

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ TÜKETİMİ VE EMİSYONLARIN DÜŞÜRÜLMESİ AMACIYLA
ÇİMENTO ÜRETİMİNDE MİNERAL KATKILARIN KULLANIMININ
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melis TOKER

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ TÜKETİMİ VE EMİSYONLARIN DÜŞÜRÜLMESİ AMACIYLA
ÇİMENTO ÜRETİMİNDE MİNERAL KATKILARIN KULLANIMININ
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melis TOKER
(505091019)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan ERGİN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505091019 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Melis TOKER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ENERJİ TÜKETİMİ VE EMİSYONLARIN DÜŞÜRÜLMESİ AMACIYLA ÇİMENTO ÜRETİMİNDE MİNERAL KATKILARIN KULLANIMININ OPTİMİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan iüri önünde basarı ile sunmustur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hasan ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN**
İstanbul Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ömür ACAROĞLU ERGÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **3 Haziran 2013**

ÖNSÖZ

Tez çalışmamam sırasında önemli katkılarda bulunan değerli bölüm başkanımız Prof.Dr.Orhan KURAL'a ve tez çalışmamı yapmamda yardımcı olan, çalışmanın her aşamasında yardımını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Hasan ERGİN'e,

Nuh Çimento A.Ş.'deki laboratuvar çalışmalarımın yapılmasına olanak veren Nuh Çimento A.Ş. yetkililerine ve Kalite, Çevre ve Ar-Ge Müdürü Sayın Oğuz AYDİNÇ'e, deneylerin yapılması sırasında tüm analizlerde yardımcı olan ve yol gösteren Laboratuvar Şefi Eren DEMİRAL'a, Proses Şefi Yücel UZMAN'a, Laboratuvar Teknikeri Naci BEKAR başta olmak üzere tüm laboratuvar çalışanlarına,

Çalışmamı 'İz Bırakanlar' bursu çerçevesinde destekleyen, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne,

Tüm çalışmam ve hayatım boyunca bana güvenen ve yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2013

Melis Toker
Maden Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. ÇİMENTO TANIMI VE ÜRETİMİNDE KULLANILAN MİNERAL KATKILAR	3
2.1 Çimentonun Tanımı ve Tarihçesi	3
2.2 Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar	8
2.2.1 Pozolanik Maddeler	11
2.2.2 Silis Dumanı.....	19
2.2.3 Kalker.....	20
3. KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	21
3.1 Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu Amacıyla Yapılan Deneyler.....	21
3.1.1 Çimentonların Fiziksel ve Mekanik Analizleri	21
3.1.1.1 Standart kıvam, priz süresi ve genleşme tayini	23
3.1.1.2 Dayanım tayini	29
3.1.1.3 İncelik tayini.....	32
3.1.2 Çimentoların Kimyasal Analizleri	34
3.1.2.1 X-Işını Floresanas (XRF)	34
3.1.2.2 Radyoetkin Yöntemle Çevrimiçi (Sürekli) Elementel Analiz.....	35
3.1.2.3 Mineralojik Analiz	35
3.1.2.4 Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM)	36
3.1.3 Seramik Atıkların Öğünelirlikleri	36
3.2 Kullanılan Malzemeler	42
3.2.1 Çimento	43
3.2.2 Standart kum ve su	44
3.2.3 Seramik atıkları	45
3.2.4 Pozolanlar ve Kalker	46
3.3 Kullanılan Malzemelerin Katkılı Çimentoda Kullanım İmkanlarının Araştırılması	52
3.3.1 Duvar karosu kırığı katkılı çimentolar	52
3.3.2 Yer karosu kırığı katkılı çimentolar	56
3.3.3 Granit kırığı katkılı çimentolar	59
3.3.4 Zeolit katkılı çimentolar	62
3.3.5 Yüksek fırın cürufu ile yer karosu kırığı katkılı çimento.....	67
3.3.6 Uçucu kül ile yer karosu kırığı katkılı çimento.....	69

3.3.7 Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ile yer karosu kırığı katkılı çimentolar	72
3.3.8 Zeolit – 2 ile yer karosu kırığı katkılı çimento.....	75
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	89

KISALTMALAR

A	: Çimentonun en az mineral katkı içeren tipi
B	: Çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi
C	: Çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi
CEM I	: Portland çimento
CEM II	: Portland – kompoze çimento
CEM III	: Portland – yüksek fırın cürufu çimento
CEM IV	: Puzolanik çimento
CEM V	: Kompoze çimento
CEN	: Rilem – Cembureau Standart Kumu
D	: Silis dumanı
D5	: % 5 duvar karosu kırığı katkılı çimento
D10	: % 10 duvar karosu kırığı katkılı çimento
D15	: % 15 duvar karosu kırığı katkılı çimento
G5	: % 5 granit kırığı katkılı çimento
G10	: % 10 granit kırığı katkılı çimento
G15	: % 15 granit kırığı katkılı çimento
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
K	: Kontrol çimentosu
L	: Kalker (Toplam organik karbonu en fazla % 0,5)
LL	: Kalker (Toplam organik karbonu en fazla % 0,2)
LSF	: Kireç doygunluk faktörü
M	: Mineral katkılardan ikisi ya da daha çoğu
N	: Normal erken dayanım sınıfı
P	: Doğal puzolan
Q	: Yapay puzolan
R	: Yüksek erken dayanım sınıfı
S	: Yüksek fırın cürufu
SDÇ	: Sülfata dayanıklı çimento
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
T	: Pişmiş şist
TS EN	: Türk Standartı European Norm
V	: Silisli uçucu kül
W	: Kalkersi uçucu kül
WBCSD	: Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi
XRD	: X – Işını Kırınımı
XRF	: X – Işını Floresans
Y5	: % 5 yer karosu kırığı katkılı çimento
Y10	: % 10 yer karosu kırığı katkılı çimento
Y15	: % 15 yer karosu kırığı katkılı çimento
Y5C5U5	: % 5 yer karosu kırığı, % 5 yüksek fırın cürufu ile % 5 uçucu kül katkılı çimento
Y5C10U10	: % 5 yer karosu kırığı, % 10 yüksek fırın cürufu ile % 10 uçucu kül katkılı çimento

Y5C20	:% 5 yer karosu kırığı ile % 20 yüksek fırın cürufu katkılı çimento
Y5C20U20	:% 5 yer karosu kırığı, % 20 yüksek fırın cürufu ile % 20 uçucu kül katkılı çimento
Y5U20	:% 5 yer karosu kırığı ile % 20 uçucu kül katkılı çimento
Y5Z2-10	:% 5 yer karosu kırığı ile % 10 zeolit - 2 katkılı çimento
Z1-10	: % 10 zeolit – 1 katkılı çimento
Z1-20	: % 20 zeolit – 1 katkılı çimento
Z2-10	: % 10 zeolit – 2 katkılı çimento
Z2-10	: % 20 zeolit – 2 katkılı çimento

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 :Türk standartlarındaki çimento tipleri	9
Çizelge 3.1 :TS EN 197-1’de yeralan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri .	22
Çizelge 3.2 :TS EN 197-1’de yeralan çimentoların kimyasal özellikleri.....	22
Çizelge 3.3 : Seramik atıklarının çeneli kırıcı sonrası boyut dağılımı	37
Çizelge 3.4 : Laboratuvar tipi bilyalı değirmen şarjı.....	39
Çizelge 3.5 : Kontrol çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	43
Çizelge 3.6 :Seramik atıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 3.7 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.8 : Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri	47
Çizelge 3.9 : Zeolit – 1 ve zeolit – 2’nin kimyasal ve fiziksel özellikleri	49
Çizelge 3.10 : Kalkerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	51
Çizelge 3.11 : D5, D10 ve D15’in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	53
Çizelge 3.12 : Y5, Y10 ve Y15’in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	57
Çizelge 3.13 : G5, G10 ve G15’in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	60
Çizelge 3.14 : Z1-10, Z1-20, Z2-10 VE Z2-20’nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	64
Çizelge 3.15 : Y5C20’nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	68
Çizelge 3.16 : Y5U20’nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	70
Çizelge 3.17 : Y5C20U20, Y5C10U10 VE Y5C5U5’in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	73
Çizelge 3.18 : Y5Z2-10’un kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Puzolanların sınıflandırılması.	13
Şekil 3.1 : Çimentonun standart kıvam ve priz süresi için Vicat cihazı.	23
Şekil 3.2 : Karıştırıcı.	25
Şekil 3.3: Otomatik Vicat cihazı.	26
Şekil 3.4 :Çimentoların genleşme tayini için Le Chatelier cihazı.	27
Şekil 3.5: Isıtıcı su kabı.	28
Şekil 3.6 : Deneyde kullanılan tipik yayıcılar, master ve kalıp ölçüleri.	30
Şekil 3.7 : Sarsma cihazı.	31
Şekil 3.8 : Basınç dayanımı tayini için kullanılan cihaz.	31
Şekil 3.9 : Blaine cihazı.	32
Şekil.3 10 : Özgül ağırlık tayininde kullanılan piknometre.	33
Şekil 3.11 : XRF cihazı.	35
Şekil 3.12 : Eritiş cihazı.	36
Şekil 3.13 : Laboratuvar tipi bilyalı değirmen.	37
Şekil 3.14 : Elek analizi sonrası duvar karosu kırıkları.	38
Şekil 3.15 : Elek analizi sonrası yer karosu kırıkları.	38
Şekil 3.16 : Elek analizi sonrası granit kırıkları.	38
Şekil 3.17 : Laboratuvar tipi değirmen.	38
Şekil 3.18 : Partikül boyut analiz cihazı.	39
Şekil 3.19 : Duvar karosu kırığının boyut dağılımı.	40
Şekil 3.20 : Yer karosu kırığının boyut dağılımı.	41
Şekil 3.21 : Granit kırığının boyut dağılımı.	42
Şekil 3.22 : Kontrol çimentosunun boyut dağılımı.	44
Şekil 3.23 : Yüksek fırın cürufunun boyut dağılımı.	47
Şekil 3.24 : Uçucu külün boyut dağılımı.	48
Şekil 3.25 : Zeolit numuneleri.	49
Şekil 3.26 : Zeolit 1'in boyut dağılımı.	50
Şekil 3.27 : Zeolit 2'nin boyut dağılımı.	51
Şekil 3.28 : Kalkerin boyut dağılımı.	52
Şekil 3.29 : % 5 duvar karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	54
Şekil 3.30 : % 10 duvar karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	55
Şekil 3.31 : % 15 duvar karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	55
Şekil 3.32 : % 5 yer karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	58
Şekil 3.33 : % 10 yer karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	58
Şekil 3.34 : % 15 yer karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	59
Şekil 3.35 : % 5 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	61
Şekil 3.36 : % 10 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	62
Şekil 3.37 : % 15 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.	63
Şekil 3.38 : % 10 zeolit – 1 katkılı çimentonun boyut dağılımı.	65
Şekil 3.39 : % 20 zeolit – 1 katkılı çimentonun boyut dağılımı.	65
Şekil 3.40 : % 10 zeolit – 2 katkılı çimentonun boyut dağılımı.	66

Şekil 3.41 : % 20 zeolit – 2 katkılı çimentonun boyut dağılımı.	66
Şekil 3.42 : Y5C20 çimentosunun boyut dağılımı.	69
Şekil 3.43 : Y5U20 çimentosunun boyut dağılımı.	71
Şekil 3.44 : Y5C20U20 çimentosunun boyut dağılımı.	74
Şekil 3.45 : Y5C10U10 çimentosunun boyut dağılımı.	74
Şekil 3.46 : Y5C5U5 çimentosunun boyut dağılımı.	75
Şekil 3.47 : Y5Z2-10 çimentosunun boyut dağılımı.	77
Şekil 4.1 : Çimento numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri.	80
Şekil 4.2 : Kontrol, Y5, Z2-10 ve Y5Z2-10 çimentolarının dayanım değerleri.	82

SEMBOL LİSTESİ

d_{50}	: Numunenin ortalama tane boyutu (μm)
d_{99}	: Numunenin % 99'unun tane boyutu (μm)
m_1	:Çimento yatağı elde etmek için gerekli çimento miktarı (g)
v	: Çimento yatağını hacmi (cm^3)
ρ	: Çimentonun yoğunluğu (g/cm^3)

ENERJİ TÜKETİMİ VE EMİSYONLARIN DÜŞÜRÜLMESİ AMACIYLA ÇİMENTO ÜRETİMİNDE MİNERAL KATKILARIN KULLANIMININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Dünya üzerindeki enerji tüketimi her geçen gün önemli ölçüde artmaktadır. Bunun başlıca nedenleri Dünya nüfusundaki artış ve hızlı ekonomik gelişmelerdir. Günden güne doğal kaynaklar azalmakta, hava ve çevre kirliliği sorun olmaktadır. İşte bu noktada enerjinin yoğun olarak tüketildiği çimento sektöründe yapay ve endüstriyel atıkların kullanılması önem kazanmaktadır. Atıkların kullanılması ile çimento içindeki klinker kullanımı azalmakta ve bu sayede klinkerin pişmesi için harcanan enerji ve üretim sırasında açığa çıkan emisyonların miktarı azalmaktadır.

Katkılı çimento üretiminde kullanılan mineral katkıların genellikle puzolanik malzemelerdir. Çimento endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılmakta olan puzolanik malzemelerden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ülkemizde çok miktarda bulunmaktadır. Bunların yanında tras, silis dumanı, metakaolin, kalker gibi çeşitli mineral malzemelerin kullanılması da söz konusudur. Tez kapsamında, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalker ve zeolit ile seramik fabrikalarında hatalı ürün olarak oluşan granit, yer karosu ve duvar karosu kırıkları mineral katkı olarak kullanılarak çimentodaki klinker miktarının azaltılması amaçlanmaktadır.

Deneyisel çalışmalarda ilk önce, yer ve duvar karosu ile granit kırıkları çeneli kırıcıda kırılmış ve elek analizi yapılmıştır. Elek analizinde seramik atıkları 5 boyut grubuna (+5,6 mm, -5,6+2,0 mm, -2,0+1,0 mm, -1,0+0,5 mm, -0,5 mm) ayrılmıştır. Elek analizinden yer ve duvar karosu ile granit kırıklarının en çok -5,6+2,0 mm tane boyut aralığında bulunduğu gözlenmiştir. İkinci aşamada, yer ve duvar karosu ile granit kırıklarının öğünebilirlikleri incelenmiştir. Duvar karosu diğer iki malzemeye göre kolay öğütülen bir malzeme olduğundan bilyalı değirmende 30 dakika öğütüldüğünde arzu edilen d_{50} boyutuna (ortalama tane boyutu) ulaşmakta, yer karosunu 50 dakika, graniti 55 dakika öğütmek gerekmektedir. Üçüncü aşamada, literatür araştırması yapılarak çimento numunelerine ilave edilebilecek maksimum katkı içerikleri tespit edilmiştir. Buna göre ilk etapta hazırlanan 9 çimento numunesinin içeriği; klinker, klinkerin % 5-10-15 oranında yer karosu, duvar karosu ve granit kırıkları ile % 5 alçıtaşı şeklinde olmuştur. Ayrıca ilave edilecek katkıların etkilerini belirlemek amacıyla referans olarak, %95 klinker, % 5 alçıtaşı içeren Portland çimentosu (K) hazırlanmıştır. Daha sonra bu çimentoların standartlarda belirtilen mekanik (erken ve standart dayanım), fiziksel (priz süresi, genleşme, incelik) ve kimyasal özelliklerinin (kimyasal analiz, kızdırma kaybı) incelenmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda dokuz numunenin hepsinde priz sürelerinin artışı gösterdiği, kimyasal analiz sonuçlarının standart değerler içinde olduğu, genleşme sorunu yaşanmadığı gözlemlenmiştir.

Duvar ve yer karosu ile granit kırıkları katkılı 9 adet çimento numunesinin erken ve standart dayanım değerlerine bakıldığında K'ye göre artış gösteren tek numune % 5 yer karosu katkılı çimento (Y5) olmuştur. Bu nedenle çalışmanın bir sonraki safhasında çimentoya yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kalkerin ilave edileceği kombinasyonlarda % 5 yer karosu ilavesine karar verilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde en iyi basınç dayanımı veren oranların yüksek fırın cürufu için %20, uçucu kül için % 20, kalker için % 5 olduğu görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak yer karosu kırığı ile bu üç maddenin birlikte dayanıma etkisini görmek amacıyla değişik beş kombinasyon daha yapılmıştır. Yeni beş kombinasyonun hepsinde yer karosu kırığı ile kalker klinkerin % 5'i olacak şekilde sabit tutulmuş ve alçıtaşı yine % 5 olarak alınmıştır. İlk olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül klinkerin % 20'si olarak iki ayrı katkılı çimento (Y5C20, Y5U20) hazırlanmıştır. Üçüncü çimentoda ise klinkerin % 20'si kadar yüksek fırın cürufu ve yine klinkerin % 20'si kadar uçucu kül birlikte kullanılarak Y5C20U20 kodu verilen katkılı çimento hazırlanmıştır. Bu üç çimento numunesinin erken ve standart dayanım değerleri oldukça düşük olduğu saptanınca hazırlanacak diğer iki çimento numunesinde (Y5C10U10, Y5C5U5) yüksek fırın cürufu ve uçucu kül miktarları azaltılarak klinkerin %10 ve % 5'i oranında alınmıştır. Son iki katkılı çimento numunesinin erken ve standart dayanım değerlerinin, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün miktarının azalmasıyla, artış gösterdiği fakat K'nin 2, 7 28 ve 90 günlük dayanım değerine yine de ulaşamadığı belirlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün yer karosu kırığı ile kombinasyonunun erken ve geç dayanımda olumsuz sonuçlar verdiğinin anlaşılmasından sonra yeni bir malzeme olarak yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren zeolitin çimentoda kullanımı araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda zeolitin çimento ağırlığının % 15'i kadar ilavesinde geç dayanımda artış sağladığı tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak deneylerde iri ve kırılmış taneler içeren iki tür zeolit kullanılarak, klinkerin % 10 ve % 20'si oranında zeolit içeren katkılı çimentolar (Z1-10, Z1-20, Z2-10, Z2-20) hazırlanmıştır. Bu dört çimento numunesinin basınç değerlerinin sonuçları zeolitin geç dayanımda artış sağladığını göstermiştir. Sadece Z2-10 kodlu numunenin 28 günlük dayanımında bir artış olmuştur. Bu nedenle çalışmanın bir sonraki aşamasında, yer karosu kırığı ile zeolitin kombinasyonu için Z2-10 kodlu numune baz alınmıştır.

Son numune içeriği; klinker, klinkerin %5'i kadar yer karosu, % 10'u kadar ufalanmış taneler içeren zeolit ve alçıtaşından oluşmuştur. Fakat yer karosunun zeolitle de uyumlu bir malzeme olmadığı deney sonuçlarından anlaşılmıştır.

OPTIMIZATION OF THE USE OF MINERAL ADDITIVES IN CEMENT PRODUCTION FOR REDUCE TO ENERGY COMSUMPTION AND EMISSIONS

SUMMARY

Due to the increase in world population and rapid economic development, energy consumption is increasing significantly with each passing day. Natural resources are decreasing day-by-day, air and environmental pollution is a major problem. At this point, energy intensive cement industry is important to the use of artificial and industrial waste. The use of waste is reduced using clinker in the cement. It is generally that the production of cement clinker is expensive and has adverse ecological effects. CO_2 , NO_x and SO_x are among the hazardous emissions generated in relatively high volumes by the conventional Portland cement process. In contrary, blended cements meet the challenges of modern society by incorporating different industrial by-products and waste, thus partly replacing clinker and increasing conserving energy. In this way, blended cements contribute to the reduction of carbon dioxide and other emissions during clinker firing. From economical point of view, used industrial by-products and waste materials would otherwise be transported to landfill sites.

Portland cement clinker production consumes large amounts of energy (850 kcal per kg of clinker) a considerable environmental impact. This involves massive quarrying for raw materials (limestone, clay, etc.), as it takes 1,7 tonnes to produce 1 tonne of clinker, as well as the emission of greenhouse and other gases (CO_2 , NO_x and SO_x) into the atmosphere. Around 850 kg of CO_2 are emitted per tonne of clinker produced. Portland cement is the most widely produced cement worldwide, but in recent years; production of blended cements is increased. The combination of mineral admixtures has emerged to improve cement properties such as early strenght and standard strength, durability. Mineral additives used in the production of blended cement are generally pozzolanic materials. Pozzolanic materials used in the cement industry as an additive, fly ash and blast furnace slag has a large amount of in Turkey. In addition, tras, silica fume, limestone is used as an additive in blended cements. The aim if this thesis is to reduce the amount of clinker in cement bu using blast furnace slag, fly ash, limestone, zeolite, and floor and wall tiles, granite fractures that are accepted as faulty products in ceramic plants as a mineral additive.

In experimental studies, at first, floor and wall tiles, granite fractures broken by jaw crusher, and sieve analysis were performed. Sieve analysis of ceramic wastes are divided into five size groups (+5,6 mm, -5,6+2,0 mm, -2,0+1,0 mm, -1,0+0,5 mm, -0,5 mm). Sieve analysis of wall tile and floor tile, and granite fractures were observed to be the most -5,6 + 2,0 mm particle size range.

In the second stage, average particle size of floor tile and wall tile, granite fractures mill output close to the value how much time grinding needed in ball mill investigated by trial and error. Wall tile is a material softer than the other two materials, therefore, first milled in ball mill for 30 minutes. At the end of this time, the average particle size (d_{50}) of wall tile was 15,61 μm . Such as wall tile, floor tile fracture initially for 30 minutes, but average particle size is found 22,40 μm , decided grinding of an additional 20 minutes. Thus, average particle size at the end of a total of 50 minutes grinding are obtained 17,49 μm . Granite fracture is a harder material, instead of 30 minutes, 45 minutes ground. However, average particle size found to be 21,52 μm . grinded for 10 minutes, average particle size was 15,76 μm .

The third stage, literature search was conducted, and additive content of cement samples were determined. At first, it was decided to prepare for nine cement samples. This cement content was as follows: Clinker, floor and wall tiles, granite fractures 5 – 10 - 15 % of clinker, and 5 % gypsum. In addition, in order to refer to 95 % clinker, 5 % gypsum containing Portland cement (K) was prepared. Then, these nine cement mechanical (early and standard strength), physical (setting time, expansion, and fineness) and chemical tests (chemical analysis, ignition loss, insoluble residue) were made to determine the properties in accordance with standards. Result of experiments, each of the nine samples increase the setting time, the chemical analysis results in values that standard, expansion was observed not experienced the problem.

Cement samples with ceramic wastes were analyzed as early strength and standard strength values, and all day strength values increased according to K, which was only 5 % floor tile fracture cement (Y5). For this reason, a subsequent of study, the preparation of blended cement combinations, together with blast furnace slag, fly ash and limestone decided addition of Y5.

Previous studies that examined the rates of the best strength values were found to be 20 % for blast furnace slag, 20 % for fly ash, and 5 % for limestone in blended cements. Based on these values, floor tiles in order to see the effect of the strength these three materials together in different combinations were made five. In each of the five new combination, floor tile fracture and limestone taken up to 5 % by weight of clinker, gypsum is taken 5 %. First, two different blended cement (Y5C20, Y5U20) were prepared to containing 20 % weight of clinker fly ash and blast furnace slag. Y5C20U20 called third cement content were as follows: 45 % clinker, 20 % blast furnace slag by weight of clinker, 20 % fly ash by weight of clinker, 5 % floor tile fracture, 5 % limestone, 5 % gypsum. Early strength and standard strength values of these three cement samples were too low. Floor tile fracture, limestone and gypsum in cement ratio was kept constant, the percentages of blast furnace slag and fly ash respectively 10 % and 5 % of two cement samples (Y5C10U10, Y5C5U5) were prepared. Inversely proportional to reduction the amount of blast furnace slag and fly ash in Y5C10U10 and Y5C5U5, increased strength values, but still cannot reach the determined strength values of K.

Floor tile fracture in combination with blast furnace slag and fly ash, the results of strength after giving negative value, as a new material the zeolite, which contains SiO_2 and Al_2O_3 in high concentrations, was investigated at cement technology. As a result of literature research, increase in value of strength was realized that with addition of zeolite 15 % by weight of clinker. Thus, four blended cements (Z1-10, Z1-20, Z2-10, Z2-20) that contain zeolite 10 % and 20 % by weight of clinker were prepared. According to the four cement samples of compressive strength values, zeolite leads to increase in 90 days strength values. In addition, just in the value of 28-days strength of Z2-10 coded sample was increased. Therefore, the next phase of the study, combination of zeolite with floor tile fracture is based on Z2-10 coded samples.

When the evaluation of all experiments performed, was decided to make a final mixture. The last sample to the contents were as follows: 80 % clinker, 5 % floor tile fracture by weight of clinker, 10 % zeolite by weight of clinker, and 5 % gypsum. However, the results of the experiment revealed that floor tile fracture is not a material that compatible with zeolite.

1. GİRİŞ

Dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizdeki nüfus artışı, yaşam standartının yükselmesi, sanayileşme ve kentleşme enerjiye olan ihtiyacı önemli ölçüde arttırırken, ciddi hava ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Sadece çimento üretimi şu anda küresel olarak insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 5'inden sorumludur ve gelişme gösteren ülkelerde modernizasyon kapsamında artan çimento üretimiyle CO₂ yayılımının da artacağı bilinmektedir. Bu nedenle çimento endüstrisi neden olduğu zararları azaltmak amacıyla çevre dostu ve düşük enerji gerektiren, üretim süreçlerinde tasarruf sağlayan teknolojiler ile klinker yerine geri kazanılmış ve/veya çeşitli atık malzemelerin kullanımıyla Portland çimentosunda olmayan performans özelliklerine sahip yeni katkılı çimento türlerinin üretimi konusunda çalışmalar yapmaktadır [1-3].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ile Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD), enerji tedarik edilmesindeki ve kullanılmasındaki günümüz trendinin toplumlar için sürdürülebilir, ekonomik ve çevreci olmadığından yola çıkarak 2050 yılına kadar olan zaman dilimi içinde çimento endüstrisindeki CO₂ emisyonlarını yarı yarıya azaltmak amacı ile düşük karbon enerjili teknolojiye geçilebilecek bir yol haritası hazırlamıştır. Bu yol haritasında; termal ve elektrik verimliliği, alternatif yakıt kullanımı, katkılı çimento kullanımıyla klinker kullanım oranının azaltılması ile karbon yakalama ve depolama olmak üzere dört başlık üzerinden karbon emisyonlarının azaltılabileceği belirtilmiştir. Yeni çimento fabrikalarında son model mevcut teknolojilerin kullanılması ile termal ve elektrik verimliliğinin, çimento üretim prosesinde daha az karbon yoğunluklu fosil yakıtlar ve biokütle yakıtlar ile alternatif yakıt kullanımının, karbon yoğunluklu klinkerin karbon yoğunluğu düşük çimento özelliği taşıyabilen malzemelerle yer değiştirmesi ile klinker kullanımının azaltılmasının, oluşan CO₂'nin atmosfere salınımından önce tutularak güvenli bir şekilde depolanması ile karbon yakalama ve depolamanın mümkün olduğu ifade edilmektedir [4,5].

Portland çimentosu pazarda en büyük paya sahip olmasına rağmen katkılı çimento üretim ve kullanımının ileri yıllarda daha da artarak devam edeceği tahmin edilerek bu çalışmada klinker yerine kullanılabilecek yeni bir malzeme olarak seramik atıkları (yer ve duvar karosu ile granit kırıkları) ve zeolit ile standartlarda katkı maddesi olarak yer alan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kalker değişik oranlarda çimento üretiminde kullanılmıştır. Yapay ve sanayi atıklarının kullanılması ile geri kazanım sağlanarak çimento içindeki klinker miktarı azaltılmış, böylelikle çimento üretim prosesinde yakıt miktarında, enerji tüketiminde ve CO₂ emisyonlarında azalmaya imkan tanınmıştır. Ayrıca Portland çimentosundan daha iyi dayanıma sahip katkılı çimentolar üretilmesi amaçlanmaktadır [6].

Bölüm 1’de; çimento üretiminde enerji tüketimi ve emisyonların düşürülmesinin gerekliliği ile çözüm yolları hakkında bilgi verilerek çalışmanın önemi belirtilmiştir.

Bölüm 2’de; çimento üretim prosesi ve çimento endüstrisinde kullanılan mineral katkıları anlatılmıştır.

Bölüm 3’te; tez çalışması sırasında katkılı çimento hazırlamada kullanılan atıkların ve çimento numunelerinin karakterizasyonu için yapılan fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler tarif edilmiştir. Ayrıca kullanılan katkıları nedeni ile çimentonun özelliklerinde oluşandeğişiklikler araştırılmıştır.

Bölüm 4’te; yapılan deneysel çalışmaların analizi yapılarak çimento endüstrisinde nasıl kullanılabileceği hakkında öneri sunulmuştur.

2. ÇİMENTO TANIMI VE ÜRETİMİNDE KULLANILAN MİNERAL KATKILAR

2.1 Çimentonun Tanımı ve Tarihçesi

Çimento, genel olarak havada ve suda sertleşen, sertleştikten sonra suya karşı dayanıklı olan bağlayıcı özellikteki maddelerdir. Başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin sinterleşme derecelerine kadar (yaklaşık 1350°C) pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul olan klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi katılarak öğütülmesi ile üretilen hidrolik bağlayıcı madde olarak tarif edilmesi de mümkündür [7,8].

Çimento kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince ‘caementum’ kelimesinden türemiş, sonraları ‘bağlayıcı’ anlamında kullanılmaya başlamıştır. İlk betonarme yapının tarihi 1852 olmakla birlikte, yapıların inşasında bağlayıcı malzemelerin kullanımı çok eskilere dayanır; bağlayıcı madde olarak kullanılan ilk madde kireçtir. Bu konuda kesin bulgular olmamakla birlikte, kirecin bağlayıcı özelliğinin insanlık tarihinin erken dönemlerinde milattan önce 2000’li yıllarda keşfedildiği söylenebilir. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya’nın değişik yörelerinde kirecin bir yapı malzemesi olarak kullanılmasına ait örneklerle rastlanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireci hidrolik bağlayıcı olarak kullanmışlardır.

Milattan önce 70 - 25 yılları arasında yaşamış olan Mimar Vitruvius ‘On Architecture’ (Mimarlık Üzerine) adlı 10 ciltlik kitabında puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsetmiş, nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabilecek harç için karışım oranı bile vermiştir. Araştırma sonuçları Anadolu’da Çatalhöyük’teki evlerin yapımında kullanılan sıvanın 7000 yıl öncesine tarihlendiğini ortaya koymuştur [9].

Tarihte, Mısır Piramitleri, Çin Seddi ve değişik zamanda yapılan kalelerde o dönemin medeniyetini simgeleyen birçok değişik bağlayıcı madde kullanılmıştır. Daha sonra yaklaşık 2000 yıl önce, Romalılar söndürülmüş kireci volkanik küllerle ve sonraları, pişirilmiş tuğladan elde edilen tozlarla karıştırarak bugünkü çimentonun özelliklerine benzer bir hidrolik bağlayıcı kullanmaya başlamışlardır. Eski Yunanlılar ise Santorin Adası'ndaki volkanik tüfleri kireçle karıştırarak veya killi kireç taşından elde ettikleri bir tür hidrolik kireçle harç yapmışlardır [10].

Eski Yunanlılar ve Romalılar kireç ve puzolan karışımlarının hidrolik özelliğinin farkına varmış ve bunları kullanmış olmakla birlikte, ne kirecin elde edilişi ne de puzolanik reaksiyonları kimyasal olarak açıklayacak bilgiye sahip olamamışlardır. Örneğin; Pliny (Romalı bilgin Gaius Plinius) 'taşın ateşle yakılmasıyla elde edilen kirecin suyla temas edince neden tekrar yandığının' anlaşılmaz olduğunu yazmıştır. Bağlayıcı malzemelerin kalitesi ve kullanımı konusunda ancak 18. Yüzyıl'da kayda değer bir gelişme olmuştur. 1756 yılında Eddystone Lighthouse'u yeniden inşa etmekle görevlendirilen John Smeaton, kirecin kimyasal özelliklerini ilk anlayan kişi olarak bilinir. Daha sonraki gelişme ise 'Roman Cement', adı ile bilinen bağlayıcının Joseph Parker tarafından elde edilmesiyle olmuştur.

1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası hazırladığı ince taneli kil ve kalker karışımını önce pişirerek ve sonra öğütürerek bağlayıcı bir ürün elde etmiştir. Bu ürüne su ve kum katıldığında ve zamanla sertleşme tamamlandığında, ortaya çıkan malzemenin İngiltere'nin Portland Adası'ndan üretilen yapı taşlarını andırdığını gören Aspdin, elde ettiği bu bağlayıcı için 21.10.1824 tarihinde 'Portland Çimentosu' adı altında patent almıştır. Bu bağlayıcı sonraki yıllarda büyük gelişmeler gösterecek şekilde 'Portland' ismi aynen korunmuştur [11].

Aspdin tarafından üretilen bağlayıcı, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugün kullanılan Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır. Yine de İngiltere Kirkgate İstasyonu'nun yanındaki halen ayakta olan 'Wakefield Arms' binasının Joseph Aspdin'in yaptığı bağlayıcı ile yapıldığı belirlenmiştir. Hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi olayı daha sonra 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından gerçekleştirilmiştir.

Anadolu’da ise Hitit kentlerinde, özellikle Çorum, Tokat ve Malatya illerindeki antik kentlerde, magneziyen kireç ile karıştırılmış puzolanik aktif doğal malzemelerin harç yapımında kullanıldığı görülmüştür. Bunun dışında Güneydoğu Anadolu’da Asurlulardan kalma tarihi kalıntılarda normal kireç ile bazalitik puzolanik maddenin kullanılmış olması Anadolu’da Romalılar ve Yunanlılar’dan önce çimento kullanıldığı göstermektedir. Teos- İzmir, Efes- İzmir, Afrodisias- Aydın, Kinidas- Muğla antik kentlerinde çimento ve harcın eski Anadolu uygarlıkları ile geniş temas kurulduktan sonra da görülmüştür.

Dünya’da çimento üretim ve satışına 1878 yılında başlanmasına rağmen, Türkiye’nin çimento sektörü ile tanışması ise esas olarak 1912 yılında özel sektör girişimi ile olmuştur. 3 - 4 yıl geç başlanması su kireci imalinin yeterli olmaması ve bu yılların Osmanlı İmparatorluğu’nun çöküş dönemlerine rastlamasından kaynaklanmaktadır [12].

Türkiye’de ilk çimento fabrikası 1911 yılında Darıca’da 20.000 ton/yıl kapasiteyle kurulmuştur ve Cumhuriyetin kurulması ile yıllık 40.000 ton üretim kapasitesine erişilmiştir. İstanbul Kartal ve Zeytinburnu’nda, Ankara’da ve Sivas’ta kurulan 4 çimento fabrikası ile 1950’de yıllık toplam kapasite 515.000 ton’a kadar ulaşmıştır. 1950 ve 1960 yılları arasında çimento sektöründe yaşanan olumlu gelişmeler sayesinde üretim 2.103.000 ton/yıl’ı, fabrika sayısı ise 13’ü bulmuştur. 1953 yılında çimento sanayini yaygınlaştırmak amacı ile devlet Türkiye Çimento Sanayi T.A.Ş.’yi kurulmuştur. Bu şirketin kurulmasıyla üretim artmış fakat 1970’lere dek iç piyasanın talebinin karşılayamadığı için çimento ithalatı devam etmiştir.

1978-1983 yılları arasında Dünyada patlayan inşaat krizi, Türkiye’nin büyük oranda ihracat yapmasını sağlamıştır. 1984 yılında başlayan ve 1989 yılındaki duraklama dışında, bugüne kadar devam eden iç talep artışı Türkiye’nin ihracattaki etkinliğini 1988 yılına kadar kademeli olarak azaltmış, öte yandan 1986 yılından itibaren bazı bölgelerde üretim kapasitelerini zorlayarak 1987 - 1988 yıllarında bu bölgelere önemli miktarlarda çimento ve klinker ithalatı yapılması mecburiyetini doğurmuştur. Sektör bu duruma süratle adapte olarak gerek mevcut kapasiteyi en rasyonel şekilde kullanmak ve gerekse darboğaz giderme-modernizasyon ve yenileme yatırımları ile kapasiteyi arttırarak iç talepteki yükselmeyi karşıladığı gibi dış pazarlarda da eski etkinliğini fazlası ile yeniden tesis etmiştir.

Çimento sektöründe 1989’da başlatılan özelleştirme çalışmalarından önce, 21 çimento fabrikası ile kapasite ve üretim bakımından piyasanın yarısını elinde bulunduran devlet kuruluşu Çitosan’a ait fabrikaların özelleştirilmesiyle devlet, çimento sektöründen tamamen çekilmiştir. Bu dönemde Türk Çimento Sektörü, Avrupa Birliği çimento sektörüne kıyasla kapasite, üretim, üretim teknolojisi, maliyetler, verimlilik ve fiyatlar açısından belirli bir dezavantaj göstermektedir. 1990 - 1999 yılları arasında geçen dönemde, 27 Ocak 1994 tarihinde yapılan devalüasyon ve 5 Nisan 1994 tarihinde alınan ekonomik tedbirler nedeniyle çimento iç tüketimi 1994 yılının ikinci yarısından itibaren düşmeye başlamış ve yatırımlarda azalma gözlenmiştir. 1994 yılını takip eden yıllarda iç tüketimdeki artış tekrar başlamış ve iç tüketim fazlası üretimin ihracatına devam edilmiştir [13].

2001-2007 yılları arasında %64 yüyüyen Türkiye çimento pazarı, 2008 yılında da global krizin etkisine rağmen % 2’lik büyüme kaydetmiştir. Türkiye çimento sektörü, makro ekonomik dalgalanmaların ve istikrarsızlıkların ilk etkisini gösterdiği sektörlerden biri olup, inşaat sektörünün ana girdilerinden birini sağlaması sebebiyle sektördeki dalgalanmalardan doğrudan etkilenmesine rağmen yıldan yıla artan ihracat hacmi ile Gayri Safi Milli Hasılda önemli bir yer sahibi olmanın yanında, sağladığı istihdam düzeyiyle de ekonomik yapı içindeki önemini korumaktadır. Günümüzde ise çimento sektörü, üretim için hammadde ihtiyacını tamamen kendi kaynaklarını kullanarak ülkenin çimento ihtiyacını karşılayabilmektedir.

2009 yılında üretim 54 milyon tona ulaşmış, tüketim ise 39 milyona gerilemiştir. İthalattaki payı az olan çimento sektörü, ihracattaki payını her geçen gün arttırmakta ve Dünyanın 54 ülkesine satış yapmaktadır. İhracatın büyük bölümü Rusya, Irak, Suriye ve İtalya’ya yapılmakta olup, 2009 yılında Kuzey Afrika gibi yeni pazarlara da satışa başlanmıştır. Mevcut durumda, yurtiçi talebi karşılamakta sıkıntı çekmeyen, bunun yanı sıra ihracatını % 150 oranlarında artıran sektör Avrupa’nın en büyük çimento ihracatçılarından biri olacak konuma gelmiştir [14].

2010 yılında ise ülkemizin başlıca çimento ihrac pazarları olan Irak ve Suriye’de bir miktarkayıp yaşanmış, Libya, Mısır ve Cezayir’de ise önemli artışlar yaşanmıştır. Nijerya’ya olan ihracatımızdaki düşüşün sebebi ise ülkede yeni fabrikalar açılması ve ithalat talebinin daralmasıdır. Ayrıca, Nijerya, Brezilya, ABD gibi uzak ülkelere çimento ihracatında nakliye masrafları çok fazla, navlun miktarları çok yüksek olduğundan dolayı firmalarımız genellikle yakın ülkelere ihracat gerçekleştirmeyi tercih etmektedir. Yine İspanya’ya olan ihracatımızda 2009 yılına göre % 55 oranında bir düşüş kaydedilmiştir. Bunun sebebi ise,ülkedeki ekonomik sıkıntıdan dolayı azalan ithalat talebidir[15].

Dünya pazarına bakıldığında ise, Amerika’nın mali piyasalarının krize girmesiyle baş gösteren 2008 yılındaki krizden sonra, 2009 dünya ekonomisi ve dünya ticaretinde 2. Dünya Savaşı’ndan beri görülen en büyük düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş küresel talebi ve ticaret hacmini etkileyerek küresel ekonominin daralmasına neden olmuştur. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler ekonomik daralmaya son verebilmek için mali ve parasal tedbirler almışlardır. Bu sayede 2010 yılında özellikle Amerika, Batı Avrupa, Rusya ve Japonya’da ekonominin iyileşme sürecine girdiği görülmüştür. Global krizden etkilenmeyen ülkelerde ise, büyüme devam etmiş olup, çimento tüketiminde de önemli artışlar görülmüştür. 2010 yılında dünyada 3,2 milyar tonun üzerinde bir üretim gerçekleşmiş ve Çin % 50’nin üzerinde bir paya sahip olmuştur. Çimento üretiminde Çin’i Hindistan ve Amerika takip etmiş, Türkiye 4. sırada yer almıştır. 2011 yılında üretim 3,3milyar tona ulaşmış olup, Çin 2.063 milyon ton üretim miktarı ile dünya çimento üretimindeki lider konumunu sürdürmektedir. Çin’i sırasıyla 195 milyon ton üretim ile Avrupa Birliği üyesi ülkeler, 67 milyon ton ile Amerika Birleşik Devletleri, 63 milyon ton ile Brezilya ve Türkiye takip etmektedir. [16].

2.2 Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar

Dünyada her yıl milyonlarca ton, mineral katkı maddesi özelliği taşıyan, endüstri atık yan ürünü üretilmektedir. Bu atıkların hava, toprak ve suyu kirletmeleri, hem endüstriye hem de topluma büyük maliyetler getiren depolama sıkıntıları oldukça büyük sorun teşkil etmektedir. Bunların çimento katkı maddesi halinde kullanılmasıyla, neden oldukları çevre riski azalacak, depolama sıkıntıları hafifleyecektir. Ayrıca üretim adına tekrar kazanılmaları nedeniyle, ekonomik açıdan faydalı bir döngü sağlanmış olacaktır.

Çimento, killi ve kalkerli hammaddelerin uygun oranlarda (%20-30 kil, %70-80 kalker) karıştırılıp döner fırınlarda 1400°C pişirilmesiyle oluşan klinkere az miktarda (%3-6) alçıtaşı katılıp öğütülerek elde edilen suda erimeyip katılaşan hidrolik bir bağlayıcıdır. Ana hammaddeler (kil, kalker, marn) dışında, klinkerin yerine ikame edebilecek katkı maddeleri, ham karışımın kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip; Fe, SiO₂ ya da Al₂O₃ içerikli materyaller olmalıdır. Klinkerin öğütülmesi esnasında alçı taşı, yapay ve doğal puzolanik maddeler, yüksek fırın cürufu, silisli ve kalkerli uçucu küller, silis dumanı ve son yıllarda belirli oranlarda kalker de değişik tip çimento üretimlerinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde TS EN 197-1 kapsamında 27 farklı çimento beş ana tipte gruplandırılmış ve işaretleri Çizelge 2.1’de verilmiştir[17, 18]. Klinkerin bir kısmının çeşitli malzemelerle yer değiştirilmesiyle daha ekonomik ve çevreyle uyumlu olarak üretilen katkılı çimentolar hem Portland çimentosunda olmayan performans özelliklerine sahip olmakta hem de çelik, elektrik ve silikon endüstrisinin ikincil ürünlerinin faydalı bir şekilde kullanılmasına imkan sağlamaktadır [9].

Çizelge 2.1 : Türk standartlarındaki çimento tipleri.

Ana Tipler	Çimento Tipleri	İşaretleri	Ana Bileşen										Minör İlave Bileşen
			Klinker	Y. Fırın	Silis	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş ŞistT	Kalker		
				Cürufu S	Dumanı D	DoğalP	Yapay Q	Silisli V	Kalkersi W		L	LL	
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandCürufllu Çimento	CEM II/A-S	80 - 94	6 – 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandSilis Dumanlı Çimento	CEM II/B-S	65 - 79	21 – 35	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandPuzolanlı Çimento	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 – 10	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandUçucu Küllü Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandPişmiş Şistli Çimento	CEM II/B-P	65 – 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 – 20	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-Q	65 – 79	-	-	-	21 -35	-	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-V	65 – 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-W	65 – 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-T	65 – 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-L	65 – 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-LL	65 – 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5
	PortlandKalkerli Çimento	CEM II/B-LL	65 – 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5

Çizelge 2.1 (devamı) : Türk standartlarındaki çimento tipleri.

Ana Tipler	Çimento Tipleri	İşaretleri	Ana Bileşen										Minör İlave Bileşen	
			Klinker	Yüksek Fırın Curufu S	Silis Dumanı D	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist T	Kalker			
						Doğal P	Yapay Q	Silisli V	Kalkersi W		L	LL		
CEM II	Portland	CEM II/A-M	80 -94	←-----6 – 20-----→										0 - 5
	Kompoze Çimento	CEM II/B-M	65 - 79	←-----21 - 35-----→										0 - 5
CEM III	Yüksek Fırın	CEM III/A	35 – 64	35 – 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Cüruflu Çimento	CEM III/B	20 – 34	66 – 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65 – 89	-	←-----11 - 35-----→				-	-	-	-	0 - 5	
		CEM IV/B	46 – 64	-	←-----36 - 55-----→				-	-	-	-	0 - 5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40 - 64	18 – 30	-	←-----18 – 30-----→			-	-	-	-	0 - 5	
		CEM V/B	20 – 39	31 – 50	-	←-----31 - 50-----→			-	-	-	-	0 - 5	

2.2.1 Puzolanik Maddeler

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince taneli durumdayken, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Puzolanların yapısında, büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılık gösterebilmesi için, içerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalı, amorf yapıya sahip olmalı ve en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır [19,20].

Puzolan terimi,Napoli Körfezi'ndeki Vezüv Dağı yakınındaki Puzzuoli'den kaynaklanmaktadır. Almanya'daRhenish trası ve Bavarlan trası olarak bilinen benzer türdeki materyal çimento üretiminde katkımaddesi olarak kullanılmaktadır. Diğer ülkelerde volkanik kayaçlar yanında, değişik silisli sedimanter yataklar bu kapsam içerisinde yer almaktadır. Puzolanlar kökenlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki genel gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.1). Çoğu doğal puzolanik maddeler volkanik kökenli olup, en çok bilineni tüflerdir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumda magma, yüzeye alev olarak çıkarak çok çabuk soğuma gösterdiği takdirde, camsı (amorf) yapıya sahip olmaktadır. Püskürme esnasında gazların dabalunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamlarda kalsiyum iyonlarıyla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok hızlı yer alması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmasına yol açmaktadır [21, 22].

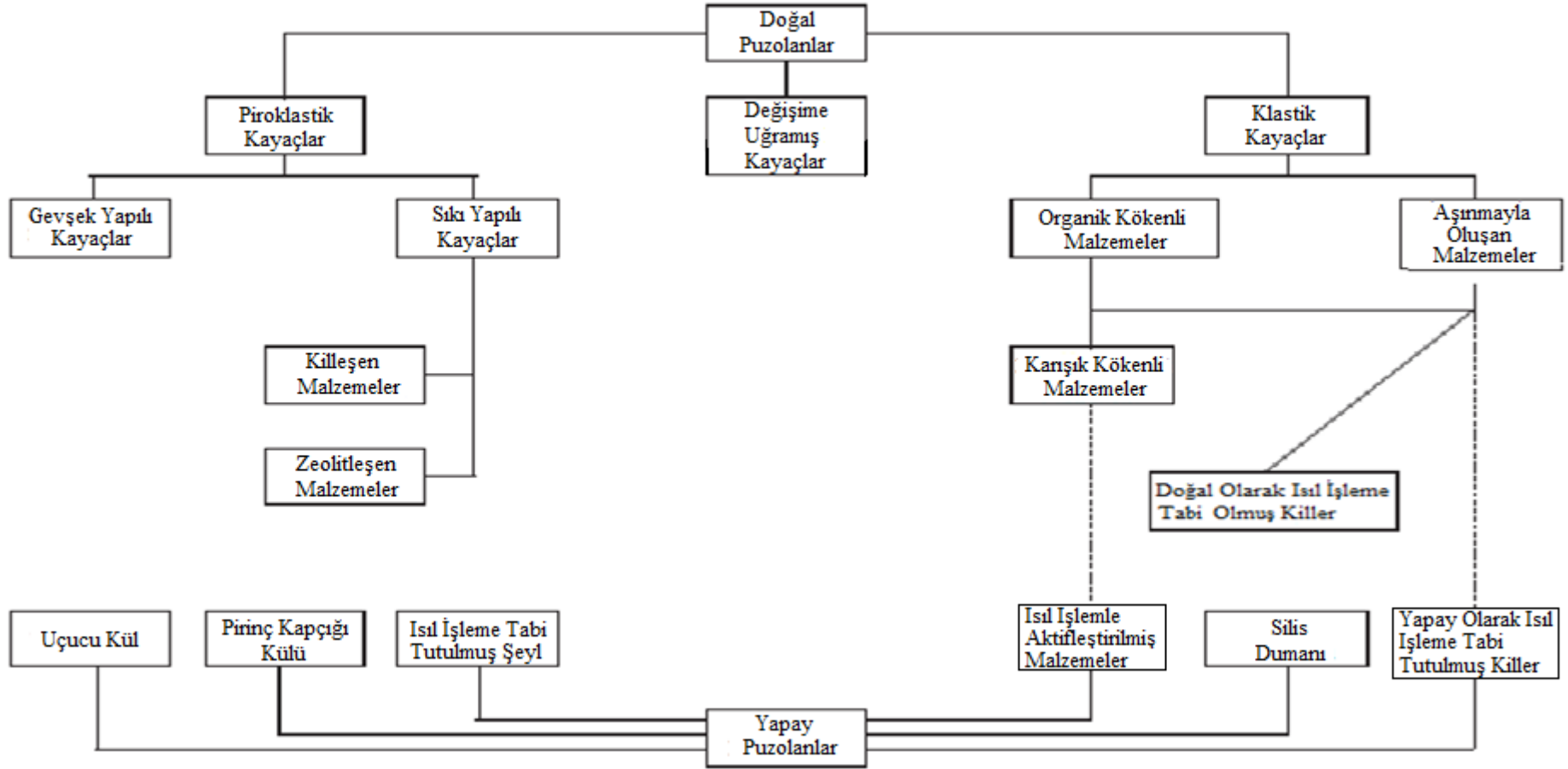
Ülkemizde çimento sanayinde doğal puzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik işlevlerin bir ürünü olarak oluşan doğal cürufların kullanımı yaygındır. Yapay olarak elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu küller de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısıtma işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen puzolanik malzemeler de yapay puzolanlar grubuna girmektedir.

Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından puzolanların katkı maddesi olarak yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzolanik aktivite değerleri ile çözünmüş kalıntı oranları, katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranı genelde % 10-40 arasında değişmektedir. Doğal puzolanlar, genellikle Portland-puzolan tipi çimento ve puzolan katkılı beton üretiminde kullanılmaktadırlar. TS 25'e göre doğal puzolanların kimyasal özellikleri, $\text{Si}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı en az %70, SO_3 miktarı en çok %3, reaktif silis miktarı en az % 25 ve klorür miktarı en çok % 0,1 olmalıdır. Doğal puzolan içeren sistemler için dayanım uzun dönemde doğal puzolanın $\text{Si}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarına bağlıdır. Kısa dönemde ise doğal puzolanın özgül yüzey alanı dayanım açısından birinci derecede etkilidir [23, 24].

Traslı çimento, portland çimentosunun kullanıldığı her yerde rahatlıkla kullanılabilir. Hidratasyon ısısını azaltması, çatlamaya karşı betonun direncini arttırması, alkali-agrega reaksiyonu nedeni ile oluşan genleşmeyi önlemesi Portland çimentosuna göre üstünlükleridir. Çimentonun içerisinde mevcut olan ve zamanla artan serbest kirecin tras içindeki aktif silis ve alüminle birleşerek daha dayanıklı plastik beton elde edilmesi, çekme mukavemetinin normal çimentoya göre daha yüksek olması, asitli, karbonatlı, sülfatlı suların aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olması dolayısıyla köprü ve baraj inşaatlarındaki kullanılabilmektedir.

Tras daha çok çimento fabrikalarında traslı çimento üretimi için klinkere karıştırılarak öğütülmektedir. Traslı çimentolarla yapılan betonların dayanımları tras miktarına ve özelliklerine bağlı olarak Portland çimentolu betonların dayanımına göre daha düşük seyretmektedir ve daha özenli ve uzun süreli kürlemeye ihtiyaç duymaktadır.

Kaplan ve Binici; traslı çimento ile sülfatlı sulara dayanıklı çimentonun normal ve sülfatlı sulardaki dayanımlarını incelemiştir. Çalışma sonunda, normal şartlarda hemen hemen aynı dayanıma sahip bu iki çimento türünün, sülfatlı su bulunan ortamlarda SDC başlangıçta daha yüksek dayanım gösterirken, ilerleyen zamanlarda dayanımı azalmıştır. Traslı çimento ise normalardan bir dayanım göstermiştir [25].



Şekil 2.1 : Pozolanların sınıflandırılması.

Kimyasal olarak ‘sulu alümino silikatlar’ olarak bilinen zeolitler, yüzyılımızın endüstriyel hammaddesi olarak da anılmaktadır. Kelime anlamı olarak ‘kaynayan taş’ anlamına gelen zeolit 1756 yılında İsveçli mineralog FreiherrAxel Fredrick Cronstedt tarafından bulunmuştur.Doğal zeolitler 40’ı aşkın mineralden oluşmuş bir grup ismidir. Dünyada zeolitlerin dokuz tanesi ticari önem taşımaktadır. Bunlar; klinoptilolit, çabasite, analsim, eriyonit, ferrierit, hoylandit, laumontit, mordenit ve fillipsittir.Doğal zeolitler arasında özellikle klinoptilolit geniş bir uygulama alanına sahiptir.Klinoptilolit, Dünyada yaygın olarak bulunması, geniş uygulama alanı olması, ekonomik olarak işletilebilirliği, homojenliği gibi yönleri ile doğal zeolitlerin en önemli mineral gruplarından birisidir. Türkiye’de de klinoptilolit, minerali, rezervi, oluşumu, homojenliği ve yüksek mineral kalitesi ile büyük önem taşımaktadır.Özellikle çevre kirliliğinin kontrolü ile tarım ve hayvancılık sektöründeki uygulamaları çok gelişmiştir. Ayrıca sentetik zeolitler de vardır. Özellikle deterjan ve kimya sektöründe tüketilen bu zeolitlerin Türkiye’de yaygın bir kullanımı söz konusu değildir [26].

Zeolitlerin benzer yapıdaki diğer mineral gruplarından ayrılan en önemli özelliklerinden biri de yapı içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunmasıdır. Yapıda bu su moleküllerinin yer alabileceği birkaç muhtemel boşluk vardır. Bu boşluklarda Na, Ca, K katyonları su molekülleri ile çevrilirler ve su molekülleri zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapısına bağlıdırlar. Genellikle kalsiyumlu zeolitler diğerlerinden daha fazla su içerirler.Sabazit, höylandit ve stilbit yapısı içindeki su molekülleri potasyumundan daha çok kalsiyum katyonu ile bağlantılıdırlar. Zeolitler ısıtıldıklarında, 100– 350°C da su molekülleri yapıda değişiklik yapmadan, birçok minerallerde görüldüğünün tersine, belli sıcaklıklarda kesikli olarak değil de, sürekli şekilde yapıdan ayrılırlar [27].

Zeolitik tüf yatakları, birçok ülkede puzolanik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzolanlar, son beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruzkalacağı hidrolik çimentolarda önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir [28].

Perraki ve ark. katkılı çimentoda zeolitin etkisini anlamak amacıyla çimentoya, çimento ağırlığının % 10 ve % 20'si kadar zeolit ikame etmiştir. Dayanım sonuçlarını incelediklerinde; %10 zeolitin ikame edildiği numunenin tüm yaşlardaki basınç dayanımı değerleri % 20 zeolit katkılı çimentodan daha yüksek olmuştur. Fakat Portland çimentosunun 1,2 ve 7 günlük basınç dayanım değerlerini geçememiş, 28 ve 90 günlük dayanım değerlerini geçmiştir [29].

Zeolitin çimentoda katkı olarak kullanılabilirliğini araştıran başka bir çalışmada ise; Portland çimento ağırlığının % 5, % 10, % 20 ve % 40'ı kadar klinoptilolit ikamesi ile dört katkılı çimento numunesi hazırlanmıştır. Tüm klinoptilolit katkılı çimentoların 1, 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri Portland çimentosundan düşük olurken; 28 günlük dayanımda tersi sonuç elde edilerek dört numunenin basınç dayanım değerleri yüksek olmuştur, fakat en yüksek değer % 20 zeolit ikameli çimentoda elde edilmiştir [30].

Yapay puzolanlar, kalsinasyon işlemi ile elde edilen puzolanlardır. Bunlar çoğunlukla endüstri atığı maddelerdir. Metal silis ve silis alaşımlarının üretim atığı silis dumanı, termal elektrik güç santrallerinin atığı uçucu kül, demir çelik endüstrisindeki font üretimi atığı cüruf gibi malzemeler bu grubu dahil edilmektedir.

Uçucu kül, termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılan pulverize kömürün yakılması sonucu, bacalardan çıkan külün toplanması ile elde edilen puzolanik özelliğe sahip ince inorganik bir malzemedir. Mikro yapısı incelendiğinde genellikle küresel tane şeklinde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Kül partiküllerinin tane boyu 0,5-200 mikron, spesifik yüzeyi alanı $1000-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, özgül ağırlığı ise uçucu külün şekline, rengine ve kimyasal içeriğine bağlı olarak 1,3 ile $4,8 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Uçucu külün puzolanik aktivitesi inceliğine, içerdiği kalsiyum miktarına, spesifik yüzey alanına ve tane boyut dağılımına bağlıdır. Yapılan araştırmalarda, uçucu külün inceliği arttırıldığında puzolanik aktivitesinin önemli miktarda arttığı, fakat özgül yüzey alanı $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ı aştığında önemli bir etkisinin olmadığı bulunmuştur. Çimentodan daha koyu renkte, ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir [9, 31].

Uçucu külün kimyasal bileşimi ve özellikleri; yakıt olarak kullanılan kömürün yapısı ve bileşimine, elde edildiği yakılma işlemine bağlı olarak değişir. Örneğin, antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimentoda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Çimento üretiminde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için uçucu küllerin çok ince olması, Al_2O_3 ve SiO_2 açısından zengin olması, alkali içeriğinin düşük olması ve yanmamış karbon içeriğinin %3'den az olması gerekir. İri taneli uçucu küllerden istenen çimentoyu üretmek için jips ve klinker ile öğütmeye tabi tutulması gerekmektedir. Kül kalitesive özelliklerine bağlı olarak uçucu küllü çimento üretiminde % 10 - 30 oranında, katkılı çimento üretiminde de diğer katkı maddeleri ile birlikte toplam % 19 oranında katılabilmektedir [19].

Uçucu küller, F tipi ve C tipi olarak sınıflandırılır. F sınıfı uçucu küllerde $Si_2O+Al_2O_3+Fe_2O_3$ yüzdesi %70'den fazladır ve CaO miktarı %10'un altındadır. Düşük CaO içeren küllerin betonun sülfata karşı dayanıklılığını arttıran etkili bir katkı maddesi olduğu bilinmektedir. C sınıfı uçucu küllerde ise $Si_2O+Al_2O_3+Fe_2O_3$ %50'den fazladır ve CaO miktarı %10'un üzerindedir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özelliği de gösterir, çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, hidratasyon ısını azaltır, çimento hamurundaki boşlukları doldurur, hacim değişikliğini azaltır, betona dayanıklılık kazandırır, sülfat dayanıklılığını artırır, alkali agrega reaksiyonuna karşı dayanıklılığı iyileştirir ve ekonomi sağlar. Türkiye'de aktif olarak çalışan 12 adet termik santral vardır. Ancak, bunlardan sadece 1 tanesinden (Çatalağzı Termik Santrali) F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir. Ülkemizdeki yıllık uçucu kül üretim kapasitesi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır [31-33].

Uçucu külün çimento içine katıldığındaki etkisini anlamak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin Wu'nun yaptığı çalışmada C ve F sınıfı uçucu küller, çimento ağırlığının % 20 – 40 – 60 – 80'i oranında çimentoya ikame edilmiştir. 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde; C sınıfı uçucu kül en iyi dayanımı % 40 ikamesinde verirken, F sınıfı uçucu kül % 20 ikamede vermiştir [34].

Şengül ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada ise; bilyalı değirmende farklı sürelerde öğütülerek Blaine değeri 222 m²/kg dan 604 m²/kg'a kadar değişen 5 farklı incelikte ağırlıkça %30 uçucu kül içeren harç karışımlarının basınç dayanımları incelenmiştir. Numunelerde uçucu kül inceliği arttıkça basınç dayanımları da artış göstermiştir. Örneğin; 28. günde Blaine değeri 222 m²/kg olan külden oluşan karışımın basınç dayanımı 33,5 MPa iken, inceliği 604 m²/kg olan karışımın basınç dayanımı 50,7 MPa'a olmuştur [32].

Uçucu kül ve trasın birlikte çimentoya katıldığındaki etkisini inceleyen başka bir çalışmada ise; % 40 oranında uçucu kül ve % 40 oranında tras sabit tutularak üç grup karışım hazırlanmıştır. Birinci karışım 45 µ elek üstü değerleri, ikinci karışım Blaine değerleri eşitlenmiş, üçüncü ve son karışım ise tras ve uçucu kül bilyalı değirmende 15 dakika öğütülmüştür. Hazırlanan bu üç karışımın 2, 7, 28, 90 ve 360 günlük basınç değerlerindeki değişime incelenmiş ve en yüksek dayanımı 3. grupta bulunan ve en yüksek Blaine değerine sahip uçucu kül katkısı ile üretilen numune vermiştir [35].

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal bileşimleri ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özelliklere sahip olduğunun belirlenmesiyle birlikte dünyada 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu malzemeyi içeren bağlayıcıların ticari olarak üretimine başlanmıştır. Yüksek fırın cüruflarının gerek Portland çimentosu hammaddesi gerekse mineral katkı maddesi olarak kullanılması, sırasıyla 1883 ve 1892 yıllarına rastlamaktadır. Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde değişik isimlerle yüksek fırın cürufu içeren çimentolar üretilmekte ve kullanılmaktadır.

Tüm cüruflar arasında çimento sektöründe en önemlisi ve en yaygın kullanıma sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üzerinde yer alır. Demir filizi, kok ve kireç taşının yanma sonrası artıklar yüksek fırın cürufunu meydana getirirler. Oluşum sıcaklığı 1400- 1600°C'dir [36, 37].

Yüksek fırın cürufu yavaş soğutulduğu takdirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle ya hiç kullanılmaz ya da yol stabilize malzemesi olarak kullanılabilir. Hızlı soğutma uygulaması sonucunda ise granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan camsı yapıda cüruf elde edilir. Granüle yüksek fırın cürufu bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Erimiş haldeki cüruf yüksek fırından çıktığında hızlı olarak soğutulduğu zaman akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engeller ve camsı yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Granüle yüksek fırın cürufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik özellik göstermekte ve çimento endüstrisinde kullanılabilir [38, 39].

Cürufllu çimentoyla üretilmiş betonun erken dayanımı, cürufun inceliğine ve miktarına bağlı olarak Portland çimentolu betona göre daha düşük olurken; son dayanımda ve işlenebilirlikte, daha özenli ve uzun süreli kürlenme ile Portland çimentodan üretilmiş betona göre önemli artış sağlamaktadır. Genel olarak %70'in üstündecüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içeren çimentolarda ise daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır. Cürufllu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin dahaince, buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Aynı öğütmesonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur.

Dayanıklılık bakımından ise, cüruf kullanımı son derece yararlıdır. Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda cürufllu çimento ile üretilen betonun zararlı kimyasal etkiler altında performansının yüksek olduğu görülmektedir [40].

Aynı 28 günlük dayanımın elde edildiği, birbirine çok yakın inceliklerdeki (3000 cm²/g) bir Portland çimentosuyla %65 cüruf içeren bir cürufllu çimento karşılaştırıldığında; erken yaşlarda Portland çimentosunun, geç yaşlarda ise cürufllu çimentonundaha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir [41].

Dorum ve ark. yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufunun katkılı çimento özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için çimento ağırlığının % 20'si oranında yüksek fırın cürufu çimento yerine ikame edilmiştir. Hazırlanan bu katkılı çimentonun Portland çimentosuna göre su ihtiyacı, Blaine değerlerine bağlı olarak azalmış, priz süresi uzamıştır [42].

Başka bir çalışmada ise, % 70 klinker ile % 30 cürufun birlikte ve ayrı ayrı öğütüldüklerindeki özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; klinker ve cürufun ayrı öğütüldüğü çimentonun inceliği $363 \text{ m}^2/\text{kg}$, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 42,5 ve 64,2 MPa olmuştur. Klinker ve cürufun birlikte öğütüldüğü çimentonun inceliği $360 \text{ m}^2/\text{kg}$, 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 40,1 ve 61,6 MPa olmuştur [43].

2.2.2 Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum metalinin veya ferro-silisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen endüstriyel bir atıktır. Silis dumanı silisyum metali ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında, yüksek saflıktaki kuvarsın yaklaşık 2000°C sıcaklıkta indirgenmesi ile elde edilmektedir. Çok büyük miktarda (%85-98) silika içeren amorf yapıya sahip olan ve boyutları Portland çimentosu tanelerine göre yaklaşık 100 kat daha küçük olan silis dumanının ortalama tane çapları $0,1 - 0,2 \mu\text{m}$ civarındadır. Aktivitesi çok yüksek olan mükemmel bir puzolandır. Silis dumanının birim ağırlığı $130-430 \text{ kg/m}^3$, özgül ağırlığı ortalama $2,2\text{g/cm}^3$, gri renkli, düzgün yüzeyli ve küreseldir [36, 44].

Silis dumanı katkılı çimentolar ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık istenen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yüksek dayanım istenen yerinde dökülmüş veya prefabrik beton elemanları, ağır aşınmaya veya zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları ve her türlü yüksek performanslı beton yapı sayılabilir[45].

Pandey ve ark. yaptığı çalışmada uçucu kül ve silis dumanının çimentoya birlikte katıldıklarındaki özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için silis dumanının çimentodaki oranı % 5'te sabit tutulmuş, uçucu külün çimentodaki oranı ise % 5 – 15 – 25 olarak ayarlanmıştır. Bu üç numunenin Blaine değerleri uçucu kül miktarı arttıkça yükselmiş, priz başlangıç ve bitiş süreleri en fazla % 15 uçucu kül katkılı çimentoda olmuş ve en yüksek basınç dayanımı değerleri yine % 15 uçucu kül katkılı çimentoda elde edilmiştir [46].

2.2.3 Kalker

Geçmişte mineral katkı olarak çoğunlukla puzolanik özellik gösteren malzemeler kullanılırken, kalker katkısı çimentoda genellikle minör bileşen olarak ağırlıkça %5'lik kullanım oranı ile sınırlandırılmıştı. Ancak, asıl ilave bileşen olarak kalkerin kullanıldığı katkılı çimentoların (CEM II/A-L, CEM II/B-L) üretimi son yıllarda artmıştır. Kalker katkısı aynı zamanda CEM II sınıfı Portland kompoze çimento üretiminde, minör ilave bileşen olarak da kullanılmaktadır.

Katkılı çimento üretiminde kullanılacak kalkerin CaCO_3 oranı en az %75 olmalıdır. Kalkerin kil içeriği de %1,2'yi geçmemelidir. Kalker, hammadde safsızlıklarına göre bünyesinde organik karbon bulundurabilir. Fakat bünyesinde %0,5'ten fazla organik karbon bulunursa çimento katkısı olarak kullanılamaz.

Literatürde kalker katkısının, çimentonun Blaine değerini artırırken, tane boyut dağılımını daha geniş bir aralığa yaydığına dair bulgular mevcuttur. Kalker katkılı çimentolarda kalker ikame oranı arttıkça, hacim sabitliğinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak kalker katkılı çimentolarla hazırlanan harçların, kalker oranı artışı ile su emme oranlarının arttığı rapor edilmiştir. Açık boşluk oranı kalker oranı artışı ile artmakta ve emilen su, bir miktar geri dönüşümlü genişlemeye neden olmaktadır.

Kalker ikame oranı %5 olan çimentolarda hidrasyon ısısının, hidrasyonun ilk zamanlarındaki gelişimi sadece Portland çimentosu ile üretilen örneklerle göre daha hızlıdır. Kalkerin basınç dayanımına doğrudan bir katkısı bulunmamaktadır. Yalnızca dolgu yapıcı vazife görür. Puzolanik bir özelliğinin olmadığı kabul edilir [47].

Tosun ve ark. yaptığı çalışmada kalker oranının artışıyla, tane boyut dağılımının daha geniş bir aralığa yayıldığı, Blaine değerinin artmasına rağmen kalker oranı artışı ile incelik (32 μm elek üstü) değerinin de arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, kalker miktarının artışıyla birim hacim ağırlıklarda azalma, su emme değerlerinde artma ve tüm yaşlardaki basınç dayanımında düşüş görülmüştür [48].

3. KULLANILAN MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Doğal kaynakların sınırsız olmadığı, dikkatlice kullanılmadığı takdirde bir gün bu kaynakların tükeneceği şüphesizdir. Kaynak israfını önlemenin yanında, hayat standartlarını yükseltme çabaları ve ortaya çıkan enerji krizi ile bu gerçeği gören gelişmiş ülkeler atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için yöntemler aramış ve geliştirmişlerdir. Aynı gerçeğin ışığı altında Avrupa Ekonomik Topluluğu üye ülkelerde atıkların geri kazanılması şartını getirmiştir.

Kalkınma çabasında olan ve ekonomik zorluklarla karşı karşıya bulunan gelişmekte olan ülkelerin de tabii kaynaklarından uzun vadede ve maksimum bir şekilde faydalanabilmeleri için atık israfına son vermeleri, ekonomik değeri olan maddeleri geri kazanma ve tekrar kullanma yöntemlerini araştırmaları gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında, dünyada insan kaynaklı CO₂ salınımının yaklaşık % 5'inden sorumlu olan çimento sektöründe kullanılabilecek katkı maddeleri ve bu katkı maddelerinin kullanımı ile geri dönüşüm sağlanırken yüksek dayanımın da elde edildiği karışım miktarları araştırılmıştır.

3.1 Kullanılan Malzemelerin Karakterizasyonu Amacıyla Yapılan Deneyler

Ülkemizde, Türk Standartları Enstitüsü 2002 yılında yürürlüğü koyduğu TS EN 197-1 'Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri' standardı ile Avrupa ülkelerinin çoğunluğunda geçerli olan EN 197-1 standardını doğrudan Türk standardı olarak kabul etmiştir. TS EN 197-1'de yer alan çimentolar için öngörülen fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.1'de, kimyasal özellikler ise Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Ayrıca, ürün standartında belirtilen özelliklerin tayin edilebilmesinde gerekli deneylerin açıklamaları Türk Standartlarında mevcuttur [17].

3.1.1 Çimentonların Fiziksel ve Mekanik Analizleri

Çimentonun fiziksel özelliklerini belirlemek için priz başlama ve bitiş süresi tayini, hacim genişmesi tayini ve incelik tayini, mekanik özelliklerini belirlemek için dayanım tayini yapılmaktadır.

Çizelge 3.1: TS EN 197-1’de yer alan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri.

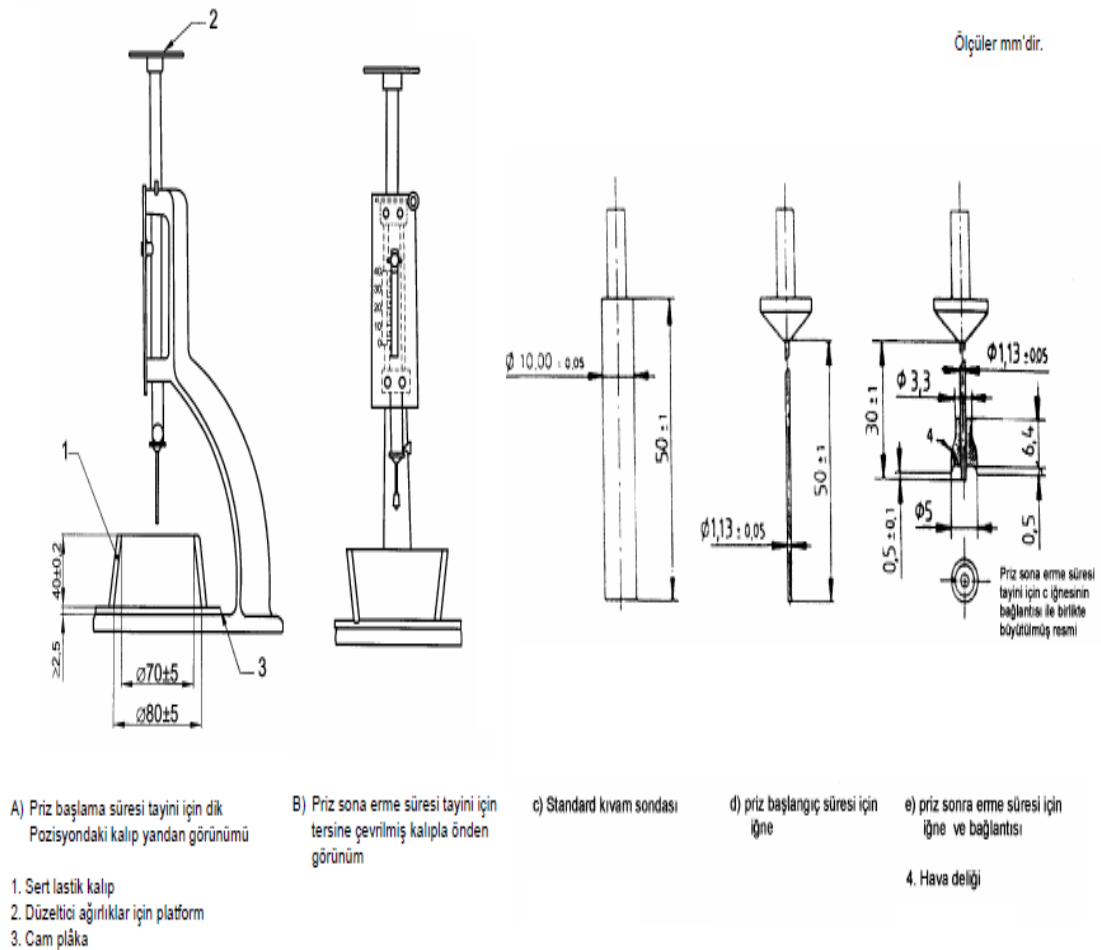
Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				PrizBaşlama Süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥75	
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10,0
42,5 R	≥ 10,0	-				
52,5 N	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 10,0	-				

Çizelge 3.2: TS EN 197-1’de yer alan çimentoların kimyasal özellikleri.

Özellik	Deney Kaynağı	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	≤ % 5,0
Çözünmeyen Kalıntı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	≤ % 5,0
			32,5 N32,5 R42,5 N	≤ % 3,5
Sülfat Miktarı (SO ₃ olarak)	EN 196-2	CEM IC CEM V	42,5 R52,5 N52,5 R	≤ % 4,0
		CEM III	Hepsi için	≤ % 4,0
KlorürMuhtevası	EN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	≤ % 0,10
PuzolanikÖzellik	EN 196-5	CEM IV	Hepsi için	Deneyi sağlar

3.1.1.1 Standart kıvam, priz süresi ve genleşme tayini

Standart kıvam, Vicat aletinin sondasının pastanın üst yüzey seviyesinden serbest bırakıldığı andan itibaren yarım dakika içinde belli bir seviyeye (tabandan yükseklik olarak 6 ± 1 mm) kadar inip bu seviyede kalmasını sağlayan pasta kıvamıdır. Bu deney için Vicat aleti kullanılır. Şekil 3.1 (a) ve (b)'de gösterilen vicat cihazı, Şekil 3.1 (c)'de gösterilen sonda ile kullanılır. Sonda etkili uzunluğu 50 ± 1 mm ve çapı $10 \pm 0,05$ mm olan dik silindir şeklinde korozyona dayanıklı metalden yapılmış olmalıdır. Hareketli parçaların toplam kütlesi 300 ± 1 g olmalıdır. Hareketleri, önemli derecede sürtünme oluşturmaksızın tam düşey olmalı ve eksenleri sondanın eksenine ile çakışmalıdır. Deneye tabi tutulan çimento pastasının içine konduğu Vicat kalıbı, sert lastikten yapılmış olmalıdır. Vicat kalıbı, derinliği $(40,0 \pm 0,2)$ mm; üst iç çapı (70 ± 5) mm ve alt iç çapı (80 ± 5) mm olan kesik koni şeklindedir. Vicat kalıbı aynı zamanda yeterince sağlam olmalı ve vicat kalıbından daha geniş olmak üzere, en az 2,5 mm kalınlığında düz cam taban plakası bulunmalıdır [49].



Şekil 3.1 : Çimentonun standart kıvam ve priz süresi için Vicat cihazı.

1 g doğrulukla 500 g çimento tartılır. Bir miktar su, mesela 125 g, karıştırıcı kabına tartılır veya dereceli mezürle veya büretle ölçülerek karıştırıcı kabına konur. Çimento ve su ilave edilirken, çimento veya su miktarında herhangi bir kayba meydan vermeden dikkatlice koyulur. İlave etme süresi 5 saniyeden az, 10 saniyeden fazla olmamalıdır. İlavenin tamamlandığı an sonraki ölçümler için sıfır zamanı olmak üzere kaydedilir. Şekil 3.2’de gösterilen karıştırıcı hemen 90 saniye süreyle düşük hızda çalıştırılır. 90 saniye sonunda 15 saniye durdurulur ve bu arada uygun bir kazıyıcı ile karıştırıcı kabının iç çeperlerine yapışan çimento pastası sıyrılır ve karışıma eklenir. Karıştırıcı tekrar 90 saniye yüksek hızda çalıştırılır. Karıştırıcının toplam çalışma süresi 3 dakika olmalıdır.

Çimento pastası daha önce hafifçe yağlanmış taban plakası üzerine yerleştirilmiş Vicat kalıbına fazla miktarda olmak üzere hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon yapmadan hemen yerleştirilir. Kalıbın üstüne taşan çimento pastası fazlalığı düzgün kenarlı bir spatül ile yavaş testere hareketi uygulanıp sıyrılarak düzgün bir yüzey elde edilir. Deney için Vicat cihazına takılan sonda Şekil 3.1 (c), taban plâkasının üzerine kadar indirilir ve taksimatlıgösterge üzerinde sıfır okunacak şekilde ayarlanır. Sonra sonda yukarı kaldırılarak duruş konumuna alınır. Pastanın seviyesi ayarlandıktan sonra, hemen Vicat kalıbı ve taban plakası Vicat cihazına yerleştirilir ve sondanın altında sondanın pozisyonuna göre merkezlenir. Sonda pasta ile temas edinceye kadar yavaşça indirilir. Hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için sonda bu durumda 1-2 saniye tutulur. Sonra hareket eden parçalar çabuk bir şekilde serbest bırakılır ve sondanın kendi ağırlığı ile düşey olarak pastanın merkezine girmesi sağlanır. Sondanın serbest bırakılması sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından 4 dakika sonra olmalıdır.

Sondanın batması tamamlandıktan sonra veya sondanın serbest bırakılmasından 30 saniye sonra (hangisi önce ise) okuma yapılmalıdır. Sondanın alt yüzü ile taban plakası arasındaki mesafeyi veren değer okunur ve bu değer, çimentonun kütlesicinsinden yüzde olarak ifade edilmek suretiyle, pastanın su muhtevası ile birlikte kaydedilir. Sonda her batırılıştan sonra hemen temizlenir. Deney, değişik miktarlarda su içeren pastalarla, sonda ve taban plakası arasındaki mesafe (6 ± 1) mm oluncaya kadar tekrar edilir. Standart kıvama gelen pastanın su miktarı % 0,5’lik doğrulukla standart kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilir.



Şekil 3.2 :Karıstırıcı.

Priz, bağlayıcı maddelerin katılaşması veya plastik şekil değişimi yapma yeteneğini kaybetmesidir. Çimento su katılarak hamurun oluşturulduğu andan itibaren, hamurun akıcılığını ve plastikliğini kaybettiği ana kadar geçen süre priz başlama süresi olarak tanımlanır. Prizin sona erme süresi, çimento ve suyun birleştirildiği zaman ile çimento hamurunun katılaştığı (sertleşmenin başladığı) zaman arasındaki süredir.

Çimentonun priz süresine sıcaklık, karıştırma suyu miktarı ve rutubet etki etmektedir. Sıcak ortamlarda hidrasyon arttığından priz süresi kısalırken, sıcaklığın düşmesiyle priz süresi uzamaktadır. Çimentonun fazla su ile yoğrulması, priz süresini uzatırken, çimentonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Rutubet ise, prizin başlamasını geciktirir, priz süresini uzatır. Normal Portland çimentolarında prizin 1 saatten önce başlamaması, 10 saatten önce tamamlanması istenir.

TS EN 196- 3'a göre priz başlama ve sona erme süresi deneyi için laboratuvar sıcaklığı $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de tutulmalı ve bağıl nem % 65'ten az olmamalıdır. Deneyde kullanılan çimento miktarının % 25- 30'u kadar su alınabilir. 500 g çimento için % 25-30 oranında su olduğuna göre 125 gram ile 150 gram arasında su kullanabilir. Normal Portland çimentolarında %25-30 olan bu oran katkılı çimentolarda % 36'ya kadar yükselir [50].

Çimentoların priz başlangıç ve bitiş süreleri de vicat aleti ile yapılan ile belirlenir. Bu deneyde, Vicat halkası içine düzgün bir şekilde yerleştirilen çimento harcının üzerine çelikten yapılmış silindir şeklinde, etkili uzunluğu 50 ± 1 mm ve çapı $1,13 \pm 0,05$ mm olan Vicat iğnesi belirli bir yükseklikten düşürülür. Batma miktarları ölçülür. Önceleri çok derine batan iğne, zaman geçtikçe yani çimento katılaştıkça daha az derine batar ve belirli bir süre sonra hiç batmaz. İğne ucunun kalıbın tabanından 35 mm uzaklıkta olması halinde priz başlamış demektir. İğne 0,5 mm battığı zaman ise priz sona ermiştir. Bu işlem elle yapılabildiği gibi otomatik olarak yapan cihazlarda mevcuttur.

Çalışmada kullanılan otomatik Vicat cihazı Şekil 3.3'te verilmektedir. Manuel olarak yapılan deneyde; Vicat aletinden sonda çıkarılıp iğne takılır, iğne halka içindeki hamurun üst yüzeyine dokunacak kadar indirilir ve yan taraftaki vida ile sıkıştırılır. Daha sonra vida gevşetilir ve iğnenin hamurun içine serbets olarak düşmesi sağlanır. İğne her 10 dakikada bir farklı noktalara batırılır. Her batırma işleminden sonra Vicat iğnesi temizlenmelidir.

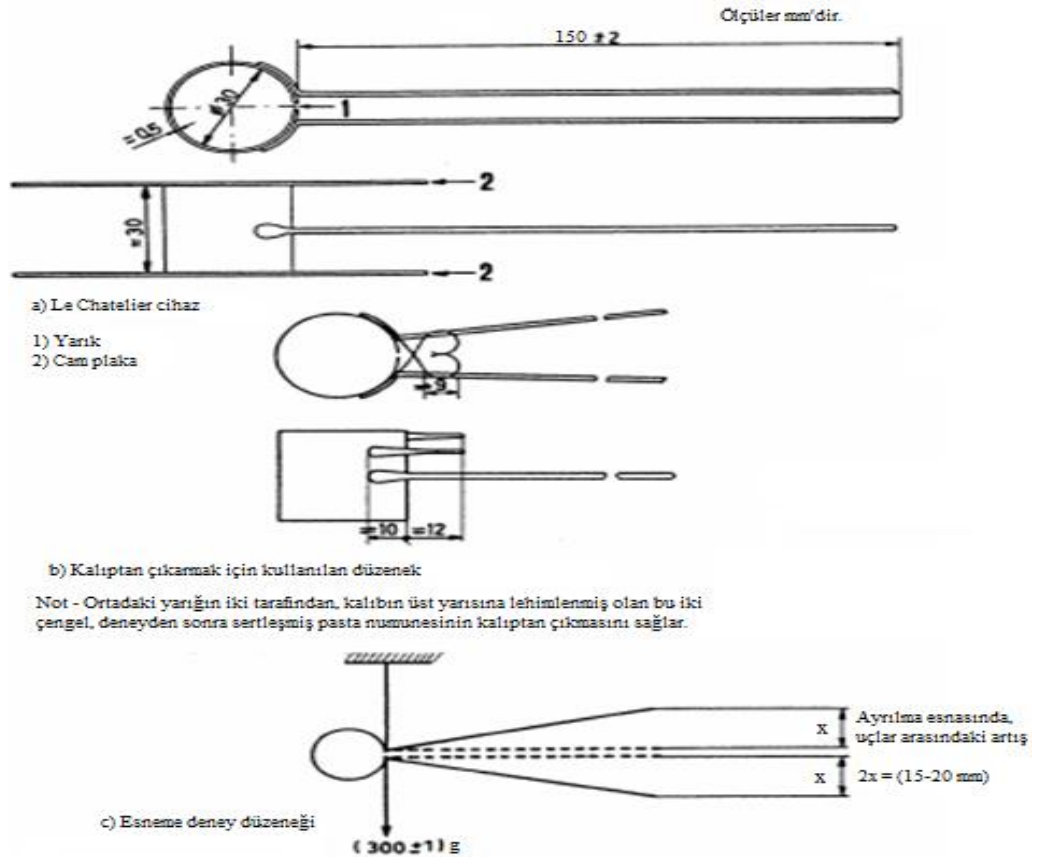


Şekil 3.3: Otomatik Vicat cihazı.

Hamura batan iğne cam levhaya 6 ± 3 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamış sayılır. Numune ile suyun karıştırıldığı andan prizin başladığı ana kadar geçen süreyi priz başlama süresi olarak kaydedilir. İğne yine aynı şartlarda fakat ikişer dakika ara ile batırılır. İğnenin hamura en çok 0,5 mm girebildiği kıvamda kadar batışlara devam edilir ve bu kıvamda priz sona ermiş sayılır. Numune ile suyun karıştırıldığı andan, prizin sona erdiği ana kadar geçen süreyi priz bitiş süresi olarak kaydedilir [49].

Otomatik Vicat cihazı ile yapılan deneylerde; standart kıvam deneyinde kullanılan Vicat halkası içindeki harç hamurunun üzeri düzeltilerek, Vicat cihazı içindeki numune haznelerine yerleştirilir. Otomatik Vicat cihazı 34 mm'ye kadar her 10 dakikada bir defa, 34 mm'den sonra her 2 dakikada bir defa iğneyi batırmak suretiyle analiz yapar. Hamura en çok 1 mm girebildiği noktadan sonra ise 3 kere daha batırarak kontrol eder ve analizi bitirir.

Çimento bileşiminde fazla miktarda serbest kireç ve magnezyum oksit bulunması halinde hidrasyon sırasında istenilmeyen hacim genişmesi meydana gelebilir. Çimentoların hacim genişmesi çubuk şeklinde gösterge uçları bulunan pirinçten yapılmış Şekil 3.4'te uygun boyutlarıyla verilen Le Chatelier cihazı ile tayin edilir. Kalıbın esnemesi, 300 gramlık bir ağırlık uygulandığında, çubuk şeklindeki göstergelerin uçları arasındaki mesafe, kalıcı deformasyon oluşturmaksızın $17,5 \pm 2,5$ mm olmalıdır. Her kalıp için alt ve üst plaka olmak üzere bir çift cam plaka bulunmalıdır. Plakalar kalıptan daha geniş olmalıdır. Kalıbın üzerini örtecek plaka en az 75 g olmalıdır, bu gereği karşılamak için ince bir plaka üzerine ilave küçük kütleler koyulabilir.



Şekil 3.4: Çimentoların genişleme tayini için Le Chatelier cihazı.

Şekil 3.5'te gösterilen, içine Le Chatelier numunelerinin doldurulacağı, ısıtıcı su kabı, su sıcaklığını $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'dan 30 ± 5 dakikada kaynama sıcaklığına ulaştıracak şekilde olmalıdır. Deney aynı çimento pasta karışımından aynı anda iki numune üzerinde yapılır. Standart kıvamda bir çimento pastası hazırlanır. Hafif yağlanmış Le Chatelier kalıbı yine hafif yağlanmış olan plakanın üzerine konur ve sıkıştırmaksızın veya vibrasyon yapmaksızın hemen pasta ile doldurulur, tercihe göre sadece elle veya düz kenarlı bir spatül kullanarak, üst yüzeyin seviyesi ayarlanır. Doldurmasında kalıbın yarık kısmının açılmaması için parmaklarla hafif sıkılır veya uçlar bağlanır veya uygun birlastik bantla tutturulur. Kalıbın üstü hafif yağlanmış plaka ile örtülür, gerekirse ilave kütle eklenir ve bütün cihaz hemen rutubet dolabına konur. Burada $24 \pm 0,5$ saat $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 'da ve % 98'den az olmayan bağıl nemde muhafaza edilir.

$24 \pm 0,5$ saatlik süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe (A) en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülür. Sonra kalıp 30 ± 5 dakika içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılır ve su banyosu kaynama sıcaklığında 3 saat ± 5 dakika bekletilir. Kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe (B), en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülebilir. Kalıbın $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'a kadar soğuması beklenir. Gösterge uçları arasındaki mesafe (C), en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak ölçülür. Her numune için (A) ve (C) ölçümleri kaydedilir ve (C-A) farkı hesaplanır. (C-A)'nın iki değerinin ortalaması en yakın 0,5 mm'ye yuvarlatılarak hesaplanır.



Şekil 3.5: Isıtıcı su kabı.

24 saat normal kürde, daha sonra 4 saat kaynamakta olan su içinde bekletilen çimento hamurunda meydana gelen genleşme aletin çubukları arasından mm olarak ölçülür. Toplam genleşmenin çimentolarda 10 mm'yi geçmemesi istenir [50].

3.1.1.2 Dayanım tayini

Çimentoların, standart kum ve belli karışım oranları ile standart kalıplar ve kür koşullarında yapılan 28 günlük basınç mukavemetleri çimento kalitesini belirleyen en önemli kriteri oluşturur. Bu mukavemet değerleri çimento tipini belirleyen sembol olarak kullanılır. Avrupa normunda ve Türk standartlarında 28 günlük standart basınç mukavemeti için sınır değeri olarak 32,5 MPa, 42,5 MPa ve 52,5 MPa olmak üzere üç sınıf belirlenmiştir [51].

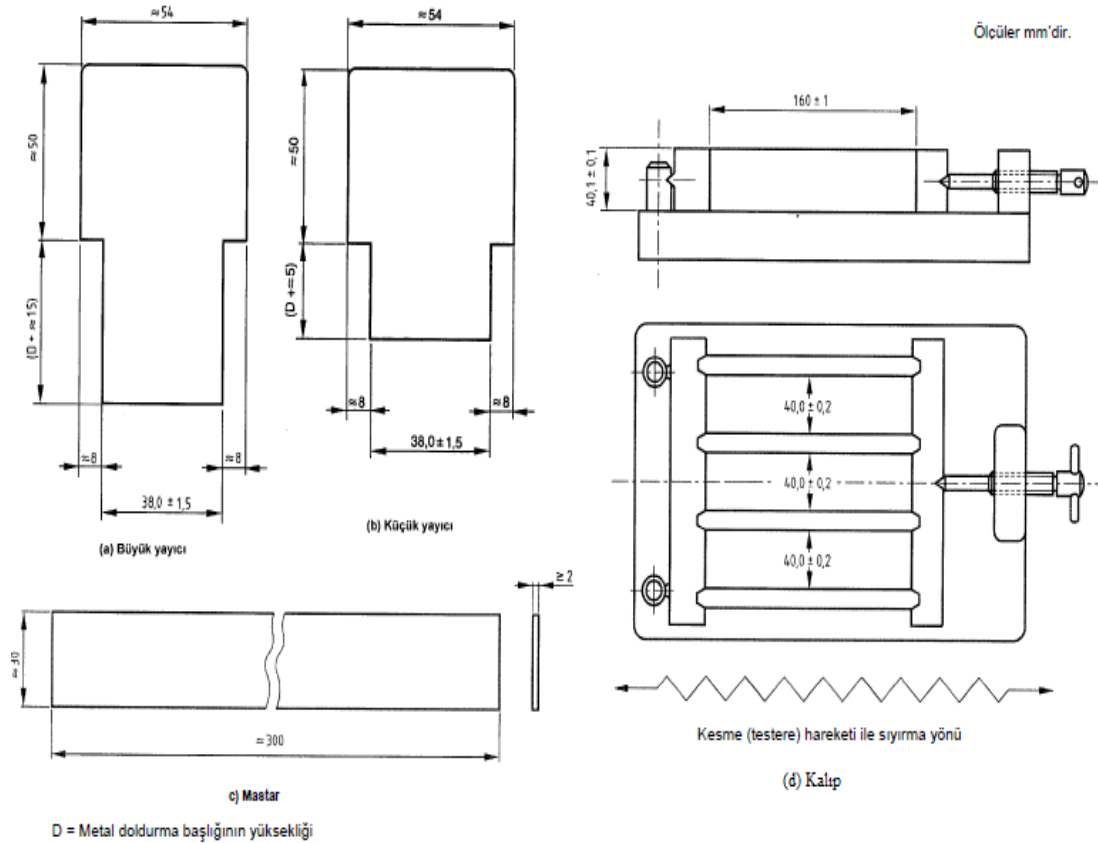
TS EN 196 - 1 standardı, boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm olan prizma şekilli deney numunelerinin basınç ve eğilme dayanımlarının tayinini kapsar. Numuneler, kütlece 1 kısım çimento, 3 kısım CEN Standart Kumu ile 0,5 kısım sudan (su/çimento oranı 0,50) oluşan taze harcın kalıplara yerleştirilmesi ile oluşturulur. 450 g çimento, 1350 g kum ve 225 g su ile oluşturulan karışım üç deney numunesi hazırlanması için yeterlidir.

Karıştırma kabına ilave edilen çimento ve su mekanik karıştırıcıda ilk aşamada düşük hızda 30 saniye karıştırıldıktan sonra kumun tamamı kesintisiz bir şekilde kaba eklenir ve bu sefer yüksek hızda 30 saniyelik bir karıştırma işlemi daha gerçekleştirilir. Karıştırıcı durduktan sonra, kabın çeperleri ve tabanına yapışan harç bir sıyrıcı ile sıyrılıp kabın ortasında toplanır. Harç 90 saniye bekletildikten sonra tekrar yüksek hızda 60 saniye daha çalıştırılır. Harç hazırlandıktan sonra kalıplara yerleştirilir.

Kalıplar, en kesitleri 40 mm x 40 mm ve uzunlukları 160 mm olan üç adet prizma şekilli numunenin aynı anda hazırlanabilmesi için üç adet yatay bölmeden oluşmalıdır. Kalıp, et kalınlığı en az 10 mm olan çelik levhalardan yapılmış olmalıdır. Kalıbın iç yüzeylerine ince film tabakası halinde kalıp yağı sürülmelidir. Kalıplar tabla üzerine, kalıp bölmelerinin boyuna kenarları, kollarla aynı yönde ve kamın dönme eksenine dik olacak konumda yerleştirilmelidir. Kalıbın konumu, uygun referans işaretler konulması suretiyle, ortadaki kalıp bölmesinin merkezi, çarpma noktasının tam üzerinde olacak şekilde ayarlanmalıdır. Çimento numunelerini hazırlamada kullanılan yayıcıların, masterın ve kalıbın tasarımı Şekil 3.6'da gösterilmektedir [52].

Harç, her bir kalıp bölümüne iki tabaka halinde doldurulur. Şekil 3.6 (a)'da ölçüleri gösterilen büyük yayıcı çıkıntı kısımları harç doldurma başlığının üst yüzeyine oturtularak her kalıp bölümü boyunca ileriye ve geriye doğru hareket ettirilerek, birinci harç tabakası aynı kalınlıkta olacak şekilde yayılır. Ardından birinci harç tabakası, sarsma cihazı 60 defa düşürülerek sıkıştırılır.

Şekil 3.7'de gösterilen sarsma cihazı, tablanın merkezinden yaklaşık 800 mm uzaklıktaki mile, iki adet hafif kolla sağlam şekilde bağlanmış olan dikdörtgen bir tabladan ibarettir. Çalışma esnasında tabla, kam (eksantrik mil kılavuzu) vasıtasıyla yukarı doğru kaldırılır ve alt yüzeyinde yer alan küresel yüzeyli bir çıkıntı parçası durdurucuya çarpmadan önce $15 \pm 0,3$ mm yükseklikten serbest düşürülür. Kam, saniyede bir devir oluşturacak şekilde sabit bir hızda 60 ± 3 saniyelik bir sarsma periyodunda tam olarak 60 düşüş yapmalıdır.



Şekil 3.6 :Deneyde kullanılan tipik yayıcılar, master ve kalıp ölçüleri.

İkinci harç tabakası, kalıp seviyesinden yukarıda olacak şekilde birinci tabakanın üzerine doldurulur, Şekil 3.6 (b)'de boyutları verilen küçük yayıcı kullanılarak yayılır ve sarsma cihazına 60 düşüş daha yaptırılarak sıkıştırılır. Kalıp itina ile

sarsma tablasından alınır ve harç doldurma başlığı çıkartılır. Harcın kalıptan taşan kısmı, vakit geçirmeksizin, düşey şekilde ancak sıyırma yönüne doğru hafifçe eğimli olarak tutulan Şekil 3.6 (c)'de gösterilen metal bir masterla sıyırılarak alınır. Master, ikiye doğru kesme hareketi yaptırılarak yavaşça çekilir. Numune yüzeyinin daha düzgün hale getirilmesi için, aynı sıyırma işlemi, masterla daha dar açıyla tutularak tekrarlanır. Numuneler kalıptan çıkartılmaksızın sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$, bağıl nem oranı en az % 90 olan rutubetli kür odasında ya da büyük bir kabin içerisinde 24 saat boyunca bekletilir ve kalıptan çıkarıldıktan sonra, dayanım deneyine tabi tutuluncaya kadar sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$ olan su içinde tutulur.



Şekil 3.7 :Sarsma cihazı.

Numuneler, gerekli yaşa (1, 2, 7 ve 28 gün) ulaşıncaya kadar içerisinde tutuldukları sudan çıkartılır. Prizma şekilli numune parçaları, yatay konumda yükleme plakaları arasına yerleştirilir. Yük, tüm deney boyunca, prizma kırıluncaya kadar $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ sabit hızla uygulanır. Göstergeden okunan değer yükleme plakalarının alanına (40mmx40mm) bölünerek numunenin basınç dayanım MPa cinsinden bulunmuş olur. Basınç dayanımını bulmada kullanılan cihaz Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 :Basınç dayanımı tayini için kullanılan cihaz.

3.1.1.3 İncelik tayini

Çimento inceliği, toz çimento tanelerinin ortalama boyutunu ifade eder. İnceliğin yüksek olması, çimento tanelerinin daha küçük boyutlara sahip olacak şekilde üretildiğini gösterir. Toz çimento tanelerinin çapı 1-200 μm arasında değişiklik gösterir. TS EN 196 – 6 çimento inceliğinin, eleme ve hava geçirgenlik (Blaine) metodları ile bulunmasını tarif eder. Eleme metodunda 10 gramlık çimento numunesi 90 μm 'lik elekten elenir ve üzerinde kalan miktar belirlenir. Daha sonra bu işlem yeni bir 10 gramlık numune ile tekrarlanır ve üzerine kalan miktar belirlenir. Çimento kalıntısı, 1. ve 2. elemelerde elekte kalan malzeme miktarlarının ortalaması olarak % 0,1 yaklaşımla yüzde olarak hesaplanır. Eleme metodu, imalat prosesinin kontrolü için uygundur.

Hava geçirgenlik metodunun amacı, sıkıştırılmış bir çimento yatağından geçen sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesiyle çimentonun özgül yüzeyinin bulunmasıdır. Çimentonun özgül yüzeyi ne kadar büyükse çimento o kadar ince öğütülmüş demektir. Standart şartlar altında çimentonun özgül yüzeyi, sıkıştırılmış çimento yatağından geçen belirli bir hava miktarının geçtiği süre olan t , $\sqrt{t}$ ile orantılıdır. Deneyde kullanılan Blaine cihazı; manometre, hücre, piston, hücre yuvası ve delikli diskten oluşur. Kullanım kolaylığı nedeniyle çimento farikaları Şekil 3.9'da görülen otomatik Blaine cihazı kullanılmaktadır.



Şekil 3.9 : Blaine cihazı.

Blaine cihazı ile özgül yüzeyin bulunmasında, hücreye doldurulacak çimento numunesinin ağırlığını hesaplamak için numunenin özgül ağırlığı bilinmelidir. Çimentoların özgül ağırlığı tiplerine göre değişir. Normal Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,10-3,15 g/cm³ civarında iken, katkılı çimentolarda ise 2,90 g/cm³ civarındadır. Özgül ağırlığı bulmak için piknometre kullanılır. Bu çalışmada kullanılan Arşimet'in akışkan taşıması prensibini ve Boyle Kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulan otomatik piknometre Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Hücre kabının darasını alınarak ve 3/4'ü dolacak kadar çimento numunesi doldurularak 0,01 g hassasiyetli terazi ile tartılır ve uygun bir şekilde çimento numunesi sıkıştırılarak hücre yuvasına yerleştirilir. Parça ağırlığı bilinen numune hacmi, hava ile yer değiştirerek doğrudan ölçüm yapar ve bu işlem yalnızca 2-3 dakika sürer [53].



Şekil.3 10 : Özgül ağırlık tayininde kullanılan piknometre.

Özgül ağırlık bulunduktan sonra **(3.1)** eşitliği kullanılarak Blaine cihazı hücreesine doldurulacak numune miktarı hesaplanır.

$$m_1 = 0,5 \times \rho \times v \quad (3.1)$$

m_1 = Çimento yatağı elde etmek için gerekli çimento miktarı (g)

ρ = Çimentonun yoğunluğu (g/cm³)

v = Çimento yatağının hacmi (73,03 cm³)

m_1 , uygun bir şekilde sıkıştırılarak bir çimento yatağı oluşturulur. Delikli disk hücrenin tabanındaki çıkıntı üzerine yerleştirilir ve onun üzerine de kullanılmamış dairesel filtre kağıdı konulur. Filtre kağıdının delikli disk üzerini tamamen kaplaması için temiz bir çubukla düzeltilir. Çimento miktarı (m_1) dikkatlice hücreye yerleştirilir. Hücre çimento seviyesinin ayarlanması için tıklatılır. İkinci bir kullanılmamış filtre kağıdı düzeltilmiş çimento üzerine konur.

Piston, filtre kağıdı ile temas etmek üzere hücreye daldırılır. Piston nazikçe kapağın alt yüzü, hücre ile temas edinceye kadar preslenir. Piston yavaşça 5 mm geri çekilir, 90° döndürülür ve tekrar yatağın üzerine piston başlığı hücre ile temas edinceye kadar preslenir. Yatak böylece sıkıştırılmış olur ve geçirgenlik deneyi için hazırdır. Cihaza numunenin özgül ağırlığının değeri işlendikten sonra, manometredeki sıvı seviyesi uzun elektrotların altına düşürülür. Böylece cihaz numunenin Blaine değerini ölçmeye başlar. Cihazın sağ göstergesindeki zaman sayacı durduğunda Blaine ölçümü tamamlanmıştır ve sol göstergeden Blaine değeri okunur [54, 55].

3.1.2 Çimentoların Kimyasal Analizleri

Çimentonun ve hammaddelerinin içindeki dört temel oksit (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3), onlarla birlikte az miktarda bulunan alkaliler (Na_2O , K_2O) ve SO_3 , Cl gibi ikincil (minör) bileşenler, bunların yanında ppm ya da ppb mertebesinde bulunan arsenik, baryum, kadmiyum, nikel, krom, vanadyum gibi elementler bilinen analitik **Yaş Analiz Kimyasal Yöntemleri** ile ya da **X-Işını Floresans (XRF)** ile analiz edilirler. Bu temel analiz yöntemlerin yanında **Atomik Absorbsiyon** ve **Alev Fotometrisi** de kullanılır. Kimyasal analiz sonuçları hammadde karışımının hazırlanmasında, klinker minerallerinin hesaplanmasında, satın alınan malzemelerin uygunluğunun belirlenmesinde ve çimento kalitesinin denetlenmesinde kullanılır.

3.1.2.1 X-Işını Floresanas (XRF)

Örneklerin nicel ve nitel analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir analiz yöntemidir. Çok sayıda elementi hızla çözümleyebildiği için maliyet bakımından da çimento laboratuvarlarının vazgeçilmez aracı olmuştur. Hammadde, farin, klinker, çimento ve katkıların analizinde kullanılır. Analiz süresi bir dakika gibi kısa olmasına karşın örnek hazırlanması daha uzundur ve karmaşıktır.

Örnekler tablet yapılarak veya lityum tetraborat gibi bağlayıcılarla birlikte eritilerek, saat camı biçiminde, hazırlanır. Eritişle hazırlanıp yüzeyi parlatılan örnekler analizin daha doğru sonuç vermesini sağlar, ancak hazırlama daha uzun sürer, daha pahalıdır. Bu çalışmada kullanılan XRF Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 : XRF cihazı.

3.1.2.2 Radyoetkin Yöntemle Çevrimiçi (Sürekli) Elementel Analiz

Bu yöntemde besleme taşıma bantları üzerindeki malzemenin kimyasal analizi sürekli yapılmakta, sonuçları sisteme bütünleşik bir bilgisayar tarafından değerlendirilip bant hızı, malzeme alış kaynağı vb. değiştirilerek giren hammaddenin ön-homojenleştirilmesi de sağlanmaktadır. Çevrimiçi denetimle Kireç Doygunluk Katsayısının (LSF) hedeften sapması önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Bir nötron kaynağı üzerinden geçen malzemenin içindeki kalsiyum, silisyum, alüminyum elementleri kendilerine özgü enerji içeren gama ışınları yayarlar. Detektör gama ışınlarını sayar ve enerjisine göre sınıflar. Bu bilgiler özel yazılımlar tarafından değerlendirilip elementlerin derişimlerine dönüştürülür. Elementel bileşim de, önceden saptanan sınırlarla karşılaştırılarak, gereken işletme değişkenlerinin harekete geçirilmesine yol açar. Bu sürekli ve anında analiz tekniği sayesinde kalite denetim süreci de hız kazanır.

3.1.2.3 Mineralojik Analiz

Hammaddelerin, mineral katkıların ve klinker minerallerinin yapılarını incelemek için **X-Işını Kırınımı (XRD)** analiz yöntemi kullanılır. Klinker ve çimento içindeki serbest kirecin, alkali sülfatların nicel analizinde XRD kullanılır. Son zamanlarda klinker minerallerinin nitelik ve niceliklerinin en güvenilir ve hızlı biçimde belirlenmesinde kullanılan **Rietveld Yöntemi** de XRD analizini kullanır.

3.1.2.4 Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM)

Klinker minerallerinin nicel analizi için kullanılan görüntülü bir analiz yöntemidir. Kristal boyutlarının dağılımlarını gösteren sonuçları yanma ve soğutma koşulları hakkında yorum yapmakta yardımcı olur. Çok özel, zaman alan bir yöntemdir [56]. Yaş yöntemle kimyasal analiz yöntemi TS EN 196 – 2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu çalışmadaki numunelerin kimyasal içeriği, cam tabletler hazırlanarak XRF ile saptanmıştır. Cam tabletler eritiş cihazında hazırlanmıştır. Çimento numunesi ile eritiş maddesi (% 66 lityum tetraborat + % 34 lityum bromür) platin kroze de iyice harmanlandıktan sonra, tablette çatlak oluşumunu önleyici (lityum bromür) ilave edilir. Kroze Şekil 3.12’de gösterilen eritiş cihazında 13 dakika boyunca 4 kademedede (ön ısıtma, pre fusion, main fusion - 1, main fusion - 2) eritilir. Elde edilen karışım platin flakslara dökülerek 6 dakika boyunca 3 kademedede soğutulur. Soğuyan tabletin XRF’te okutulması sonucunda numunenin, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃ ve Cl yüzdeleri bulunur.



Şekil 3.12 :Eritiş cihazı.

3.1.3 Seramik Atıkların Öğünebilirlikleri

Çanakkale Kale Seramik fabrikasından alınan duvar karosu, yer karosu ve granit kırıklarının öğütülebilirliğini anlamak amacıyla bir sıra işlem yapılmıştır. İlk aşamada, çeneli kırıcıda kırma işlemi uygulanmıştır. Seramik atıkları pişmiş malzeme olduğu için, numuneler kırılırken kırıcı ağzından dışarı fırlamıştır. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar tipi çeneli kırıcı Şekil 3.13’te gösterilmektedir. Kırıcı sonrası malzemenin elek analizi yapılmıştır. Numunelerin elek analizi sonucu elde edilen boyut dağılımının verildiği Çizelge 3.3 incelendiğinde, her üç numunenin -5,6 +2,0 mm boyut aralığında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 : Laboratuvar tipi bilyalı değirmen.

5,6 mm, 2,0 mm, 1,0 mm ve 0,5 mm'lik elekler kullanılarak 5 boyut grubuna ayrılan seramik atıklarının eleküstleri, duvar karosu kırığı için Şekil 3.14'te, yer karosu kırığı için Şekil 3.15'te ve granit kırığı için Şekil 3.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 : Seramik atıklarının çeneli kırıcı sonrası boyut dağılımı.

Tane Boyutu (mm)	Duvar Karosu Kırığı		Yer Karosu Kırığı		Granit Kırığı	
	kg	%	kg	%	kg	%
+5,6	0,23	4,70	0,45	7,56	0,39	8,33
-5,6 +2,0	1,96	39,98	2,76	46,26	1,97	41,99
-2,0 +1,0	0,81	16,56	1,05	17,55	0,81	17,20
-1,0 +0,5	0,58	11,86	0,66	11,00	0,52	11,11
-0,5	1,32	26,89	1,05	17,63	1,00	21,37
Toplam	4,89	100,00	5,96	100,00	4,68	100,00



Şekil 3.14 : Elek analizi sonrası duvar karosu kırıkları.



Şekil 3.15 : Elek analizi sonrası yer karosu kırıkları.



Şekil 3.16 : Elek analizi sonrası granit kırıkları.

İkinci aşamada ise numuneler bilyalı değirmende öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerde kullanılan bilyalı değirmen Şekil 3.17’de, içindeki bilya sayısı ve ağırlıkları Çizelge 3.4’te verilmiştir. Duvar karosu, diğer iki malzemeye göre daha yumuşak bir malzeme olduğu için ilk olarak öğütülmüştür. Öğütme süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.17 : Laboratuvar tipi değirmen.

Duvar karosu kırığı bilyalı değirmende öğütüldükten sonra,boyut dağılımı yapılarak değirmen çıkışı malzemenin ortalama tane boyutu öğrenilmiştir. Bunun için,Şekil 3.18’de gösterilen,lazer difraksiyon – paralel ışın prensibi ile 0,1 μm – 8,750 μm aralığındaki kuru ve yaş numuneleri boyutlandırabilen,partikül analiz cihazı kullanılmıştır [57].

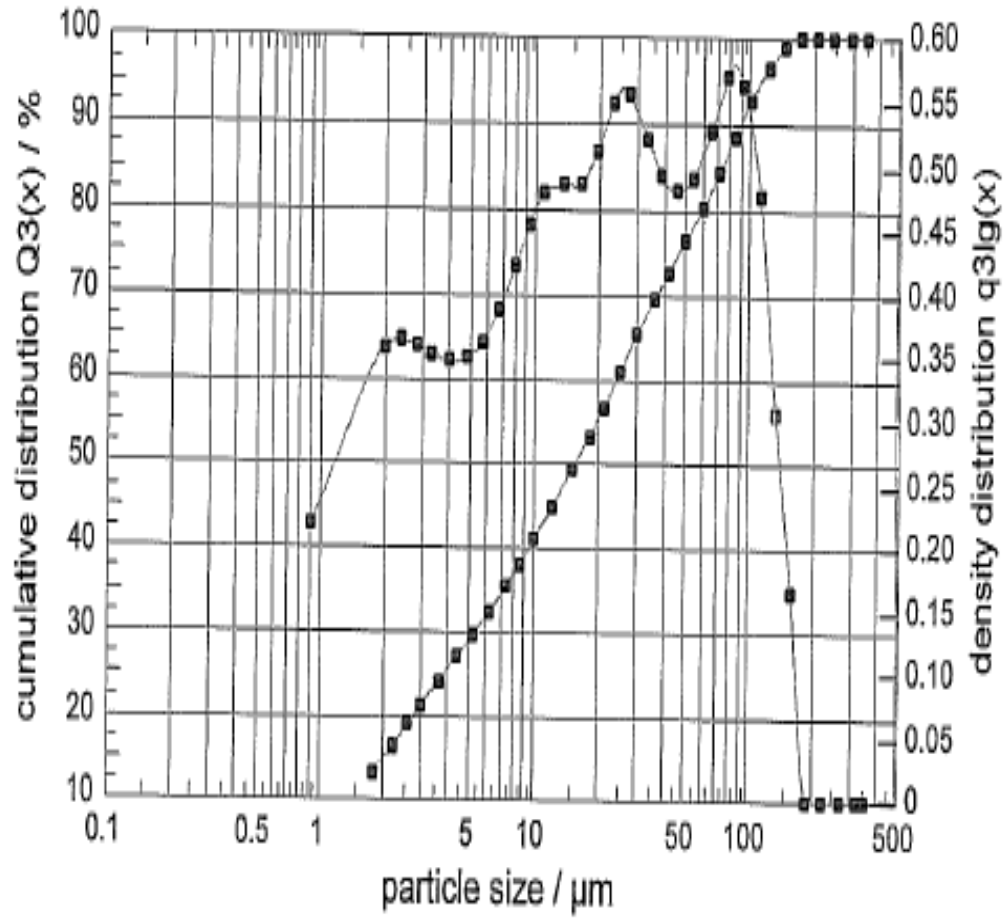


Şekil 3.18 : Partikül boyut analiz cihazı.

Şekil 3.19’da duvar karosu kırığının partikül boyut analiz sonucu verilmiştir.Duvar karosu için ortalama tane boyutu (d_{50}) 15,61 μm olurken, numunenin % 100’ü 174 μm ’nin altında olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3.4 : Laboratuvar tipi bilyalı değirmen şarjı.

Bilya Çapı (mm)	Bilya Adedi	Bilya Ağırlığı (g)
60	6	5.115
50	66	34.110
40	40	10.480
30	35	3.375
25	11	0.700
20	29	0.835
15	28	3.965
Toplam	215	58.580



Volume Size Distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1,80	13,03	7,40	35,03	30,00	65,03	122,00	96,39
2,20	16,14	8,60	37,77	36,00	69,15	146,00	98,76
2,60	18,76	10,00	40,73	42,00	72,44	174,00	100,00
3,00	20,99	12,00	44,51	50,00	76,08	206,00	100,00
3,60	23,77	15,00	49,22	60,00	79,96	246,00	100,00
4,40	26,78	18,00	53,06	72,00	84,13	294,00	100,00
5,20	29,30	21,00	56,48	86,00	88,52	350,00	100,00
6,20	32,06	25,00	60,64	102,00	92,69		

$x_{10} = 1,50 \mu\text{m}$

$x_{16} = 2,18 \mu\text{m}$

$x_{50} = 15,61 \mu\text{m}$

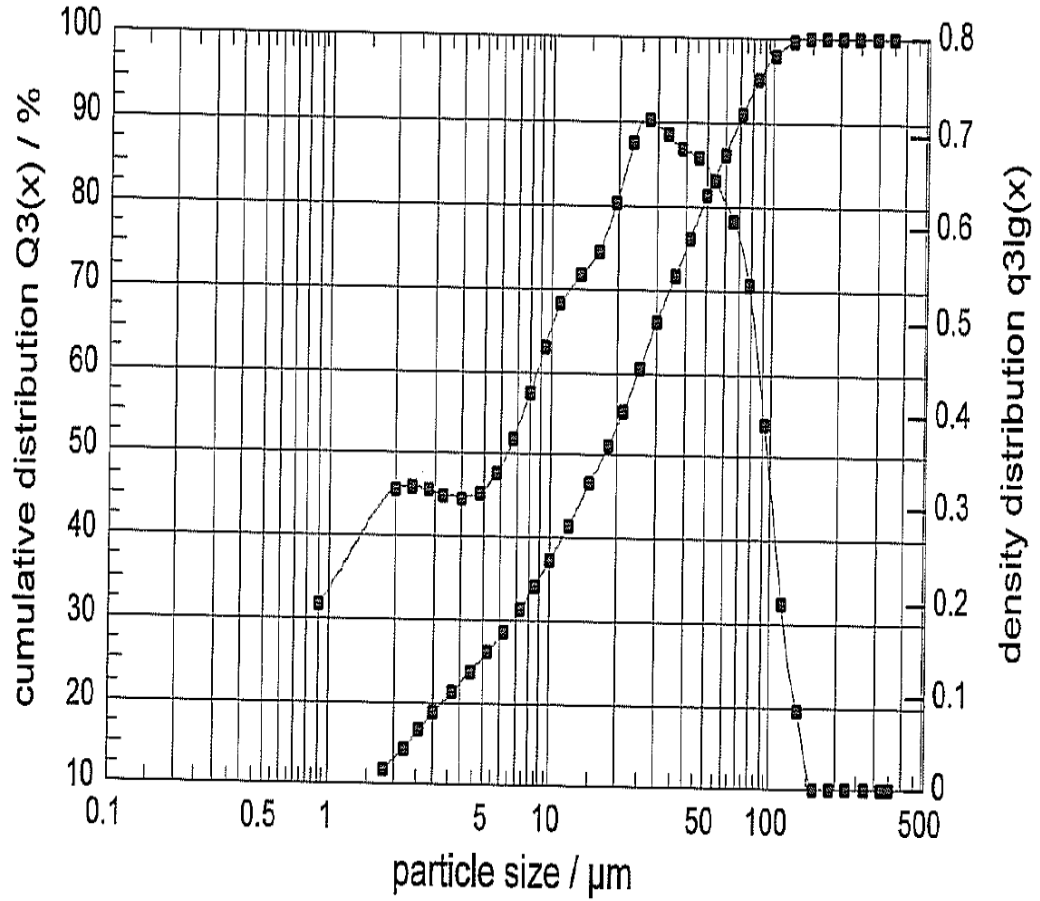
$x_{84} = 71,62 \mu\text{m}$

$x_{90} = 91,67 \mu\text{m}$

$x_{99} = 151,40 \mu\text{m}$

Şekil 3.19 : Duvar karosu kırığının boyut dağılımı.

Duvar karosundan sonra yer karosu kırığı öğütülmüştür. Yer karosu kırığının ilk aşamada 30 dakika öğütülmesine karar verilmiştir. Bu süre sonunda ortalama tane boyutunun $22,40 \mu\text{m}$ olduğu analiz edilince, 20 dakika daha öğütme işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçta d_{50} 'si $17,49 \mu\text{m}$ olmuştur. Toplam 50 dakika öğütülen yer karosu kırığının boyut dağılımı Şekil 3.20'de yer almaktadır.



Volume Size Distribution

x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%
1,80	11,39	7,40	31,10	30,00	65,77	122,00	99,37
2,20	14,12	8,60	33,84	36,00	71,28	146,00	100,00
2,60	16,42	10,00	36,90	42,00	75,83	174,00	100,00
3,00	18,37	12,00	40,97	50,00	80,92	206,00	100,00
3,60	20,81	15,00	46,24	60,00	86,04	246,00	100,00
4,40	23,47	18,00	50,77	72,00	90,84	294,00	100,00
5,20	25,74	21,00	54,93	86,00	94,97	350,00	100,00
6,20	28,26	25,00	60,12	102,00	97,84		

$$x_{10} = 1,64 \mu\text{m}$$

$$x_{16} = 2,53 \mu\text{m}$$

$$x_{50} = 17,49 \mu\text{m}$$

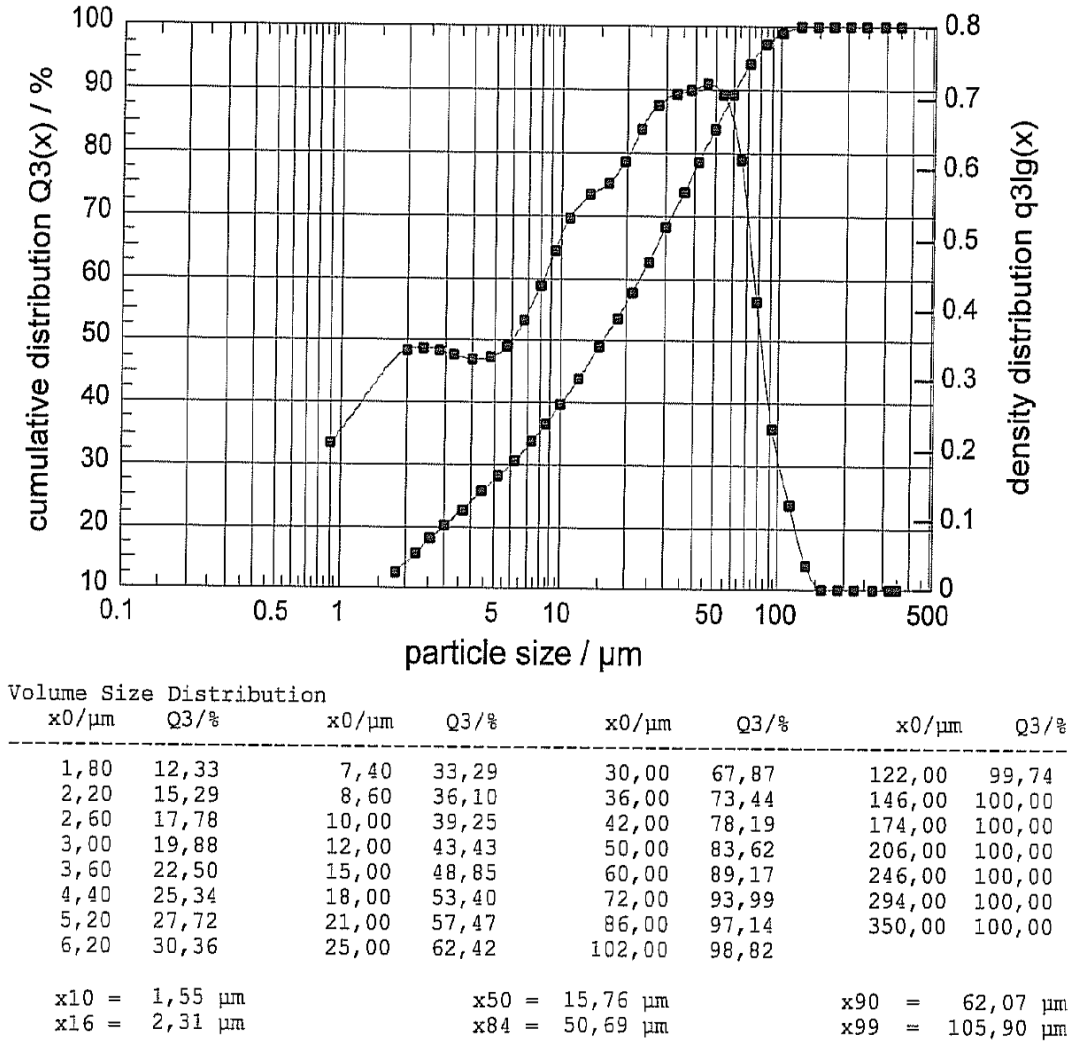
$$x_{84} = 56,01 \mu\text{m}$$

$$x_{90} = 69,90 \mu\text{m}$$

$$x_{99} = 117,20 \mu\text{m}$$

Şekil 3.20 : Yer karosu kırığının boyut dağılımı.

En son olarak, granit kırığı öğütülmüştür. Granit kırığının yer karosu kırığından daha sert bir malzeme olduğu bilindiğinden ilk aşamada 45 dakika öğütülmüş ve boyut dağılımına bakılmıştır. 45 dakikalık öğütme sonunda granit kırığının, d_{50} 'si 21,52 μm bulunmuş ve ek 10 dakikalık bir süre daha öğütülmesine karar verilmiştir. Toplam 55 dakikalık öğütme sonucunda granit kırığının, d_{50} 'si 15,76 μm olmuştur, bu öğütmenin boyut dağılımı Şekil 3.21'de incelenebilir.



Şekil 3.21 : Granit kırığının boyut dağılımı.

3.2 Kullanılan Malzemeler

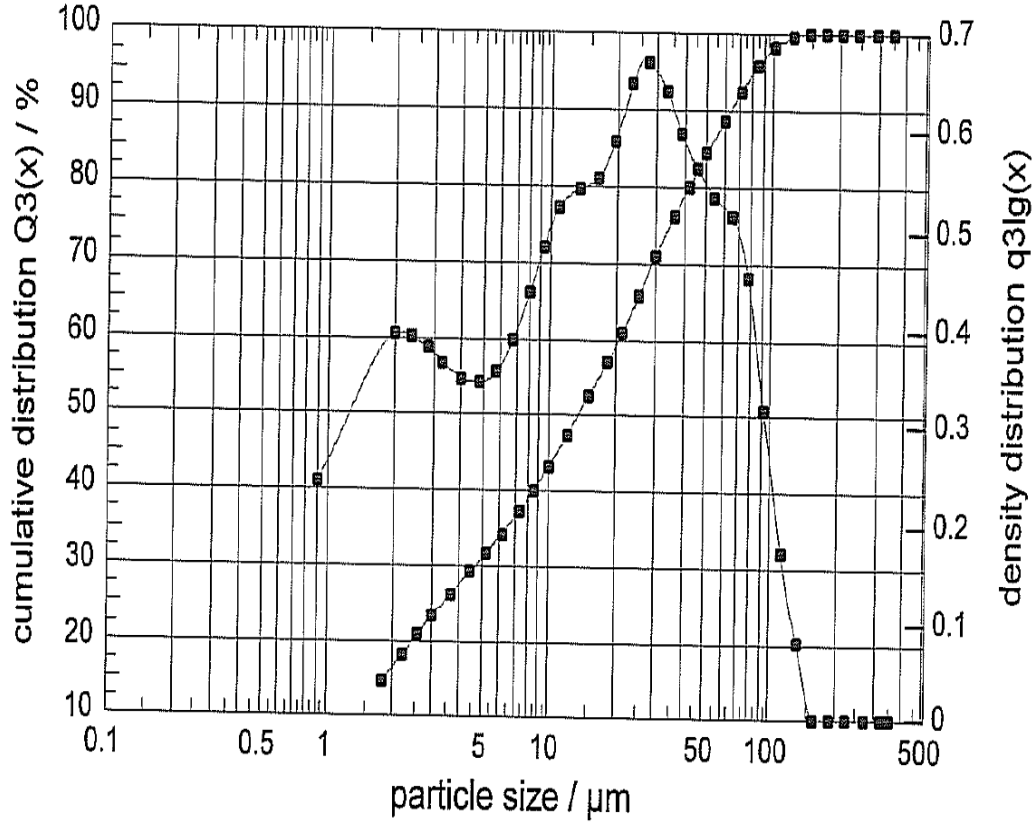
Deneyisel çalışmalarda klinkerin yerine katkı olarak kullanılan malzemeler; seramik fabrikalarında üretim hatası olarak atık kabul edilen duvar karosu, yer karosu ve granit kırıkları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, zeolit ve kalkerdir. Bu bölümde tez kapsamında oluşturulan katkılı çimentoların fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemek için Nuh Çimento Fabrikasının Kalite, Çevre ve Ar-Ge Laboratuvarı'nda yapılan deneyler anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan çimentoların analizleri, TS EN 196-1 'Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini', TS EN 196-2 'Çimento Deney Metotları - Bölüm: 2 Çimentonun Kimyasal Analizi', TS EN 196-3 'Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini' ve TS EN 196-6 'Çimentoda Deney Metotları - Bölüm 6: İncelik Tayini' standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

3.2.1 Çimento

Kontrol çimentosu(K) olarak CEM I tip Portland çimento kullanılmıştır. Klinker, Nuh Çimento Fabrikasının 1+2 No'lu döner fırınından alınmış ve kontrol çimentosu da dahil olmak üzere bütün katkılı çimentoların hazırlanmasında kullanılmıştır. Kontrol çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te, boyut dağılım grafiği Şekil 3.22'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kontrol çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Özellik	Birim	Kontrol Çimentosu	
Kimyasal Analiz	CaO	%	65,65	
	SiO ₂	%	21,46	
	Al ₂ O ₃	%	4,62	
	Fe ₂ O ₃	%	3,59	
	MgO	%	1,20	
	SO ₃	%	0,46	
	K ₂ O	%	0,80	
	Na ₂ O	%	0,21	
	Kızdırma Kaybı		0,31	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		2 Gün	MPa	22,6
	Basınç Dayanımı	7 Gün	MPa	43,9
		28 Gün	MPa	56,2
		90 Gün	MPa	59,5
		Özgül Ağırlık	g/cm ³	3,15
		Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	3343
	İncelik	+32 µm	%	27,2
		+90 µm	%	7,4
		+200 µm	%	2,9
		Priz Başlangıcı	dakika	124
		Priz Sonu	dakika	157
		Hacim Genleşmesi	mm	10



Volume Size Distribution

x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%
1,80	14,40	7,40	36,93	30,00	70,74	122,00	99,41
2,20	17,79	8,60	39,76	36,00	75,80	146,00	100,00
2,60	20,60	10,00	42,90	42,00	79,80	174,00	100,00
3,00	22,94	12,00	47,03	50,00	84,04	206,00	100,00
3,60	25,80	15,00	52,26	60,00	88,25	246,00	100,00
4,40	28,81	18,00	56,61	72,00	92,31	294,00	100,00
5,20	31,28	21,00	60,54	86,00	95,78	350,00	100,00
6,20	33,97	25,00	65,44	102,00	98,10		

x10 = 1,40 μm

x16 = 1,99 μm

x50 = 13,70 μm

x84 = 49,93 μm

x90 = 65,17 μm

x99 = 115.73 μm

Şekil 3.22 : Kontrol çimentosunun boyut dağılımı.

3.2.2 Standart kum ve su

Harç numunelerinin hazırlanmasında; TS EN 196-1 Rilem-Cembureau Standart Kumu, harç karışımlarında çimentoya zararlı olabilecek organik madde ve madensel tuz içermeyen saf su kullanılmıştır.

3.2.3 Seramik atıkları

Klinkerin yerine çimentoda ikame edilen seramik atıklarının, fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler yapılmıştır. Seramik atıklarının kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.6’da yer almaktadır.

Çizelge 3.6 :Seramik atıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik		Birim	Duvar Karosu Kırığı	Yer Karosu Kırığı	Granit Kırığı
Kimyasal Analiz	CaO	%	9,85	0,78	0,74
	SiO ₂	%	62,31	67,41	68,56
	Al ₂ O ₃	%	19,84	20,85	23,68
	Fe ₂ O ₃	%	2,52	2,24	0,96
	MgO	%	0,73	0,87	0,93
	SO ₃	%	0,43	0,13	0,12
	K ₂ O	%	2,17	3,02	0,81
	Na ₂ O	%	0,96	2,72	3,79
Kızdırma Kaybı			0,27	0,05	0,08
Fiziksel	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,68	2,57	2,55
Özellikler	Özgül Yüzey	cm ² /g	5063	4148	4121

Seramik, ana hammaddeleri kil, feldspat ve kuvarsın harmanlanması, biçimlendirilmesi ve kurutularak pişirilmesi aşamalarıyla elde edilen ürünlerdir. Fırından çıkan ürünler Kalite Ayırım bölümünde % 100 kontrol edilmekte, belirlenmiş standartlara göre ‘ıskarta, tamir ve kalite’ olarak ayrılmaktadır. İskarta ürünler ‘Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’ kapsamında kırılarak alternatif sektörlerde hammadde olarak yeniden kullanılmaktadır. İskarta ürün kırıkları, tehlikeli veya özel işlem gerektiren bir atık sınıfına girmemektedir. Kırılan vitrifiye ürünlerin sağlam ve homojen olması, yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ve su geçirmezliği gibi özellikleri vardır.

Bu çalışmada kullanılan seramikler Çizelge 3.6 incelendiğinde, en yüksek Blaine değeri diğerlerine göre daha yumuşak bir malzeme olan duvar karosu kırığında elde edilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarında ise numunelerin daha çok SiO₂’den oluştuğu anlaşılmıştır.

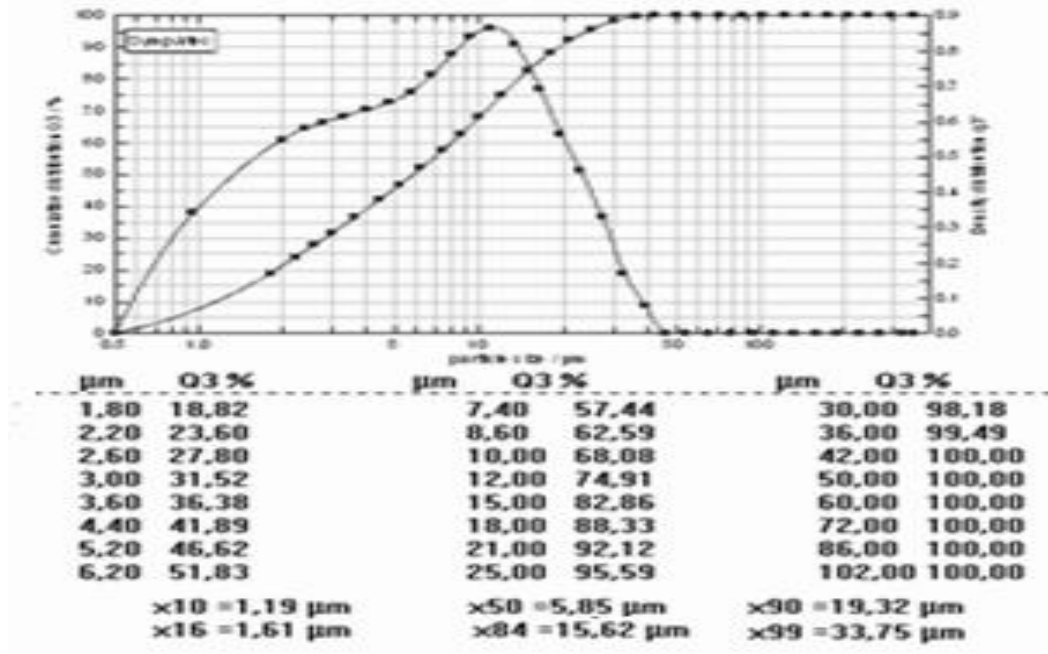
3.2.4 Puzolanlar ve Kalker

TS EN 197-1 standartında yer alan mineral katkılardan; yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalker, doğal bir puzolan olan zeolit bu çalışmada kullanılmıştır. Demir ve çelik üretimi yapan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'den alınan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de, boyut dağılımı sonuçları Şekil 3.23'de verilmiştir. Deneyler sonucunda cürufta CaO miktarı % 31,87, SiO₂ miktarı % 40,47, özgül ağırlığı 2,88 g/cm³, Blaine değeri 5324 cm²/g bulunmuştur.

Şekil 3.23 incelendiğinde, deneylerde kullanacağımız yüksek fırın cürufunun d₅₀'si 5,85 µm, malzemenin tamamı 42 µm'den küçük olduğu anlaşılmıştır. Şekil 3.24 incelendiğinde ise, deneylerde kullanacağımız uçucu külün d₅₀'si 12,13 µm, malzemenin tamamı 146 µm'den küçük olduğu anlaşılmıştır. Yüksek fırın cürufu ile uçucu külün boyut analiz sonuçları karşılaştırıldığında, uçucu külün daha iri bir malzeme olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.7 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik		Birim	Yüksek Fırın Cürufu
Kimyasal Analiz	CaO	%	31,87
	SiO ₂	%	40,47
	Al ₂ O ₃	%	14,30
	Fe ₂ O ₃	%	1,38
	MgO	%	7,08
	SO ₃	%	0,53
	K ₂ O	%	1,03
	Na ₂ O	%	0,18
Kızdırma Kaybı			1,71
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,88
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	5324

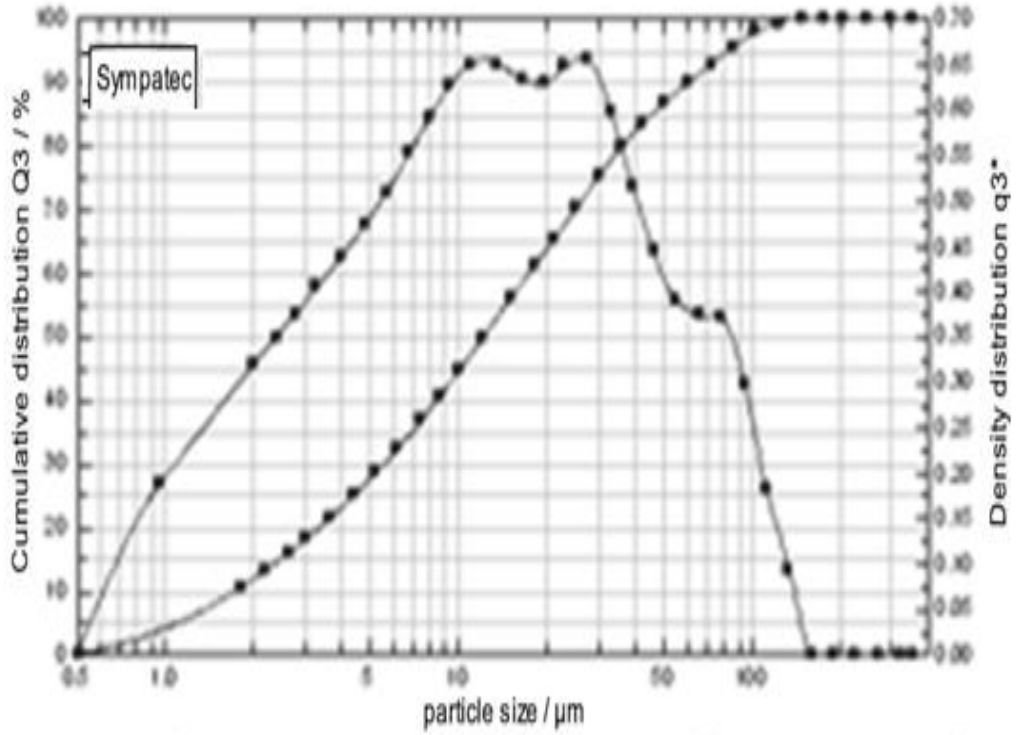


Şekil 3.23 : Yüksek fırın cürufunun boyut dağılımı.

Tez kapsamında kullanılan uçucu kül Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'den alınmıştır. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.8'de, boyut dağılımsonuçları ise Şekil 3.24'te yer almaktadır. Uçucu külün kimyasal analizi incelendiğinde, $\text{Si}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 31,28, CaO miktarı ise 50,24'tür. Bu değerlere göre çalışmada kullanılan uçucu kül C sınıfı uçucu küldür. Çünkü C sınıfı uçucu küllerde ise $\text{Si}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ %50'den fazladır ve CaO %10'un üzerindedir. Özgül ağırlığı $2,77 \text{ g/cm}^3$, Blaine değeri ise $4303 \text{ cm}^2/\text{g}$ bulunmuştur.

Çizelge 3.8 : Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik		Birim	Uçucu Kül
Kimyasal Analiz	CaO	%	50,24
	SiO ₂	%	20,02
	Al ₂ O ₃	%	8,98
	Fe ₂ O ₃	%	2,28
	MgO	%	2,71
	SO ₃	%	0,87
	K ₂ O	%	1,03
	Na ₂ O	%	0,19
Kızdırma Kaybı			10,56
Fiziksel	Özgül Ağırlık	g/cm^3	2,77
Özellikler	Özgül Yüzey Alanı	cm^2/g	4303



μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	10,37	7,40	36,60	30,00	75,30	122,00	99,29
2,20	13,14	8,60	40,47	36,00	80,02	146,00	100,00
2,60	15,68	10,00	44,57	42,00	83,47	174,00	100,00
3,00	18,02	12,00	49,72	50,00	86,82	206,00	100,00
3,60	21,21	15,00	56,02	60,00	89,90	246,00	100,00
4,40	25,03	18,00	61,03	72,00	92,84	294,00	100,00
5,20	28,46	21,00	65,23	86,00	95,69	350,00	100,00
6,20	32,36	25,00	70,13	102,00	97,88		
x10 = 1,75 μm		x50 = 12,13 μm		x90 = 60,43 μm			
x16 = 2,65 μm		x84 = 43,27 μm		x99 = 117,90 μm			

Şekil 3.24 : Uçucu külün boyut dağılımı.

Zeolitler, Şekil 3.25'te görüldüğü üzere iki boyut grubunda olacak şekilde .Santek firmasından alınmıştır. Zeolit - 1 olarak adlandırılan ilk numune 15-20 cm'lik parçalardan, Zeolit - 2 olarak adlandırılan ikinci numune ise büyüklüğü 15-20 cm oaln parçaların yanında 1 - 2 cm'lik parçalardan oluşmuştur. Şekil 3.25'te iki numune gösterilmektedir.



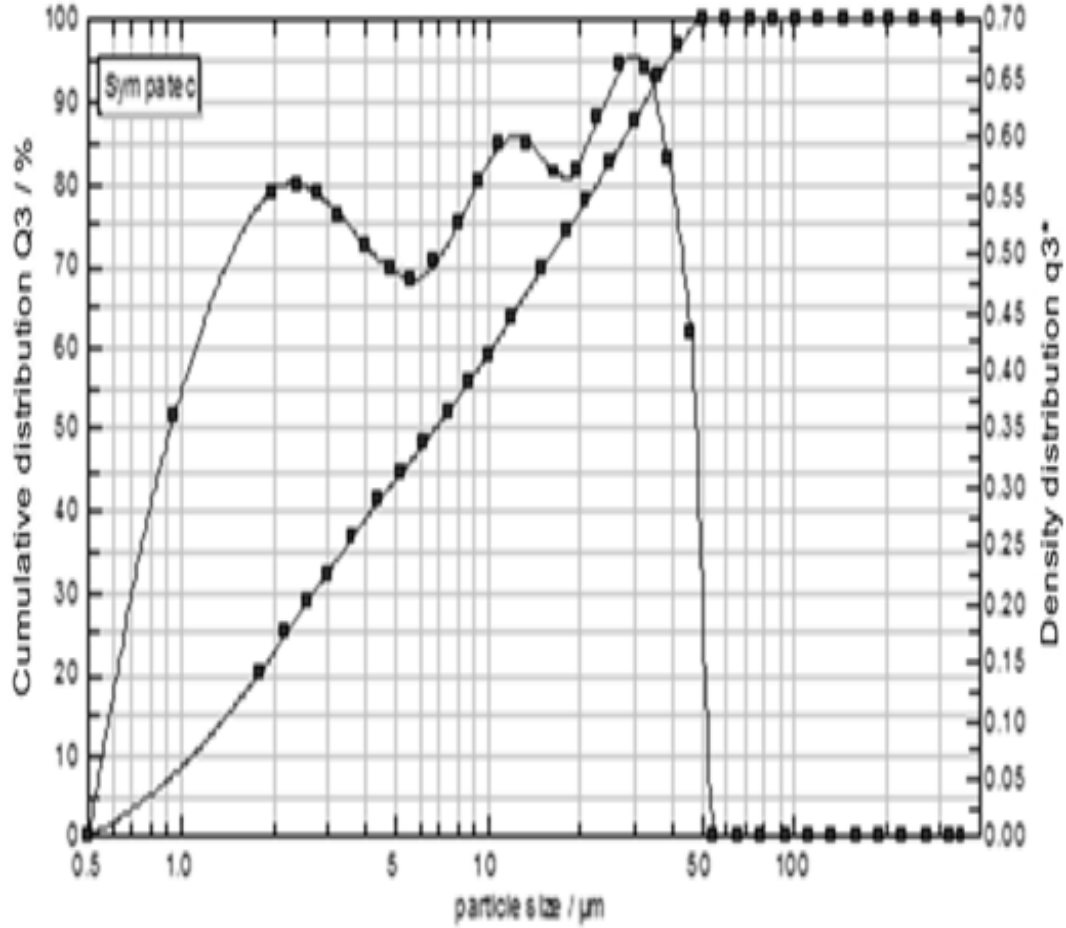
Şekil 3.25 :Zeolit numuneleri.

Zeolit – 1 ve Zeolit - 2 numunelerinin karakterizasyonu amacıyla yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 3.9’da, Zeolit – 1’in partikül analiz sonucu Şekil 3.26’da, Zeolit - 2’nin boyut analiz sonucu Şekil 3.37’de yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, $\text{Si}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 70’in üzerinde, MgO ve SO_3 miktarı % 5’in altındadır, diğer malzemelere göre zeolitlerin Blaine değerleri oldukça yüksek çıkmıştır.

Çizelge 3.9 : Zeolit – 1 ve Zeolit - 2’in kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik		Birim	Zeolit - 1	Zeolit - 2
Kimyasal Analiz	CaO	%	3,39	5,81
	SiO ₂	%	63,04	62,27
	Al ₂ O ₃	%	12,70	12,46
	Fe ₂ O ₃	%	2,18	1,51
	MgO	%	1,32	5,81
	SO ₃	%	0,41	0,16
	K ₂ O	%	3,26	3,65
	Na ₂ O	%	0,25	0,06
Kızdırma Kaybı			10,80	10,60
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,27	2,24
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	8063	7969

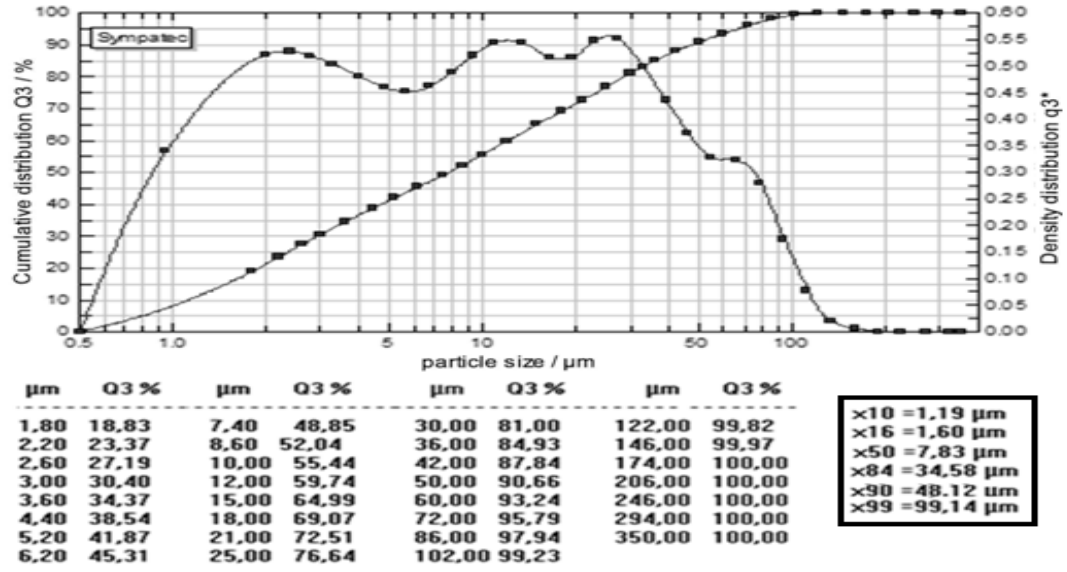
Zeolit numunelerinin boyut dağılım sonuçları incelendiğinde, zeolit – 1 numunesinin % 99’u için tane boyutu 47,55 μm oluken, zeolit – 2 numunesinde bu değer 99,14 μm olmuştur. Zeolit – 2 numunesi öğütülmeden önce küçük boyutta parçalara da sahip olmasına rağmen içerisinde, zeolit – 1 numunesine göre, daha iri parçalar barındırdığı anlaşılmıştır.



μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	20,02	7,40	51,87	30,00	87,64
2,20	24,84	8,60	55,29	36,00	92,85
2,60	28,89	10,00	58,96	42,00	96,73
3,00	32,30	12,00	63,65	50,00	100,00
3,60	36,51	15,00	69,41	60,00	100,00
4,40	40,93	18,00	73,93	72,00	100,00
5,20	44,45	21,00	77,75	86,00	100,00
6,20	48,09	25,00	82,41	102,00	100,00

$\times 10 = 1,15 \mu\text{m}$
 $\times 16 = 1,54 \mu\text{m}$
 $\times 50 = 6,81 \mu\text{m}$
 $\times 84 = 26,52 \mu\text{m}$
 $\times 90 = 32,72 \mu\text{m}$
 $\times 99 = 47,55 \mu\text{m}$

Şekil 3.26 : Zeolit 1’in boyut dağılımı.

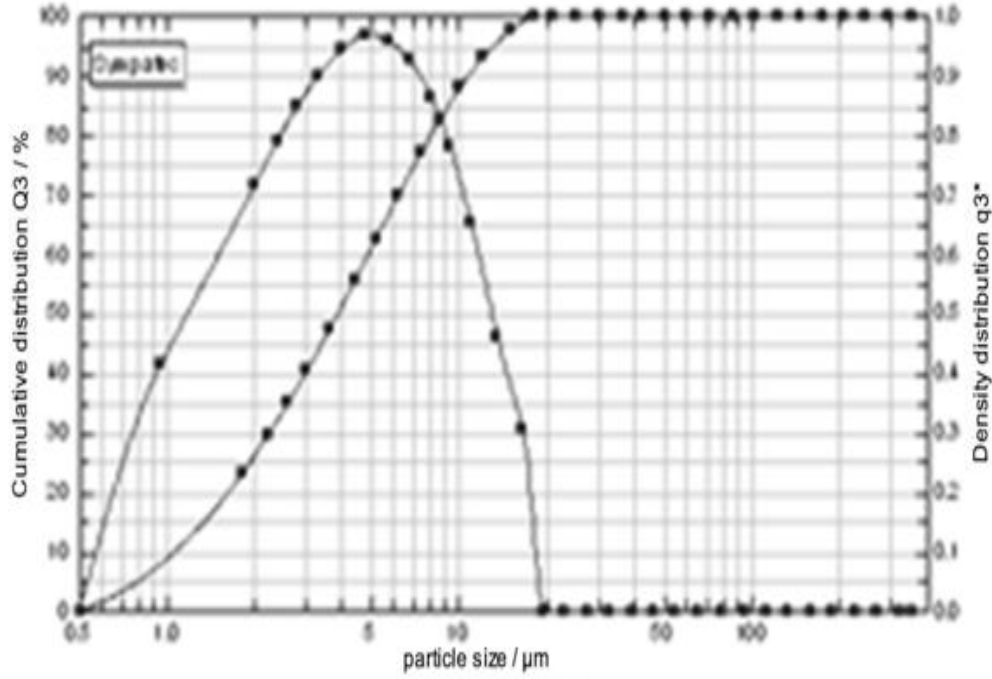


Şekil 3.27 : Zeolit 2'nin boyut dağılımı.

Deneylerde kullanılan kalkerin kimyasal ve fiziksel özellikleri ile, tane dağılımı hakkında bilgi edinmek için yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 3.10'da ve Şekil 3.28'de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, yüksek miktarda CaCO_3 içeren kalkerin, CaO içeriği % 54,41, kızdırma kaybı ise 41,49 olmuştur. Kalkerin özgül ağırlığı $2,71 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuş, Blaine değeri hesaplanmak istendiğinde (3.1)'deki eşitlikten yararlanarak Blaine hücreğine konulacak numune miktarı 99,12 g bulunmuştur, fakat bu miktar hücreyi dolduramadığından kalkerin Blaine inceliği hesaplanamamıştır.

Çizelge 3.10 : Kalkerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik		Birim	Kalker
Kimyasal Analiz	CaO	%	54,41
	SiO ₂	%	1,75
	Al ₂ O ₃	%	1,12
	Fe ₂ O ₃	%	0,36
	MgO	%	0,74
	SO ₃	%	0,60
	K ₂ O	%	0,29
	Na ₂ O	%	0,16
Kızdırma Kaybı			41,49
Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık	g/cm^3	2,71
	Özgül Yüzey Alanı	cm^2/g	-



μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	23,07	7,40	77,16	30,00	100,00
2,20	29,32	8,60	82,80	36,00	100,00
2,60	35,06	10,00	87,92	42,00	100,00
3,00	40,34	12,00	93,08	50,00	100,00
3,60	47,47	15,00	97,56	60,00	100,00
4,40	55,71	18,00	100,00	72,00	100,00
5,20	62,73	21,00	100,00	86,00	100,00
6,20	70,06	25,00	100,00	102,00	100,00

×10 = 1,06 μm
 ×16 = 1,40 μm
 ×50 = 3,85 μm
 ×84 = 8,93 μm
 ×90 = 10,81 μm
 ×99 = 16,77 μm

Şekil 3.28 : Kalkerin boyut dağılımı.

3.3 Kullanılan Malzemelerin Katkılı Çimentoda Kullanım İmkanlarının Araştırılması

Bu bölümde, karakterizasyonu yapılan malzemelerin klinker, alçıtaşı ve birbirleri ile değişik oranlarda harmanlandığında meydana gelen fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

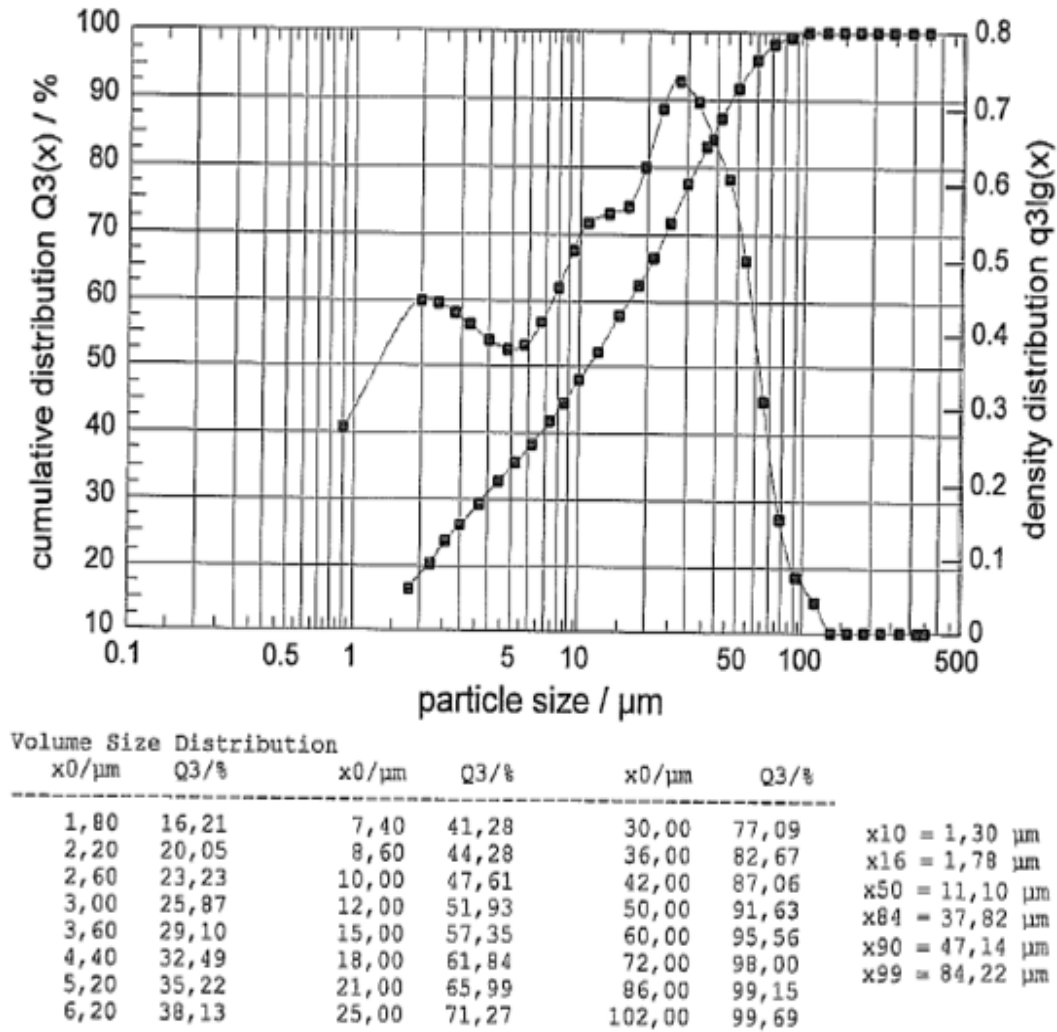
3.3.1 Duvar karosu kırığı katkılı çimentolar

Klinkerin yerine sırasıyla % 5 – 10 - 15 duvar karosu kırığı ile klinker ve alçıtaşı katılarak hazırlanan katkılı çimentolara katkı içeriğine göre; D5, D10 ve D15 olarak kodlanmıştır. Bu katkılı çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.11’de verilmiştir.

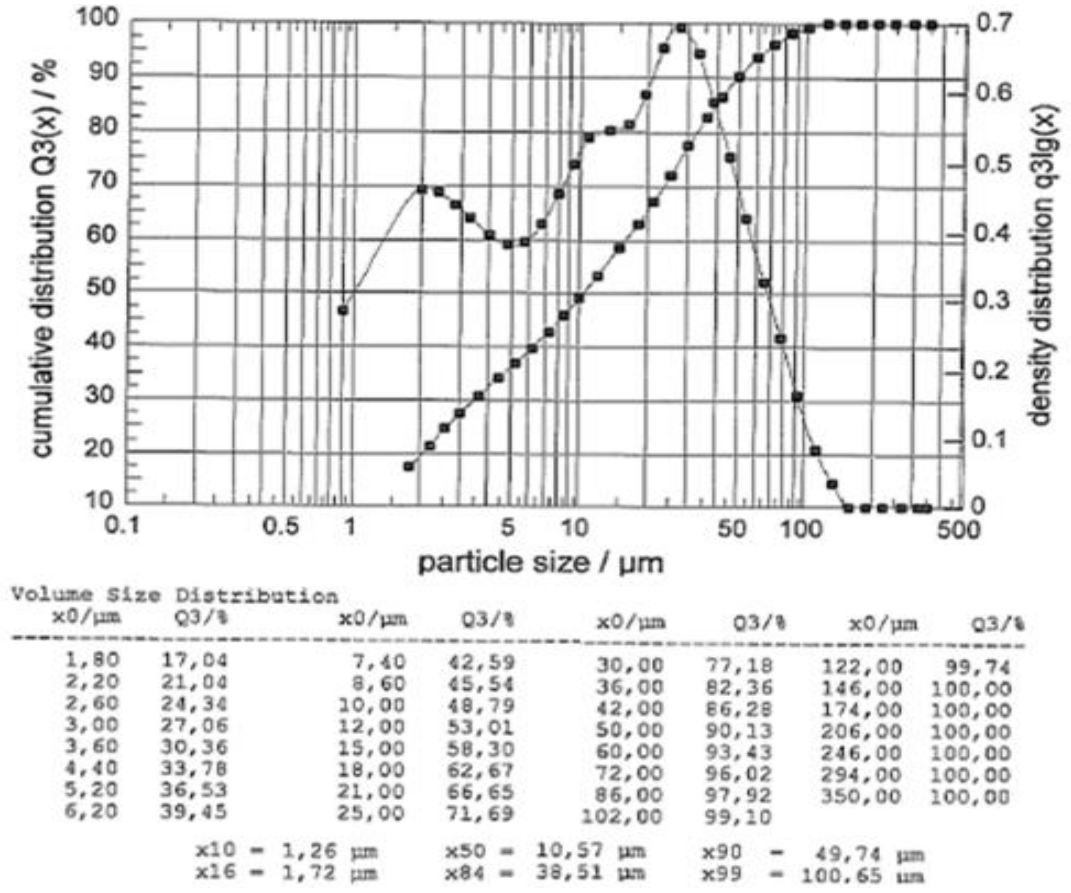
Çizelge 3.11 : D5, D10 ve D15'in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Özellik	Birim	D5	D10	D15	
Kimyasal Analiz	CaO	%	55,97	53,56	55,06	
	SiO ₂	%	26,10	27,00	28,08	
	Al ₂ O ₃	%	6,54	7,07	6,87	
	Fe ₂ O ₃	%	3,72	3,76	3,44	
	MgO	%	1,29	1,26	1,15	
	SO ₃	%	2,29	2,17	2,41	
	K ₂ O	%	0,90	0,95	0,92	
	Na ₂ O	%	0,19	0,20	0,14	
	Kızdırma Kaybı		1,56	1,72	1,20	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		2 Gün	MPa	19,7	18,4	21,5
	Basınç Dayanımı	7 Gün	MPa	36,9	35,4	38,7
		28 Gün	MPa	50,8	48,1	50,7
		90 Gün	MPa	55,2	56,6	59,3
	Özgül Ağırlık	g/cm ³	3,05	3,03	3,07	
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	4089	4646	4507	
		+32 µm	%	25,9	21,0	19,1
	İncelik	+90 µm	%	5,9	4,6	3,9
		+200µm	%	3,0	2,8	2,1
	Priz Başlangıcı	dakika	181	167	184	
	Priz Sonu	dakika	223	194	206	
	Hacim Genleşmesi	mm	9	10	9	

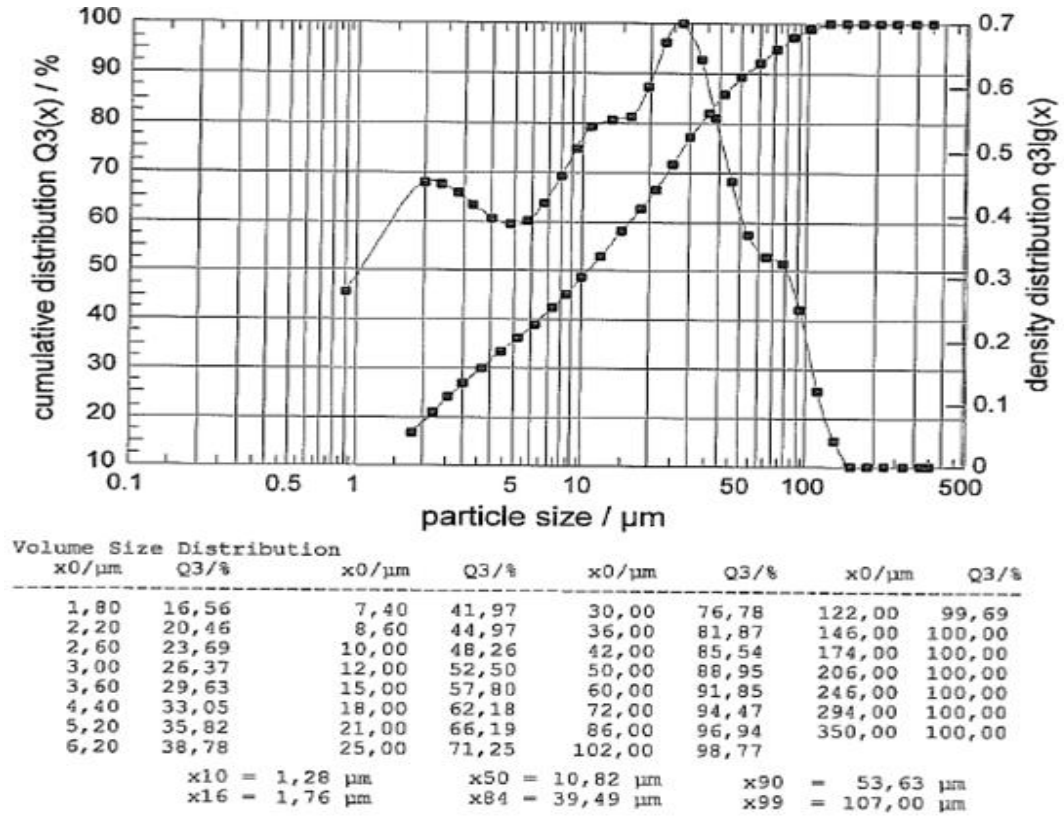
Duvar karosu kırığı katkılı çimentoların analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. SiO_2 içeriği yüksek olan duvar karosu kırığının klinker yerine ikame oranı arttıkça D5, D10 ve D15 numunelerinin SiO_2 içeriği de artmıştır. Ayrıca duvar karosu kırığı ilavesi SO_3 miktarını ve kızdırma kaybı değerinde artışa neden olmuştur. Kontrol çimentosuna göre, özgül ağırlıklarının azaldığı, öğütülmesi daha kolay malzemeler olduğu için özgül yüzey alanlarının arttığı ve priz sürelerinin uzadığı anlaşılmıştır. 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinde ise bu üç numune içinde en yüksek değerleri veren D15 numunesi olmuştur. D15 numunesinin 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinde sırasıyla % 4,8, % 11,8, % 9,7 ve % 0,3'lük azalma olmuştur. Erken dayanımlarda daha düşük sonuçlar veren duvar karosu katkılı çimentolar geç dayanımlarda önemli artışlar sağlasada Kontrol çimentosunun dayanım değerlerine erişememiştir.



Şekil 3.29 : % 5 duvar karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.30 : % 10 duvar karosu kırığı katkıli çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.31 : % 15 duvar karosu kırığı katkıli çimentonun boyut dağılımı.

D5'in Şekil 3.29'da, D10'un Şekil 3.30'da ve D15'in Şekil 3.31'de verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutları sırasıyla 11,10 μm , 10,57 μm ve 10,82 μm olmuştur. Kontrol çimentosunda 13,70 μm olan d_{50} değeriyle kıyaslandığında duvar karosu katkılı çimentoların daha ince oldukları anlaşılmaktadır. Çizelge 3.11'de yer alan incelik değerlerine göre ise +32 μm ve +90 μm miktarı daha az, +200 μm miktarı ise aynı olmuştur.

3.3.2 Yer karosu kırığı katkılı çimentolar

Klinkerin yerine sırasıyla % 5 – 10 - 15 yer karosu kırığı ile klinker ve alçıtaşı katılarak hazırlanan katkılı çimentolara katkı içeriğine göre; Y5, Y10 ve Y15 olarak kodlanmıştır. Bu katkılı çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

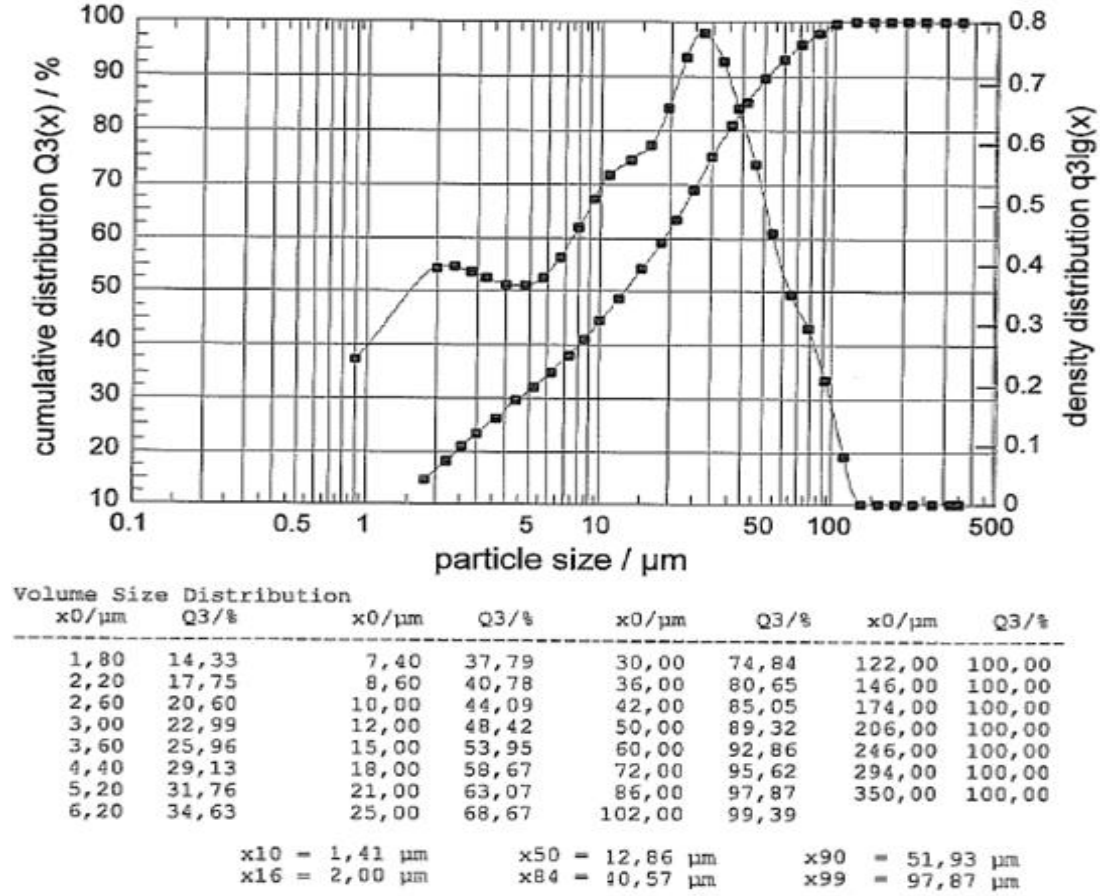
Yer karosu kırığı katkılı çimentoların analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. Yer karosu kırığının çimento içindeki miktarı arttıkça CaO, Fe₂O₃, MgO, SO₃ yüzdeleri azalırken, SiO₂ ve Al₂O₃ yüzdeleri artmıştır. Özgül ağırlık değerlerinde katkı miktarının artmasıyla ters orantılı olarak azalma, priz sürelerinde artma olmuştur.

Kontrol çimentosuna göre, Y5'in dayanım değerlerinde özellikle erken dayanımda artış olurken, Y10 ve Y15'te düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Y5 çimentosundaki 2, 7, 28 ve 90 günlük dayanımlardaki artış miktarları sırasıyla % 8,4, % 2,8, % 2,8 ve % 1,0 olmuştur. Yer karosu kırığıda aynı duvar karosu kırığı gibi erken dayanımlarda daha yüksek artışlar sağlamıştır.

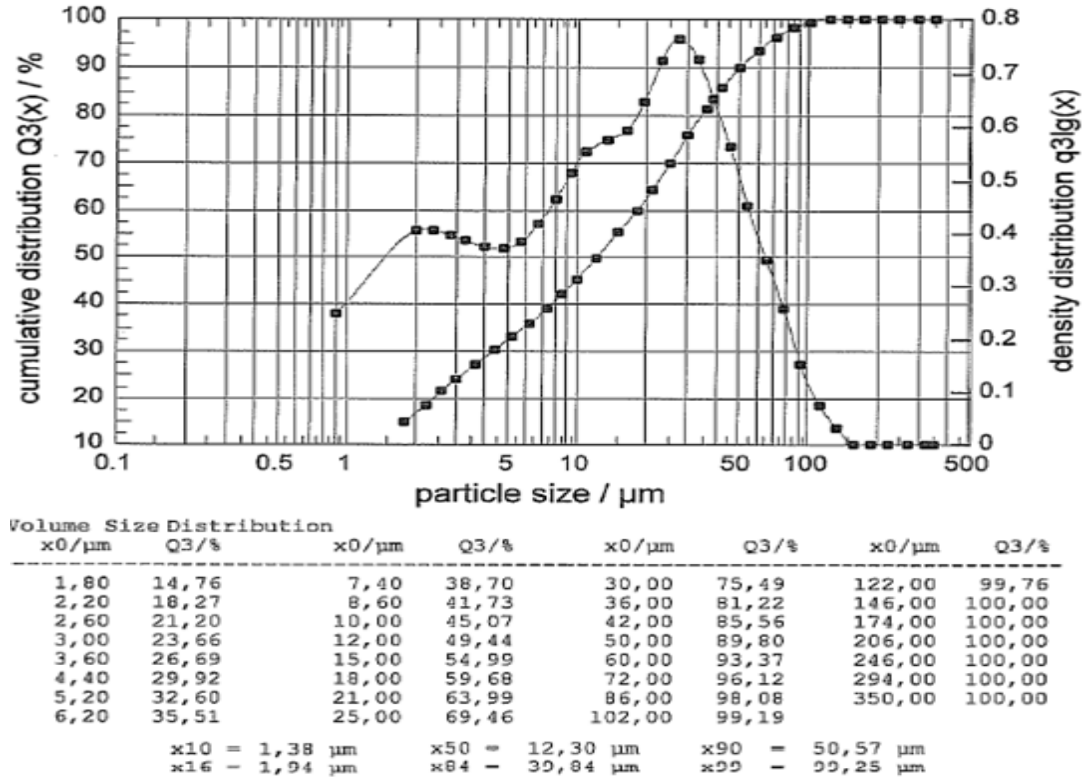
Y5'in Şekil 3.32'de, Y10'un Şekil 3.33'te ve Y15'in Şekil 3.34'te verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutları sırasıyla 12,86 μm , 12,30 μm ve 11,51 μm olmuştur. Kontrol çimentosunun 13,70 μm olan d_{50} değeriyle kıyaslandığında yer karosu katkılı çimentoların daha ince oldukları anlaşılmaktadır. Çizelge 3.12'deki incelik değerlerine göre Y15 çimentosu, Y5 ve Y10 çimentolarına göre daha iri taneler içerdiği anlaşılmıştır.

Çizelge 3.12 :Y5, Y10 ve Y15’in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

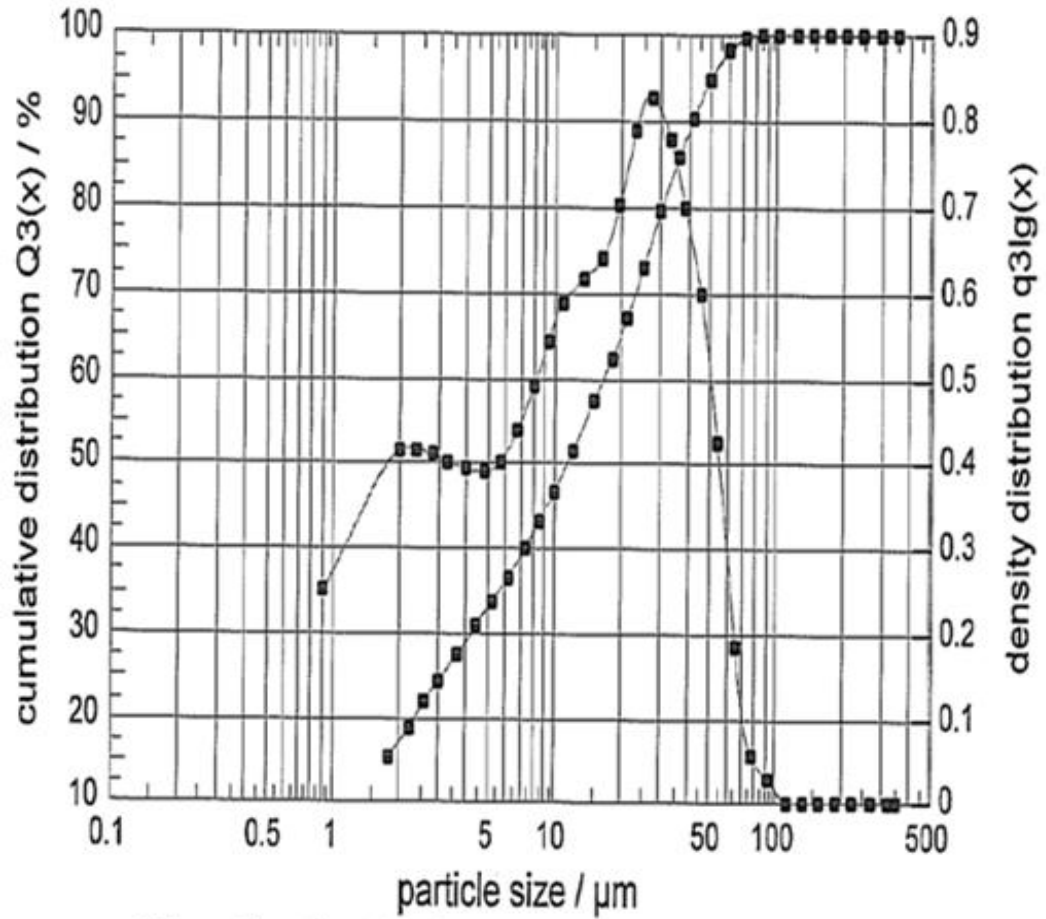
Özellik		Birim	Y5	Y10	Y15	
Kimyasal Analiz	CaO	%	59,83	57,15	55,31	
	SiO ₂	%	23,40	25,34	27,05	
	Al ₂ O ₃	%	5,74	6,29	6,87	
	Fe ₂ O ₃	%	3,49	3,44	3,45	
	MgO	%	1,20	1,17	1,14	
	SO ₃	%	2,47	2,63	2,39	
	K ₂ O	%	0,84	0,98	0,92	
	Na ₂ O	%	0,17	0,33	0,14	
	Kızdırma Kaybı		1,17	1,18	1,10	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Dayanımı	2 Gün	MPa	24,5	22,5	20,0
		7 Gün	MPa	45,1	41,6	37,9
		28 Gün	MPa	57,8	53,1	50,2
		90Gün	MPa	60,1	60,6	58,6
	Özgül Ağırlık		g/cm ³	3,10	3,07	3,06
	Özgül Yüzey Alanı		cm ² /g	3820	3915	3646
	İncelik	+32 µm	%	21,4	21,4	24,9
		+90 µm	%	4,3	4,5	5,4
		+200 µm	%	2,3	2,2	3,1
	Priz Başlangıcı		dakika	154	164	169
	Priz Sonu		dakika	188	192	200
	Hacim Genleşmesi		mm	10	10	9



Şekil 3.32 : % 5 yer karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.33 : % 10 yer karosu kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Volume Size Distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1,80	14,89	7,40	39,75	30,00	79,29
2,20	18,47	8,60	42,94	36,00	85,44
2,60	21,47	10,00	46,49	42,00	90,11
3,00	24,00	12,00	51,13	50,00	94,63
3,60	27,15	15,00	57,08	60,00	97,97
4,40	30,55	18,00	62,12	72,00	99,41
5,20	33,35	21,00	66,80	86,00	99,82
6,20	36,40	25,00	72,75	102,00	100,00

$$x_{10} = 1,37 \mu\text{m}$$

$$x_{16} = 1,92 \mu\text{m}$$

$$x_{50} = 11,51 \mu\text{m}$$

$$x_{84} = 34,59 \mu\text{m}$$

$$x_{90} = 41,86 \mu\text{m}$$

$$x_{99} = 68,57 \mu\text{m}$$

Şekil 3.34 : % 15 yer karosu kırığı katkıli çimentonun boyut dağılımı.

3.3.3 Granit kırığı katkıli çimentolar

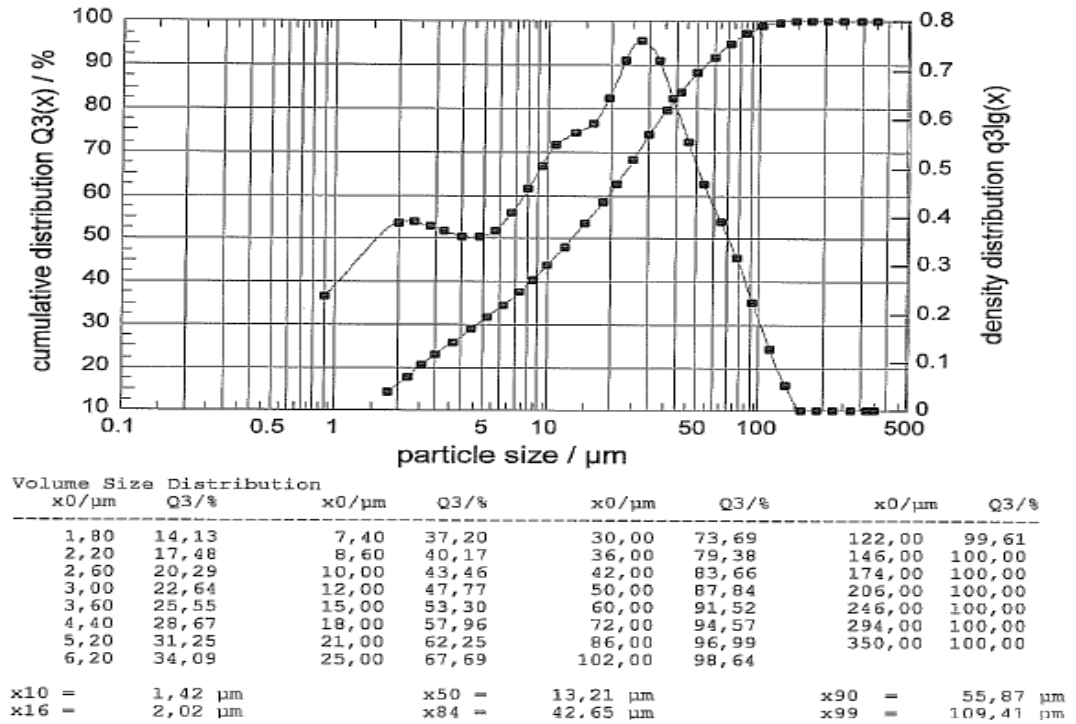
Klinkerin yerine sırasıyla % 5 – 10 - 15 granit kırığı ile klinker ve alçıtaşı katılarak hazırlanan katkıli çimentolara katkı içeriğine göre; G5, G10 ve G15 olarak kodlanmıştır. Bu katkıli çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.13'te yer almaktadır.

Çizelge 3.13 : G5, G10 ve G15'in kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

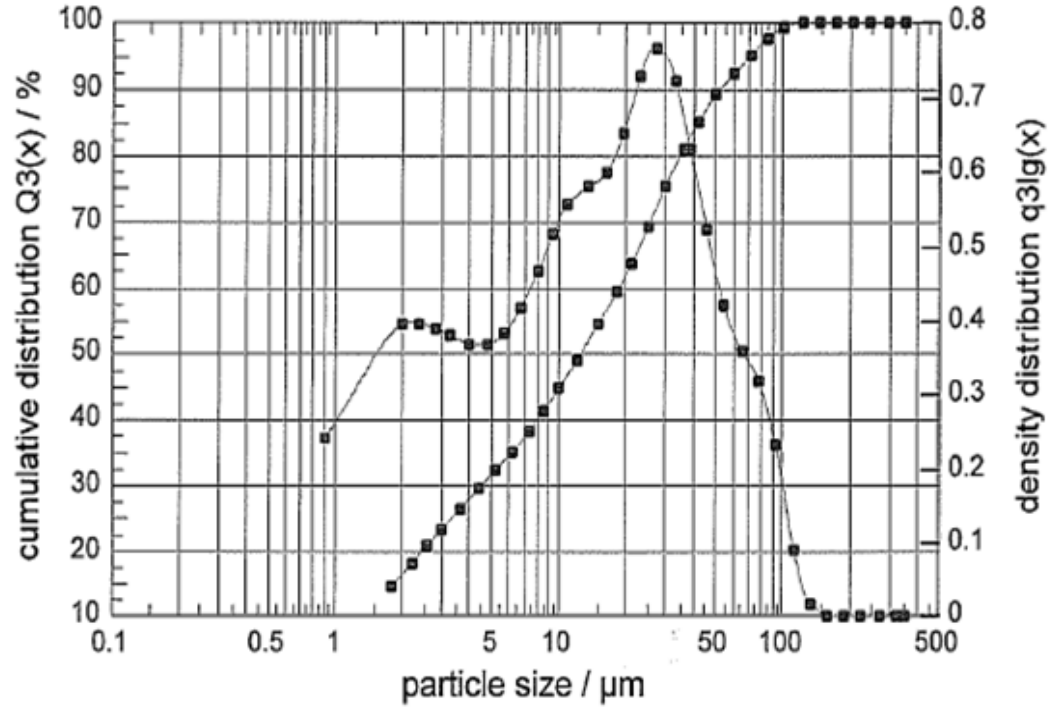
			Özellik	Birim	G5	G10	G15
Kimyasal Analiz			CaO	%	60,58	58,07	54,96
			SiO ₂	%	23,12	25,15	27,99
			Al ₂ O ₃	%	5,61	6,34	7,24
			Fe ₂ O ₃	%	3,37	3,32	3,24
			MgO	%	1,16	1,16	1,14
			SO ₃	%	2,55	2,43	2,53
			K ₂ O	%	0,79	0,78	0,75
			Na ₂ O	%	0,21	0,24	0,31
			Kızdırma Kaybı		1,23	1,10	1,23
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı	2 Gün	MPa		22,2	21,5	20,4
		7 Gün	MPa		41,6	39,7	36,8
		28 Gün	MPa		52,6	52,0	49,1
		90 Gün	MPa		57,6	59,1	57,7
	Özgül Ağırlık		g/cm ³		3,12	3,09	3,05
	Özgül Yüzey Alanı		cm ² /g		3714	3889	3973
	İncelik	+32 µm	%		22,7	22,6	20,6
		+90 µm	%		6,1	5,7	5,4
		+200 µm	%		3,5	3,4	3,1
	Priz Başlangıcı		dakika		160	166	172
	Priz Sonu		dakika		185	196	201
	Hacim Genleşmesi		mm		9	9	10

Granit kırığı katkılı çimentoların analiz sonuçlarına bakıldığında, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı anlaşılmıştır. SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği yüksek olan granit kırıklarının klinkerin yerine katkı olarak kullanılmasıyla çimento içindeki SiO_2 ve Al_2O_3 miktarlarını da arttırmıştır. Katkı miktarının artmasıyla ters orantılı olarak; özgül ağırlık değerlerinde azalma, priz sürelerinde ise artma olmuştur. Dayanım değerleri, duvar karosu kırığı katkılı çimentolara kıyasla daha yüksek olsada Kontrol çimentosuna göre düşük olduğu sonucuna varılmıştır. G5 numunesinin 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinde sırasıyla % 1,7, % 5,1, % 6,3 ve % 3,2'lik düşüşler olurken, G10 numunesinde % 4,9, % 9,5, % 7,3 ve % 0,7; G15 numunesinde % 9,8, % 16,1, % 12,6 ve % 3,0 olmuştur.

G5'in Şekil 3.35'te, G10'un Şekil 3.36'da ve G15'in Şekil 3.37'de verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutları sırasıyla 13,21 μm , 12,63 μm ve 12,27 μm olmuştur. Kontrol çimentosunun 13,70 μm olan d_{50} değeriyle kıyaslandığında yer karosu katkılı çimentoların nispeten daha ince oldukları anlaşılmaktadır. Çizelge 3.13'teki incelik değerlerine göre çimentodaki granit miktarı arttıkça çimento numunelerinin eleküstü miktarlarında azalma olmuştur. Partikül analizleri ile Çizelge 3.13'teki incelik değerleri kıyaslandığında birbirine uyumlu sonuçlar vermişlerdir.



Şekil 3.35 : % 5 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Volume Size Distribution							
x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%
1,60	14,39	7,40	38,04	30,00	75,08	122,00	99,69
2,20	17,82	8,60	41,07	36,00	80,79	146,00	100,00
2,60	20,68	10,00	44,43	42,00	84,99	174,00	100,00
3,00	23,09	12,00	48,83	50,00	88,93	206,00	100,00
3,60	26,08	15,00	54,43	60,00	92,25	246,00	100,00
4,40	29,28	18,00	59,15	72,00	95,07	294,00	100,00
5,20	31,94	21,00	63,51	86,00	97,51	350,00	100,00
6,20	34,85	25,00	69,02	102,00	99,21		
x10 = 1,40 μm		x50 = 12,63 μm		x90 = 53,23 μm			
x16 = 1,99 μm		x84 = 40,59 μm		x99 = 99,99 μm			

Şekil 3.36 : % 10 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.

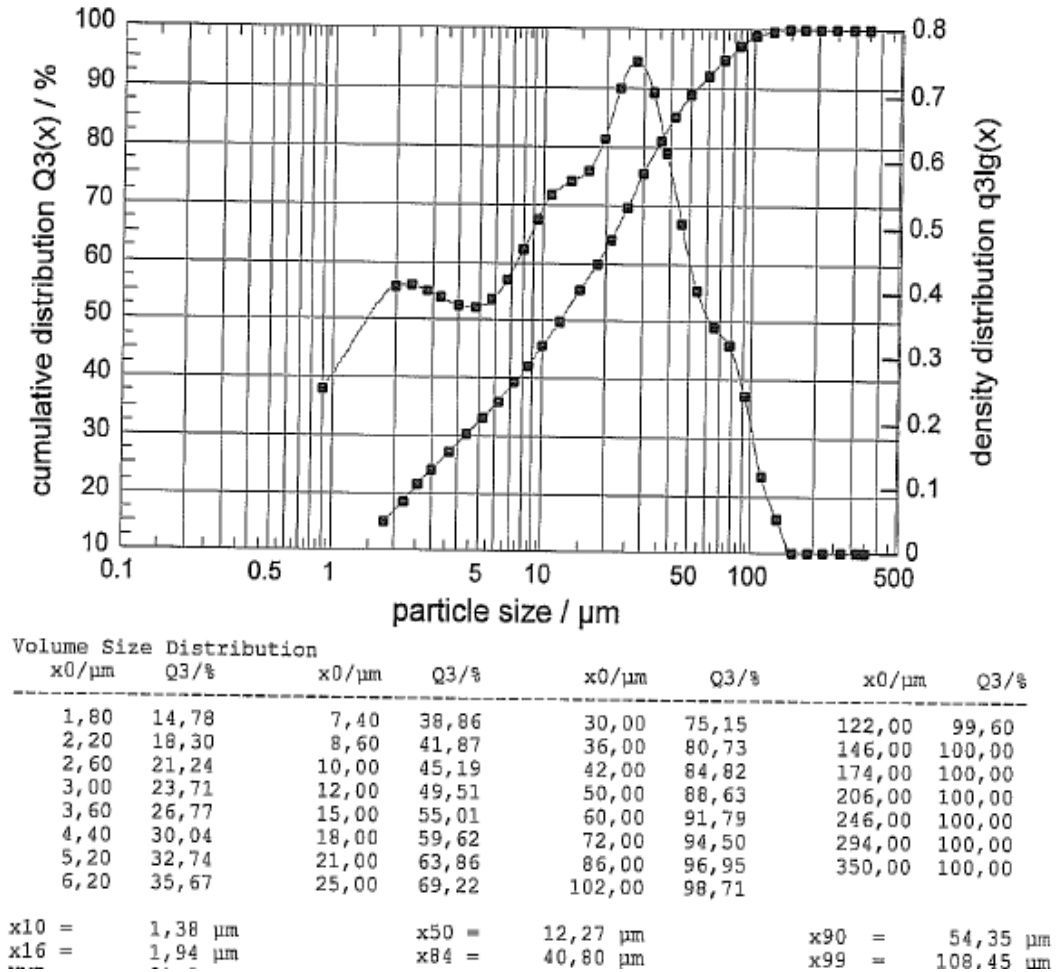
3.3.4 Zeolit katkılı çimentolar

Bu çalışmada kullanılan zeolit – 1 ve zeolit – 2, klinkerin yerine % 10 –20 oranında ikame edilerek hazırlanan katkılı çimentolara katkı içeriğine göre; Z1-10, Z1-20, Z2-10 ve Z2-20 olarak adlandırılmıştır. Bu katkılı çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Zeolilt katkılı çimentoların analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. SiO₂ içeriği yüksek olan zeolitler çimentoya katıldıklarında elde edilen katkılı numunelerin SiO₂ miktarlarını da yükseltmiştir. % 10 zeolit içeren numunelerde SiO₂ % 24 olurken, % 20 zeolit içeren numunelerde bu değer % 29’lara kadar yükselmiştir. Özgül ağırlık değerlerinde katkı miktarının artmasıyla ters orantılı olarak azalma, priz sürelerinde artma olmuştur.

Basınç dayanım sonuçları değerlendirildiğinde, dört zeolit katkılı çimento numunesinin 2 ve 7 günlük sonuçları, Kontrol çimentosunun 2 ve 7 günlük basınç dayanım değerleriyle kıyaslandığında, olumsuz sonuçlar elde edilirken, 90 günlük dayanımlarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sadece Z2-10 numunesi 28 günlük dayanımda, bu dört numune içinde en düşük Blaine değerine sahip olmasına rağmen, % 1,1'lik artışla 56,8 MPa değerini almıştır.

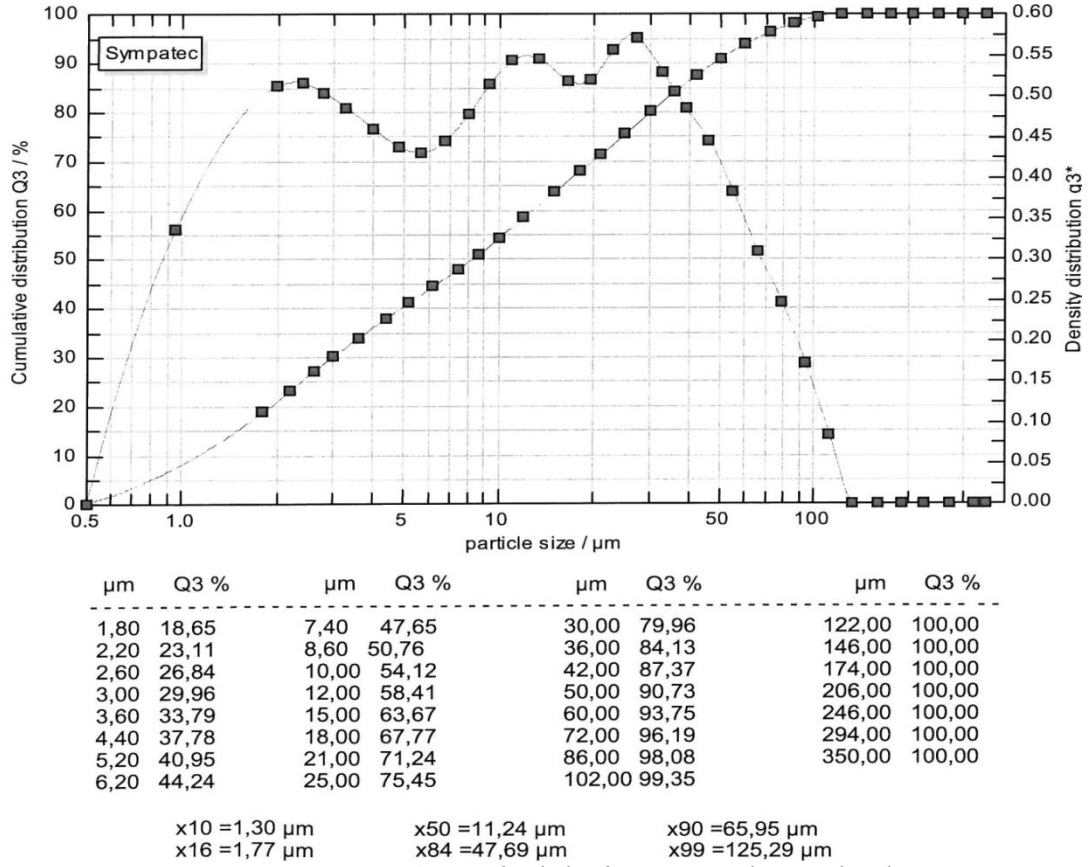
Z1-10'nun Şekil 3.38'de, Z1-20'nin Şekil 3.39'da, Z2-10'nun Şekil 3.40'ta ve Z2-20'nin Şekil 3.41'de verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutları sırasıyla 11,24 μm , 8,44 μm , 9,05 μm ve 8,38 μm olmuştur. Kontrol çimentosunun 13,70 μm olan d_{50} değeriyle kıyaslandığında, zeolit katkılı çimentoların daha ince oldukları anlaşılmaktadır. Çizelge 3.14'teki incelik değerleri incelendiğinde ise, zeolit – 1 katkılı numunelerin +32 μm değerleri % 24 iken, zeolit – 2 katkılı numunelerin +32 μm değerleri % 23 olmuştur. Bu iki boyut analizinden anlaşılan zeolit – 2 numunesi katkısı ile çimentonun incelik değeri artmıştır.



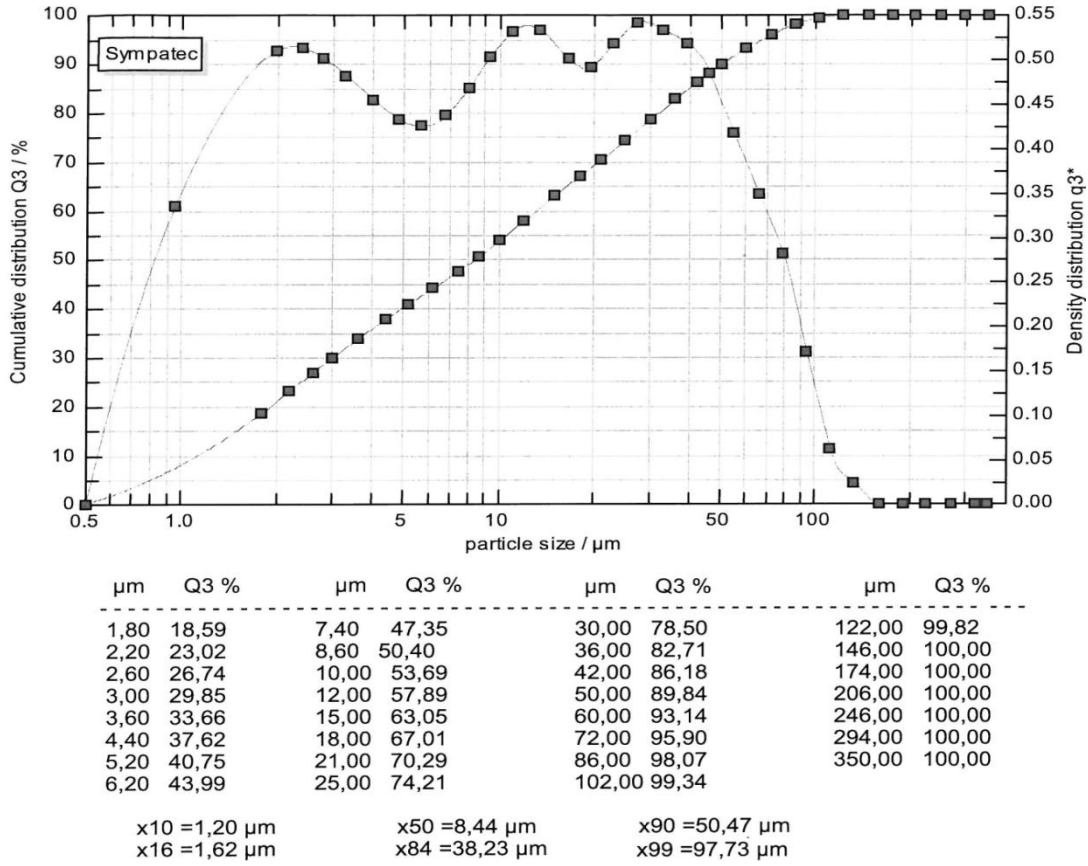
Şekil 3.37 : % 15 granit kırığı katkılı çimentonun boyut dağılımı.

Çizelge 3.14 : Z1-10, Z1-20, Z2-10 ve Z2-20'nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

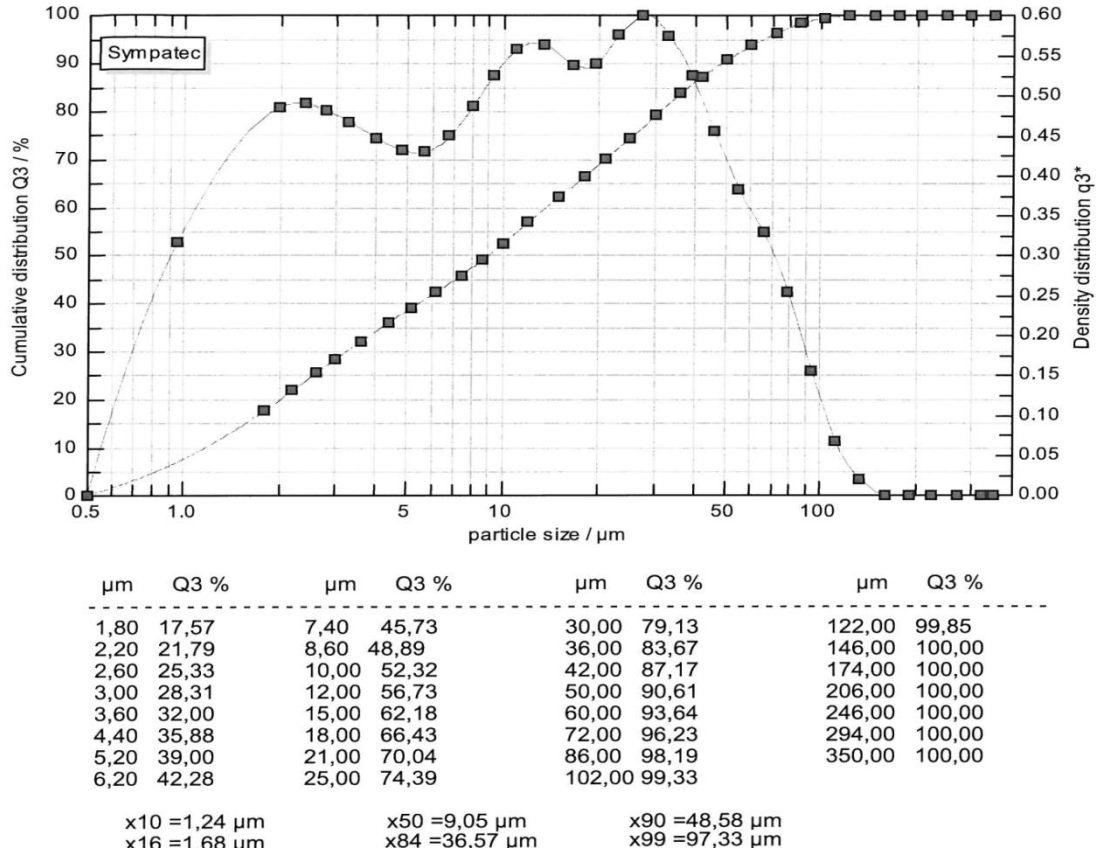
Özellik		Birim	Z1-10	Z1-20	Z2-10	Z2-20
Kimyasal Analiz	CaO	%	56,01	51,87	56,96	51,06
	SiO ₂	%	25,41	29,60	24,66	29,86
	Al ₂ O ₃	%	6,29	6,51	5,71	6,55
	Fe ₂ O ₃	%	3,15	3,11	3,04	3,01
	MgO	%	1,35	1,31	1,38	1,29
	SO ₃	%	2,36	2,44	2,72	2,41
	K ₂ O	%	1,36	1,41	1,18	1,45
	Na ₂ O	%	0,05	0,07	0,08	0,04
	Kızdırma Kaybı		3,19	3,37	2,52	3,49
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	2 Gün	MPa	18,7	17,5	22,1	16,6
	Basınç	7 Gün	MPa	34,9	32,2	37,6
	Dayanımı	28 Gün	MPa	55,0	53,8	56,8
		90 Gün	MPa	63,9	63,5	64,0
	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,94	2,91	2,98	2,88
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	5940	5811	5213	6063
	+32 µm	%	24,8	24,2	23,7	23,0
	İncelik	+90 µm	%	3,6	2,8	2,8
		+200µm	%	1,6	1,6	1,8
	Priz Başlangıcı	dakik	172	178	173	174
	Priz Sonu	dakik	247	263	227	260
	Hacim Genleşmesi	mm	9	10	10	9



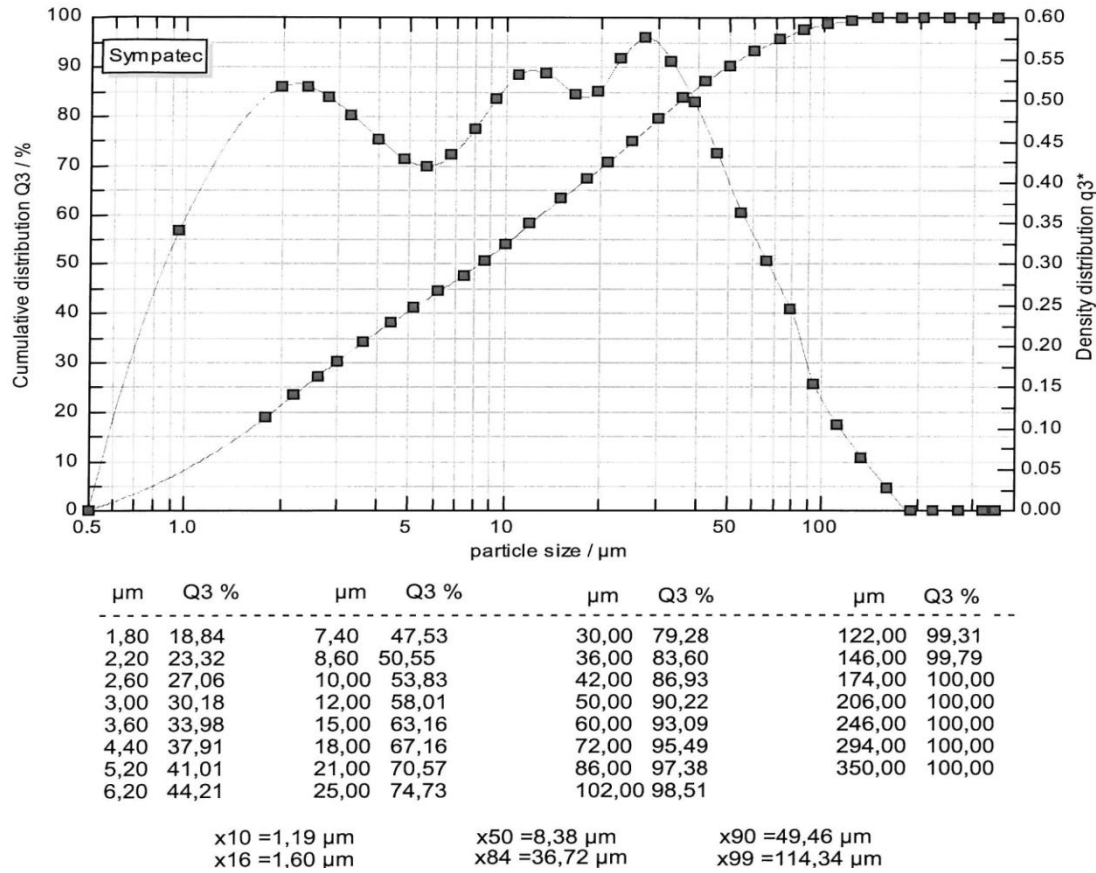
Şekil 3.38 : % 10 zeolit – 1 katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.39 : % 20 zeolit – 1 katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.40 : % 10 zeolit – 2 katkılı çimentonun boyut dağılımı.



Şekil 3.41 : % 20 zeolit – 2 katkılı çimentonun boyut dağılımı.

3.3.5 Yüksek fırın cürufu ile yer karosu kırığı katkılı çimento

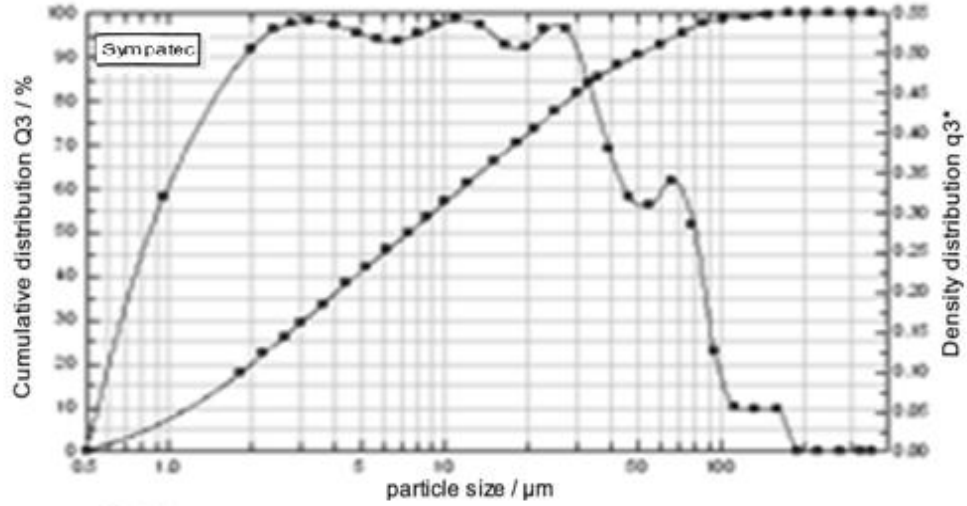
Seramik atıkları içinde tüm dayanımlarda artış gösteren tek numune olan % 5 yer karosu kırığı katkılı çimento referans alınarak; klinker, yüksek fırın cürufu, kalker ve yer karosu kırığının birlikte aynı çimento numunesi içinde uyumu araştırılmıştır. Bunun için, klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 20'si yüksek fırın cürufu, % 5'i kalker ve % 5'i alçıtaşı harmanlanarak Y5C20 çimentosu hazırlanmıştır. Y5C20 numunesinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.15'te yer almaktadır.

Y5C20 olarak adlandırılan katkılı çimentonun analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. CaO ve SiO₂ içeriği yüksek olan yüksek fırın cürufu çimentoda katkı olarak kullanıldığında ise Cao miktarı % 46,80, SiO₂ miktarı % 30,90 olmuştur. Blaine değeri 5424 cm²/g gibi yüksek bir değerde bulunan bu numunenin basınç dayanım sonuçları ise oldukça düşük olmuştur.

Şekil 3.42'de yeralan partikül analiz sonuçlarına göre, Y5C20 numunesinin ortalama tane boyutu 7,44 µm olmuştur. Bu değerden anlaşılan Y5C20 numunesinin Kontrol çimentosuna göre ince bir malzemedir. Çizelge 3.15'teki incelik analizine göre Y5C20 numunesinin +32 µm değeri % 22,7, +90 µm değeri % 6,3, +200 µm değeri % 3,6 olmuştur.

Çizelge 3.15 : Y5C20'nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik		Birim	Y5C20
Kimyasal Analiz	CaO	%	46,80
	SiO ₂	%	30,90
	Al ₂ O ₃	%	7,95
	Fe ₂ O ₃	%	3,07
	MgO	%	2,27
	SO ₃	%	2,42
	K ₂ O	%	1,02
	Na ₂ O	%	0,22
Kızdırma Kaybı			4,12
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	2 Gün	MPa	11,4
	Basınç 7 Gün	MPa	25,8
	Dayanımı 28 Gün	MPa	44,0
	90 Gün	MPa	52,8
	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,92
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	5424
	+32 µm	%	22,7
	İncelik +90 µm	%	6,3
	+200 µm	%	3,6
	Priz Başlangıcı	dakika	177
	Priz Sonu	dakika	213
	Hacim Genleşmesi	mm	8



μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	17,64	7,40	49,88	30,00	81,90	122,00	99,19
2,20	22,05	8,60	53,30	36,00	85,56	146,00	99,59
2,60	25,88	10,00	56,80	42,00	88,10	174,00	100,00
3,00	29,22	12,00	61,09	50,00	90,52	206,00	100,00
3,60	33,49	15,00	66,26	60,00	92,97	246,00	100,00
4,40	38,16	18,00	70,31	72,00	95,66	294,00	100,00
5,20	41,97	21,00	73,70	86,00	97,85	350,00	100,00
6,20	45,92	25,00	77,70	102,00	98,77		
x10 = 1,24 μm		x50 = 7,44 μm		x90 = 48,27 μm			
x16 = 1,68 μm		x84 = 33,44 μm		x99 = 112,84 μm			

Şekil 3.42 : Y5C20 çimentosunun boyut dağılımı.

3.3.6 Uçucu kül ile yer karosu kırığı katkılı çimento

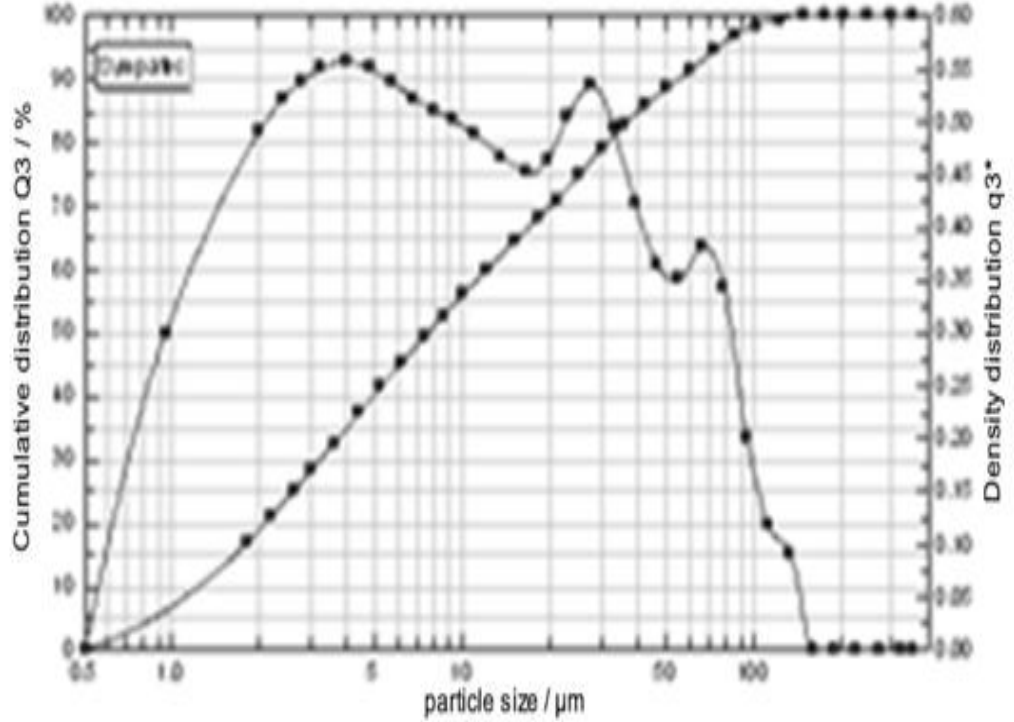
Yer karosu kırığının yüksek fırın cürufu ve kalkerle uyumuna bakılırken uçucu külle olan uyumuda araştırılmak istenmiştir. Bu nedenle daha önceden bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 20'si uçucu kül, % 5'i kalker ve % 5'i alçıtaşından oluşan Y5U20 katkılı çimentosunun hazırlanmasına karar verilmiştir. Y5U20 numunesinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.16'da yer almaktadır.

Y5U20 katkılı çimentosunun analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. CaO bakımından zengin olan uçucu kül klinker yerine kullanıldığında, SiO₂ miktarında önemli bir değişime yol açmazken, CaO içeriği Y5C20 numunesinden fazla olmuştur. Basınç dayanım sonuçları ise 2 ve 7 günlük dayanımlarda, Y5C20 numunesi gibi Blaine değeri yüksek olmasına rağmen (5452 cm²/g), düşük değerler elde edilirken, 28 ve 90 günlük dayanımlarda Y5C20 numunesine göre daha da düşük değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3.16 : Y5U20 çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Özellik	Birim	Y5U20	
Kimyasal Analiz	CaO	%	53,99	
	SiO ₂	%	22,62	
	Al ₂ O ₃	%	6,46	
	Fe ₂ O ₃	%	3,06	
	MgO	%	1,50	
	SO ₃	%	4,25	
	K ₂ O	%	0,89	
	Na ₂ O	%	0,16	
	Kızdırma Kaybı		5,77	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		2 Gün	MPa	12,5
	Basınç	7 Gün	MPa	18,3
	Dayanımı	28 Gün	MPa	25,7
		90 Gün	MPa	42,5
	Özgül Ağırlık		g/cm ³	2,96
	Özgül Yüzey Alanı		cm ² /g	5452
		+32 µm	%	29,0
	İncelik	+90 µm	%	8,9
		+200 µm	%	4,3
	Priz Başlangıcı		dakika	145
	Priz Sonu		dakika	222
	Hacim Genleşmesi		mm	9

Şekil 3.43’de yeralan partikül analiz sonucuna göre, Y5U20’nin ortalama tane boyutu 7,64 μm olmuştur. Bu değerden anlaşına Y5U20 numunesinin Kontrol çimentosuna göre ince, Y5C20 numunesiyle hemen hemen aynı incelikte bir malzemedir. Çizelge 3.16’daki incelik analiz sonuçları incelendiğinde, +32 μm değeri % 29,0, +90 μm değeri % 8,9 ve +200 μm değeri % 4,3 olmuştur. Y5U20 için yapılan iki boyut analizi sonuçlarının birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.



μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	16,67	7,40	49,34	30,00	79,02	122,00	99,30
2,20	20,94	8,60	52,66	36,00	82,91	146,00	100,00
2,60	24,71	10,00	55,93	42,00	85,74	174,00	100,00
3,00	28,05	12,00	59,78	50,00	88,51	206,00	100,00
3,60	32,41	15,00	64,30	60,00	91,28	246,00	100,00
4,40	37,25	18,00	67,87	72,00	94,29	294,00	100,00
5,20	41,23	21,00	70,97	86,00	96,92	350,00	100,00
6,20	45,33	25,00	74,79	102,00	98,39		

$$\times 10 = 1,28 \mu\text{m}$$

$$\times 16 = 1,75 \mu\text{m}$$

$$\times 50 = 7,64 \mu\text{m}$$

$$\times 84 = 38,30 \mu\text{m}$$

$$\times 90 = 55,38 \mu\text{m}$$

$$\times 99 = 115,36 \mu\text{m}$$

Şekil 3.43 : Y5U20 çimentosunun boyut dağılımı.

3.3.7 Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ile yer karosu kırığı katkılı çimentolar

Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün ayrı ayrı yer karosu ile uyumu incelendikten sonra, birlikte aynı çimento numunesinde olduklarında Kontrol çimentosuna kıyasla fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin ne yönde değiştiği araştırılmıştır. Bu amaçla üç numune (Y5C5U5, Y5C10U10 ve Y5C20U20) hazırlanmıştır. Y5C5U5'in içeriğinde klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 5'i yüksek fırın cürufu, % 5'i uçucu kül, %5'i kalker ve % 5 alçıtaşı; Y5C10U10 numunesinde klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 10'u yüksek fırın cürufu, % 10'u uçucu kül, %5'i kalker ve % 5 alçıtaşı; Y5C20U20 numunesinde klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 20'si yüksek fırın cürufu, % 20'si uçucu kül, %5'i kalker ve % 5 alçıtaşı mevcuttur. Y5C5U5, Y5C10U10 ve Y5C20U20 numunelerinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.17'de yer almaktadır.

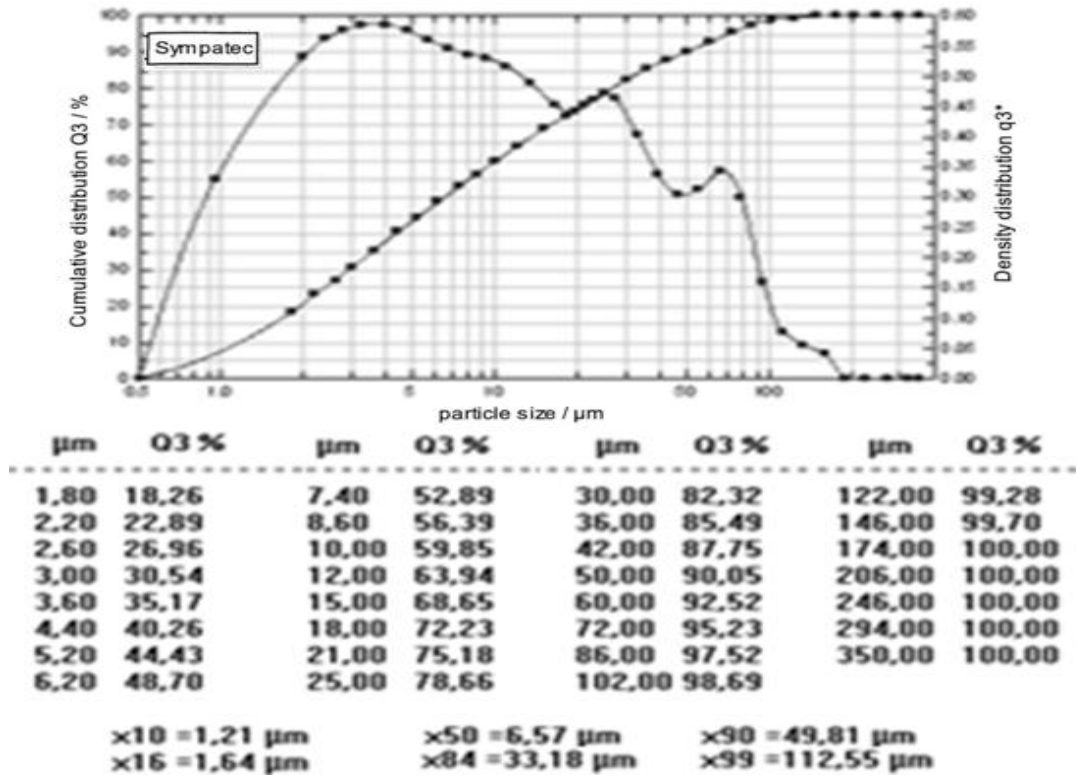
Y5C5U5, Y5C10U10 ve Y5C20U20 numunelerinin analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. Bu üç numunedeki cüruf ve uçucu kül katkısı arttıkça; numunelerin CaO içeriği azalmış, SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri ise artmıştır.

Dayanım değerleri irdelendiğinde ise cüruf ve uçucu kül katkısı arttıkça, tüm yaşlardaki dayanımlar azalmıştır. Örneğin, Kontrol çimentosuna göre 7 günlük dayanım değerlerinde Y5C5U5 numunesi için % 25,9'luk, Y5C10U10 numunesi için % 47,1'lik, Y5C20U20 numunesi için % 62,9'luk azalmalar yaşanmıştır. 2, 7 ve 28 günlük dayanımlarda çok büyük düşüşlerin olduğu bu çimentolarda, 90 günlük dayanımlarda önemli artışlar olsada Kontrol çimentosunun dayanım değerlerine ulaşamamıştır.

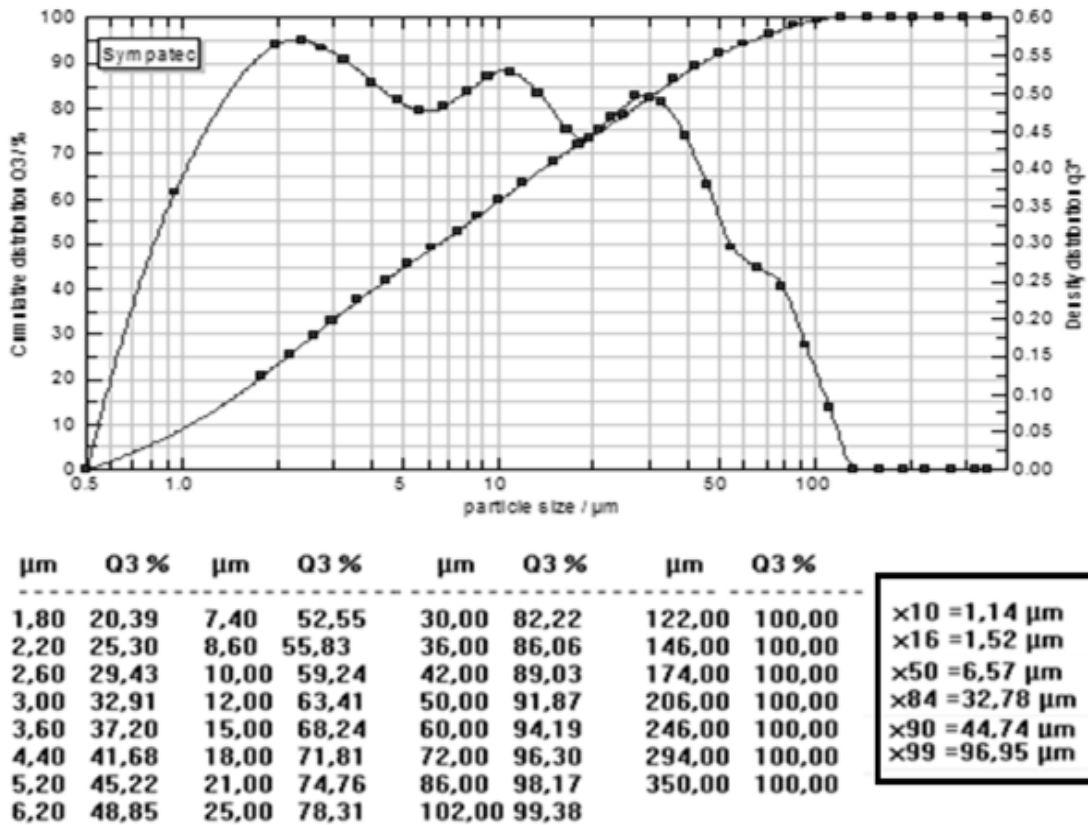
Y5C20U20 numunesinin Şekil 3.44'te'de, Y5C10U10 numunesinin Şekil 3.45'te ve Y5C5U5 numunesinin Şekil 3.46'da verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutları sırasıyla 6,57 µm, 6,57 µm ve 7,89 µm olmuştur. Kontrol çimentosunun 13,70 µm olan d₅₀ değeriyle kıyaslandığında, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, yer karosu kırığı ve kalker içeren katkılı çimentoların daha ince oldukları anlaşılmaktadır. Çizelge 3.14'teki incelik sonuçlarına göre; katkı miktarı arttıkça 32 µm eleküstü değerleri artmış, 90 µm ve 200 µm eleküstü değerleri ise azalmıştır.

Çizelge 3.17:Y5C20U20, Y5C10U10 VE Y5C5U5 çimentolarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

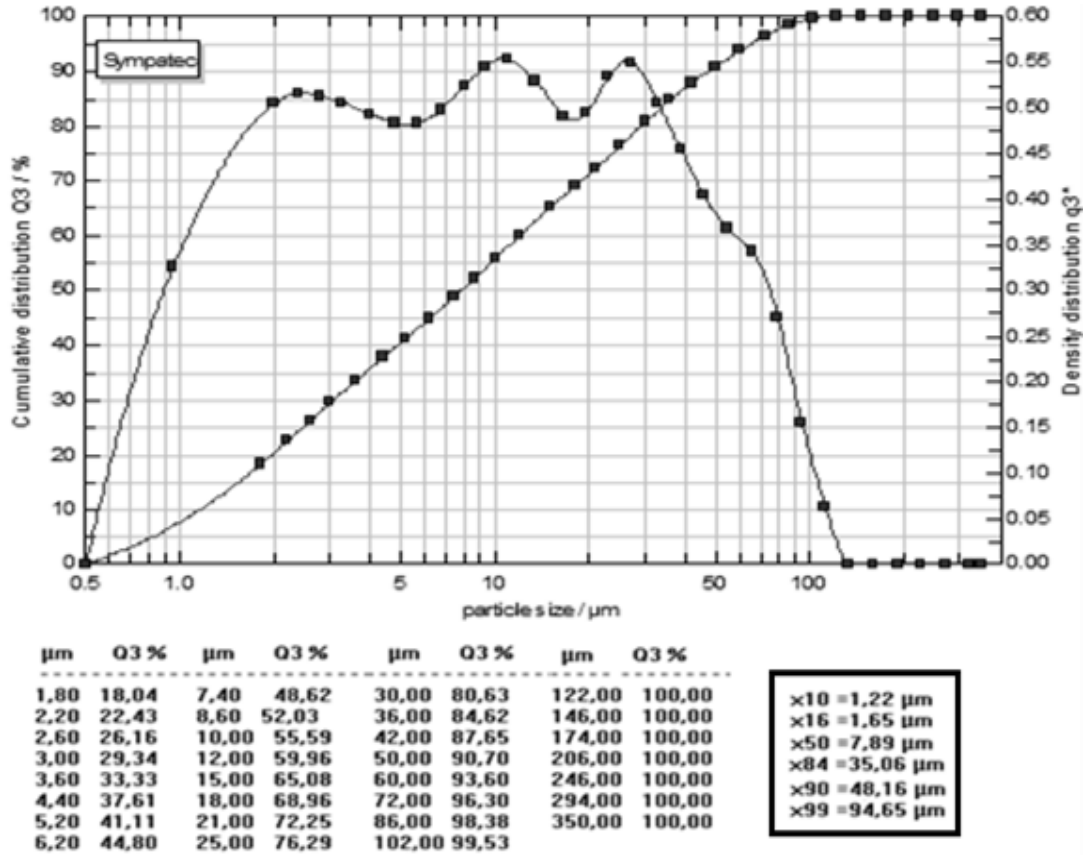
	Özellik	Birim	Y5C20U20	Y5C10U10	Y5C5U5	
Kimyasal Analiz	CaO	%	47,51	50,54	55,13	
	SiO ₂	%	27,68	25,80	23,18	
	Al ₂ O ₃	%	8,32	7,22	6,21	
	Fe ₂ O ₃	%	2,93	3,26	3,09	
	MgO	%	2,63	1,92	1,57	
	SO ₃	%	3,32	3,28	3,65	
	K ₂ O	%	0,92	0,92	0,86	
	Na ₂ O	%	0,18	0,20	0,16	
	Kızdırma Kaybı		5,46	5,18	4,46	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	2 Gün	MPa	7,3	12,0	16,6	
	Basınç	7 Gün	MPa	16,3	23,2	32,5
	Dayanımı	28 Gün	MPa	39,9	38,5	45,6
	90 Gün	MPa	53,1	50,3	56,5	
	Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,90	2,95	3,02	
	Özgül Yüzey Alanı	cm ² /g	6179	5731	5094	
	+32 µm	%	22,8	23,1	24,3	
	İncelik	+90 µm	%	6,8	6,6	5,6
	+200µm	%	3,9	3,8	3,1	
	Priz Başlangıcı	dakika	165	206	167	
	Priz Sonu	dakika	235	251	213	
	Hacim Genleşmesi	mm	9	10	10	



Şekil 3.44 : Y5C20U20 çimentosunun boyut dağılımı.



Şekil 3.45 : Y5C10U10 çimentosunun boyut dağılımı.



Şekil 3.46 : Y5C5U5 çimentosunun boyut dağılımı.

3.3.8 Zeolit – 2 ile yer karosu kırığı katkılı çimento

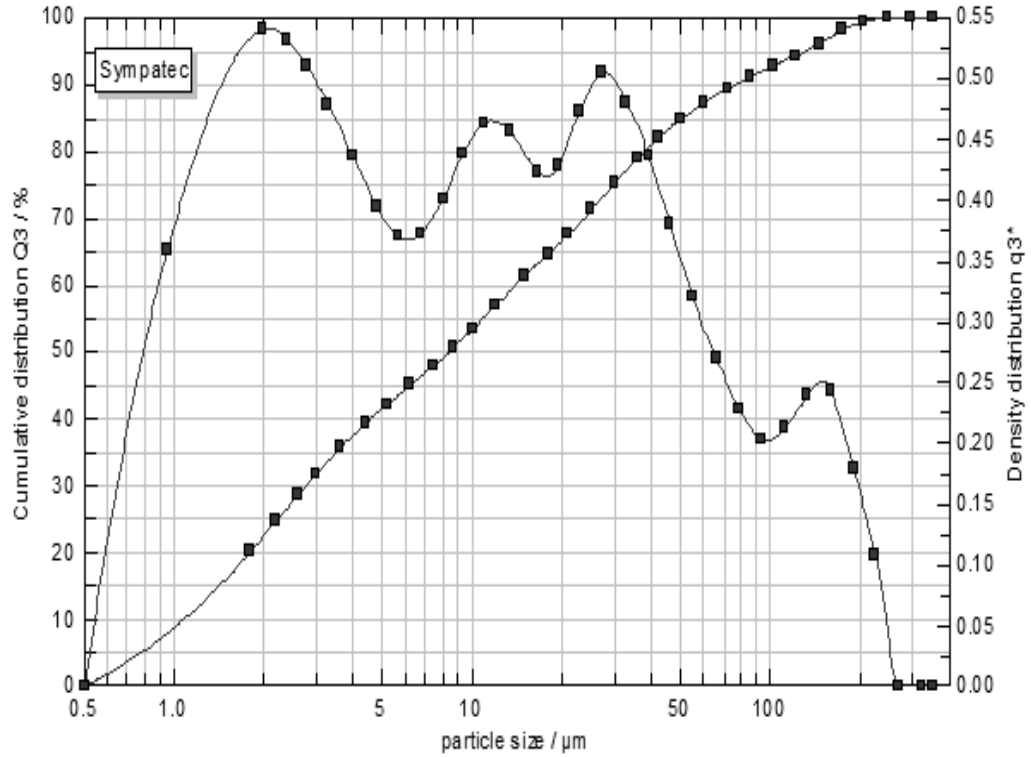
Bütün çalışma boyunca elde edilen sonuçlar incelendikten sonra en son numunede klinker kullanımını azaltmak amacıyla yer karosu kırığı ile zeolit – 2 malzemelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Y5Z2-10 olarak kodlanan numunenin mineral katkı içeriği şu şekilde olmuştur: Klinkerin % 5'i yer karosu kırığı, % 10'u zeolit – 2 ve % 5 alçıtaşı. Y5Z2-10 katkılı çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler sonunda elde edilen veriler Çizelge 3.18'de verilmiştir. Y5Z2-10 numunesinin analiz sonuçları incelendiğinde, kimyasal içeriklerinin ve genleşme miktarlarının standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmadığı gözlemlenmiştir. Numunenin CaO miktarı % 49,50, SiO₂ miktarı % 30,20 SO₃ miktarı % 2,77, kızdırma kaybı ise 3,86 olmuştur.

Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde ise, tek başlarına Kontrol numunesine göre artışlar gösteren yer karosu kırığı ve zeolit – 2 numuneleri, birlikte çimentoda kullanıldıklarında aynı performansı göstermemişlerdir. Y5Z2-10 numunesinin 2, 7 ve 90 günlük dayanım değerlerindeki düşüşler sırasıyla % 41,5, % 37,9 ve % 0,1 olmuştur.

Çizelge 3.18 : Y5Z2-10 çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Özellik	Birim	Y5Z2-10	
Kimyasal Analiz	CaO	%	49,50	
	SiO ₂	%	30,20	
	Al ₂ O ₃	%	7,70	
	Fe ₂ O ₃	%	3,59	
	MgO	%	1,36	
	SO ₃	%	2,77	
	K ₂ O	%	1,36	
	Na ₂ O	%	0,50	
	Kızdırma Kaybı		3,86	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler		2 Gün	MPa	13,0
	Basınç Dayanımı	7 Gün	MPa	28,2
		28 Gün	MPa	56,1
	Özgül Ağırlık		g/cm ³	2,91
	Özgül Yüzey Alanı		cm ² /g	5643
		+32 µm	%	31,4
	İncelik	+90 µm	%	10,0
		+200 µm	%	6,4
	Priz Başlangıcı		dakika	184
	Priz Sonu		dakika	222
	Hacim Genleşmesi		mm	10

Y5Z2-10 numunesinin Şekil 3.47’de verilen partikül analiz sonuçlarına göre, ortalama tane boyutu 8,44 μm olmuştur. Çizelge 3.18’deki incelik değerleri ise +32 μm için % 31,4, +90 μm için % 10,0, +200 μm için % 6,4 olmuştur. Y5 ve Z2-10 numunelerinde daha az olan elek üstü değerleri, yer karosu kırığı ile zeolit – 2 numunesi birlikte çimentoda katkı olarak kullanıldığında artış göstermiştir. Partikül analiz sonuçlarına göre Y5 numunesinin d_{99} değeri 97,87 μm , Z2-10 için d_{99} değeri 97,33 μm olurken; Y5Z2-10 için bu değer 201,57 μm ’ye çıkmıştır.



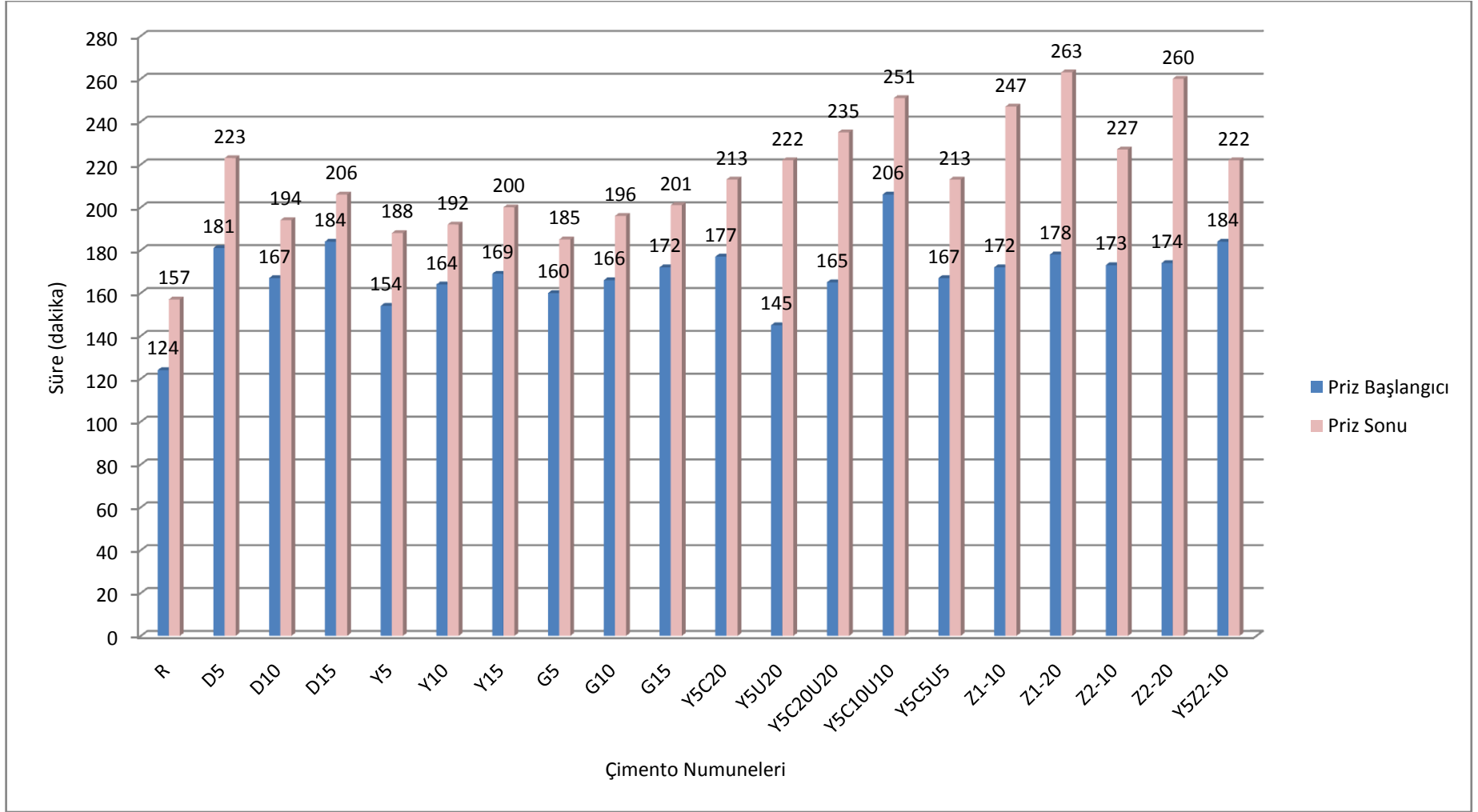
μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %	μm	Q3 %
1,80	19,92	7,40	47,73	30,00	75,03	122,00	94,16
2,20	24,62	8,60	50,34	36,00	78,82	146,00	96,03
2,60	28,47	10,00	53,20	42,00	81,74	174,00	97,87
3,00	31,63	12,00	56,86	50,00	84,62	206,00	99,18
3,60	35,41	15,00	61,26	60,00	87,14	246,00	100,00
4,40	39,20	18,00	64,61	72,00	89,27	294,00	100,00
5,20	42,05	21,00	67,46	86,00	91,02	350,00	100,00
6,20	44,87	25,00	71,04	102,00	92,52		
x10 = 1,15 μm		x50 = 8,44 μm		x90 = 77,86 μm			
x16 = 1,54 μm		x84 = 48,29 μm		x99 = 201,57 μm			

Şekil 3.47 :Y5Z2-10 çimentosunun boyut dağılımı.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

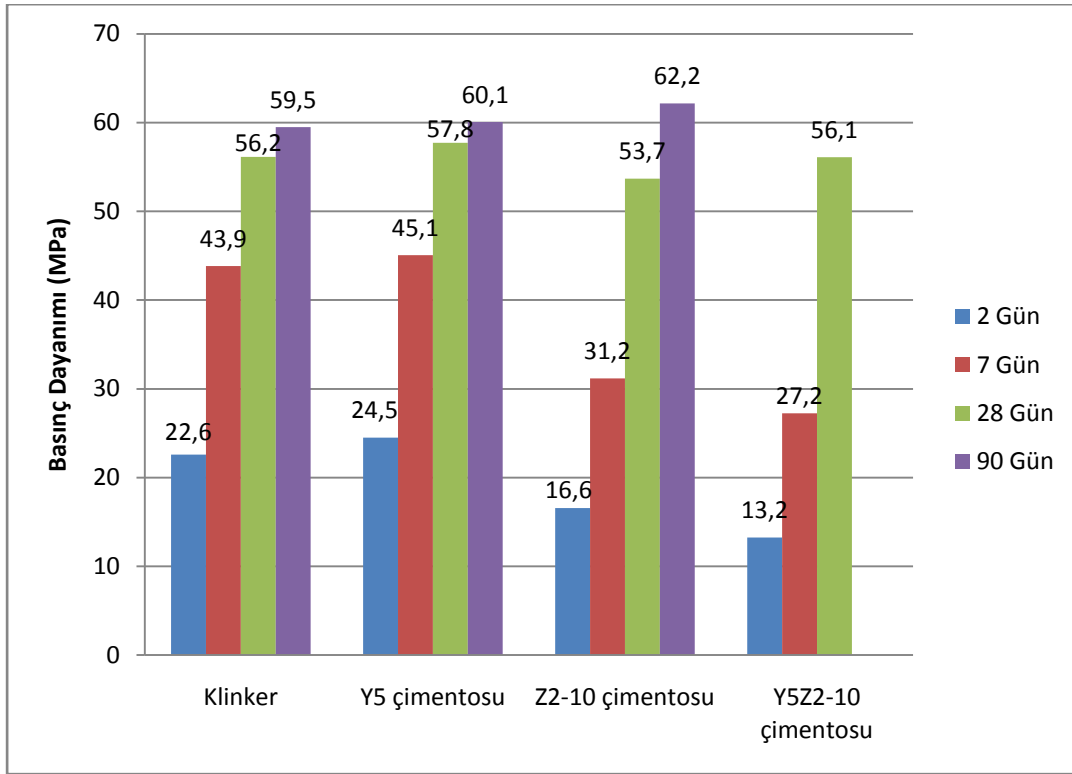
Bu çalışmada, seramik fabrikalarında ıskarta ürün olarak adlandırılan duvar karosu kırığı, yer karosu kırığı ve granit kırığının, doğal puzolan olarak zeolitin, yapay puzolan olarak yüksek fırın cürufu ile uçucu külün ve kalkerin çimentoda tek başlarına veya birlikte klinkerin yerine ikame edildiklerindeki kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- ❖ Deneysel çalışmalar sırasında hazırlanan 20 numunenin kimyasal analizleri yapıldığında numunelerin kimyasal içeriklerinin, kızdırma kayıplarının TS EN 197-1’de verilen sınır değerleri aşmadığı anlaşılmıştır.
- ❖ Kontrol çimentosunun özgül yüzey alanı 3343 cm²/g, duvar karosu kırığı katkılı çimentoların 4000 – 4500 cm²/g, yer karosu kırığı katkılı çimentoların 3600 - 3900 cm²/g, zeolit katkılı çimentoların 5200 – 6000 cm²/g aralığında bulunmuştur. Seramik atıkları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalker ve zeolit içeren katkılı çimentoların özgül yüzey alanları 5000 – 6200 cm²/g aralığında değişmiştir. En yüksek Blaine değeri, Y5C20U20 katkılı çimentosunda 6179 cm²/g olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni, Y5C20U20 katkılı çimentosunda çok ince boyutlarda tanelere sahip olan yüksek fırın cürufunun bulunmasından kaynaklanmaktadır.
- ❖ Hiçbir numunede genleşme sorunu yaşanmazken, priz süreleri çimentoda katkı miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. Tüm çimento numunelerinin priz sürelerini gösteren grafik Şekil 4.2 incelendiğinde en fazla priz süreleri Z1-20 ve Z2-20’de meydana gelmiştir. Bu sonuçtan zeolitin priz süresini arttırdığı sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.1 : Çimento numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri.

- ❖ Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, tüm dayanımlarda en iyi sonuç % 5 yer karosu kırığı katkılı çimentoda elde edilmiştir. Y5 numunesi 2 günlük dayanımda % 8,4'lük, 7 ve 28 günlük dayanımda %2,8'lik, 90 günlük dayanımda % 1,0'lik artışlar sağlamıştır.
- ❖ Yer karosu kırığı (Y10 ve (Y15), duvar karosu kırığı (D5, D10 ve D15) ve granit kırığı katkılı (G5, G10 ve G15) çimentoların basınç dayanım değerleri, klinkerin dayanım değerine ulaşamamıştır. Fakat bu çimentoların dayanım değerleri çok düşüğe olmamıştır. 28 günlük basınç dayanımı, 48,1 MPa ile 53,1 MPa arasında değerler kazanmıştır.
- ❖ Portland - kompoze çimento olarak nitelendirilebilecek Y5C20 ve Y5U20 numunelerinin dayanım değerleri oldukça düşük çıkmıştır. Y5C20U20, Y5C10U10 ve Y5C5U5 numunelerinin dayanım değerleri ise yüksek fırın cürufu ve uçucu kül miktarının azalmasına ters orantılı olarak artış göstermiştir, fakat yine de Kontrol çimentosunun dayanım değerlerine ulaşamamışlardır.
- ❖ Zeolit, klinkerin % 10 ve % 20'si oranında çimentoya katılmıştır. % 10 zeolit içeren numunelerin basınç dayanım değerleri nispeten yüksek olmuştur. 90 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde ise tüm zeolit katkılı çimentolarda (Z1-10, Z1-20, Z2-10 ve Z2-20) Kontrol çimentosuna göre artış sağlanmıştır.
- ❖ Kontrol çimentosuna göre basınç dayanımlarında artış sağlayan iki çimentonun (Y5 ve Z2-10) ve bu iki numunede yer alan yer karosu kırığı ile zeolit – 2'nin birlikte katkı olarak kullanıldığı Y2Z2-10 çimentosunun basınç dayanımlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.2'de verilmiştir. Yer karosu kırığı ve zeolit içeren katkılı çimentonun 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerleri sırasıyla 13,2 MPa, 27,2 MPa ve 56,1 MPa olmuştur. Bu değerler Kontrol çimentosunun dayanım değerlerine göre düşük olduğundan zeolit ile yer karosu kırığının uyumsuz malzemeler oldukları anlaşılmıştır.



Şekil 4.2 : Kontrol, Y5, Z2-10 ve Y5Z2-10 çimentolarının dayanım değerleri.

KAYNAKLAR

- [1] **Arikan, M.** (2004). Feasibility analysis of manufacturing high performance – ecological – cement in Turkey. *Building and Environment*, 39, Sf. 1125 – 1130.
- [2] **Rodrigues, F. A., Joeques, L.** (2011). Cement industry: sustainability, challenges and perspectives. *Environmental Chemistry Letters*, 9, Sf. 151 – 166.
- [3] **Soares, J. B., Tolmasquim, M. T.** (2000). Energy efficiency and reduction of CO₂ emissions thruht 2015: The Brazilian cement cement industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2000 Kluwer Academic Publishers, 5, Sf. 297 – 318.
- [4] **TÇMB** (2010). Küresel Çimento Endüstrisinde Düşük Karbonlu Geleceğe Doğru Atılan Teknolojik Adımlar. Prof. Asım Yeğınobalı (Ed.), Ankara.
- [5] **CEMBUREAU** (t.y.). Building a future, with cement and concrete: Adapting to climate change by planning sustainable construction. Brussels.
- [6] **Martin, N., Worrell, E., Price, L.** (1999). Energy efiiciency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. cement industry. Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division.
- [7] **British Geological Survey** (2005). Mineral profile: Cement raw materials. Office of the Deputy Prime Minister, Natural Environment Research Council.
- [8] **Duda, W. H.** (1988). Process engineering in the cement industry. *Cement Data Book.*, Sf. 32 – 205, 3. Ed.
- [9] **DPT**(1996). Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri, *Çimento Hammaddeleri (Kalker, Kil, Alçıtaşı, Katkı Maddeleri)*. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu, Dokuzuncu Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Cilt – 1, Ankara.

- [10] **Blezard, R. G.** (1998). The History of Calcareous Cements. Hewlett P. H. (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Butterworth Heinemann, Sf. 1 – 23.
- [11] **Dayı, M.** (2006). Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Bölümü, Ankara, 93.
- [12] **Url-1** <<http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53> >, alındığı tarih: 04.04.2013.
- [13] **DPT(2006).** *Çimento Sanayii Ön Raporu*. Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler Özel İhtisas Komisyonu, Dokuzuncu Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı MüsteşarlığıAnkara.
- [14] **Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı** (2012). *Çimento Sektörü Raporu*. Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi, Sanayi Genel Müdürlüğü.
- [15] **Ekonomi Bakanlığı** (2012). *Çimento Sektörü*. Sektör Raporları, İhracat Müdürlüğü, Kimya Ürünleri ve Özel İhracat Daire Başkanlığı.
- [16] **Bursa Çimento Fabrikası A. Ş.** (2011) 2010 Faaliyet Raporu, Bursa.
- [17] **TS EN 197 – 1** (2002). Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [18] **Yeğınobalı, A., Ertün, T.** (2009). Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, AR-GE Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- [19] **DPT** (2001). *Çimento Hammaddeleri Çalışma :Grubu Raporu*. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- [20] **Aruntaş, H.Y. ve Tokyay, M.** (1996).Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği.*Çimento ve Beton Dünyası*, 1, 4, Sf. 33-41,Ankara.
- [21] **Erdoğan, K., Tokyay, M., Türker, P.** (2009). *Traslar ve Traslı Çimentolar*. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, AR-GE Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, Ankara.

- [22] **Leckebush, R.** (1984). Türkiye’deki doğal puzolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı. *Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi*, Sf. 1 – 10, Ankara.**No index entries found.**
- [23] **Massazza, F.** (1998). Pozzolana and Pozzolan Cements. Hewlett P. H. (Ed.), *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Butterworth Heinemann, Sf. 471 – 635.
- [24] **TS 25** (2008). Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [25] **Kaplan, H., Binici, H.** (1995). Tras ve Traslı Çimentolar. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi, 1, 2 – 3, Sf. 121 – 127.
- [26] **Erdem, E., Donat, R., Çetişli, H.** (1999). Zeolit Katkılı Çimentoların Hidratasyon ve Mekanik Özellikleri. *Çimento ve Beton Dünyası*, 17, Sf. 22-28, Ankara.
- [27] **Okucu, A.** (1998). Bigadiç ve Turnatepe Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 54.
- [28] **DPT** (2001). *Çalışma :Grubu Raporu (Mika-Zeolit-Lületaşı)*. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri II, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- [29] **Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali, G.** (2010). The Effect of Zeolite On The Properties And Hydration Of Blended Cemets. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 32, Sf. 128-133.
- [30] **Yılmaz, B., Uçar, A., Ötekaya, B., Uz, V.** (2007). Properties of Zeolitic Tuff (Clinoptilolite) Blended Portland Cement. *Buildind and Environment*, Elsevier, 42, Sf. 3808-3815.
- [31] **Siddique, R., Khan, I.M** (2011). Fly Ash. *Supplementary Cementing Materials*, Chapter 1, Engineering Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Sf. 1-66.
- [32] **Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Koç, İ., Tarhan, M., Erenoğlu, T.** (2007) Doğal ve Endüstriyel Mineral Katkılar İçeren Betonların Tasarımı, Mekanik Özellikleri ve Dürabilitesi. 7. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, Sf. 291-300.

- [33] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınbalı, A.** (2009). Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, AR-GE Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- [34] **Wu, Z.** (2000). Development of High- Performance Blended Cements. Doktora tezi, The University of Wisconsin-Milwaukee, 198.
- [35] **Çelik, Ö.** (2004). Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi, 10, 3, Sf. 333 - 337.
- [36] **Url-2** < <http://www.tunculcemento.com.tr/cimntokatki.html>>, alındığı tarih: 5.10.2012.
- [37] **Shi, C., Qian, J.** (2000). High Performance Cementing Materials From Industrial Slags- A Review. *Resources Conservation and Recycling*, Elsevier.
- [38] **Siddique, R., Khan, I.M** (2011). Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Supplementary Cementing Materials*, Chapter 3, Engineering Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Sf. 121-173.
- [39] **Siddique, R.,** (2008). Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Chapter 1, Springer, Sf. 1-39.
- [40] **Tokay, M., Erdoğan, K.** (2009). Cürufur ve Cürufu Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, AR-GE Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- [41] **Smolczyk, H.G.** (1980). Slag Structure and Identification of Slag. Principal Report, 7. International Congress Chemistry of Cement, 1, Sf. 1-17 Paris.
- [42] **Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Uçar, A.** (2009). Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine ve Hidratasyona Etkileri. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Dumlupınar Üniversitesi, 19, Sf. 47-58.
- [43] **Difen, L., Longzhong, T., Ning, L., Haipeng, H.** (2005). Grinding Characteristics of Multi-Component Cement-Based Material. *Journal of Wuhan University of Technology*, 20, 1, Sf. 126-129.
- [44] **Yeğınbalı, A.,** (2009). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, AR-GE Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, Ankara.

- [45] **Fidjestol, P., Lewis, R.** (1998). Microsilica as an Addition. Hewlett P. H. (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Butterworth Heinemann, Sf. 679 – 712.
- [46] **Url-3** <<http://www.forumaden.com/forum/cimento-78/cimento-ogutmede-optimizasyon>>, alındığı tarih: 23.03.2013
- [47] **Pandey, S.P., Singh, A.K., Sharma, R.L., Tiwari, A.K.** (2003). Studies on High-Performance Blended/Multiblended Cements and Their Durability characteristics. *Cement and Concrete Research*, 33, Sf. 1433-1436.
- [48] **Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, İ.A.** (2009). Portland Kalkerli Çimento Bölüm I – Çimentoların Hazırlanması. *İMO Teknik Dergi*, 309, Sf. 4117-4736.
- [49] **MEGEP** (2006). Çimento Deneyleri – 3. İnşaat Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara.
- [50] **TS 196-3** (2002). Çimento – Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [51] **Yalçın, H., Gürü, M.** (2006). *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [52] **TS 196-1** (2009). Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [53] **AccuPyc II 1340** (ty). Ürün Kataloğu.
- [54] **TS 196-6** (2000). Çimento Deney Metotları – Bölüm 6: İncelik Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [55] **MEGEP** (2006). Çimento Deneyleri – 4. İnşaat Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara.
- [56] **Kuleli, Ö.** (2009). *Çimento Mühendisliği El kitabı*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [57] **Url-4** <<http://www.sympatec.com/EN/LaserDiffraction/LaserDiffraction.html>>, alındığı tarih: 05.04.2013

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Melis Toker

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy, 23.11.1986

Adres: Maltepe mah. Yeşilkent sitesi No: 181
Adapazarı/SAKARYA

E-Posta: melis_toker@hotmail.com

Lisans: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi