

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

SODYUM-POTASYUM SİLİKAT ESASLI CAM
FRİT İLAVELİ BETON KARIŞIMLARININ
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

DİLAY ERDOĞAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

GEBZE

2011

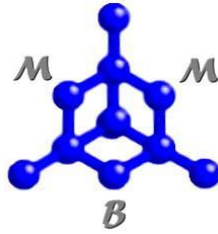


T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

SODYUM-POTASYUM SİLİKAT ESASLI CAM
FRİT İLAVELİ BETON KARIŞIMLARININ
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

DİLAY ERDOĞAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ahmet ÇAPOĞLU



GEBZE

2011



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından
..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan
.....'ın tez çalışması Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Annem'e

Ben uyur, dūřümde

Senin iřin bir ev görürdüm gökyüzünde

Sen, babam, kardeşim, ben ve melekler

Ve melekler anne

Anne melekler

N.H.R.

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: SODYUM POTASYUM SİLİKAT ESASLI CAM FRİT İLAVELİ BETON KARIŞIMLARININ ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

YAZAR: DİLAY ERDOĞAN

Bu çalışmada, cam frit ilavesinin betonun mekanik davranışı ve mikro yapı gelişimi üzerine etkilerini incelemek üzere; sadece çimento içeren ve çimento ile frit katkısı birlikte kullanılarak hazırlanan iki farklı beton üretilmiştir. Frit katkılı beton numunelerin karakterizasyonu sırasında karşılaştırmada referans olması açısından, kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız beton numuneleri; kum/çimento oranı 3:1 ve su/çimento oranı 0.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Frit katkılı beton numuneler ise; Gizem Frit firmasında $K_2O-Na_2O-SiO_2$ esaslı bir camın ergitilerek ani soğutulması ile elde edilen fritin, kum/çimento oranı 3:1 olacak şekilde kompoze çimento ile hazırlanan beton karışımına; karışımın ağırlıkça %5-10-15'i olacak şekilde ilave edilerek hazırlanmıştır. Frit ilaveli beton numunelerin hazırlanmasında uygun bir akışkanlık elde edebilmek için su/çimento oranı; artan frit miktarına bağlı olarak 0.69'a kadar arttırılmıştır. 50 mm x 50 mm x 50 mm boyuta sahip küp numuneler şeklinde hazırlanan beton numuneleri mekanik özellikleri test edilmeden önce hidratasyon reaksiyonlarının tamamlanması için sırasıyla 7, 14, 28, 56 gün gibi farklı sürelerde, hem açık atmosferde hem de su içinde kür edilmek üzere bekletildikten sonra basma mukavemetleri ölçülmüştür. Ayrıca, mekanik testten geçen beton numunelerinin mikro yapılarındaki fazlar; X-ışını kırınım indisi (XRD) metodu ile tespit edilmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleme sırasında fazların içerdiği elementler EDX tekniği ile tespit edilmiştir. Ayrıca, beton karışımlarının sıcaklığa bağlı davranışı DTA/TG yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar hem frit miktarına bağlı olarak hem de referans olarak hazırlanan katkısız beton numuneleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE: PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CONCRETE MIXTURES CONTAINING SODIUM-POTASSIUM- SILICATE BASED GLASS FRIT

AUTHOR: DİLAY ERDOĞAN

In this study, to examine the effect of glass frit addition on the mechanical behavior and microstructure development of concrete bodies, two different concrete mixtures were prepared by using a contribution of only cement and a contribution of frit and cement together. Terms of reference for comparison during the characterization of the concrete samples a contribution of frit together cement, a contribution of only cement concrete samples were mixed with a production weight ratio of sand/cement equal to 3:1 and water/cement ratio of 0.5. Supplied by Gizem Frit company, frit obtained by melting from sodium- potassium-silicate based glass and then poured into water for quenching. A contribution of only cement concrete samples were mixed with a production weight ratio of sand/cement equal to 3:1, frit additives of 5, 10, 15% by weight of the mixtures were prepared a contribution of frit together cement concrete samples. In order to achieve a suitable viscosity for mixing the preparation of concrete samples with a contribution of frit together cement, water/cement ratio has been increased up to 0.69 depending on the amount of increased frit. Concrete samples were molded into metal blocks to produce test-cubes with dimensions of 50x50x50 mm. Before testing the samples for mechanical properties to see the effect of curing times on the completion of hydration reactions in different days such as 7, 14, 28, 56 ; respectively, the samples were hold either in open atmosphere or in the water and then tested for compressive strengths. In addition, concrete samples on which compressive strengths test were carried out were used for microstructure analysis. The phases present in the microstructure have been determined by X-ray diffraction analysis (XRD) and have been viewed by scanning electron microscopy (SEM). During Scanning electron microscopy displaying phases contained elements were determined by EDX. Moreover thermal behavior of concrete mixtures were examined DTA / TG methods and the results were compared to considering the amount of frit and the reference to the concrete samples were prepared by using a contribution of only cement.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve yüksek lisans öğrenimim süresince bilgisi, tecrübeleri ve hoşgörüsü ile desteğini benden esirgemeyen, hayatım boyunca sevgi ve saygı ile hatırlayacağım değerli hocam ve tez danışmanım, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet ÇAPOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans eğitimim sırasında maddi ve manevi desteklerini ve fedakarlıklarını esirgemeyen, her zaman yanımda olacaklarını bildiğim sevgili annem Ayla ERDOĞAN'a, babam Hasan ERDOĞAN'a, anneannem Sevim KANBUR'a, dayım Ahmet KANBUR'a, yengem Sevinç KANBUR'a kardeşim Mehmet ERDOĞAN'a ve kuzenlerim Fulya ve Yiğit KANBUR'a ve tüm akrabalarım sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarım sırasında ve analizlerin uygulanmasında hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuar teknikeri Sayın Adem ŞEN'e, SEM operatörü Sayın Ahmet NAZIM'a, laboratuar arkadaşlarım Tijen ARSLAN, Gamze Sultan BAŞ ve Arş.görevlisi Ali Sabri BERKEM'e çok teşekkür ederim.

Her zaman, beni ailesinin bir ferdi gibi kabullenip desteklerini esirgemeyen Çiğdem BAŞARAN ve ailesine çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca destekleri ile her zaman yanımda olan sevgili ev arkadaşlarım Aysun DEMİRTAŞ, Didem OVALI ve teyzem Ayşe DEMİRTAŞ 'a çok teşekkür ederim.

Destekleri ile her zaman yanımda olan sevgili arkadaşlarım Selin ENGÜRLÜ, Aslı UÇAR, Çiğdem OĞUZ, Hakan KARACA, Özay CANDARLI, Aytaç DOĞAN, Mehmet DİNÇER, Rahime ADALI, Damla İSHAK, Duygu GÖÇMENOĞLU, Merve KAHYA' ya çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xv
1.GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	4
1.2. Literatür Taraması	4
2.TEORİK BİLGİLER	13
2.1.Beton	13
2.2.Beton ve Beton Bileşenleri	15
2.2.1.Çimento	15
2.2.1.1.Portland Çimentosunun Üretimi	16
2.2.1.1.1.Kullanılan Hammaddeler	17
2.2.1.1.2.Hammaddelerin Pişirilme İşlemi	18
2.2.1.2.Portland Çimentosunun Kimyasal Kompozisyonu	20
2.2.1.2.1.Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler	20

2.2.1.2.2.Portland Çimentosunu Oluşturan Ana Bileşenler	21
2.2.1.2.2.1.Kalsiyum Silikatlar	22
2.2.1.2.2.2.Kalsiyum Aluminatlar	23
2.2.1.2.2.3.Tetrakalsiyum Aluminaferrit	23
2.2.1.3.Portland Çimentosunun İçerdiği Oksitlerin ve Ana Bileşenlerin Miktarlarını Bulma Yöntemleri	24
2.2.1.3.1.Portland Çimentosundaki Ana Bileşenlerin Miktar Tayini	25
2.2.1.4.Portland Çimentosunun Hidratasyonu ve Hidratasyon Ürünlerinin Özellikleri	25
2.2.1.5.Hidratasyon Isısı	28
2.2.1.6.Çimentonun Prizi	29
2.2.1.7.Çimentonun İnceliği	32
2.2.1.8.Çimento Hamurunun Yapısı ve Çimento Hamurundaki Boşluklar	32
2.2.1.8.1.Çimento Hamurunun Yapısı	32
2.2.1.8.2.Çimento Hamurunun Yapısındaki Boşluklar ve Özellikleri	33
2.2.1.9.Çimento Hamurunun Dayanım Kazanma Mekanizması	34
2.2.1.10.Puzolanlar ve Yüksek Fırın Cürüfunun Tanımı	35
2.2.1.10.1.Puzolanların ve Yüksek Fırın Cürüfunun Çimento Üretiminde Kullanılması	36

2.2.1.10.2.Portland Çimentosunun ve Portland Puzolan Çimentosunun Dayanım Kazanma Mekanizması	36
2.2.1.11.Türkiye’deki Çimento Tipleri	38
2.2.1.12.Çimento Kullanım Alanları	40
2.2.1.13.Türkiye’deki Çimentoların Dayanım Sınıfları ve Priz Süreleri	41
2.2.2.Agrega	42
2.2.3.Su	43
2.2.4.Beton Katkı Maddeleri	43
2.2.4.1.Katkı Maddelerinin Tanımı	43
2.2.4.1.1.Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkileri	45
2.3.Sertleşmiş Beton Özellikleri	45
2.3.1.Beton Dayanımı	46
2.3.1.1.Beton Dayanımını Etkileyen Unsurları	47
2.3.1.2.Beton Basınç Dayanımı	50
2.4.Beton Basınç Dayanım Sınıfları	51
3.MATERYAL VE METOD	52
3.1.Giriş	52
3.2.Kullanılan Hammaddelerin Tanımlanması	53
3.2.1.Çimento	53
3.2.2.Agrega	53

3.2.3.Karışım Suyu	54
3.2.4.Frit	54
3.3.Beton Karışımının Hazırlanması	55
3.4.Beton Karışımının Şekillendirilmesi	56
3.5.Numunelerin Kür Edilmesi	57
3.6. Numunelerin Karakterizasyonu	57
3.6.1.Basınç Dayanımı	57
3.6.2. Setleşmiş Betonun X-Işını Kırınım (XRD) Analizleri	58
3.6.3. Sertleşmiş Betonun Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	59
3.6.4.Sertleşmiş Betonun DTA/TG Analizleri	61
3.6.5.Elastik Modül Ölçümü	61
4.DENEYSEL BULGULAR	63
4.1.Basma Mukavemeti Testi Sonuçları	63
4.2.Elastik Modül Ölçüm Sonucu	70
4.3. X-Işını Kırınım (XRD) Analizleri Sonuçları	70
4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analizleri Sonuçları	79
4.5.DTA Analizleri Sonuçları	98
5.TARTIŞMA	103
6. KAYNAKLAR	105
7. ÖZGEÇMİŞ	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
μm	Mikrometre
<	Küçüktür
m^3	Metreküp
kg	Kilogram
cc	Cubic Centimeter
mm^2	Milimetrekare
dk	Dakika
kv	Kilovolt
mA	Miliamper
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
mm	Milimetre
MPa	Mega paskal
Ph	Power of Hydrogen
UNI	User-to-Network Interface
ASTM C	American Society for Testing and Materials
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDX	Energy dispersive x-ray spectroscopy
PKÇ/B	Portland kompaze çimento/ %21-35 puzolan malzeme
R	Erken dayanım
RC	Renksiz cam
KC	Kahve rengi cam
YFC	Yüksek fırın cürufu
CEM I	Çimento sınıf 1
PÇ	Portland çimentosu

ECO	Reaktif magnezit, kalsine magnezit veya MgO içeren çimento
CH	Kalsiyum hidroksit
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
N	Newton
XRD	X-Işını Kırınım İndisi
DTA	Diferansiyel termal analiz
TG	Termogravimetri
TSE	Türk standartları enstitüsü
σ	Basma Mukavemeti
P	Maksimum Yük
A	Kesit Alanı
HF	Hidroflorik asit
N	Normal dayanım
KZÇ	Kompaze Çimento

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Portland çimentosu üretiminde kullanılan döner fırın	16
2.2 Döner fırın içinde yürüyen reaksiyon sıcaklıkları	19
2.3 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sistemi	20
2.4 Klinker bileşiklerinin hidratasyon hızları	26
2.5 Portland çimentosu ve portland-puzolan çimentosu kullanılarak hazırlanan karışımların hidratasyonunda serbest kireç miktarının değişimi	38
2.6 Klinker Bileşiklerinin Mukavemet Artışları	48
2.7 Beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki	49
3.1 Çimento X Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi	53
3.2 Kum X Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi	54
3.3 Frit X-Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi	55
3.4 Frit katkılı kürlü ve kürsüz, Kompoze Çimento (KÇ)'lu Frit katkısız kürlü ve kürsüz olarak hazırlanan beton karışımlarının şekillendirilmesinde kullanılan kalıp	57
3.5 Basma mukavemeti test cihazı	58

3.6 (a) Kompoze çimento (KÇ)'lu Frit katkısız 28 gün kürlü taramalı elektron mikroskobu (SEM) numunesi (b) %5 Frit katkılı 28 gün kürlü taramalı elektron mikroskobu (SEM) numunesi	60
3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	60
3.8. (a)- Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız (b)-%5 frit katkılı elastik modül ölçüm çubukları	62
3.9. Elastik modül ölçüm düzeneği	62
4.1 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği	64
4.2 % Frit katkı miktarının artmasıyla farklı sürelerde, atmosfer ortamında normal şartlar altında tutulan beton numunelerin mukavemeti üzerine etkisi	65
4.3 % Frit katkı miktarının artmasıyla farklı sürelerde kürlenmiş beton numunelerin mukavemeti üzerine etkisi	66
4.4 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği	67
4.5 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği	69
4.6 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği	69
4.7 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	73

4.8 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	73
4.9 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	74
4.10 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	75
4.11 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	75
4.12 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	76
4.13 %15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu	77
4.14 %15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu İndisi analiz sonucu	78
4.15 Katısız 28 gün kürlü numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	80
4.16 Katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsü	81
4.17 Katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsü	82
4.18 Katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranında EDX görüntüsü	83
4.19 Katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranında EDX görüntüsü	84
4.20 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik	

büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	86
4.21 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	87
4.22 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	89
4.23 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 1000 büyütme oranında EDX görüntüsü	90
4.24 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 500 büyütme oranında EDX görüntüsü	91
4.25 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 16000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü	92
4.26 28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	93
4.27 28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri	95
4.28 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin 4000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü	95
4.29 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin 16000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü	97
4.30 Katkısız 14 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	98
4.31 Katkısız 14 gün kürlü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	98
4.32 %5 Frit katkılı 14 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	

	99
4.33 %5 Frit katkılı 14 gün kürlü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	99
4.34 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	99
4.35 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu	100
4.36 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü-kürsüz beton numunelerinin DTA analiz sonucu	100
4.37 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü-kürsüz beton numunelerinin TG analiz sonucu	101

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tipik Bir Betonun Başlıca Özellikleri	14
2.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Miktarları	20
2.3. Çimentonun Ana Bileşenleri	21
2.4. Portland Çimentosunun Tipik Kimyasal Analizi	24
2.5. Çimentodaki Ana Bileşenlerin Özellikleri	28
2.6. TS-EN197-1 Standardı Kapsamında Çimento Çeşitleri	39
2.7 Çimentoların dayanım ve priz başlama süresi özellikleri	41
2.8. Normal ve Ağır Beton İçin Basınç Dayanımı Sınıfları	51
3.1. Karışım Türlerine Göre Beton Karışım Oranları	56
4.1 Tüm harç karışımlarının basma mukavemeti testi sonuçları	63
4.2 Katkısız ve %5 Frit katkılı çubukların elastik modül değerleri	70
4.3 Katkısız kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazlar	71
4.4 %5 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazlar	71

4.5 %10 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazlar	71
4.6 %15 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazlar	72

1.GİRİŞ

Beton uzun yıllardan beri irili ufaklı birçok yapıda kullanılmakta olan ve güncelliğini kaybetmeyen önemli bir yapı malzemesi durumundadır. Konutlar, köprüler, sulama kanalları, barajlar, yollar bu yapılardan birkaçıdır. Betonun kullanılma sebebi; yapılarda yük taşıyıcı eleman olarak görev yapan çelik örgüyü çevreleyerek sabit kalmasını sağlamasının yanında şekil verilebilme kolaylığı, mukavemeti, fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılığı, ekonomik oluşu, kullanım ve üretimindeki pratikliğidir.

Betonun yapı malzemesi olarak kullanım sebebi açısından belirtilen özellikleri sağlamasında, beton karışımını oluşturan çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisinde yer almış oldukları oranlar etkilemektedir.

Betonu oluşturan hammaddeler arasında en önemli ve en pahalı hammadde olmasından dolayı, çimentoların fiziksel özellikleri, kimyasal özellikleri ve miktarı, betonun performansına ve ekonomisine etki etmektedir. Türkiye’de ve dünyada inşaat sektörünün en önemli malzemelerinden biri olan çimentoların özelliklerini iyileştirme, daha ekonomik ve kaliteli hale getirmek amacıyla yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bu amaçla puzolanik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek için ya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmı ile yer değiştirmek üzere betona katılmaktadır.

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği göstermeyen fakat, ince öğütüldüklerinde sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek, hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşiklerini oluşturan, silis ve alüminalı malzemelerdir. Puzolanlar doğal puzolanlar (doğada bulunan volkanik tüfler, volkanik küller, ısıtılmış killeri) ve yapay puzolanlar (endüstriyel yan ürünlerden elde edilen uçucu küller, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Ayrıca 1970’lerde çalışılmaya

başlanan fakat, özellikle son yıllarda yapılmış birçok çalışmanın sonuçları, atık camların çok ince öğütüldüğünde puzolanik özellik sergilediğini göstermiştir. [1]. Camın çok ince tane boyutlarında öğütülerek puzolan olarak kullanılmasında camın çeşidi, kompozisyonu ve fiziksel özellikleri göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. [2]. Camlar ana kompozisyonu baz alınarak camsı silika, alkali silika, soda-kireç camları, borosilikat camları, kurşun içeren camlar, baryumlu camlar, alümina silikat camlar olarak sınıflandırılabilir. Camların belirli özelliklerini geliştirmek veya renk vermek amacıyla, cam katkılanabilir. Atık cam olarak, soda kireç camları ağırlık itibarıyla % 80 orandadır. Renk bazında % 63 saydam, % 25 bal rengi, % 10 ve yeşil % 2 mavi veya diğer renklerdir. Bu camların ana kompozisyonu, renk vermek amacıyla az miktarda kullanılan katkı maddeleri hariç aynıdır. Soda-kireç camları yaklaşık % 73 SiO₂, % 15 Na₂O ve % 10 CaO içermektedir. Borosilikat camları ve kurşun içeren camlar sırasıyla yaklaşık olarak %60-80 oranında silika içermektedir. Fakat, yüksek miktarda kurşun içeriğinden dolayı kurşunlu camlar beton sektöründe kullanılmamaktadır. Borosilikat camlarının kullanımı ise yaygın değildir. Böylece soda-kireç-silika camlarının kimyasal kompozisyonunun uygunluğu baz alınarak, puzolanik malzeme olarak beton üretiminde kullanılabilir [3].

Yixin Shao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, öğütülmüş atık camın puzolanik özelliğinin değerlendirilmesi ve çimento ile uygun oranda yer değiştirmesi üzerine bir başlangıç çalışması olarak kabul edilebilir. Söz konusu çalışmada kullanılan atık cam; tipik bir soda-kireç-silika camı olan florasan lambalarından elde edilmiştir. Cam <38µm tane boyutuna öğütülmüş ve %30 oranında çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılmıştır. [4]. Ahmad Shayan ve Aimin Xu tarafından yapılan çalışmada soda-kireç-silika camından oluşan ve ambalaj için kullanılan karışık renkte cam kullanılmıştır. İnce öğütülmüş cam tozunun performansının araştırılması için tane boyutu <10µm olacak şekilde cam tozu %20-30 çimento yerine kullanılmıştır. [5]. A.Karamberi ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada çimento yerine cam kullanmak amacıyla, cam ve çimento uyumluluğu incelenmiştir. Kurşun bileşenli, bal rengi ve yeşil renkte ambalaj camları Yunan piyasasında yaygın olması sebebi ile seçilmiştir. Ayrıca, camın puzolanik aktivite potansiyelinin geliştirilmesi incelenmiş ve çalışmanın sonuçları, beton üretiminde camdan yararlanma potansiyeli hakkında teşvik edicidir [6]. Ömer Özkan ve İsa

Yüksel yapmış oldukları çalışmada bağlayıcı olarak, öğütülmüş atık şişe camlarının ve endüstriyel yan ürünler içeren harçların özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla, bal rengi ve renksiz olmak üzere iki farklı renkte camın tek başlarına ve yüksek fırın cürufu ilavesi ile çeşitli oranlarda çimento yer değiştirmesi ile oluşturulan harç numuneleri üretilmiştir. [7]. Karışık renkli atık cam, sektöründe yeniden kullanılamaz atık malzemedir. Karışık renkte atık camların geri dönüşüm yöntemiyle beton sektöründe kullanılabilmesi yeni bir pazarı ortaya çıkarmaktadır. Bashar Taha ve Ghassan Nounu çalışmalarında, atık camlardan elde edilen puzolanik cam tozu ve cam kumunu betonda sırasıyla kum ve çimento yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. [8]. Nathan Schwarz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, cam tozu katkılı betonların dayanıklılık özelliklerinin araştırılması üzerinedir. Üretilen numuneler cam tozu ile aynı oranda, çimento ile yer değiştirme yapılan uçucu kül katkılı beton numuneler ile karşılaştırılmıştır. [9].

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojinin hızla gelişmesinden dolayı, dünyadaki enerji tüketimi son yıllarda önemli derecede artmaktadır. Doğal kaynakların azalması, hava ve çevre kirliliği, endüstriyel atık malzemelerin kullanılma fikrine popülerlik kazandırmıştır. Son yıllarda, özellikle büyük kentlerde atıkların denetim ve kontrol altına alınmasına yönelik çalışmalar hızlandırılmıştır. Bu amaçla üzerinde önemle durulan konulardan birisi de kentsel katı atıkların geri kazanılarak, ekonomiye bir katkı sağlanmasıdır. Evsel katı atıkların yakma ünitelerinde elde edilen uçucu kül, kazıyıcı dip külü gibi puzolanik özellik gösteren malzemeler, belirli oranda çimento ve agrega yer değiştirmesi ile beton üretiminde kullanılmaktadır.

Tzen-Chin Lee ve arkadaşları evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen kazıyıcı külü ve uçucu kül karışımını 3:1 oranında karıştırarak 1400°C’de ergitip, ani su soğutması ile katılaştıktan sonra elde edilen camı belirli bir tane boyutunda öğüterek çimento ile belli oranda yer değiştirip beton üretiminde kullanmışlardır. [10, 11, 12, 13]. Monica Ferraris ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen uçucu külün 1450°C’de ergitip, ani su soğutması ile elde ettikleri camı belirli tane boyutlarına öğüterek yapmış oldukları çalışmada beton üretiminde kullanmışlardır. [14].

1.1.Çalışmanın Amacı

Frit formundaki cam tozunun beton bünyesine ilavesinin, betonun mekanik davranışı ve mikro yapıdaki faz tiplerine ve gelişimi üzerine etkisini incelemek bu çalışmanın amacıdır. Bu amaçla; CEM V-A (S-P) 32,5 normal dayanımlı (N) kompaze çimento (KZÇ), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği binasının inşaat alanından getirilen kum, Gebze ilçesi şebeke suyu ve Gizem Frit firmasından temin edilen $K_2O-Na_2O-SiO_2$ esaslı bir camın ergitilerek ani soğutulması ile elde edilen frit kullanılarak, belirli karışım oranlarında hazırlanacak beton numunelerinin, katkı olarak sadece KZÇ'nin kullanılmasıyla hazırlanacak beton numunelerinden elde edilen verileri referans kabul ederek, karşılaştırmalı karakterizasyonu yapılacaktır.

1.2. Literatür Taraması

Beton karışımlarına cam tozu ilavesi ile ilgili literatüre kazandırılmış bilimsel çalışmalar son yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Bu bölümde bu çalışmalar hakkında kısa bir literatür özeti verilecektir.

Ahmad Shayan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen önceki çalışmalarda puzolanik malzeme olarak cam tozunun beton karışımında kullanımının uygun olduğu görülmüştür.[1, 15] Söz konusu çalışmada kullanılan cam tozu karışık renkte ambalaj için kullanılmış soda-kireç camından oluşan atık camlardan sağlanmıştır. %20-30 cam tozu (88% $<10 \mu m$ ve 12% $>15 \mu m$) çimento yer değiştirmesi ile çimento yerine kullanılmıştır. %40-75 oranında cam iri agrega yerine 0.60–2.36 mm, ince agrega yerine 0.15–0.30 mm tane boyutlarında kullanılmıştır. Toplamda 10 karışım hazırlanmıştır. 28 gün kürlenен numunelerden sadece %20 oranda cam tozun çimento ile yer değiştirdiği karışımda hedeflenen 40 MPa dayanımı sağlamıştır. 404 gün kürlenен tüm karışımlarda hedeflenen 40 MPa dayanımı aşılmış ve 55 MPa dayanıma ulaşılmıştır. [5].

Caijun Shi ve Keren Zheng tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda; cama ince öğütme yapıldığında, amorf olması ve büyük miktarlarda silika ve kalsiyum içermesinden dolayı cam, teorik olarak puzolanik karakterde ve hatta çimentomsu olarak kabul edilebilir. Böylece cam, betonda çimento ile yer değiştirmesi yapılarak çimentonun yerine kullanılabilir. Nispeten büyük parçacıklar halinde kırılan camlar ve portland çimentosu kullanılarak hazırlanan beton karışımlarında %100 oranda agrega yerine kullanıldığı durumda camın betona ilavesinin olumlu bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada, beton üretiminde camların uygun şekilde kullanımına değinilmiştir. Bu makalede, çimento ve beton üretiminde atık camların üç olası kullanım şekli değerlendirilmiştir. Beton agregası olarak atık camların kullanımı işlenebilme, mukavemet ve çimento beton donma-çözülme dayanımı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Ancak asıl endişe cam agrega içeren betonlarda genleşme ve çatlamların olmasıdır. Betonun cam agregadan kaynaklanan olması muhtemel korozyon ve genleşmesini önlemek için portland çimentosunun uçucu kül, füme silika gibi puzolanlarla yer değiştirmesi ile sistemin Ph'nın 12'nin altında tutulması sağlanabilir. Atık camlar çimento üretiminde silika kaynağı olarak hammadde şeklinde kullanılabilir. Ancak, klinker içerisinde sıvı içeriği artacak ve Na içerikli bileşikler çimentonun alkali içeriğini arttıracaktır. Bu etki kullanılan atık cam miktarıyla orantılıdır. Hammadde olarak kullanılan atık cam oranı düşükse, etkileri çok az olabilir. Öğütölmüş atık cam tozları çok iyi puzolanik reaktivite göstermektedir ve çimento yer değıştirmesi şeklinde beton üretiminde kullanılabilir. İnceliğı arttıkça puzolanik özelliğı de artmaktadır. [3].

Evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen uçucu kül ve kazıyıcı küllerinin 1:3 oranında karıştırılmasıyla elde edilen karışıma CaO/SiO_2 oranı baz alınarak frit ilave edilmiş ve böylece farklı bazlık değerlerinde katkılı karışık kül karışımları elde edilmiştir. Elde edilen karışık kül karışımları 1400°C ' de ergitilmiştir. Su soğutması yapılarak aniden sertleşmesi sağlanmış ve daha sonra $<38\mu\text{m}$ tane boyutunda öğütölmüştür. 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, ve 1.2 bazlık değerlerinde karışımların %20 çimento yer değıştirmesi ile elde edilen betonların özellikleri Tzen-Chin Lee ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Tüm karışımlardan hazırlanan numuneler $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ çözeltisinde 7, 28, 56, 90 gün kürlenmiştir. 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, ve 1.2 bazlık değerlerine sahip çimento harçları, sıradan çimento harcına nazaran biraz daha uzun

katılaşma başlangıç zamanı, biraz daha düşük katılaşma sonlanma zamanı gösterdiğinden; biraz daha düşük akışkanlığa sahiptir. Referans numunelere göre 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, ve 1.2 bazlık değerlerine sahip çimento harç numunelerinin 1 ve 7 günlük basma dayanımları düşüktür. 28 günlük basma dayanımları referans numunelerle benzerdir. Ancak yararlı etkileri %20 çimento ile yer değiştirdiği numunelerin 90 günlük basma dayanımı sonunda elde edilmiştir. En iyi sonuç 1.1 bazlık değerinde 60,9 MPa basınç dayanımı ile %20 çimento ile yer değiştirmesi sonucu elde edilen beton numunelerinden sağlanmıştır. [10].

Nathan Schwarz ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ince öğütülmüş cam ile katkılanırılmış beton karışımları ile uçucu kül katkılı beton karışımlarının dayanıklılık özellikleri; aynı oranda çimento yer değiştirmesi yapılarak üretilen beton örnekleriyle karşılaştırılmıştır. En iyi sonuç çimentonun %10 (öğütülmüş) cam tozu ile yer değiştirmesi sonucunda elde edilmiştir ve cam tozu ve uçucu kül katkılı karışımların 90 gün kür edilmiş numunelerinin basınç dayanımları arasındaki fark %5 dir. [9].

Monica Ferraris ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada kuzey İtalya'da evsel katı atık yakma fırınından elde edilen dip külü 1450°C'de hiçbir katkı maddesi olmaksızın ergitilmiştir. Sonra öğütülmüş ve tane boyutu 50µm-20 mm olmak üzere elenmiş ve betonda agrega, dolgu maddesi ve kum yer değiştirmesi şeklinde kullanılmıştır. Tane boyutu 50µm, 90µm olacak şekilde %5, %10, %20 ağırlıkta çimento ile yer değiştirmiş., <5 mm, 4-10 mm, 10-20 mm olmak üzere hacimce 25, 50, 75, 100 olacak şekilde agrega yerine kullanılmıştır. Örnekler çökme testi (UNI 9418), alkali-silika reaktivitesi (UNI 8520/22 ve ASTM C 298), basma dayanım testine (UNI 6132, 6132/72, 6686/72) göre karakterize edilmiş ve ergitilmiş dip külü olmadan elde edilen referans örnekleriyle kıyaslanmış. Kum yerine kullanılan ergitilmiş dip külünün uygun olmadığı, ancak ergitilmiş dip külünün %20 ağırlıkta çimento ile dolgu maddesi olarak yer değiştirmesinin ise uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, harçlarda dolgu malzemesi olarak 90µm tane boyutunda %20 ergitilmiş dip külü kullanılarak hazırlanan numunelerin basma dayanım sonucu referans numunelere yakındır. Ergitilmiş dip külünün 5-10 mm, 10-20 mm tane boyutlarında hacimce %75'e kadar doğal agrega olarak kullanılması sonucunda,

referans örnekle aynı mekanik özellikler göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları evsel katı atık yakma fırınından elde edilen ergitilmiş dip külünün beton üretiminde doğal agrega yerine kullanılabilirliğini göstermektedir. [14].

Tzen-Chin Lee ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada ise daha önce yaptıkları ve olumlu sonuç elde ettikleri çalışmayı daha da ileri götürmüşlerdir. Bu çalışmada, evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen uçucu kül ve kazıyıcı küllerin 1:3 oranında olacak şekilde ön karıştırma yapılması ve ilave olarak döküm kumundan elde edilen uçucu külün bazlık derecesinin (CaO/SiO_2) 1.1 olacak şekilde ön karıştırma yapılması ile hazırlanan karışıma katılmasıyla 1400°C 'de ergitilmesi yapılmıştır. Su soğutması yapılarak aniden sertleşmesi sağlanmış ve daha sonra $<38\mu\text{m}$ tane boyutunda öğütülmüştür. Ağırlıkça %10-20-30-40 oranlarında $<38\mu\text{m}$ tane boyutunda öğütülen toz çimento ile yer değiştirmiştir. Su/çimento oranı 0.48 olacak şekilde hazırlanan beton karışımları 7, 28, 56 ve 90 gün kalsiyum hidroksit çözeltisinde kür edilmiştir. Bu çalışmada; %30 çimento ile yer değiştirmesi sonucu hazırlanan örneklerden en iyi basınç dayanımları sonucu elde edilmiştir. [11].

Tzen-Chin Lee ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada Tayvan'ın kuzeybatısındaki Hsinchu evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen uçucu kül ile kazıyıcı külünün 1:3 oranında karıştırılmasıyla elde edilen karışıma koyu yeşil cam şişelerin öğütülmesi sonucu elde edilen frit katılarak, bazlık derecesi (CaO/SiO_2 oranı) 1.1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Tzen-Chin Lee daha önce 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, ve 1.2 bazlık değerlerinde karışımlarla çalışmış ve bu çalışmanın sonucunda en uygun bazlık değerinin 1.1 olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada da bazlık derecesi 1.1 olacak şekilde hazırlanan karışım 1400°C 'de ergitilmiştir. Su soğutması yapılarak aniden sertleşmesi sağlanan cam fritin daha sonra $<38\mu\text{m}$ tane boyutunda olacak şekilde öğütülmesi sağlanmıştır. Elde edilen toz, ağırlıkça %20-30 ve 40 oranlarında çimento ile yer değiştirecek şekilde ve su/çimento oranı da 0.485 olacak şekilde beton karışımları hazırlanmıştır. 7, 28, 60 ve 90 gün kalsiyum hidroksit çözeltisinde kür edilmiştir. Tüm yer değiştirme oranlarındaki beton numunelerinin 60 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 45.81, 46.55 MPa olarak portland çimentosu kullanılarak elde edilen numunelerin 60 ve 90 günlük basınç dayanımlarından yüksek çıkmıştır. [16].

Tzen-Chin Lee ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada da yine Tayvan'ın kuzeybatısındaki Hsinchu evsel katı atık yakma ünitesinden elde edilen uçucu kül ve kazıyıcı külün 1:3 oranında karıştırılmasıyla elde edilen karışıma cam şişelerin öğütülmesi sonucu elde edilen frit bazlık derecesi (CaO/SiO_2 oranı) 1.1 olacak şekilde katılmıştır. Elde edilen karışım 1400°C ' de ergitilmiştir. Su soğutması yapılarak aniden sertleşmesi sağlanmış ve daha sonra $<38\mu\text{m}$ tane boyutunda öğütülmüştür. Portland çimentosu ve uçucu kül-kazıyıcı külü ve frit karışımının vitrifikasyonu sonucu $<38\mu\text{m}$ tane boyutlu toz katkılı harç karışımları su/çimento oranı 0.48, 0.58 ve 0.68 olacak şekilde farklı beton karışımları hazırlanmıştır. Uçucu kül-kazıyıcı kül ve frit karışımının ergitilmesi sonucu elde edilen toz %20 çimento yer değiştirmesi şeklinde beton karışımları hazırlanmıştır. Tüm karışımlardan hazırlanan numuneler (Ca(OH)_2) çözeltisinde 7, 28, 56, 90 gün kürlenmiştir. 28 gün kürlenmiş uçucu kül-kazıyıcı kül ve frit karışımının ergitilmesi sonucu elde edilen toz karışımının kullanıldığı beton örneklerinin basınç dayanımları sadece portland çimentosu kullanılarak hazırlanan karışımların dayanımından yüksektir. 56 ve 90 gün kürlenmiş her iki tip numune örneklerinin basınç dayanım sonuçlarında ise sadece portland çimentosu kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımı daha yüksektir. Tzen-Chin Lee , Wei-Jer Wang , Ping-Yu Shih; 2007' de yapmış oldukları benzer çalışmaya ek olarak Tzen-Chin Lee , Chieh-Jen Chang, Ming-Kang Rao, Xun-Wei Su SEM/EDX analizi ve elastik modül analizi yapmışlardır. Hazırlanan iki tip karışımdan elde edilen numunelerin elastik modülleri arasında fark yok denecek kadar azdır. [13].

Karamberi ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çimento yerine cam kullanımının uygunluğu incelenmiştir. Kurşun bileşenli, koyu sarı ve yeşil renkte ambalaj camları Yunan piyasasında yaygın olması sebebi ile seçilmiştir. Bu üç tip cam öğütüldükten sonra tane boyutu en az $90\mu\text{m}$ olacak şekilde elenmiştir. Kırık camlar yüksek silis içeriğinden dolayı amorf yapıdadır. Yunanistan'da Megalopoli ve Ptolemais'den temin edilen uçucu kül, cam kırıkları ile hazırlanan betondan elde edilen sonuçlar sadece cam kırığı katkısı ile hazırlanan beton karışımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her üç renk tipi için en az $90\mu\text{m}$ olacak şekilde öğütülen cam kırıkları %25 çimento ile yer değiştirmiştir. Kullanılan çimento 42,5 MPa dayanıma sahip portland çimentosudur. Kullanılan agrega ASTM C778'e göre

temin edilmiştir. Uygun yer değiştirme oranında çimento yerine kullanılan renkli camların kullanımının uygun olduğu görülmüş. Basınç dayanım sonuçları kullanılan ince öğütülmüş camların puzolanik malzeme olarak kabul edilebilirliğini göstermiştir. Farklı renkte camların kullanımıyla üretilen beton numuneler arasında son dayanım değerlerinde farklılıklar görülmüştür. Yeşil renkte ve kurşun içeren cam kırıklarıyla hazırlanan beton numunelerinin, koyu sarı renkte cam kırıklarıyla hazırlanan beton numunelerinden daha iyi dayanım sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. [6].

İlker Bekir Topcu ve Mehmet Canbaz tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yeşil renkli camlar kırılarak betonda iri agrega fonksiyonunda kullanılmıştır. Çünkü yeşil renkli soda camının geri dönüşümü yoktur. Atık cam öğütülmüş kalkerli taş agrega yerine %0, 15, 30, 45, 60 yer değiştirme oranlarında tane boyutu 4–16 mm olacak şekilde kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.54 olacak şekilde 5 çeşit beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara ait beton örnekleri 22°C doygun kireç çözeltisinde 28 gün kür edilmiştir. PKÇ/B (portland kompoze çimento) 32.5R (erken dayanımlı) çimentosu kullanılmıştır. Agrega ile yer değiştiren atık cam miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Agrega olarak kullanılan atık cam ile çimento arasında yetersiz bağlanma sebebiyle atık cam çatlaklara neden olmuştur. Atık camın kötü geometrisi nedeniyle, homojen bir karışım elde edilememiş dolayısıyla, artan atık cam oranı ile basma dayanımları düşük betonlar elde edilmiştir. [17].

Karışık renkte atık cam geri dönüşüm yapılarak cam sektöründe kullanılamamaktadır. Karışık renkte atık camların geri dönüşüm yöntemiyle beton sektöründe kullanılabilmesi yeni bir pazarı ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada renkli atık camların beton üretiminde kum ve puzolanik cam tozu olarak çimento yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakolin portland çimentosu yerine beton davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması için farklı oranlarda katılarak beton karışımları hazırlanmıştır. Yüksek fırın cürufu %50 ve %100 oranlarında kum, cam tozu ise %20 oranında kullanılmıştır. Kullanılan cam tozunun tane boyutu 45 µm'dir. Hazırlanan karışımlarda portland çimentosu kullanılmıştır. Puzolanik cam tozunun kullanımı

betonun plastik özelliğini geliştirmiştir. Geri dönüşümlü cam kumunun doğal kum yerine kullanıldığı karışımlarda istenilen kıvam, dayanım performansı sağlanamamıştır. %20 çimento yer değiştirmesi yapılarak hazırlanan beton karışımlarının basma mukavemetleri %100 çimento kullanılarak hazırlanan kontrol beton karışımlarının basma mukavemetlerinden %16 daha düşük çıkmıştır. [8].

Zainab Ismail ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada atık camın betonda ince agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Cam %10-15-20 oranlarında kum ile yer değiştirmesi şeklinde kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlarda portland çimentosu kullanılmıştır. Hazırlanan tüm beton karışımlarında 14 gün kür edilenler haricinde, kontrol karışımdan daha yüksek basma dayanımı elde edilmiştir. En iyi basma dayanımı değerleri; %20 yer değiştirme oranında 28 gün kür edilen beton numunelerinden elde edilmiştir. Pozolanik reaksiyonun, hidrasyon sırasında ileriki aşamalarda gerçekleştiğinden 28 günden sonra basınç dayanım artışı ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. [18].

Ömer Özkan ve İsa Yüksel tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, öğütülmüş atık renksiz (RC) ve kahverengi (KC) renkte şişe camı ve Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiş yüksek fırın cürufu (YFC) içeren harçların özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, iki farklı renkte camın tek başlarına ve cama ilaveten yüksek fırın cürufunun çimento ile çeşitli oranlarda yer değiştirmesi suretiyle oluşturulan beton numuneleri üretilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı 42.5 MPa olan CEM I Portland (PÇ) tipi çimento kullanılmıştır. Çimento ile yer değiştirmesi yapılan camların ve YFC'nin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en iyi sonucu veren yer değiştirme oranı % 10 olarak belirlenmiştir. % 10 yer değiştirmede renksiz cam, kahverengi cama göre daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. Camlar ile birlikte YFC'nin kullanıldığı serilerin 28 günlük basınç dayanımlarının cam yer değiştirmeli serilerden daha yüksek olduğu görülmüştür.[7].

Yixin Shao ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise ince toz halinde öğütülmüş atık camın çimento ile yer değiştirmesiyle hazırlanan betonların basınç dayanımları çalışılmıştır. Kullanılan atık cam tipik bir soda-kireç camıdır.

150-75-38 μ m tane boyut aralıklarında olacak şekilde üç tip öğütülmüş cam kullanılmıştır. Camın %30 çimento ile yer değiştirmesi yapılarak hazırlanan betondan elde edilen sonuçlar, yine aynı oranda silika fume ve uçucu külün çimento ile yer değiştirmesi yapılarak hazırlanan beton numunelerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Hazırlanan karışımların tümü 3, 7, 28, 90 gün kürlü kontrol numunelerinden düşük basma dayanımı göstermiştir. Ancak, 38 μ m tane boyutuyla hazırlanan beton karışımlarının 90 gün süresiyle kürlenmiş numunelerinin basma dayanımları kontrol numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Çalışmada kullanılan üç tip tane boyutuyla hazırlanan beton numunelerinin basma dayanım sonuçları göstermiştir ki; öğütülmüş camın tane boyutu azaldıkça dayanımı artmaktadır. [4].

Diğer bir çalışma ise, beton için ince agregası olarak Kore'den temin edilen kırılmış zümrüt yeşili, koyu sarı, kurşunlu cam ve karışık renkte camların beton üretiminde etkilerini incelemek üzere yapılmıştır. Kullanılan camlar soda kireç camı olup, cam eşya ve şişelerden elde edilmiştir ve tane boyutu 5 mm den az olacak şekilde %30, %50, %70 çimento ile yer değiştirmesi yapılarak kullanılmıştır. Karışıma giren cam miktarı attırıldığı takdirde basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. % 30 atık cam agregası içeren beton en yüksek dayanım özelliği göstermiştir. Ayrıca, karışımlarda camın farklı renkte olması beton basınç dayanım sonuçlarında farklılık yaratmamıştır.[19].

Çimento bir ince öğütülmüş mineral katkı olarak atık cam kullanımında geri dönüşümü için ümit verici bir yöntem olabilir. ECO (reaktif magnezit, kalsine magnezit veya MgO içeren) -çimento olarak, portland çimento klinkeri nispeten büyük miktarda (% 70) atık cam ile değiştirilebilir. Bu amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada; ECO-çimento üzerinde atık cam etkisinin mikro yapı ve dayanıma etkisi incelenmiştir. Çalışmada pencere camı, beyaz ve siyah monitör camı, kahverengi ve yeşil şişe camı kullanılmıştır. CEM-I 42.5 portland çimentosu ve yüksek performans çimentosu kullanılmıştır. 6 çeşit karışım hazırlanmış ve hazırlanan karışımların hepsinde cam %50, süper silika %10 oranında sabit tutulmuş, fakat hazırlanan çimento karışımlarının klinker ve alçıtaşı miktarları değiştirilmiştir. 6 çeşit karışımdan hazırlanan numuneler 2, 7, 28 gün kürlenmiş ve basma testi

uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre en iyi 28 günlük basınç dayanımını pencere camı içeren karışım vermiştir. Monitör camı, yeşil ve kahverengi şişe camı içeren karışımların 28 günlük basma dayanımı referans karışıminkine yakın değerler vermiştir. Ancak, tüm cam karışımlarının basma dayanımı sonuçları yüksek performans çimentosu ile hazırlanan referans örneğinden (cam katkısı yok fakat %10 süper silika katkısı var) düşük değer vermiştir. Geliştirilen ECO-çimentosunun basınç dayanım değerleri portland çimentosuna yakındır. Mikro yapı incelemesinde cam katkısının portland çimentosundan farkı cam taneler arasındaki puzolanik reaksiyondaki kalsiyum hidroksit (CH) tüketiminden kaynaklanan CH boyutunun ve miktarının az olduğu sonucuna varılmıştır. [20].

Diğer bir çalışmada ise; cam iri agrega olarak 4,75-12 mm, ince agrega olarak 0,15-4,75 mm ve cam tozu olarak $<10\mu\text{m}$ tane boyutlarında olmak üzere 3 şekilde kullanılmıştır. İri agrega olarak cam, çalışmada doğal agrega yerine kullanılmıştır. Cam tozunun silika füme ve uçucu kül gibi puzolanik özellikte olup olmadığı araştırılmıştır. Çimento, uçucu kül ve iri cam agrega beton karışımı numuneleri ile çimento, uçucu kül, iri ve ince cam agrega karışım numuneleri karşılaştırılmış ve çimento, uçucu kül, iri ve ince cam agrega karışım numunelerinin 28 günlük basma dayanım sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Silika fümenin %5, %10 oranında çimento ile yer değiştirmesi şeklinde ilavesi ile ve %10, %20, %30 cam tozunun çimento ile yer değiştirmesi şeklinde hazırlanan karışım numuneleri sadece çimento ile hazırlanan kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. %30 cam tozunun çimentoya da agrega ile yer değiştirmesi şeklinde kullanımının sakıncası olmadığı görülmüştür.[21].

2.TEORİK BİLGİLER

2.1. Beton

Çimento, su, agrega (kum, çakıl, kırma taş) ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen yapı malzemesidir. Malzemeler karıştırıldıktan birkaç saat sonra, şekil verilebilir (plastik) bir karışım durumunda olan beton, istenilen şekil ve boyutlardaki kalıplara yerleştirilebilmekte, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların (hidratasyonun) ilerlemesiyle katılaşp sertleşmektedir. Böylece istenilen şekil ve boyutlardaki sertleşmiş beton ürün elde edilebilmektedir.

Betonun plastikliğini koruduğu süredeki durumuna ‘taze beton’ denilmektedir. Taze betonun katılaşmasından sonraki safhadaki durumu ‘sertleşmiş beton’ olarak adlandırılmaktadır.[22].

Betonun tüm özelliklerini, beton karışımının oluşturulmasında kullanılan çimentonun, agreganın, suyun ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisinde yer almış oldukları oranlar etkilemektedir.

Betonun yapı malzemesi olarak geniş bir uygulama alanı olması, diğer yapı malzemelerine kıyasla:

- Son derece ekonomik oluşundan kaynaklanmaktadır. Betonu oluşturan hammaddeler içinde yalnızca çimento için enerji harcanır. Çimento beton üretiminde kütleli olarak %10-15 yer alır. Beton hacminin yaklaşık dörtte üçünü oluşturan agregalar hemen her yerde bulunabilen ve maliyete çok az etki yapan bir hammaddedir. Ayrıca agregalar, su ve gerektiğinde beton yapımında kullanılan mineral katkıları, yapının bulunduğu bölgeden temin edilebilmektedir. Bölgesel malzemenin kullanılması yapının ekonomik olmasına yol açabilmektedir. [23].

- Taze betonun plastik yapıya sahip olması ve bu özelliğini birkaç saat süreyle koruyabilmesi nedeniyle, taze betonun istenilen şekil ve boyutlardaki kalıpların içerisine kolayca yerleştirebilmek mümkündür. Betonun yeterince sertleşmesinden sonra kalıpların sökülmesiyle, istenilen şekil ve boyutlarda sertleşmiş beton elemanlar elde edilebilir.
- Beton sertleşmeden önce bir kil hamuru kadar yumuşak ve akışkandır. Buna karşın, sertleştikten sonra doğadaki taşlar kadar sert ve sağlamdır.
- Sertleşmiş beton hizmet gördüğü süre boyunca çevrede oluşan yıpratıcı etkenlere karşı diğer yapı malzemelerinin çoğundan (ahşap, çelik gibi) daha dayanıklıdır. Bakım işlemleri ve bakım masrafı gerektirmemektedir. Tablo 2.1’de yapı betonlarının değişik özelliklerine ait tipik değerler verilmektedir.

Tablo 2.1 Tipik Bir Betonun Başlıca Özellikleri [22]

Özellikler	Tipik Değerler
Basınç Dayanımı	35 MPa
Eğilme Dayanımı	6 MPa
Çekme Dayanımı	3 MPa
Elastiklik Modülü	28000 MPa
Poisson Oranı	0,02
Kırılmadaki Çekme- Birim Deformasyonu	0,001
Isısal Genleşme Katsayısı	$10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Büzülme (Rötre) Birim Deformasyonu	% 0,05-0,1
Yoğunluk	
Normal Ağırlıklı Beton	2350 kg/m ³
Hafif Beton	1800 kg/m ³

2.2.Beton ve Beton Bileşenleri

2.2.1.Çimento

Beton üretiminde en büyük rolü üstlenen hammaddelerden biri çimentodur. Çimento, gerek kendi başına gerekse agregalarla (kum, çakıl, kırma taş gibi) birlikte su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır.

Önceleri plastik durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma gelmekte katılaşp sertleşmektedir. Çimento hamurunun içerisindeki su ve çimento arasındaki kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon) uygun sıcaklık ve nem ortamı mevcut olduğu sürece devam etmektedir. Çimento hamurunun hangi hızda katılaşabileceği ve hangi hızda mukavemet kazanabileceği, çimentonun ana bileşenleri ile su arasındaki kimyasal reaksiyonların hangi hızda ve ne ölçüde gerçekleşeceğine bağlıdır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon reaksiyonları) ise çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin oranlarına, çimento tanelerinin inceliğine, reaksiyonların devam edebilmesi için yeterli nem ve sıcaklık koşullarının mevcut olmasına bağlıdır.

Betonu oluşturan hammaddelerin karışımı tamamlandıktan sonra beton karışımı birkaç saat içerisinde katılaşmakta, sertleşmektedir. Sertleşmeye başlayan beton, zaman ilerledikçe daha büyük dayanım kazanmaktadır. Betonun bu özellikleri, hidratasyon nedeniyle çimento hamurunun yapısında yer alan değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, çimentonun özellikleri ve çimentonun betonun içerisinde hangi miktarda kullanıldığı sadece taze betonun ve sertleşmiş betonu özelliklerini etkilemekle kalmayıp sertleşmiş betonun dayanıklılığını da etkilemektedir.

Çimento denilince akla ilk gelen portland çimentosudur. 1824 yılında, İngiltere'nin Leeds kentinde Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası, hazırladığı

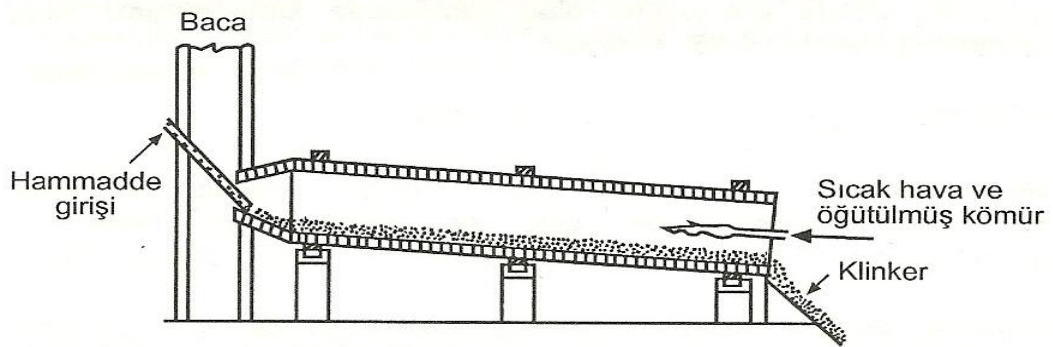
kalkerli ve killi karışımı pişirmiş ve pişirilmiş durumdaki malzemeyi öğütürerek elde ettiği ürüne, su ve kum kattığında zamanla sertleştiğini gözlemlemiştir. Elde edilen malzemenin fiziksel özellikler bakımından İngiltere'nin güneyinde yapı taşları ile ünlü olan Portland adasından getirilen taşlara benzetmiştir. Elde etmiş olduğu ürün için 'portland çimentosu' adı altında patent almıştır. [22].

J. Aspdin tarafından üretilen çimento, hammaddelerin yeterince yüksek sıcaklıkta pişmemesi ve öğütme işleminin yeterli olmaması yüzünden, günümüzde kullanılmakta olan portland çimentosunun özelliklerinden çok farklıdır. Hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda yeterince pişirilip istenilen inceliğe öğütülmesi işlemi sonucu çimento üretimi ilk olarak 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından gerçekleştirilmiştir. [22].

2.2.1.1. Portland Çimentosunun Üretimi

Kalkerli ve killi malzemelerden oluşan hammadde karışımının yüksek sıcaklıklarda (1350-1450°C) 'döner fırın' olarak adlandırılan fırında pişirilmesiyle 'klinker' adı verilen ürün elde edilmektedir. Şekil 2.1'de çimento üretiminde kullanılan döner fırın gösterilmektedir. Klinker; gri siyah renkte, oldukça sert ve çapı 1-25 mm aralığında değişen parçacıklardan oluşmaktadır. Klinkerin pişirilmesinden sonra, soğutulan klinkere % 3-6 oranında alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. Elde edilen ürün 'Portland Çimentosu' dur.

Klinker + %3-%6 Alçı Taşı $\xrightarrow{\text{öğütme}}$ Portland Çimentosu



Şekil 2.1 Portland çimentosu üretiminde kullanılan döner fırın [22].

2.2.1.1.1.Kullanılan Hammaddeler

Çimento klinkerinin üretiminde kullanılan başlıca hammaddeler kalkerli ve killi malzemelerdir.

Kalker:

Kalker doğada saf halde bulunmayıp, bileşiminde %90'a kadar kalsiyum karbonat (CaCO_3), değişen oranlarda magnezyum karbonat (MgCO_3), silika, demir oksit, alüminyum oksit, kükürt ve alkaliler yer almaktadır. Çok saf haline 'kireç taşı' denilmektedir.

Kalker doğada kalsit ve aragonit kristallerinden oluşmuş bir kayaç olarak bulunduğu gibi 'dolomit' [$\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$] olarak da bulunur.

Kil:

Kil mineralleri esas olarak silika (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmaktadır. Kil minerallerinin bileşimi genellikle alüminyum oksit ve alüminyum silikat hidratlardan meydana gelmektedir. Kil mineralleri doğada ender olarak saf halde bulunur. Az miktarda magnezyum, kalsiyum, potasyum ve sodyum elementleri içerir.

Alçı taşı:

Kalsiyum sülfat minerali doğada, bileşiminde iki molekül kristal suyu bulunan jips [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] ve susuz kalsiyum sülfat anhidrit minerali olmaz üzere iki şekilde bulunur. Çimento üretiminde genellikle jips kullanılmaktadır ve klinker içerisine %3- %6 oranında karıştırılarak kullanılır. Alçı taşı çimento hamurunun katılaşma süresini geciktirmekte ve taze betonu, yerine rahat yerleştirme imkanı sağlamaktadır.

2.2.1.1.2.Hammaddelerin Pişirilme İşlemi

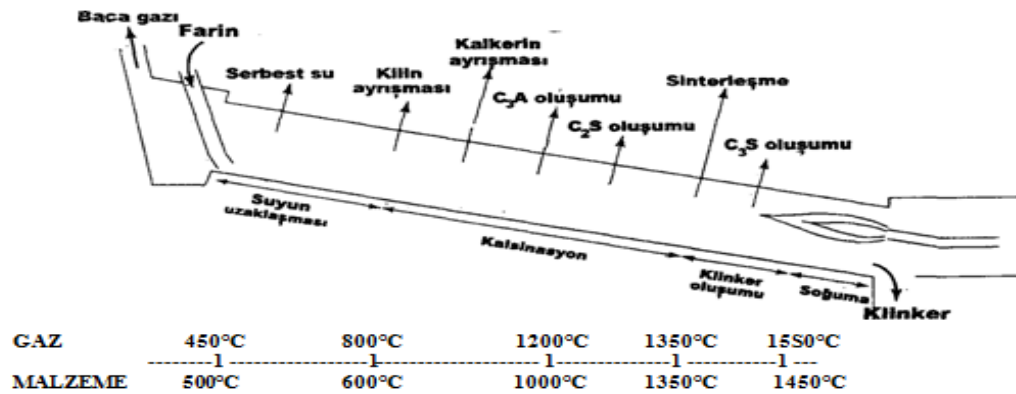
Hammadde karışımı pişirilme işlemine tabi tutulmadan önce, klinker oluşumunda reaksiyonların tümü katı fazda gerçekleştiği için, hammaddelerin çok iyi karıştırılması ve çok ince bir dağılım haline getirilerek temas yüzeylerinin mümkün olduğu kadar artırılması gereklidir. İstenilen kimyasal bileşime sahip ve yeterli inceliğe kadar öğütülmüş olan kalkerli ve killi hammadde karışımı hazırlandığı yönteme göre ‘kuru sistem’ veya su ile karıştırılarak çamur haline getirilmiş ‘yaş sistem’ olarak iki şekilde hazırlanmaktadır. Hazırlanan hammadde karışımı ‘döner fırın’da pişirilmektedir. Döner fırın içi boş, silindir şeklinde, bir ucu diğer ucundan daha yüksekte kalacak şekilde yaklaşık olarak %3-4 eğimle yerleştirilmiştir. Çelikten yapılmış olan bu fırının iç yüzü ateşe dayanıklı tuğlalarla astarlanmıştır. Döner fırınlar, kendi ekseni etrafında saatte 60-180 devir yapabilmektedir. Kendi ekseni etrafında döndüğü için ‘döner fırın’ denilmiştir. Fırında yakıt olarak toz kömür, fuel-oil veya doğal gaz kullanılır. Hammadde karışımı fırının üst ucundan beslenir. Fırının eğiminden ve kendi ekseni etrafında dönme hareketinden dolayı, pişirilen malzeme fırının üst ucundan alt ucuna doğru hareket eder.

Klinker pişirme işlemi hammaddelerin içerisinde bulunan az miktardaki serbest suyun buharlaştırılması ile başlar. Serbest su 100°C’de buharlaşır. Hammadde içerisinde bulunan kilin 500-600°C’de kristal suyu ayrışarak buharlaşır. Kalsiyum ve magnezyum karbonatlar ortamda bulunan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 etkisiyle 550-600°C’de bozunmaya başlar ve 900°C’de bütün karbonatların ayrışması tamamlanır. Kristal suyunu kaybeden kil mineralleri 900-1000°C sıcaklıklar arasında bozunarak Al_2O_3 ve SiO_2 gibi oksitlere dönüşmektedir. Açığa çıkan oksitler karbonatlardan karbondioksitin ayrışmasını kolaylaştırır. 900°C’de CO_2 ayrışması ile CaO ve MgO ’in ayrışması tamamlanır. 1000-1100°C arasında (C_2AS) gibi geçici bileşikler oluşurken, 1100-1200°C arasında trikalsiyum alüminat (C_3A) ve tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF) oluşumu büyük ölçüde tamamlanır. Katı fazın bu aşamasında oldukça fazla miktarda serbest kireç oluşur. Yaklaşık 1200°C’de ancak kalsiyum oksit ile silisyum dioksit reaksiyona girerek dikalsiyum silikatı (C_2S) $(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ oluşturabilir. 1200-1250°C’de katı faz reaksiyonları tamamlanır. 1250-1300°C’de

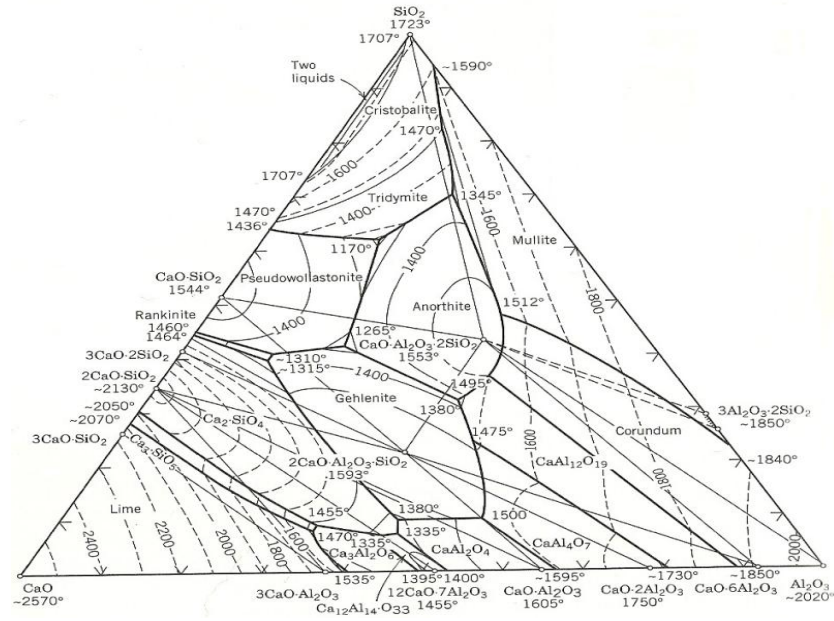
hammadde karışımının %20-30'u sıvılaşma göstermektedir. Burada klinker oluşumunu gerçekleştiren esas reaksiyonlar gerçekleşir. Sıvılaşma olayının başlangıcında serbest CaO içeriği henüz çok yüksektir. Çünkü, silisyum dioksitin tümü dikalsiyum silikat oluşumu için tüketilir. Sıvı fazda CaO ile C_2S birleşerek C_3S ($3CaO.SiO_2$) (trikalsiyum silikat)'ı meydana getirir. Bu aşamada sistemin kısmen eriyik halde olması reaksiyon bileşenleri arasındaki difüzyonu kolaylaştırır. Bu reaksiyon sonucu serbest kirecin konsantrasyonu $1280^{\circ}C$ 'den sonra önemli miktarda azalır. C_3S oluşumu $1450^{\circ}C$ 'de tamamlanır. Tamamlanan reaksiyonlar sonucunda ortaya birbirinden farklı özellikteki ana bileşenler çıkmaktadır. Klinkerin yapısı artık bu ana bileşenlerden oluşmaktadır.

Döner fırının ateşleme bölgesini geçerek en alt bölgeye ulaşan malzeme yaklaşık $1000^{\circ}C$ 'den yüksek bir sıcaklıkta klinker olarak fırını terk eder. Klinker gri siyah renkte, oldukça sert ve boyutları fındık veya ceviz tanesi arasında değişen parçacıklardan oluşmaktadır. Sıcak haldeki klinker soğutucular ile normal sıcaklığa kadar soğutulur. Soğutulan klinkere %3-6 arasında değişen oranlarda alçıtaşı katıldıktan sonra bilyeli veya borulu değirmenlerde kuru olarak öğütülmektedir.

Fırın içinde katı ve sıvı fazda gerçekleşen hidratasyon reaksiyonları ayrı ayrı değil, bir arada yürümektedir. Genel olarak klinker oluşum reaksiyonları ve denge kristalizasyon reaksiyonları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.2 Döner fırın içinde yürüten reaksiyon sıcaklıkları [23]



Şekil 2.3 CaO-Al₂O₃-SiO₂ sistemi [24]

2.2.1.2. Portland Çimentosunun Kimyasal Kompozisyonu

2.2.1.2.1. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler

Portland çimentosunun içerisinde yer alan oksitler ve yaklaşık miktarları Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2 Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Miktarları [22]

Genel İsmi	Oksit	Çimento Kimyasına Göre sembolü	Miktarı %
Kireç	CaO	C	60-67
Silis	SiO ₂	S	17-25
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3-8
Demir	Fe ₂ O ₃	F	0,5-6
Magnezi	MgO	M	0,1-4
Alkaliler	Na ₂ O+K ₂ O	N+K	0,2-1,3
Kükürt anhidrit	SO ₃	Š	1-3

Tablo 2.1’de yer alan SO_3 dışındaki bütün oksitler çimento klinkerini oluşturan oksitlerdir. Klinkerin içerisinde SO_3 bulunmamaktadır. Çimentonun içerisinde yer alan SO_3 , çimento üretimi için kullanılan alçı taşından (CaSO_4 , $\text{CaO}.\text{SO}_3$) gelmektedir. Klinkerde (ve PÇ’nda) yer alan oksitlerden CaO , hammadde karışımındaki kalkerden, SiO_2 ve Al_2O_3 ise kilden elde edilmektedir. Hammaddelerin içerisinde bir miktar Fe_2O_3 bulunmaktadır. Bu dört oksit, çimentonun ana bileşenlerini oluşturan ana oksitlerdir.

Çimentonun yapısında yer alan ve Tablo 2.1’de gösterilmiş olan MgO ve alkalilerin yararlı bir fonksiyonu yoktur. Bu oksitler kullanılan hammaddelerde yer alan oksitlerdir; fazla miktarlarda yer aldıkları takdirde çimento hamurunda ve betonda genleşmeye neden olarak zararlı etkileri olmaktadır.

2.2.1.2.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Ana Bileşenler

Çimentoyu meydana getiren hammadde karışımının döner fırında pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını oluşturan ana bileşenler Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Çimentonun Ana Bileşenleri [22]

Ana Bileşenler	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, (Belite)	C_2S
Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, (Alite)	C_3S
Trikalsiyum aluminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, (Selit)	C_3A
Tetrakalsiyum alüminaferrit, (Kahverengi Millerit) $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Çimento hamuru veya beton elde edebilmek için, çimento ve su bir arada karıştırıldığında her ana bileşen ile su ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon sonucunda

açığa çıkan ürünün, çimentonun bağlayıcılık özelliğine (dayanımına) katkısı farklı olmaktadır.

2.2.1.2.2.1.Kalsiyum Silikatlar

Silisin (SiO_2) kireç (CaO) ile birleşmesi sonunda dört tür kalsiyum silikat meydana gelmektedir.

Kalsiyum monosilikat:

CaO . SiO_2 doğada ‘wollastonit’ adı ile bilinen mineraldir. Bu mineral ince bir şekilde öğütülse bile su ile reaksiyona girerek sertleşme yapmaz.

Trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, C_3S , Alit):

Alit klinkerin ana mineralidir ve mukavemet yönünden çok önemlidir. Normal Portland çimentosu klinkerinde C_3S ’in % 58-64 arasında olması gerekmektedir. Klinkerde C_3S % 65 den fazla ise pişme zorluğunun yanı sıra çimento dayanımı da düşük olmaktadır. İlk günlerdeki priz ve sertleşme üzerinde etkisi olan en aktif bileşendir. Hidratasyon neticesinde fazlaca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ meydana getirmektedir. Tablo 2.5’de görüleceği gibi çimentoların esas bağlayıcılık değerini tayin eden bileşenler, C_3S ve C_2S olmak üzere, kalsiyum silikatlı bileşenlerden biridir [25,26]. C_3S bileşeni hem ilk zamanlarda hem de uzun vadede çimentonun bağlayıcılık özelliğini arttırmaktadır.

Dikalsiyum silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, C_2S , Belit):

Portland çimentosu klinkerinde %25 kadar belit (C_2S) bulunur. C_2S çimentonun geç dayanım kazanmasında etkindir. Belit, alitten daha yavaş sertleşir

ama uzun zaman sonra aynı mukavemete ulaşır. C_2S bileşeninin çimentonun bağlayıcılık özelliğine katkısı ilk günlerde az fakat daha sonraları çok yüksektir.[26].

2.2.1.2.2.2.Kalsiyum Alüminatlar

Trikalsiyum alüminat ($3CaO.Al_2O_3$, C_3A , Celit):

C_3A klinkerin plastisitesini (işlenebilirliğini) sağlamaktadır. Portland çimentosu klinkerinde C_3A 'nın %10 civarında olması istenir ve bu değerlerin üzerinde C_3A 'nın bulunması çimentonun sülfat direncini azaltmaktadır. C_3A ve suyun birleşmesiyle, gerek ilk saatlerde gerekse 28 güne kadar sertleşmede çok hızlı reaksiyon yapmakta ve yüksek miktarda hidrasyon ısısı açığa çıkarmaktadır. Ayrıca bu bileşenin çimento dayanımına olumlu bir katkısı da yoktur. C_3A 'nın su ile birleşmesi çimentoda ani sertleşme yaparak taze betonun kullanımını ve betonun bağlayıcılık kazanabilmesini engeller. Bu durumu önlemek için üretim esnasında çimentoya küçük bir miktar alçıtaşı katılmaktadır. [26].

2.2.1.2.2.3.Tetrakalsiyum Alüminaferrit ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, C_4AF , Felit)

Çimento klinkeri için önemli bileşenlerden birisi de tetrakalsiyum alüminoferrittir. Çimentonun rengini etkileyen bileşendir. C_4AF 'e kadar fazlaysa çimentonun rengi o kadar koyu olmaktadır. Dayanım üzerine etkisi zayıftır. C_4AF olarak ifade edilirse de dikalsiyum ferrit (C_2F) ve dikalsiyum alüminat (C_2A) kombinasyonlarıyla temsil edilen geniş bir aralığa yayılmış olup, C_4AF bu kombinasyon aralığının sadece belli bir bileşimini oluşturmaktadır. C_4AF bileşeni, su ve alçı taşı arasındaki reaksiyonlar, C_3A bileşenindeki kadar şiddetli olmamakla beraber, burada da C_3A bileşeninin hidrasyon ürünlerine benzer sonuçlar ortaya çıkabilmektedir [26].

Çimento genellikle, yaklaşık %75 silikatlardan, %5-10 kalsiyum alüminattan, %5 kalsiyum sülfattan, %2-4 magnezyum oksit, %1'den az miktarda sodyum-potasyum oksitler ve %5-10 kalsiyum-alümina-ferrit bileşiklerinden oluşmaktadır

2.2.1.3. Portland Çimentosunun İçerdiği Oksitlerin ve Ana Bileşenlerin Miktarlarını Bulma Yöntemleri

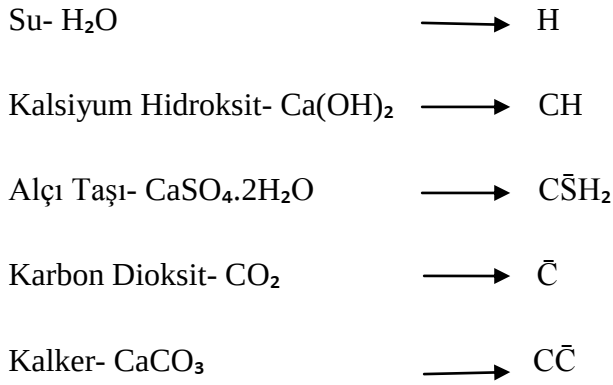
Çimentonun yapısında yer alan oksitlerin miktarları çimento standartlarında belirtilen kimyasal analiz yöntemlerinin uygulanması sonucunda bulunmaktadır. Bu konudaki Türk ve ASTM standartları ; TS EN 196-2 ve ASTM C 114' dir. [22].

Tablo 2.4'de normal portland çimentosunun kimyasal analizi sonucunda elde edilen değerler görülmektedir.

Tablo 2.4 Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi [22]

Oksitler ve Diğer Değerler	Miktarları (Ağırlıkça %)
CaO	63.6
SiO ₂	20.7
Al ₂ O ₃	6.0
Fe ₂ O ₃	2.4
SO ₃	2.1
MgO	2.6
Na ₂ O	0.1
K ₂ O	0.9
Çözünmeyen Kalıntı	0.2
Kızdırma Kaybı	1.4
Serbest CaO	1.4
Cl ⁻ (maksimum)	0.1

Çimentolarla ilgili formüllerde yer alan su, kalsiyum hidroksit, alçıtaşı, karbon dioksit ve kalkerin çimento kimyasına uygun sembollerle gösterilişi aşağıdaki gibidir.



2.2.1.3.1. Portland Çimentosundaki Ana Bileşenlerin Miktar Tayini

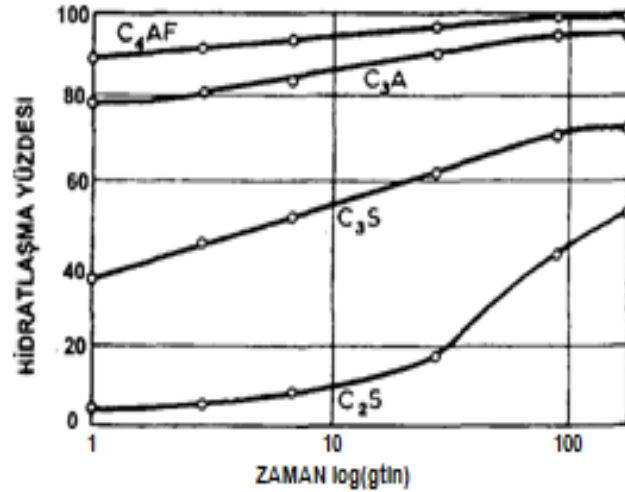
Portland çimentosu veya klinkerin kompozisyonunda yer alan ana bileşenlerin miktarlarının tayininde aşağıdaki üç yöntem kullanılmaktadır.

1. X-ışını kırınımı yöntemi
2. Optik veya elektron tarama mikroskobu ile inceleme
3. Hesap yöntemi

2.2.1.4. Portland Çimentosunun Hidratasyonu ve Hidratasyon Ürünlerinin Özellikleri

Çimentoyu oluşturan klinker bileşikler su ile reaksiyona girerek çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana getirir. Çimento ve su arasında gerçekleşen bu reaksiyonlara ‘hidratasyon reaksiyonları’ denir. Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento, su içinde yavaş olarak çözünür. Çözünme katı partikül yüzeylerinde yürür. Çözünen bileşikler hemen hidrate olarak partikül yüzeyini jel halinde kaplar. Böylece henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Diğer taraftan çözeltiye geçmiş olan klinker bileşikler çözelti içinde doymuş hale gelerek çözünme hızının yavaşlamasına yol açar. Çimento bileşenlerinin tam olarak hidrate olması için uzun süre geçmesi gerekir. [23].

Hidratasyon hızına tanecik çapı yanında klinker kimyasal bileşiminin etkisi de büyüktür. Klinker bileşiklerinin hidratasyon hızlarının zamana bağlı değişimi Şekil 2.4’de görülmektedir.

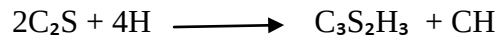
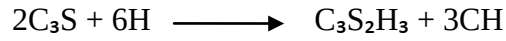


Şekil 2.4 Klinker bileşiklerinin hidratasyon hızları [23].

Kalsiyum silikatlar (C_2S - C_3S) ve su (H) reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat ($C_3S_2H_3$, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$) kısaca C-S-H denilen jel ve kalsiyum hidroksiti (CH, $CaO \cdot H_2O$) meydana getirmektedir. Çimento hamuruna dayanım kazandıran da bu C-S-H jelleridir. Çimento hamurunun kazandığı dayanım C_3S ve C_2S ana bileşenlerin hidratasyonu ile ortaya çıkan C-S-H jellerinin miktarına bağlıdır.

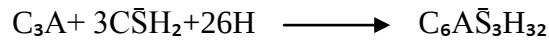
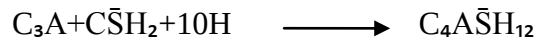
C-S-H jellerinin tümü, bir anda meydana gelmemektedir. Hidratasyon olayı devam ettikçe, C-S-H jellerinin üretimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı artmaktadır. C_3S ana bileşenlerin hidratasyonu ilk zamanlarda C_2S ana bileşenlerin hidratasyonundan daha hızlı yer aldığı için, C_3S 'nin ilk zamanlarda çimentodaki dayanım artışına katkısı daha çoktur.

Kalsiyum silikatlar ile su arasındaki reaksiyonlar aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir. C_3S ve C_2S su ile birleştiğinde ortaya çıkan hidratasyon ürünlerinin türü aynıdır.



C-S-H jelleri, zayıf kristalli (amorfa yakın) koloidal parçacıklardan oluşmaktadır. C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0.1 \times 0.01 \mu m$ 'den küçük, lif (fiber) şekline sahip olan bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur. Elektron mikroskopla incelendiğinde C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir.

C_3A ile su arasındaki reaksiyonlar çok büyük bir hızda, ve çok büyük miktarda ısı açığa çıkaracak tarzda oluştuğundan, çimento hamurunun 'ani sertleşme' sine yol açmaktadır. Ani sertleşme ile çimento hamuru erken katılaşma gösterdiği gibi önemli sayılabilecek bir dayanım da kazanmamaktadır. Çimento hamurunun ani katılaşmasını önlemek amacıyla çimento üretimi sırasında klinkere bir miktar alçı taşı (%3-6) katılarak birlikte öğütülmektedir. C_3A , su ve alçı taşı reaksiyona girmekte ve reaksiyon hızını yavaşlatmaktadır. C_3A , su ve alçı taşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir.



$C_4A\bar{S}H_{12}$ (kalsiyum-alümina-monosülfohidrat) oluşması çimento hamurunun içerisinde bir miktar genleşmeye yol açmaktadır. Plaka şekline sahip olan bu kristaller yarı kararlı özelliktedir.

C_4AF 'nin hidratasyonu, C_3A 'nın hidratasyonuna benzer şekilde gerçekleşmektedir. C_3A 'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demir oksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alümina-sülfohidrat ürünleri $C_4(A,F)\bar{S}H_{12}$ $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$ 'dir. Ortamdaki demir oksidin fazlalaşması reaksiyonun daha yavaş gerçekleşmesine yol açmaktadır. [22].

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı yada gereğinden az kullanıldığı zaman C_4AF ana bileşenin göstereceği hidratasyon C_3A ana bileşenin göstereceği hidratasyon kadar şiddetli olmasa da, oldukça hızlıdır ve büyük miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Tablo 2.5’de portland çimentosundaki ana bileşenlerin özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.5 Çimentodaki ana bileşenlerin özellikleri [22]

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
Dayanıma Katkısı				
İlk Günlerde	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çimento hamurunun kazanabileceği dayanım C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonunda elde edildiği Tablo 2.5’de görülmektedir.

2.2.1.5.Hidratasyon Isısı

Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin su ile birleşerek başlattıkları kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon) ısı açığa çıkaran türdendir. Isının büyük bir kısmı beton döküldükten sonraki ilk günlerde çıkar. Betonun ısı iletim katsayısı çok düşük olduğundan açığa çıkan ısı kısa sürede dışarı atılamaz ve hidratasyon ısısının etkisiyle betonun sıcaklığı artmakta ve genleşme meydana getirmektedir. Dışarıdaki ortamla temasta olan betonun dış kısmı zamanla soğuyarak büzülmekte ancak, sıcaklığını henüz kaybetmeyen iç kısım dış kısımla aynı şekilde hareket edememekte ve dış kısmın büzülmesini önlemeye çalışmaktadır. Böylece sıcaklık farkından meydana gelen gerilmeler nedeniyle, beton çatlamakta ve su geçirgen bir yapı ortaya çıkmaktadır.

Çimento hidratasyon ısısının çıkış hızı çimento cinsi ve çimento inceliğine bağlıdır. Dökümden sonraki 1-3 gün içinde %50'si, 7 gün içerisinde %75'i ve %90'ının da 6 ay içinde açığa çıktığı söylenebilir. [23].

Portland çimentosunu oluşturan ana bileşenlerin her biri farklı hidratasyon ısisına sahiptir. Portland çimentolarının hangi hızda hidratasyon yapacağı, hangi hızda ve ne kadar hidratasyon ısisı açığa çıkaracağı ve hangi hızla dayanım kazanabileceği çimento kompozisyonundaki ana bileşenlerin hangi miktarda yer almış olduklarına bağlıdır. Bir başka deyişle, çimentonun ana bileşenlerinin miktarlarının değişiklik göstermesi, değişik tipte portland çimentosu üretilmesine yol açmaktadır.

2.2.1.6.Çimentonun Prizi

Çimento ve su arasındaki hidratasyon olayları zaman ilerledikçe gelişerek belirli bir dereceye ulaşmakta, çimento hamuru daha az plastik duruma gelmekte ve viskozitesinde belirli bir artış olmaktadır. Çimentonun su ile birleştiği an ile çimento hamurunun katılaşarak plastik özelliğini kaybettiği an arasındaki süre, "priz alma süresi" olarak tanımlanmaktadır. Priz alma süresi, "priz başlama süresi" ve "priz sona erme süresi" olarak ayrı ayrı ifade edilmektedir. [23].

Priz başlama süresi, çimentoyla suyun birleştiği an ile çimento hamurunun fiziksel değişiklik göstererek katılaşmaya başladığı (plastikliğini kaybettiği) an arasında geçen süredir.

Prizin sona erme süresi ise, çimento ve suyun birleştirildiği an ile çimento hamurunun katılaştığı (sertleşmenin başladığı) an arasındaki süredir.

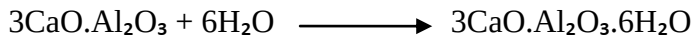
Çimentoların priz başlama süresinin çok kısa olmaması, priz sona erme süresinin ise çok uzun olmaması istenmektedir. Türkiye'de üretilen PÇ'ları için priz başlama ve priz sona erme süreleri, sırasıyla, minimum 1 saat ve maksimum 10 saattir. [22].

Priz olayı çimento yapı oluşturan klinker bileşiklerinin, özellikle C_3S ve C_3A 'nın çözünmesiyle başlar. Çözünme bir süre devam edince doygun bir çözelti meydana gelir. Bu doygun hidratlaşmış bileşikler katı tanecikler üzerine çöker. Bu çökme ile çimento partikülleri yüzeyinde ince bir tabaka oluşur. Çökme sonucu çözeltinin doygunluğu kaybolur. Çözeltinin tekrar doygun hal almasıyla yeni bir çökme olayı gerçekleşir. Birbirini izleyen çözünme ve çökme olaylarının devam etmesiyle oluşan hidrate bileşikler katı taneleri köprü şeklinde birbirine bağlayarak çimento hamurunun plastiklik özelliğinde azalma meydana getirir. Bu şekilde çimentonun prizi başlamış olur.

Pratikte prizin başlama ve bitiş süreleri büyük önem taşımaktadır. Bu süreler sıcaklığa, çimento mineralojik bileşimine ve çimento inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Çimentonun sertleşme olayı çözünen trikalsiyum silikatın klinker katı partikülleri çevresinde koagule olması ile başlar. Koagülasyon kristalleşmenin başlaması için uygun bir ortam oluşturur. [23].

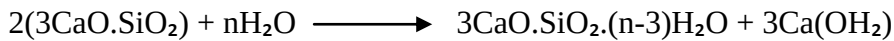
Çimentonun hidratasyonu ve prizi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki sırada gerçekleşmektedir.

İlk olarak trikalsiyum alüminatın hidratasyonu gerçekleşir.



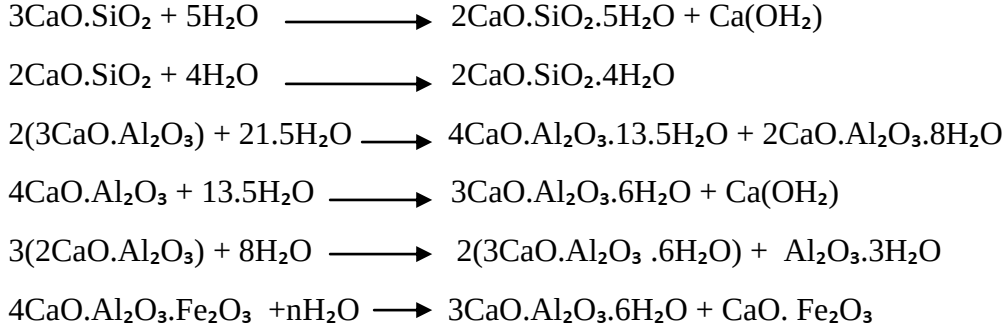
Bu reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olup şiddetli ısı çıkışı olur.

İkinci olarak trikalsiyum silikat reaksiyona girer.



Bu reaksiyon çimento hamurunun ilk birkaç gün içerisinde katılaşmasını sağlayan temel hidratasyon reaksiyonudur. Burada oluşan Trikalsiyum silikat doygun hale gelerek kristalleşir. $Ca(OH)_2$ ise jel haldedir.

Diğer hidratasyon reaksiyonları ise:



Daha önce bahsedildiği üzere, klinkere az miktarda (%3-6) katılan alçı taşının görevi priz başlangıcının sorumlusu olan trikalsiyum alüminatı geçici olarak $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.31\text{H}_2\text{O}$ halinde bağlayarak reaksiyon hızını yavaşlatarak çimentonun erken priz almasını önlemektir.

Yalnızca bu reaksiyonlar ile çimentonun sertleşme kinetiğini tam olarak açıklamam mümkün olmadığından, sertleşme kinetiğinin gelişimi ile ilgili çeşitli teoriler ileri sürülmüştür. Bunlardan en önemlisi jel oluşma mekanizması ile ilerleyen, prizin başlaması ile birlikte oluşan jel tabakası tanecikler arasında ilk bağlanmayı sağlar ve sonrasında taneciklerin iç bölgesinde bulunan ve henüz hidratlaşmamış olan kısımlar yüzeydeki jelin suyunu çeker ve böylece sertleşme olayı meydana gelir.

Sonuç olarak katılaşma sürecini dört evreye ayırmak mümkündür. Birinci evrede kuvvetli bir çözünme reaksiyonu meydana gelerek daha çok kalsiyum hidroksit oluşur. Bunu uyuyan devre denilen ve reaksiyonların yavaşlamış olduğu evre izler. Bu evrenin sona ermesi ile klinker bileşikleri ile su arasında tekrar başlayan reaksiyonlar sonucunda plastik karakterde boşluklu bir hamur meydana gelir. Bunu da reaksiyon hızının gittikçe yavaşladığı katılaşma evresi izler. [23].

2.2.1.7.Çimentonun İnceliği

Çimento inceliği, çimento tanelerinin ortalama boyutunu ifade etmektedir. ‘Klinker + alçıtaşı’ ne kadar ince taneli olarak öğütülürse, elde edilen çimento tanelerinin yüzeylerinin toplamı o kadar artmaktadır. Böylece su ile temas eden tanelerin yüzeyi daha fazla olmakta, kimyasal reaksiyonlar daha hızlı ve daha iyi gelişebilmektedir. Çimento taneleri 1-200 µm arasında değişik boyutlardan oluşmaktadır.

Çok ince öğütülmüş çimento taneleri, öğütme işlemi sırasında veya depolama esnasında, bir miktar nem alarak hidratasyona başlayabilir ve bu vakitsiz hidratasyon sebebiyle bağlayıcılık özelliğini az da olsa yitirebilir. Kalın öğütülmüş tanelerden oluşan çimento ise daha yavaş hidratasyon yapmakta, hidratasyon ürünleri daha yavaş hızda elde edilmekte ve çimento hamurunun kazanması beklenen dayanım daha geç elde edilmektedir.

2.2.1.8.Çimento Hamurunun Yapısı ve Çimento Hamurundaki Boşluklar

2.2.1.8.1.Çimento Hamurunun Yapısı

Çimento ve su karıştırıldığı anda ortaya çıkan çimento hamurunun yapısı, aralarında su dolu küçük boşluklar bulunan çimento tanelerinden oluşmaktadır. Çimentoya karıştırılan suyun bir kısmı kimyasal reaksiyonlar için kullanılırken, diğer kısmı koloidal bir çözelti oluşturur ve boşlukları doldurur.

Elde edilen çimento hamurunun hacmi çimento tanelerinin ve bu tanelerin arasındaki boşluklarda bulunan suların hacimleri toplamına eşittir Hidratasyon ürünlerinin oluşmasıyla çimento hamurunun toplam hacminde değişme olmadığı var sayılmaktadır. [22].

Hidratasyon sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit kristalleri de dahil olmak üzere, hidratasyon ürünlerinin tümü çimento teknolojisinde ‘çimento jeli’ olarak adlandırılır. Çimento jelinin hacmi, hidratasyon yapan çimentonun hacminden daha büyüktür. 1 cc çimento, hidratasyonunu tamamladığı takdirde yaklaşık 2,1 cc çimento jeli üretmektedir. [22].

Hidratasyon çimento tanelerinin yüzeyinde başlamakta ve ilerleyerek tanelerin iç kısımlarına kadar ulaşmaktadır. Ortaya çıkan hidratasyon ürünleri çimentodan daha büyük hacme sahip oldukları için kapiler boşlukların içerisine taşarak yer almaktadır. Ne kadar çok çimento jeli ortaya çıkarsa çimento hamurundaki kapiler boşluk oranında o kadar azalma olmaktadır. [22].

Hidratasyonunu belirli ölçüde gerçekleştirmiş, yani hidratasyonunu tamamen bitirmemiş bir çimento hamurunun yapısında :

Çimento jeli

Çimento jelinin yapısında yer alan jel boşlukları

Hidratasyonunu henüz tamamlamamış çimento ve

Su dolu kapiler boşluklar bulunmaktadır.

2.2.1.8.2.Çimento Hamurunun Yapısındaki Boşluklar ve Özellikleri

Jel boşlukları hidratasyon sonucunda oluşan jellerin yapısında yer alan boşluklardır. Jel boşluklarının boyutu çok küçük olduğu için, jel üzerinde absorbe olan suyun mobilitesi çok azdır. Jel boşluklarındaki su, serbest su değildir ve serbest su gibi kolayca hareket edememektedir. Jel boşluklarındaki suyun buhar basıncı, serbest suyun buhar basıncından daha yüksektir. [23]. Hidratasyon sonucu oluşmuş olan jelin yapısında, hacimce %28 jel boşluğu bulunmaktadır. Bu oran kullanılan çimento cinsine, su/çimento oranına ve hidratasyon sırasında uygulanan kür yöntemine bağlıdır.

Çimento ve suyun karıştırıldığı anda çimento hamurunun yapısında çimento taneleri ve çimento tanelerinin arasında su dolu küçük boşluklar yer almaktadır. Bu su dolu küçük boşluklar birbiri ile bağlantılı kapiler sistemi oluşturmaktadır. Çimento ve suyun birleştiği anda kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve hidratasyon ürünleri oluşmaktadır. Hidratasyon ürünlerinin hacmi hidratasyon yapan çimentonun hacminden daha büyük yer kapladığı için hidratasyon ürünleri kapiler boşlukları azaltacak yönde gelişmektedir. Çimento hamurunun içerisinde rastgele dağılım gösteren içi su dolu bu boşluklar çimento hamurunun karıldığı anda birbirleri ile bağlantılıdır. Hidratasyon devam ettikçe jel miktarı artmakta ve kapiler boşluk miktarı azalmaktadır. Kapiler boşluklar değişik şekil ve boyutlarda olabilir. Çimento hamurunun yapısında başlangıçta yer alan boşlukların miktarı, çimento hamurunun su/çimento oranına bağlıdır. Su/çimento oranı yüksek olduğu zaman daha çok kapiler boşluk oluşmaktadır.

Kapiler boşlukların içerisindeki su, jel boşluklarının içerisindeki sudan farklı davranış göstermektedir. Sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde kapiler boşluklarda bulunan su buharlaşıp kaybolabilmekte, sulu ortamda boşlukların içerisine yeniden dolabilmektedir. Kapiler boşluklar içerisindeki su serbest su gibi davranış sergilemektedir.

2.2.1.9.Çimento Hamurunun Dayanım Kazanma Mekanizması

Çimento hamurunun dayanım kazanmasında hidratasyon ürünlerinin tümünün etkisi olsa da, en büyük etki C-S-H jelleri tarafından sağlanmaktadır. C-S-H jellerinin dayanıma etkisi kesin olarak bilinmemekle birlikte ortaya çıkan dayanımın muhtemel nedeni iki tür bağ kuvvetinin varlığı ile açıklanmaktadır. [22].

Bağ kuvvetlerinin birincisi, birbirinden çok küçük mesafede (jel boşluğu kadar) uzakta olan çok küçük katı parçacıkların arasındaki fiziksel çekimdir. Bu tür bağ genellikle van der waals kuvvetleri olarak tanımlanmaktadır. Bağ kuvvetlerinin ikincisi ise, van der waals kuvvetlerinden çok daha büyük olan iyonik ve kovalent

bağlardır. Jel parçacıkları bu kimyasal bağlar nedeniyle bir dokuma örgüsü gibi çapraz olarak bağlanmaktadır.

2.2.1.10.Puzolanlar ve Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı

Puzolanlar kendi başlarına su ile karıştırıldıklarında bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat ince öğütüldüklerinde sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek hidroik bağlayıcılık özeliğine sahip olan bileşenlerin oluşmasını sağlayan maddelerdir. Doğal ve yapay birçok puzolanik madde çimento içine katılarak kullanılmaktadır.

Doğal puzolanların büyük bir bölümü volkanik orijinli malzemelerdir. Volkanik camlar, volkanik tüfler (tras), bazı killeri doğal puzolanlardır. Volkanik orijinli malzemelerin puzolan olarak kullanılabilmesi için en az portland çimentosu inceliğine getirilmeleri gerekmektedir.

Doğal puzolan olarak kullanılacak killeri, önce ısıtıl işleme tabi tutulduktan sonra ince taneli olacak şekilde öğütüldüklerinde puzolanik özellik kazanabilmektedir.

Yapay puzolanlar termik santrallerde elektrik üretimi için yakıt olarak kullanılan öğütülmüş kömür yandıktan sonra atık malzeme olarak elde edilen ve ‘uçucu kül’ olarak adlandırılan ince taneli küller, silikon metalinin veya alaşımlarının elde edilmesinde ortaya çıkan silis dumanının yoğunlaştırılması sonucu elde edilen ‘silis dumanı’, demir üretimi için demir oksidin yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda eritilerek indirgenmesi esnasında ortaya çıkan bir atık malzeme olan ‘yüksek fırın cürufu’ dur. Fırındaki yüksek sıcaklık nedeniyle eriyik haline gelen yüksek fırın cürufu, ani olarak suda soğutulduğunda iri kum parçacıkları boyutunda amorf yapıya sahip granüle bir durum kazanmaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu da puzolanik özellik kazanmaktadır. [22].

2.2.1.10.1.Puzolanların ve Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Üretiminde Kullanılması

Portland – Puzolan tipi çimentoların üretimi:

Klinker + Puzolan + Alçıtaşı öğütme ‘Portland-Puzalan Çimentosu’

Farklı miktarlarda puzolanik malzeme kullanarak Portland-puzolan tipi çimentoların üretimi yapılmaktadır. Portland-puzolan tipi çimentoların üretimi için öğütülecek klinker miktarı, portland çimentosunun üretiminde kullanılabilecek kıyasla bir miktar azaltılmakta, onun yerine puzolan eklenmektedir.

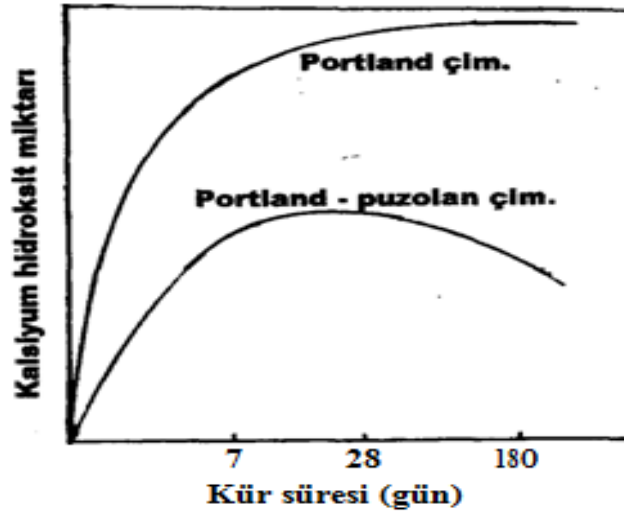
Cüruf katkılı çimentoların üretilmesi puzolan katkılı çimentoların üretim akışı ile aynıdır. Puzolan yerine granüle yüksek fırın cürufu kullanılmakta ve ‘Klinker + Granüle Yüksek Fırın Cürufu + Alçıtaşı’ birlikte öğütülmektedir.

2.2.1.10.2.Portland Çimentosunun ve Portland Puzolan Çimentosunun Dayanım Kazanma Mekanizması

Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların üretiminde kullanılan klinker miktarı, portland çimentosunun üretiminde kullanılan klinker miktarından daha azdır. Bu nedenle, puzolan veya cüruf katkılı çimentoların yapısında bulunan C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ana bileşenlerinin miktarı portland çimentosunda yer alan miktardan daha azdır. Dolayısıyla, puzolan veya cüruf katkılı çimentolar su ile birleştiğinde C-S-H jeli üretimi portland çimentosuna kıyasla daha az ve daha düşük hızda gerçekleşmektedir. Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların dayanım kazanmaları ilk günlerde daha yavaştır. Ancak klinkerden gelen kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin, özellikle C_3S 'in hidratasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit, puzolan veya cüruf katkılı çimentolardaki puzolan veya cüruf katkılı reaksiyona girerek yeni C-S-H jellerinin oluşumunu sağlamaktadır. Bu tür çimentoların hidratasyonu ile ilerleyen haftalarda daha çok C-S-H jeli ortaya çıkmakta ve ilk zamanlardaki düşük dayanım kaybolmaktadır. [22].

Puzolan katkılı betonların basınç mukavemetleri ilk zamanlarda daha düşük, fakat ileriki zamanlarda puzolanın cinsine ve miktarına bağlı olarak yüksek değerlerde olabilir. Puzolanların bu etkisi ince bir dolgu maddesi olmalarından ve puzolanik etki sonucu serbest kireci bağlayarak çimento hamurunun boşluklu yapısını değiştirmelerinden kaynaklanmaktadır.

Puzolanların asıl kullanım amacı çimento hidratasyonu sonunda açığa çıkan serbest kireci bağlamaktır. Puzolanik reaksiyon etkisiyle serbest kireç miktarı giderek azalır. Bu durum 28 gün kür sonrasında daha da belirginleşir. Şekil 2.5’de puzolan katkılı ve portland çimentosu ile yapılmış olan betonlarda serbest kireç miktarının zamanla değişimi görülmektedir. Puzolan ile yapılmış olan betonlarda portland çimentosu ile yapılmış olan betonlara oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrat bileşikleri bulunur. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, beton boşlukları içinde serbest kirecin azalması boşluk yapısının azalmasına dolayısıyla mukavemet artışına neden olmaktadır.



Şekil 2.5 Portland çimentosu ve portland-puzolan çimentosu kullanılarak hazırlanan karışımların hidratasyonunda serbest kireç miktarının değişimi [23].

2.2.1.11.Türkiye’deki Çimento Tipleri

2000 yılında yürürlüğe giren TS-EN197-1 standarda göre Türkiye de 27 çeşit çimento üretilmektedir. TS-EN197-1 standardı kapsamında 27 çimento çeşidi beş ana grupta toplanmaktadır.

CEM I Portland çimentosu

CEM II Portland kompoze çimento

CEM III Yüksek fırın cürufu çimento

CEM IV Pozolanlı çimento

CEM V Kompoze çimento

Farklı gruplara ayrılan çimento tipleri içerdikleri klinker ve çeşitli pozolanik madde miktarına göre Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Şekilde A, B, C olarak belirtilen çimento tiplerinde D, L, LL, P, Q, S, T, V, W harfleri çimentonun kompozisyonundaki pozolan cinsini ve kalkerini belirtmektedir. Bu harflerin açık şekilde ifadesi ise standartta şöyledir:

D: Silis dumanı

L: Organik karbon içeriği %5’den az ola kalker.

LL: Organik karbon içeriği %2’Den az olan kalker.

P: Doğal pozolan.

Q: Kalsine edilmiş pozolan

S: Granüle yüksek fırın cürufu.

T: Pişmiş şist.

V: Silissi uçucu kül.

W: Kalkersi uçucu kül.

Tablo 2.6 TS-EN197-1 standardı kapsamında çimento çeşitleri [22]

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Ana Bileşenler										
			Klinker K	Yüksek Fırıncı Çirufu S	Siliş Dumanı D	Puzolan		Uçucu Kül		Pisriş Şist T	Kalker		Minör İlave Bileşen
						Doğal P	Doğal Kalsine Edilmiş Q	Silişli V	Kalkeresi W		L	LL	
CEM I	Portland Çimento	Cem I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
CEM II	Portland Çirufu Çimento	Cem I/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
	Portland Siliş Dumanlı Çimento	Cem I/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0,5
	Portland Puzolanlı Çimento	Cem I/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/A-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/A-S	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0,5
	Portland Uçucu Külü Çimento	Cem I/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0,5
		Cem I/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0,5
		Cem I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0,5
		Cem I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0,5
	Portland Pisriş Şistli Çimento	Cem I/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0,5
		Cem I/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0,5
	Portland Kalkerli Çimento	Cem I/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0,5
		Cem I/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0,5
		Cem I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0,5
		Cem I/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0,5
	Portland Kompoze Çimento	Cem I/A-M	80-94										0,5
		Cem I/B-M	65-79										0,5
CEM III	Yüksek Fırıncı Çirufu Çimento	Cem I/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
		Cem I/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
CEM IV	Puzolanlı Çimento	Cem IV/A	65-89	-								0,5	
		Cem IV/B	45-64	-								0,5	
CEM V	Kompoze Çimento	Cem V/A	40-64	18-30	-							0,5	
		Cem V/B	20-38	31-50	-							0,5	

2.2.1.12.Çimento Kullanım Alanları

Çimento kullanımına yol gösterici ve yardımcı olması açısından TS EN 197-1 standardı çimentoların tipik kullanım alanları:

CEM I Portland çimentoları tipik kullanım alanları:

Her çeşit beton üretiminde genel amaçla kullanılır. Bina, köprü, yol, prefabrike elemanlar vb. betonlar için kullanımı uygundur. Yüksek mukavemet istenen yapılarda 42,5MPa ve 52,5MPa mukavemeti olanlar tercih edilir. Soğukta beton dökümü, erken kalıp alma gibi, erken dayanımının yüksek olmasının istenildiği durumlarda (R) işareti olanlar, normal betonlarda ise (N) işareti olan kullanılır.

CEM II Portland-kompoze çimentoların kullanım alanları:

Bu çimentolar (A) ve (B) olmak üzere iki tip üretilmektedir. (A) tiplerinde %6-20, (B) tiplerinde %21-35 puzolan malzeme bulunmaktadır. Bu tip çimentolar yüksek mukavemetin gerekli olmadığı yapılarda, portland çimentosunun kullanıldığı her yerde kullanılabilir. CEM II sınıfı puzolanlı çimentolar içerisinde ülkemizde en çok üretilen çimentolar katkı cinsinin serbest bırakıldığı ‘portland kompoze çimentolardır.

CEM III Yüksek fırın cürufu çimentoların kullanım alanları:

Üç tipi vardır. Bileşiminde %35-65 ve %66-80 yüksek fırın cürufu içeren CEM III/A ve CEM III/B tipi cürufu çimentolar, hidrasyon ısısı düşük ve kimyasal etkilere dayanıklı olması istenen betonlarda kullanılmaktadır. CEM III/C çimentosu içinde %81-95 oranında yüksek fırın cürufu bulunur. Bu tip çimento sülfat korozyonuna tam olarak dayanıklı olması istenen betonlar için uygundur.

CEM IV Pozolanik çimentoların kullanım alanları:

Hidratasyon ısısı düşük ve geçirgenliği azaltıcı etkisi nedeniyle kimyasal etkilerin söz konusu olduğu deniz içi yapılarda ve kütle betonlarda tercih edilir.

CEM V Kompoze çimentoların kullanım alanları:

Bileşiminde hem yüksek fırın cürufu hem de volkanik tuf (tras) ve uçucu kül gibi pozolanları içeren çimento tipidir. Bu nedenle pozolanik etkileri yüksektir. Deniz içi yapılarda, kütle betonları dökümünde kullanılmaları uygundur.

2.2.1.13. Türkiye'deki çimentoların dayanım sınıfları ve priz süreleri

Çimentoların genel olarak dayanımları 3 sınıfta (32,5-42,5 ve 52,5) toplanmıştır. Çimentoların dayanım sınıflarına göre kür sürelerine bağlı olarak göstermeleri gereken en az dayanımlar ve priz süresi ve hacim genişmesi Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.7 Çimentoların dayanım ve priz başlama süresi özellikleri [27]

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı(MPa)				Priz başlama süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanımı		Standart Dayanım			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük			
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10
32,5 R	≥10,0	-				
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5 R	≥20,0	-				
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-	≥45	
52,5 R	≥30,0	-				

2.2.2.Agrega

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelerdir. Beton hacminin yaklaşık %75'i agregata tarafından oluşturulmaktadır. Beton yapımında kullanılan en pahalı malzeme çimentodur. Agreganın maliyeti çimento maliyetine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, istenilen kalitedeki betonu elde edebilmek kaydıyla, betonda mümkün olabildiği kadar çok miktarda agregata kullanılması, betonun daha ekonomik olmasına yol açmaktadır [22].

Beton yapımında kullanılan agregalar genellikle sert ve dayanımı oldukça yüksek olan malzemelerdir. Agregata dayanımının yüksek olması betonun dayanımının da yüksek olmasını sağlamaktadır. Sert ve dayanıklı agregalar, betonun aşınmaya karşı veya çevreden gelebilecek diğer yıpratıcı etkenlere karşı dayanımını sağlar.

Nehir yatakları, eski buzul yatakları, deniz ve göl kenarlarında doğal kaynaklardan elde edilmiş kum ve çakıl gibi agregalar ile taş ocaklarından çıkarılan kayaların kırma, eleme, değişik tane boyu sınıflarına ayırma, yıkama işlemleri dışında doğadaki yapılarında değişiklik yaratacak hiçbir işlem uygulanmadığı takdirde 'doğal agregata' olarak adlandırılmaktadır. Kum, çakıl, kırma taş en tipik ve en çok kullanılan doğal agregalardır.

Beton üretimi ile doğrudan ilgisi bulunmayan, bir endüstri kolunda yan ürün veya atık malzeme olarak ortaya çıkan malzemelerden üretilen agregalar veya bir malzemeye ısı işlem uygulayarak beton yapımında kullanılan agregalar 'yapay agregata' olarak adlandırılmaktadır. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, pişmiş kil yapay agregalar arasında en çok kullanılan malzemelerdir.

Betonun içerisinde bulunan agregata taneleri, çimento hamurunun zamana bağlı olarak gösterebileceği hacim değişikliğinin serbestçe oluşabilmesini belirli ölçüde engellemektedir. O nedenle, sadece çimento hamurundan oluşmuş olan bir

malzemeye oranla, betonun göstereceği hacim değişikliği ve buna bağlı olarak yer alabilecek çatlaklar daha az olmaktadır.

2.2.3.Su

Bilindiği üzere çimento ve agreganın yanı sıra betonu oluşturan bir diğer malzeme sudur. Beton yapımında kullanılan su değişik amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır. Çimento ve agregaya ile birlikte karılarak beton üretilmesinde kullanılan ‘karışım suyu’ olarak, yerine yerleştirilen betonun yüzeyine uygulanarak betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki hidratasyon reaksiyonlarının gelişebilmesini sağlayan ‘kür suyu’ olarak ve beton karışımında kullanılacak agregaların temiz olmalarını sağlamak için ‘yıkama suyu’ olarak kullanılmaktadır.

Beton malzemelerin karılmasında kullanılan karışım suyunun iki önemli görevi bulunmaktadır: Birincisi, çimento ile birleşerek hidratasyonun yer almasını sağlamak, ikincisi ise betonun karılması sırasında, agregaya ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak, üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır.

Beton karışımında kullanılacak su, mümkün olabildiği kadar temiz olmalı, içerisinde taze ve sertleşmiş beton özelliklerine zararlı etki yapabilecek yabancı maddeler bulundurulmamalıdır.

2.2.4.Beton Katkı Maddeleri

2.2.4.1.Katkı Maddelerinin Tanımı

Beton karışımını oluşturmak üzere kullanılan temel malzemelerin karılma işleminden hemen önce veya karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine katılan malzemeye ‘beton katkı maddesi’ denilmektedir. Bu maddeler fonksiyonlarını su emme, yüzey gerilimini değiştirme, kolloid oluşturma, hidratasyon

sırasında çimento-su reaksiyonuna katalizör etkisi yapma gibi fizikokimyasal etkiler ile gerçekleştirirler. [23].

Son yıllarda kimya endüstrisinde yapılan araştırmalarla geliştirilen formüllerle bir çok katkı maddeleri üretilmiştir. Ülkemizde son yıllara kadar hemen hemen hiç kullanılmayan katkı maddelerinin önemi yeni anlaşılmaya başlanmıştır.

Beton katkı maddeleri betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansını arttırabilmek, betonun daha ekonomik olmasını sağlayabilmek için kullanılmaktadır.[22].

Farklı amaçlarla kullanılmak üzere değişik malzemelerden özel patentlerle ve değişik isimlerle üretilmiş olan binlerce katkı maddesi bulunmaktadır. En önemlileri ise kimyasal katkı maddeleri ve ince taneli mineral katkı maddeleridir.

Kimyasal katkı maddeleri:

Kimyasal katkı maddeleri beton teknolojisinde su içerisinde erime özelliği gösteren katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. Beton karışımının içerisine çimento ağırlığının % 5'ini geçmeyecek şekilde kimyasal katkı maddesi katılmaktadır.

Bu tür katkılar belirli bir beton karışımında kıvamı değiştirmeden su miktarının azalmasını sağlayan veya su miktarını değiştirmeden kıvamı arttıran ya da bu iki etkiyi birlikte yapabilen kimyasal katkılardır. Bunlar çimento tanecikleri arasındaki çekim kuvvetlerini azaltan yüzey-aktif maddeler olup, betonun akışkanlık özelliğini arttır.

İnce taneli mineral katkı maddeleri:

İnce taneli mineral katkı maddeleri betona yapışkanlık özelliği kazandırmak ve dökümden sonra su salmayı azaltmak üzere, beton içerisine toz halinde katılmaktadır. Bu katkı maddeleri uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikli katkı maddeleridir. Beton içerisine çimento ağırlığının yaklaşık %10- %50'si oranında katılırlar.

Puzolanik malzemelerin beton üretiminde yaygın olarak kullanıldığı yöntem, bu malzemelerin beton üretiminde ince taneli mineral katkı olarak kullanılmalarıdır.

2.2.4.2.Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkileri

Beton katkı maddeleri taze betonun işlenebilme, kıvam, su ihtiyacı, priz süreleri gibi özelliklerini istenilen yönde değiştirmek için kullanılmaktadır.

Katkı maddeleri kullanılarak ilk günlerde ve nihai olarak daha yüksek beton mukavemeti elde edilebilmektedir. Ayrıca, beton katkı maddelerinin kullanımı ile sertleşmiş betonun bulunduğu ortamdan kaynaklanan yıpratıcı etkenlere karşı (donma-çözülme olayları, aşınma, korozyon gibi) daha dayanıklı olabilmesini sağlamaktadır.

2.3.Sertleşmiş Beton Özellikleri

Beton yapıların bulunduğu ortam koşullarına dayanması ve uzun süre hizmet görmesi beklenir. Bunun için mekanik mukavemetinin yüksek olması öncelikli özelliğidir. Diğer taraftan beton çevre koşullarından gelen fiziksel ve kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olmalıdır. Betonun çevresel etkilere dayanıklılığı yoğun ve geçirimsiz olması ile sağlanabilir ancak, beton poroz yapıda malzemedir. Betonun

boşluk yüzdesi arttıkça başta don etkisi olmak üzere zararlı kimyasal etkilere dayanımı azalmaktadır. [23].

Sertleşmiş betonun kalitesini belirlemek üzere birçok deney yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri beton basınç mukavemeti, özgül ağırlık, su emme, boşluk yüzdesi tayinidir.

2.3.1.Beton Dayanımı

Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan betonun üzerine farklı yönlerde statik veya dinamik yükler etki edebilmektedir. Beton, bu yükleri taşıyabilmek için bir direnç göstermektedir. Betona etki eden yüklerden dolayı, doğal olarak betonda bir miktar şekil değişimi meydana gelmektedir. Betona etki eden yüklerin büyüklüğü arttıkça, hem betondaki şekil değişimi artmakta hem de beton bu yükleri taşıyabilmek için daha çok direnç göstermektedir. Betona etki eden yüklerin büyüklüğü, betonun göstermiş olduğu dirençten daha büyük olursa çok büyük şekil değişiklikleri olmakta yani, beton kırılmaktadır.

Betonun üzerine etki eden yüklerin neden olacağı şekil değişikliklerine ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği maksimum direnç ‘beton dayanımı’ olarak tanımlanmaktadır.

Betonun üzerine değişik yönlerde uygulanan yükler farklı etkiler yaratabilmektedir. Betonun basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında şekil değiştirme ve kırılmaya karşı göstereceği direnç sırasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak adlandırılmaktadır.

Beton özellikleri içerisinde en çok kullanılanı dayanım özelliğidir. Çünkü, betonun genellikle kullanıldığı yapılar basınç, çekme, eğilme ve kayma yaratacak kuvvetlerin doğrudan etkisi altındadır. Bu nedenle, betondaki basınç, çekme, eğme ve kayma dayanımlarının bilinmesi, beton yapıların bu yükler altındaki taşıma kapasitelerinin bilinmesini sağlamaktadır. Sertleşmiş betonda aranan hacim sabitliği, dayanıklılık, su geçirimsizlik, dayanım gibi bir çok özellikten deneysel olarak en kolay tayin edilen dayanım özelliğidir. Betonun dayanım özelliği ile diğer özellikleri arasında bir ilişki kurabilmek ve niteleyici olarak diğer özelliklerin ne büyüklükte olduğunu değerlendirebilmek mümkündür. Örneğin dayanımı yüksek olan bir betonda su geçirimsizlik ve dayanıklılık da daha iyi olmaktadır.

2.3.1.1.Beton Dayanımını Etkileyen Unsurlar

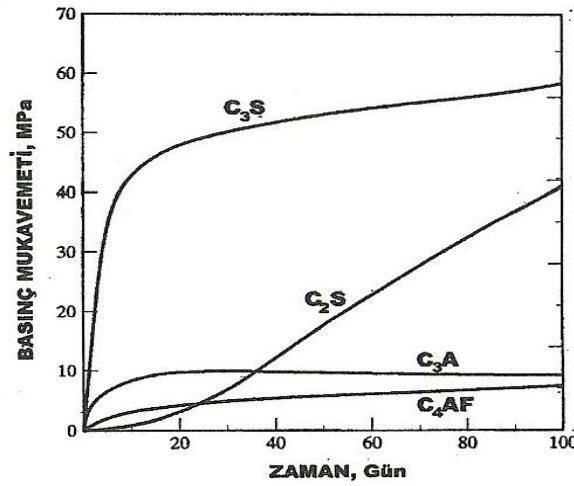
Agregalar değişik minerallerin bir araya gelmesi ile oluşmuş ve yapılarında bir miktar gözenek bulunabilen malzemelerdir. Çimento hamuru ise, çimentodaki ana bileşenlerin hidratasyonu sonucunda oluşan, her biri değişik boyutlara ve özelliklere sahip hidrotasyon ürünlerini içermektedir. Ayrıca, çimento hamurunun içerisinde değişik şekil ve boyutlara sahip boşluklar ve hidrotasyonunu tamamlamamış çimento tanecikleri de bulunmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında betonun çok kompleks bir yapıda olduğunu söyleyebiliriz.

Betonun yük altında kırılma göstermesi çimento hamurunun veya agreganın yeterli direnci gösterememesinden yada çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki gerilme geçişlerinin (aderans) yeterince yüksek olmamasından kaynaklanmaktadır.

Çimentonun mukavemet üzerine etkisi:

Çimento hamurunun dayanımı büyük ölçüde çimentonun su ile gerçekleştiği hidrotasyon reaksiyonlarına bağlıdır. Çimento içinde bulunan C_3A ve C_3S bileşiklerinin su ile reaksiyon hızı çok yüksektir. Bu nedenle çimento içinde bu

bileşiklerin fazla miktarda bulunması başlangıç periyodu içinde çimentonun hızlı şekilde hidrasyon yapmasına yol açar ve özellikle 28 günlük basınç dayanımı büyük değerler alır. C_2S 'in hidrasyonunun ise oldukça yavaş olmasından dolayı çimento içerisinde fazla miktarda bulunan C_2S , mukavemetin yavaş bir şekilde artmasına yol açar. Portland çimentosunun dört temel bileşiğinin zaman içinde mukavemet artışları Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.6 Klinker bileşiklerinin mukavemet artışları [23]

İlk 28 gün içinde beton mukavemetinin neredeyse tamamını C_3S sağlamaktadır. Daha sonraki günlerde C_2S 'de mukavemete katkı yapmaktadır. Diğer klinker bileşikleri olan C_3A ve C_4AF 'nin mukavemet üzerine etkileri çok azdır.

Çimentonun hidrasyon kinetiğini kimyasal bileşim yanında inceliği de etkilemektedir. Çimento inceliğinin artışı reaksiyon hızının da artmasını sağlar. Bu özellikler çimento çeşitlerine göre farklı mekanik mukavemet değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Agreganın mukavemet üzerine etkisi:

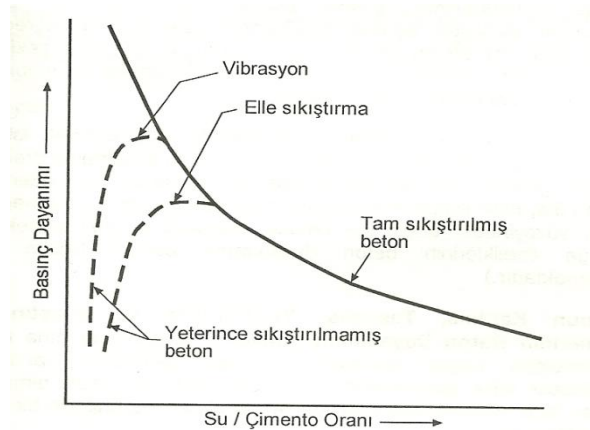
Beton üretiminde kullanılan agregaların sert, dayanıklı ve temiz olmaları gerekmektedir. Ancak, beton yapımında kullanılan agregalar düşük dayanımlı ve kolayca kırılabilir ise, uygulanan yük altında betonda meydana gelecek çatlama ve

kırılma iri agreg a tanelerinin kırılmasıyla başlamaktadır. Sertleşmiş betonda kırılmanın başladığı en zayıf bölgeler, iri agreg a taneleri ile çimento hamuru arasındaki yüzeylerdir. Ayrıca çimento hamuru ile iri agreg a taneleri arasında bulunabilecek boşluklar nedeniyle, çimento hamuru ile agreg a taneleri arasındaki bağın zayıf olmaması için taze betonun vibrasyon ile çok iyi sıkıştırılması gerekmektedir.

Su/çimento oranının mukavemet üzerine etkisi:

Uygun sıcaklık ve nem ortamında kür edilmiş olan betonun herhangi bir zamandaki mukavemetini etkileyen iki ana faktör bulunmaktadır. (a) betonun üretiminde kullanılan su/çimento oranı ve (b) taze betonun sıkıştırılma derecesi.

Su/çimento oranı yükseldikçe, betonun içerisinde yer alan boşluk miktarı daha çok olmakta ve daha düşük beton dayanımı elde edilmektedir. Su/çimento ile beton dayanımı arasındaki ilişki Şekil 2.8’de görülmektedir. Genel olarak su/çimento oranı azaldıkça dayanım artmaktadır. Ancak su/çimento oranındaki azalma fazla ise böyle bir betonu tam olarak sıkıştırılabilmek zor olacağından, betonun içindeki hava kabarcıkları tam olarak yok edilememektedir. Bu nedenle çok düşük su/çimento oranına sahip olan betonların mukavemetinde kesik çizgilerle gösterildiği gibi düşüş olmaktadır.



Şekil 2.7 Beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki [22]

2.3.1.2.Beton Basınç Dayanımı

Eksenel basınç yükü etkisi altında, betonun kırılmamak için gösterebileceği direnç ya da bir başka deyişle eksenel basınç yükü etkisi altında betonda oluşan maksimum gerilme betonun basınç dayanımı olarak adlandırılmaktadır.

Betonun basınç dayanımını ölçebilmek için taze betondan alınan standart boyutlu numunelerin beton üretim standardında belirtilen süre ve koşullarda kür edilip kırılmaya tabi tutuldukları standart deney yöntemi günümüzde kullanılan en önemli deney yöntemidir.

Standart deney yönteminin uygulanmasında beton standardında belirtilen boyutlarda silindir veya küp numuneler kullanılmaktadır. Taze beton silindir veya küp şekilli kalıplara, beton standardında belirtildiği şekilde yerleştirilmekte ve bir gün sonra kalıplarından çıkarılmaktadır. Kalıplarından çıkarılan sertleşmiş beton numuneleri beton standardının belirttiği kür ortamında saklandıktan sonra, kür sürelerinin bitiminde deney presi olarak adlandırılan alet vasıtasıyla üniform basınç yükü altında kırılma tabi tutulmaktadır.

Basınç dayanımı $\sigma = P/A$ denkleminde hesaplanmaktadır.

σ =Basınç Dayanımı (Maksimum basınç gerilmesi)

P=Numunenin Kırılmasına Yol Açan Maksimum Yük

A=Numunenin Kesit Alanı

2.4.Beton Basınç Dayanım Sınıfları

Betonlarda aranan en önemli özellik yüksek bir mekanik mukavemet, fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılıktır. Mukavemet, betonun diğer bütün özelliklerini belirleyen bir parametre olarak kullanılır. Yapılan araştırmalar, betonun basınç mukavemetinin yüksek olduğu oranda diğer (çekme, eğilme ve aşınma gibi) mekanik mukavemetlerinin de yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durumda basınç mukavemeti yüksek bir beton elde edildiğinde, diğer mekanik mukavemetleri de yüksek olan beton elde edildiği kabul edilebilir. Pratikte basınç mukavemeti beton kalitesini belirleyen ölçü olarak kullanılır. Bu nedenle betonlar standartlarda basınç mukavemetleri esas alınarak sınıflandırılır. [23]. Beton sınıflandırılmasında esas alınacak olan 28 günlük basınç mukavemetidir. Tablo 2.7’de betonun silindir ve küp dayanımları veriliştir.

Tablo 2.8 Normal ve ağır beton için basınç dayanımı sınıfları [28]

Beton Sınıfı	En Düşük Silindir Dayanımı N/mm ²	En Düşük Küp Dayanımı N/mm ²
C-8/10	8	10
C-12/15	12	15
C-16/20	16	20
C-20/25	20	25
C-25/30	25	30
C-30/37	30	37
C-35/45	35	45
C-40/50	40	50
C-45/55	45	55
C-50/60	50	60
C-55/67	55	67
C-60/75	60	75
C-70/85	70	85
C-80/95	80	95
C-90/105	90	105
C-100/115	100	115

3.MATERYAL VE METOD

3.1.Giriş

Bu çalışmada %5-10-15 frit katkılı kürlü ve kürsüz, Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız kürlü ve kürsüz olmak üzere dört tip beton karışımı hazırlanmıştır. Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız kürlü ve kürsüz beton numuneleri; kum/çimento oranı 3:1 ve su/çimento oranı 0.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Frit katkılı kürlü ve kürsüz beton numuneler ise; fritin, kum/çimento oranı 3:1 olacak şekilde kompoze çimento ile hazırlanan beton karışımına; karışımın ağırlıkça %5-10-15'i olacak şekilde ilave edilerek hazırlanmıştır. Frit katkılı kürlü ve kürsüz beton numunelerin su/çimento oranı %5, 10, 15 frit katkısına göre sırasıyla 0,58, 0,62, 0,69'dur. Hazırlanan karışımlar 50 mm x 50 mm x 50 mm boyuta sahip küp numuneler şeklindedir. Beton numunelerin mekanik özellikleri test edilmeden önce hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanması için sırasıyla 7, 14, 28, 56 gün gibi farklı sürelerde su içinde kür uygulandıktan sonra basma mukavemetleri ölçülmüştür. Kürsüz olarak adlandırılan numuneler ise 7, 14, 28, 56 gün atmosfer ortamında normal şartlar altında bekletildikten sonra basma mukavemetleri ölçülmüştür.

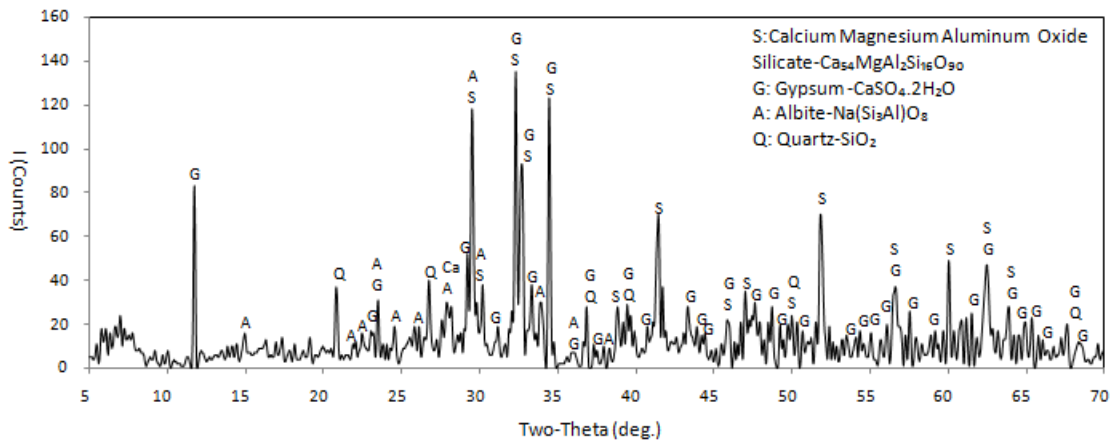
Numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu için yapılan basınç dayanım testi, mikro yapıdaki fazların belirlenmesi ve görüntülenmesi için yapılan X-Işını Kırınım İndisi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri ile faz içeriklerinin belirlenmesi için yapılan EDX analizleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında, katkısız karışımların 28 ve 56 gün kürlü beton numunelerinin basma mukavemeti testleri ise TSE İnşaat bölüm laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.Kullanılan Hammaddelerin Tanımlanması

3.2.1.Çimento

Tüm harç karışımlarında Aslan Çimento Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 197-1 CEM V-A (S-P) 32,5 N kompoze çimento (KZÇ) kullanılmıştır. Söz konusu çimentoya ilişkin X Işını Kırınım İndisi (XRD) analiz sonucu Şekil 3.1'de verilmiştir.

Yapılan X-Işını Kırınım İndisi (XRD) analizinde çimento içerisinde; kalsiyum magnezyum alüminyum oksit silikat, alçı taşı, albit ve kuvars fazlarının bulunduğu görülmektedir.



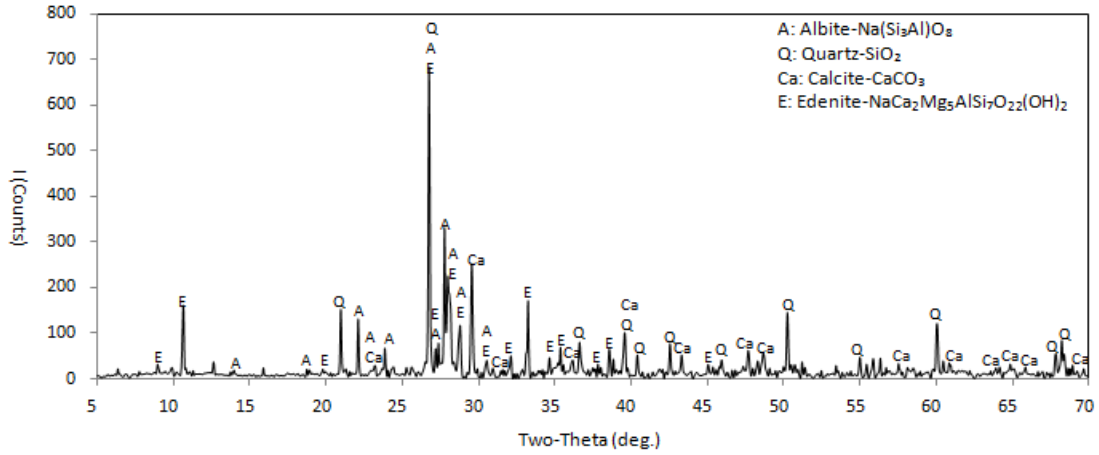
Şekil 3.1 Çimento X Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi

3.2.2.Agrega

Hazırlanan harç karışımlarının tümünde, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği binasının inşaat alanından getirilen kum

kullanılmıştır. Söz konusu kumun X Işını Kırınım İndisi (XRD) analiz sonucu Şekil 3.2’de verilmiştir.

Kumun X Işını Kırınım İndisi (XRD) analizi sonucunda kum içerisinde, albit, kuvars, kalsit ve edenit fazlarının olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2 Kum X Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi

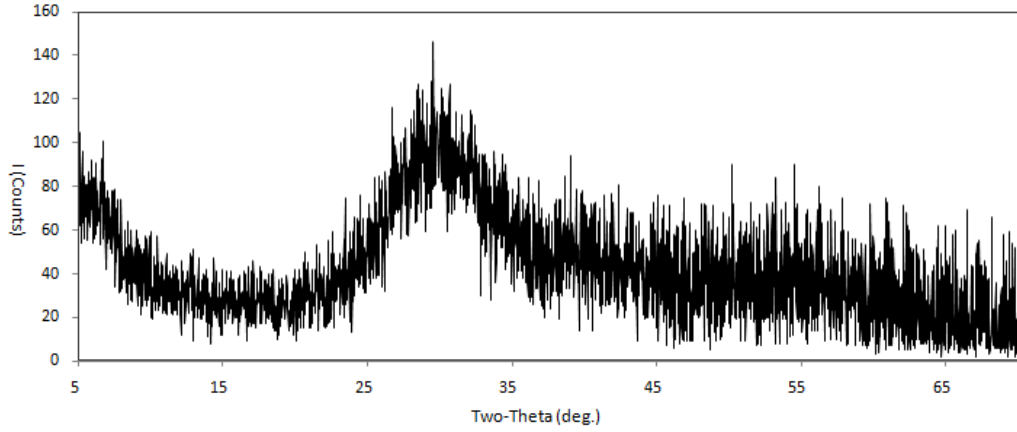
3.2.3.Karışım Suyu

Hazırlanan harç karışımlarının tümünde karışım suyu olarak Gebze ilçesi şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2.4.Frit

Beton karışımlarında kullanılan frit Gizem Frit firmasından temin edilen $K_2O-Na_2O-SiO_2$ esaslı bir camın ergitilerek ani soğutulması ile elde edilmiştir. Kullanılan frit bilyeli değirmende kuru öğütme yapılarak tane boyutu $66 \mu m$ olacak şekilde toz halde kullanılmıştır. Frit’ in X Işını Kırınım İndisi (XRD) analiz sonucu Şekil 3.3’ de verilmiştir.

Yapılan X Işını Kırınım İndisi (XRD) analizinde fritin tamamen amorf yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3 Frit X-Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizi

3.3.Beton Karışımının Hazırlanması

Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız kürlü ve kürsüz beton numuneleri; kum/çimento oranı 3:1 ve su/çimento oranı 0.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Frit katkılı kürlü ve kürsüz beton numuneler ise; fritin, kum/çimento oranı 3:1 olacak şekilde kompoze çimento ile hazırlanan beton karışımına; karışımın ağırlıkça %5-10-15'i olacak şekilde tane boyutu 66 μm öğütülmüş toz frit ilave edilerek hazırlanmıştır. Frit katkılı kürlü ve kürsüz beton numunelerin su/çimento oranı %5, 10, 15 frit katkısına göre sırasıyla 0,58, 0,62, 0,69'dur. Hazırlanan tüm beton tiplerine ait karışım oranları Şekil 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1 Karışım Türlerine Göre Beton Karışım Oranları

Karışım Türleri	KARIŞIM HAMMADDELERİ					
	Kum (gr)	KÇ (gr)	Frit (gr)	Karışım Suyu (gr)	Su/Çimento	Kum/Çimento
Katkısız	525	175	0	87,5	0,5	3
%5 Frit Katkılı	495	165	33	96,02	0,581	3
%10 Frit Katkılı	495	165	66	102,72	0,622	3
%15 Frit Katkılı	495	165	99	115,14	0,697	3

3.4.Beton Karışımının Şekillendirilmesi

Hazırlanan tüm beton karışımları 50 mm x 50 mm x 50 mm boyuta sahip küp numuneler şeklinde olup, Şekil 3.4’de gösterilen pirinç alaşımından üretilmiş iki adet kalıba döküm yapılmıştır. Döküm aşamasında frit katkılı kürlü-kürsüz toplam 10 adet ve Kompoze çimento (KÇ)’lu frit katkısız kürlü-kürsüz toplam 10 adet beton şekillendirilmiştir.

Beton dökümünden önce kalıp temizlenmiş ve betonun metal kalıptan ayrılmasını sağlayan bir organik madde ile yağlanmıştır. Döküm yapıldıktan sonra kalıba, beton karışımının yerleşmesi ve içerisindeki hava kabarcıklarının giderilmesi için elle sıkıştırma ve elek sarsma cihazındaki titreşim mekanizması kullanılarak vibrasyon uygulanmıştır.



Şekil 3.4 Frit katkılı kürlü ve kürsüz, Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız kürlü ve kürsüz olarak hazırlanan beton karışımlarının şekillendirilmesinde kullanılan kalıp

3.5. Numunelerin Kür Edilmesi

Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve frit katkılı kürlü ve kürsüz toplam 10 adet ve Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız kürlü ve kürsüz toplam 10 adet hazırlanan numunelerin her birinin 5 adetine su dolu kap içinde kür uygulanmıştır. Kürsüz olarak adlandırılan numuneler laboratuarda, atmosfer ortamında normal şartlar altında bekletilmiştir. Frit katkılı ve Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız beton numunelerine 7, 14, 28, 56 gün süreyle kür uygulanmıştır.

3.6. Numunelerin Karakterizasyonu

3.6.1. Basma Mukavemeti

Betonların basma mukavemeti deneyi, 50 mm x 50 mm x 50 mm boyutta küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney, Şekil 3.5'de gösterilen Instron 5569 serisi basma test cihazında 1mm/dk yükleme hızı ile yapılmıştır. Kür süresi bitiminde kürlü ve kürsüz olarak adlandırılan 10 adet numuneye test yapılmıştır. Kürlü olarak adlandırılan küp numuneler basınç dayanım testinden önce su içerisinden çıkarılmış ve üzerindeki fazla su kurulanmıştır. Küp numunelere yapılan deneyler sonucunda, numunelerin taşıyabileceği maksimum basma mukavemeti MPa olarak

belirlenmiştir. Numunelerin mukavemeti 7, 14, 28, 56 günlük numunelerin basma mukavemeti testi sonucunda elde edilmiştir. Deney numunelerinin basma mukavemetleri, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

Basma mukavemeti $\sigma = P/A$

σ =Basma Mukavemeti (Maksimum Basınç Gerilmesi)

P=Numunenin Kırılmasına Yol Açan Maksimum Yük

A=Numunenin Kesit Alanı



Şekil 3.5 Basma Mukavemeti Test Cihazı

3.6.2. Setleşmiş Betonun X-Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizleri

X-ışını kırınımının incelenmesi numunelerin yapısında mevcut olan ve gelişen kristal fazların tanımlanmasında en sık kullanılan ve doğruluğu kanıtlanmış en güçlü metotlardan biridir. X-ışını kırınımı ile her bir kompozisyonun analizi yapılarak her biri içindeki mevcut kristal fazlar tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan X-Işını Kırınım İndisi analizleri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği araştırma laboratuarlarında

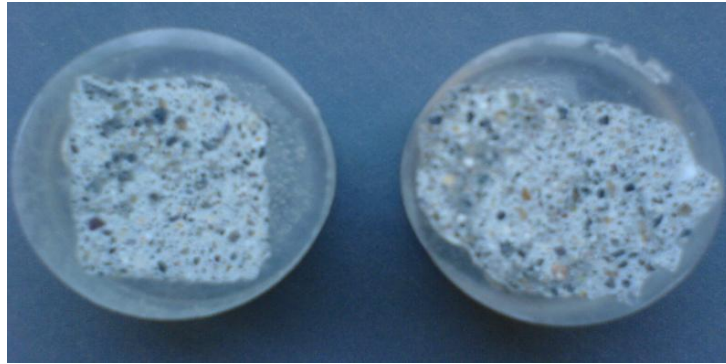
mevcut olan Bruker D-8 ADVANCE serisi cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada tüp voltajı 40 kv ve akımı 40 mA olacak şekilde ayarlanarak, $\text{Cu}_{K\alpha}$ radyasyonu kullanılarak numune analizleri yapılmıştır.

Frit katkılı ve Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız beton numunelerine basma mukavemeti testi uygulandıktan sonra X-Işını Kırınım İndisi (XRD) analizleri yapılacak numunelerden alınan parçalar agat havanda toz haline getirilmiştir.

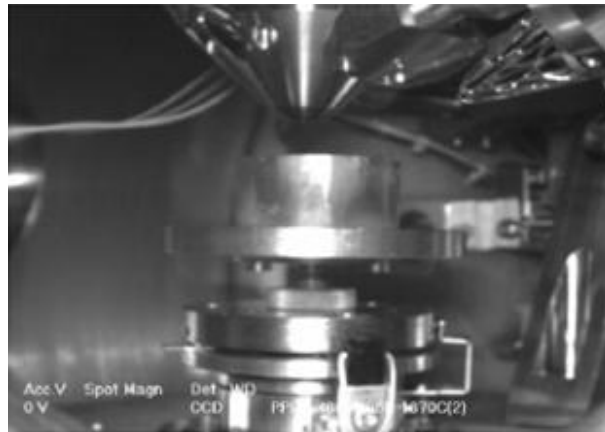
3.6.3. Sertleşmiş Betonun Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Sertleşmiş beton numunelerinin mikro yapı incelemesi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile %5 frit katkılı 28 gün kürlü ve kürsüz, Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız 28 gün kürlü ve kürsüz numunelere yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'de içyapıyı inceleyebilmek için, numune yüzeylerinin öncelikle zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden geçirilmesi gerekmektedir. Zımparalama işleminden önce numune yüzeylerinden alınan parçalar kendiliğinden sertleşen epoksi reçine ve sertleştirici ajan yardımı ile kalıba alınmışlardır. Böylece zımparalama işleminin daha kolay hale getirilmesi sağlanmıştır. Kalıp içerisine alınan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Kalıp içerisinden çıkarılan numuneler görüntü alımına hazırlanması için zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Sırasıyla 80, 500, 800, 1000, 1200 ve 2500 numaralı SiC aşındırıcılar ile yüzeyleri aşındırılarak kabadan inceye giden zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra 3 mikron boyutunda pasta (ince taneli elmas aşındırıcılar) ile yüzey daha pürüzsüz ve parlak hale getirilmiştir. Parlatılan numuneler yüzeydeki kristallerin açığa çıkması için 4 dk. hidroflorik asit (HF) ile dağlanmıştır. Şekil 3.6'de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) için hazırlanan Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız ve %5 frit katkılı 28 gün kür edilmiş numune örnekleri görülmektedir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) çalışması esnasında elektron demetinin yüzeyde yüklenip kalmasını engellemek için ve yüzey iletkenliğini sağlamak amacıyla altın ile kaplama işlemi yapılmıştır. Bu işlem Şekil 3.7’de gösterildiği üzere Polaron- SC7610 Sputter Coater marka kaplama cihazında 4’er dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mikro yapısal analizleri Phillips XL 30 SFEG marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile ikincil elektron detektörü kullanılarak 2-5 kv’ da yapılmıştır.



Şekil 3.6 (a) Kompoze çimento (KÇ)’lu frit katkısız 28 gün kürlü Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) numunesi (b) %5 frit katkılı 28 gün kürlü Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) numunesi



Şekil 3.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

3.6.4.Sertleşmiş Betonun DTA/TG Analizleri

%5 frit katkılı 14-28 gün kürlü ve kürsüz beton numuneleri ve Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız 14 gün kürlü ve kürsüz beton numunelerinden alınan parçalar agat havanda toz haline getirilmiştir. DTA/TG Analizleri Netzsch marka STA 449 F3 model cihazda 25-1000°C aralığında, sıcaklık dakikada 10°K arttırılarak gerçekleştirilmiştir.,

3.6.5.Elastik Modül Ölçümü

Elastik modül ölçümü için %5 frit katlı ve Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız olmak üzere iki ayrı karışım Tablo 3.1'deki karışım türlerine göre beton karışım oranları baz alınarak hazırlanmış ve dikdörtgen kalıba döküm yapılmıştır. Şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra numuneler 1 gün kalıpta sertleşmeleri için bekletilmiştir. Sertleşmiş numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra, 7 gün su içerisinde kür edilmiştir. Kür süresi sonunda numunelerin en, boy, kalınlık değerleri ölçülmüş ve aşağıdaki formül yardımıyla elastik modülleri ölçülmüştür.

$$X=TB-(TB \times 0,224 \times 2)-3,1$$

TB= İlk boy

X= Destek mesafesi

Elastik modül ölçümü Grindo Sonic Mk5 marka cihazda yapılmıştır. Numune mesnet üzerine yukarıdaki denklemden elde edilen destek mesafesi (X) değerine göre yerleştirilmektedir. Cihaza bağlı olan algılayıcı numune yüzeyinin üzerinde tutulmakta ve bu esnada numunenin sağ uç kısmına çekiç darbeleriyle vurulmaktadır. Algılayıcı numunenin bu salınım hareketinin frekansını belirlemektedir. Elde edilen frekans dataları bilgisayara gönderilir. Alınan 10 adet frekans değerinin ortalaması alınır. Daha önceden ölçtüğümüz üç tane en, boy, kalınlık değerinin ortalaması da

alınarak bilgisayardaki elastik modül ölçüm programına elde edilen ortalama frekans,en, boy, kalınlık değerleri girildiğinde elastik modül değeri elde edilmektedir. Şekil 3.8 (a) ve (b)'de sırasıyla, Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız ve %5 frit katkılı çubuklar ile Şekil 3.9'da elastik modül ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.8 (a)- Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız (b)-%5 Frit Katkılı elastik modül ölçüm çubukları



Şekil 3.9 Elastik modül ölçüm düzeneği

4.DENEYSEL BULGULAR

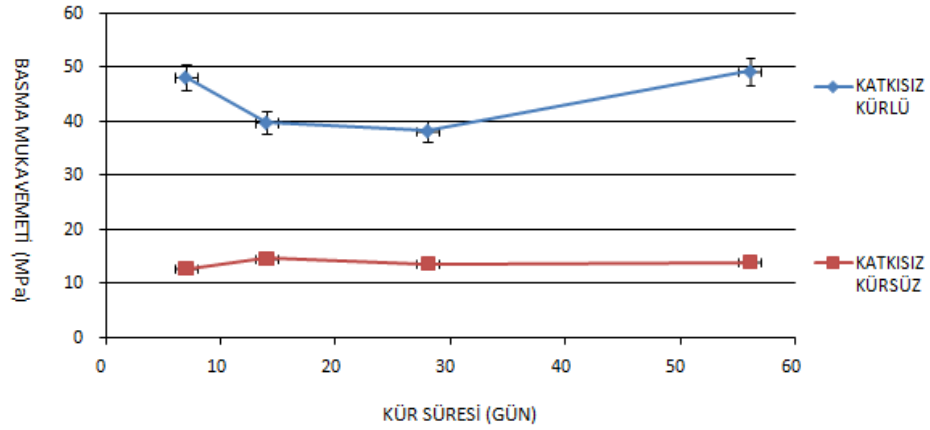
4.1.Basma Mukavemeti Testi Sonuçları

Basma mukavemet testi; sırasıyla %5, %10, %15 frit katkı ve katkısız olarak hazırlanan ve 7, 14, 28 ve 56 gün süresiyle kürlendirilmek üzere gruplandırılan beton karışımlarının her birinden 5 adet kürlü (su içinde tutulan) ve 5 adette kürsüz (normal atmosfer ortamında bırakılan) olmak üzere toplam 160 numune üzerinde yapılmıştır. Kür süreleri sonunda numunelerin basma mukavemetleri ölçülmüştür. Elde edilen tüm mukavemet değerleri kürlenme süresi ve frit katkı içerip içermediğine ve katkı miktarına bağlı olarak Tablo 4.1’de listelenmiştir. Şekil 4.1 frit içermeyen beton karışımlarının normal ortamda (kürsüz) ve su içinde tutulmasına (kürlü) bağlı olarak bekleme süresiyle değişen mukavemet davranışını gösterirken Şekil 4.2 ve 4.3 % frit katkı miktarına bağlı olarak sırasıyla normal atmosfer ortamında bekletilen-kürsüz ve suda bekletilerek kürlenmiş beton numunelerinin mukavemet davranışındaki değişimi gösterir. Ayrıca, sırasıyla %5, 10, ve15 frit ilave oranlarında hazırlanan beton karışımlarının bekleme süresine bağlı olarak, kürlü-kürsüz olmak üzere, mukavemet davranışları kürlenmenin etkisini de gösterir şekilde karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.1 Tüm harç karışımlarının basma mukavemeti testi sonuçları

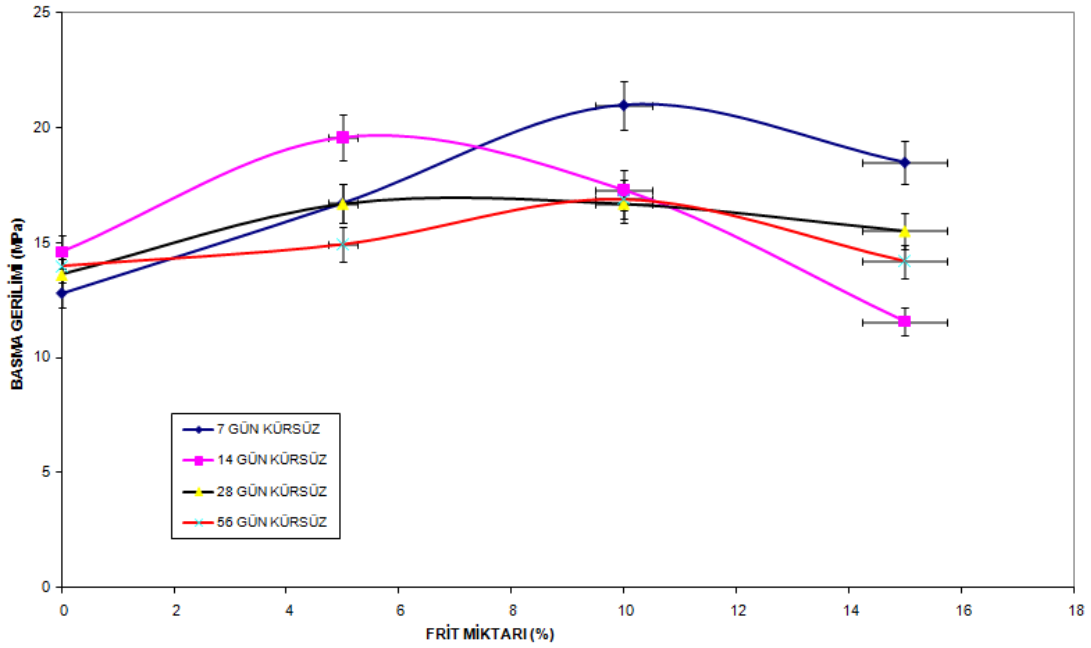
	7 GÜN (Mpa)		14 GÜN (Mpa)		28 GÜN (Mpa)		56 GÜN (Mpa)	
	KÜRSÜZ	KÜRLÜ	KÜRSÜZ	KÜRLÜ	KÜRSÜZ	KÜRLÜ	KÜRSÜZ	KÜRLÜ
Frit Katkısız	12,8	48,2	14,6	39,8	13,6	38,25	13,97	49,28
%5 Frit Katkılı	16,72	39,29	19,57	29,95	16,7	42,95	14,92	41,49
%10 Frit Katkılı	20,98	20,01	17,28	23,48	16,7	35,52	16,89	39,3
%15 Frit Katkılı	18,49	18,2	11,57	34,21	15,51	33,94	14,18	36,81

Frit ilavesi içermeyen beton karışımlarından hazırlanan numunelerin normal atmosfer şartlarında bekletilmesi ve su içinde kür edilmesi sonucu mukavemet değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 4.1’de verilmiştir. Su içinde kürlemenin mukavemet üzerine etkisi açıkça görülmektedir. Su içinde kürlenen numunelerin ortalama mukavemet değeri normal ortamda bekletilen numunelerin mukavemetinin yaklaşık üç katıdır. Normal ortamda bekletilen numunelerin mukavemeti bekleme süresi ile çok fazla değişim göstermez iken, su içinde kür edilen numunelerin mukavemeti kürleme süresine bağlı olarak dalgalanma göstermektedir.



Şekil 4.1 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği

Frit katkılandırılarak, 7, 14, 28 ve 56 gün süresiyle normal atmosfer ortamında bekletilen beton karışımlarından elde edilen mukavemet değerlerinin frit ilavesine bağlı olarak değişimi Şekil 4.2 de verilmiştir.

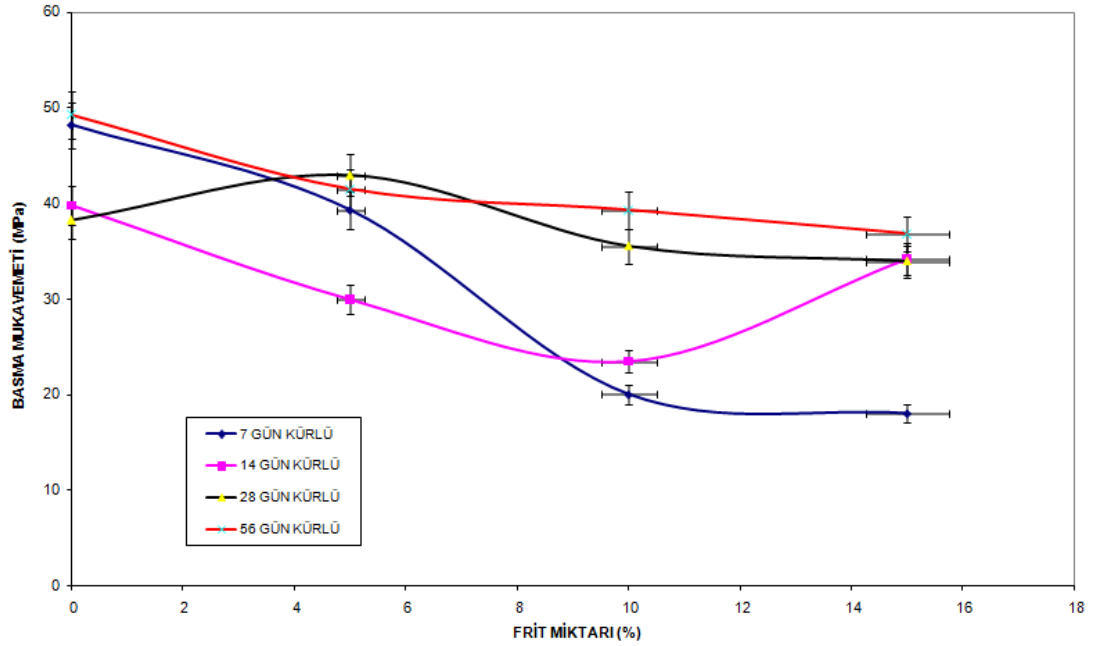


Şekil 4.2 % Frit katkı miktarının artmasıyla farklı sürelerde, atmosfer ortamında normal şartlar altında tutulan beton numunelerin mukavemeti üzerine etkisi

Frit katkı miktarının mukavemet üzerine etkileri incelendiğinde; 7 gün kürsüz numuneler ele alındığında; artan frit ilavesine bağlı olarak, %10 frit miktarına kadar mukavemet değerlerinde artış vardır. Frit miktarı %15 olduğunda ise mukavemette %10 frit içeren beton karışımına göre %11 civarında düşme vardır. 14 gün bekletilen kürsüz numunelerde; maksimum mukavemet değeri %5 frit içeriğinde elde edilmiştir. Artan frit miktarıyla beraber mukavemet değeri azalmakta ve %15 frit miktarında ise en düşük mukavemet değeri elde edilmiştir. 28 gün kürsüz numunelerde ise; mukavemet değerlerinde %5 frit miktarına kadar çok az bir artış ve sonrasında %10 frit miktarına kadar stabil mukavemet değerleri, %15 frit miktarında ise %10'a göre mukavemet değerinde %7 gibi bir düşme vardır. 56 günlük kürsüz numunelerde ise, %10 frit miktarına kadar mukavemette azda olsa artış görülmekte fakat, %15 frit katkısında ise mukavemet değerinde %10luk frit ilavesine göre %16'lık bir düşüş vardır.

Frit katkılanırılmış ancak, 7, 14, 28 ve 56 gün süresiyle su içinde bekletilen beton karışımlarından elde edilen mukavemet değerlerinin frit ilavesine bağlı olarak değişimi Şekil 4.3 de verilmiştir. Ayrıca, %5, 10 ve 15 frit ilavesi içeren beton karışımlarından elde edilen mukavemet değerlerinin, her bir ilave düzeyinde; suda

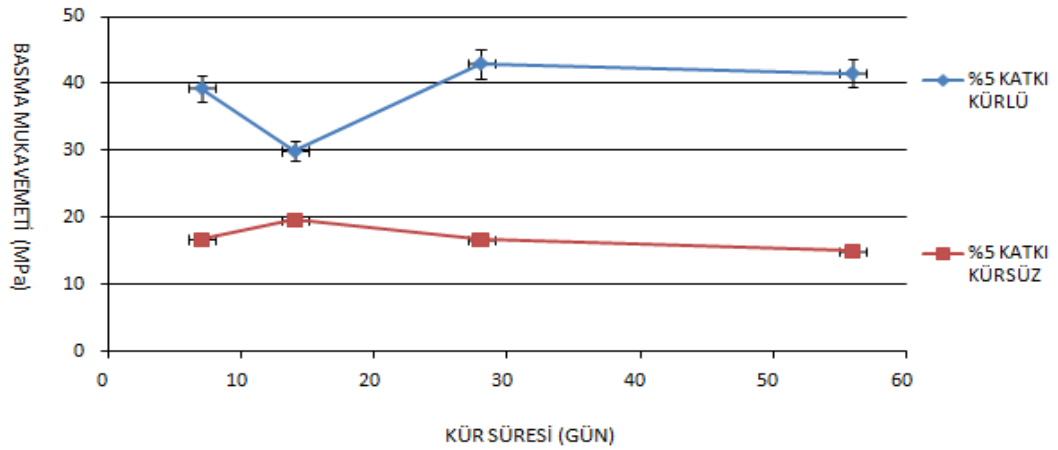
kürlemenin de etkisini açıkça gösteren, kürlleme süresine bağlı olarak değişimini veren grafikler sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir.



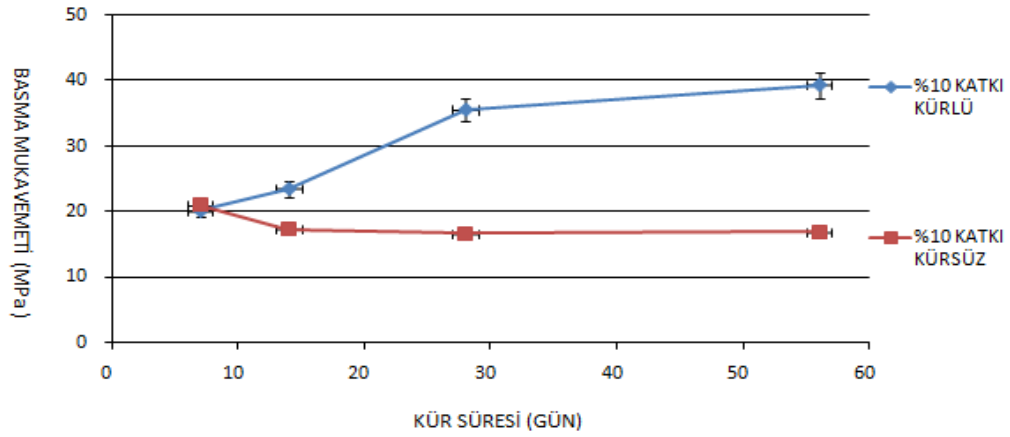
Şekil 4.3 % Frit katkı miktarının artmasıyla farklı sürelerde kürlenmiş beton numunelerin mukavemeti üzerine etkisi

Genel olarak frit ilavesi ile mukavemetin düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak, mukavemetteki düşüş ile frit ilavesi ve kürlleme süresi arasında net bir lineer ilişki kurulamamıştır. Bu nedenle; su içinde tutularak kürlenen numunelerden elde edilen mukavemet sonuçları kürlleme süresine ve frit ilave miktarına bağlı olarak detaylı incelenmiştir. 7 gün süresince kürlenen numunelerde, artan frit miktarına bağlı olarak mukavemet değerlerinde önemli oranda azalma olduğu açıkça görülmektedir. Frit ilavesinin artışına bağlı olarak, %10 frit miktarına kadar mukavemet değerinde neredeyse lineer bir azalma, %10'dan fazla ilave durumunda ise stabil kalma gibi bir durum söz konusudur. Hatta, %10 ve %15 frit ilavelerinde; %0 katkı miktarına göre mukavemet değerinde, neredeyse 2/3 oranında azalma vardır. Benzer şekilde, 14 gün süreyle kürlenen numunelerde de, %10 frit miktarına kadar, mukavemet değerlerinde azalma görülmektedir. Frit katkısı %15 olduğunda, mukavemet değerindeki ani artış veya bir başka ifade ile toparlanma, net bir şekilde; %15 frit katkılı, kürlü ve kürsüz beton numunelerinden elde edilen mukavemet sonuçlarının birlikte grafik halinde verildiği Şekil 4.6'da görülmektedir. 28 gün kürlü numunelerde ise, en yüksek mukavemet değerinin, %5 frit katkı içeren beton karışımlarından elde edilmiştir. Bu

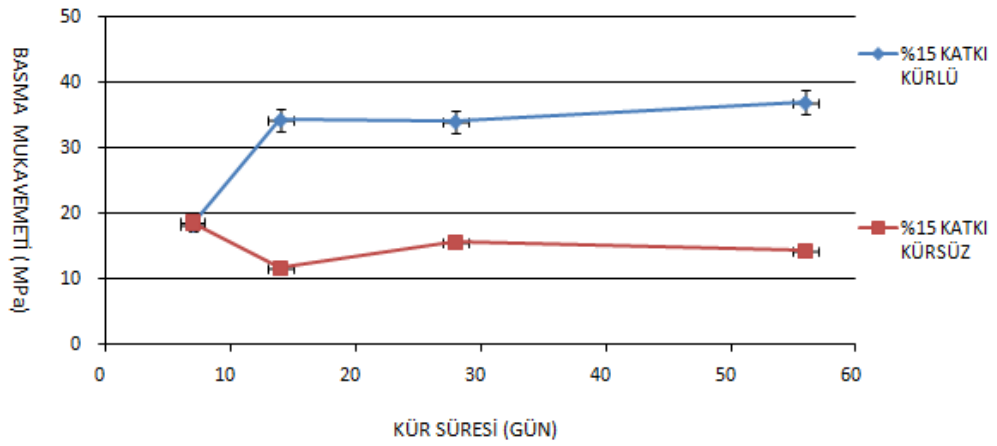
değer, frit içermeyen beton karışımlarının 7 ve 14 gün kürlü numunelerinde görülenin aksine, beton standardında da referans olarak alınan 28 günlük değer açısından, %5 frit katkı miktarı ile elde edilen en yüksek mukavemet değeridir. Artan frit miktarına bağlı olarak mukavemet değerinde hafif bir azalma meydana gelmiştir. Yine en düşük mukavemet değeri, %15 frit katkısında elde edilmiştir. 56 gün kürlü numuneler ele alındığında ise; %5 frit katkı miktarına kadar mukavemet değerinde azalma oranı yüksek; %10 frit katkısından sonra ise azalma oranı daha düşüktür. %5 frit katkı miktarı ile 28 günde ulaşılan en yüksek mukavemet değerine, %10 ve %15 katkı miktarlarında ancak 56 günde ulaşmış oldukları görülmektedir. Buradan, artan katkı miktarının mukavemet üzerine olumlu etkisini uzun vadede gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, %5 ve 10 frit katkılı, kürlü-kürsüz beton numunelerin mukavemet davranışının kür süresine göre değişimini gösteren grafiklerinde (Şekil 4.4 ve 4.5) görüldüğü üzere çalışmalarımızda istenilen, kür süresini kısa tutmak koşuluyla mukavemet artışının sağlanması; %10 frit katkısı ile, katkı miktarını azaltarak yüksek mukavemet değerinin elde edilmesi ise %5 frit katkısı ile sağlanabileceği ifade edilebilir.



Şekil 4.4 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği



Şekil 4.5 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği



Şekil 4.6 %15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü ve kürsüz numunelerin mukavemet-kür süresi (bekleme süresi) grafiği

Kür süresine bağlı olarak %5 Frit katkılı 7 gün kürlü numunelerde katkısız 7 gün kürlü numunelerde olduğu gibi erken mukavemet artışı görülmektedir. Burada yine katkısız kürlü numunelerdekine benzer bir durum olan 7 günden sonra mukavemette 14 güne kadar düşüş görülmektedir ancak, katkısız 7 gün kürlüden farklı olarak 14 günden sonra mukavemette artış ve 28 günde en yüksek mukavemet değerine ulaşması söz konusudur. 56 günde ise %5 Frit katkılı kürlü numunelerin mukavemetinde düşme söz konusudur. %5 Frit katkılı kürsüz numunelerde ise, katkısız kürsüz numunelerdeki 7 günden 14 güne kadar mukavemette az da olsa bir artış, 14 günden sonra ise bekleme süresinin mukavemet üzerine bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

%10 Frit katkılı kürlü numunelerde 28 güne kadar kür süresinin mukavemet üzerine lineer bir etkisi vardır. 28 günden 56 güne kadar mukavemet değerinin kür süresi ile arttığı ve en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Dolayısıyla %10 Frit katkılı kürlü numunelerde kür süresi ile mukavemet değerinin doğru orantılı olduğunu söyleyebiliriz. %10 Frit katkılı kürsüz numunelerde ise, 7 günde kürlü kürsüz numuneler aynı mukavemet değerine sahip olsalar bile 14 günden sonra %5 frit katkılı kürsüz ve katkısız kürsüz numunelerde olduğu gibi %10 Frit katkılı kürsüz numunelerde de bekleme süresinin mukavemet üzerine bir etkisinin olmadığı hatta, başlangıçta aynı mukavemet değerine sahip kürlü ve kürsüz numunelerden kürlü numunelerin 56 güne kadar suda kür edilip kürsüz numunelerin 56 gün atmosfer ortamında normal şartlarda bekletilme işlemi sonrası elde edilen grafik verilerinden, betonun belirli bir mukavemet kazanabilmesi için kür işlemini uygulanması gerektiği anlaşılmaktadır.

%15 Frit katkılı kürlü numunelerde 28 gün mukavemet değerinde çok az bir düşüş görülse de mukavemet değerinde kür süresine bağlı olarak artış söz konusudur. Yine burada da %10 Frit katkılı kürlü numunelerde olduğu gibi en yüksek mukavemet değerine 56 günde ulaşılmıştır. %15 Frit katkılı kürsüz numunelerde %10 Frit katkılı kürsüz numunelerde olduğu gibi 7 gün'deki mukavemet değerleri aynı olmasına rağmen kür işlemi ile ancak betonda belirli bir mukavemet değeri elde edilebileceği, bekleme süresinin mukavemet üzerine bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak; dört tip kürsüz beton numunelerinin mukavemet-kürleme süresi grafiklerinden, atmosfer ortamında normal koşullarda bekleme süresinin betonların mukavemeti üzerine olumlu yada olumsuz bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Referans olması açısından üretilen en yüksek mukavemet değerine sahip katkısız betonun mukavemet değerine en yakın değer, %5 frit katkısında elde edilmiştir. Ancak, %10-15 frit içeren kürlü numunelerin mukavemet-kürleme süresi grafiğinde mukavemet değerlerinin 56 güne kadar artması ve 56 günde en yüksek değere ulaşması; %5 frit katkılı kürlü numunelerdeki aksine, artan % frit miktarı ile puzolanik malzemelerde olduğu gibi uzun vadede görülmektedir.

4.2.Elastik Modül Ölçüm Sonucu

Tzen-Chin Lee ve arkadaşlarının 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada betonun elastik modülünün artan su/çimento oranı ile azaldığı görülmüştür. Uçucu kül-kazıyıcı kül ve frit karışımının ergitilmesi sonucu elde edilen toz %20 çimento yer değiştirmesi şeklinde 0,48, 0,58 ve 0,68 su/çimento oranlarında hazırlanan beton karışımlarından en iyi elastik modül değerini 0,48 su/çimento oranıyla hazırlanan örnekler vermiştir. Bu çalışmadan esinlenerek yapılan elastik modül ölçüm testinde 0,58 ile en az su/çimento oranına sahip %5 frit katkılı beton karışımı kullanılmıştır. Elastik modül ölçüm sonucunun değerlendirilmesinde referans olması açısından sonuçlar katkısız beton karışımı ile karşılaştırılmıştır. Katkısız ve %5 frit katkılı numunelerden elde edilen elastik modül değerleri Tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2 Katkısız ve %5 Frit katkılı çubukların elastik modül değerleri

Numune Adı	Elastik Modül (GPa)
Katkısız	25,45
%5 Frit Katkılı	24

Tabloda verilen değerler literatürde rapor edilen değerlere çok yakın bulunmuştur.

4.3. X-Işını Kırınım İndisi (XRD) Analizleri Sonuçları

7, 14, 28 ve 56 gün kürlü ve kürsüz olarak bekletilen katkısız, %5-10-15 frit katkılı numunelerin mukavemet testi yapıldıktan sonra X-Işını Kırınım İndisi analizleri sonucunda mikro yapılarındaki fazlar tespit edilmiş ve Tablo 4.3, 4.4, 4.5, 4.6’da listelenmiştir.

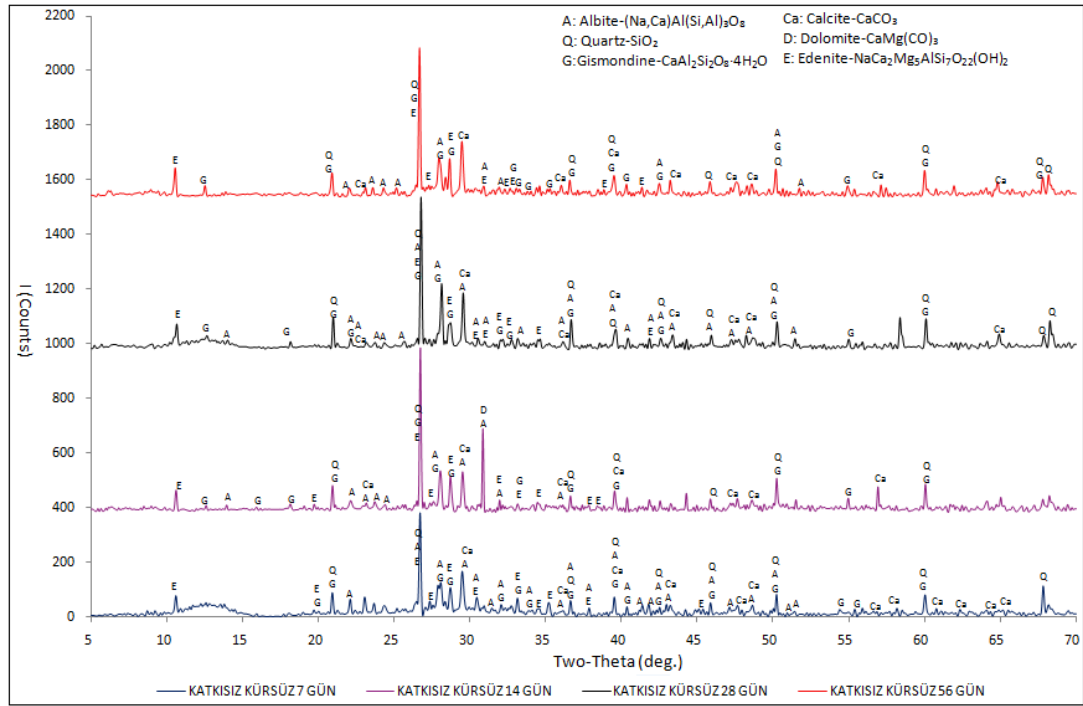
%10 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazların tespiti için yapılan x-ışını kırınım indisi analizi sonucunda 7, 14, 28, 56 gün kürlü-kürsüz numunelerde albit, kuvars, gismondine, edenit ve kalsit fazları ortaktır. Dolomit fazı ise hiçbir kür süresinde görülmemiştir.

Tablo 4.6 %15 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazlar

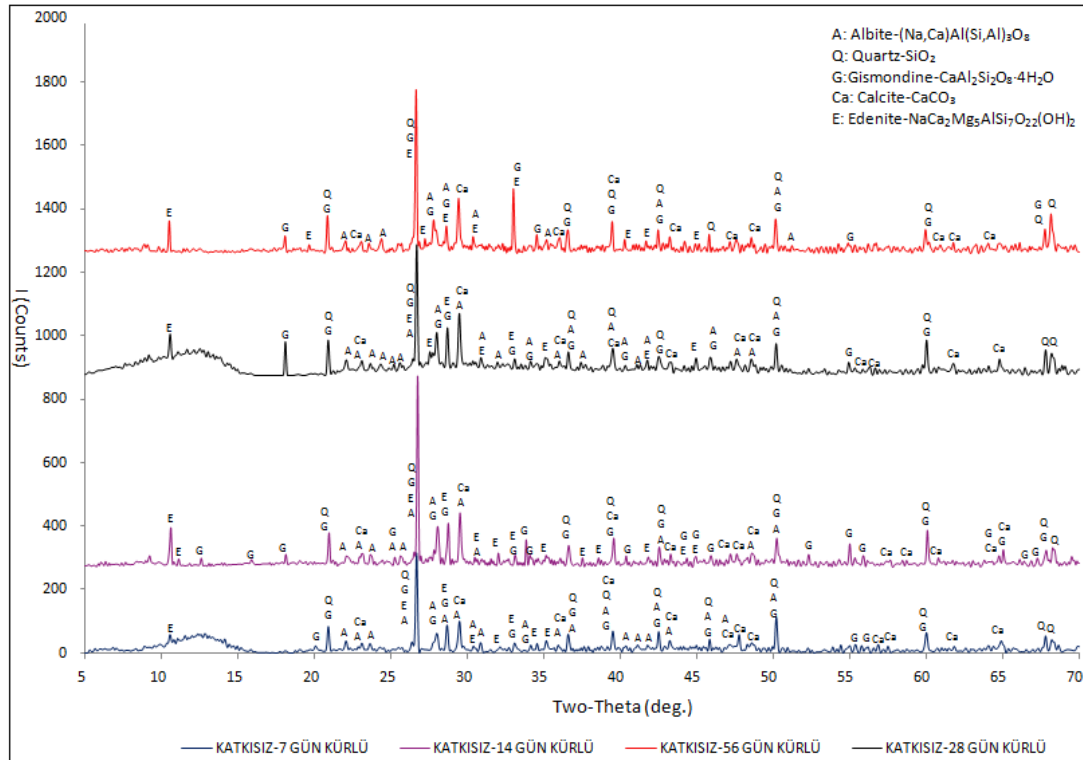
%15 Frit	Albit		Kuvars		Gismondine		Kalsit		Edenit		Dolomit		Phlogophite	
	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü	Kürsüz	Kürlü
7 GÜN	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
14 GÜN	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
28 GÜN	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
56 GÜN	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				*

%15 Frit katkılı kürlü-kürsüz numunelerin mikro yapılarındaki fazların tespiti için yapılan x-ışını kırınım indisi analizi sonucunda 7, 14, 28, 56 gün kürlü-kürsüz numunelerde albit, kuvars, gismondine, edenit ve kalsit fazları ortaktır. Dolomit fazı ise hiçbir kür süresinde görülmemiştir. Katkısız, %5 ve %10 frit katkılı numunelerden farklı olarak 56 gün kürlü numunede phlogophite fazı tespit edilmiştir.

7, 14, 28 ve 56 gün kürlü ve kürsüz olarak bekletilen katkısız, %5-10-15 frit katkılı numunelere ait X-ışını kırınım indis desenlerinin grafik halinde gösterimi sırasıyla Şekil 4.7-4.14'de verilmiştir.



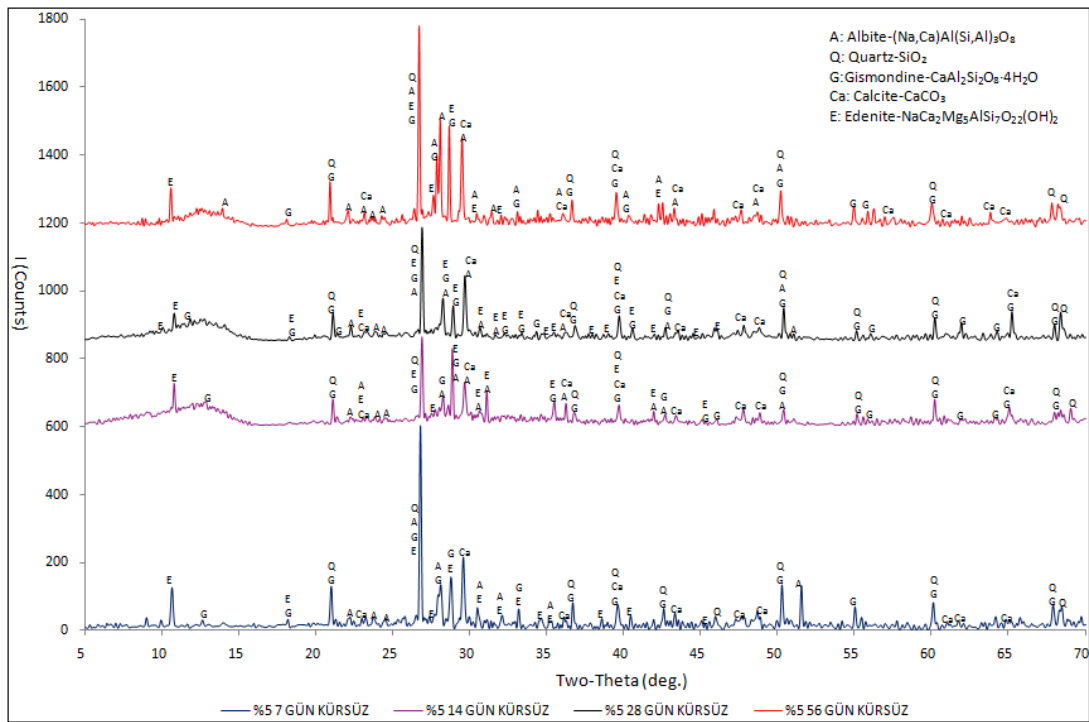
Şekil 4.7 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu



Şekil 4.8 Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

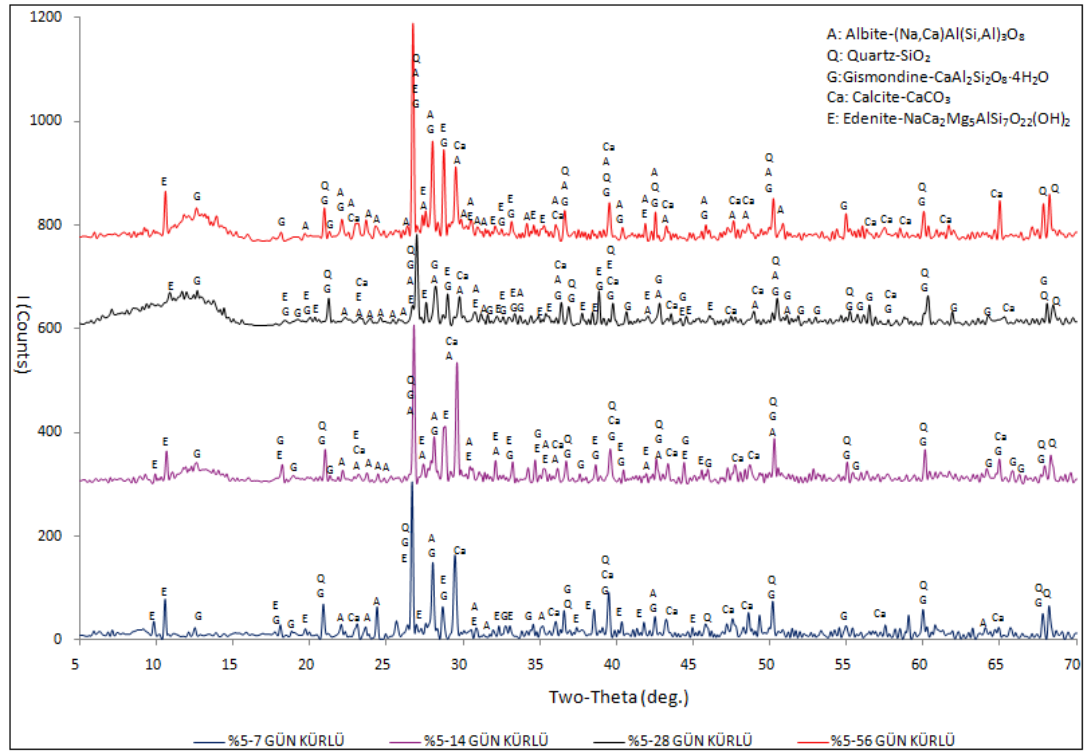
Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin Şekil 4.7'deki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde, 7 günden itibaren 56 güne kadar edenit fazı pikleri miktarı fazladır. 56 günde ise edenit fazı miktarı azdır.

Katkısız 7, 14, 28, 56 gün kürsü numunelerin Şekil 4.8'deki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde, 7 günden itibaren görülen albit pikleri 56 günde azalmıştır ve gismondine pikleri miktarı fazlaşmıştır.

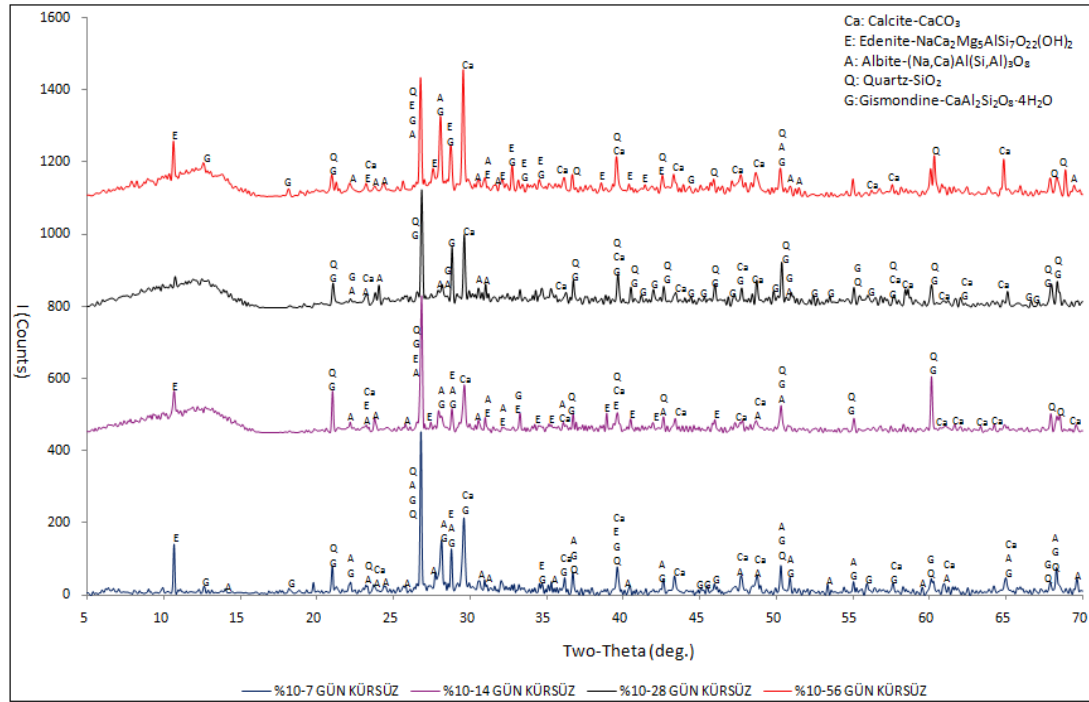


Şekil 4.9 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

%5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsü numunelerin Şekil 4.9'daki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde; 14 günde edenit ve albit fazları pik şiddetleri fazla olması 14 günde az da olsa mukavemet artışı yaratmıştır. 28 ve 56 güne gelindiğinde ise edenit piklerinin varlığının azalması 14 günden itibaren düşen mukavemet değerini açıklamaktadır.



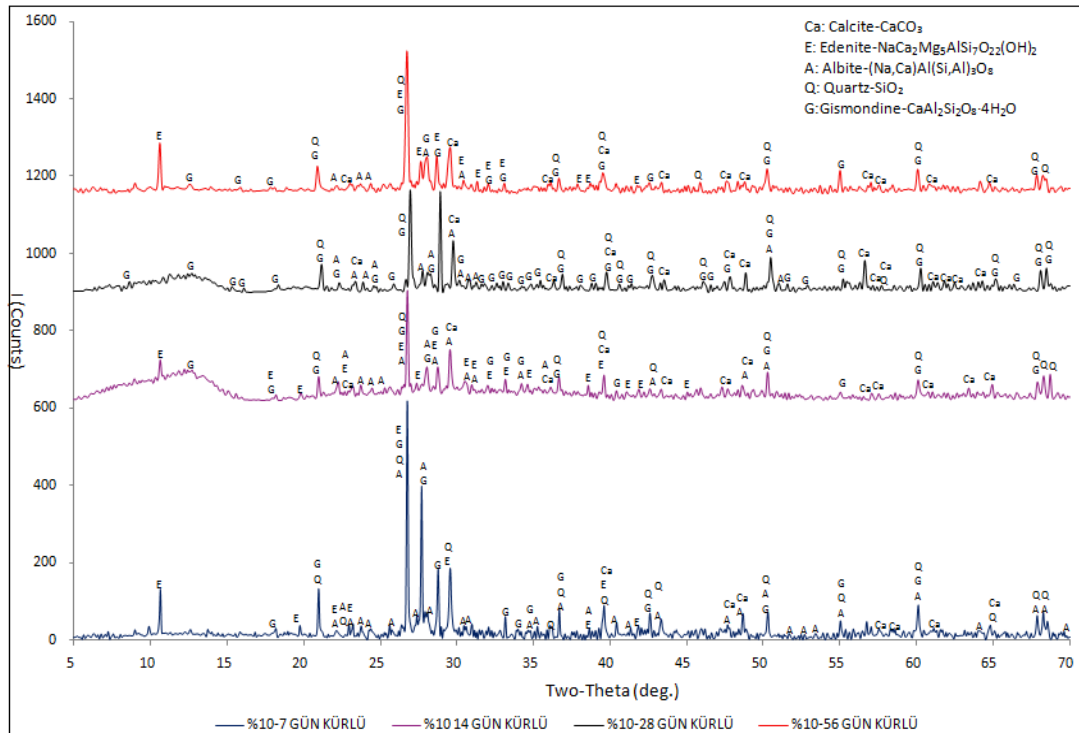
Şekil 4.10 %5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu



Şekil 4.11 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

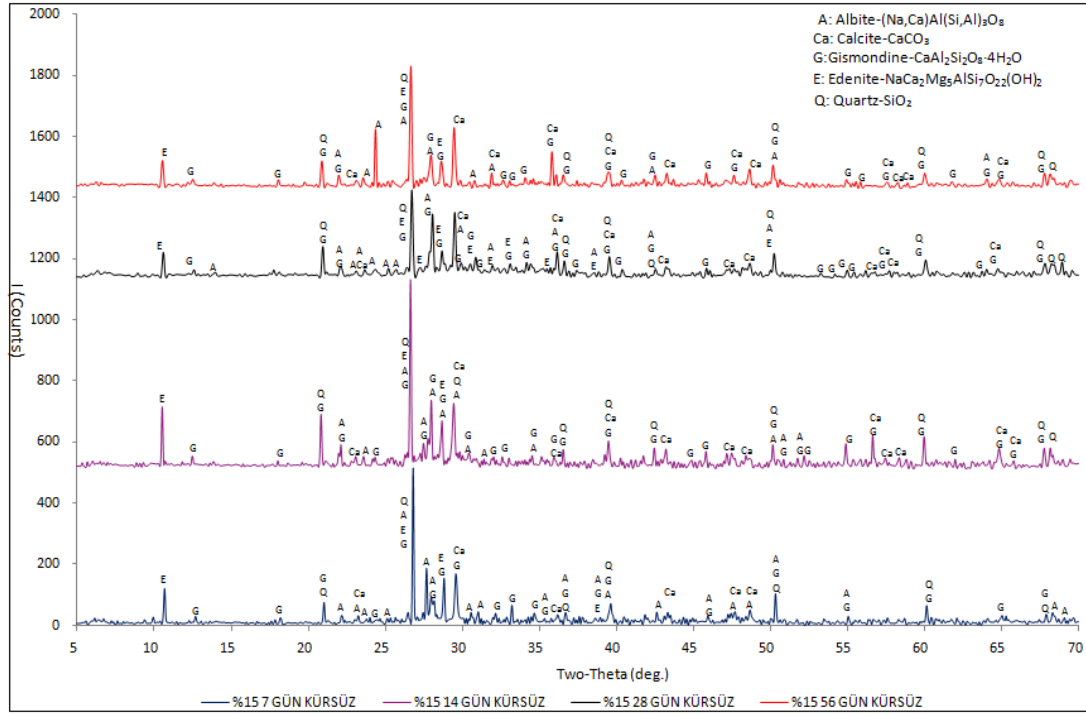
%5 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin Şekil 4.10'daki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde; 14 ve 28 günlerde gismondine ve edenit fazı piklerinin fazlalığı 14 günden sonra mukavemette artış ve 28 günde en yüksek mukavemet değerine ulaşmasının sebebi olarak gösterilebilir. 56 günde ise diğer günlere göre edenit fazı pikleri daha az miktardadır.

%10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin Şekil 4.11'deki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde; edenit fazı 7,14, 28 ve 56 günlerde değişen miktarlarda yapıda mevcuttur. X-ışını kırınım indisi analiz sonuçlarında kürlü numunelerde mukavemet değerindeki artışın sebebi olarak görülen edenit fazının, %10 frit katkılı kürsüz numunelerde hidrasyon reaksiyonlarının yeterince gerçekleşmemiş olması nedeniyle 28. günde yapıda nispeten daha az olması ve dolayısıyla betonun mukavemet artışı üzerine olumlu bir etkisinin olmadığı şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.12 %10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

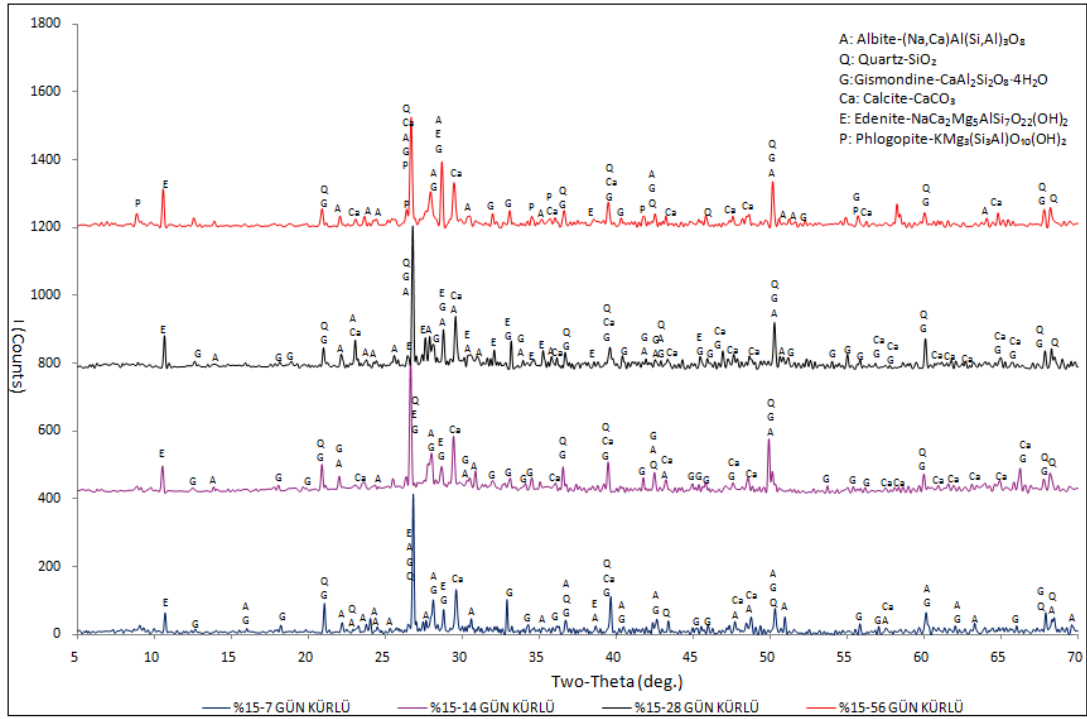
%10 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin Şekil 4.12'deki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde; 7, 14 ve 56 günlük kürlleme sürelerinde edenit fazı piklerinin olduğu görülmektedir. 28 günde görülen gismondin fazına ait piklerinin bir çoğu 56 günde kaybolmuştur. Bunun yerine edenit fazına ait piklerin tekrar kuvvetli olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13 %15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

%15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürsüz numunelerin Şekil 4.13'deki x-ışını kırınım indisi desenleri incelendiğinde; edenit fazı yapıda 28 günde de vardır. Özellikle, 14 günlük kürlleme süresinde edenit fazının oluşumu diğer kürlleme sürelerinden fazladır. 28 günde yapıda edenit fazının olması mukavemette artışın sebebi olarak gösterilebilir.

%15 Frit katkılı kürlü numunelerde ise edenit fazı 7, 14, 28 ve 56 günlerde yapıda mevcuttur ve %10 Frit katkılı kürlü numunelerde olduğu gibi, 7 gün'deki kürlü-kürsüz numunelerin mukavemet değerleri aynı olmasına rağmen kür işlemi ile ancak betonda belirli bir mukavemet değeri elde edilebileceği, bekleme süresinin mukavemet üzerine bir etkisinin olmadığı Şekil 4.5 ve 4.6'da açıkça görülmektedir.

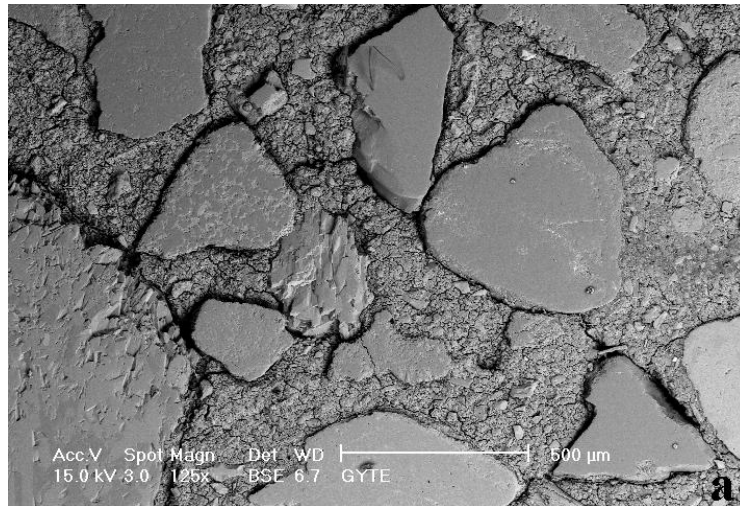


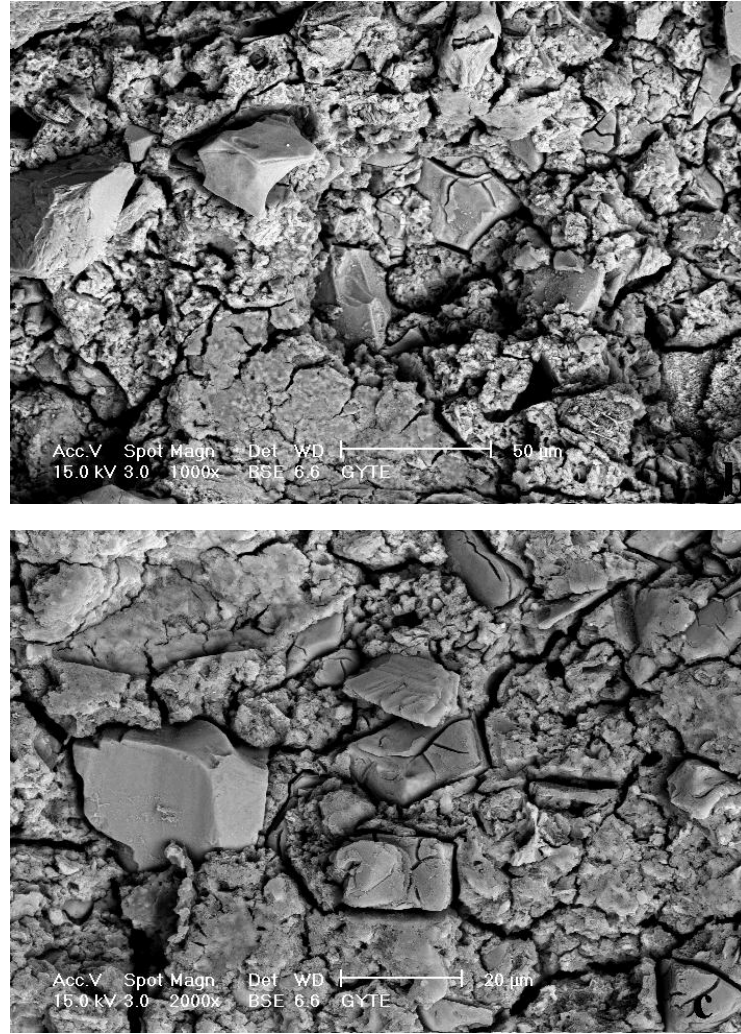
Şekil 4.14 %15 Frit katkılı 7, 14, 28, 56 gün kürlü numunelerin X-Işını Kırınım İndisi analiz sonucu

X-ışını kırınım analiz metodu ile %15 frit katkılı ve 7, 14, 28, 56 gün süreyle kürlenmiş numunelerin mikro yapılarında tespit edilen fazların kürlenme zamanına göre değişimi Şekil 4.14’de görülmektedir. Grafikteki eğrilerin şiddetlerinden anlaşıldığı üzere kürlenme süresine bağlı olarak edenit fazın görece miktarı da artmaktadır. Bunun olumlu etkisi mukavemet değerleri üzerinde görülmüştür. Özellikle, mukavemet değerlerinin kürlenme süresinin 7 günden 14 güne arttırılması ile mukavemetin neredeyse 2 katına artması bu olumlu etkinin göstergesi olarak kabul edilebilir.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analiz Sonuçları

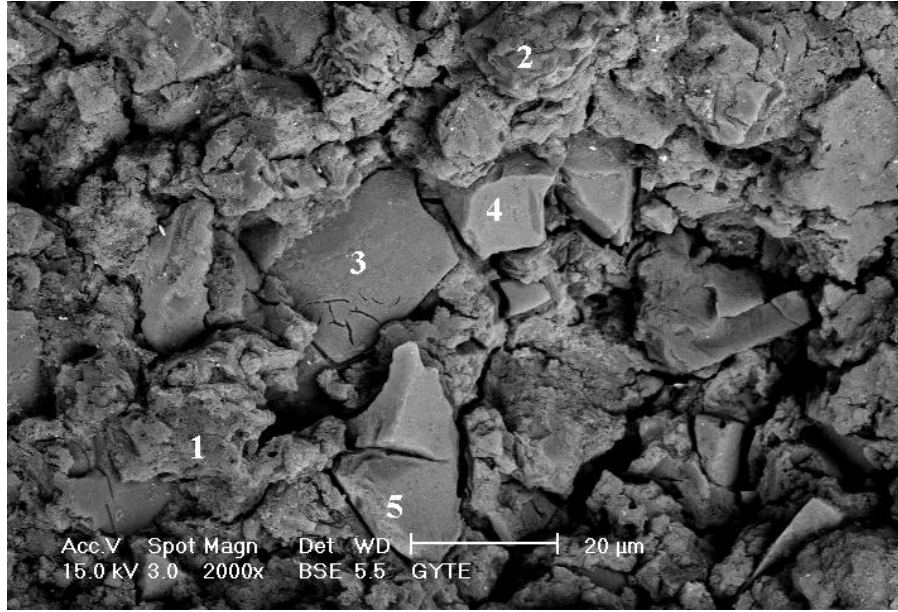
Kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız 28 gün kürlü beton numunelerinin ve %5 frit katkılı 28 gün kürlü ve kürsüz beton numunelerinin, hidroliz reaksiyonları sırasında mikro yapılarında gelişen ve x-ışını kırınım metodu ile tespit edilen farklı kristal oluşumlarını görüntülemek amacıyla numunelerden farklı büyütme oranlarında taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve fazların içerdiği elementlerin mikro yapıdaki dağılımlarını inceleyebilmek amacıyla numunelerin farklı büyütmelerde alınan mikro yapı görüntülerinin değişik bölgelerinden EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 4.15'de kompoze çimento (KÇ)'lu frit katkısız 28 gün kürlü beton numunelerinin SEM görüntüleri ile Şekil 4.16-19'da EDX analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 4.20-22'de %5 Frit katkılı 28 gün kürlü beton numunelerinin SEM'den elde edilen değişik büyütmelerde mikro yapı görüntüleri ile Şekil 4.23'den 4.25'e kadar olan grafiklerde ise EDX analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 4.26-4.27'de %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz beton numunelerinin SEM'den elde edilen değişik büyütmelerde mikro yapı görüntüleri ile Şekil 4.28 ile 4.2'de EDX analiz sonuçları verilmiştir.





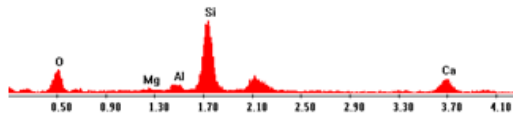
Şekil 4.15 Katısız 28 gün kürlü numunelerin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri.

Katısız 28 gün kürlü numunelerin Şekil 4.15 a, b ve c’deki mikro yapı görüntüleri incelendiğinde 500 büyütme oranında yaklaşık 500µm tane boyutuna sahip parçacıklar arasına yayılmış faz ile birlikte kompakt bir yapı görülmekte, bu yapıya 1000 büyütme oranı ile yaklaşıldığında parçacıklar arasına yayılmış fazın süngerimsi yapıya yakın şekilde olduğu ve köşeli yapıya sahip parçacıkların süngere benzeyen fazın içine gömüldüğü, 2000 büyütme oranında ise köşeli parçacıkları saran yapının süngerimsi yapıdan daha sıkı yapıda olduğu fakat, yapının yine de boşluklu olduğu görülmektedir.

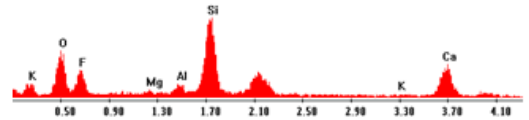


1.Bölge EDX analizi

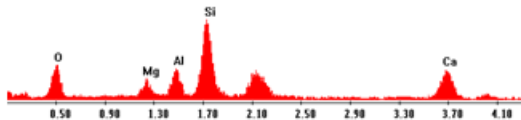
2.Bölge EDX analizi



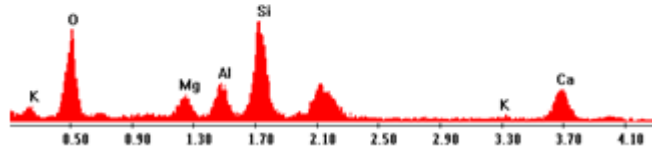
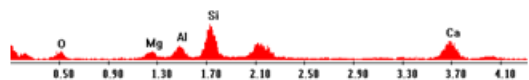
3.Bölge EDX analizi



4.Bölge EDX analizi



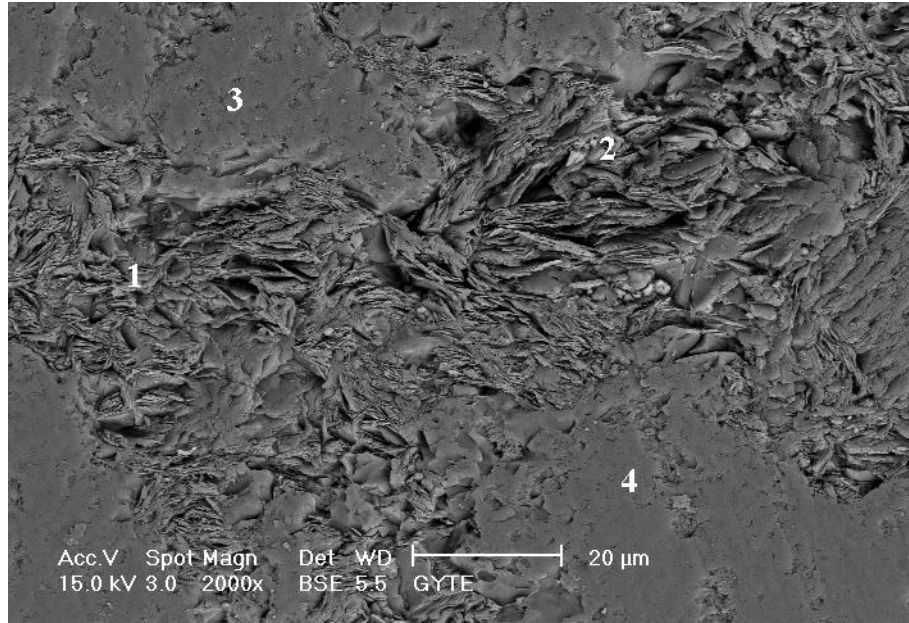
5.Bölge EDX analizi



Şekil 4.16 Katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsü

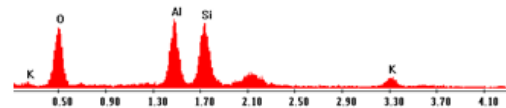
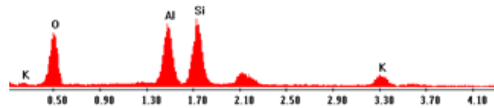
Şekil 4.16'in c'deki SEM görüntüsü ile katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsüne baktığımızda birbirine çok benzer yapılar olduğu görülmektedir. Yaklaşık 20 μm tane boyutunda parçacıklar ile bu parçacıkları saran süngerimsi yapının 5 bölgesinde yapılan EDX analiz sonuçlarına göre, 1 numaralı bölgede yoğunlukla SiO_2 yani kuvarsın mevcut olduğuna işaret eder. 2

numaralı bölgede Ca ve F elementlerin varlığını gösterir. Bu elementler büyük olasılıkla beton numunesinin kolay parlatılması için içine gömüldüğü reçine artıklarından kaynaklanmış olabilir. 3, 4 ve 5 numaralı bölgelerden elde edilen EDX sonuçları o bölgelerde gismondine fazının geliştiğini göstermektedir.



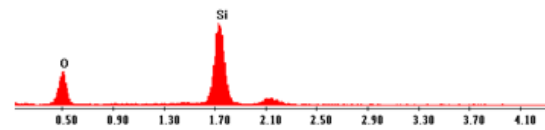
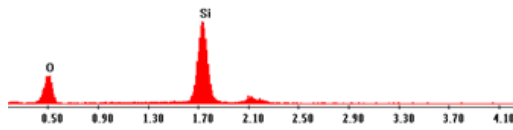
1.Bölge EDX analizi

2.Bölge EDX analizi



3.Bölge EDX analizi

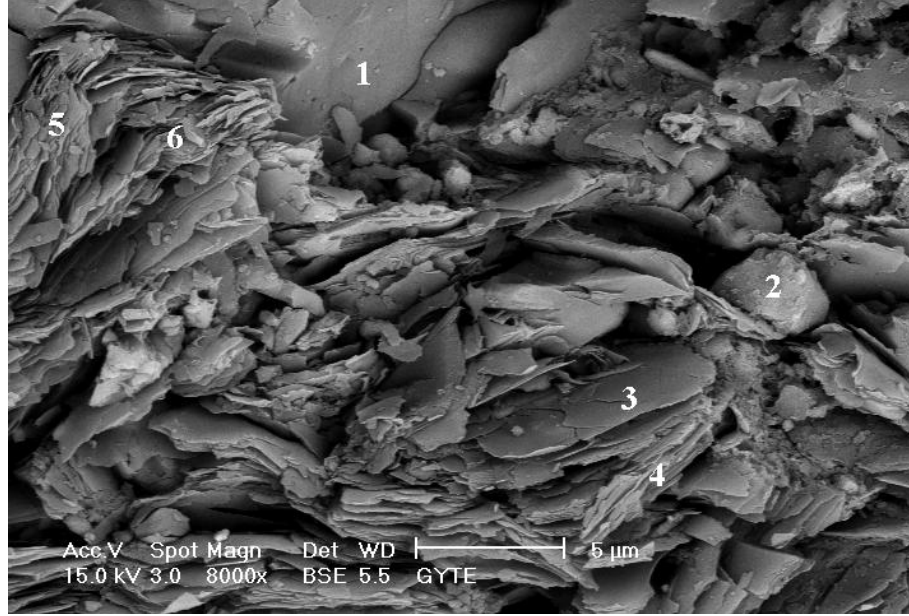
4.Bölge EDX analizi



Şekil 4.17 Katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsü

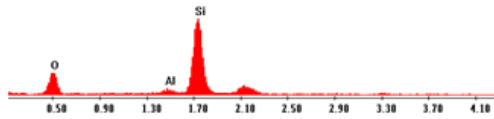
Katısız 28 gün kürlü numunenin 2000 büyütme oranında EDX görüntüsünde tabakalı yapı ile onu çevreleyen blok halde bir faz yapısı Şekil 4.17'de görülmektedir. 1 ve 2. numaralı bölgeden alınan EDX sonuçları o bölgelerde bulunan

tabakalı yapının albit yapısında, 3 ve 4 numaralı bölgelerde bulunan faz yapısının ise silika tanelerinin olduğu tespit edilmiştir.

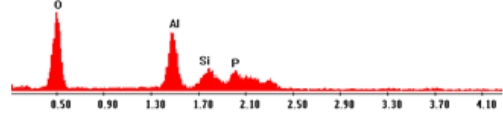


1.Bölge EDX analizi

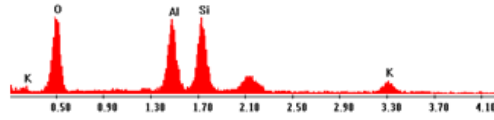
2.Bölge EDX analizi



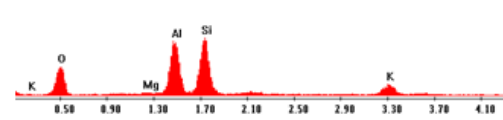
3.Bölge EDX analizi



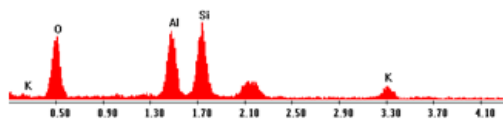
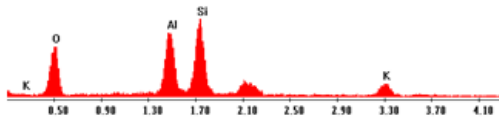
4.Bölge EDX analizi



5.Bölge EDX analizi

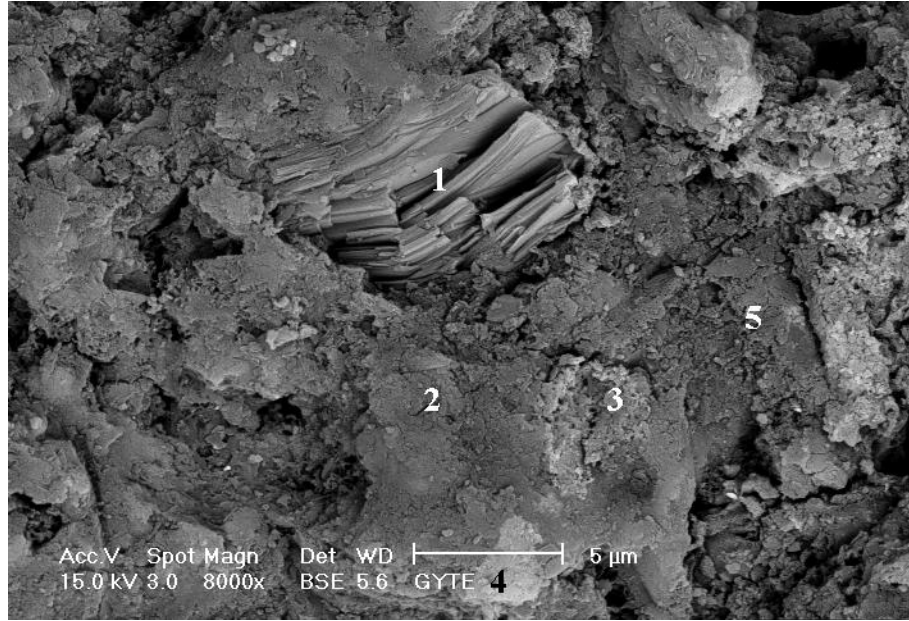


6.Bölge EDX analizi



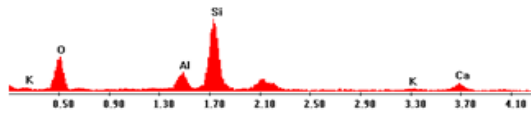
Şekil 4.18 Katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranında EDX görüntüsü

Şekil 4.18'deki katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranındaki EDX görüntüsünde genelde yoğunlaşmış tabakalı yapı hakimdir. 1 bölgeden alınan EDX sonuçları o bölgenin tamamıyla silikadan oluştuğu 2 bölgeden alınan EDX sonuçları o bölgenin alüminaca zengin bir bölge olduğunu, diğer 3, 4, 5 ve 6. bölgelerden alınan EDX sonuçlarında ise tabakalı albit yapısının hakim olduğu anlaşılmaktadır.

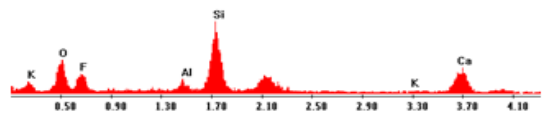


1.Bölge EDX analizi

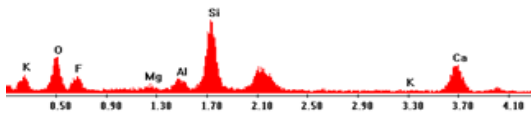
2.Bölge EDX analizi



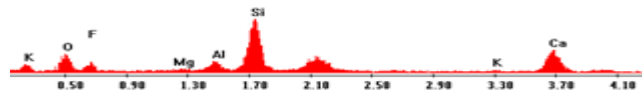
3.Bölge EDX analizi



4.Bölge EDX analizi

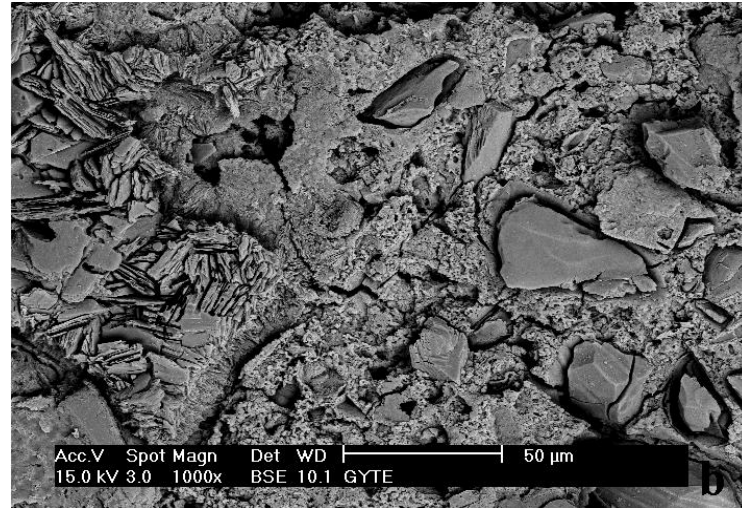
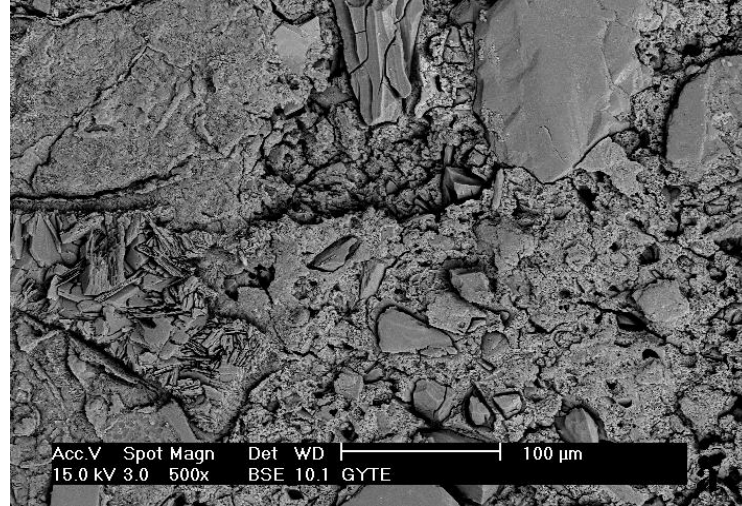


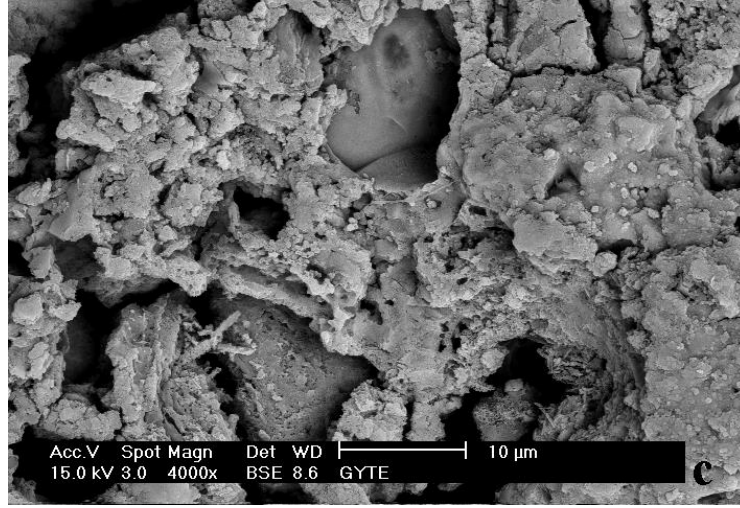
5.Bölge EDX analizi



Şekil 4.19 Katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranında EDX görüntüsü

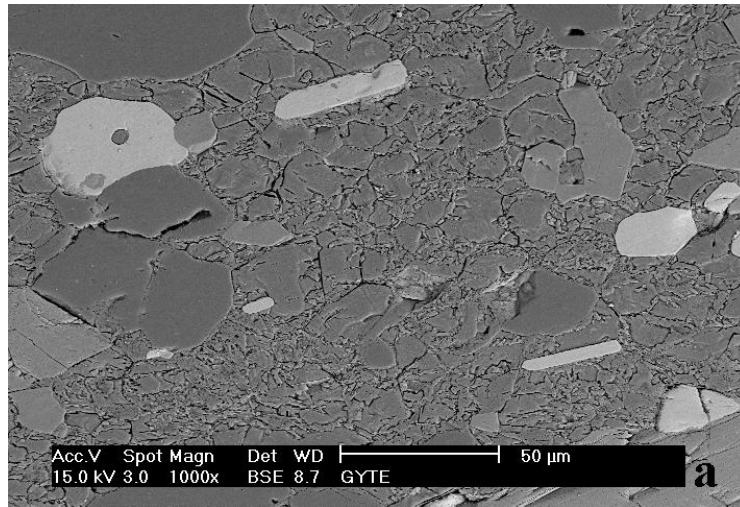
Şekil 4.19'daki katısız 28 gün kürlü numunenin 8000 büyütme oranındaki EDX görüntüsünde süngerimsi yapıya benzeyen fakat, daha sıkı paketlenmiş yapıyla bu yapıya gömülmüş tabakalı yapı olmak üzere iki ayrı faz yapısı görülmektedir. 1 numaralı bölgeden alınan EDX sonuçları o bölgenin tabakalı albit yapısında olduğu, diğer 2, 3, 4 ve 5 numaralı bölgelerden alınan EDX sonuçlarında ise o bölgelerde gismondine fazının yaygın olduğu tespit edilmiştir.

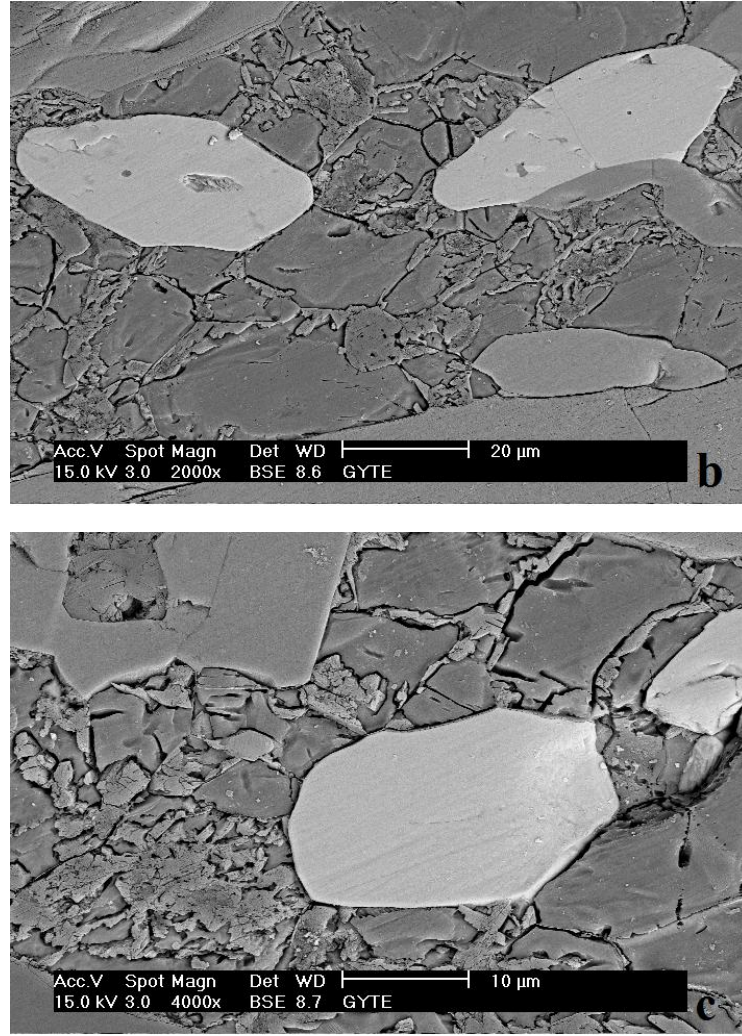




Şekil 4.20 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri

Yukarıdaki Şekil 4.20’de verilen %5 frit katkılı ve 28 gün kürlenmiş beton numunelerinden elde edilen SEM görüntülerinden a’da 100 µm ile 50 µm tane boyut aralığında farklı şekillerde parçacıklar ile onların arasında yayılmış şekilde bulunan yapı görülmektedir. Bu görüntüye 1000 büyütme oranında yaklaşılarak elde edilen b’deki görüntüde yaklaşık 50 µm tane boyutuna sahip köşeli yapı ile tabakalı yapı ve bu yapıların arasına yayılmış süngere benzeyen bir yapı belirgin şekilde seçilmektedir. Taneler arasına yayılmış süngere benzeyen yapıya 4000 büyütme oranı ile yaklaşılmış c’deki görüntüde ise sünger gibi olan yapının kendi içerisinde sıkı paketlenmiş fakat az da olsa boşluk içerdiği görülmektedir.

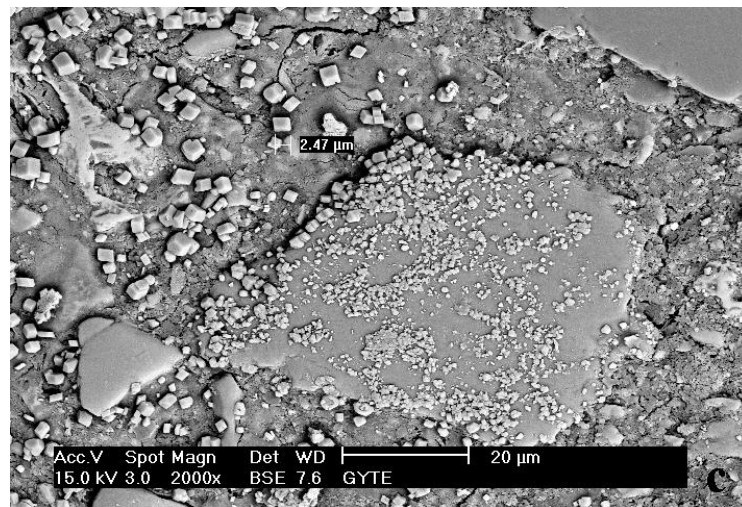
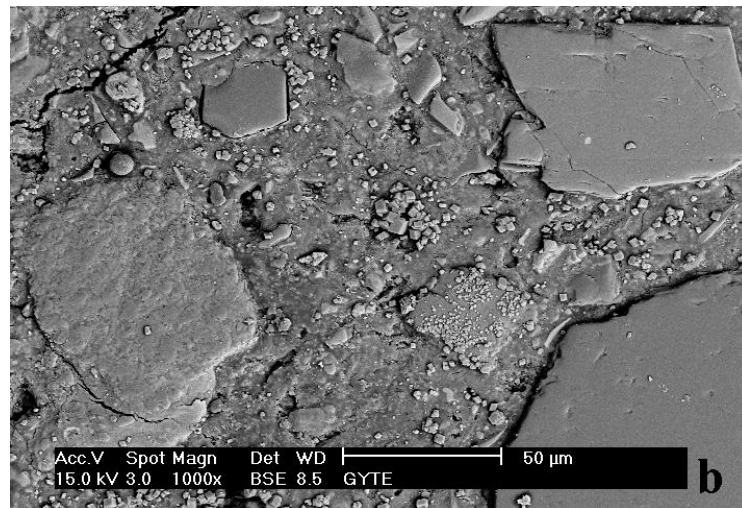
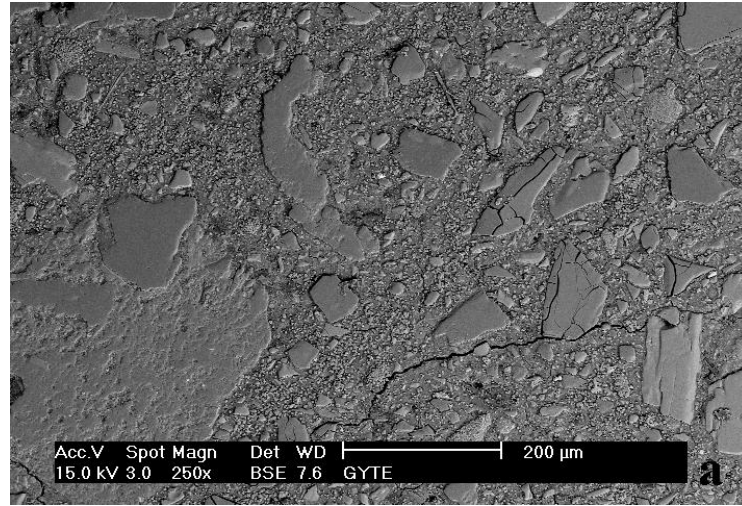


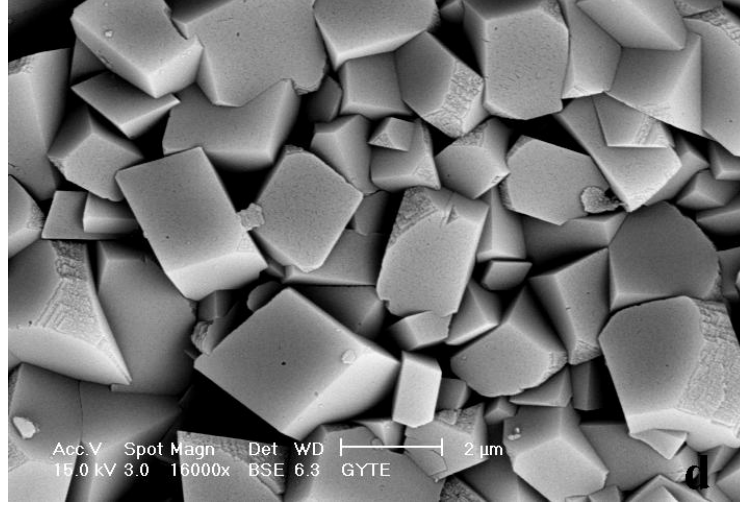


Şekil 4.21 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri

%5 frit katkılı ve 28 gün kürlenmiş şekilde hazırlanan beton numunelerinin farklı bir bölgesinden elde edilen ve Şekil 4.21 de a’da gösterilen 1000 büyütme oranındaki mikro yapı görüntüsünde ilk bakışta gerek kilden gerekse kullanılan diğer hammaddelerdeki safsızlıklar olan demir ve titanyum atom ağırlıklarının farklı olmasının neden olduğu kontrast farkı göze çarpmaktadır. Ayrıca yapının neredeyse boşluk içermeyecek şekilde sıkı paket olduğu, farklı tane boyutlarında irili ufaklı birçok tanenin arasına sıkışmış yapı ile kompakt halde bulunduğu görülmektedir. Kontrast farkının olduğu bölgelerden birinin 2000 büyütme oranında ki b’deki görüntüsünde, yaklaşık 20µm tane boyutuna sahip taneler ile bu taneler arasına yayılmış farklı bir faz yapısı görülmektedir. 4000 büyütme oranındaki c görüntüsünde ise tane yapısı biraz daha küçülmekte ve 10µm tane boyutuna sahip

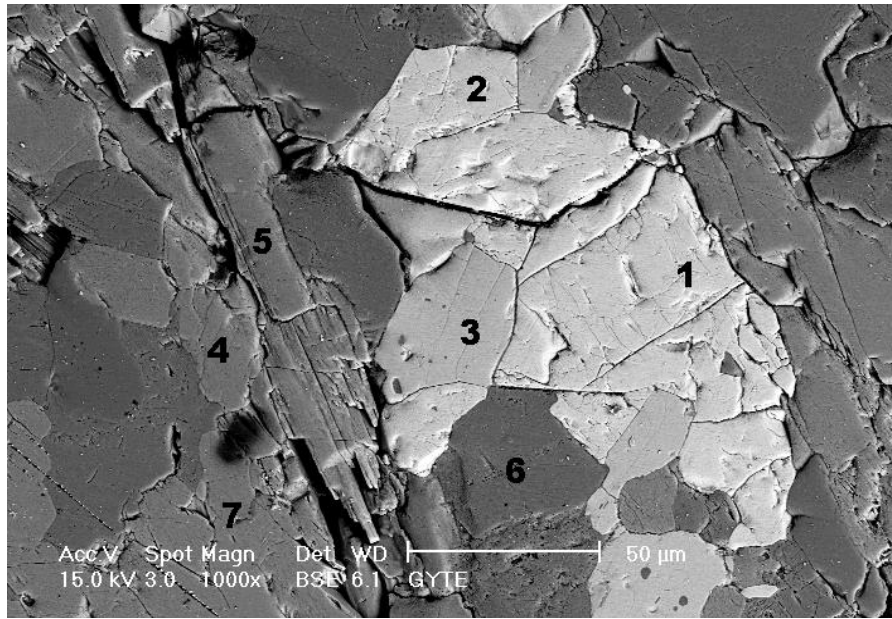
taneleri çevreleyen fazın bir köprü görevi görerek taneler arasına yayıldığı belirgin şekilde görülmektedir.





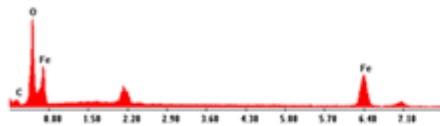
Şekil 4.22 28 gün kürlü %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütmelerde alınan mikro yapı görüntüleri

Yine aynı şekilde, %5 frit katkılı ve 28 gün kürlenmiş şekilde hazırlanan beton numunelerinin farklı bir bölgesinden elde edilen ve Şekil 4.22 a’da gösterilen 250 büyütme oranındaki görüntüde yapının neredeyse boşluk içermeyecek şekilde sıkı paket durumda olduğu, 200 μm ile 20 μm tane boyutlarında irili ufaklı birçok tanenin arasına sıkışmış yapı ile bütünleşmiş halde bulunduğu görülmektedir. Bu yapıya 1000 büyütme oranında yaklaşılacak b’görüntüsünde ise yaklaşık 50 μm tane boyutuna sahip parçacıklar arasına yayılmış halde bulunan faz üzerinde farklı bölgelerde kümelenmiş küçük beyaz renkte lekeler olduğu görülmektedir. Bu lekeler 2000 büyütme oranında yaklaşılacak c’deki SEM görüntüsünde ise lekelerin köşeli şekle sahip kübik kristaller olduğu görülmektedir. 16000 büyütme oranındaki d görüntüsünde kristallerin belirli bir geometride oldukları ve 2 μm tane boyutunda olduğu görülmektedir.

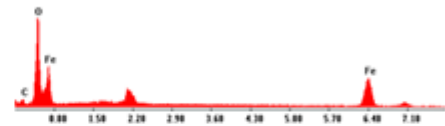


1.Bölge EDX analizi

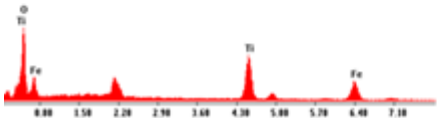
2. Bölge EDX analizi



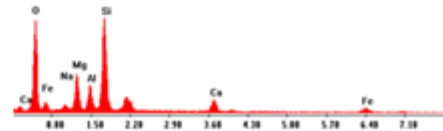
3.Bölge EDX analizi



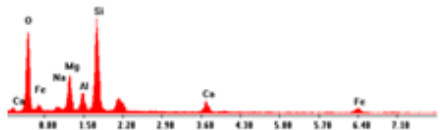
4.Bölge EDX analizi



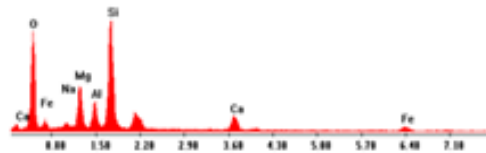
5.Bölge EDX analizi



6.Bölge EDX analizi

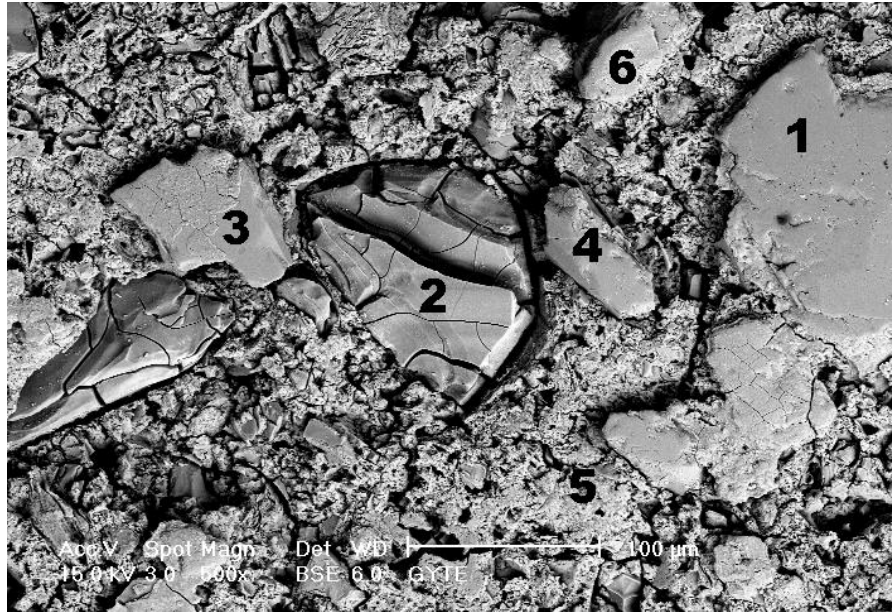


7.Bölge EDX analizi



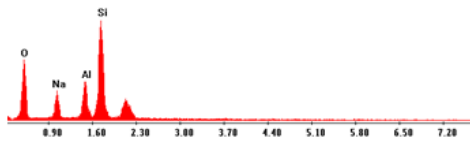
Şekil 4.23 %5 Frit katkılı 28 gün kürülü numunenin 1000 büyütme oranında EDX görüntüsü

Şekil 4.23'deki %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 1000 büyütme oranındaki EDX görüntüsünde 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerden alınan EDX sonuçları o bölgelerde kontrast farkına neden olan demir oksit ve titanyum oksit oluşumlarını, 4, 5 ve 7 numaralı bölgelerde edenit fazı ve 6 numaralı bölge de albit fazı tespit edilmiştir.

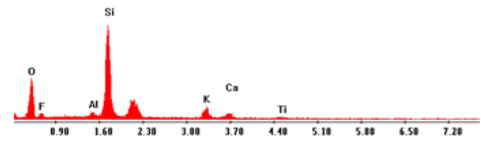


1. Bölge EDX analizi

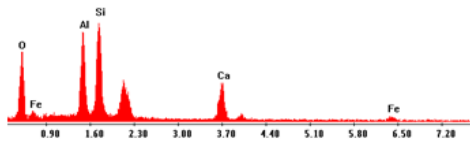
2. Bölge EDX analizi



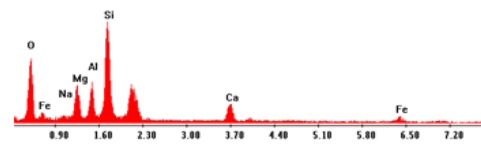
3. Bölge EDX analizi



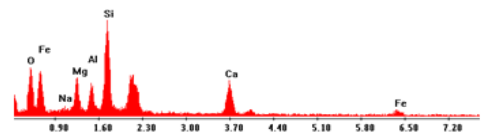
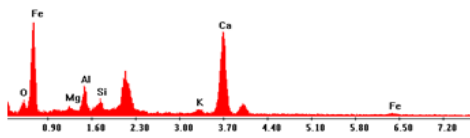
4. Bölge EDX analizi



5. Bölge EDX analizi

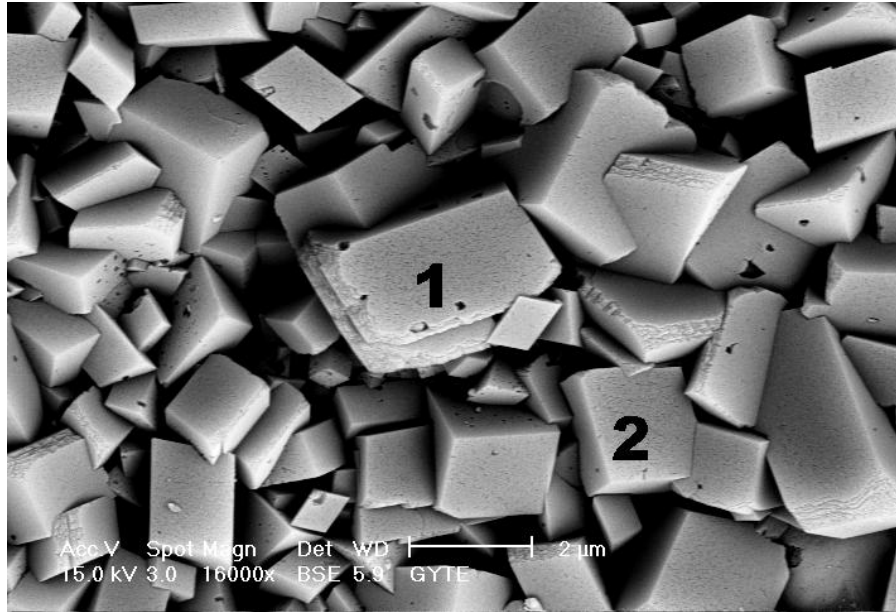


6. Bölge EDX analizi



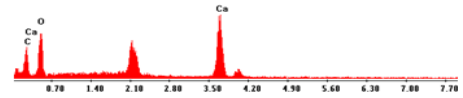
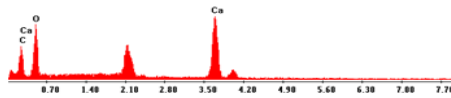
Şekil 4.24 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 500 büyütme oranında EDX görüntüsü

Şekil 4.24'deki %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 500 büyütme oranındaki görüntüsünde yaklaşık 100 μm tane boyutunda parçacıklar ile bu parçacıkları içerisine alan süngerimsi yapının 5 bölgesinde yapılan EDX analizlerine göre 1 numaralı bölgesinde albit, 2 ve 3 numaralı bölgelerinde gismondine, 4, 5 ve 6 numaralı bölgelerinde ise edenit fazı tespit edilmiştir.



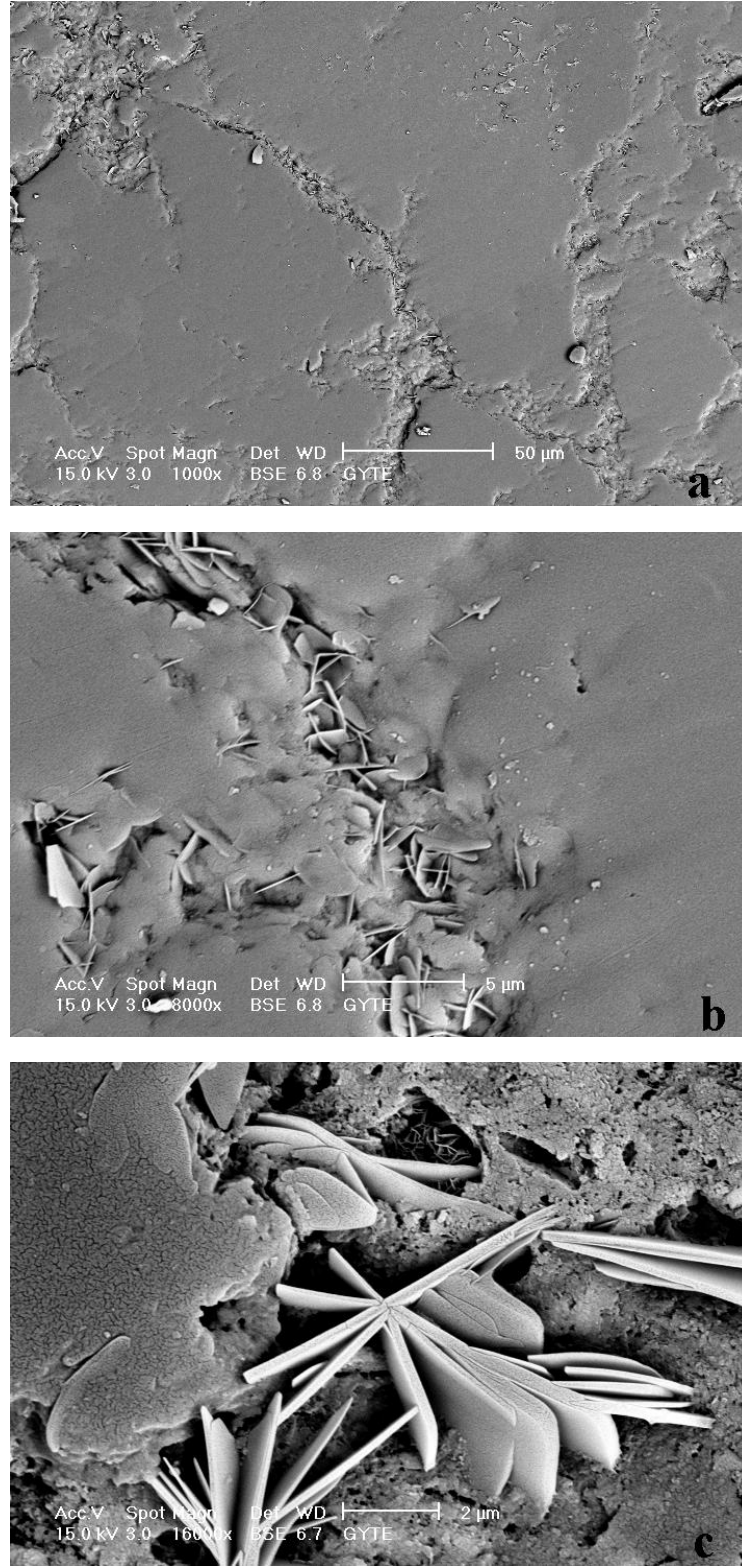
1.Bölge EDX analizi

2.Bölge EDX analizi



Şekil 4.25 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 16000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü

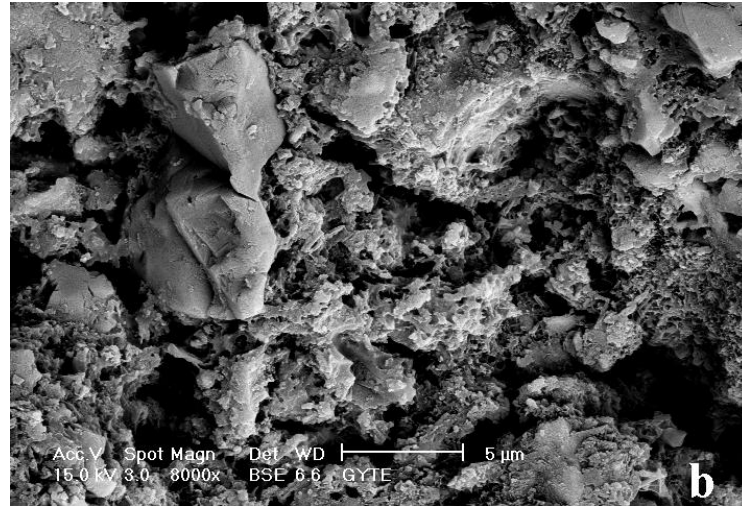
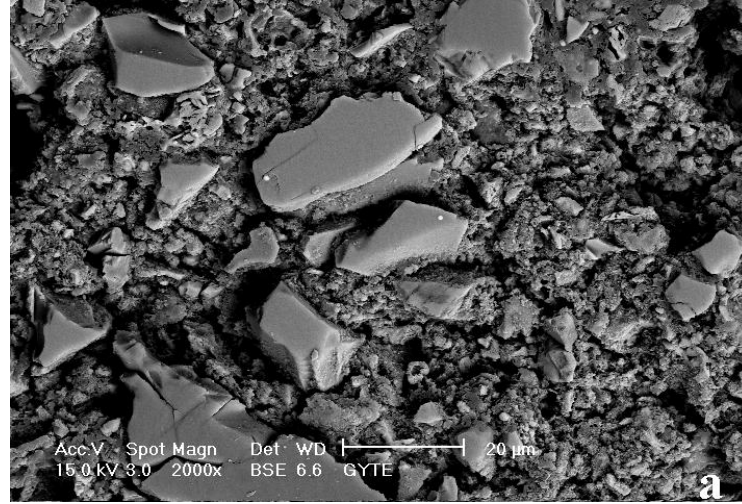
Şekil 4.25'deki %5 Frit katkılı 28 gün kürlü numunenin 16000 büyütme oranındaki görüntüsünde, farklı tane boyutlarındaki geometrik şekillerin 1 ve 2 numaralı bölgelerindeki EDX analizi sonucunda kalsiyum karbonat olduğu tespit edilmiştir.

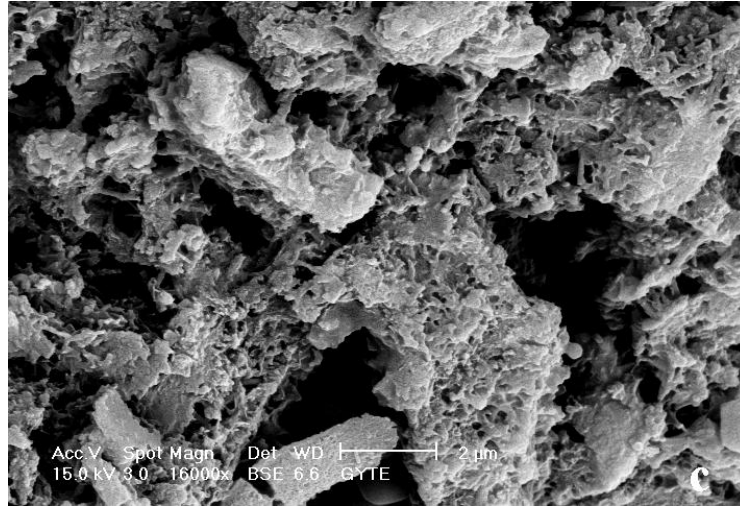


Şekil 4.26 28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütme oranında alınan mikro yapı görüntüleri

28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numuneden alınan ve Şekil 4.26.a’da verilen 1000 büyütme oranındaki görüntüsünde 50 µm tane boyutunda yayılmış fazı bir vadi

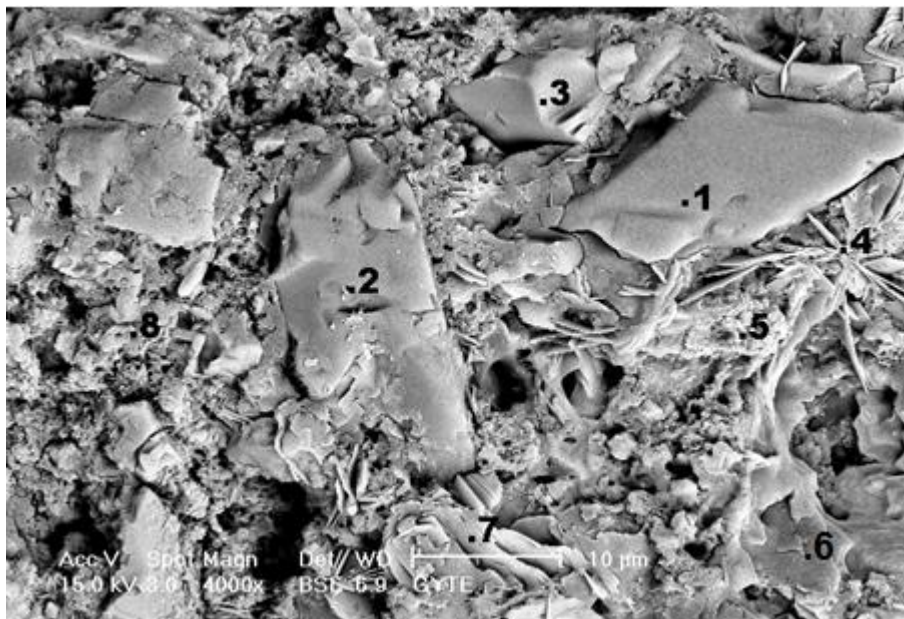
şeklinde ayıran farklı yapıda faz bütünleşik halde görülmektedir. Bu görüntüde bir vadiyi andıran kısımlara 8000 büyütme oranında yaklaşılan b görüntüsünde kütle halinde bulunan fazın örtülediği yaprak şeklinde fazın varlığı görülmektedir. Bu yaprak şeklindeki faza 16000 büyütme oranında yaklaşılmış c görüntüsünde bir merkez etrafında yapraklanmış çiçek görüntüsüne sahip faz ve bu fazı örten süngerimsi yapı görülmektedir.

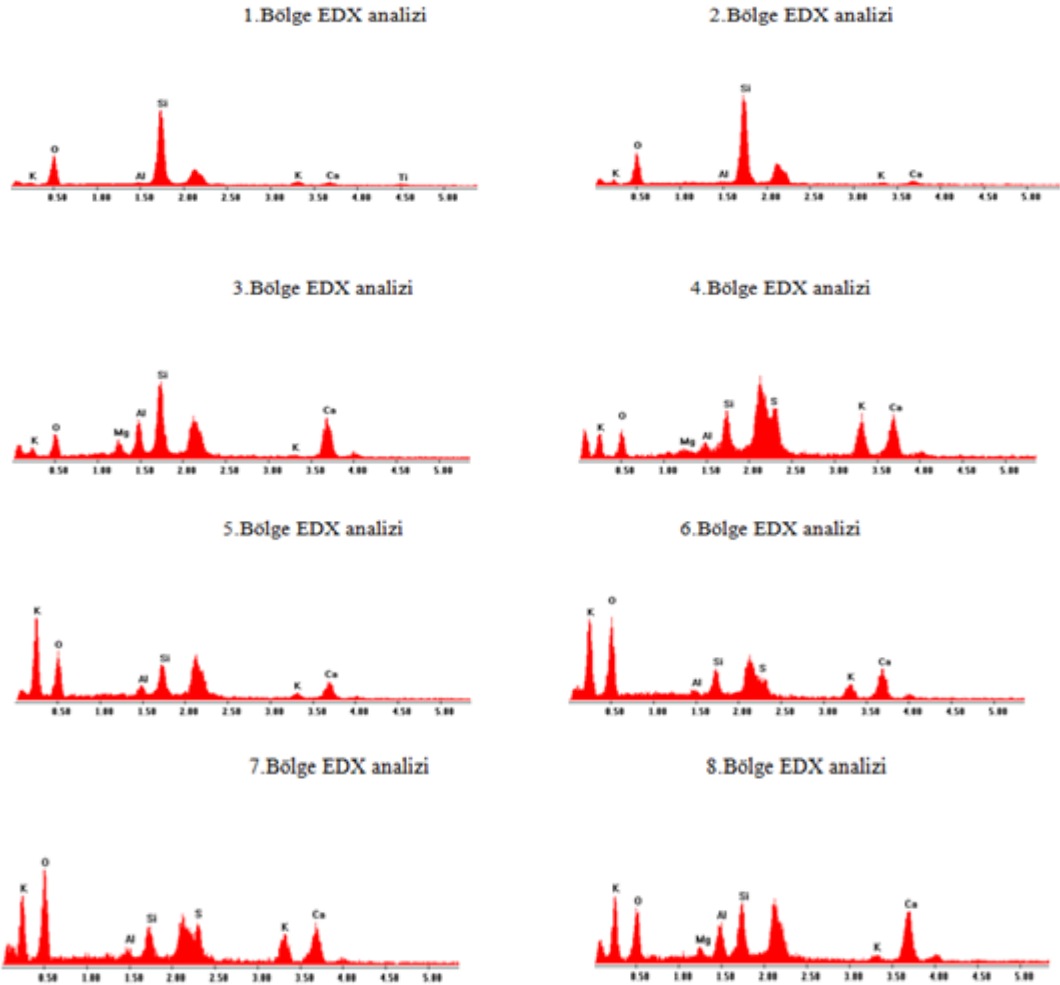




Şekil 4.27 28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numunenin SEM’de değişik büyütme oranlarında alınan mikro yapı görüntüleri

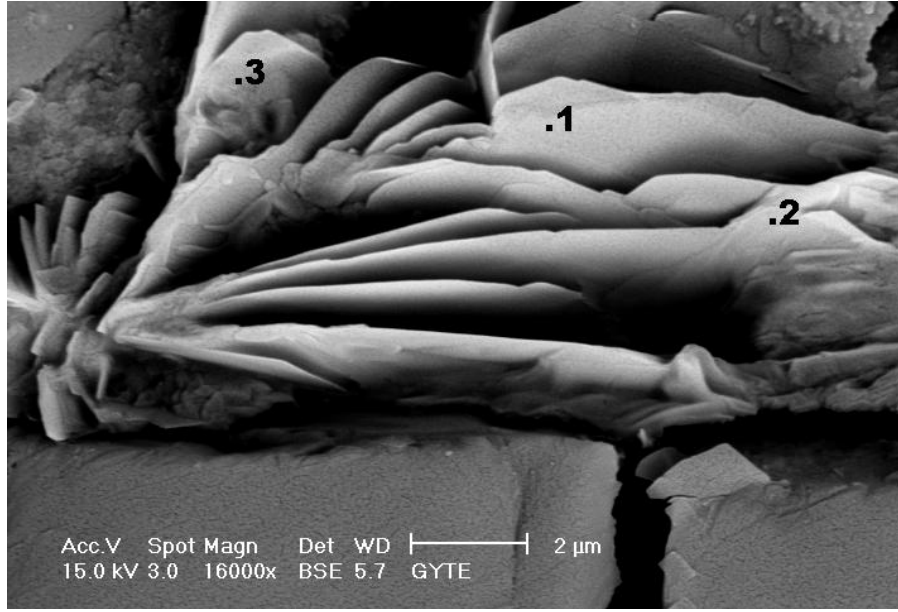
Şekil 4.27.a’da 28 gün kürsüz %5 Frit katkılı numunenin bir başka bölgesinden elde edilen 2000 büyütme oranındaki görüntüde yaklaşık 20 µm tane boyutunda parçacıklar ile bu parçacıklar arasında büyük boşluklar içeren yapı görülmektedir. Bu görüntüye 8000 büyütme oranlarında yaklaşıldığında büyük boşluklar içeren yapının süngerimsi yapıya sahip olduğu ve birçok boşluk içerdiği görülmektedir. 16000 büyütme oranında yaklaşılan c görüntüsünde ise sünger gibi olan yapının kendi içerisinde boşluklu yapısı ve yapı arasındaki gözenekler belirgin şekilde görülmektedir.





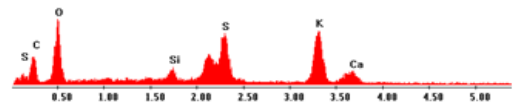
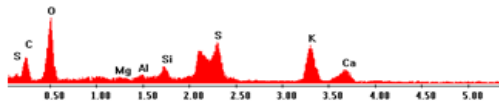
Şekil 4.28 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin 4000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü

%5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin Şekil 4.28’de verilen EDX görüntüsünde süngerimsi yapı üzerinde köşeli yapıya sahip parçalar ile çiçek yapısına benzer tabakalı yapıda parçacıklar bir arada görülmektedir. Yapının 7 bölgesinde yapılan EDX analizlerinde 1 ve 2 numaralı bölgede silika, 3-4-5-6-7 ve 8 numaralı.bölgelerde gismondine fazı tespit edilmiştir.

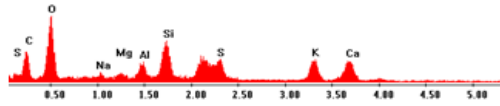


1.Bölge EDX analizi

2.Bölge EDX analizi



3.Bölge EDX analizi

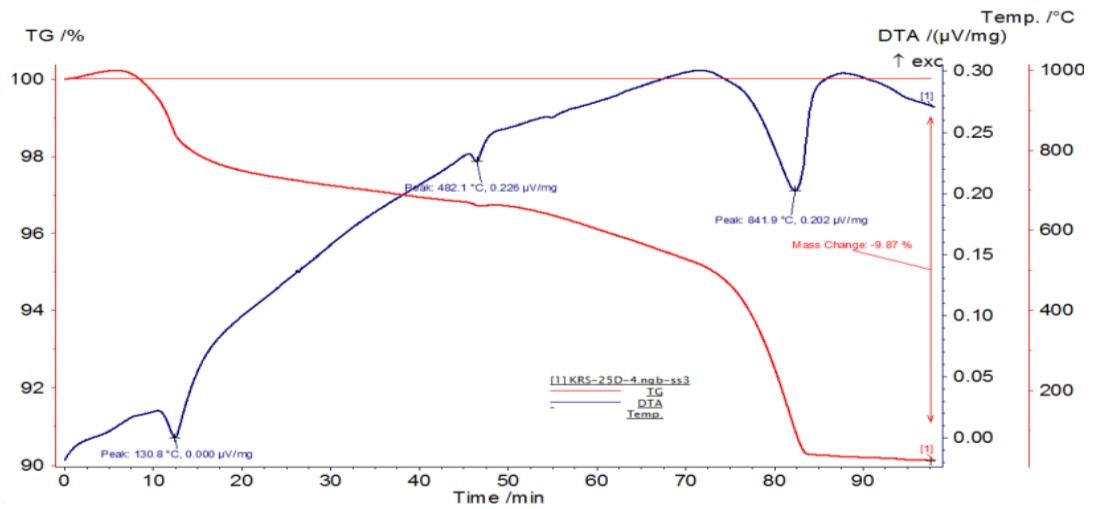


Şekil 4.29 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin 16000 büyütme oranındaki EDX görüntüsü

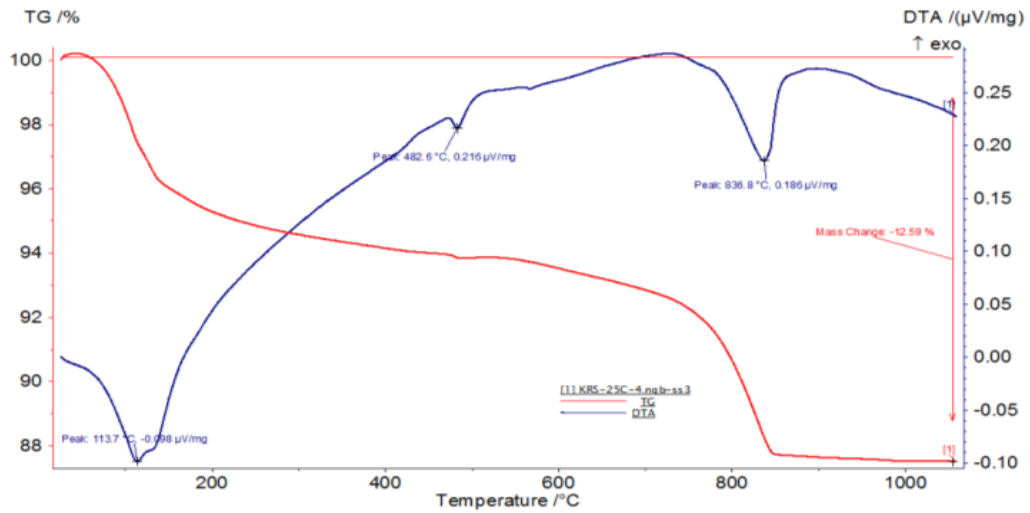
%5 Frit katkılı 28 gün kürsüz numunenin Şekil 4.29'daki EDX görüntüsündeki tabakalı yapıların 16000 büyütme oranındaki görüntüsünde 1 ve 3 numaralı bölgelerde gismondine, 2 numaralı bölgede silika tanesi tespit edilmiştir.

4.5.DTA/TG Analiz Sonuçları

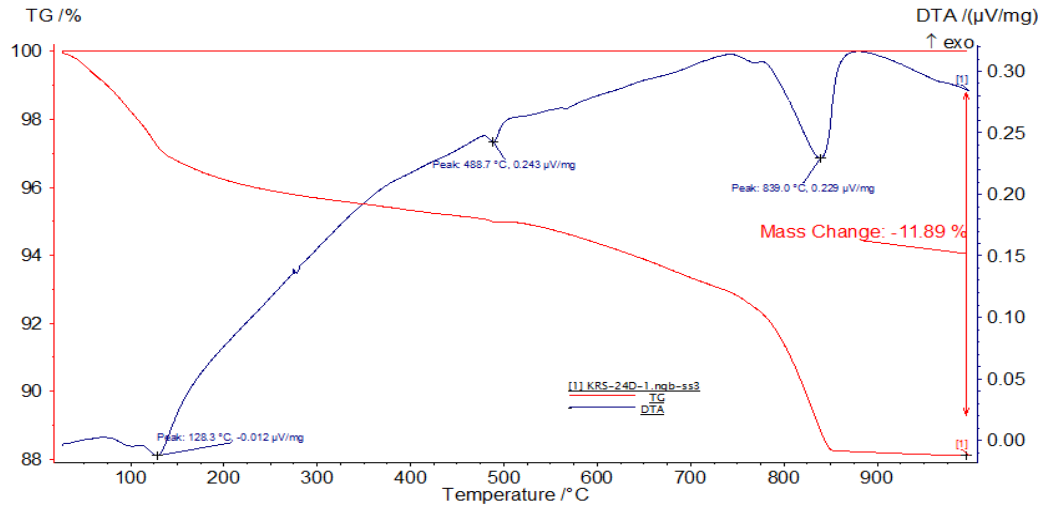
Katkısız ve %5 frit katkılı 14 gün kürlü-kürsüz beton numuneleri ile %5 frit katkılı 14 ve 28 gün kürlü-kürsüz beton numunelerinin sıcaklığa bağlı davranışı DTA/TG yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.30 ile 4.35 arasında verilmiştir.



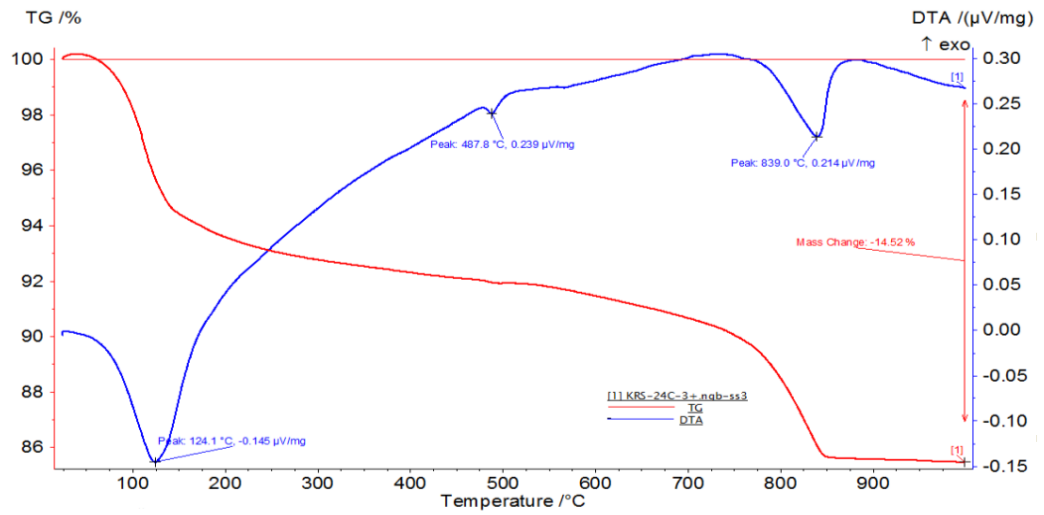
Şekil 4.30 Katkısız 14 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



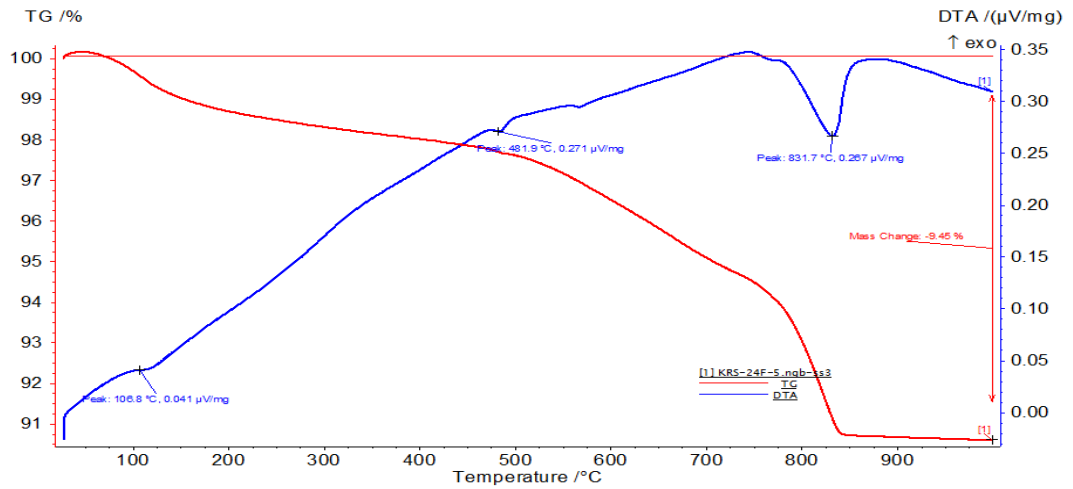
Şekil 4.31 Katkısız 14 gün kürlü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



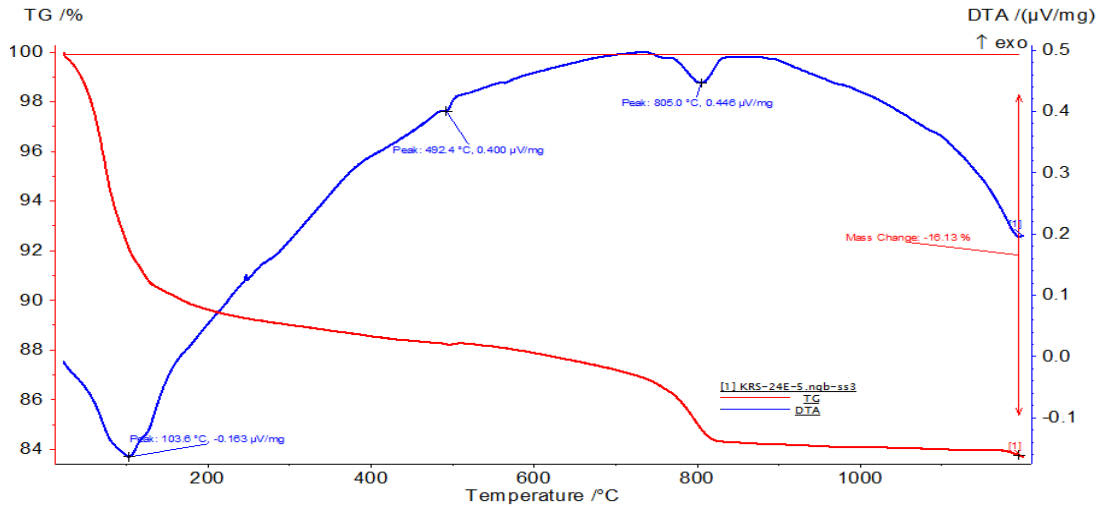
Şekil 4.32 %5 Frit katkılı 14 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



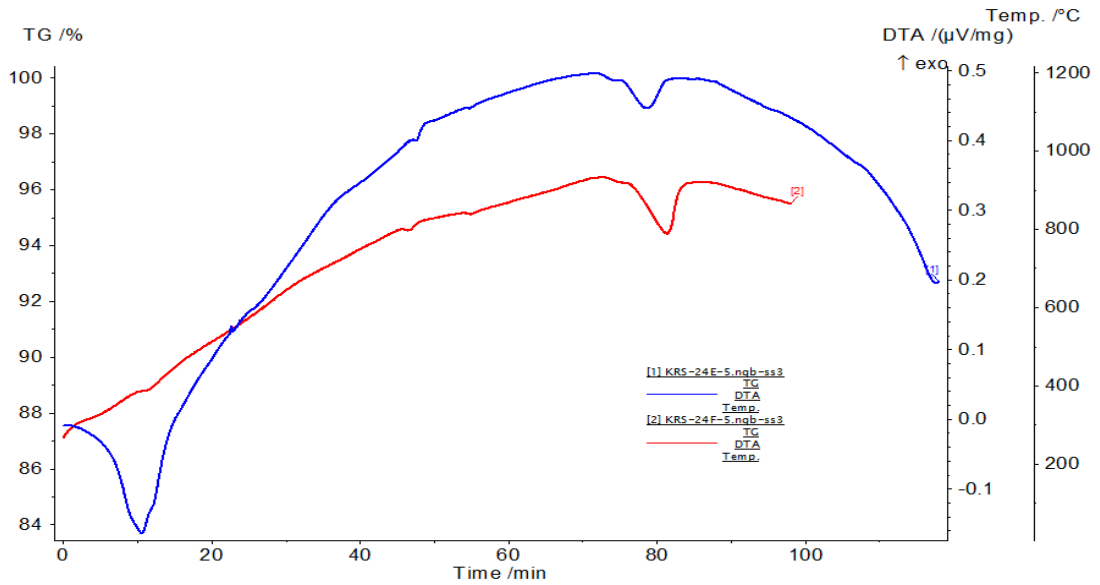
Şekil 4.33 %5 Frit katkılı 14 gün kürü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



Şekil 4.34 %5 Frit katkılı 28 gün kürsüz beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



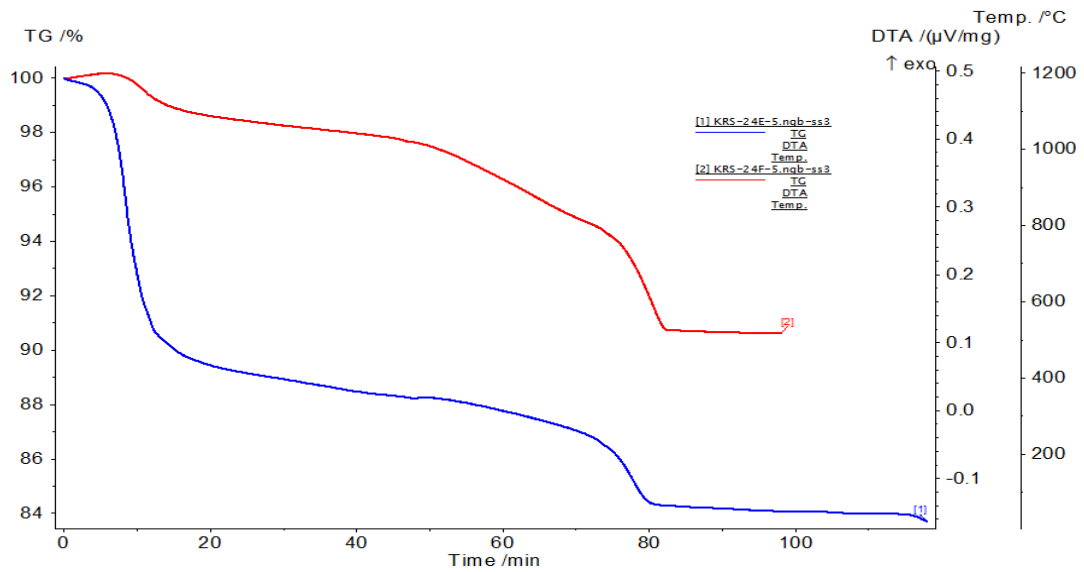
Şekil 4.35 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü beton numunesinin DTA/TG analiz sonucu



Şekil 4.36 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü-kürsüz beton numunelerinin DTA analiz sonucu

Şekil 4.30 ile Şekil 4.35 arasında verilen DTA/TG grafikleri incelendiğinde hepsinin yaklaşık olarak aynı sıcaklıklarda benzer ısıl davranış sergilemelerinden dolayı ortak karakterde oldukları görülmüştür. Bunun sonucu olarak Şekil 4.36'daki DTA grafikleri üzerinden ortak karakteri ifade etmek için odaklanıldığında, üç adet endotermik reaksiyon piki tespit edilmiştir. Birinci endotermik reaksiyon piki 100-150°C sıcaklıkları arasında, ikinci endotermik reaksiyon piki 450-500°C sıcaklıkları arasında ve üçüncü endotermik reaksiyon piki ise 800-850°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir. 100-150°C sıcaklıkları arasında hammaddelerin içerisinde

bulunan az miktardaki serbest suyun yada bünyenin atmosferdeki nemi absorblaması ile oluşan fiziksel suyun buharlaşmasıyla gerçekleştiği, 450-500°C sıcaklıkları arasında hidratasyon reaksiyonları ile oluşan ve yapının mukavemet kazanmasını sağlayan gismondin ve edenit fazlarının oluşum reaksiyonları sırasında ve son olarak da 800-850°C sıcaklıkları arasında gerçekleşen endotermik reaksiyon pikinin ise yapıdaki kalsiyum karbonatın parçalanma reaksiyonu ile gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 4.37 %5 Frit katkılı 28 gün kürlü-kürsüz beton numunelerinin TG analiz sonucu

Şekil 4.37'deki TG grafikleri üzerinden ortak karakteri ifade etmek için odaklanıldığında ise, DTA grafiklerindeki birinci ve üçüncü endotermik reaksiyon pikleriyle örtüşen iki aşamalı ağırlık kaybının olduğu görülmektedir. Birinci aşamada, beton karışımının hazırlanmasında kullanılan suyun tamamen uzaklaşmadan bir miktar kalması yapıda nemlilik oluşturmakta ve bünyede farklı oranlarda ağırlık kayıplarına sebep olmaktadır. Şekil 4.30 ile Şekil 4.33 arasındaki grafikler incelendiğinde 14 günlük sürede yapı nemden tamamen arındırılmamaktadır. Katkısız kürsüz numunede nem oranı %2 iken %5 frit katkılı kürsüz numunede ise oran %3 ve 28 gün sonrasında ise oran %1'dir. Kürlü numunelerde ise, numunelere suda kür uygulanması ile suyun iyice yapıya dahil olması ve OH iyonu olarak yapıda hapis olan nemin miktarının artması veya bir başka ifade ile fiziksel olarak absorblanan suyun artması, sonrasında buharlaşma

oranı katkısız kürlü numunede %4, %5 frit katkılı kürlü numunede ise %6 olarak göstermektedir. Şekil 4.37'deki grafik incelendiğinde 28 günlük sürede ise kürlü numunelerde bu oran %10'a çıkmaktadır. İkinci aşamada Şekil 4.37'deki grafik incelendiğinde ise, DTA grafiklerinde görülen üçüncü endotermik pikin altında kalan alan değişimini yapıdaki kalsiyum karbonatın parçalanma reaksiyonu ile ilişkilendirdiğimizde, kürsüz numunede bu oranın sürekli arttığı ve buna bağlı olarak ağırlık kaybı oranının da arttığı görülmektedir. Kürlü numunede ise üçüncü endotermik pikin altında kalan alan değişiminden yapıda çok fazla miktarda kalsiyum karbonatın olduğunu söyleyebiliriz.

5.TARTIŞMA

Çimentoyu oluşturan klinker bileşikleri su ile reaksiyona girerek çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana getirmekte ve bu reaksiyonlar hidrotasyon reaksiyonları olarak adlandırılmaktadır. Çimentonun su içinde yavaş olarak çözünmesi ve çözünmenin katı partikül yüzeylerinde yürümesi ile devam eden reaksiyonlar sırasında çözünen bileşikler hemen hidrate olarak partikül yüzeyini jel halinde kaplar. Bu sayede henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Diğer taraftan çözeltiye geçmiş olan klinker bileşikleri çözelti içinde doymun hale gelerek çözünme hızının yavaşlamasına yol açar. Bu doymun hidratlaşmış bileşikler katı tanecikler üzerine çökerir. Bu çökme ile çimento partikülleri yüzeyinde ince bir tabaka oluşur. Çökme sonucu çözeltinin doymunluğu kaybolur. Çözeltinin tekrar doymun hal almasıyla yeni bir çökme olayı gerçekleşir. Birbirini izleyen çözünme ve çökme olaylarının devam etmesiyle oluşan hidrate bileşikler katı taneleri köprü şeklinde birbirine bağlayarak çimento hamurunun plastiklik özelliğinde azalma meydana getirir. Bu şekilde çimentonun prizi başlamış olur.

Jel oluşma mekanizması ile ilerleyen, prizin başlaması ile birlikte oluşan jel tabakası tanecikler arasında ilk bağlanmayı sağlar ve sonrasında taneciklerin iç

bölgesinde bulunan ve henüz hidratlaşmamış olan kısımlar yüzeydeki jelin suyunu çeker ve böylece sertleşme olayı meydana gelir.

Bizim yaptığımız çalışmada hidratasyon ürünlerinin oluşmasını sağlayan kullandığımız çimentonun kompoze çimento olması yani, bileşiminde yüksek fırın cürufu ve volkanik tuf (tras), uçucu kül gibi puzolanları içeren çimento tipi olması nedeni ile puzolanik etkileri yüksektir. Dolayısıyla bizim çalışmamızda elde ettiğimiz hidratasyon ürünlerinin çimento hamurunun dayanım kazanma mekanizmasına etkilerini, portland puzolan çimentosunun dayanım kazanma mekanizmasından yola çıkarak açıklamamız uygun olacaktır.

Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların üretiminde kullanılan klinker miktarı, portland çimentosunun üretiminde kullanılan klinker miktarından daha azdır. Bu nedenle, puzolan veya cüruf katkılı çimentoların yapısında bulunan C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ana bileşenlerinin miktarı portland çimentosunda yer alan miktardan daha azdır. Dolayısıyla, puzolan veya cüruf katkılı çimentolar su ile birleştiğinde C-S-H jeli üretimi portland çimentosuna kıyasla daha az ve daha düşük hızda gerçekleşmektedir. Puzolan veya cüruf lu çimentoların dayanım kazanmaları ilk günlerde daha yavaştır. Ancak klinkerden gelen kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin, özellikle C_3S 'in hidratasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit, puzolan veya cüruf katkılı çimentolardaki puzolan veya cüruf la reaksiyona girerek yeni C-S-H jellerinin oluşumunu sağlamaktadır. Bu tür çimentoların hidratasyonu ile ilerleyen haftalarda daha çok C-S-H jeli ortaya çıkmakta ve ilk zamanlardaki düşük dayanım kaybolmaktadır.

Bizim yaptığımız çalışmada ise gerek kullandığımız çimento tipi gerekse kullandığımız kumun içerdiği safsızlıklar ve kullandığımız frit katkısının etkisiyle çimentonun hidrasyonu sırasında oluşan hidrate bileşikler, yukarıda anlatılan portland çimentosunun hidrate ürünlerinden farklı olarak gismondine ve edenit'dir.

Puzolan katkılı betonların basınç mukavemetleri ilk zamanlarda daha düşük, fakat ileriki zamanlarda puzolanın cinsine ve miktarına bağılı olarak yüksek değerlerde olabilir. %10-15 frit içerikli beton numunelerinin basma mukavemeti testinden elde ettiğimiz %10-15 frit içeren kürlü numunelerin mukavemet-kürleme süresi grafiğinde mukavemet değerlerinin 56 güne kadar artması ve 56 günde en yüksek değere ulaşması; %5 frit katkılı kürlü numunelerde ise en yüksek mukavemet değerinin 28 gün de elde edilmesinin aksine, artan % frit miktarı ile puzolanik malzemelerde görüldüğü gibi uzun vadede yüksek mukavemet değeri elde edilmektedir. Puzolanların bu etkisi ince bir dolgu maddesi olmalarından ve puzolanik etki sonucu serbest kireci bağlayarak çimento hamurunun boşluklu yapısını değiştirmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. M. Pattengil, T.C. Shutt, T.C; Use of ground glass as a pozzolan. Albuquerque Symp. on Utilisation of Waste Glass in Secondary Products. Albuquerque, (1973), pp. 137–153, Jan. 24–25.
- [2]. J.W. Figg; Reaction between cement and artificial glass in concrete. Proc. 5th Int. Conf. on AAR in concrete, (1981), paper S252/7.]
- [3]. Caijun Shi , Keren Zheng; A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling 52 (2007) 234–247.
- [4]. Shao,Thibaut Lefort, Shylesh Moras, Damian Rodriguez Yixin; Studies on concrete containing ground waste glass, (1999), Cement and Concrete Research 30 (2000) 91–100.
- [5]. Ahmad Shayan, Aimin Xu; Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. (2005), Cement and Concrete Research 36 (2006) 457–468.
- [6]. A. Karamberi, E. Chaniotakis, D. Papageorgiou and A. Moutsatsou; Influence of glass cullet in cement pastes, CHINA PARTICUOLOGY Vol. 4, No. 5, 234–237, 2006.
- [7]. Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products, Ömer Özkan, İsa Yüksel, Construction and Building Materials 22 (2008) 1288–1298.
- [8]. Bashar Taha, Ghassan Nounu, Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement, Bashar Taha, Ghassan Nounu, Construction and Building Materials 22 (2008) 713–720.].
- [9]. Nathan Schwarz, Hieu Cam, Narayanan Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash Department of Civil and Environmental Engineering. United States, Cement & Concrete Composites 30 (2008) 486–496.
- [10]. Tzen Chin Lee, Wei-Jer Wang, Ping-Yu Shih, Slag–cement mortar made with cement and slag vitrified from MSWI fly-ash/scrubber-ash and glass frit. Construction and Building Materials 22 (2008) 1914–1921.

- [11].Tzen-Chin Lee, Zong-Syun Li; Conditioned MSWI ash-slag-mix as a replacement for cement in cement mortar. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 970–979.
- [12].Tzen-Chin Lee; Recycling of municipal incinerator fly-ash slag and semiconductor waste sludge as admixtures in cement mortar. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3305–3311.
- [13].Tzen-Chin Lee, Chieh-Jen Chang, Ming-Kang Rao, Xun-Wei Su, Modified MSWI ash-mix slag for use in cement concrete. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1513–1520.
- [14]. Monica Ferraris a, Milena Salvo, Andrea Ventrella, Luigi Buzzi, Massimo Veglia; Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production. *Waste Management* 29 (2009) 1041–1047.
- [15]. A. Shayan, A. Xu; Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research* 34 (1) (2004) 81–89.
- [16]. Tzen-Chin Lee, Ming-Kang Rao; Recycling municipal incinerator fly- and scrubber-ash into fused slag for the substantial replacement of cement in cement-mortars. *Waste Management* 29 (2009) 1952–1959.
- [17]. İlker Bekir Topcu, Mehmet Canbaz; Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 267–274.
- [18]. Zainab Z. Ismail, Enas A. AL-Hashmi; Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management* 29 (2009) 655–659.
- [19]. Seung Bum Park, Bong Chun Lee, Jeong Hwan Kim; Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 2181–2189.
- [20]. Konstantin Sobolev, Pelin Türker, Svetlana Soboleva, Günsel Iscioglu; Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. *Waste Management* 27 (2007) 971–976.
- [21]. Ahmad Shayan, Aimin Xu; Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 81–89.
- [22]. Turhan Y. ERDOĞAN, ‘BETON’, ODTÜ Yayıncılık; Mart 2010, syf. 11-204, 353-516.
- [23]. Prof.Dr. HAYRİ YALÇIN- Prof.Dr. Metin GÜRÜ, ‘ÇİMENTO ve BETON’, PALME Yayıncılık, 2006, syf. 15-155.

- [24]. Physical Ceramics, syf.332.
- [25]. T.Y. Erdoğan, 1995, Türkiye’de üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları. Çimento sempozyumu, TMMOB inşaat ve kimya mühendisleri odası, Ankara, syf. 67-80.
- [26]. B. Özdemir, ‘Çimento Teknolojisi’, Türkiye Çimento Sanayi T.A.S.
- [27]. Yrd.Doç.Dr. osman ŞİMŞEK, ‘Beton ve Beton Teknolojisi’, Seçkin yayıncılık, Mayıs 2009, syf.21-194.
- [28]. TS EN 206-1, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Bartın’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bartın’da tamamladı. 2004 yılında Dumlupınar Üniversitesi Seramik Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başladı. 2008 yılında mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitime başladı. 2011 yılında mezun oldu.