sürecinde puzolanik aktiviteleriyle bağlayıcı hamurun yapısını değiştirerek betonun istenilen özelliklerinde iyileşme sağlamaktadırlar.

Yapılan araştırmalar doğrultusunda puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi 2 gruba ayrılmaktadır [26].



Şekil 2.1. Pozolanların Sınıflandırılması

2.3.1. Doğal Pozolanlar

Doğal pozolanlar volkanik camlar, volkanik tüfler, silisler olup bir kimyasal işlemten geçmeden oluşan ve kırma, eleme, öğütme yoluyla elde edilen malzemelerdir. TS 25 (2008)'de [27] silisli veya alüminyum silikatlı veya bunların birleşimi sonucu oluşan sedimanter ve volkanik kayalar olarak tanımlanmaktadır. Doğal pozolanların yapısında silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) ana bileşen olarak bulunmaktadır. Doğal Pozolanların genel kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.2' de verilmiştir [7].

Çizelge 2.2. Doğal Puzolanların Genel Kimyasal Kompozisyonu (%)

<i>Doğal Puzolan</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>Alkali</i>
Volkanik Cam	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1	6,5
Volkanik Tüf	52,1	18,3	5,8	4,9	1,2	6,6
Diatomlu Toprak	86,0	2,3	1,8	-	0,6	0,4
Pişirilmiş Kıl	42,2	16,1	7,0	21,8	1,9	1,3

Doğal puzolanlar genellikle volkanik kökenli malzemelerdir. Volkanlardan püsküren alüminli ve silis içerikli eriyik magmanın yüzeye çıkması ve çabuk soğuması sonucu amorf bir yapıya sahip olmaktadır. Eriyik malzemenin yüzeye çıkması sırasında bulunan gazlardan dolayı oluşan malzeme gözenekli ve büyük yüzey alanına sahiptir. Yüzey alanındaki büyüklük kalsiyum iyonlarının alüminli silislerle daha çabuk tepkimeye girmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde volkanik aktivitenin hızı malzemenin amorf yapısının ve puzolanik aktivitenin oluşmasına neden olmaktadır [7].

Volkanik kütlelerin yoğun olduğu bölgelerde sık rastlanan doğal puzolanların kimyasal yapısı genel anlamda çizelge 2.3’ de belirtilmiş olsa da puzolanların yapısı bulunduğu bölge ve aktivitesine göre değişmekte olup özgül kütleleri 2,0 ile 2,35 g/cm² arasındadır [28].

Doğal puzolanların büyük bölümü proklastik kayalardan oluşmaktadır. Proklastik kayalar bir volkanik patlama sonucu, volkandan fırlatılan kırıntı şeklindeki malzemeleri ifade eder. Proklastik kayalar oluşumlarında, püskürme sürecinde magma katılaşır, parçacıklar kristalleşemez ve volkanik cam olarak katılaşma sürecinde camsı yapı kazanır.

Killer ve benzeri doğal puzolanların aktif hale gelebilmesi için genellikle kalsinasyon işleminden geçmeleri gerekir. Opal, volkanik tüfler, sünger taşları gibi malzemelerin kalsinasyon işlemi sonucu aktif hale gelmesi nadiren görülmekte olup bu malzemeler herhangi bir işlem olmadan kullanılabilir [29].

Doğal puzolanların beton yapımında kullanılabilmesi için ASTM C 618 [5] ve TS 25 [27] standartlarında belirtilen fiziksel ve kimyasal özellikleri sağlaması gerekmektedir. Doğal Puzolanların katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için gereken kimyasal ve fiziksel değerler Çizelge 2.3.'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Doğal puzolanların katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için gereken kimyasal ve fiziksel değerler

<i>FİZİKSEL ÖZELLİK</i>	<i>TS25 [27]</i>	<i>ASTM C 618 [5]</i>
<i>İNCELİK</i>		
45 µm göz açıklıklı elekten ıslak olarak elendiğinde elek üzerinde kalan miktar maksimum (%)	-	34
Özgül yüzey, Blaine minimum (cm ² /g)	3000	-
<i>DAYANIM AKTİVİTE İNDEKSİ MİNİMUM (%)</i>		
7 Günlük	-	75
28 Günlük	70	75
<i>SU İHTİYACI (%)</i>		
Kontrol Numunesine Kıyasla maksimum	-	115
<i>KİMYASAL ÖZELLİK (%)</i>	<i>TS25 [27]</i>	<i>ASTM C 618 [5]</i>
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ minimum	70,0	70,0
SO ₃ , maks	5,0	4,0
Nemlilik, maks	3,0	3,0
Kızdırma Kaybı, maks	10,0	10,0
MgO, maks	5,0	-
Na ₂ O olarak alkaliler, maks	1,5	1,5

2.3.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstrinin çeşitli dallarında atık veya yan ürün olarak oluşan malzemelerdir. Bu atıklar başka bir bağlayıcı ile kullanıldığı zaman bağlayıcılık özelliği kazanmakta ve bu nedenle katkı maddesi olarak kullanılabilir. Yapay puzolanlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar uçucu kül, yüksek fırın cürufu, taban külü ve silis dumanıdır. Dış etkenlere karşı (deniz suyu, yağmur suyu, yeraltı suyu vb.) dayanıklı harç ve beton üretiminde yapay puzolanların beton içinde çözünerek boşluk üreten CH jellerini bağladığı için mineral katkı olarak kullanımı yaygındır. Kütle betonlarında hidrasyon ısını düşürmek için çimento yerine ikame olarak bu mineral katkılar kullanılmaktadır.

Yapay puzolanlar başlığı altında incelenen uçucu kül ve taban külü termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan çevreye zarar veren, depolaması maliyetli atıklardır. Ülkemizde 2017 itibarı ile kömürle enerji üretimi sağlayan 43 adet büyük ölçekli termik santral bulunmaktadır. Bu santrallere ait genel bilgiler Çizelge 2.4'te belirtilmiştir [30].

Çizelge 2.4. Kömüre Dayalı Termik Santraller

<i>Yıl</i>	<i>Santral Ünitesi</i>	<i>Güç (KW)</i>	<i>Yıl</i>	<i>Santral Ünitesi</i>	<i>Güç (KW)</i>
1956	Tunçbilek A1	65	1989	Kangal 1	150
1957	Soma A1	22	1990	Kangal 2	150
1958	Soma A2	22	1991	Çatalağzı 2	150
1973	Seyitömer 1-2	300	1991	Soma B5	165
1977	Seyitömer 3	150	1992	Orhaneli 1	210
1977	Tunçbilek B1	150	1993	Soma B6	165
1978	Tunçbilek B2	150	1993	Kemerköy 1	210
1981	Soma B1	165	1994	Kemerköy 2	210
1982	Soma B2	165	1995	Kemerköy 3	210
1982	Yatağan 1	210	1997	Çayırhan 3	160
1983	Yatağan 2	210	1998	Çayırhan 4	160
1984	Afşin Elbistan A1-2	680	2000	Kangal 3	157
1984	Yatağan 3	210	2005	Afşin-Elbistan B1	360
1985	Soma B3	165	2005	Çan 1-2	320
1986	Soma B4	165	2006	Afşin Elbistan B2-3-4	1080
1986	Afşin Elbistan A3	340	2009	Silopi Elektrik Asfaltit 1	135
1986	Yeniköy 1	210	2015	Silopi Elektrik Asfaltit 2-3	270
1987	Afşin-Elbistan A4	335	2015	Aksa enerji Göynük 1	135
1987	Çayırhan 1-2	300	2016	Enerji Tufanbeyli 1-2-3	450
1987	Yeniköy 2	210	2016	Aksa enerji Göynük 2	135
1989	Seyitömer 4	150	2016	Naksan-Adularya 1	145
1989	Çatalağzı 1	150			

Bu termik santrallerin çalışma prensibi içerisinde yanan kömür dumanının elektro filtreler yardımıyla elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile uçucu kül elde edilmektedir. Uçucu küllerin büyük bölümü silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmakta ve yakılan kömürün cinsine bağlı olarak kimyasal kompozisyonu değişmektedir.

Termik santrallerde atık olarak ortaya çıkan bir diğer malzeme de taban külüdür. Taban külü baca gazıyla taşınamayan, kazan tabanında toplanan iri taneli atıktır. Termik santrallerde yanan kömür küllerinin yaklaşık %20’sini taban külleri oluşturmaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde her yıl termik santrallerde büyük miktarlarda taban külü atık olarak ortaya çıkmakta, endüstriyel ekoloji kavramı içerisinde bu atığa yeni kullanım alanları geliştirilmesi gerekmektedir [31-32].

Termik santraller dışında demir çelik tesislerinde yüksek sıcaklıklı fırınlarda ham demir üretiminde yoğunluk farkından dolayı demirin üzerinde yer alan cüruf malzeme yüksek fırın cürufu olarak adlandırılır. Yüksek fırın cürufunun oluşumu $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında gerçekleşmekte olup bu malzeme demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanması sonucunda meydana gelmektedir. Yüksek fırın cürufu yavaş soğutulduğunda kristal bir yapıya sahiptir ve bu hali ile beton agregası olarak da kullanılabilir [33].

2.3.2.1. Yüksek Fırın Cürufu

Demir çelik sanayinde yüksek fırınlarda demir üretimi yapılmaktadır. Demir cevheri doğada oksit bileşenleri (hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4), limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), Siderit (FeCO_3)), silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan benzeri maddelerle birlikte bulunmaktadır [34]. Demir cevherinin bünyesinde bulunan bu yabancı maddelerden ayrıştırılması için yüksek sıcaklıklı fırınlarda cevherin yaklaşık 1400°C - 1600°C de ısıtılması gerekmektedir. Isıtma işlemi sonucunda yoğunluk farkından dolayı yoğunluğu yüksek olan demir fırının alt bölümünde, diğer malzemeler ise fırının üst kısmında kalır. Fırının üstünde kalan bu atık malzemeler yüksek fırın cürufu (YFC) olarak adlandırılır.

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliğinin olduğu 1862 yılında Langens tarafından gözlemlenmiştir [33]. Aynı yıllarda yüksek fırın cürufu kireçle karıştırılarak elde edilen bağlayıcı malzemelerin ticari amaçlı üretimi yapılmıştır. Yüksek fırın cürufunun çimentoda mineral katkısı olarak ilk kullanımı 1883 yılına rastlamaktadır. Yüksek fırın cürufu ve çimentonun birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen yüksek fırın cürufu çimento 1892 yılında ilk kez Almanya’da üretilmiştir. Yüksek fırın cürufunun tek başına öğütülerek betonda katkı maddesi olarak kullanımı N. Stutterheim tarafından yapılan çalışmaların olumlu neticeleri doğrultusunda 1950’li yıllarda başlamıştır. Son 10-15 yıl içinde İngiltere, Japonya, Kanada ve ABD gibi ülkelere üretilen yüksek fırın cürufunun büyük bölümü beton katkısı olarak kullanılmaktadır [7].

Yüksek fırın cürufunun üretiminin yapıldığı tesisin özellikleri ve üretim süreçlerinin durumu yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonunu etkilemektedir. Yüksek fırın cürufunun farklı ülkelere göre kimyasal kompozisyonu farklılık göstermektedir [33]. Çizelge 2.5.’de farklı ülkelere göre örnekler verilmiştir.

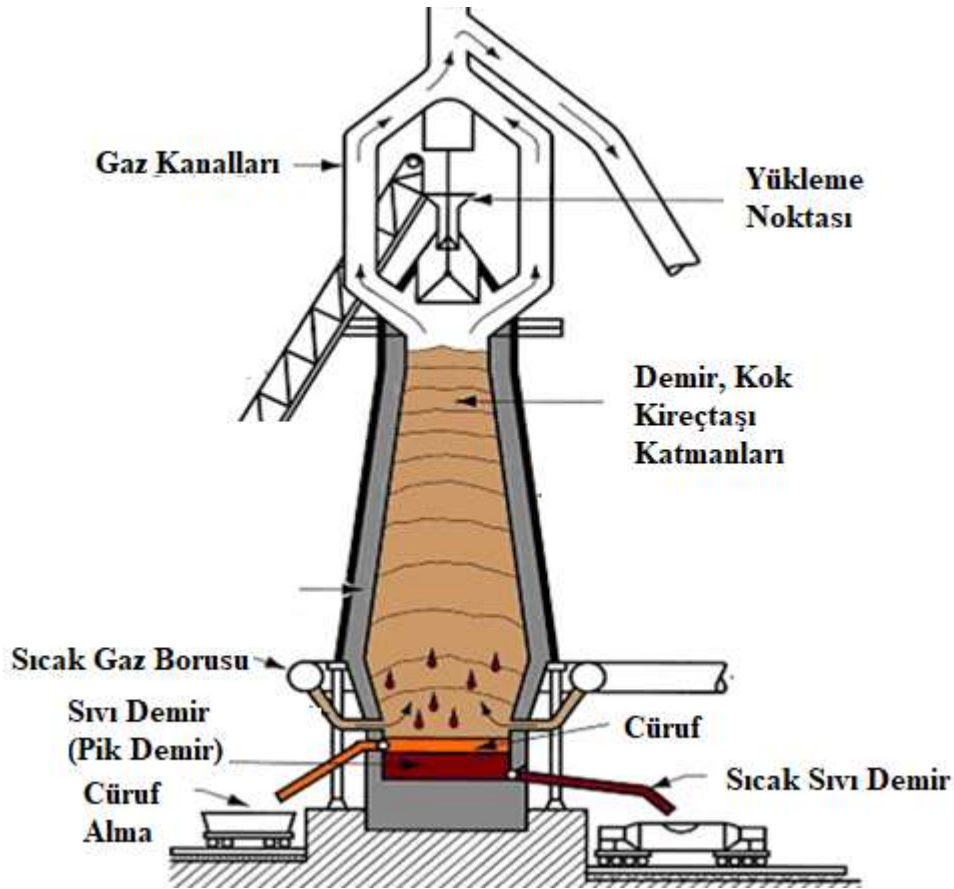
Çizelge 2.5. Yüksek fırın cürufunun ülkelere göre kimyasal kompozisyonu

<i>Oksit (%)</i>	<i>Fransa</i>	<i>Türkiye</i>	<i>Japonya</i>
SiO ₂	35	31	31
CaO	43	37	34,5
MgO	8	8	9,4
Al ₂ O ₃	12	16	11
Fe ₂ O ₃	0,4	0,7	0,8

İnşaat mühendisliği uygulamalarında cüruflar çeşitli alanlarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Klasik çelik üretiminden elde edilen kristal yapılı, kütleler halinde oluşan cüruflar beton agregası ve yol malzemesi olarak kullanılmaktadır. Modern yöntemlerle çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya sahip cüruflar elde edilir.

Yüksek Fırın Cürufu Üretim Prosesi

Yüksek fırında cüruf oluşum süreci genel hatlarıyla Şekil 2.2’ de gösterilmiştir. Erimiş olarak fırından çıkan cüruf hızlı soğutma neticesinde ani akışkanlık azalması sonucu camsı katı eriyik bir hal alır. Bu camsı yapıdaki cüruf granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılır. Yüksek fırın cürufu yavaş soğutulduğu zaman ise kristal yapıya sahip olur. Kristal yapılu cüruf dayanım özellikleri bakımından bazalta benzer bir yapı sergilemektedir.

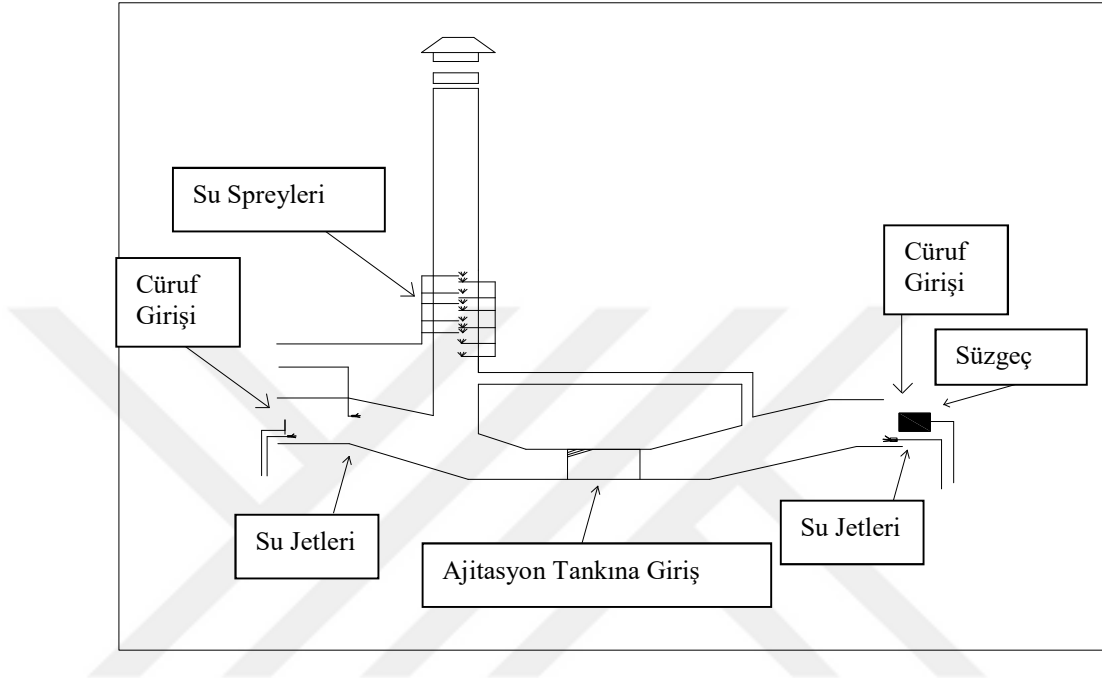


Şekil 2.2. Yüksek fırında cüruf oluşum süreci

Cürufun elde edilmesinde kullanılan soğutma işlemi için farklı iki yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntem granülasyondur. İkinci yöntem ise peletlemedir.

Granülasyon yöntemi su ile cürufun soğutulması temeline dayanmakta olup yüksek miktarda su tüketimine neden olmaktadır. Bu işlemde 1 ton cüruf için 100 m³ su

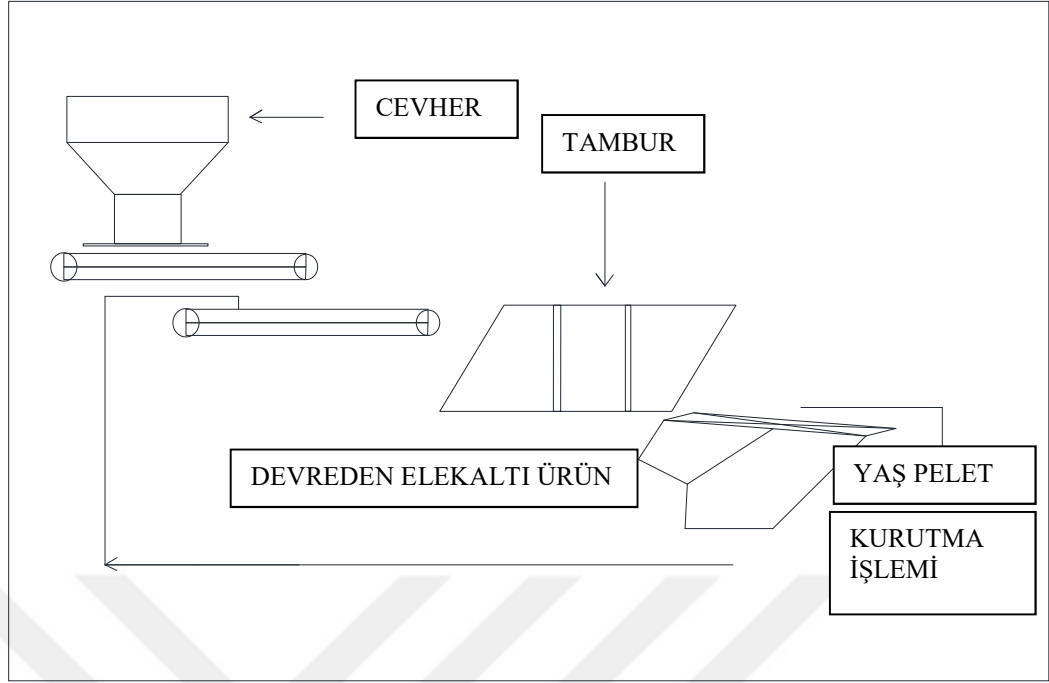
kullanılmaktadır. Bu soğutma sistemi neticesinde ortaya çıkan malzeme %30 oranında su içermektedir. Malzeme içeriğindeki su kurutucu değirmenler ve filtreli havuzlar sayesinde cüruftan uzaklaştırılır. Granülasyon yönteminin şematik olarak anlatımı Şekil 2.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Granülasyon yöntemi şematik gösterimi

Peletleme yönteminde erimiş cüruf ilk olarak su ile soğutulur. Sonrasında dakikada 300 tur devrinde dönen tambur sayesinde havaya fırlatılır. Bu işlemde 1 ton cürufa 1 m³ su kullanılmaktadır. Soğutma sonucu oluşan malzeme %10 oranında su içermektedir.

Peletleme işlemi sonrasında farklı boyutlarda malzeme oluşmaktadır. Büyük boyutlu olan malzemeler hafif beton agregası olarak değerlendirilebilmektedir. Hafif beton agregası olarak değerlendirilebilecek malzemelerin dane çapı 15 mm’ye kadar çıkmakta olup gözenekli ve kısmen kristal bir yapıdadır. Dane boyu 4 mm’den küçük olan malzemeler camsı yapıya sahip olup çimento üretiminde katkı maddesi olarak da kullanılır. Peletleme yönteminin şematik olarak anlatımı Şekil 2.4’ de gösterilmiştir [35-36].



Şekil 2.4. Peletleme yöntemi şematik gösterimi

Yüksek Fırın Cürufunun Camı ve Kristal Yapısı

Yüksek fırın cürufu tanecikleri bakımından saf cam tanecikleri, bir miktar kristal içeren camı tanecikler ve kristal tanecikler olarak sınıflandırılabilir. Camı faz ile dayanım arasında doğru orantı bulunmakla birlikte bir miktar kristal içeren camı taneciklerin reaktivite özelliği diğer tanecik yapılarına göre daha fazladır. Çimento harçlarında mineral katkı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunda kristal içeriğin %0-%5 aralığında artması çimento bağlayıcılı kompozitlerin dayanımında artışa neden olmaktadır. Ancak Kristal içeriğin %5'in üzerine çıkması çimento bağlayıcılı kompozitlerin dayanımında azalmaya neden olmaktadır [37,38].

Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Yapısı

Yüksek fırın cürufunun özelliklerinin belirlenmesinde malzemenin kimyasal yapısı önem arz etmektedir. Yapısında silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), magnezyum oksit (MgO), kalsiyum oksit (CaO), mangan oksit (MnO) gibi bileşikler bulunmaktadır. Malzemenin yapısındaki kalsiyum oksit (CaO) bir

miktar bağlayıcılık özelliği kazanmasına neden olmaktadır. Yüksek fırın cürufu içinde bulunan kalsiyum oksit (CaO)/silisyum oksit (SiO₂) oranının belirli bir sınır değere kadar artması malzemenin hidrolik özelliğini arttırmaktadır. Fakat sınır değerini aşılması durumunda hidrolik özellik azalış göstermektedir. Bu durumun nedeni kalsiyum oksit (CaO) miktarındaki yüksekliğe bağlı olarak granülasyonun zorlaşmasıdır. Kimyasal kompozisyon içinde kalsiyum oksit (CaO)/silisyum oksit (SiO₂) sabit olması durumunda alüminyum oksit (Al₂O₃) miktarının artması cürufun aktivitesini arttırmaktadır. İçerikte bulunan magnezyum oksit (MgO) miktarının %10'a kadar dayanıma etkisi bulunmamaktadır [39].

Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

Çimento ile kullanılan yüksek fırın cürufunun su ile karıştırılması sonucu kimyasal reaksiyonlar başlar. Yüksek fırın cürufu ile su arasında oluşan reaksiyon cürufun az miktarda bağlayıcılık özelliğine sahip olmasından dolayıdır. Cürufun bir bölümü su içerisinde erir ve hidrate alüminatlar, hidrate silika alüminatlar çökelir. Bu durum çimentonun reaksiyonlarına göre yavaştır ve sonucunda güçlü bağlayıcılık özelliği oluşmaz.

Yüksek fırın cürufu ve çimentonun hidratasyonu iki bölümde incelenebilir. Birinci aşamada çimentonun ve cürufun içinde bulunan alkali hidroksitin reaksiyonu, ikinci aşama ise çimento hidratasyonu sonucu oluşan CH ve cürufun reaksiyonudur. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan CH ile yüksek fırın cürufu arasında oluşan reaksiyon bağlayıcılık özelliğini geliştiren asıl reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucu hidrolik bağlayıcılık özelliği yüksek C-S-H jelleri oluşmaktadır ve bu reaksiyonlar ortamın sıcaklığına bağlı olarak hızlanmaktadır. Cürufu çimento hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H jellerinin yüzeylerinde alüminyum oksit (Al₂O₃) ve magnezyum oksit (MgO) miktarları yoğun olarak bulunmaktadır [7,35].

Yüksek Fırın Cürufunun Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı

Yüksek fırın cürufu sertlik bakımından çimento klinkerinden sert bir yapıya sahiptir. Cürufu çimento üretiminde klinker ve cüruf birlikte öğütüldüğünde cüruf ve klinker

tanecikleri arasında farklılıklar oluşmaktadır. Cüruf daha kalın taneli, klinker ise daha ince taneli kalmaktadır. Bu nedenle yüksek fırın cürufunun ayrı öğütülmesi taneciklerin istenilen inceliğe gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca değişik kaynaklardan elde edilen cüruflar da farklı sertlik derecelerine sahip olmaktadır. Cürufun ayrı öğütülmesi bu noktada üretilen malzemenin daha iyi kontrol edilmesini ve cürufun istenilen incelik değerine ulaşmasını sağlamaktadır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, cürufu çimentolara göre saklama ve depolama özellikleri bakımından daha sağlıklıdır [40].

Yüksek fırın cürufunun ayrı öğütülmesi beton karışımındaki cüruf miktarının belirlenmesi açısından daha kullanışlı olmaktadır. Farklı incelik değerlerinde ve farklı oranlarda cüruf içeren beton karışımları yapılabilmektedir. Yüksek fırın cürufunun betonda kullanılmasının avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.6’de belirtilmiştir [40].

Çizelge 2.6. Yüksek fırın cürufunun betonda kullanılmasının avantajları ve dezavantajları

<i>YFC Betonda Kullanılmasının Avantajları</i>	<i>YFC Betonda Kullanılmasının Dezavantajları</i>
<i>-Taze betonda işlenebilirliği arttırmaktadır</i>	<i>-Soğuk havalarda betonun geç priz almasına neden olur</i>
<i>-Betonda terlemeyi azaltmaktadır.</i>	<i>-İlk zamanlarda beton dayanımı artışı yavaştır</i>
<i>-Betonun hidrasyon ısını azaltmaktadır</i>	
<i>-Sertleşmiş betonun sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır</i>	

2.3.2.2. Uçucu Kül

Yakıt olarak pulverize kömür kullanılan termik santrallerde yanan kömürün oluşturduğu baca gazı elektro filtreler yardımıyla tutulmakta veya mekanik olarak

çöktürülerek atmosfere çıkışı önlenmektedir. Atık malzeme statüsünde bulunan mikron boyutundaki elektro filtreler ve mekanik çöktürmeyle elde edilen bu kül tanecikleri uçucu kül olarak isimlendirilmektedir. Uçucu kül TS 639' da ise öğütülmüş veya toz haline getirilen kömürün yüksek sıcaklıkla birlikte yanması sonucu ortaya çıkan baca gazları ile hareket eden silisli ve alümino-silisli toz yanma ürünleri şeklinde tarif edilmektedir [41].

Uçucu kül ilk kez elektrik enerjisi üretimi sektöründe 1930'lu yıllardan itibaren görülmeye başlamıştır. Bu yıllarda kömürlü elektrik santrallerinde çok miktarda uçucu kül elde edilmekteydi. Uçucu külün çimento sektöründe kullanılması da yaklaşık bu yıllara rastlamaktadır. R.E. Davis ve arkadaşlarının 1937 yılında California Üniversitesinde uçucu kül kullanılan betonla ilgili yaptığı çalışma yayımlandı. Bu çalışma betonda uçucu kül kullanımının temellerini oluşturdu. Uçucu külün inşaat sektöründe ilk kullanımı Hoover ve Hungry Horse barajlarında Amerika Birleşik Devletleri'nde 1940'lı yıllarda oldu. 1970'li yıllarda Arap Ülkeleri Birliğinin ambargosundan kaynaklı oluşan petrol krizinde elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanımına neden oldu. Bu nedenle artan uçucu kül üretimine bağlı olarak konu üzerine yapılan araştırmalar da yoğunluk kazandı [42].

Ülkemizde ise uçucu kül kullanımı 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk barajlarının yapımı sırasında kullanılmıştır. Bu barajlarda dökülen kütle betonlarının hidrasyon enerjisini düşürmek için uçucu kül kullanılmasına karar verilmiş ve Türk Standartları Enstitüsü TS 639 uçucu kül ve TS 640 uçucu küllü çimento standartlarını hazırlamıştır [43]. Karayolları da DSI'nin baraj uygulamaları dışında bazı köprü ve karayolu uygulamalarında uçucu kül kullanmıştır. Ülkemizde uçucu kül kullanımı benzer uygulamaların ötesine geçememiş ve sınırlı düzeyde kalmıştır. Geçtiğimiz yıllarda elde edilen uçucu kül ancak %1'ine yakın bölümü değerlendirilebilmiştir. Günümüzde hazır beton teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak AR-GE çalışmalarına önem verilmekte ve çimento, beton endüstrisinde uçucu kül kullanımına olan ilgi artmaktadır [43].

Uçucu Külün Üretim Prosesi

Elektrik üretiminde termik santrallerde kömür kullanımının %20-%50 arası linyit kömüründen, %10-%15'i ise taşkömüründen karşılanmaktadır. Kullanılan kömürün yanması sonucu oluşan küllerin %75-%85'i baca gazları ile dışarıya taşınmaktadır [44]. Kömürün yanması sırasında kazan alevi 1600 °C sıcaklığı aşmaktadır. Bu sıcaklık kömürün içinde bulunan minerallerin birçoğunun erimesine neden olmaktadır. Kömürün mineralojik yapısı değerlendirildiğinde alüminyum silikatlar, karbonatlar, sülfidler, kloritler ve silika olmak üzere 5 ana gruba rastlanmaktadır.

Kömürün yanmasından sonra bacadan gazlarla birlikte büyük miktarda kül çıkışı olmaktadır. Bu küllerin bacadan direk doğaya salınması durumunda termik santral etrafı kısa sürede küllerle kaplanacaktır. Bu durumu önlemek için bacadan çıkan küller birtakım elektrostatik ve elektromekanik sistemler yardımıyla tutulmaktadır. Uçucu küllerin toplanmasında elektro filtreler, siklonlar, nemlendirme, ultrasonik çöktürme, filtreler, kontrol prosesleri benzeri sistemler kullanılmaktadır. Termik santrallerde bu yöntemler içinde en çok tercih edilenler elektro filtreler ve siklonlardır. Eğer uçucu kül boyutu büyük ise siklon gibi mekanik sistemler, eğer boyutu küçük ise elektro filtreler kullanılır [45].

Bacada tutulan küllerin özellikleri üretim sürecinde yanan kömürün cinsine, yakma işlemine kömürün öğütülmesine, elektrostatik tutucunun ayırma niteliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bacada küllerin yakalanması sürecinin ardından tanecikler kül toplayıcı silolara iletilmektedir. Sonrasında silolardan alınan malzeme bantlarla veya başka sistemlerle depo alınana götürülür ve atık malzeme niteliğinde depolanır [7,46].

Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında malzemenin kimyasal kompozisyonu göz önünde bulundurularak ASTM C618 [5] ve TS EN 197-1 [49] standartları temel alınmaktadır. Uçucu külün özellikleri üretim prosesinin niteliklerine göre değişkenlik gösterse de içerisinde dört ana bileşik bulunmaktadır. Bu bileşikler silisyum oksit (SiO_2),

alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) şeklindedir. ASTM C618 standardına göre uçucu küller iki bölümde sınıflandırılmakta olup bunlar F ve C sınıfıdır [7]. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürün yanması sonucu elde edilmektedir ve puzolanik özelliktedir, C sınıfı uçucu küller ise linyit ve düşük bitümlü kömürden elde edilir, bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Ayrıca C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılmaktadır. Çizelge 2.7’de ASTM C618’e göre uçucu kül sınıfları ve kimyasal niteliklerinin değerleri belirtilmiştir [7].

Çizelge 2.7. ASTM C 618’e göre uçucu kül sınıfları

<i>SINIFI</i>	<i>TANIM</i>
<i>F</i>	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ -Antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilir. -Puzolanik özelliktedir.
<i>C</i>	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ -Linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmektedir. -Puzolanik özelliktedir ayrıca tek başına bir miktar bağlayıcılık özelliği de vardır

C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanı sıra az da olsa kendinden bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Bu tip uçucu küller genellikle %15’ten fazla kalsiyum oksit (CaO) içermekte olup üretim sürecine bağlı olarak bazen %10 altında ve daha düşük miktarlarda kalsiyum oksit (CaO)’de içerebilmektedirler. Ayrıca kalsiyum oksit (CaO) miktarı genellikle bağlayıcılıkla doğru orantılıdır. C sınıfı uçucu küllerin hidrasyon mekanizması çimento ile aynıdır. Bu küllerin içerisinde az miktarda karbon bulunabilmekte olup kızdırma kaybı %1’den azdır. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliktedir. Yapısındaki kalsiyum oksit (CaO) içeriği %6’dan azdır, bu nedenle de kendiliğinden bağlayıcılık özelliği göstermez. Kızdırma kaybı bakımından F sınıfı uçucu küller değerlendirildiğinde yapısında %2’den fazla yanmamış karbon bulunabilmektedir [47].

Düşük kireç içerikli uçucu küllerin ana bileşeni silika ve alümina içerikli amorf veya camsı yapılardır. Yani düşük kireçli uçucu küller yalnızca puzolanik özelliğe sahiptir yani su bulunan ortamda kalsiyum hidroksitle (CH) ile reaksiyonu sonucu bağlayıcılık niteliği kazanırlar. Yüksek kireç içeren uçucu küller değerlendirildiğinde ise puzolanik özellik dışında kendi başına bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Bu uçucu küllerin içeriğinde bulunan serbest kireç, trikalsiyum alüminat (C_3A), amorf yapıda bulunan silika ve alümina tek başına bağlayıcılık özelliğini kazanmasını sağlamaktadır [48].

Uçucu küller için yapılan bir diğer sınıflandırma da TS EN 197-1’de [49] belirtildiği üzere silissi (V) ve kalkersi (W) olarak iki grupta incelenmiştir. İlk olarak V sınıfı uçucu külleri ele alacak olursak; bu sınıfta bulunan küller çoğunlukla puzolanik özelliğe sahiptir. İnce yapılı küresel taneciklerden meydana gelmektedir. Kimyasal yapısının büyük çoğunluğunu silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) oluşturmakta olup geriye kalan kısmını ise demir oksit (Fe_2O_3) ile diğer bileşikler oluşturmaktadır. Bu küllerin reaktif kireç ve silis oranı ise sırasıyla %10’dan az ve %25’ten fazla olması gerekmektedir. Bu sınıflandırmada ikinci olarak ise kalkersi (W) sınıfı uçucu küller değerlendirilmiştir. W sınıfı uçucu küller hidrolik ve puzolanik özelliklere sahip ince taneli tozlardır. İçeriğinde reaktif olarak kireç (CaO), silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) miktarı yoğun olarak bulunmaktadır. Geri kalan bileşenler ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğerleridir. Bu küllerde ise reaktif kireç (CaO) miktarı %10’dan fazla ve reaktif silisyum oksit (SiO_2) miktarı %25’ten fazla olmalıdır [49].

Uçucu Külün Kimyasal ve Mineralojik Yapısı

Uçucu küllerin matrisi temel olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Si, Fe, Al, Mg, Na, K, Ca, Ti gibi elementlerden oluşmaktadır. Uçucu külün yapısını oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler de matrise girme yönelimi gösterir ve tane boyutuyla ters orantılı bir şekilde uçucu küllerin yüzeylerinde toplanır. Kimyasal kompozisyonda en yoğun bulunan bileşikler silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) olarak belirtilebilir. Bu bileşiklerin yanında yapısında bazı alkali oksitler ve minör yapıda bileşikler de bulunmaktadır. Bu temel bileşiklerin uçucu kül yapısında bulunma

oranları uçucu kül türüne göre değişmekte olup yaklaşık olarak silisyum oksit (SiO_2) %25-%60, alüminyum oksit (Al_2O_3) %10-%30, demir oksit (Fe_2O_3) %1-%15 ve kalsiyum oksit (CaO) %1-%40 şeklindedir. Uçucu külün içeriğinde bulunan diğer oksitlerden magnezyum oksit (MgO) en fazla %5, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) %5'in altında, kükürt (SO_3) ise yakılan kömür cinsine göre %10 değerine kadar yükselebilmekle birlikte %0,2-%2,5 aralığındaki miktarlarda bulunmaktadır. Kızdırma kaybı, uçucu kül oluşumunda kömürün yanma işlemi sırasında içinde bulunan yanmamış karbon miktarı olarak nitelendirilmekle birlikte kömürün yapısında bulunan hidratların ve karbonatların bozulması sonucu ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da belirtmektedir. Uçucu külde kızdırma kaybı oranı %1-%10 arasında değişkenlik göstermektedir. Kimyasal kompozisyondaki farklılık uçucu külün sınıfını tayin etmektedir [50,51].

Çimentonun hidratasyonu sırasında meydana gelen ve çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H jellerini oluşturan silisyum oksit (SiO_2) ve kalsiyum oksit (CaO) bileşiklerini uçucu külde bulunan reaktif silis ve reaktif kireç temsil etmektedir. Uçucu külün aktif bileşeni olan reaktif silis puzolanik reaksiyona girmek için alkali ortamda çözünür. Silis camsı ve amorf yapıda bulunurken, mullit ve kuvars inert olup kristal fazda bulunurlar [24]. Ülkemizde bulunan bazı termik santrallerde açığa çıkan uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarının ortalama değerleri Çizelge 2.8'de verilmiştir [51].

Çizelge 2.8. Ülkemizde Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonu

<i>Termik Santral</i>	Kimyasal Kompozisyon (%)								
	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>S+A+F</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>
Afşin Elbistan	18,27	9,16	3,26	30,68	53,44	1,74	11,40	0,38	0,19
Orhaneli	48,53	24,61	7,59	80,73	9,48	2,28	2,48	2,51	0,35
Çatalağzı	58,75	25,24	5,76	89,75	1,46	2,22	0,08	4,05	0,60
Seyitömer	54,49	20,58	9,27	84,34	4,26	4,48	0,52	2,01	0,65
Yatağan	51,50	23,08	6,07	80,65	10,53	2,42	1,32	2,54	0,77
Tunçbilek	58,25	16,66	12,91	87,82	1,95	5,08	0,76	1,37	0,33
Soma	44,04	22,07	4,37	70,48	20,95	1,66	2,55	1,22	0,34
Kangal	34,03	14,93	4,41	53,37	31,91	1,73	6,95	1,01	0,65
Yeniköy	16,34	10,65	5,06	32,05	39,40	1,49	23,94	1,44	0,49
Kemerköy	25,20	12,58	5,98	43,76	38,49	1,27	13,88	1,18	0,41
Çayırhan	50,98	13,11	9,74	73,83	11,82	3,91	3,94	1,91	2,71

Uçucu küllerin ağırlıkça %15 ile %45 oranı kristalize yapıya sahiptir. Linyit kömürünün ve bitümlü kömürün yanması sonucu elde edilen uçucu küllerde yoğun miktarda kristalize madde bulunmaktadır [52]. Uçucu külün mineralojik yapısı değerlendirildiğinde özellikle C sınıfı uçucu küllerin yapısındaki farklılık dikkat çekmektedir. Uçucu küller üretim sürecine bağlı olarak mineralojik farklılıklar göstermektedir [53,54].

Uçucu külün ana bileşenlerini içeren kristal yapıların belirlenmesinde mineralojik karakterizasyon önemlidir. Puzolanik özelliklerin değerlendirilmesinde uçucu külün kimyasal yapısından çok mineralojik yapısı etkindir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana bileşenleri aktif silis ve alümina olup amorf veya camsı fazdadır. Bu sınıfta bulunan uçucu küller suyun bulunduğu ortamda sönmüş kireç (CH) ile reaksiyona girer bu da

puzolanik özelliğinin göstergesidir. Ayrıca kimyasal yapısında bulunan serbest kireç, trikalsiyum alüminat, amorf silis ve alümina nedeni ile de kendi başlarına bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahiptir [55].

Düşük kireçli uçucu küllerde bulunan camsı yapının miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerde bulunan camsı faz miktarına göre değerlendirildiğinde daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerin mineralojik yapısında mullit, camsı faz, hematit, kuvarz, manyetit gibi maddeler bulunurken yüksek kireçli uçucu küllerin yapısında bunlara ek olarak serbest kireç, anhidrit, trikalsiyum alüminat, plajiyoklaz, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır. Ülkemizde bulunan bazı termik santrallerde açığa çıkan uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Çizelge 2.9’ da verilmiştir [55].

Çizelge 2.9. Ülkemizde Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonu

<i>Termik Santral</i>	Mineralojik Kompozisyonu (%)						
	<i>Mullit</i>	<i>Kuvarz</i>	<i>Manyetit</i>	<i>Hematit</i>	<i>Anhidrit</i>	<i>Plajiyoklaz</i>	<i>Amorf Faz</i>
Afşin	1,0	4,5	0,8	4,0	12,2	~28	~30
Elbistan							
Çayırhan	18,1	10,9	0,2	0,1	-	-	~70
Seyitömer	1,2	5,6	2,5	6,0	9,3	~15	~50
Soma	4,3	5,1	0,6	2,0	7,4	~20	~50
Tunçbilek	8,8	13,9	4,1	3,0	-	-	~70
Yatağan	6,0	22,4	2,9	7,0	-	~25	~35

Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

Uçucu külün fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesinde parçacık şekli, büyüklüğü ve dağılımı, incelik, yoğunluk, renk, puzolanik aktivite indeksi, hacim değişimi ve kızdırma kaybı gibi ana başlıklar bulunmaktadır.

Tanecik şekil ve büyüklük dağılımında, uçucu külün oluşumunda yakılan kömürün cinsi, yapısı, yanma koşulları uçucu kül toplama sistemi gibi prosesler belirleyicidir. Kül partikülleri küresel şekle sahip olup içi boşluksuz veya boşluklu yapılarda bulunabilecekleri gibi büyük bir küre içerisinde küçük küreler halinde, düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklu yapılar halinde, yüzeyinde sıvı damlacık bulunan yapılar halinde, yüzeyi kristal kaplı yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar halinde de bulunabilirler [56].

Uçucu külün tanecik boyutu 0,5 μm -150 μm arasında değişkenlik göstermektedir. Camsı küresel taneciklere ve şekil bakımından düzensiz tanecik dağılımına sahip olması uçucu külün sınıfından kaynaklanmaktadır. Küçük katı uçucu küller şekil bakımından değerlendirildiğinde büyük küllere göre daha küresel yapıdadır. Boşluklu küller de boşluksuz küllere göre daha küresel yapıda olup tanecik büyüklüğüne göre küresel yapı değişkenlik göstermektedir [51,57].

Uçucu külün inceliği kül tutma sistemine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. İncelik miktarı uçucu külün puzolanik aktivitesini etkileyen temel niteliklerden biridir. Bu kapsamda elektro-filtrelerde tutulan uçucu küller daha ince taneciklere sahip olduğu için yapı malzemesi olarak kullanılması daha uygundur. Yüzey alanı yüksek ve camsı faz içeriğine sahip uçucu küllerde puzolanik reaksiyonunun daha yoğun olduğu yapılan araştırmalar sonucu belirlenmiştir [58]. İnce yapıda bulunan uçucu kül yani ortalama 6,4 μm parçacık boyutuna sahip olan uçucu küller çimento hamurunda daha homojen bir dağılıma sahip olur. İnce tanecikli küller ortalama parçacık boyutu 19,1 μm olan normal boyuta sahip uçucu küllere göre daha yüksek puzolanik reaksiyon oluşmasını sağlar ve buna bağlı olarak da basınç dayanım artışını pozitif yönde etkiler [59, 60].

İncelik ve mineralojik yapı uçucu külün yoğunluğunu belirleyen faktörlerdir. İçi dolu küresel tanecik yapısına sahip küllerin mutlak yoğunluğu $2,2-2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Uçucu külün blaine inceliği $1800-5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ arasında değişkenlik göstermektedir. İri tanecik yapısına sahip uçucu küller boşluklu yapısından dolayı ince tanecikli uçucu küllere kıyasla daha az yoğunluğa sahiptir. Ayrıca uçucu külün yoğunluğu kimyasal birleşimi ile de ilgilidir. Kimyasal kompozisyonunda demir içeriği fazla olan küllerin yoğunluğu; alümin, silika ve karbon içeriği fazla olan küllere göre daha fazladır. Mineralojik açıdan ise kuvars ve mullit miktarı külün yoğunluğunu azaltmaktadır [47].

Uçucu kül rengi genel olarak koyu gridir. Renginde oluşabilecek değişimler üretim aşasında kömüre ve yanma biçimine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Kül içeriğinde bulunan yanmamış karbon miktarı rengin koyulaşmasına neden olmaktadır. Yanma sonucu içindeki karbon miktarı azalan uçucu küller daha açık renge sahiptir.

Uçucu kül parçacıkları üretim bakımından volkanik temelli küller ile benzeşmektedir. Her iki kül yapısı da Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) komitesi 226' ya [61] göre ince bölünmüş karışım grubuna girer ve puzolanik aktivite gösterir. Puzolanik aktivite; külün inceliği, amorf yapısı, kimyasal ve mineralojik kompozisyonu ile kızdırma kaybı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [62].

Uçucu külün beton ve çimento harcında kullanımında malzemeye zarar verecek genleşme ve büzölmeye neden olmaması gerekmektedir. Hacim sabitliği için TS EN 450-1 [63] ve ASTM C311'e [25] göre deneyler yapılmaktadır. Hacim değişikliğini kimyasal kompozisyon dahilinde belirleyen iki önemli bileşik kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO)' dir. ASTM C618'de hacimsel genleşme ve büzölmenin kabul edilebilir değeri $\pm \%0,8$ olarak belirlenmiştir [5]. Serbest kireç hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (CH) haline dönüşerek betonda genleşme ve çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle TS EN 450-1'de [63] kireç miktarı $\%1$ ile sınırlandırılmıştır. Magnezyum oksit (MgO) hidrasyon aşamasında yavaş gelişen bir maddedir. Hidrasyon olduğunda ise oluşan ürünün miktarı büyük hacim kaplayarak betonun veya çimento harcının genişleyip çatlamasına neden olabilir. Bu

nedenle uçucu kül şartnamelerinde genel olarak Magnezyum oksit (MgO) miktarı %5 ile sınırlandırılmıştır [56].

Uçucu kül içerisinde bulunan yanmamış karbon kızdırma kaybı olarak değerlendirilir. Karbon bağlayıcılık reaksiyonu içerisinde aktif olmayan bir maddedir. Ancak betonda su ihtiyacını arttırması, kimyasal katkıların etkisini düşürmesi, donma ve çözülme dayanımını olumsuz yönde etkilemesine neden olur. Bu nedenlerden dolayı uçucu kül içerisinde bulunan karbon miktarı belirli oranlarda tutulması gerekmekte olup TS-EN 197-1 standardına [49] göre kızdırma kaybı limitleri %0-%9 arasında belirlenmiştir [51].

Uçucu Külün Hidratasyonu

Uçucu kül, alüminli ve silisli yapıya sahip, ince taneli puzolanik özellik gösteren bir malzemedir. Külün kalsiyum hidroksit (CH) ve su ile bir araya gelmesi sonucu çimentoda olduğu gibi C-S-H jelleri oluşur ve bağlayıcılık özelliği kazanır. Uçucu kül yapısında bulunan amorf silika, kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat üretirler [64].

Doğal ve yapay puzolanların genelinde farklı oranlarda olmak üzere çimentonun yapısında meydana gelen hidratasyon olayına benzer reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Hidrate olmuş su ve kül karışımında klinkerin hidratasyonu sonucu oluşan primer C-S-H jellerinden oluşmaktadır. Hidratasyon sonucu oluşan diğer yapılar da çimento hidratasyonu sonucu oluşan yapılara benzemektedir. Uçucu külün hidratasyonu daha uzun zaman almakta olup buna bağlı olarak kürlemenin (olgunlaştırma) ilk aşamalarında düşük basınç dayanımı görülmektedir. Uçucu külün basınç dayanım artışında ise kimyasal kompozisyonunun ve fiziksel yapısının nitelikleri önem arz etmektedir [65].

Uçucu Kül Kullanımının Beton Üzerine Etkisi

Uçucu kül hem taze betonun özelliklerini hem de sertleşmiş betonun özelliklerini etkilemektedir. Taze betonun hidratasyon ısısını, işlenebilirliğini, priz süresi ve su

ihtiyacını vb. uçucu kül etkilemektedir. Ayrıca sertleşmiş betondaki dayanım ve dayanıklılık özellikleri uçucu kül kullanımından etkilenmektedir [7].

Betonda priz süresi birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Uçucu kül betonun priz süresinin uzamasına neden olmaktadır. Priz zamanı uçucu külün özelliklerine ve beton içinde kullanılan miktarına göre de değişkenlik göstermektedir. Uçucu külün priz süresini uzatması hidrasyon ısısının yavaş oluşumuna, betonun iç geriliminin daha az olmasına ve daha az rötire çatlaklarına sebep olmaktadır. Uçucu külün bu özelliği kütle betonlarında ortaya çıkan yüksek ısıların kontrol edilmesi için kullanılmasını sağlar [66].

Çimentoya uçucu kül ikame edilmesi hidrasyon için gerekli olan su ihtiyacını azaltmaktadır. Uçucu külün su ihtiyacını azaltmasını sağlayan incelik değeridir. İncelik arttıkça su ihtiyacı artar ve şekli küresel olan tanelerin içsel sürtünmeyi azaltması da su ihtiyacının azalmasına sebep olmaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde uçucu kül betonun su ihtiyacını azaltma konusunda önemli bir yere sahiptir. Ayrıca yapılan çalışmalarda çimentoya %20-%30 oranlarında uçucu kül ikamesinin su ihtiyacını yaklaşık %7 oranında azalttığı tespit edilmiştir [47].

Betonun işlenebilirliği konusunda da uçucu külün etkileri gözlenmektedir. Uçucu külün bağlayıcı hamurun hacmini artırır. Çimentoya ikame edilen uçucu külün yoğunluğu çimentodan az olduğu için hacim artışı meydana gelmektedir. Artan hacim agrega taneleri arasında boşluğu daha iyi doldurduğu için işlenebilirliği arttırmaktadır. Uçucu kül tanelerinin küresel yapısı ve inceliği de beton işlenebilirliğinde pozitif etki yaratmaktadır. Taneciklerin küresel şekli agregalar arasında sürtünmeyi azaltmakta böylece betonun hareket kabiliyeti artmaktadır [66].

Uçucu külün betonda katkı maddesi olarak kullanımının basınç dayanımı üzerindeki etkisi ince taneli doğal puzolanlara benzerlik göstermektedir. Kür döneminin ilk günlerinde uçucu külün betonun basınç dayanımına katkısı bulunmamakta hatta katkı kullanılmayan betona göre basınç dayanımının daha az olduğu gözlemlenmektedir. Ancak nihai dayanımda uçucu kül basınç dayanımını arttırmaktadır. Betonda katkı olarak kullanılan uçucu kül betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Betonun

dayanıklılığı konusunda olumlu etkileri olmaktadır. Sülfata dayanıklılığı arttırmakla birlikte alkali agrega reaksiyonlarının oluşmasını da önlemektedir [7]. Uçucu külün beton özelliklerine etkisi Çizelge 2.10'te özet olarak verilmiştir.

Çizelge 2.10. Uçucu külün beton özelliklerine etkisi

<i>Uçucu Külün Betonda Kullanılmasının Avantajları</i>	<i>Uçucu Külün Betonda Kullanılmasının Dezavantajları</i>
<i>-Taze betonda sabit su içeriğinde işlenebilirliği arttırmaktadır.</i>	<i>-Soğuk havalarda betonun geç priz süresini uzatması dezavantaj olabilmektedir.</i>
<i>- Terleme ve segregasyonu (ayrışmayı) azaltmaktadır.</i>	<i>-Nihai dayanımı daha yavaş kazanmaktadır.</i>
<i>-İlerleyen yaşlarda dayanımı arttırmaktadır.</i>	<i>-Kür hassasiyetini artırır.</i>
<i>-Betonun hidratasyon ısını azaltmaktadır.</i>	<i>-Daha fazla hava sürükleyiciye ihtiyaç duyulmasına neden olabilir</i>
<i>-Sertleşmiş betonun sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır.</i>	<i>-Karbonatlaşma riskini artırır.</i>
<i>-Alkali silika reaksiyonu önlemektedir.</i>	
<i>Yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırır. Ekonomik fayda sağlar.</i>	

2.3.2.3. Taban Külü

Termik santral fırınlarında kömürün yanması sonucu oluşan gazlar bacalardan atılmaktadır. Gazlarla birlikte atmosfere sürüklenemeyen fırın tabanında kalan iri taneli maddeler taban külü olarak adlandırılmaktadır. Termik santralde oluşan toplam atıkların %20-%25'lik bölümünü taban külü oluşturmaktadır [67].

Termik santralde üretilen bu atıkların elde edilmesinde santralde kullanılan kazan türü temel unsurdur. Bu santrallerde iki tür kazan kullanılmaktadır. Kazanlarda oluşan bu farklılığa bağlı olarak da iki farklı taban külü oluşmaktadır. Kullanılan kazan türü kuru

tabanlı buhar kazanı ise oluşan atıklar taban külü olarak nitelendirilirken, ıslak taban veya siklon tipi kazanların dibine düşüp sinterleşen atıklar da kazan altı cürufu olarak nitelendirilmektedir. Bu iki malzeme arasındaki fark ise taban külünün tabana düşmeden katılaşması, kazan altı cürufunun ise erimiş halde bulunması ve kazandan erimiş halde uzaklaştırılmasıdır. Erimiş haldeki kül suya bırakılarak soğutulur ve camsı kristallerden meydana gelen cüruf elde edilir [68].

Taban küllerinin kullanım alanları yol inşaatları, temel malzemesi, gürültü bariyeri üretimi vb. olarak nitelendirilebilmektedir. Ayrıca çimentoya ikame edilerek zemini yalıtımlı yol yapımında kullanılabilir. Ancak ülkemizde taban külü sadece yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Taban külü çimento ve beton standartları dışında değerlendirilmektedir. Bunun nedeni ise içeriğinde bulunan yanmamış karbon oranının yüksek olmasıdır. İçeriğinde bulunan yanmamış karbon oranının yüksek olması çimento ve betonda su ihtiyacını arttırmaktadır. Ayrıca puzolanik özelliği ve malzeme kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak taban külünün içerisinde bulunan karbon miktarı bazı yöntemlerle azaltılabilmekte ve içeriğinden uzaklaştırılabilmektedir [69].

Taban Külünün Üretim Prosesi

Taban külü termik santrallerde büyük kazanlarda yanan kömürün kazan altında toplanır ve yaklaşık 250-750 µm boyutlarında tanecik yapısına sahiptir. Ülkemizde kömürle çalışan termik santrallerin yılda yaklaşık 4 milyon ton taban külü elde edilmektedir. Termik santrallerde açığa çıkan külün bir kısmı satılarak ülke ekonomisine katkı sağlamakta olup büyük bir bölümü ise depo sahalarında taşınarak depolanmaktadır. Taban külü TS EN 450-1 standardı [63] dahilinde bir malzeme olmadığı için termik santralde depolanmaktadır [69].

Taban külünün depolama sorunlarını ve çevreye verdiği zarar ile çimento üretim süreci içerisinde doğaya verilen zarar değerlendirildiğinde taban külünün çimento ve beton üretiminde teknik yönden kullanılabilirliği konusunda çözüm getirmek amacıyla çevreci bir yaklaşım olacaktır. Bu kapsamda taban külünün çimento endüstrisinde klinkere katılarak veya doğrudan çimentoya katılma gibi değişik şekillerde

değerlendirmek gerekmektedir. Taban küllerinin çimento üretiminde kullanılması öğütme veriminde artışa, çimento maliyetinde azalışa neden olarak ekonomik yararlar sağlayacaktır [70].

Taban Külünün Fiziksel Özellikleri

Taban külünün fiziksel özellikleri diğer yapay puzolanlarda olduğu gibi üretim prosesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Taban külünün fiziksel görünüşü doğal kuma benzemektedir [71]. Taban külünün genel yapısının belirlenmesi ve bilinmesi doğru alanlarda doğru biçimde kullanılabilmesi için önem arz etmektedir. Bu külün yapısının belirlenmesi için değerlendirilen fiziksel unsurlar; tane boyut özelliği, görsel sınıflandırma, su içeriği, yanma sıcaklığı ve kızdırma kaybı gibi özelliklerdir. Taban külleri genelde gri renkli ve gözenekli kuma benzer bir yapıya sahiptir. Belirgin şekilli camsı görünüşte taneciklerden oluşmaktadır. İri tanecikli olan bazı türleri kabarcıklı yapıdadır [68,72].

Taban külünün tanecik boyutu incelendiğinde ince tane oranı %33-%98 ve taneciklerin boyutu yaklaşık 25,4 mm (1 inç)'den küçüktür. Yapılan çalışmalarda ince tane oranının %0-12 arasında değişim göstermekle birlikte ince taneli parçacıkların plastik özelliği olmayıp nadiren de olsa iri tanecikler içerdiği belirtilmiştir [73]. Taban külü yapısal olarak kum boyutlarında bir malzemedir ve uniformluk katsayısı (C_u)=7-33 arasında değişkenlik göstermektedir. ASTM-D 854 standardına [74] göre taban külünün özgül ağırlığı 1,94-3,46 g/cm³ arasındadır.

Taban Külünün Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Taban külünün kimyasal kompozisyonu uçucu kül ile benzerlik göstermektedir. Kimyasal yapısında başlıca silika ve alümina bulunmaktadır. Taban külünde mineralojik yapısı kristal ve camsı içeriklerden oluşmakta olup camsı içerik mineralojik yapının %66-%88'ini oluşturmaktadır. Mineralojik kompozisyon içerisinde bulunan diğer yapılar ise kuvars, manyetit ve hematittir.

Taban külünün kimyasal yapısında bulunan birleşikler üretim sürecine ve yakılan kömürün cinsine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Taban külünün kimyasal

kompozisyonunda silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi bileşikler bulunmaktadır. Taban külünün ortalama kimyasal kompozisyon oranları çizelge 2.11’de verilmiştir [75].

Çizelge 2.11. Taban Küllünün Ortalama Kimyasal Kompozisyonu

<i>Oksitler</i>	<i>Kimyasal Kompozisyon (%)</i>
<i>CaO</i>	0-22
<i>SiO₂</i>	21-60
<i>Al₂O₃</i>	10-37
<i>Fe₂O₃</i>	5-37
<i>MgO</i>	0-4

Taban külünün yapısında düzensiz şekilli ve küresel tanecikler bulunmaktadır. Küresel camsı taneciklerin pozolanik aktivitesi yüksektir. Küresel olmayan tanecikler ise yapılarında kömürün yanma reaksiyonuna katılmayan kuartz, feldispatlar, kil kalıntıları ve yanmamış karbon gibi maddeleri bulundurmaktadır [73].

Taban Küllünün Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması

Taban külünün özellikleri ve kullanımı bakımından, uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna nazaran yeterli bilgi birikimi mevcut değildir. Bu atıkların giderek artması diğer taraftan da doğal agrega kaynaklarının sınırlı hale gelmesi ve çimento üretiminden dolayı oluşan çevre kirliliği taban külünün değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Taban külü sıcak asfalt yüzeylerinde ve otoyollarda kayma önleyici malzeme olarak kullanılabilirler. Drenaj sistemlerinde filtre malzemesi, yalıtım malzemesi olarak da taban külü kullanılabilir. Taban külü yapı endüstrisi içerisinde asfalt betonunun bitümlü karışımında kullanılabilir. Ayrıca barajlarda drenaj ve filtre sistemleri dahilinde kullanılması olumlu sonuçlar doğurmuştur. Beton blok imalatlarında hafif agrega niteliğinde kullanılması ve çimento üretiminde hammadde olarak kullanılması da mümkündür [68].

3.DENEYSEL PROGRAM

3.1. Çalışma Sırasında Kullanılan Malzemeler

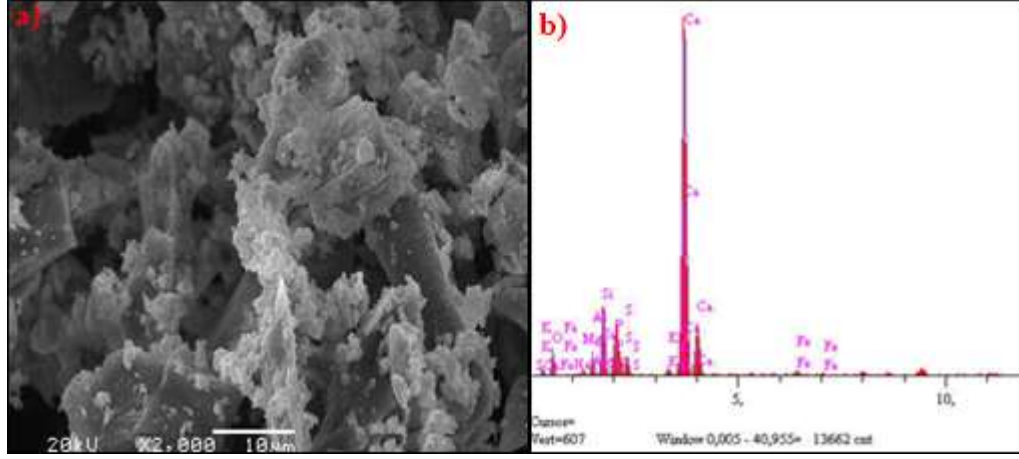
3.1.1. Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1'e [49] uygun CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmasında çimentonun özgül ağırlığı, hava içeriği ve özgül yüzey alanı hesaplanmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	20,02
Al ₂ O ₃	4,31
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	63,78
MgO	1,44
Na ₂ O	0,39
K ₂ O	0,88
SO ₃	3,31
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	3,20
Blaine inceliği (cm ² /g)	3330
Kızdırma Kaybı (%)	2,21

CEM I 42.5 R portland çimentosunun taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) altında elde edilen mikroyapı görüntüsü ve EDS analizi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1.Kullanılan çimentonun (a) SEM görüntüsü (b) EDS analizi

3.1.2 Su

Çimento hamuru hazırlanmasında ve çimento harcının kür işlemlerinde şehir şebekesinden elde edilen musluk suyu kullanılmıştır.

3.1.3 CEN Standart Kumu

Bu çalışma kapsamında kullanılan kum Limak Trakya Çimento fabrikasında üretilen TS EN 196-1 [76] standartlarında belirtilen CEN referans kumudur. Referans kuma ait tane dağılımı çizelge 3.2’de verilmiştir

Çizelge 3.2. CEN Referans Kumunun Tane Büyüklüğü Dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	± 1

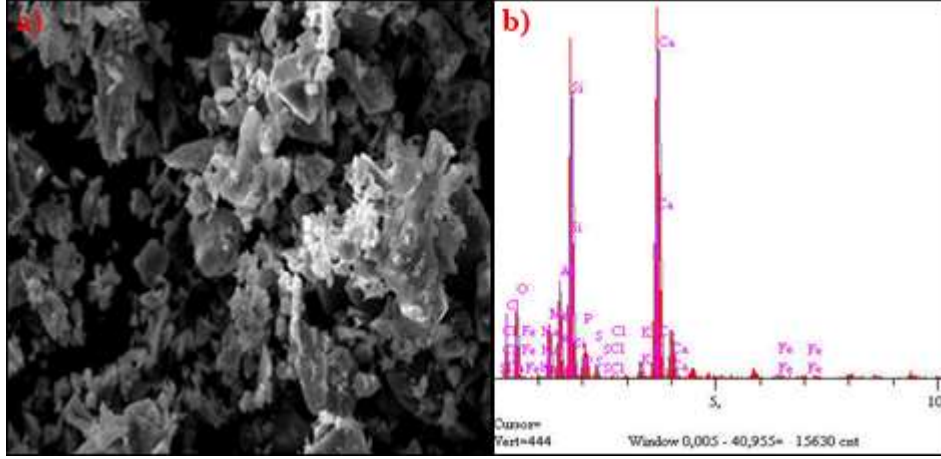
3.1.4 Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Ereğli Demir Çelik Fabrikasından elde edilen öğütülmüş cüruftur. Kullanılan cüruf bol miktarda su ile hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Laboratuvar çalışmalarında yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı, hava içeriği ve özgül yüzey alanı bulunmuştur. Kullanılan yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	35,10
Al ₂ O ₃	9,67
Fe ₂ O ₃	0,99
CaO	39,60
MgO	5,44
Na ₂ O	0,28
K ₂ O	1,18
SO ₃	1,90
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	2,94
Blaine inceliği (cm ² /g)	3335
Kızdırma Kaybı (%)	1,00

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) altında elde edilen mikroyapı görüntüsü ve EDS analizi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2.Yüksek fırın cürufunun (a) SEM görüntüsü (b)EDS analizi

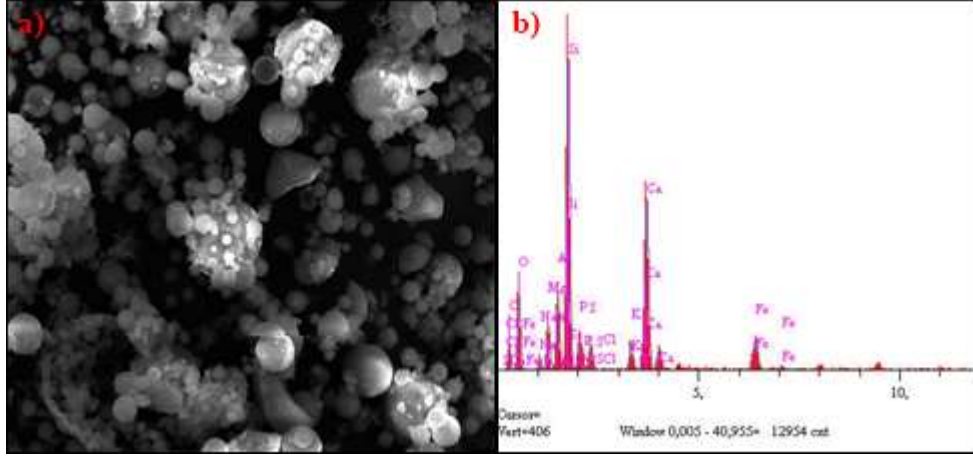
3.1.5 Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen küldür. Kullanılan kül halkalı öğütücüde öğütülmüş ve laboratuvar çalışmalarında uçucu külün özgül ağırlığı, hava içeriği ve özgül yüzey alanı bulunmuştur. Çalışmada Kullanılan uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	45,10
Al ₂ O ₃	11,11
Fe ₂ O ₃	7,35
CaO	13,89
MgO	4,66
Na ₂ O	2,14
K ₂ O	4,12
SO ₃	2,57
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	2,20
Blaine inceliği (cm ² /g)	3295
Kızdırma Kaybı (%)	1,00

Uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Mikroskope-SEM) altında elde edilen mikroyapı görüntüsü ve EDS analizi Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Uçucu külün (a) SEM görüntüsü (b) EDS analizi

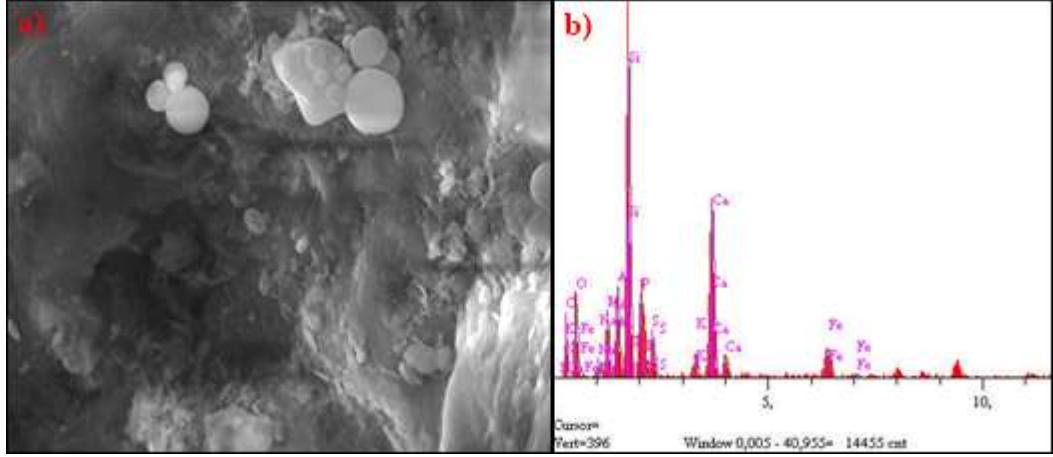
3.1.6 Taban Külü

Çalışmada kullanılan taban külü Çatalağzı Termik Santralinden elde edilen küldür. Külün karbon miktarını en aza indirmek için 1000°C sıcaklıkta kalsine edilmiştir. Kullanılan kül halkalı öğütücüde öğütülmüş ve laboratuvar çalışmalarında taban külünün özgül ağırlığı, hava içeriği ve özgül yüzey alanı bulunmuştur. Çalışmada kullanılan taban külünün kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan taban külünün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	41,35
Al ₂ O ₃	14,41
Fe ₂ O ₃	8,30
CaO	6,35
MgO	4,37
Na ₂ O	0,79
K ₂ O	1,24
SO ₃	5,21
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık	2,17
Blaine inceliği (cm ² /g)	3380
Kızdırma Kaybı (%)	5,21

Taban külünün taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Mikroskope-SEM) altında elde edilen mikroyapı görüntüsü ve EDS analizi Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Taban külü (a) SEM görüntüsü (b) EDS analizi

3.2 Metot

3.2.1. Numunelerin Adlandırılması

Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen çimento harç numunelerinin adlandırılması çizelge 3.6’ da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Taban Külü ikameli örneklerin adlandırılması

Numune İsmi	Kod
Kontrol numune	KN
% 5 Yüksek Fırın Cürufu ikameli numune	YFC5
% 10 Yüksek Fırın Cürufu ikameli numune	YFC10
% 15 Yüksek Fırın Cürufu ikameli numune	YFC15
% 20 Yüksek Fırın Cürufu ikameli numune	YFC20
% 5 Uçucu Kül ikameli numune	UK5
% 10 Uçucu Kül ikameli numune	UK10
% 15 Uçucu Kül ikameli numune	UK15
% 20 Uçucu Kül ikameli numune	UK20
% 5 Taban Külü ikameli numune	TK5
% 10 Taban Külü ikameli numune	TK10
% 15 Taban Külü ikameli numune	TK15
% 20 Taban Külü ikameli numune	TK20

3.2.2. Mekanik Deneyler

Deneyisel çalışmalarda harç üretimi için kullanılacak malzeme miktarları Çizelge 3.7, verilmiştir.

Çizelge 3.7. Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Taban Külü ikameli harçlarda kullanılan malzeme miktarları

<i>Kontrol Numune</i>	<i>Çimento (gr)</i>	<i>CEN Standart Kum (gr)</i>	<i>Su (gr)</i>	
0	450	1350±5	225	
<i>YFC İkame Oranı (%)</i>	<i>Çimento (gr)</i>	<i>CEN Standart Kum (gr)</i>	<i>Su (gr)</i>	<i>Yüksek Fırın Cürufu (gr)</i>
5	427.50	1350±5	225	22,50
10	405.00	1350±5	225	45,00
15	382.50	1350±5	225	67,50
20	360.00	1350±5	225	90,00
<i>UK İkame Oranı (%)</i>	<i>Çimento (gr)</i>	<i>CEN Standart Kum (gr)</i>	<i>Su (gr)</i>	<i>Uçucu Kül (gr)</i>
5	427.50	1350±5	225	22,50
10	405.00	1350±5	225	45,00
15	382.50	1350±5	225	67,50
20	360.00	1350±5	225	90,00
<i>TK İkame Oranı (%)</i>	<i>Çimento (gr)</i>	<i>CEN Standart Kum (gr)</i>	<i>Su (gr)</i>	<i>Taban Külü (gr)</i>
5	427.50	1350±5	225	22,50
10	405.00	1350±5	225	45,00
15	382.50	1350±5	225	67,50
20	360.00	1350±5	225	90,00

Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 196-1 [76] standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney sürecinin ilk aşaması harç numunelerinin hazırlanmasıdır. Numunelerin kütlece birleşim oranları şu şekildedir; bir kısım çimento üç kısım CEN

standart kumu ve $\frac{1}{2}$ kısım su yani su/çimento oranı 0,50 olacak şekilde hazırlanmıştır. Bir kalıba yani 3 deney prizmasına yetecek her takım için, (1350 ± 5) g CEN standart kum, (450 ± 2) g çimento ve (225 ± 1) g su kullanılmıştır. İkame oranları çimento miktarından düşülerek yapılmıştır. Deneysel çalışmalar laboratuvar sıcaklığında yapılmış olup söz konusu malzemeler 0,1 g hassasiyete sahip terazide tartılmıştır.

Harç numunelerinin hazırlanması için Çizelge 3.7' de verilen miktarlarda tartılan malzemeler çimento mikseri ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi şu şekilde yapılmaktadır; karıştırıcıya su ve çimento eklenir çimento mikseri düşük hızda çalıştırılmaya başlanır ve 30 saniye karıştırılır, sonrasında kum, 30 saniye içinde sürekli olarak su çimento karışımına ilave edilir. Karıştırıcı otomatik olarak kendisini yüksek hıza ayarlar ve karıştırmaya 30 saniye daha devam edilir. Sonrasında çimento mikseri, 1 dakika 30 saniye sonra durdurulur. Çimento mikserinin kabı ve bıçağı 15 saniye sıyrıcı yardımıyla kabın içine toplanır. Sonrasında tekrardan karıştırma işlemine yüksek hızda 60 saniye daha devam edilir. Çimento mikserinden kap çıkarılır ve harç kalıplara doldurmaya hazır duruma gelir [76].

TS EN 196-1 standardına [76] uygun olarak hazırlanan harç $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki kalıplara doldurulur. Kalıplar sarsma tablasına yerleştirilir. Kalıp sarsma tablasına uygun şekilde oturtulup sıkıca tutturulur. Harç kaşık yardımıyla karıştırma kabından doğrudan her biri yaklaşık 300 g olacak şekilde kalıbın her bölümüne doldurulur. Harç tabakası yayıcı yardımıyla kalıbın her bölümüne eşit biçimde dağıtılır. Kalıba yerleştirilen birinci tabaka harç sarsma tablası yardımıyla 60 sarsma ile sıkıştırılır. Sonrasında ikinci tabaka harç kalıba doldurulur yayıcı yardımıyla tabaka düzeltilerek tekrar 60 sarsma ile sıkıştırılır. Kalıp sarsma tablasından çıkarılır harcın fazla olan kısmı metal mastar yardımıyla testere hareketi yapılarak yavaş bir biçimde alınır. Numunelerin yüzeyleri mastar yardımıyla tekrar düzeltilip markalanır. Çalışmada kalıplara dökülen numuneler Şekil 3.5'te verilmiştir [76].



Şekil 3.5. Dökümü tamamlanan harç numuneleri

Cam plâka ile kapatılan markalanmış kalıplar yatay olarak rutubet kabinine konulur. Kalıplar muhafaza edildiği yerden sökülme üzere 24 saat sonra rutubet kabininden alınır ve kalıplar numunelere zarar vermeden sökülür. Su kürü uygulanacak numuneler daha sonra tanımlanabilmeleri için, suya dayanıklı kalemle uygun şekilde işaretlenir. İşaretlenmiş çimento harç numuneleri (20 ± 1) C° 'de su bulunan Şekil 3.6'da görülen kür havuzuna uygun şekilde yatay olarak bırakılır. Numuneler, paslanmaz ızgaraların üzerine, su harç numunelerinin bütün yüzeyleri ile temas edebilecek şekilde yerleştirilir [75].



Şekil 3.6 Kür Havuzu

Numuneler 7, 28, 90 günlük su kürü sürecinden sonra kür havuzundan çıkarılır. Her bir değer için üretilen 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler çimento presinde kırılarak eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Alınan sonuçların aritmetik ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır. Çimento presinde kırılan numune örneği Şekil 3.7’de verilmiştir.

Eğilme dayanımının belirlenmesinin ardından 40×40×160 mm ebatlarındaki numunelerden altı adet bir yüzeyi 40 mm boyutunda prizmatik numuneler elde edilip Şekil 3.7’de verilen basınç presi yardımıyla basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı cihazı deney için uygun kapasitede TS EN 196-1 [76] standardına uygun olarak (2400±200) N/s yükleme hızına göre ayarlanmıştır. Eğilme deneyi neticesinde kırılan numunelerden elde edilecek yarım prizmalar cihazın plakaları arasına ±5 mm’den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek yerleştirilmiştir. Cihaz (2400±200) N/s hızla prizma numuneler kırılana kadar yükleme yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyinin neticesinde 3 adet numuneden elde edilen 6 adet numunenin basınç deneyi sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır. 6 adet sonuç içerisinde bir adet numune ortalamadan ± %10 fazla farklılık gösterdiği durumda sonuç atılarak, geri kalan 5 sonucun ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.7 Çimento presi ve kırılan numune örneği

3.2.3. Boy Uzama ve Sülfata Dayanıklılık Deneyleri

Çalışmalarda ASTM C1012 [77] standardına göre üretilen Şekil 3.8’de gösterilen 25×25×285 mm boyutlarındaki çimento harçları sodyum sülfat çözeltisinde bekletilerek harç çubukların boy değişimleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.8 ASTM C1012’ ye göre üretilen ve kürde bekletilen numuneler

ASTM C1012’ye [77] göre oluşturulan numuneler, 20 MPa basınç dayanım değerine ulaşmasının ardından sülfat çözeltisine konulmuştur. Bu amaçla 40×40×160 mm numuneler kullanılarak eğilme ve basınç dayanımları tespit edilmiş daha sonra 25×25×285 mm boyutlu harç çubuğu örnekleri 50.000 mg/l sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinde küre bırakılmış ve boy değişimleri ölçülmüştür [76].

3.2.4. Harç Numunelerinin Klor Geçirgenliği

Hızlı Klorür İyonu Geçirirmliliği tespiti için TS EN 196-1’e [76] göre hazırlanan çimento harçları ASTM C1202’ye [78] uygun olarak üretilmiştir. Üretilen numunelerde CEM I 42.5 R Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü, musluk suyu ve CEN standart kumu kullanılmıştır.

Hızlı Klorür İyonu Geçirirmliliğinde %5, %10, %15, %20 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük hızlı

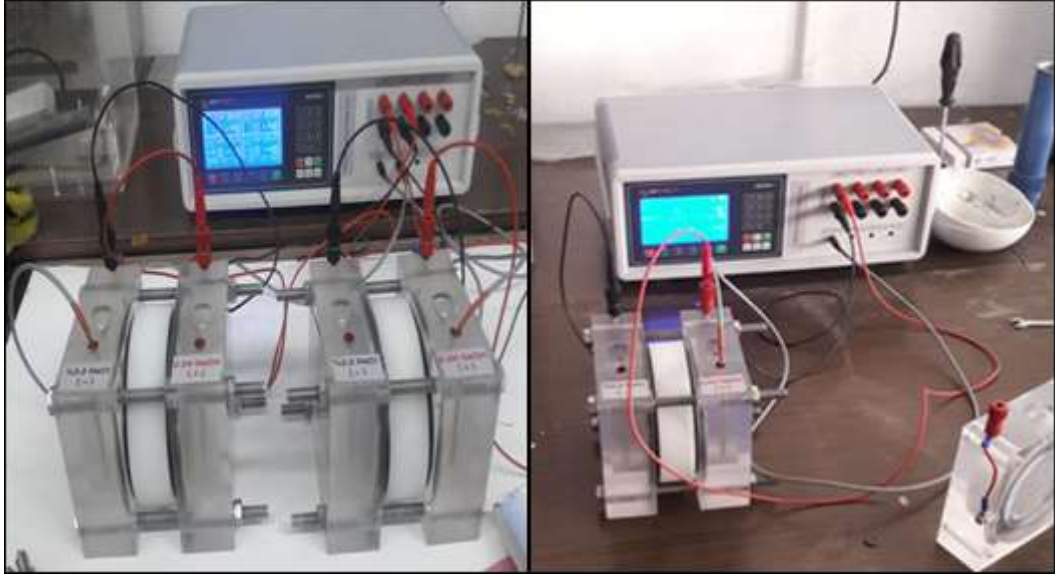
klorür iyonu geçirimsiliği ASTM C 1202'e [78] göre değerlendirilmiştir. Hazırlanan harç numunelerinin hızlı klorür iyonu geçirimsiliği sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Üretilen çimento harçları 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılmış ve 7, 28 ve 90 güne kadar $23\pm2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta suda kür edilmiştir. $\text{Ø}100\times200$ mm silindir çimento harçlarının orta kısımlarından olgunlaştırma sonrası $\text{Ø}100\times50$ mm silindirik parçalar kesilerek deney için örnekler üretilmiştir. Üretilen numuneler Şekil 3.9' da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Hızlı klorür iyonu geçirimsiliği deneyi için üretilen numuneler

Üretimi yapılan silindirik harç numunelerin bir yüzünün 0.30 N NaOH çözeltisi diğer yüzünde ise %3 NaCl çözeltisiyle temas ettirilerek deney hücresine aktarılır. Şekil 3.10' da deney hücresine alınan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deney hücresine alınan numuneler

Yapılan deneyde hazırlanan silindirik numunelerin yüzeylerine 60.0 ± 0.1 V gerilim verilir. Numune kanallarına bağlı olan veri kaydedici, 6 saatlik bir süreçte silindirik harç numunelerinden geçen akımın kaydını tutar. Tutulan kayıtlar 6 saatlik sürecin bitiminde numunelerden geçen akım Coulomb cinsinden verilir. ASTM C1202 [78] standardına göre hızlı klorür iyonu geçirimsizliğini, hesaplanan Coulomb değerlerine dayanılarak, 'Yüksek'ten' 'İhmal edilebilir' olmak üzere beş sınıfta değerlendirilebilir [77]. Bu sınıflar Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği coulomb değeri sınıfları

<i>Klorür Geçirimsizliği</i>	<i>Geçen Akım (Coulomb)</i>
<i>Yüksek</i>	>4.000
<i>Orta</i>	2.000-4.000
<i>Düşük</i>	1.000-2.000
<i>Çok Düşük</i>	100-1.000
<i>İhmal Edilebilir</i>	<100

DeneySEL çalışmaların bu bölümünde %5, %10, %15, %20 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 gün sonunda hızlı klorür iyonu geçirimsizliği incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılmak üzere her bir

ikameli harç için 4 er adet Ø100×50 mm silindirik numune üretilmiştir. Bu silindirik çimento harçları üzerinde hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi yapılmıştır.

3.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikroyapı İncelemesi

Su küründe bekletilen %5, %20 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapıların incelenmesi taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskop Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılan ve numune üzerine odaklanan elektron demetinin, numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan elastik ve elastik olmayan çarpışmaların meydana getirdiği etkilerin uygun algılayıcılarda toplanarak sinyal güçlendiricilerinden geçirilmesinin ardından katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

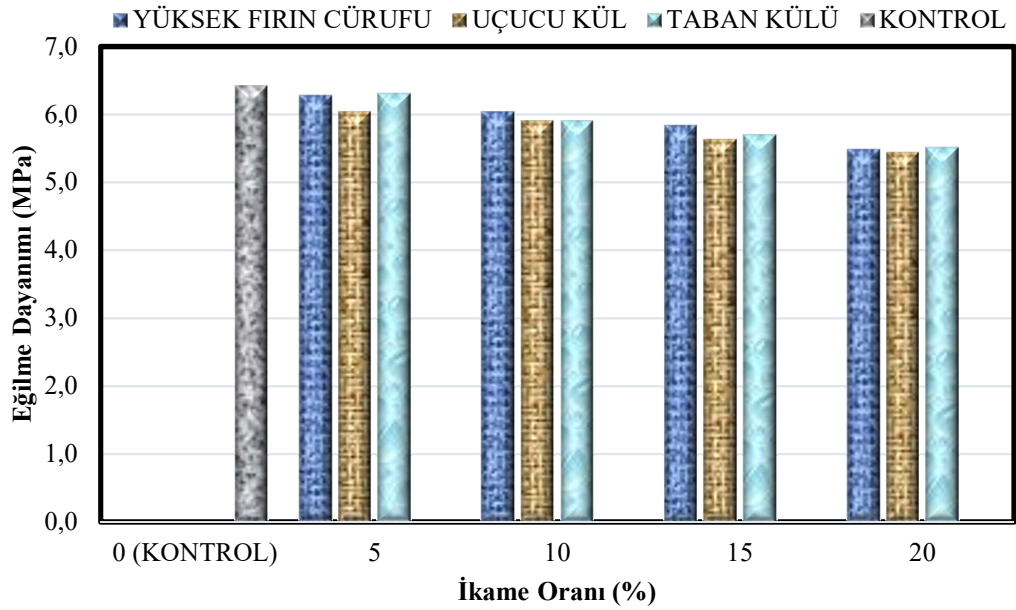
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Eğilme ve Basınç Dayanımları

Deneyssel çalışmalar kapsamında üretilen %5, %10, %15, %20 oranlarında benzer inceliğe sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli ve katkısız çimento harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

4.1.1. Eğilme Dayanımları

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 7 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımı

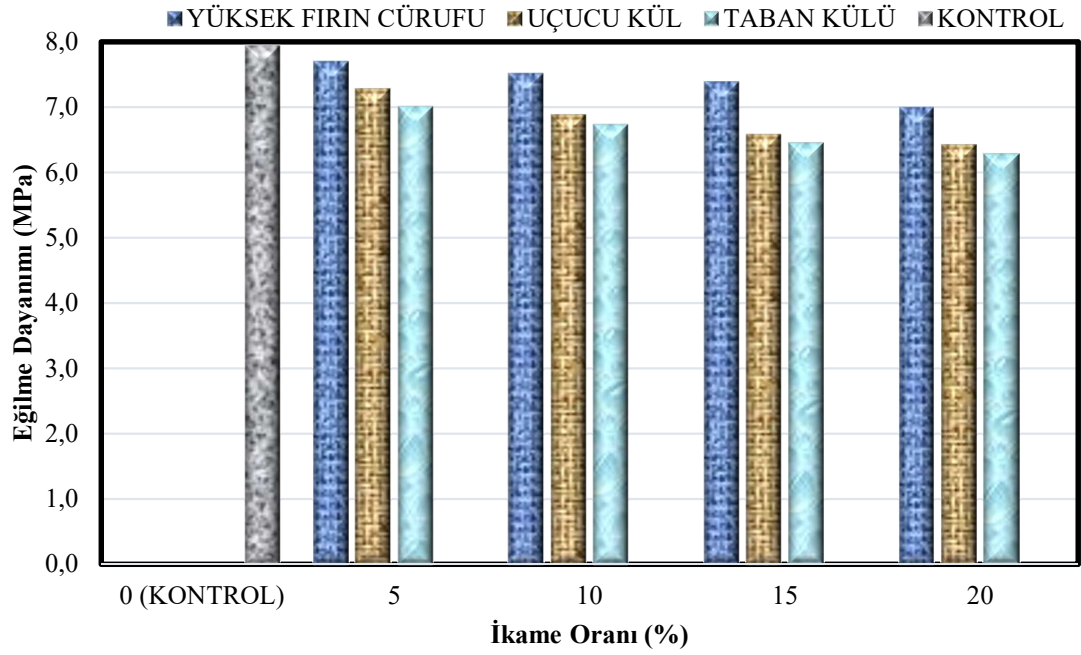
İkame edilen malzeme cinsine göre 7 günlük numuneler için eğilme dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numunelerde sırasıyla 6,27 MPa, 6,04 MPa ve 6,42 MPa olarak eğilme dayanım değerleri bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 7 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri taban külü ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımı ise uçucu kül ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 6,04 MPa, 5,91 MPa, 5,91 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 7 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olup uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin eşit olduğu gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 5,84 MPa, 5,63 MPa, 5,69 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 7 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise uçucu kül ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 5,48 MPa, 5,44 MPa ve 5,51 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 7 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri taban külü ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise uçucu kül ikameli numunelerde gözlemlenmiştir. Numunelerin 7 günlük eğilme dayanım verilerinden net sonuçlar çıkarılamamıştır.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 28 günlük eğilme dayanımı

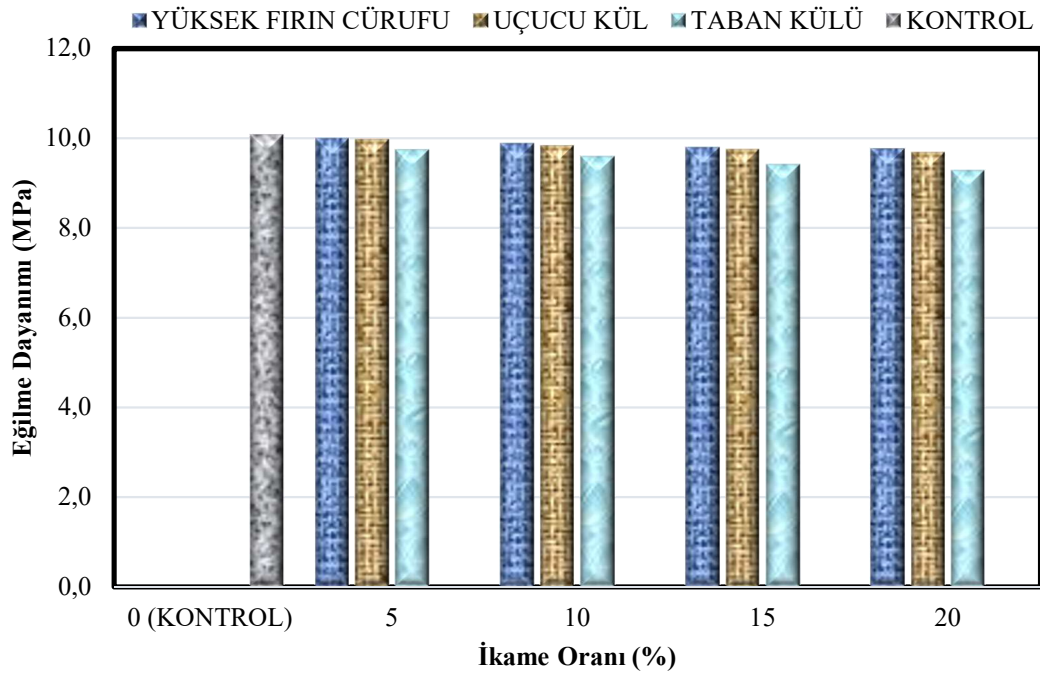
Kür süresi 28 gün olan numuneler için eğilme dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numunelerde sırasıyla 7,70 MPa, 7,28 MPa ve 7,01 MPa olarak eğilme dayanım değerleri bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 28 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 7,51 MPa, 6,88 MPa, 6,73 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 28 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olup en düşük eğilme dayanımının ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 7,39 MPa, 6,57 MPa, 6,45 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 28 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 6,99 MPa, 6,42 MPa ve 6,28 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 28 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir. Numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı verileri incelendiğinde yüksek fırın cürufu ikamesinin taban külü ve uçucu külle göre eğilme dayanımı değerini pozitif yönde etkilediği ve ikame oranı artışına bağlı olarak bütün ikame türlerinde eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli Numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 90 günlük eğilme dayanımı

Kür süresi 90 gün olan numuneler için eğilme dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numuneler için sırasıyla eğilme dayanım değerleri 9,98 MPa, 9,97 MPa ve 9,28 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 90 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli

numunelerde en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

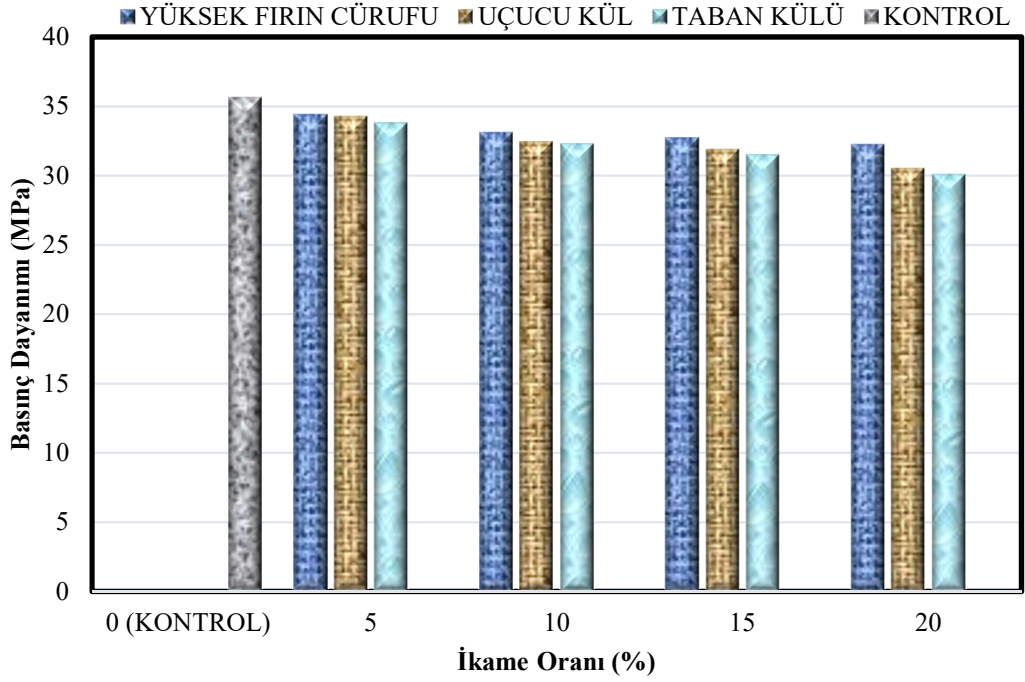
İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 9,87 MPa, 9,82 MPa, 9,60 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 90 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımı değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 9,80 MPa, 9,74 MPa, 9,41 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 90 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde eğilme dayanımları sırasıyla 9,76 MPa, 9,68 MPa ve 9,28 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 90 günlük numuneler için en yüksek eğilme dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük eğilme dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir. Numunelerin 90 günlük eğilme dayanımı verileri incelendiğinde yüksek fırın cürufu ikamesinin taban külü ve uçucu küle göre eğilme dayanımı değerini pozitif yönde etkilediği ve ikame oranı artışına bağlı olarak bütün ikame türlerinde eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

4.1.2. Basınç Dayanımları

Çalışma kapsamında üretilen %5, %10, %15, %20 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli ve katkısız çimento harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 4.4'te belirtilmiştir.



Şekil 4.4. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 7 günlük basınç dayanımı

İkame edilen malzeme cinsine göre 7 günlük numuneler için basınç dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numunelerde sırasıyla 34,36 MPa, 34,22 MPa ve 33,78 MPa olarak basınç dayanım değerleri bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 7 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanım değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük basınç dayanım değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

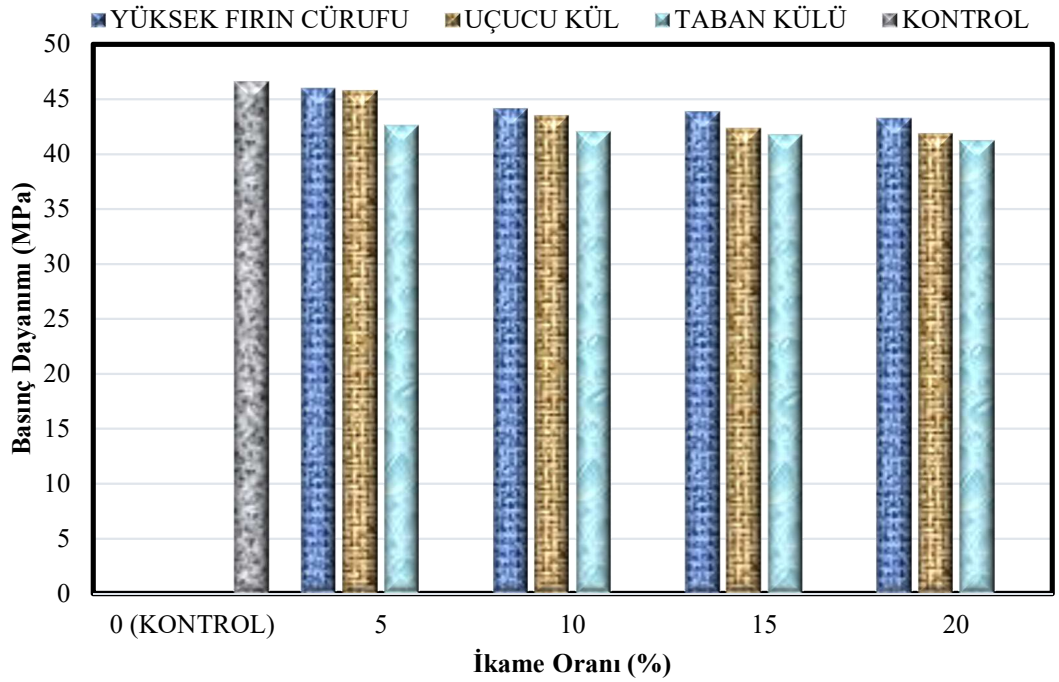
İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 33,10 MPa, 32,44 MPa, 32,31 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 7 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu, en düşük basınç dayanım değerinin ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 32,71 MPa, 31,85 MPa, 31,52 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 7 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri yüksek fırın cürufu

ikameli numunelerde, en düşük basınç dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 32,23 MPa, 30,51 MPa ve 30,05 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 7 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük basınç dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli Numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımı

Kür süresi 28 gün olan numuneler için basınç dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numunelerde sırasıyla 45,98 MPa, 45,77 MPa ve 42,60 MPa olarak basınç dayanım değerleri bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 28 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanım değeri yüksek fırın cürufu ikameli

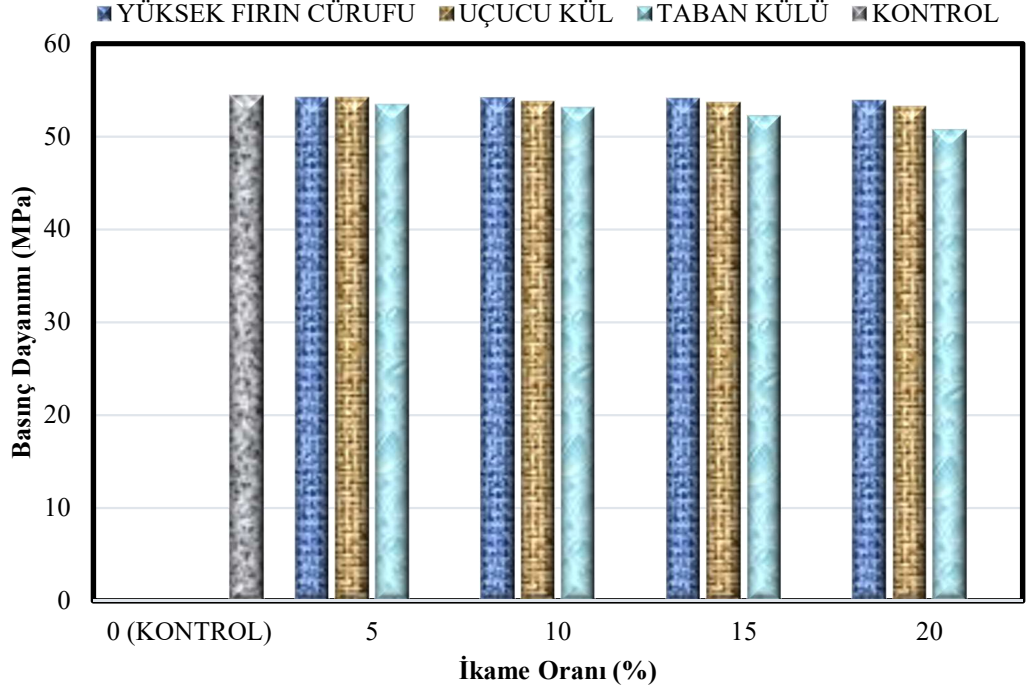
numunelerde en düşük basınç dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerde basınç dayanımları sırasıyla 44,08 MPa, 43,51 MPa, 42,04 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 28 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu en düşük basınç dayanımı ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerde basınç dayanımları sırasıyla 43,78 MPa, 42,30 MPa, 41,74 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 28 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanım değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük dayanım değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 43,17 MPa, 41,88 MPa ve 41,17 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 28 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanım değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük basınç dayanım değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli Numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 90 günlük basınç dayanımları Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. YFC, UK, TK ikameli çimento harçlarının 90 günlük basınç dayanımı

Kür süresi 90 gün olan numuneler için basınç dayanımları incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5, UK5, TK5 numuneler için sırasıyla basınç dayanım değerleri 54,21 MPa, 54,15 MPa ve 53,44 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 90 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük basınç dayanımı değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %10 olan YFC10, UK10, TK10 numunelerde basınç dayanımları sırasıyla 54,11 MPa, 53,72 MPa, 53,11 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 90 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük basınç dayanımı değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15, UK15, TK15 numunelerde basınç dayanımları sırasıyla 54,07 MPa, 53,59 MPa, 52,23 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 90 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanım değeri yüksek fırın cürufu ikameli

numunelerde, en düşük basınç dayanımı değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20, UK20, TK20 numunelerinde basınç dayanımları sırasıyla 53,87 MPa, 53,23 MPa ve 50,74 MPa olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 90 günlük numuneler için en yüksek basınç dayanımı değeri yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde, en düşük basınç dayanımı değeri ise taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Benzer özgül yüzey alanına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin basınç dayanım sonuçları genel olarak incelendiğinde yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin basınç dayanımlarının en yüksek değeri aldığı, sonrasında uçucu kül ikameli numunelerin bulunduğu ve en düşük değerlerin ise taban külü ikameli numunelerin aldığı gözlemlenmiştir. Çimentoya ikame edilen bu yapay puzolanların kimyasal özelliklerine bakıldığında, çimentonun bağlayıcılık özelliği kazanmasında ve ilk-nihai dayanımının oluşumunda temel rol üstlenen alit (C_3S), belit (C_2S) oluşumunu sağlayan silisyum oksit (SiO_2), kalsiyum oksit (CaO) bileşenlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’ de belirtildiği üzere Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külünün kalsiyum oksit (CaO) miktarları sırasıyla %39,60, %13,89, %6,35’tir. Bu malzemelerin kimyasal yapısında bulunan silisyum oksit (SiO_2) miktarı Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü için sırasıyla % 35,10, %45,10 ve %41,10’dur. Her ne kadar silisyum oksit (SiO_2) miktarı en yüksek olan malzeme uçucu kül olsa da kalsiyum oksit (CaO) miktarının düşük olmasından dolayı alit (C_3S), belit (C_2S) oluşumuna yüksek fırın cürufu kadar katkı sağlayamamıştır. Bu nedenle yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin basınç dayanım değerleri uçucu kül ve taban külü ikameli numunelere göre yüksektir. Ayrıca uçucu kül ikameli numunelerin de silisyum oksit (SiO_2) ve kalsiyum oksit (CaO) miktarları taban külünün kimyasal kompozisyonuna göre daha fazla olması uçucu külün dayanım değerlerinin taban külünden fazla olmasına neden olmuştur.

4.2. Harç Çubuklarının Sülfata Karşı Boyca Uzaması

Bu bölümde ASTM C1012 “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution” standardına göre üretilen 25×25×285 mm boyutlarındaki %5, %10, %15, %20 ikame oranına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numuneler 50.000 mg/lit sodyum sülfat çözeltisinde (SS) ve normal su küründe (NS) bekletilerek harç çubuklarının boyca değişimleri tespit edilmiştir [77].

Yüksek fırın cürufu ikame edilerek üretilen harç numunelerinin boy uzama değerleri Çizelge 4.1’da verilmiştir.

Çizelge 4.1. YFC İkameli numunelerin NS ve SS küründe boyca uzama değerleri (%)

Numune Kodu	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
KN (NS)	0,0019	0,0156	0,0270
YFC5 (NS)	0,0016	0,0140	0,0261
YFC10 (NS)	0,0015	0,0133	0,0250
YFC15 (NS)	0,0015	0,0129	0,0239
YFC20 (NS)	0,0012	0,0122	0,0225
KN (SS)	0,0017	0,0161	0,0329
YFC5 (SS)	0,0016	0,0153	0,0314
YFC10 (SS)	0,0015	0,0142	0,0308
YFC15 (SS)	0,0014	0,0130	0,0297
YFC20 (SS)	0,0015	0,0126	0,0285

Numunelerin 7 günlük kür süresi için boy uzama değerleri incelendiğinde boy uzama değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemekle birlikte en fazla boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan kontrol numunelerinde %0,0019 oranında olduğu görülmüştür. En az boy uzama değeri ise %20 yüksek fırın cürufu ikame edilen ve su küründe olgunlaştırılan YFC20 numunelerinde %0,0012 olarak görülmüştür.

Erken kür süresinde numunelerde beklenildiği gibi belirgin boy uzama değişiklikleri tespit edilememiştir.

Kür süresi 28 gün olan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan katkısız kontrol numunelerinde %0,0161 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 yüksek fırın cürufu içeren normal su küründe olgunlaştırılan YFC20 numunelerinde %0,0122 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, YFC5, YFC10, YFC15, YFC20 numunelerin boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0156, %0,0140, %0,0133, %0,0129, %0,0122 olarak bulunmuş ve yüksek fırın cürufu ikamesindeki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan KN, YFC5, YFC10, YFC15, YFC20 numunelerinde boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0161, %0,0153, %0,0142, %0,0130, %0,0126 olarak bulunmuş ve yüksek fırın cürufu ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

Boy uzama değerleri, kür süresi 90 gün olan yüksek fırın cürufu ikameli numuneler için incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan katkısız KN numunelerinde %0,0329 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 yüksek fırın cürufu içeren normal su küründe olgunlaştırılan YFC20 numunelerinde %0,0225 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin, aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek oranda olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, YFC5, YFC10, YFC15, YFC20 numunelerin boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0270, %0,0261, %0,0250, %0,0239, %0,0225 olarak bulunmuş ve yüksek fırın cürufu ikame oranındaki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan KN, YFC5, YFC10, YFC15, YFC20 numunelerinde boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0329, %0,0314, %0,0308, %0,0297, %0,0285 olarak bulunmuş ve yüksek fırın cürufu ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.2. UK İkameli numunelerin NS ve SS küründe boyca uzama değerleri

Numune Kodu	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
KN (NS)	0,0019	0,0156	0,0270
UK5 (NS)	0,0017	0,0145	0,0266
UK10 (NS)	0,0016	0,0137	0,0254
UK15 (NS)	0,0014	0,0134	0,0244
UK20 (NS)	0,0013	0,0129	0,0231
KN (SS)	0,0017	0,0161	0,0329
UK5 (SS)	0,0018	0,0158	0,0320
UK10 (SS)	0,0017	0,0146	0,0312
UK15 (SS)	0,0017	0,0135	0,0304
UK20 (SS)	0,0015	0,0132	0,0292

Uçucu Kül ikame edilerek üretilen harç numunelerinin boy uzama değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunelerin 7 günlük kür süresi için boy uzama değerleri incelendiğinde boy uzama değerlerinde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmekle birlikte en fazla boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan ikamesiz KN numunelerinde %0,0019 oranında olduğu görülmüştür. En az boy uzama değeri ise %20 uçucu kül ikame edilen ve normal su küründe olgunlaştırılan UK20 numunelerinde %0,0013 olarak görülmüştür. Erken kür süresinde numunelerde beklenildiği gibi belirgin boy uzama değişiklikleri tespit edilememiştir.

Kür süresi 28 gün olan uçucu kül ikameli numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan kontrol numunelerinde %0,0161 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 uçucu kül içeren normal su küründe olgunlaştırılan UK20 numunelerinde %0,0129 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, UK5, UK10, UK15, UK20 numunelerin boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0156, %0,0145, %0,0137, %0,0134, %0,0129 olarak bulunmuş ve uçucu kül ikame oranındaki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe

olgunlaştırılan KN, UK5, SSUK10, UK15, UK20 numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0161, %0,0158, %0,0146, %0,0135, %0,0132 olarak bulunmuş ve uçucu kül ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

Boy uzama değerleri, kür süresi 90 gün olan uçucu kül ikameli numuneler için incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan kontrol numunelerinde %0,0329 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 uçucu kül içeren normal su küründe olgunlaştırılan UK20 numunelerinde %0,0231 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin, aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek oranda olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, UK5, UK10, UK15, UK20 numunelerin boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0270, %0,0266, %0,0254, %0,0244, %0,0231 olarak bulunmuş ve uçucu kül ikame oranındaki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan UK0, UK5, UK10, UK15, UK20 numunelerinde boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0329, %0,0320, %0,0312, %0,0304, %0,0292 olarak bulunmuş ve uçucu kül ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.3. TK İkameli numunelerin NS ve SS küründe boyca uzama değerleri

Numune Kodu	7 GÜN	28 GÜN	90 GÜN
KN (NS)	0,0019	0,0156	0,0270
TK5 (NS)	0,0021	0,0155	0,0257
TK10 (NS)	0,0018	0,0150	0,0241
TK15 (NS)	0,0016	0,0143	0,0232
TK20 (NS)	0,0016	0,0130	0,0225
KN (SS)	0,0017	0,0161	0,0329
TK5 (SS)	0,0022	0,0170	0,0340
TK10 (SS)	0,0020	0,0165	0,0324
TK15 (SS)	0,0018	0,0154	0,0309
TK20 (SS)	0,0017	0,0140	0,0288

Taban Külü ikame edilerek üretilen harç numunelerinin boy uzama değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Numunelerin 7 günlük kür süresi için boy uzama değerleri incelendiğinde boy uzama değerlerinde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmekle birlikte en fazla boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan %5 taban külü ikameli TK5 numunelerinde %0,0022 oranında olduğu görülmüştür. En az boy uzama değeri ise %15 ve %20 taban külü ikame edilen normal su küründe olgunlaştırılan TK15 ve TK20 numunelerinde %0,0016 olarak görülmüştür. Erken kür süresinde numunelerde beklenildiği gibi belirgin boy uzama değişiklikleri tespit edilememiştir.

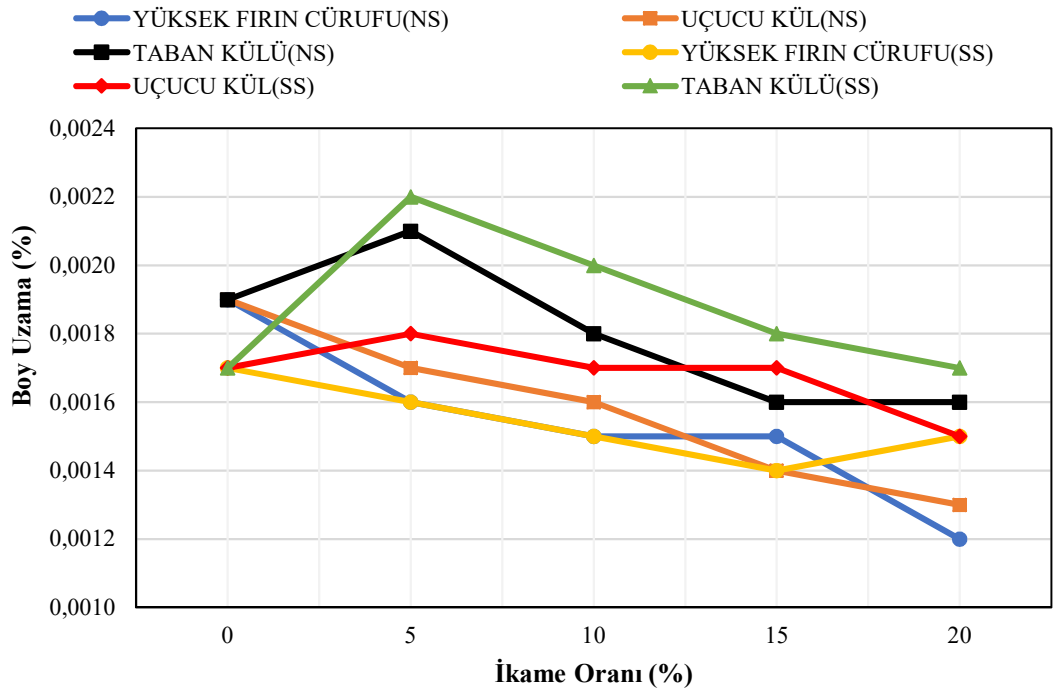
Kür süresi 28 gün olan taban külü ikameli numunelerin boy uzama değerleri incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan %5 taban külü ikame edilen TK5 numunelerinde %0,0170 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 taban külü içeren normal su küründe olgunlaştırılan TK20 numunelerinde %0,0130 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, TK5, TK10, TK15, TK20 numunelerin boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0156, %0,0155, %0,0150, %0,0143, %0,0130 olarak bulunmuş ve taban külü ikame oranındaki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan KN, TK5, TK10, TK15, TK20 numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0161, %0,0170, %0,0165, %0,0154, %0,0140 olarak bulunmuş ve taban külü ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

Boy uzama değerleri, kür süresi 90 gün olan taban külü ikameli numuneler için incelendiğinde en yüksek boy uzama değerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan %5 taban külü içeren TK5 numunelerinde %0,0340 olduğu, en düşük boy uzama değerinin ise %20 taban külü içeren normal su küründe olgunlaştırılan TK20 numunelerinde %0,0225 olduğu belirlenmiştir. Sodyum sülfat küründe bekletilen numunelerde boyca uzama değerlerinin, aynı ikame oranında normal su küründe olgunlaştırılan numunelere göre daha yüksek oranda olduğu tespit edilmiştir. Normal su küründe olgunlaştırılan KN, TK5, TK10, TK15, TK20 numunelerin boyca uzama

değerleri sırasıyla %0,0270, %0,0257, %0,0241, %0,0232, %0,0225 olarak bulunmuş ve taban külü ikame oranındaki artışa bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür. Sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan KN, TK5, TK10, TK15, TK20 numunelerin de boyca uzama değerleri sırasıyla %0,0329, %0,0340, %0,0324, %0,0309, %0,0288 olarak bulunmuş ve taban külü ikame oranının artışına bağlı olarak boyca uzama değerinin azaldığı görülmüştür.

TK, UK, YFC İkameli numunelerin boy uzamalarının karşılaştırılması

Çalışma kapsamında üretilen %5, %10, %15, %20 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli ve katkısız çimento harç numunelerinin 7 günlük normal su ve sodyum sülfat küründe boyca uzama değerleri Şekil 4.7’de belirtilmiştir.



Şekil 4.7. TK, UK, YFC İkameli numunelerin NS ve SS küründe 7 günlük boyca uzama değerleri

İkame edilen malzeme cinsine göre 7 günlük numuneler için boy uzama değerleri incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5 (NS), UK5 (NS), TK5 (NS), YFC5

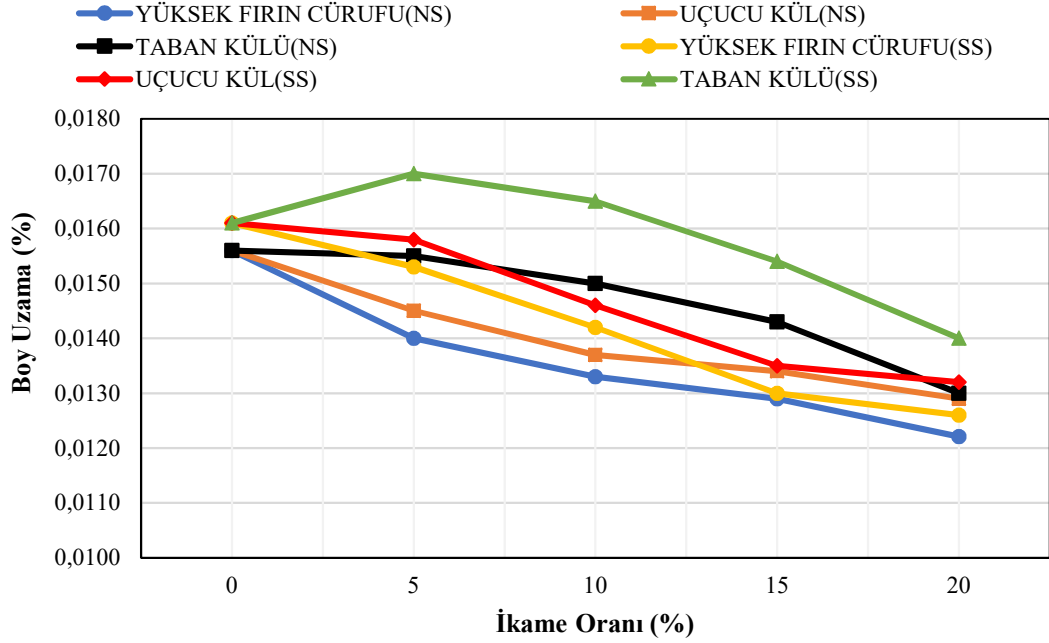
(SS), UK5 (SS), TK5 (SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0016, %0,0017, %0,0021, %0,0016, %0,0018, %0,0022 olarak bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 7 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numuneler ile sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan uçucu kül ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame edilen malzeme cinsine göre 7 günlük numuneler için boy uzama değerleri incelendiğinde, %10 ikame oranına sahip YFC10 (NS), UK10 (NS), TK10 (NS), YFC10 (SS), UK10 (SS), TK10 (SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0015, %0,0016, %0,0018, %0,0015, %0,0017, %0,0020 olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 7 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numuneler ile sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15 (NS), UK15 (NS), TK15 (NS), YFC15 (SS), UK15 (SS), TK15 (SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0015, %0,0014, %0,0016, %0,0014, %0,0017, %0,0018 olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 7 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan uçucu kül ikameli numuneler ile sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20 (NS), UK20 (NS), TK20 (NS), YFC20 (SS), UK20 (SS), TK20 (SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0012, %0,0013, %0,0016, %0,0015, %0,0015, %0,0017 olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 7 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 28 günlük normal su ve sodyum sülfat küründe boyca uzama değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. TK, UK, YFC İkameli numunelerin NS ve SS küründe 28 günlük boyca uzama değerleri

İkame edilen malzeme cinsine göre 28 günlük numuneler için boy uzama değerleri incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5 (NS), UK5 (NS), TK5 (NS), YFC5 (SS), UK5 (SS), TK5(SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0140, %0,0145, %0,0155, %0,0153, %0,0158, %0,0170 olarak bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 28 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numuneler numunelerde gözlemlenmiştir.

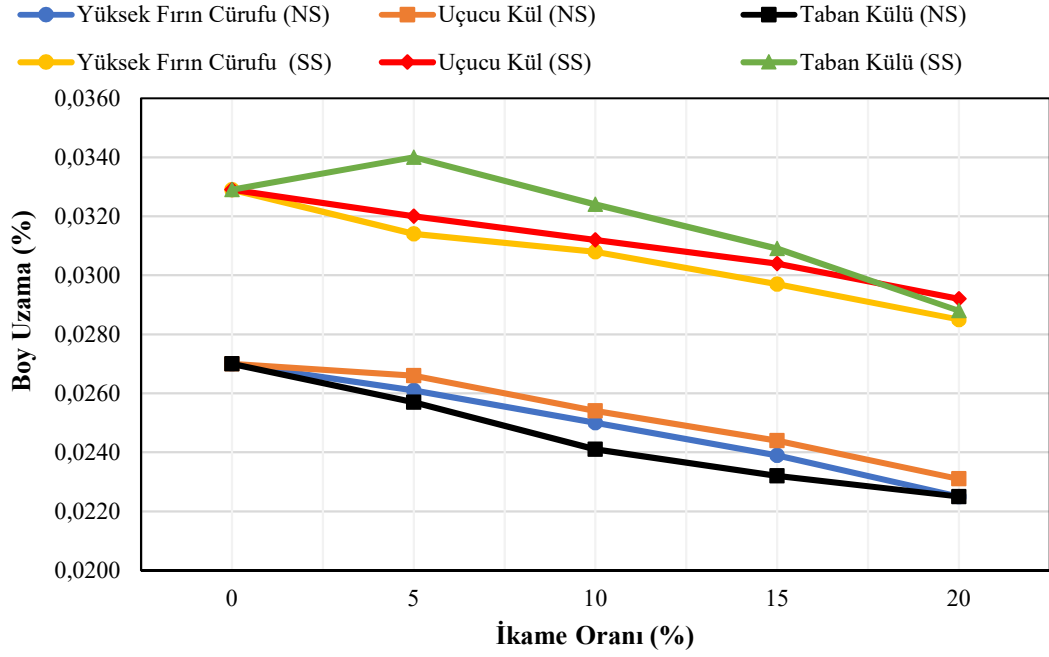
İkame oranı %10 olan YFC10 (NS), UK10 (NS), TK10 (NS), YFC10 (SS), UK10 (SS), TK10 (SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0133, 0,0137, %0,0150, %0,0142, %0,0146, %0,0165 olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 28 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe

olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15 (NS), UK15 (NS), TK15 (NS), YFC15 (SS), UK15 (SS), TK15 (SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0129, %0,0134, %0,0143, %0,0130, %0,0135, %0,0154 olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 28 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20 (NS), UK20 (NS), TK20 (NS), YFC20 (SS), UK20 (SS), TK20 (SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0122, %0,0129, %0,0130, 0,0126, %0,0132, %0,0140 olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 28 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli Numunelerin %5, %10, %15, %20 ikame oranlarına göre 90 günlük normal su ve sodyum sülfat küründe boyca uzama değerleri Şekil 4.9'de verilmiştir.



Şekil 4.9. TK, UK, YFC İkameli numunelerin NS ve SS küründe 90 günlük boyca uzama değerleri

İkame edilen malzeme cinsine göre 90 günlük numuneler için boy uzama değerleri incelendiğinde, %5 ikame oranına sahip YFC5 (NS), UK5 (NS), TK5 (NS), YFC5 (SS), UK5 (SS), TK5 (SS) numunelerinde boy uzama oranları sırasıyla %0,0261, %0,0266, %0,0257, %0,0314, %0,0320, %0,0340 olarak bulunmuştur. İkame oranı %5 olan 90 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %10 olan YFC10 (NS), UK10 (NS), TK10 (NS), YFC10 (SS), UK10 (SS), TK10 (SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0250, %0,0254, %0,0241, %0,0308, %0,0312, %0,0324 olarak bulunmuştur. İkame oranı %10 olan 90 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %15 olan YFC15 (NS), UK15(NS), TK15(NS), YFC15(SS), UK15(SS), TK15(SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0239, %0,0244, %0,0232, %0,0297, %0,0304, %0,0309 olarak bulunmuştur. İkame oranı %15 olan 90 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

İkame oranı %20 olan YFC20 (NS), UK20 (NS), TK20 (NS), YFC20 (SS), UK20 (SS), TK20 (SS) numunelerinde boy uzama değerleri sırasıyla %0,0225, %0,0231, %0,0225, %0,0314, %0,0320, %0,0288 olarak bulunmuştur. İkame oranı %20 olan 90 günlük numuneler için en yüksek boy uzama değeri sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan uçucu kül ikameli numunelerde en düşük boy uzama değeri ise normal su küründe olgunlaştırılan yüksek fırın cürufu ve taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir.

Çimento bağlayıcı kompozit ikameli harç çubuklarında boy uzama değerleri ikame oranına bağlı olarak azalmaktadır. Ancak kısa süreli kür dönemlerinde belirgin farklılıklar gözlenmemektedir. Beton durabilitesinin önemli ölçülerinden biri olan sülfata karşı dayanıklılık hususunda 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin uçucu kül ve taban külü ikameli numunelere göre daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Taban külü ikameli numunelerin ise sülfata dayanıklılığının daha az olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak C-H ve C-S-H jelleri çimento harcının yapısında yoğunlaşmakta ve bu da çimentonun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Harç numunelerinin geçirimsizliğinin azalmasına bağlı olarak da sülfat saldırısı azalmaktadır. Bu nedenle yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin boy uzama değerleri uçucu kül ve taban külü ikameli numunelere göre daha azdır.

4.3. Klor Geçirgenliği

Çalışmanın bu kısmında TS EN 196-1'e göre üretilen %5, %10, %15, %20 ikame oranına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 7, 28 ve 90 günlük olgunlaşma süreleri içerisinde ASTM C1202' ye göre hızlı klorür iyonu

geçirimliliği incelenmiştir [78]. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde toplam 52 adet Ø100×50 mm silindirik çimento harcı hızlı klorür iyonu geçirimliliği deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak Çizelge 4.4’ de verilen değerler bulunmuştur.

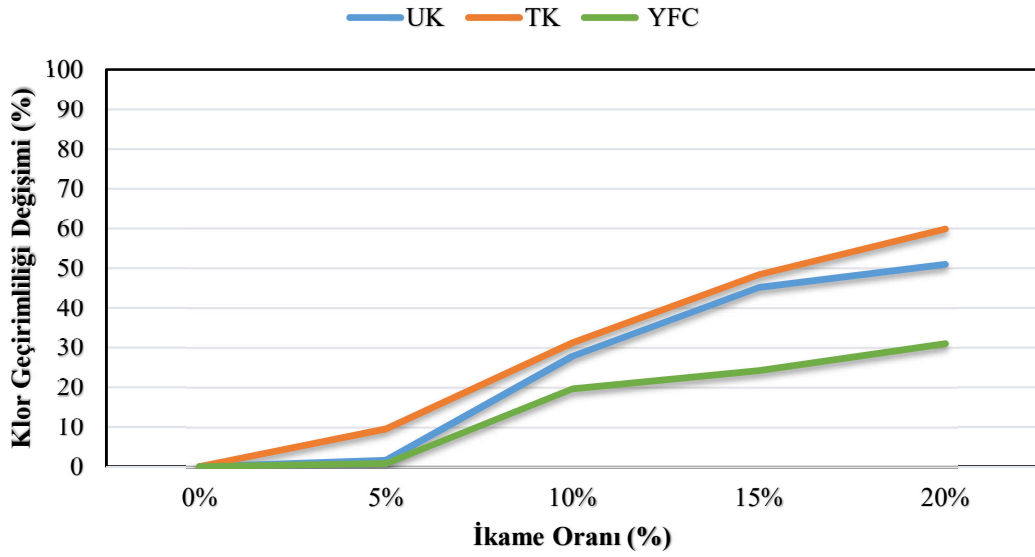
Çizelge 4.4. TK, UK, YFC İkameli numunelerin klor geçirimliliği sonuçları (C)

Numune Kodu	7-gün	28-gün	90-gün
KN	4515	3085	2077
UK5	4587	3497	2078
UK10	5769	3754	2008
UK15	6551	4066	1961
UK20	6814	4341	1830
TK5	4941	3579	2177
TK10	5921	3843	2151
TK15	6697	4152	2088
TK20	7216	4533	1995
YFC5	4549	3278	1888
YFC10	5397	3336	1842
YFC15	5607	3541	1791
YFC20	5912	3890	1609

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin 7, 28 ve 90 günlük olgunlaşma süreleri sonunda zamana bağlı olarak Coulomb (C) cinsinden klor iyonu geçirimliliği değerlendirildiğinde kür süresine bağlı olarak hızlı klor iyonu geçirimliliğinin azaldığı ve durabilitenin arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin 7 günlük olgunlaşma süresinde yüksek klor geçirimliliğine sahipken 28 günlük numunelerde ve 90 günlük numunelerde bu oran Çizelge 4.4’te görüleceği üzere azalmıştır.

Klor iyonu geçirimliliği 7 günlük numuneler arasında en yüksek klor geçirimliliği %20 taban külü ikame edilen TK20 numunelerde en düşük klor geçirimliliği ise ikamesiz

harç numunelerinde gözlemlenmiştir. 28 günlük numuneler arasında yapılan değerlendirmede en yüksek klor geçirimsiliği %20 taban külü ikameli numunelerde en düşük klor geçirimsiliği ise ikamesiz numunelerde olduğu tespit edilmiş ve 90 günlük geçirimsilikte aynı şekilde %20 taban külü ikameli numuneler en fazla klor geçirimsiliğini ikamesiz numuneler ise en yüksek klor geçirimsiliğine sahip olmuştur. Burada kür süresindeki artışa bağlı olarak farklı oranlarda ve farklı ikame malzemelerinde geçirimsilik değerleri arasındaki fark azalma eğilimindedir.



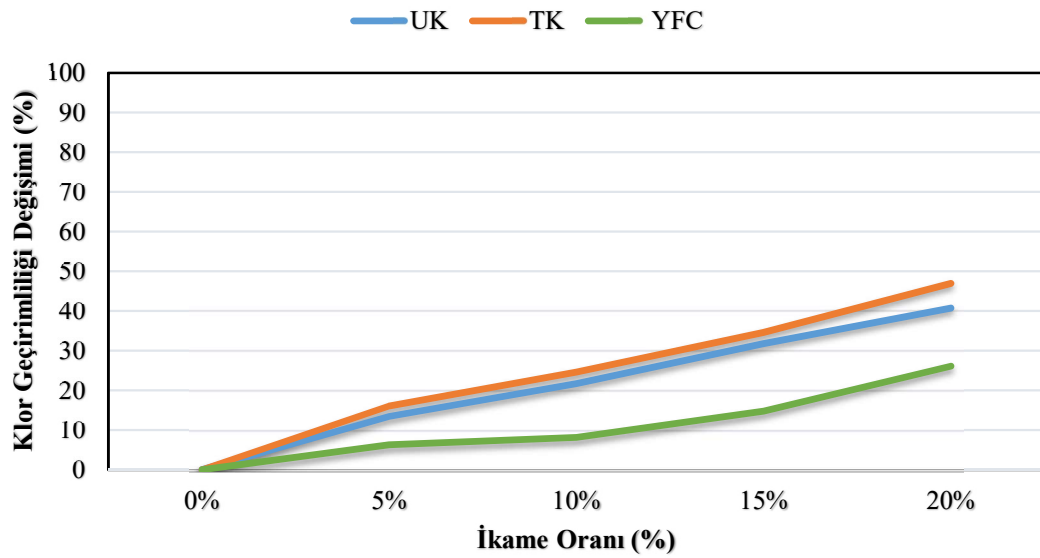
Şekil 4.10. TK, UK, YFC İkameli numunelerin 7 günlük klor geçirimsiliği (%) değişimi

Farklı ikame türlerine ve oranlarına sahip numunelerin, ikamesiz çimento harç numuneleri baz alınarak klor geçirimsiliklerinin 7 günlük kür süresi içinde yüzde değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Bütün ikame oranlarında en az klor geçirimsiliğinin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu ve bu değişimin ikame miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikamesinin %5 olduğu numunelerde klor geçirimsiliğindeki değişim %1 artmışken %20 yüksek fırın cürufu ikamesinde bu oran %31'e kadar çıkmıştır.

Uçucu külün 7 günlük kür süresinde klor geçirimsiliğinin ikame oranına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelere göre uçucu külün klor geçirimsiliği daha fazladır. Uçucu kül ikamesi %5 olan numunelerde klor geçirimsiliği

ikamesiz numunelere göre %2 artmışken, ikame oranı %20'ye geldiğinde bu değer %51 olmuştur.

Olgunlaştırma süresi 7 gün olan numunelerde ne yüksek klor geçirimliliği yüzde değişimi taban külü ikameli numunelerde gözlemlenmiştir. Taban külü ikame oranı artışına bağlı olarak klor geçirimliliği artmıştır. Taban külü ikame oranı %5 olan numuneler için klor geçirimliliği ikamesiz numunelere göre %9 artmışken %20 taban külü ikameli numunelerde bu oran %60'lara çıkmaktadır.

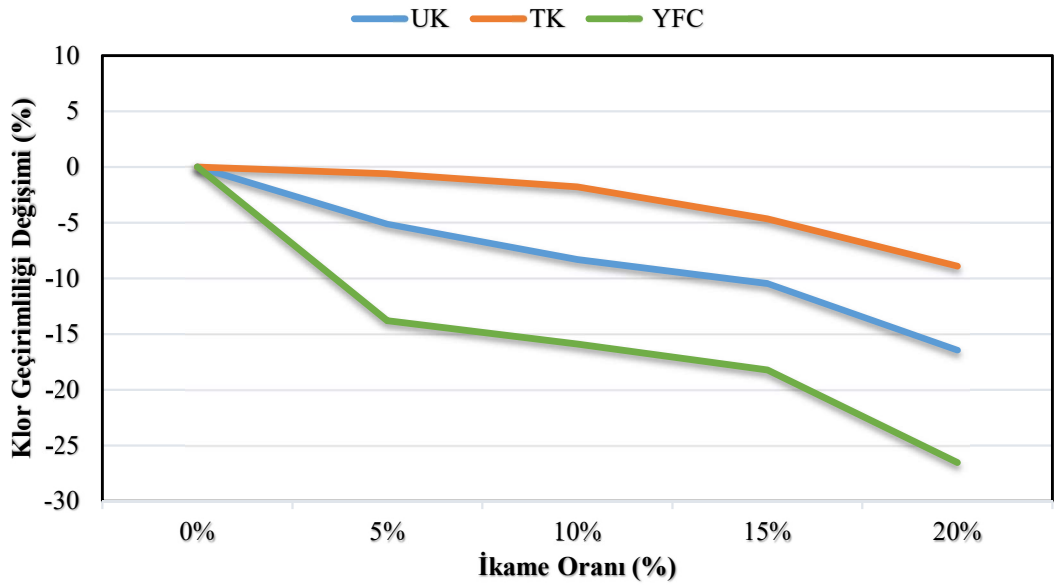


Şekil 4.11. TK, UK, YFC İkameli numunelerin 28 günlük klor geçirimliliği (%) değişimi

Çimento bağlayıcı kompozitlerin 28 günlük kür süresi içerisinde ikamesiz harç numunelerine göre klor iyonu geçirimlilikleri incelendiğinde 7 günlük numunelere göre değişim oranlarının azaldığı görülmektedir. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük klor geçirimliliği oranları görülmekte olup en yüksek klor geçirimliliği oranları da taban külü ikameli numunelerde görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikamesi %5 olan numunelerde klor iyonu geçirimliliği ikamesiz numunelere göre %6 daha fazla iken %20 yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde bu oran %26'ya çıkmıştır. Uçucu kül ikameli numunelerde klor geçirimliliği 7 günlük numunelerde olduğu gibi yüksek fırın cürufu ikameli numunelere göre daha fazladır. Uçucu kül

ikamesi %5 olan numunelerde klor iyonu geçirimsiliği %13 oranında artmışken ikame oranına bağlı olarak bu oran artmış ve %20 uçucu kül ikameli numunelerde klor iyonu geçirimsiliği %41 artmıştır.

Taban külü ikameli numunelerin 28 günlük klor iyonu geçirimsiliği oranları incelendiğinde en yüksek klor geçirimsiliği oranına sahip olduğu görülmüştür ancak 28 günlük değerlerde taban külü ikameli numunelerin klor iyonu geçirimsilik oranları uçucu kül ikameli numunelere yaklaşmıştır. İkame oranı %5 olan taban külü numuneleri için klor iyonu geçirimsilik oranı %16 artmışken bu oran %20 taban külü ikameli numunelerde %47'ye çıkmıştır. Taban külü ve uçucu kül ikameli numuneler için klor iyonu geçirimsiliği yakın olmakla birlikte taban külünün klor iyonu geçirimsiliğinin fazla durabilesinin daha az olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.12. TK, UK, YFC İkameli numunelerin 90 günlük klor geçirimsiliği (%) değişimi

Çalışmada üretilen numunelerin 90 günlük kür süresi içerisinde ikamesiz harç numunelerine göre klor iyonu geçirimsilikleri incelendiğinde 7 ve 28 günlük numunelere göre değişim oranlarının azaldığı görülmektedir. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük klor geçirimsiliği oranları görülmekte olup en yüksek klor geçirimsiliği oranları da taban külü ikameli numunelerde görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikamesi %5 olan numunelerde klor iyonu geçirimsiliği ikamesiz

numunelere göre %14 daha az iken %20 yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde bu azalma oranı %27'ye kadar çıkmıştır.

Uçucu kül ikameli numunelerde klor geçirimliliği 7 ve 28 günlük numunelerde olduğu gibi yüksek fırın cürufu ikameli numunelere göre daha fazladır. Uçucu kül ikamesi %5 olan numunelerde klor iyonu geçirimliliği katkısız numunelere göre %5 oranında azalmıştır. İkame oranına bağlı olarak klor geçirimliliği oranı azalmıştır ve %20 uçucu kül ikameli numunelerde klor iyonu geçirimliliği %16 azalmıştır.

Taban külü ikameli numunelerin 90 günlük klor iyonu geçirimliliği oranları incelendiğinde en yüksek geçirimlilik oranına sahip olduğu görülmüştür. İkame oranı %5 olan taban külü numunelerin ikamesiz numunelere göre klor iyonu geçirimliliği %1 azalmışken bu azalma oranı %20 taban külü ikameli numunelerde %9'a çıkmıştır.

4.4. Mikroyapı İncelemesi

Çalışmanın bu bölümünde su küründe olgunlaştırılan %5 ve %20 ikame oranlarına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapıların incelenmesi taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yapılmıştır.

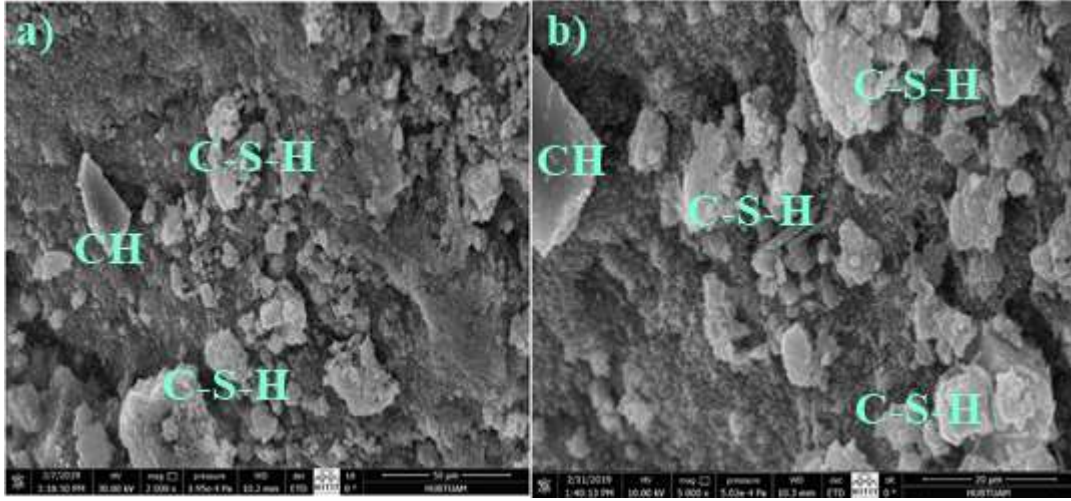
Çimento harcının mikroyapısında kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum hidroksit (C-H), gecikmiş etrenjit ve tomasit gibi fazlar bulunmaktadır. Kalsiyum silikat hidrat jelleri, hidratasyon sürecinin ilerlemesiyle birlikte çimento hamurunun özelliklerini etkileyen en önemli fazdır. C-S-H jellerinin morfolojik yapısı ise zayıf kristalin liflerden ağsı bir yapı kazanması şeklindedir. C-S-H jelleri hidratasyon sürecinin erken dönemlerinde, düşük yoğunluklu ince tabakalar oluşturarak su dolu boşluklara doğru gelişir. Hidratasyon sürecinin ilerlemesiyle birlikte ise C-S-H hidrate olmuş çimento partiküllerinin etrafında yoğunlaşır ve tüm tanecikleri kaplar. C-H morfolojisi yapısal olarak genellikle tanımsız bir şekilden büyük plakların kümelenmesine doğru değişkenlik gösteren bir yapıya sahiptir. C-S-H jelleri ile karşılaştırıldığında yüzey alanının düşük olmasına bağlı olarak dayanıma katkısı azdır [79].

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin ve katkısız numunelerin mikro yapı incelemelerinin kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum hidroksit (C-H) gelişimleri elektron mikroskobu ile 2000× ve 5000× büyütmelede incelenmiştir.

4.4.1 Katkısız Numunelerin Mikroyapısı

Katkısız numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri şekil 4.16'da verilmiştir. Görüntülerde 2000× ve 5000× büyütmelede C-S-H jellerinin 7 günlük numunelerde gelişmeye başladığı ve C-H jellerinin olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde C-S-H yoğunluğunun artmaya başladığı ve C-H jellerinin üzerini kaplayarak geliştiği görülmektedir. C-H jellerinin boyu 20 µm büyüklüklerine ulaşmakta olup C-S-H jelleri ise 5 µm boyutlarında erken dayanım sürecinde ilk gelişim sürecindedir.

Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri şekil 4.17'de verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağısı bir yapıya ulaşarak tüm yüzeyi kapladığı görülmektedir. Yapıda bulunan C-H jelleri C-S-H jellerinin ağısı yapısıyla kaplanmıştır. C-S-H jelleri hidratasyon sürecinde çimento harcının yapısında bulunan boşlukları doldurmaktadır. Numunelerin 2000× ve 5000× lik görüntülerinde . C-S-H jellerinin ağısı yapısının çimento harcında bulunan boşluklu yapıyı doldurma biçimi görülmüştür. Numunelerin 7 günlük görüntülerinde 5000× büyütmede yaklaşık 2 µm büyüklüğünde gözlenen C-S-H jelleri 28 günlük numunelerde yaklaşık 20 µm boyutuna ulaşmakta ve tüm yapıyı kaplamaktadır.

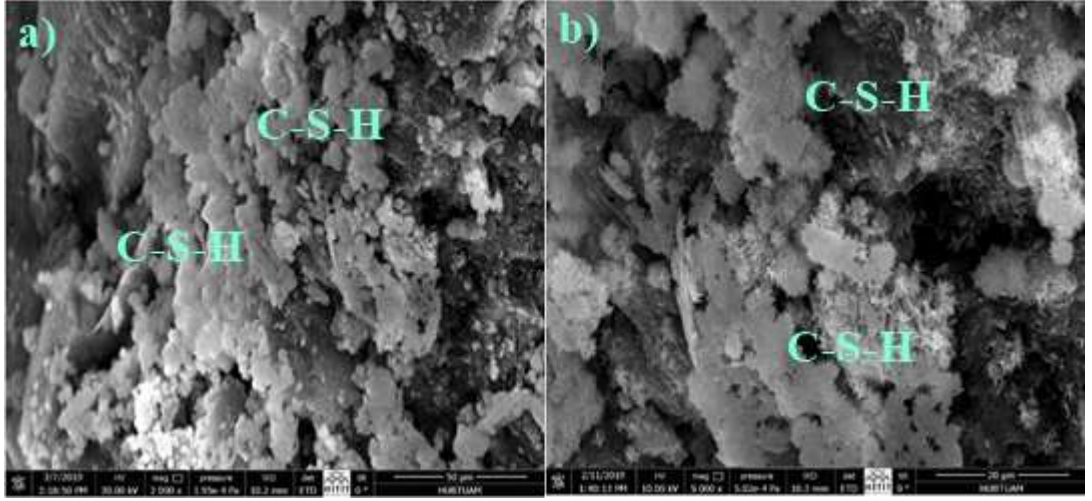


Şekil 4.13 Katkısız numuneler için 7 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×



Şekil 4.14 Katkısız numuneler için 28 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri şekil 4.18’de verilmiştir. Görüntülerde gelişen C-S-H jellerinin ağısı yapısının tamamen gelişerek yapıların 20 μm ve üzeri boyutlara çıktığı ve bu ağısı yapının çimento harcının mikroyapısını tamamen kapladığı görülmektedir.



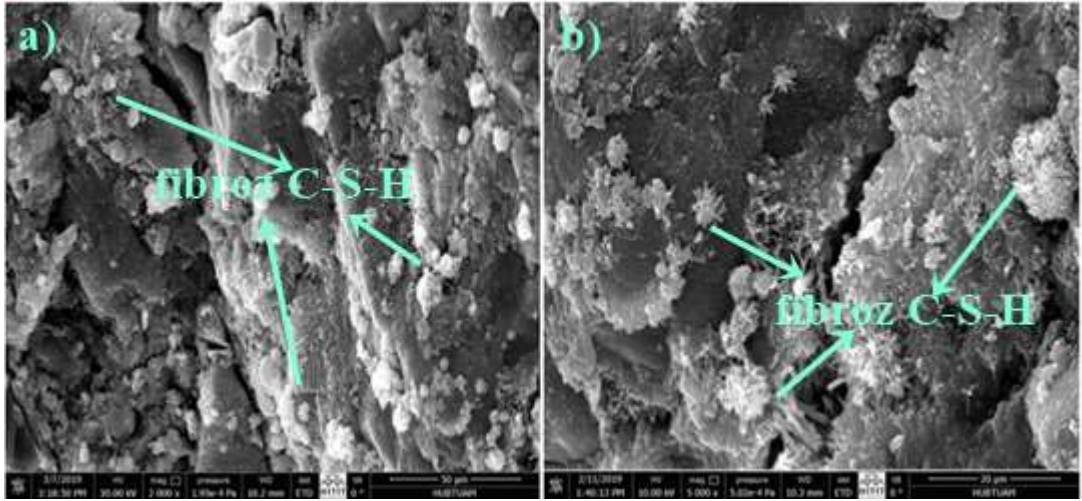
Şekil 4.15 Katkısız numuneler için 90 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

Çimento mikroyapısında oluşan gelişmeler doğrudan çimento harcının dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Katkısız numunelerde yoğun C-S-H jeli oluşumunun kür süresine bağlı olarak artması basınç dayanımının da kür süresine bağlı olarak artmasına neden olmaktadır.

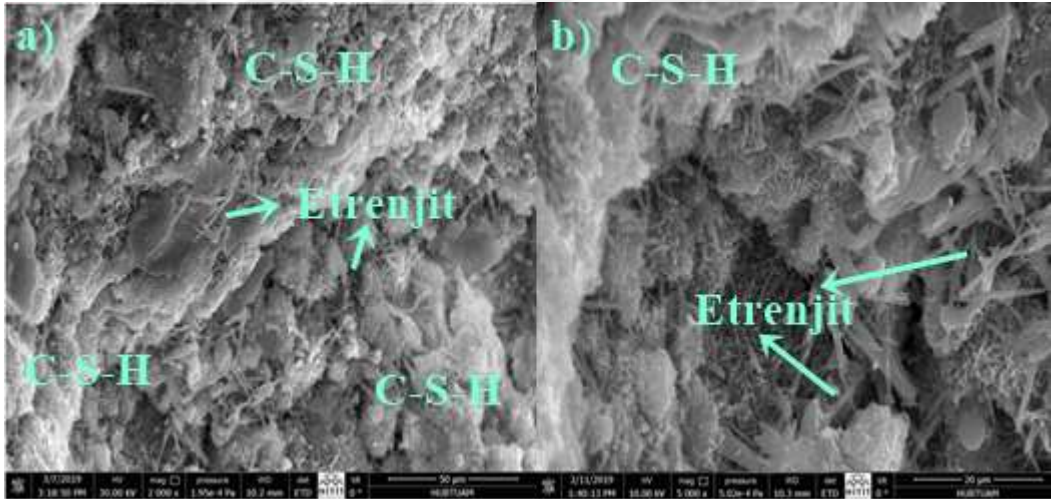
4.4.2 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin Mikroyapısı

Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin %5 ve %20 ikame oranına göre 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

Yüksek fırın cürufu ikame oranı %5 olan 7 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.19’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağısı yapısının oluştuğu ve yüzeyde yoğunlaşmaya başladığı görülmektedir. Boşlukları dolduran fibroz C-S-H jelleri yaklaşık 10µm boyutlarına ulaşmıştır. Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük 2000× ve 5000× büyütme oranına sahip SEM görüntüleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun 7 günlük numunelere göre arttığı ve yapıyı tamamen kapladığı görülmektedir. C-S-H jelleri ağ biçiminde gelişerek boşluklu yapıları tamamen doldurmuş ve yaklaşık 20 µm boyutlarına ulaşmıştır.

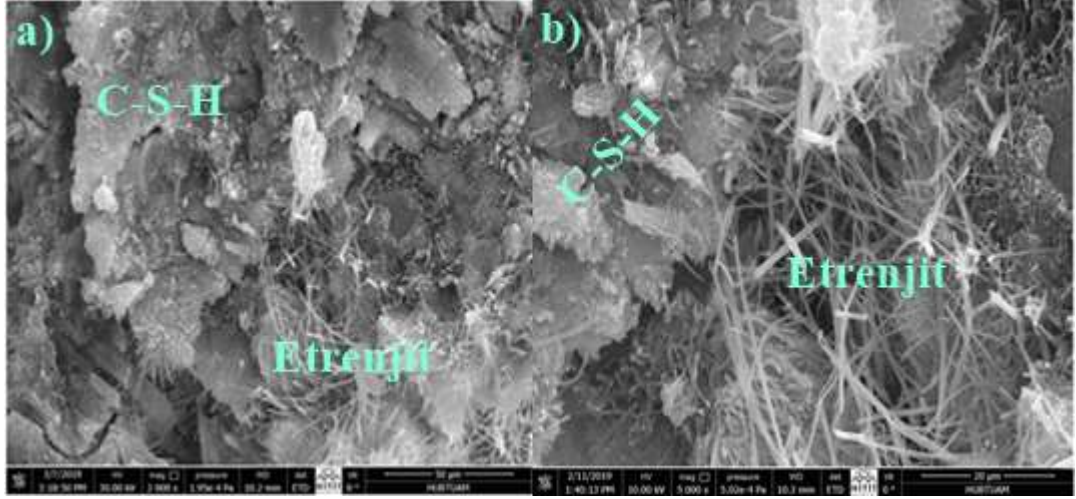


Şekil 4.16 %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×



Şekil 4.17 %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×

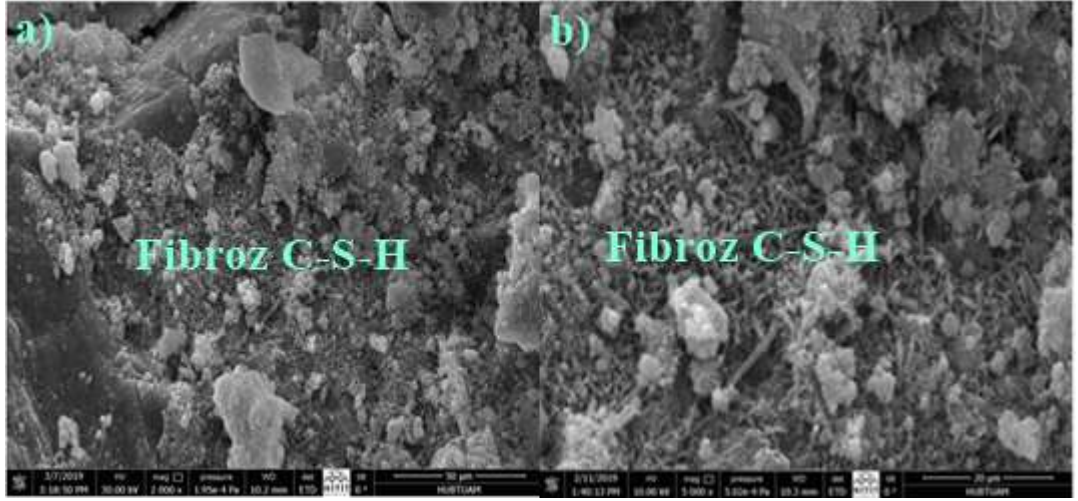
Yüksek fırın cürufu ikame oranı %5 olan 90 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.21’de verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde kısmen C-S-H jelleri görülmekte olup etrenjit çubuklarının yoğunlaşarak yaklaşık 50 µm boyutlarına ulaştığı görülmektedir.



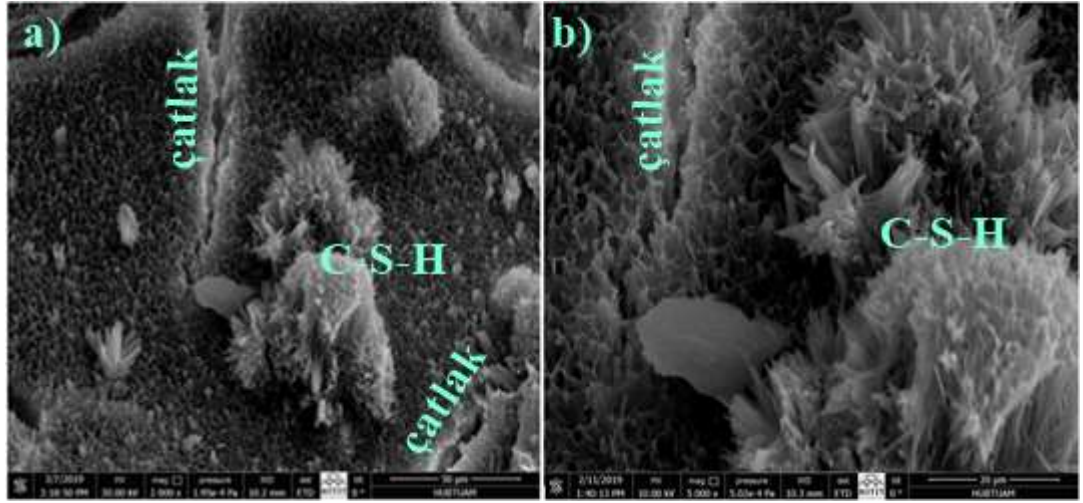
Şekil 4.18 %5 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×

Yüksek fırın cürufu ikame oranı %20 olan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük 2000× ve 5000× büyütmede oranındaki SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir.

Sem görüntüleri incelendiğinde 7 günlük numunelerde fibroz C-S-H jellerinin geliştiği ve yoğunlaşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Jellerin oluşturduğu ağsı yapıların yaklaşık 10µm boyutlarında geliştiği gözlemlenmiştir. Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük SEM görüntülerinde C-S-H jellerinin tüm yapıyı kapladığı, boşlularda geliştiği ve ağsı C-S-H yapısının gelişerek kaktüs biçimini aldığı görülmüştür. Kaktüs biçimli C-S-H fazı yaklaşık 20 µm boyutlarına ulaşmıştır. Jellerin gelişimi 7 günlük numunelere göre artmıştır.

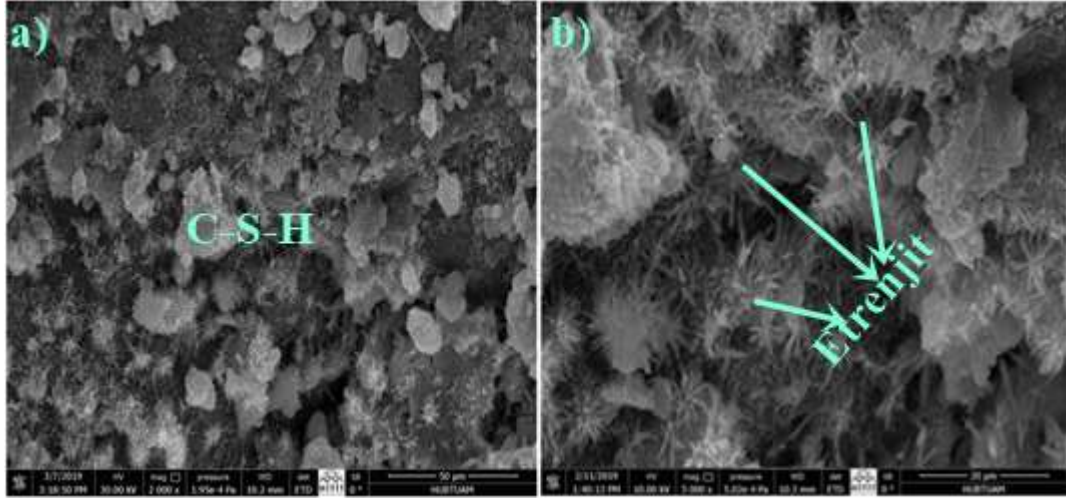


Şekil 4.19 %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×



Şekil 4.20 %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×

90 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde ise C-S-H jellerinin ve etrenjit çubuklarının tüm yapıyı kapladığı görülmüştür. Görüntü alınan kesimde 5000× büyütmede C-S-H jellerinin ve etrenjit çubuklarının 20-30 μm boyutlarında olduğu görülmüştür.

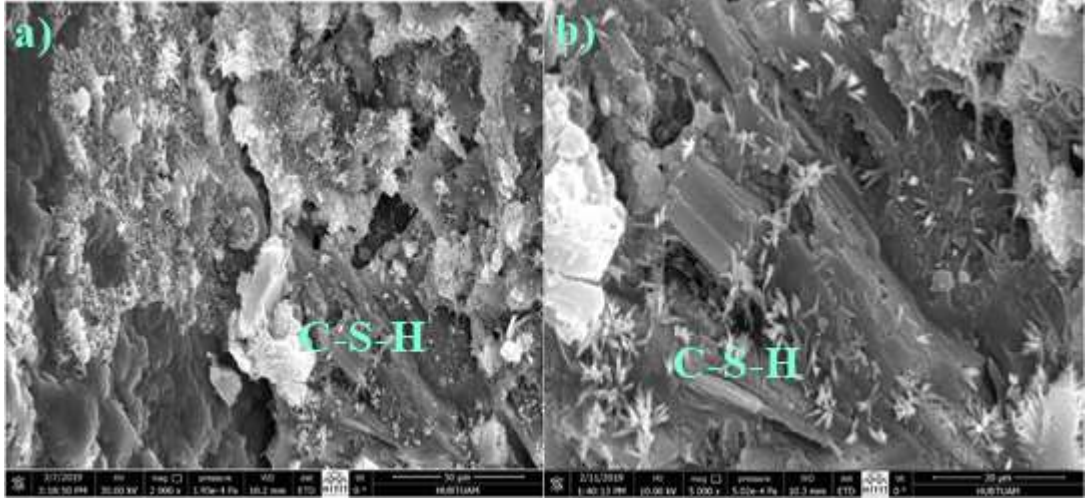


Şekil 4.21 %20 Yüksek Fırın Cürufu İkameli Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri
(a) 2000× (b) 5000×

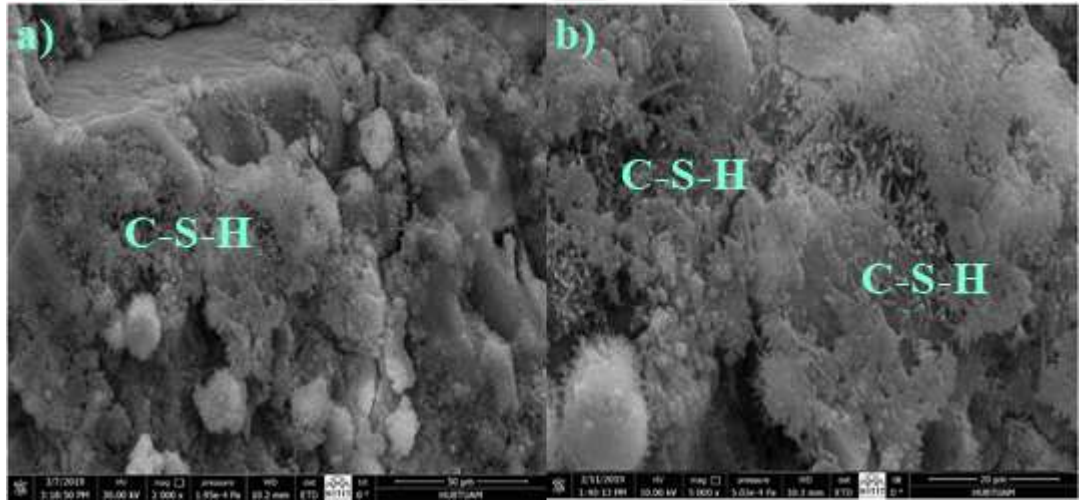
4.4.3 Uçucu Kül İkameli Numunelerin Mikroyapısı

Uçucu kül ikameli numunelerin %5 ve %20 ikame oranına göre 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Uçucu kül ikame oranı %5 olan 7 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.25’te verilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağsı yapısının oluşmaya başladığı görülmektedir. Boşlukları doldurmaya başlayan jeller yaklaşık 5 µm boyutlarına ulaşmıştır. Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük 2000× ve 5000× büyütme oranına sahip SEM görüntüleri Şekil 4.26’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun 7 günlük numunelere göre gözle görülebilir oranda arttığı ve yapıyı tamamen kaplamaya başladığı görülmektedir. C-S-H jelleri ağ biçiminde gelişerek boşluklu yapıları tamamen doldurmuştur. Ağsı yapı birbirine bağlanıp gelişerek yaklaşık 20 µm boyutlarına ulaşmıştır.



Şekil 4.22 %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri (a) 2000×
(b) 5000×



Şekil 4.23 %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri (a) 2000×
(b) 5000×

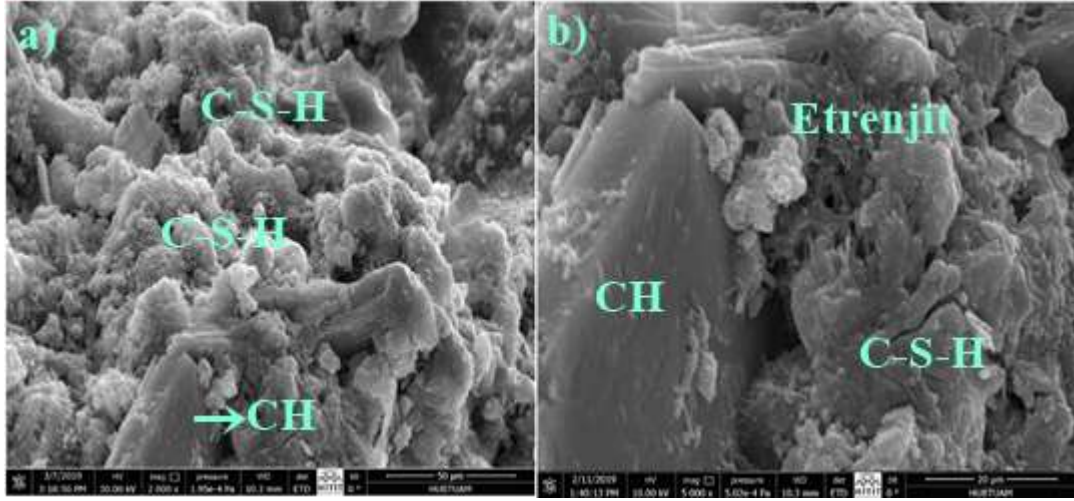
Numunelerin %5 uçucu kül ikame oranına sahip 90 günlük 2000x ve 5000x büyütmede SEM görüntüleri Şekil 4. 26’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin boyutlarının arttığı ve ağısı yapının kalınlaşarak boşluklu yapıları doldurduğu gözlemlenmiştir. C-S-H jellerinin boyutlarının 20-30 μm aralığında olduğu görülmüştür. Ayrıca 20-30 μm boyutlarında etrenjit çubukları da gözlemlenmiştir.



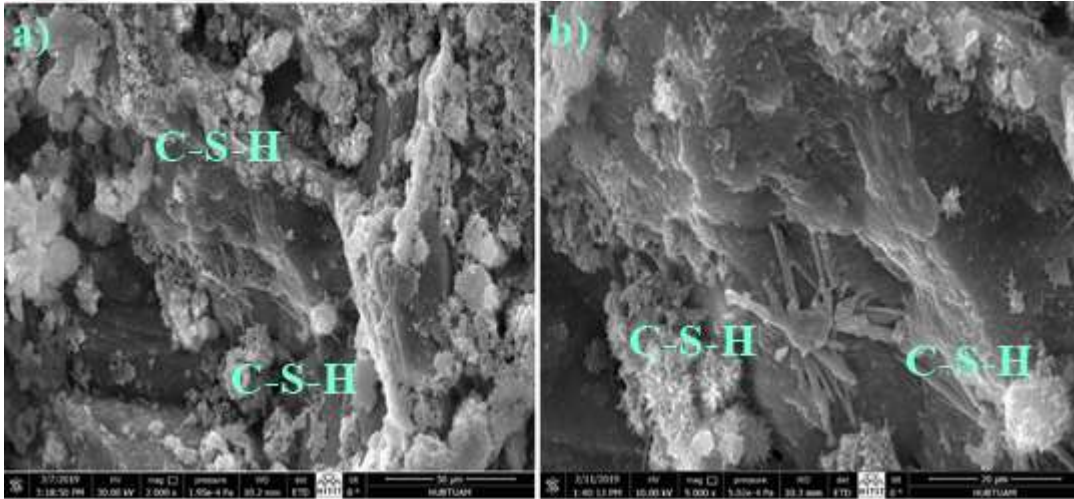
Şekil 4.24 %5 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

Uçucu kül ikame oranı %20 olan 7 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağıs yapısının oluşmaya başladığı görülmektedir. Mikroyapıda C-H jelleri de gözlemlenmiş olup C-S-H jellerinin C-H jellerini ağıs yapısı ile kaplamaya başladığı görülmüştür. Boşlukları doldurmaya başlayan C-S-H jellerinin yaklaşık 10 µm boyutlarına ulaştığı ve C-H jellerinin yaklaşık 20 µm boyutlarında olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük 2000× ve 5000× büyütme değerinde SEM görüntüleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun 7 günlük numunelere göre gözle görülebilir oranda arttığı ve yapıyı tamamen kaplamaya başladığı görülmektedir. C-S-H jelleri ağ biçiminde gelişerek boşluklu yapıları tamamen doldurmuştur. Ağıs yapı birbirine bağlanıp gelişerek yaklaşık 20 µm boyutlarına ulaşmıştır.



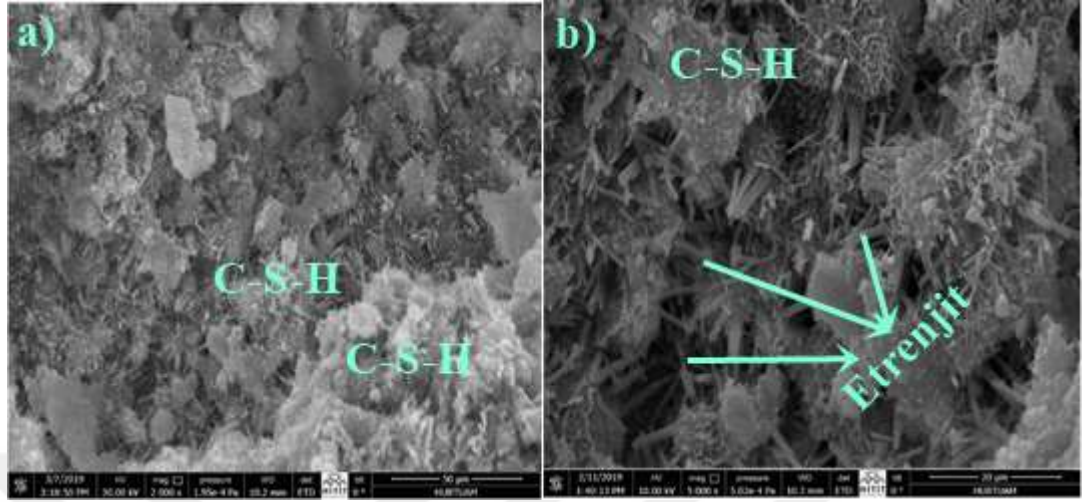
Şekil 4.25 %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×



Şekil 4.26 %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

Numunelerin %20 uçucu kül ikame oranına sahip 90 günlük 2000× ve 5000× büyütmede SEM görüntüleri Şekil 4.30’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin boyutlarının arttığı ve ağısı yapının kalınlaşarak boşluklu yapıları

doldurduğu gözlemlenmiştir. C-S-H jellerinin oluşturduğu ağın boyutlarının yaklaşık 30 μm olduğu görülmüştür.

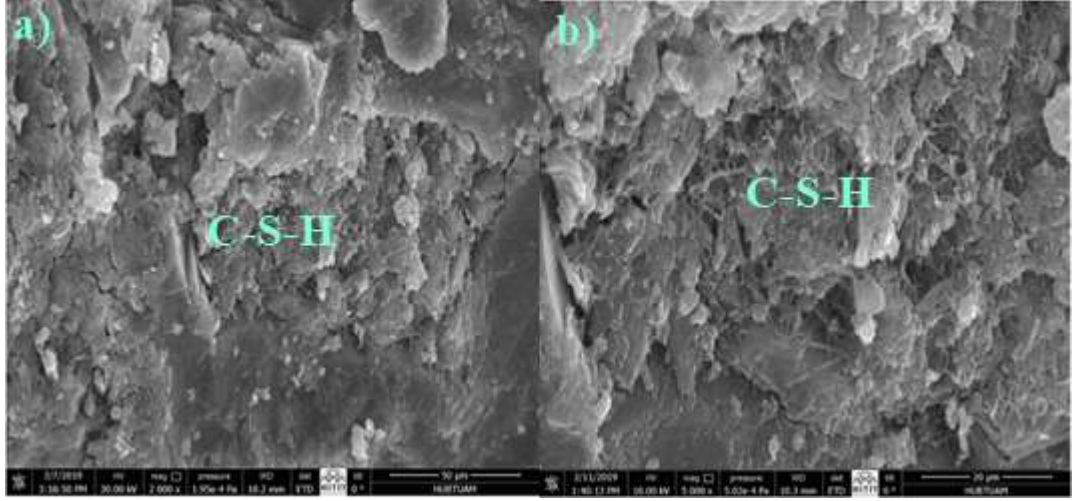


Şekil 4.27 %20 Uçucu Kül İkameli Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri (a) 2000 $\times$ (b) 5000 $\times$

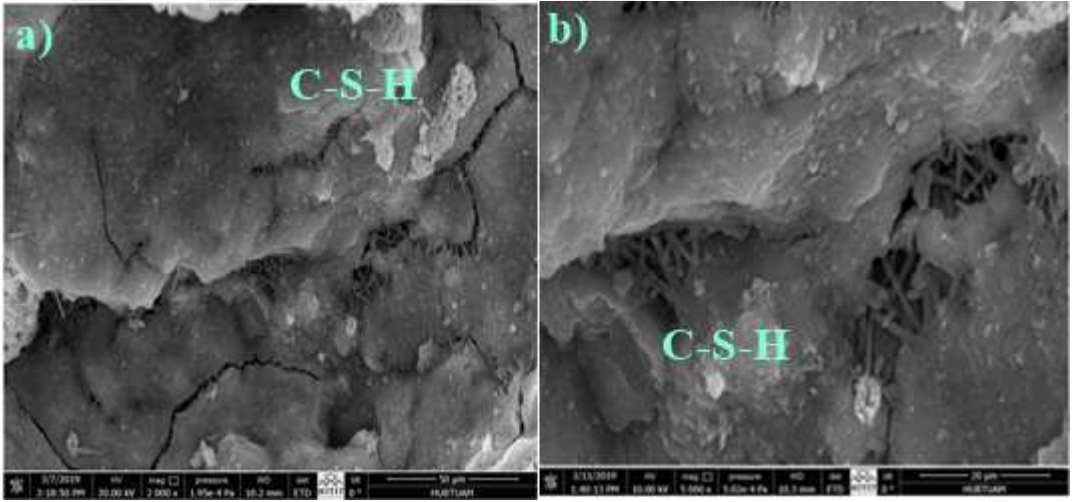
4.4.4 Taban Külü İkameli Numunelerin Mikroyapısı

Taban külü ikameli numunelerin %5 ve %20 ikame oranına göre 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Taban külü ikame oranı %5 olan 7 günlük numunelerin 2000 $\times$ ve 5000 $\times$ büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.31’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağsı yapısının oluşmaya başladığı görülmektedir. Boşlukları doldurmaya başlayan C-S-H jellerinin boyutlarının yaklaşık 10-15 μm aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

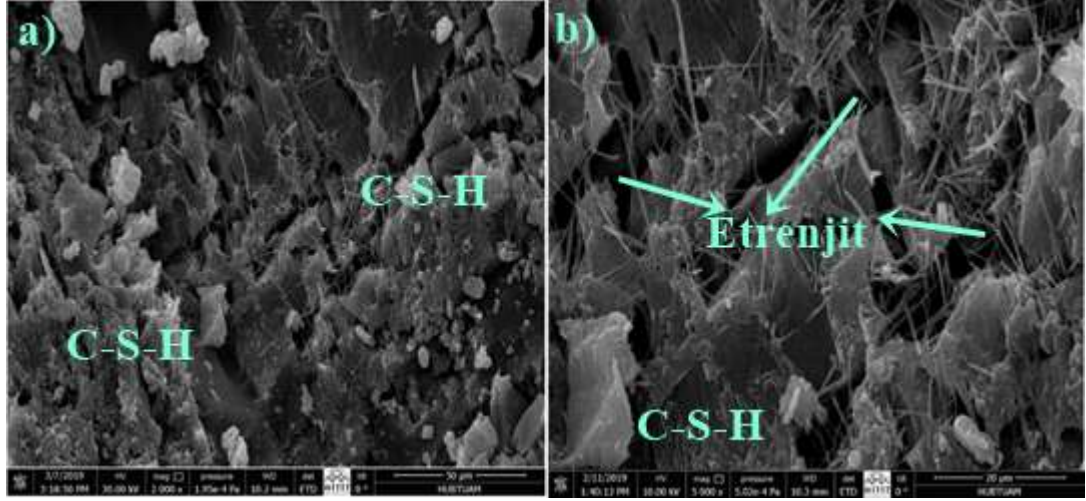
Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük 2000 $\times$ ve 5000 $\times$ büyütme değerinde SEM görüntüleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun 7 günlük numunelere göre gözle görülebilir oranda arttığı ve yapıyı tamamen kaplamaya başladığı görülmektedir. C-S-H jelleri ağ biçiminde gelişerek boşluklu yapıları tamamen doldurmuştur. Ağsı yapı birbirine bağlanıp gelişerek yaklaşık 20 μm boyutlarına ulaşmıştır.



Şekil 4.28 %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri (a) 2000×
(b) 5000×



Şekil 4.29 %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri (a) 2000×
(b) 5000×

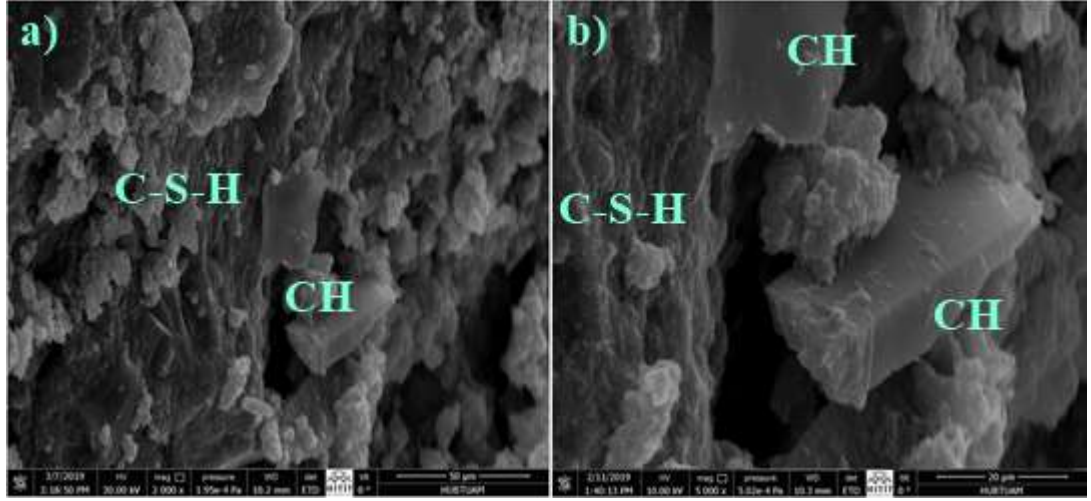


Şekil 4.30 %5 Taban Külü İkameli Numunelerin 90 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

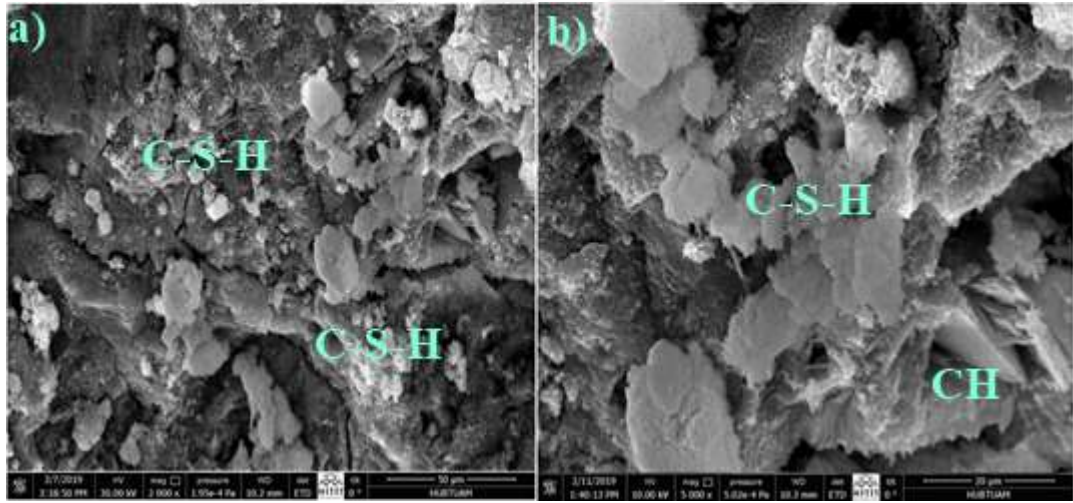
Taban külü ikame oranı %5 olan 90 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede elde edilen sem görüntüleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin boyutlarının aynı ikame oranına sahip 7 ve 28 günlük numunelere göre arttığı ve ağsı yapının yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. C-S-H jellerinin oluşturduğu ağın boyutlarının yaklaşık 20-30 µm aralığında olduğu görülmüştür.

İkame oranı %20 olan 7 günlük numunelerin 2000× ve 5000× büyütmede alınan SEM görüntüleri Şekil 4.34'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ağsı yapısının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Mikroyapıda C-H jelleri de görülmüş olup C-S-H jellerinin C-H jelleri etrafında ağsı yapısının geliştiği görülmüştür. Boşlukları doldurmaya başlayan C-S-H jellerinin yaklaşık 10 µm boyutlarına ulaştığı ve C-H jellerinin yaklaşık 5-10 µm aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı ikame oranına sahip numunelerin 28 günlük 2000× ve 5000× büyütme değerinde SEM görüntüleri Şekil 4.35'de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin yoğunluğunun 7 günlük numunelerde arttığı ve yapıyı tamamen kaplamaya başladığı görülmektedir. C-S-H jellerinin birleşerek oluşturduğu kaktüs biçimli yapıların yaklaşık 20µm boyutlarına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.31 %20 Taban Külü İkameli Numunelerin 7 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×



Şekil 4.32 %20 Taban Külü İkameli Numunelerin 28 günlük SEM görüntüleri (a) 2000× (b) 5000×

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstriyel atıklar olan puzolanik özellikli uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külünün çimento harçlarındaki dayanıklılığa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada halkalı öğütücüde belirli bir blaine incelik aralığında ($\approx 3300 \text{ cm}^2/\text{gr}$) öğütülen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külü çimento harçlarına %5, %10, %15, %20 oranlarında ikame edilerek tüm çimento harçları 7, 28, 90 güne kadar $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sürekli suda kür edilmiş ve eğilme, basınç dayanım deneyleri, boyca hacimsel genleşme deneyleri yapılarak, değerleri incelenmiştir. Ayrıca aynı kür sürelerinde harçlarda klorür iyonu geçirimsizliği incelenmiştir. Su küründe bekletilen %5 ve %20 oranında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taban külü ikameli 7, 28 ve 90 günlük numunelerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) yardımıyla mikroyapısı incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek benzer özgül yüzey alanına sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli çimento bağlayıcı kompozitlerin çimento harçlarında mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yüksek Fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. İkame oranı %5 olan numuneler için eğilme dayanımı değeri en yüksek taban külü ikameli numunelerde en düşük ise uçucu kül ikameli numunelerde gözlemlenmiştir. İkame oranı %10 olan numuneler karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerinin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu taban külü ve uçucu kül ikameli numunelerin ise eşit eğilme dayanım değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. İkame oranı %15 olan numuneler ikame türlerine göre karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerinin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımının ise uçucu kül ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. İkame oranı %20 olan numuneler karşılaştırıldığında ise en yüksek eğilme dayanımının taban külü ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanım değerinin ise uçucu kül ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. Numunelerin 7 günlük eğilme dayanım verilerinden net sonuçlar çıkarılamamıştır.
- Yüksek Fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. İkame oranı %5 olan numuneler için eğilme

dayanımı değerinin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en yüksek olduğu, taban külü ikameli numunelerde ise en düşük olduğu görülmüştür. İkame oranı %10 olan numuneler karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu en düşük eğilme dayanımının taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. İkame oranı %15 olan numuneler ikame türlerine göre karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımının ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. İkame oranı %20 olan numuneler karşılaştırıldığında ise en yüksek eğilme dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanım değerin ise taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. 28 günlük numuneler için eğilme dayanımı değerleri genel olarak değerlendirildiğinde yüksek fırın cürufunun harçların eğilme dayanım özelliğini ikamesiz numunelere göre minimum oranda azalttığı görülmüştür.

- Yüksek Fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 90 günlük eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. İkame oranı %5 olan numuneler için eğilme dayanımı değerin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en yüksek olduğu, taban külü ikameli numunelerde ise en düşük olduğu görülmüştür. İkame oranı %10 olan numuneler karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu en düşük eğilme dayanımının taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. İkame oranı %15 olan numuneler ikame türlerine göre karşılaştırıldığında en yüksek eğilme dayanım değerin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanımının ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. İkame oranı %20 olan numuneler karşılaştırıldığında ise en yüksek eğilme dayanımının yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük eğilme dayanım değerin ise taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. 90 günlük numuneler için eğilme dayanımı değerleri genel olarak değerlendirildiğinde yüksek fırın cürufunu ve uçucu külün çimento harçlarının eğilme dayanım özelliğini ikamesiz numunelere göre değerlendirildiğinde minimum oranda etkilediği görülmüştür. Taban külünün ise eğilme dayanım değerini negatif yönde maksimum oranda etkilediği görülmüştür.
- Çimento bağlayıcı kompozit ikameli harçların basınç dayanımları karşılaştırıldığında 7,28 ve 90 günlük kür süresi içerisinde %5, %10, %15 ve %20

ikame oranında en yüksek basınç dayanım değerinin yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde en düşük basınç dayanım değerinin ise taban külü ikameli numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Basınç dayanımları genel olarak değerlendirildiğinde yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin basınç dayanımının özellikle kür süresi artışına bağlı olarak ikamesiz numunelere yaklaştığı görülmüştür. İkame oranı artışı genel olarak basınç dayanımını azaltmakla birlikte kür süresi artışına bağlı olarak azalma oranında düşüş meydana gelmiştir.

- Benzer özgül yüzey alanına sahip çimento bağlayıcı kompozit ikameli harçların basınç ve eğilme dayanımında oluşan farklılıkların numunelerin kimyasal kompozisyonlarındaki farklılıktan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Silisyum oksit (SiO_2) miktarı en yüksek olan malzeme uçucu kül olsa da kalsiyum oksit (CaO) miktarının düşük olmasından dolayı alit (C_3S), belit (C_2S) oluşumuna yüksek fırın cürufu kadar katkı sağlayamamıştır. Bu nedenle yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin basınç dayanım değerleri uçucu kül ve taban külü ikameli numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür.
- Çimento bağlayıcı kompozit ikameli harç çubuklarının sülfata karşı boyca uzama değerleri 7 günlük numuneler için anlamlı sonuçlar vermemiştir. Olgunlaştırma süresi 28 ve 90 günlük numuneler için farklı ikame türlerine göre değerlendirme yapıldığında, ikame oranı artışına bağlı olarak sülfata karşı dayanıklılığın arttığı görülmüştür.
- Yüksek Fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 28 günlük kür süresi için boy uzama değerleri karşılaştırılmıştır. İkame oranı %5 olan numuneler için normal su ve sodyum sülfat küründe boyca uzama miktarları değerlendirildiğinde en yüksek boy uzama değerlerinin sodyum sülfat küründe olgunlaştırılan taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. Yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin ise hem normal su küründe hem de sodyum sülfat küründe en düşük boy uzama değerini aldığı görülmüştür. Aynı şekilde %10, %15 ve %20 ikame oranlarında da yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin boy uzama değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Olgunlaşma süresi 28 gün olan numunelerde sülfata karşı dayanıklılık ve mekanik dayanım deneyleri sonuçlarının paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yüksek Fırın cürufu, uçucu kül, taban külü ikameli numunelerin 90 günlük kür süresi için boy uzama değerleri karşılaştırılmıştır. İkame oranı %5, %10, %15 ve

%20 olan numuneler için sodyum sülfat küründe boy uzama değeri en fazla taban külü ikameli numunelerde, en düşük değer ise yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde görülmüştür. Olgunlaşma süresi 90 gün olan numunelerin boy uzama değerleri ve mekanik dayanım değerleri paralellik göstermekte olup yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin uçucu kül ikameli numunelerden daha iyi olduğu uçucu kül ikameli numunelerin dayanım ve dayanıklılık değerlerinin de taban külü ikameli numunelerden daha iyi olduğu görülmüştür.

- Benzer özgül yüzey alanına sahip çimento bağlayıcı kompozit ikameli harçların boy uzama değerleri ikame oranındaki artışa bağlı olarak azalmıştır. Boy uzama değerleri mekanik dayanım değerleri ile 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için katkısız numuneler baz alınarak karşılaştırıldığında ikame oranındaki artış mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilerken dayanıklılık değerlerini pozitif yönde etkilediği görülmüştür.
- Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerde 7 ve 28 günlük kür süreleri içerisinde klor geçirimlilik değerleri ikame oranındaki artışa bağlı olarak artmıştır. En düşük klor geçirimliliği katkısız numunelerde görülmüştür. Harç numunelerine ikame edilen çimento bağlayıcı kompozitlerin miktarının artması, çimento miktarını azaltmakta ve buna bağlı olarak oluşan kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 miktarının artması ile C-S-H jellerinin daha fazla oluşmasına neden olmuştur. Harç numunelerinde C-S-H jellerinin artması numunelerde mikroyapıdaki boşlukları doldurarak klor geçirimliliğini azaltmaktadır.
- Benzer özgül yüzey alanına sahip çimento bağlayıcı kompozitlerin 90 günlük klor geçirimlilikleri incelendiğinde ikame oranındaki artışa bağlı olarak klor geçirimliliği değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni çimento bağlayıcı kompozitlerin uzun kür sürelerinde puzolanik aktivitenin artmasına bağlı olarak C-S-H jellerinin oluşumunun artması ve mikroyapıda bulunan boşlukları doldurmasıdır.
- Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve taban külü ikameli numunelerin klor geçirimlilikleri değerlendirildiğinde 7, 28 ve 90 günlük olgunlaşma sürelerinde, %5, %10, %15 ve %20 ikame oranlarında, en yüksek klor iyonu geçirimlilik değerinin taban külü ikameli numunelerde olduğu görülmüştür. En düşük klor

iyonu geçirimsizlik değeri ise yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde olduğu görülmüştür.

- Üretilen çimento harç numunelerinin mikroyapı incelemesi sonucu olgunlaşma süresine bağlı olarak C-S-H jellerinin ağı yapısının yoğunlaşarak mikroyapıda bulunan boşlukları doldurduğu gözlemlenmiştir. Mekanik dayanım değerleri ve durabilite sonuçları değerlendirildiğinde dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin C-S-H jellerinin gelişimleri ile orantılı olarak iyileştiği görülmüştür.

Sonuç olarak benzer özgül yüzey alanına sahip çimento bağlayıcı kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri karşılaştırıldığında yüksek fırın cürufu ikamesinin bu özellikleri maksimum oranda iyileştirdiği görülmüştür. Uçucu kül ikameli numunelerin dayanım ve dayanıklılık değerleri yüksek fırın cürufu ikameli numunelere göre daha düşük olmakla birlikte dayanıklılık özellikleri bakımından yüksek fırın cürufuna yakın özellikler göstermektedir. Taban külü ikamesi ise betonun dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilerken 90 güne kadar kür süresi içerisinde mekanik dayanım özelliklerinde olumlu sonuçlar doğurmamaktadır ancak 90 gün üzeri olgunlaşma süreleri için dayanım özelliklerini de olumlu yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Çimento ile benzer incelik oranına sahip yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımı 90 günlük kür süresi dahilinde betonda kullanılan çimento miktarını azaltabilecektir. Çimento miktarının azalmasına bağlı olarak doğaya salınan (CO₂) miktarı da azalacaktır. Endüstriyel atık statüsünde bulunan bu malzemeler inşaat sektöründe değerlendirilebilecek ve ülke ekonomisine fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Şahan, Muammer Alper “Cem I 42,5 Çimentolu Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği” Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [2] K. Toklu and O. Şimşek, “Investigation of mechanical properties of repair mortars containing high-volume fly ash and nano materials. Journal of the Australian Ceramic Society, 54(2), 261-270.(2017)
- [3] Ural, B., Turanlı, L., Mehta, P.K. “High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications.” ACI Materials Journal, V.104, No. 5 (2007).
- [4] Madloul, Naseer Abboodi, "A Critical Review on Energy Use and Savings in The Cement Industries." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15.4 (2011): 2042-2060.
- [5] ASTM, C. "618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete." Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania (2002): 1-10.
- [6] ASTM. "ASTM C125-Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates." (2018).
- [7] Erdoğan, T.Y., Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Ankara, (2003).
- [8] Vitruvius, M. Pollio. "The Ten Books On Architecture, Translated By Morris Hicky Morgan." (1960).
- [9] Şengül, Ö., Taşdemir , M. A., Gjörv, O. E., “Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayılımına etkisi”, İTÜ Dergisi/d Mühendislik, 6 (1): 53-64 (2007).

[10] Li, Gengying, and Xiaohua Zhao. "Properties of Concrete Incorporating Fly Ash And Ground Granulated Blast-Furnace Slag." *Cement and Concrete Composites* 25.3 (2003): 293-299.

[11] Zhang, Xiong, Keru Wu, and An Yan. "Carbonation property of hardened binder pastes containing super-pulverized blast-furnace slag." *Cement and Concrete Composites* 26.4 (2004): 371-374.

[12] Gökçe, A., Çiçekli, O.C., Uyan, M., Öztekin, E., “Uçucu Küllü Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Deneysel Çalışma” 4.Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, (1996).

[13] İnan Sezer, G. Kalker ve Klinker Özelliklerinin Kalkerli Çimento Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.

[14] Dinçer, Rıza, İsmail H. Çağatay. "Uçucu Kül, Çelik Lif Ve Pomza İçeren Betonların Mekanik Özellikleri." (2004).

[15] Binici, Hanifi, İsmail H. Çağatay. "Klinker-Bazaltik Pomza Ve Granule Yüksek Fırın Cürufu Üçlü Karışımların Korozyon Dayanımları." *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 18.2 (2003): 161-171.

[16] Massaza, F., “Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements”, *Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cements*, Paris (1980).

[17] Özkan, Ömer. "Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri." *Teknik Dergi* 17.83 (2006): 3893-3902.

[18] Kurama, Haldun, Mine, Kaya. "Usage Of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture." *Construction and building materials* 22.9 (2008): 1922-1928.

- [19] Jaturapitakkul, Chai, and Raungrut, Cheerarot. "Development of Bottom Ash As Pozzolanic Material." *Journal Of Materials İn Civil Engineering* 15.1 (2003): 48-53.
- [20] Kula, I., "Effects of Colemanite Waste, Cool Bottom Ash, and Fly Ash on The Properties Of Cement." *Cement and Concrete Research* 31.3 (2001): 491-494.
- [21] Slanička, Š. "The İnfluence of Fly Ash Fineness on The Strength of Concrete." *Cement and Concrete Research* 21.2-3 (1991): 285-296.
- [22] Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., "Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri", 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 263-275, 13 Nisan (2007).
- [23] Tuygun, C. S., "Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2002).
- [24] Kurugöl, Sedat. "Puzolanik Aktivite Tespit Yöntemleri: Fiziksel Metotlar." *Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi* 38.1 (2017): 21-39.
- [25] ASTM C311. "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete." (2000).
- [26] Sevim, Özer. "Yüksek Kompoziteli Çimento Bağlayıcılı Sistemler İçin Uçucu Kül Tane Boyut Dağılımlarının Optimizasyonu", Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale, (2018).
- [27] TS-25, Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan, Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (2015)

- [28] Okucu, A., “Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri”, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir (1998).
- [29] Akgül, E. “Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2006).
- [30] TMMOB Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, Türkiye’de Termik Termik Santraller. Ankara, (2017).
- [31] Andrade LB, Rocha JC, Cheriaf M. Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete. Cem Concr Res 2007;37:231–41.
- [32] Yüksel, İ., Özkan, Ö., Bilir, T., "Kazanaltı Külü İle Briket Üretimi". Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 21 (2013)
- [33] Tokyay M., Erdoğan K., “Cüruflar ve Cürufllu Çimentolar” TÇMB / AR-GE / Y97-2, Sayfa 9-10, 2007.
- [34] Onat, O. B., Türkiye’de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul (1998).
- [35] Saran G., “Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2007).
- [36] Çavuş, Bülent Çınar, “Çimento Harcında Yüksek Fırın Cürufunun Basınç Dayanımına Etkisi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2008).

- [37] Frearson, John PH, and J. M. Uren. "Investigations Of A Ground Granulated Blast Furnace Slag Containing Merwinitic Crystallization." Special Publication 91 (1986): 1401-1422.
- [38] Demolian, E. Influence of Slag Chemical Composition and Texture on Their Hydraulicity . Proceedings, 7th Int. Cong. On the Chemistry of Cement. (1980) Vol. 11, Paris pp.111/89-111/94
- [39] Şahan, A, “ Düşük Dozajlı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliği”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2006
- [40] Öz, A., “Doğal Zeolit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo – Mekanik Özellikleri” Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2006).
- [41] TS 639, (1975), Uçucu Kül - Çimentoda Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [42] Öner, A., (2005), Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu İçeren Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Açısından Optimum Bileşiminin Belirlenmesi Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [43] Gürbüz, Emrah. “C Tipi Uçucu Küllerin Etkinliği” Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul(2009).
- [44] Morrison, Ronald E., et al. "A Review of Ash Specifications." Ash Utilization: Proceedings 8488 (1970): 3.
- [45] Erdemiş, S. "Termik Santral Artık Uçucu Küllerinin Sinterleme Davranışına B203'ün Etkisi” Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya (2001).

[46] Güler G., Güler E., İpekoğlu Ü. ve Mordoğan H., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, Türkiye, 419-423, 09 (2005).

[47] Hediye, Y. "Uçucu Kül ve Nano – SiO₂ İçeren Üçlü Çimento Sistemlerinin Özellikleri ve Hidratasyonu" Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2019).

[48] Çelik, Özlem. "Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi." Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 10.3 (2011): 333-337.

[49] TS EN 197-1, 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü.

[50] Güler, G., "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları." Türkiye 19 (2005): 419-423.

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

[52] Joshi, R.C. and Lohtia, R. P., “Fly Ash in Concrete Production, Properties and Uses”, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, pp. 1-47, 1997.

[53] Joshi, R. C., and B. K. Marsh. "Some Physical, Chemical And Mineralogical Properties Of Some Canadian Fly Ashes." MRS Online Proceedings Library Archive 86 (1986).

[54] Görhan G., Kahraman E. Başpınar S. M., Demir İ., 2009, Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 5, No: 2, 33 - 42

- [55] Esin, D. " Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Harçların Özellikleri " Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2008).
- [56] Yazıcı, H. "Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Gelistirilmesi” Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir (2004).
- [57]] T. Matsunaga, J.K. Kim, S. Hardcastle, P.K. Rohatgi, "Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles." Materials Science and Engineering: A 325.1-2 (2002): 333-343.
- [58] Slanička, Š. "The Influence of Fly Ash Fineness on The Strength of Concrete." Cement and Concrete Research 21.2-3 (1991): 285-296.
- [59] Chindaprasirt, Prinya, Chai Jaturapitakkul, and Theerawat Sinsiri. "Effect Of Fly Ash Fineness On Compressive Strength And Pore Size Of Blended Cement Paste." Cement and Concrete Composites 27.4 (2005): 425-428.
- [60] Poon, C.S., Kou, S.C., Lam. L., Lin., An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete, Modern Concrete Materials; Binders, Additions and Admixtures, 131-138, ISBN:0727728229, Thomas Telford Pres. (1999)
- [61] ACI Committee 226., 1987. Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, 84 (5): 381-409.
- [62] Gikunoo, Emmanuel. Effect Of Fly Ash Particles On The Mechanical Properties And Microstructure Of Aluminium Casting Alloy A535. Vol. 56. University of Saskatchewan, (2004)
- [63] EN, TS. 450-1, (2006)." Uçucu Kül-Betonda Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

[64] Nonavinakere S, Reed BE. Fly ash enhanced metal removal process. In: Sengupta AK, editor. Hazardous and Industrial Wastes. Proceedings of the 27th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference. Technomart Publishing, 1995:588–94.

[65] Massazza, F., “Puzolanlar. Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri” 11-12 Mayıs, Ankara (1989).

[66] Karahan, Okan "Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri." Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Adana (2006).

[67] Mehta P. K., Concrete. Structure, Properties and Materials, 1rd ed., Incorporated Prentice-Hall, New Jersey USA, (1986).

[68] Buluş G. “Değişik Bağlayıcı Maddeler ile İyileştirilmiş Kömür Külünün Mühendislik Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara (1998).

[69] Keskin, Fatma Şeyma “Perlit ve Taban Külü Katkılı Harç Özelliklerinin Taguchi Deneyisel Tasarım Yöntemi ile İncelenmesi” Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli (2016)

[70] F. Özmal, “Bor Endüstrisi Atıkları, Uçucu Kül, Taban Külü ve Alünit Mineralinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya (2005).

[71] Kaya A. İ. “Study on Blended Bottom Ash Cements” Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara (2010).

[72] Ölmez, Ö. “Tehlikeli Atık Yakma Tesisi Taban Küllerinin Beton Hammaddesi Olarak Kullanılması ile Bertaraf Edilmesinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2010).

[73] Konak, S. "Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İnce Agregaları ile Üretilmiş Betonun Gerilme Şekil Değiştirme Davranışının İncelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak (2018).

[74] ASTM D 854. "Standard Test Method For Specific Gravity Of Soils." Test Method A Procedure For Oven-Dried Specimens (1999).

[75] Alataş, Taner. "Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Kullanımı Üzerine Bir Araştırma" Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ (1996).

[76] TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, TSE, 2016.

[77] ASTM C1012 / C1012M - 07 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, Annual book of ASTM standards, Philadelphia, USA, (2007).

[78] ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[79] Baradan B, Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, (2012)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çağrı Göktuğ ŞENGÜL
Doğum Tarihi : 03.02.1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu : Ondokuz Mayıs Üniversitesi 2011
Lisans : Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

2009-2010 Eryapı İnşaat Stajyer

2010-2011 Yüksel Proje Stajyer

2011-2012 Akdeniz İnşaat Şantiye Şefi

2012-2014 Deniz Kuvvetleri Komutanlığı İnşaat Mühendisi

2016 Tarihinden Beri Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İnşaat Mühendisi

Yayınları :

1) Demir, I., Güzelküçük, S., Sevim, Ö., Filazi, A., Şengül, Ç.G., Micro-structural Examination of The Effect of Sulfate on Cement Mortars with Blast Furnace Slag Substitution. International Scientific and Vocational Studies Journal, 2(1), 8-18. (2018)

2) Musa SAVAŞ, İlhami DEMİR, Selahattin GÜZELKÜÇÜK, Çağrı Göktuğ ŞENGÜL, Hasbi YAPRAK., “Sepiyolit İkame Edilmiş Gazbetonun Isıl ve Basınç Dayanım Özellikleri”, Politeknik Dergisi, 17, Sayı 1 (Özel sayı), s.43-47, (2014).

3) Güzelküçük, S., Şengül, Ç. G., Demir, İ., Yaprak, H., Önal, M.M., ve Doğan, O.,” Taban Külü İkameli Çimento Harçlarına Sülfatın Etkisi” Hazır Beton Kongresi Bildirileri, İstanbul, 345-355, İstanbul,Türkiye, (2013).

4) Savaş, M., Demir, İ., Güzelküçük, S., Şengül, Ç. G. and Yaprak, H., “Thermal and Compressive Strength Properties of Sepiolite Substituted Autoclaved Aerated

Concrete”, First International Conference & Exhibition Application Of Efficient & Renewable Energy Technologies In Low Cost Buildings and Construction, Ankara, 442-450, Ankara, Turkey, September (2013).

Araştırma Alanları : Yapı Malzemeleri

