



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UÇUCU KÜL, YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE TRASLI
ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN AYNI MUKAVEMET
SINIFINDAKİ HARÇLARIN DAYANIM VE
DAYANIKLILIĞININ İNCELENMESİ**

**İnş. Müh. Kemal ÇELİK
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı**

**Danışman
Doç. Dr. Fahriye KILINÇKALE**

Temmuz, 2005

İSTANBUL

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren Hocam Sayın Doç. Dr. Fahriye KILINÇKALE' ye,

Her konuda benden yardım ve desteklerini esirgemeyen hocalarım Sayın Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU, Sayın Prof. Dr. T. ÇELİK, Sayın Prof. Dr. E. MANİSALI, Yrd. Doç. Dr. A. M. HAKSEVER, Yrd. Doç. Dr. T. ÇOŞGUN, Araş. Gör. Dr. Ö. F. KÜLTÜR, Araş. Gör. Dr. E. ÇOŞGUN, Araş. Gör. İnş. Yük. Müh. E. DAMCI, Araş. Gör. İnş. Yük. Müh. M. K. KELEŞOĞLU ve özel olarak Araş. Gör. Yük. Mimar İ. H. DEMİR ve Araş. Gör. İnş. Yük. Müh. Ö. GİRAN'a,

Arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. A. FETTAHOĞLU ve Araş. Gör. İnş. Yük. Müh. B. GÜNEŞ, Araş. Gör. Elek.-Elektronik Yük. Müh. H. DOĞAN ve Araş. Gör. Elektronik Yük. Müh. M. YALÇIN'a

Deneysel çalışmalarım için gerekli malzemelerin temininde ve deneylerin bir bölümünün gerçekleştirilmesinde Ar-Ge laboratuvarlarından yararlandığım Set Çimento Italcementi Group Anadolu Çimentoları T.A.Ş'nin Sayın Müdürü Yasin SARIÇAMLI, Operasyon Şefi Sayın Levent ONAT, Kalite Kontrol Teknisyeni Levent ÖZER ve Labortant Vedat ÖZEL, Mülayim ASLAN ve Cemal BOZBEK'e

Deneysel çalışmalar sırasında özverili çalışmalarından dolayı meslektaşlarım Hakan KAYA, Abdullah KURTULUŞ, Sinem METİN, Gülden SÖZKESEN ve Fatma GÖDEN'e

Sıkıntılı zamanlarımda yanımda olup bana destek olan BİRBİLEN ailesine ve daima yanımda olan, her zaman bana destek olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bilginin gerçek kaynağına ulaşabilme yolunda...

Kemal ÇELİK
Temmuz - 2005
Avcılar, İSTANBUL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	2
PUZOLANLAR	2
2.1. TARİHÇE	2
2.2. PUZOLANLARIN KULLANIMI	2
2.3. PUZOLAN ÇEŞİTLERİ	4
2.3.1. Doğal Puzolanlar	4
2.3.2. Yapay Puzolanlar	5
2.3.2.1. Uçucu Kül	5
2.3.2.1.1. Silissi Uçucu Kül	5
2.3.2.1.2. Kalkersi Uçucu Kül	6
2.3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu	6
2.3.2.3. Silis Dumanı	6
2.3.2.4. Pirinç Kabuğu Külü	6
2.4. ÇİMENTODA PUZOLAN KULLANIMININ ETKİLERİ	7
2.4.1. Teknik Etki	7
2.4.1.1. Dayanım	8
2.4.1.1.1. Doğal Puzolanların Dayanıma Etkisi	8
2.4.1.1.2. Cürufu Çimentoların Dayanıma Etkisi	9
2.4.1.1.3. Uçucu Küllü Çimentoların Dayanım Özellikleri	9
2.4.1.2. Dayanıklılık	10
2.4.1.2.1. Sülfatlara Karşı Dayanıklılık	11
2.4.1.2.2. Klor Etkisine Dayanıklılık	12

2.4.1.2.3. Alkali Agregası Reaksiyonuna Dayanıklılık	14
2.4.1.2.4. Donma Çözülme Etkisine Dayanıklılık	16
2.4.1.2.5. Islanma Kuruma Etkisine Dayanıklılık	18
2.4.2. Ekolojik ve Ekonomik Etki	19
2.5. ÇİMENTO TİPLERİ - BİLEŞİM VE İŞARETLEME	20
2.5.1. Ana Bileşenler	20
2.5.2. Minör İlave Bileşenler	21
2.5.3. Bileşim Oranları	21
2.5.4. Dayanım Sınıfları	21
2.5.5. Çimento İçin Standart İşaretleme	22
2.6. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	23
3. MALZEME VE YÖNTEM	25
3.1. KULLANILAN MALZEMELER	25
3.1.1. Portland Çimentosu Klinkeri	25
3.1.2. Kalsiyum Sülfat (Alçı)	25
3.1.3. Doğal Puzolan (Tras)	25
3.1.4. Uçucu Kül	25
3.1.5. Granüle Yüksek Fırın Cürufu	25
3.1.6. Kum (CEN Standart Kum)	26
3.2. ÇİMENTO ÜRETİMİ	26
3.2.1. Öğütme İşlemi	26
3.2.2. Çimento Üretimi	27
3.3 HARÇ ÜRETİMİ	27
3.4 YAPILAN DENEYLER	29
3.4.1. Fiziksel Deneyler	29
3.4.1.1. Yoğunluk Tayini	29
3.4.1.2. Elek Analizi	30
3.4.1.3. İncelik (Blaine)	30
3.4.1.4. İncelik (Lazerli Tanecik Ölçümü)	31
3.4.1.5. Normal Kıvam Tayini	33
3.4.1.6. Priz Süreleri Tayini	34
3.4.1.7. Hacim Genleşmesi	34
3.4.2. Mekanik Deneyler	35

3.4.2.1. Eğilme Dayanımı Deneyi	35
3.4.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi	36
3.4.3. Durabilite Deneyleri	36
3.4.3.1. Donma – Çözülme Deneyi	36
3.4.3.2. Islanma - Kuruma Deneyi	37
3.4.3.3. Hasar Ölçüm Deneyleri	37
3.4.3.3.1. Ultrases Hızı	37
3.4.3.3.2. Ağırlık Değişimi Deneyi	37
4. BULGULAR	38
4.1. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI	38
4.1.1. Puzolanik Katkıların Fiziksel Deney Sonuçları	38
4.1.2. Referans ve Katkılı Çimentoların Fiziksel Deney Sonuçları	38
4.1.2.1. Referans ve Katkılı Çimentoların Lazerli Tanecik Ölçümü Sonuçları	39
4.2. MEKANİK DENEY SONUÇLARI	48
4.3. HASAR ÖLÇÜM DENEYLERİNİN SONUÇLARI	50
4.3.1. Donma Çözölmeye Maruz Bırakılan Numuneler	50
4.3.2. Islanma Kurumaya Maruz Bırakılan Numuneler	52
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	54
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması	4
Şekil .2.2. Çimento ve mineral katkı	7
Şekil 2.3. Çimento hamur yapıları	7
Şekil 2.4. Doğal puzolanlı harçların dayanımı-dayanım değerleri	8
Şekil 2.5. Çimentodaki doğal puzolan miktarının normal kıvam için gerekli su miktarına etkisi	13
Şekil 2.6. Cürufli çimentolarda klor permeabilitesi	14
Şekil 2.7. Farklı miktarlarda doğal puzolan içeren harçlarda alkali – agregası reaksiyonundan kaynaklanan genişleme	15
Şekil 2.8.Cürufli çimentolarla Portland çimentolarının alkali – agregası genişmeleri bakımından karşılaştırılması	16
Şekil 3.1.(a) Bilyalı öğütme değirmeni	26
Şekil 3.1.(b) Bilyalı öğütme değirmen içi	26
Şekil 3.2. Harç üretimi ve numunelerin muhafazası	28
Şekil 3.2. (a) Çimento tartımı	28
Şekil 3.2. (b) Su tartımı	28
Şekil 3.2. (c) Harç mikseri	28
Şekil 3.2. (d) Şok aleti	28
Şekil 3.2. (e) Harç kalıbı	28
Şekil 3.2. (f) Harç kalıbının yüzey masterlanması	28
Şekil 3.2 (g) Cam kapak muhafazası	28
Şekil 3.2 (h) Kür dolabı	28
Şekil – 3.3 Tane yoğunluğu cihazı	29
Şekil 3.4. Alpine elek makinesi	30
Şekil 3.5. Blaine aleti	31
Şekil 3.6. Parçacık hacim dağılımının (1) sayı dağılımına (2) dönüştürülmesi	32
Şekil 3.7.Master Sizer cihazı	33

Şekil 3.7. (a) Master Sizer cihazı	33
Şekil 3.7. (b) Numune haznesi	33
Şekil 3.7. (c) (d) Numune yerleştirme	33
Şekil 3.8. Otomatik Vicat aleti	34
Şekil 3.9 Le Chatelier iğnesi ve Le Chatelier halkası	35
Şekil 3.10. Eğilme dayanımı cihazı	35
Şekil 3.11. Pres makinası	36
Şekil 4.1. Referans CEM I 42,5 N lazerli tanecik dağılımı	40
Şekil 4.2. CEM II/A -S (%14) Lazerli tanecik dağılımı	40
Şekil 4.3. CEM II/A -S (%19) Lazerli tanecik dağılımı	41
Şekil 4.4. CEM I 42,5, CEM II/A –S %14 ve CEM II/A –S %19 Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı	41
Şekil 4.5. CEM II/A -V (%9) Lazerli tanecik dağılımı	42
Şekil 4.6. CEM II/A -V (% 14) Lazerli tanecik dağılımı	43
Şekil 4.7. CEM II/A -V (% 19) Lazerli tanecik dağılımı	44
Şekil 4.8.- CEM I 42,5, CEM II/A –V(%9), CEM II/A –V(%14) ve CEM II/A –V(%19) Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı	44
Şekil 4.9. CEM II/A -P (% 9) Lazerli tanecik dağılımı	45
Şekil 4.10. CEM II/A -P (% 14) Lazerli tanecik dağılımı	46
Şekil 4.11. CEM II/A -P (% 19) Lazerli tanecik dağılımı	46
Şekil 4.12. CEM I 42,5, CEM II/A –P(%9), CEM II/A –P(%14) ve CEM II/A –P(%19) Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı	47
Şekil 4.13- CEM I ve CEM II Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı	47
Şekil 4.14. Kür havuzunda bekletilen numunelerde basınç dayanımının referans numunenin basınç dayanımına oranı (%)	48
Şekil 4.14. (a) 7. Gün/28. Gün Referans	49
Şekil 4.14. (b) 28. Gün/28. Gün Referans	49
Şekil 4.15. Kür Havuzunda bekletilen numunelerde eğilme dayanımının referans numunenin eğilme dayanımına oranı (%)	49
Şekil 4.15. (a) 7. Gün/28. Gün Referans	49
Şekil 4.15. (b) 28. Gün/28. Gün Referans	49
Şekil 4.16. Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişim oranı (%)	51

Şekil 4.16. (a) 15. Gün	51
Şekil 4.16. (b) 28. Gün	51
Şekil 4.17. Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişim oranı (%)	51
Şekil 4.17. (a) 15. Gün	51
Şekil 4.17. (b) 28. Gün	51
Şekil 4.18. Islanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişim oranı (%)	53
Şekil 4.18. (a) 15. Gün	53
Şekil 4.18. (b) 28. Gün	53
Şekil 4.19. Islanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişim oranı (%)	53
Şekil 4.19. (a) 15. Gün	53
Şekil 4.19. (b) 28. Gün	53

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Sabit PH'lı sülfat çözeltisinde bekletilen çimento pastalarının basınç dayanım kaybı	13
Tablo 2.2. Genel çimentolar	23
Tablo 2.3. Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler	24
Tablo 3.1. Mineral katkıların kimyasal bileşimi (%)	27
Tablo 3.2. CEN Referans kumunun tanecik büyüklük dağılımı	28
Tablo 3.3. Referans CEM I 42,5 N ve katkıların öğütme devir sayıları	28
Tablo 3.4. Üretilen çimentoların kodları ve karışım oranları	29
Tablo 3.5. Çimentoların kimyasal özellikleri	29
Tablo 4.1. Referans ve katkıların elek analizi, yoğunluk ve özgül yüzey değerleri	40
Tablo 4.2. Referans ve katkılı çimentoların elek analizi, yoğunluk, özgül yüzey, priz sonu, kıvam tayini ve genleşme değerleri	41
Tablo 4.3. Referans CEM I 42,5 N lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	41
Tablo 4.4 CEM II/A -S (%14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	42
Tablo 4.5. CEM II/A -S (%19) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	43
Tablo 4.6. CEM II/A -V (%9) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	44
Tablo 4.7. CEM II/A -V (%14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	45
Tablo 4.8. CEM II/A -V (%19) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	45

Tablo 4.9. CEM II/A -P (%9) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	47
Tablo 4.10. CEM II/A -P (% 14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	47
Tablo 4.11. CEM II/A -P (% 19) Lazerli tanecik dağılımı (Elek üstü kalıntı (Hacimsel))	48
Tablo 4.12. 7. Gün ve 28. gün basınç dayanımı	50
Tablo 4.13. 7. Gün ve 28. gün eğilme dayanımı	51
Tablo 4.14. Donma/çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı	52
Tablo 4.15. Donma/çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi	53
Tablo 4.16. Islanma/kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı	54
Tablo 4.17. Islanma/kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi	55

SEMBOL LİSTESİ

CH; Ca(OH) ₂	: kalsiyum hidroksit
S; (SiO ₂)	: silisyum dioksit
A; (Al ₂ O ₃)	: alüminyum oksit
F; (Fe ₂ O ₃)	: demir oksit
CaO	: kalsiyum oksit
MgO	: magnezyum oksit
CEM I	: portland çimentosu
CEM II	: portland -kompoze Çimento
CEM III	: portland yüksek fırın cürufu çimento
CEM IV	: puzolanik çimento
CEM V	: kompoze çimento
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
K	: klinker
S	: granüle yüksek fırın cürufu
D	: silis dumanı
P	: doğal puzolan
Q	: doğal kalsine edilmiş puzolan
V	: silissi uçucu kül
W	: kalkersi uçucu kül
T	: pişmiş şist
L	: kalker
K	: cihaz sabiti,
e	: yatağın porozitesi,
t	: ölçülen zaman, (s)
ρ	: çimentonun yoğunluğu (g/cm ³)
η	: deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi (Pa.s)
a_0	: t=0' da iğneler arası açıklık

a_1	: t=28 saat sonunda iğneler arası açıklık
b	: prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (cm),(4 cm)
P	: prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, (kgf), (N)
L	: destek silindirlerinin eksenleri arasındaki uzaklık, (cm), (10 cm)
σ_R	: eğilmede çekme mukavemeti, (kgf/cm ²), (N/mm ²)
σ_C	: basınç dayanımı (N/mm ²),
P	: kırılmadaki en büyük yük (N),
W_D	: ağırlık değişimi (%)
W_t	: t süredeki ağırlık değişimi (g)
W_0	: başlangıçtaki (28. gündeki) ağırlık (g)

ÖZET

Bu yüzyılın başlarından itibaren puzolanlı çimentolar önemli derecede ilgi görmektedir. Katkılı çimentolar, Portland çimentosunda olmayan performans özelliklerine sahip olmalarının yanında çelik, elektrik ve silikon endüstrisinin ikincil ürünlerinin faydalı bir şekilde kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Ancak, değişik kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklere sahip katkı malzemelerinin klinkere ilavesi çimento sisteminde önemli ölçüde farklılıklara neden olmaktadır. Bu çalışmada, katkı türünün ve katkı oranının, çeşitli çevresel koşullar altında, puzolanlı çimentoların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, üç tür katkı (Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül V (veya F) sınıfı, Tras), üç farklı oranda (%9, %14, %19) ayrı öğütme tekniği ile Portland çimentosuna katılarak, birbirlerine yakın inceliklerde ($3500 \text{ cm}^2/\text{g} \sim 3700 \text{ cm}^2/\text{g}$) dokuz tip katkılı çimento ve referans (kontrol) Portland çimentosu üretilmiştir. Çimentolarla üretilen harçlar ilk 28 gün kür havuzunda bekletilmiş ardından birinci grup numuneler donma – çözülme etkisine, ikinci grup numuneler ıslanma – kuruma etkisine , üçüncü grup numuneler ise standart kür etkisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca 28 günlük eş dayanım sınıfındaki farklı tip katkılı çimentoların, benzer çevresel etki koşullarında gösterdikleri performanslar incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen belli başlı sonuçlar şöyledir: 28. günün sonunda % 14 ve % 19 yüksek fırın cürufu ve % 9 uçucu kül katkılı çimentoların dayanımları katkısız çimentonunkinden fazla olmaktadır. Uçucu kül katkılı ve tras katkılı çimentolarda katkı oranının artması ile dayanım düşüşleri gözlenmektedir. Erken yaşlarda ise, katkılı çimentoların dayanımları katkı miktarına ters orantılı olarak azalmakta ve referans çimentonun dayanımından düşük değerler almaktadır. Donma / çözülme ve ıslanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numuneler içinde en iyi performansı % 9 oranında uçucu kül içeren CEM II-A/V (%9) çimentosu göstermektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda katkı oranının artması ile donma / çözülmeye olan dayanıklılığın olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Uçucu kül ve tras katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça ıslanma kuruma etkisine olan dayanıklılık azalmakta, yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda ise katkı oranı arttıkça dayanıklılık artmaktadır. 28. gün sonunda yakın dayanımlarda olan referans ve % 9 katkılı çimentolar arasında donma / çözülme ve ıslanma / kuruma etkisine karşı en iyi performansı, uçucu kül içeren çimento göstermektedir. Tras katkılı numuneler ise yıpratıcı koşullardan en fazla etkilenen numuneler olmaktadır.

SUMMARY

Pozzolanic cements have attracted considerable interest since the beginning of this century. Blended cements are characterized not only by their performance properties that are absent in Portland cement, but they also represent gainful utilization of by-products from steel, electric power, and silicon industries. However, the addition of blending materials of different chemical, mineralogical and physical properties introduces significant diversity into the cement system. In this study, the effects of additive types and additive percentage on strength and durability properties of cements under different environmental conditions were investigated. For this purpose, three types of additives (Blast Furnace Slag, Fly Ash V (or F) class and Trass), were admixed to Portland cement in three different ratios (9%, 14%, 19%) by means of a separate grinding system. Thus, nine types of blended cements and a reference (control) Portland cement having nearly the same fineness have been produced. The mortars produced from the mentioned cements were left to curing for 28 days. Then the first, second and the last groups of specimens were exposed to freezing-thawing, wetting-drying effects and standard curing respectively. Furthermore, the performance of different types of cements, which are in the same strength range for 28 days, are examined under similar environmental conditions.

The results showed that the strengths of the cements with 14% and 19% blast furnace slag and 9% fly ash, after 28 days, are higher than the specimens with no additives. Decrease in the strengths is observed with the increase in the percentage of fly ash and trass additives in the cements. In early ages, the strengths of the cements with additives decrease with the increase in the amount of additives and the strength is less than the reference cement without any additives. The best performance amongst the specimens, which are exposed to the effects of freezing / thawing and wetting / drying, is observed in the cement sample with 9% fly ash additive, CEM II-A/V (9%). It is observed in the cements with fly ash additives that the strengths against freezing / thawing are badly affected with the increase in the additives. In the cements with fly ash and trass additives, the increase in the additives decreases the strengths against the effects of wetting-drying, however in the cements with blast furnace slag, the strength increases. At the end of 28th day, among the reference cement and blended cements which have similar strengths cements and including 9% additives, the best performance against freezing-thawing and wetting-drying is observed in the specimen with fly ash additives. The specimens with trass additives are the most affected by the aggressive circumstances.

1. GİRİŞ

Bu yüzyılın başlarından itibaren puzolanlı (veya katkı) çimentolar önemli derecede ilgi görmektedir [1]. Aslında, katkı çimentolar modern toplumun ihtiyaçlarını karşılayan temel bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Katkı çimentolar hem Portland çimentosunda (veya CEM I' de) olmayan performans özelliklerine sahip olmakta hem de çelik, elektrik ve silikon endüstrisinin ikincil ürünlerinin faydalı bir şekilde kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Ancak, değişik kimyasal ve mineralojik bileşenlere sahip katkı malzemelerinin klinkere ilavesi çimento sisteminde önemli ölçüde farklılıklara neden olmaktadır. Bu nedenle farklı çimentolar ile üretilen betonların farklı özelliklere ve performanslara sahip olmaları kaçınılmaz olmaktadır [2].

Betonun değerlendirilmesinde 28 günlük basınç dayanımı önemli bir parametredir. TS EN 197-1 standardı, çimentonun uygunluğunun tespitinde ve dayanım sınıfının belirlenmesinde 28 günlük basınç dayanım değerini esas almaktadır. Maalesef birçok örnek göstermiştir ki, 28 günlük yeterli basınç dayanımına sahip betonlar çoğu zaman tasarım aşamasında maruz kalacağı çevre koşullarının dikkate alınmaması veya yanlış ve yetersiz kür edilme gibi nedenlerle birçok özelliklerini kaybetmektedirler [2]. Görülmektedir ki, kompozit bir malzeme olan betonarmenin olumlu özelliklerini sürdürebilmesi dayanımının yanı sıra kalıcı olmasına bağlıdır [3]. 2002 yılında kabul edilen ve 2004 yılında yürürlüğe konulan TS EN 206-1 standardı, betonun bulunduğu ortamın göz önünde bulundurulması amacıyla, çevresel etki sınıflaması ve yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılık için beton karışımları önerileri getirmektedir. Bütün bu gelişmeler tasarım sırasında, betonun dayanımı ile birlikte betonun bulunduğu dış ortam etkilerinin göz önünde bulundurulması gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, katkı türünün ve katkı oranının, çeşitli çevresel koşullar altında, puzolanlı çimentoların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, üç tür katkı (Yüksek Fırın Cürufu – (Ereğli), Uçucu Kül V (veya F) sınıfı – (Çatalağzı), Tras – (Kaytazdere)), üç farklı oranda (%9, %14, %19) ayrı öğütme tekniği ile Portland çimentosuna

katılarak, birbirlerine yakın inceliklerde ($3500 \text{ cm}^2/\text{g} \sim 3700 \text{ cm}^2/\text{g}$) dokuz tip katkılı çimento ve referans (kontrol) Portland çimentosu üretilmiştir. Çimentolarla üretilen harçlar üretimin ardından 28. güne kadar kür havuzunda bekletilmiştir. 28. günün ardından birinci grup numuneler donma – çözülme etkisine, ikinci grup numuneler ıslanma – kuruma etkisine, üçüncü grup numuneler ise kür havuzunda standart kür etkisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca 28 günlük eş dayanım sınıfındaki farklı tür katkılı çimentoların, benzer çevresel etki koşullarında gösterdikleri performanslar incelenmiştir.

Bölüm 2’de puzolanlar; puzolan çeşitleri, çimentoda puzolan kullanımının etkileri; katkılı çimentoların dayanım ve kalıcılık özellikleri ile ilgili çalışmalar derlenmiş, çimento tipleri ile çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

Bölüm 3’de, bu çalışmada kullanılan malzemeler, bu malzemelerle üretilen harç karışımları, deneyler ve deneylerde kullanılan aletler açıklanmıştır.

Bölüm 4’de, yapılan deneylerin sonuçları tablolar ve grafikler halinde açıklanmıştır.

Bölüm 5’de, çalışma bulgularının değerlendirilmesi ile varılan sonuçlar mevcut literatür bilgisi ile birlikte yorumlanmıştır. Çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

PUZOLANLAR

Puzolanlar, silissi ve alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Puzolanlar su ile karşılaştığında kendi kendine sertleşmezler fakat ince öğütüldüğünde ve suyun mevcudiyetinde normal çevre sıcaklığında çözülmüş kalsiyum hidroksitle (CH ; $\text{Ca}(\text{OH})_2$), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25’den az olmamalıdır [4].

2.1. TARİHÇE

İnsanların su içinde priz yapabilen, su etkisiyle erimeyen bağlayıcı üretme çabaları çok eski çağlara kadar uzanır. Sorunun kesin çözümü çimentonun icadı ile mümkün olabilmiştir. Bununla beraber aktif, camlaşmış silis (SiO_2) içeren toprakların kireçle karıştırılmaları durumunda bu özelliğin kısmen sağlandığı gözlenmiştir. Eski Mısır’da tuğlanın (pişmiş kil) öğütülerek kirece katılması düşünülmüştür. Bu yöntemle elde edilen harca “horasan harcı” denilmektedir. Osmanlılar bu harcı geniş ölçüde ve bilinçli olarak kullanmışlardır. Avrupa’da ise Romalılar Napoli civarındaki Puzzuoli kasabasının toprağından yararlanmışlardır. Puzolan sözcüğü bu kullanımdan kaynaklanmaktadır. Almanlar puzolana “tras” demektedirler, ülkemizde de bu deyim yaygındır ve standartlarımıza geçmiştir [5].

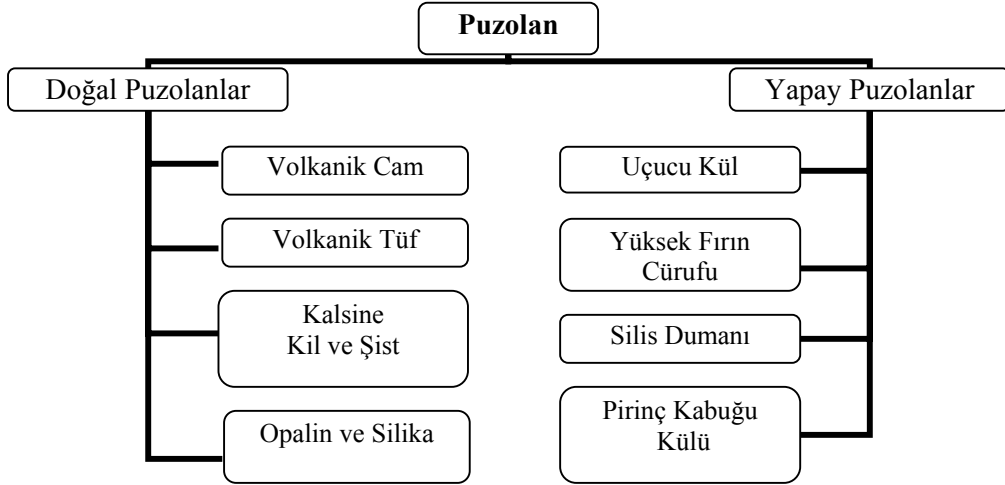
2.2. PUZOLANLARIN KULLANIMI

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı çimento (CEM II/P, CEM II/Q, CEM II/M, CEM IV, CEM V) üretiminde kullanılmaktadırlar. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül beton üretiminde iki şekilde kullanılmaktadırlar. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya cüruf içeren katkılı çimento kullanımıyla betona katılmaktadır ve bu yöntem “birlikte öğütme tekniği” adıyla ifade edilmektedir. İkinci yöntem

ise uçucu külün veya ince öğütülmüş cürufun, betona, karıştırma sırasında, çimentoya ilave ya da ikame olarak katılmasıdır ve “ayrı öğütme tekniği” olarak isimlendirilmektedir.

2.3. PUZOLAN ÇEŞİTLERİ

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olarak iki grupta sınıflandırılabilirler. (Şekil 2.1) [1,6,7]



Şekil 2.1 - Puzolanların sınıflandırılması [1,6,7]

2.3.1. Doğal Puzolanlar

Genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşimli volkanik maddeler veya tortul kayalardır. Doğal kalsine edilmiş puzolanlar ise volkanik orijinli malzemelerin, killerin, şistlerin ve tortul kayaların ısı ile işleme aktifleştirilmesi sonucu meydana gelmektedirler.

Pişmiş şist, özellikle pişmiş yağlı şist özel bir fırında yaklaşık 800 °C sıcaklıkta üretilir. Doğal maddenin bileşimi ve üretim prosesi nedeniyle pişmiş şist esas olarak dikalsiyum silikat ve mono kalsiyum alüminat olmak üzere klinker fazlarını ihtiva eder. Aynı zamanda az miktarda serbest kalsiyum oksit ve kalsiyum sülfatın yanında özellikle silisyum dioksit olmak üzere daha yüksek oranlarda, puzolanik reaksiyona giren oksitleri ihtiva eder. Buna göre ince öğütülmüş pişmiş şist, puzolanik özelliklere ilâve olarak, Portland çimentosu gibi belirgin hidrolik özellikleri de gösterir.

2.3.2. Yapay Puzolanlar

2.3.2.1. Uçucu Kül

Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Dolayısı ile atık malzeme olarak değişik karakterlerde küller elde edilmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenmektedir. Bu küllere “uçucu kül” ya da “pulverize yakıt külü” denilmektedir [8].

Tane boyutları 0,5 – 150 mikron olan, kısmen veya tamamen küresel şekilli küllerin bacadan çıkarak çevreye yayılmasını önlemek gerekmektedir. TS EN 197-1 “Çimento- Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk” standardında belirtilen tipteki uçucu küller, elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülme ile elde edilmektedirler. Yine bu standarda göre diğer metotlarla elde edilen uçucu küller puzolanik madde olarak kullanılamazlar. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

- a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç (CaO) yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO %10'dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

TS EN 197-1'e göre uçucu küller silissi (V) veya kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu külün ise hidrolik özelliklerine ilâveten puzolanik özellikleri olabilmektedir.

2.3.2.1.1. Silissi Uçucu Kül

Silissi uçucu kül çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip küresel partiküllerden ibaret ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

2.3.2.1.2. Kalkersi Uçucu Kül

Kalkersi uçucu kül, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃)'den oluşur. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşikleri ihtiva eder [4]. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

2.3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC) yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC'yi meydana getirirler [9]. Granüle yüksek fırın cürufu, ergimiş cürufun hızla soğutulması ile edilir, kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eder ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir.

Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az 2/3'ü, kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO₂) toplamından ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşiklerle birlikte alüminyum oksit (Al₂O₃) ihtiva eder. Kütlece (CaO+ MgO)/(SiO₂) oranı 1,0'dan fazla olmalıdır.

2.3.2.3. Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya alaşımlarının elde edilmesi için yüksek saflıktaki kuvars elektrik fırınlarında yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömürle indirgeme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem esnasında büyük bir miktarı SiO'dan oluşan gaz oluşmaktadır. SiO'nun, fırının nispeten soğuk kısmında havadaki oksijenle hızlı bir şekilde soğuması sonucunda, camsı yapıdaki SiO₂ parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar fiber filtrelerden geçirildikten sonra yoğunlaştırılmış silis dumanı parçacıkları olarak elde edilmektedir [10].

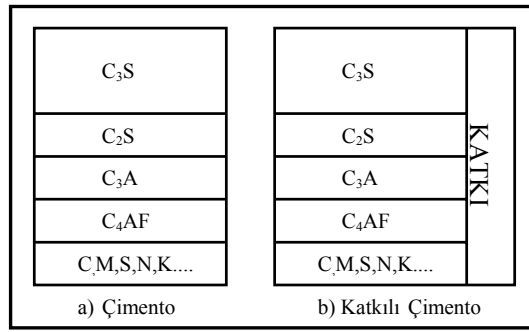
2.3.2.4. Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığıdır. Pirinç kabuğunun yapısındaki SiO₂, kabuklar yandıktan sonra elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal SiO₂ oluşur. Amorf şekilde özgül yüzeyi 50–60 m²/g gibi büyük bir değerdedir. Bu nedenle puzolanik aktivitesi yüksektir [11].

2.4. ÇİMENTODA PUZOLAN KULLANIMININ ETKİLERİ

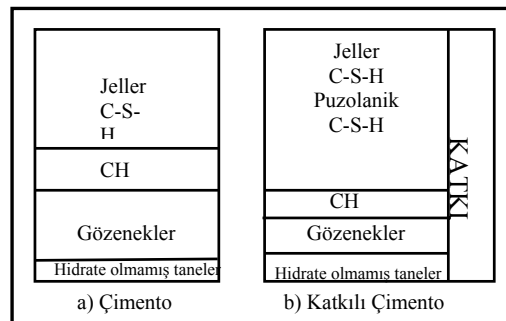
2.4.1. Teknik Etki

Mineral katkı kullanımının çimentoya teknik etkisi fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından olmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.2 a'da katkısız ve Şekil 2.2 b'de katkılı çimentolar ele alınmıştır. Bilindiği gibi Portland çimentosunun %90 kadarı dört karma oksitten oluşmaktadır. Bunlar C_3S ve C_2S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C_3A ve C_4AF olarak belirtilen kalsiyum alüminatlardır. Mineral katkıları ise genellikle klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütülerek çimentoya katılırlar. Böylelikle toplam bağlayıcı içindeki dört karma oksidin göreceli miktarları katkı miktarına bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 2.2. Çimento ve mineral katkı [13]

Şekil 2.3-a'da katkısız çimento hamurunun bileşimi gösterilmiştir. Bağlayıcı özellikteki kalsiyum silikat hidrat (CSH) jelleri ile kalsiyum alüminat ($3CaO.Al_2O_3$, C_3A ve $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, C_4AF) jelleri hamurun yarısından fazlasını oluşturmakta, kalsiyum hidroksit (CH) açığa çıkmakta ve gözenekler oluşmaktadır. Katkılı çimentonun hidratasyonu ve özellikleri ise farklıdır. Özet olarak Şekil 2.3-b'de gösterildiği gibi katkılı çimento hamurunda bağlayıcı jeller artmakta, CH ve gözenekler azalmaktadır [13]. Kuşkusuz bu genel etkiler klinker ve katkı özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Katkı türünün çimentoya etkisi dayanım ve dayanıklılık yönünden incelenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 2.3. Çimento hamur yapıları [13]

2.4.1.1. Dayanım

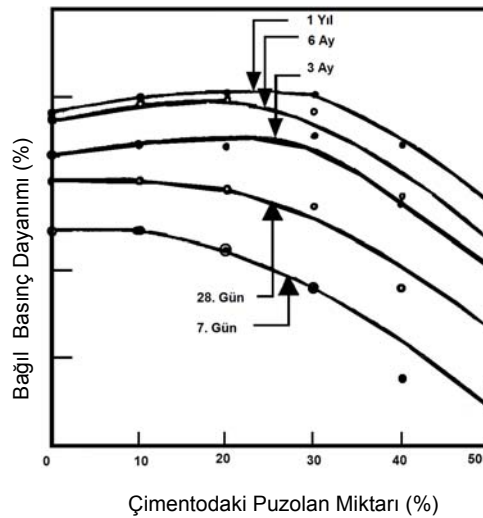
Puzolanlar, betonda, klinkerin hidrasyonundan oluşan Ca(OH)_2 ile tepkime verirler ve bu sebeple betona karışım suyu ilavesinden itibaren bir süre ortamda Ca(OH)_2 birikene kadar Portland çimentosunu seyreltici bir etki yaparlar. Fakat zamanla ortamda Ca(OH)_2 birikmesi puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlar.

2.4.1.1.1. Doğal Puzolanların Dayanıma Etkisi

Mehta [20] çimentoya %10, 20 ve 30 oranlarında Santorin doğal puzolanı ikame ederek, harçların dayanım gelişmesini incelediği çalışmada, oluşan puzolanik tepkimelerin 7. güne kadar dayanımda gelişme yapmadığını tespit etmiştir. Buna karşılık 7–28 günlük süreçte %10 tras içeren çimentolu harçların kontrol numunesinin dayanımını geçtiğini belirtmiştir. 28–90 günlük süreçte %20 tras içeren çimentolu harçlarda puzolanik aktivite daha da belirgindir. %30 tras içeren çimentolu harçlar ise birinci yılın sonunda kontrol numunesi ile yaklaşık aynı dayanımı almıştır [14].

İtalyan doğal puzolanları ile bir başka çalışma Massaza tarafından yapılmıştır. Hazırlanan Portland çimentosu-doğal puzolan harçları için bulunmuş dayanım değerleri Şekil 2.4'de görülmektedir [15].

Sonuçlar bir önceki çalışmayı doğrular niteliktedir. Bu bilgiler ışığında öğütülmüş doğal puzolan ikamesi yapılmış harçların dayanımlarının düştüğü fakat %30 gibi yüksek doğal puzolan ikamesinde bile bir yılda puzolanlı harçların kontrol numunelerinin dayanım değerlerine ulaştığı ve hatta geçtiği görülmektedir.



Şekil 2.4 -Doğal puzolanlı harçların dayanımı-dayanım değerleri Portland çimentolu harçların 28 günlük dayanımının yüzdesi olarak ifade edilmiştir [15].

Sonuç olarak, ortalama incelikteki (3000–4000 cm²/gr incelik) bir puzolan ikamesiyle betonda dayanım kaybının belirli bir süre zarfında yok olabileceği söylenebilir. Bu süre puzolan tipine ve ikame oranına bağlıdır.

Türkiye'deki genel durum trasların harç ya da betonlara doğrudan katılması yerine bu malzemelerin çimento üretiminde kullanılmasıdır. Dolayısıyla Mehta ve Massaza tarafından doğal puzolanlarla yapılan çalışmalar, Türkiye'de doğal puzolanlı çimentolarla üretilen harçlardaki ve betonlardaki durumu tam olarak yansıtmamaktadır. Ülkemizde traslı çimentolarda meydana gelen erken dayanım kayıpları bu tip çimentoların Portland çimentosuna göre daha ince öğütülmesiyle bertaraf edilebilmektedir [14].

2.4.1.1.2. Cürüflu Çimentoların Dayanıma Etkisi

Cürüflu çimentolar hidrasyon mekanizması ve hidrasyon ürünleri bakımından Portland çimentolarıyla benzer nitelikler göstermekle birlikte, normal incelikte öğütülmüş durumda dayanım kazanma hızı, özellikle erken yaşlarda, Portland çimentolarından daha düşüktür.

Aynı 28 günlük dayanımın elde edildiği, birbirine çok yakın inceliklerdeki (3000 cm²/g) bir Portland çimentosuyla %65 cüruf içeren bir cürüflu çimento karşılaştırıldığında, erken yaşlarda Portland çimentosunun geç yaşlarda ise cürüflu çimentonun daha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir. Durum, betonda incelendiğinde, eğilme dayanımlarının %25–45 cüruf içeren çimentolarla yapılan betonlarda, normal Portland çimentosuyla yapılanlara göre, ya eşit ya da daha yüksek olduğu saptanmıştır. Cürüflu çimentoların uygun erken dayanımlara sahip olabilmesinde, özgül yüzeyleri ve cüruf miktarları önemli birer faktördür [9].

Cürufun klinkere oranla daha zor öğütülebilir bir malzeme olması, birlikte öğütme koşullarında, klinkerin ince cürufun ise daha kaba kalması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Ayrı öğütme ile elde edilmiş, %30–50 cüruf içeren çimento ile yapılan betonda ise gerek işlenebilirlik gerekse dayanım bakımından önemli artışlar sağlanmaktadır.

2.4.1.1.3. Uçucu Küllü Çimentoların Dayanım Özellikleri

Uçucu küller büyük miktarlarda silika ve alümin içermektedir; çok ince taneli olan bu malzeme amorf yapıya sahip olduğundan puzolanik aktivite göstererek özellikle ileri yaşlarda dayanımı olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [8,23].

Sabit su/bağlayıcı oranında değişen katkı miktarlarında uçucu kül katılan harçların dayanımlarının incelendiği bir araştırmada, yüksek, orta ve düşük düzeyde aktivite veren küllerden gelişmiş güzel seçilen üç termik santrale ait küller üzerinde, su/bağlayıcı oranı 0.5 olarak sabit tutulup ve Portland çimentosuna ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ikame edilerek numunelerin basınç dayanımları 7., 28. ve 90. günlerde tespit edilmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre Soma ve Afşin Elbistan külü tüm yüzde ikame değerleri için referans Portland çimentosu (PÇ)'na göre daha az basınç dayanımı değerleri vermekte ve ikame kül miktarı arttıkça harçların işlenebilirlik değerleri düşmektedir. Buna karşın Orhaneli uçucu külünün %30 ikame oranına kadar referans Portland çimentosundan daha yüksek basınç dayanımına ve referans Portland çimentosundan daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu görülmektedir.

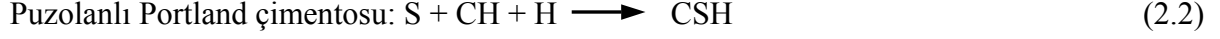
Sabit kıvamda değişik miktarlarda uçucu kül katılan harçların dayanımlarının araştırıldığı bir çalışmada ise yine aynı termik santrallere ait uçucu küllerde yayılma tablası deneyi ile referans PÇ 42.5 çimentosunun yayılma değeri baz alınarak %10, %20, %30, %40 uçucu kül katkılı bağlayıcılarla hazırlanan harçların su/ bağlayıcı (PÇ + uçucu kül) oranları, basınç dayanımları ve numunelerin basınç dayanımlarının referans Portland çimentosunun basınç dayanımına oranları 7., 28. ve 90. günlerde tespit edilmiştir.

Deney sonuçlarında Soma ve Afşin Elbistan uçucu küleriyle hazırlanan harçlarda yüzde ikame değeri arttıkça dayanımlar düşmekte, su ihtiyaçları artmaktadır. Orhaneli uçucu külünde ise %30 ikâme oranına kadar bütün zamanlar için referans Portland çimentosundan daha yüksek basınç dayanımına sahip olmaktadır. Aynı zamanda referans Portland çimentosundan daha az su ihtiyacı görülmüştür [16].

2.4.1.2. Dayanıklılık

Portland çimentodaki trikalsiyum silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_3S), dikalsiyum silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_2S) hidratasyon reaksiyonu sonunda kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CH) oluşmaktadır. Çimentoya katılan puzolanlardaki aktif silis ise puzolanik reaksiyon neticesinde CH ile birleşerek çözünmeyen yapıdaki CSH jellerini oluşturmaktadır.

Reaksiyonunun oluşumu, Portland çimentosunda hızlı, puzolanlı çimentolarda ise yavaş seyretmektedir.



Yukarıda her iki reaksiyonda da CSH oluşmaktadır. Ancak puzolanik reaksiyon neticesinde oluşan CSH, Portland çimentosunun CSH'ndan daha küçük özgül ağırlığa sahiptir. Aynı zamanda puzolanın CSH'ı kimyasal ortamda mekanik ve kimyasal özellikler açısından diğerine göre daha dayanıklıdır. Ayrıca CSH'daki C/S oranı puzolanik CSH' da 1.2 iken Portland çimentosunda 1.7 dir [11].

Dış ortam betonu fiziksel ve kimyasal yönden hasara uğratmaktadır. Fiziksel etkenler arasında donma-çözülme, ard arda oluşan ıslanma ve kuruma, yüksek sıcaklık ve yangın etkisi, trafik araçlarının, kum fırtınalarının, deniz, göl ve ırmaklarda meydana gelen dalgaların yaptığı aşınmalar sayılabilir. Kimyasal etkenler ise asitli, sülfatlı, klorlu suların ve atmosferlerin varlığında ortaya çıkmaktadır. Ayrıca beton içyapısında mevcut ve zamanla ortaya çıkan kimyasal öğelerin tahribatı da unutulmamalıdır. Buna örnek alkali-agrega reaksiyonudur. Betonu hasara uğratan nedenlerden bazıları da biyolojik kökenlidir, betona zarar veren aerobik, aneorobik bakteriler, yosunlar mevcuttur [18]. Bütün bu etkiler betonda yüzey aşınması neticesinde kütle kaybına veya çatlamaya yol açarak betonun hasar görmesine sebep olurlar.

Puzolanlı çimentoların zararlı ortamlardaki performanslarını inceleyen araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.4.1.2.1. Sülfatlara Karşı Dayanıklılık

Uygun tipte puzolanın çimentonun bir kısmının yerine kullanılmasının sülfat dayanıklılığına etkisi üç yolla olmaktadır. İlk olarak, puzolan kullanılması ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarını azaltacaktır. Böylece sülfatların betona zararlı ürünler oluşturabilmesi için gerekli $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ortamdaki çekilmiş olacaktır. İkinci olarak, bir kısım çimentonun puzolan ile yer değiştirmesi ortamdaki C_3A miktarını göreceli olarak azaltacaktır. Bu durum yine sülfatların C_3A ile yaptıkları zararlı tepkimelerin azalmasını doğurur. ASTM standartları C_3A içeriği %8 ve altında olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, %5 ve altında olan çimentoları ise

sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Avrupa’da ise %3 C₃A içeriği birçok ülke tarafından üst sınır kabul edilmektedir. Normal Portland Çimentolarında C₃A oranı %8–11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir [17]. Üçüncü olarak ise, puzolanlar uygun miktarlarda kullanıldığında betonun geçirimsizliğini artırdıklarından betona sülfat girişini önlerler [18]. Kullanılacak olan puzolan düşük oranlarda CaO içermelidir.

Santorin toprağı ile yapılan araştırmalar Tablo 2.1’de sunulmaktadır. Bu çalışma neticesinde, 28 gün boyunca sülfat çözeltilisinde bekletilen numunelerdeki dayanım kaybının, puzolan miktarının artması ile azaldığı görülmüştür.

Tablo 2.1. – Sabit PH’lı sülfat çözeltilisinde bekletilen çimento pastalarının basınç dayanım kaybı [14]

Çimento Tipi	Önceki Dayanım MPa	Sülfat Çözeltilisinde 28 Gün Kaldıktan Sonraki Dayanım MPa	Dayanım Kaybı (%)
Kontrol PÇ	18	6,1	66
%10 Santorin Topraklı Çimento	18,5	9,5	49
%20 Santorin Topraklı Çimento	16,1	12,9	20
%30 Santorin Topraklı Çimento	15,2	12,8	16

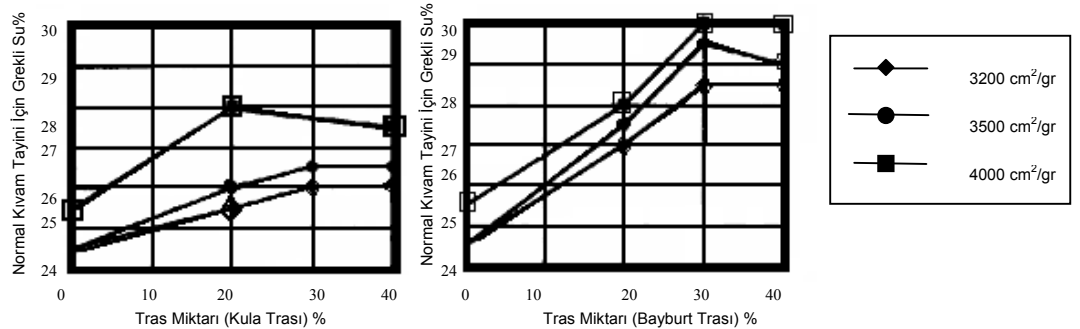
Regourd [9] tarafından yapılmış olan bir araştırmada ise çimento sentetik olarak hazırlanmış, %50 C₃S + %15 C₃A + %5 alçı + %30 kuartz içeren numuneler %5 MgSO₄ eriyiğıne batırılmıştır. İlk günden başlayarak, numunelerde genleşme gözlenmiş ve yedinci günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra bu numuneler X-ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskobu kullanılarak incelendiğinde, Mg(OH)₂, CaSO₄.2H₂O, etrenjit ve C-M-S-H oluştuğıu saptanmıştır. Aynı araştırmada, ikinci seri numuneler kuartz yerine granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta, GYFC içeren numunelerde hiçbir bozulma görülmemiştir. X-ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskop analizleri bu numunelerde yoğun bir C-S-H, bir miktar Ca(OH)₂, mono sülfat formu ve çok az etrenjit oluştuğunu göstermiştir. Araştırmalardan çıkan bir başka sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir [9].

2.4.1.2.2. Klor Etkisine Dayanıklılık

Klor etkisi; betonu doğrudan etkilemek yerine, betonun içerisindeki donatıların korozyonuna sebep olması nedeniyle, betonun maruz kaldığı diğerk olumsuz şartlardan farklılık gösterir. Klor etkisi altında betonun yapısının bozulması, donatının korozyona uğramasıyla hacminin

genleşmesine bağlı olarak, donatıyı çevreleyen betondaki çatlaklardan kaynaklanmaktadır. Korozyon, donatının etrafında çimento hidratasyonunun başlamasından hemen sonra kendiliğinden oluşan ve korozyonu önleyen pasif katmanın, betona giren klorun etkisi altında parçalanmasıyla başlamaktadır.

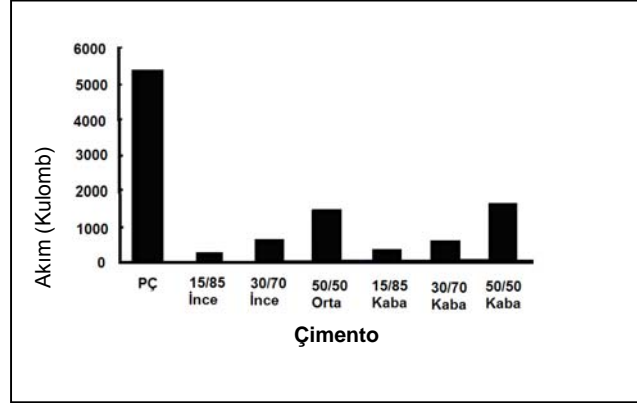
Betona dışardan klor nüfuz etmesi halinde doğal puzolan kullanımı betona klor girişini azaltır. Aynı şartlar altında Portland çimentolu harcın, traslı çimentolu harca göre 5 kat daha fazla klor giriş derinliğine sahip olduğu görülmüştür [14]. Diğer yandan, betona klor girişi ile ilgili genel düşünce, betonun su/çimento oranının dolayısıyla sıklığının kullanılan puzolandan çok daha önemli olduğudur. Bu noktada puzolanın betonun kıvamına ve işlenebilirliğine etkisinin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar Portland çimentosu – doğal puzolan karışımının kullanıldığı betonlarda aynı kıvamı sağlamak için gerekli su bir miktar daha fazla olabildiğini göstermektedir. Beraber öğütme tekniği ile üretilen ve Portland çimentosu klinkeri yerine Türkiye’deki iki farklı trasın %20, 30 ve 40 oranlarında kullanıldığı farklı inceliklerdeki çimentoların normal kıvamı üzerine yapılan çalışmada, Şekil 2.5’de sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre kullanılan doğal puzolanlar için çimentodaki ikame oranı artıkça, normal kıvam için gerekli su miktarı da artmaktadır. Ancak %30 düzeyindeki tras miktarlarından sonra su ihtiyacı kayda değer derecede değişim göstermemektedir. Aynı zamanda puzolanın inceliğinin artışı özgül yüzeyin de artmasına neden olacağından normal kıvam için gerekli olan su miktarı artmaktadır [14].



Şekil 2.5.- Çimentodaki doğal puzolan miktarının normal kıvam için gerekli su miktarına etkisi (çimentolar tras ve klinkerin beraber öğütülmesi ile üretilmiştir) [14]

Değişik inceliklerde ve değişik miktarlarda cüruף içeren çimentolar kullanılarak yapılan bir araştırmada, 102 mm çap ve 51 mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve hızlandırılmış klor permeabilite deneyi uygulanmıştır. 14 günlük standart bakımdan sonra numunelerin bir yüzü sodyum klorür (NaCl) diğer yüzü sodyum hidroksit (NaOH)

eriyiklerine batırılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzünden öbürüne geçen elektriksel akım ölçülerek klor permeabilitesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu araştırmalarda kullanılan kontrol çimentosu (Portland çimentosu) 0,865 m²/g (BET) kaba cürüflü çimentolar 0,866 m²/g (BET), orta cürüflü çimentolar 1,083 m²/g (BET) ve ince cürüflü çimentolar 1,337 m²/g (BET) inceliktedir. İnce cürüflü çimentolarda ağırlıkça %70 ve %85, orta cürüflü çimentoda %50 ve kaba cürüflü çimentolarda %50,%70 ve %85 cüruf kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. – Cürüflü çimentolarda klor permeabilitesi [9]

2.4.1.2.3. Alkali Agregaya Reaksiyonuna Dayanıklılık

Betonda kullanılan agregalardaki bazı özel bileşenler, özel şartlar altında, betona çoğu durumda çimentodan geçen alkalilerle tepkime verirler. Bu tepkimenin ürünleri sertleşmiş betonda genişleme meydana getirmekte ve hasara sebep olmaktadır. Puzolanlar genel olarak alkali-agrega reaksiyonuyla oluşan bu genişlemeyi kontrol etmek için de kullanılırlar. Çimentodaki alkaliler ve agregaya arasındaki reaksiyonlar başlıca iki tiptedir:

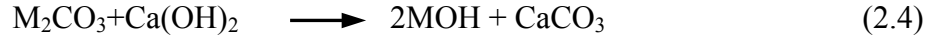
- i) Alkali – Karbonat Reaksiyonu
- ii) Alkali – Silika Reaksiyonu

Dolomit veya magnezyum içeren kireçtaşları reaksiyon sonucu magnezyum hidroksite dönüşürler. Dedolomitasyon adı verilen bu olay, harita şeklinde çatlaklara ve betonun tamamen parçalanmasına yol açabilir. Tipik bir alkali karbonat reaksiyonu (2.3)'de gösterildiği şekilde gelişir:



*Burada M; potasyum, sodyum veya lityum'u temsil etmektedir.

Bu şekilde oluşan alkali karbonatlar betonda Portland çimentosunun hidratasyon ürünleri ile birleşerek yeniden alkali üretirler [18].

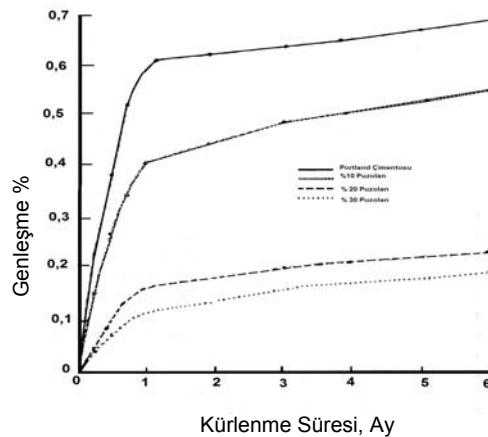


Alkali karbonat reaksiyonunda alkalilerin reaksiyon sonunda tüketilememesinden ötürü puzolan kullanımı alkali karbonat reaksiyonunu önlemede etkisizdir. Bununla beraber, yüksek fırın cürufu kullanımının etkili olduğu görülmüştür.

Alkali silika reaksiyonunu önlemede ise puzolanların etkinliği kesin olarak kanıtlanmıştır. Genel olarak puzolan kullanımının alkali silika reaksiyonuna olumlu etkisi birden fazla yolla olmaktadır;

- i) Puzolanlardaki reaktif silika; ortamdaki alkalilerle, reaktif agregadan daha hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve dolayısıyla puzolan kullanımı alkali – silika reaksiyonu için ortamda yeterince alkali bulunmasını önler.
- ii) Çimentonun puzolanlar ile ikamesi ortama çimento ile birlikte gelen alkali miktarının azalmasını sağlar. Bu durum genellikle böyle olmakla birlikte puzolan kullanımı ile ortama fazladan alkali girişi de mümkündür.
- iii) Puzolan kullanımı ile $Ca(OH)_2$ tüketiminden dolayı ortamın pH'ı düşer. Bu durum alkali agregada reaktivitesini azaltır.

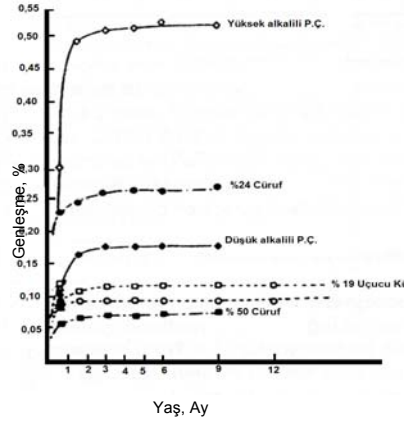
Santorin toprağı üzerine yapılan bir araştırmada kullanım miktarı ile alkali – silika genişemesinin azalması arasındaki ilişki incelenmiştir.



Şekil 2.7.-Farklı miktarlarda doğal puzolan içeren harçlarda alkali – agregada reaksiyonundan kaynaklanan genişeme [14]

Sonuç olarak, beton ya da çimentoda doğal puzolan bulunması, alkali silika reaksiyonunun etkilerini önlemede uygun bir yol olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer yandan nadir bazı doğal puzolanların alkali – silika genişmesini artırdığı rapor edilmiştir. Genel olarak, puzolan kullanımı ile genişlemenin artması, puzolanın ortama suda çözünebilir alkali vermesinden kaynaklanabilmektedir.

Cürüflu çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla alkali – agregre reaksiyonun neden olduğu genişmelerin azaldığını göstermiştir. Yüksek miktarda alkali içeren bir Portland çimentosunu %24 ve %50 oranlarıyla yüksek fırın cürufu ile ikame edilmesi sonucunda ulaşılan alkali – agregre reaksiyonu genişmeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. – Cürüflu çimentolarla Portland çimentolarının Alkali – Agregre genişmeleri bakımından karşılaştırılması [9]

2.4.1.2.4. Donma Çözülme Etkisine Dayanıklılık

Betonarme binaların çıplak kalacak yüzeyleri, köprü kirişleri, barajlar, beton yollar, hava meydanı pistleri gibi yüzeyleri atmosfer etkilerine açık kalacak beton elemanların donmaya karşı dayanıklılığına tesir eden en önemli iki etken kritik doygunluk derecesi ve betonun boşluk yapısıdır. Kritik doygunluk değeri altında beton donmaya karşı dayanıklıdır denilebilmektedir. Kapalı bir kap için kritik doygunluk değeri %91,7 kabul edilirken beton gibi boşluklu bir malzeme için kritik doygunluk derecesi, cismin boyutlarına, homojenliğine ve donma hızına bağlıdır. Hava sürükleyici katkı maddesi kullanılarak buzun oluştuğu bölgenin hemen yakınında suyun ilerleyebileceği küçük çaplı (ortalama 50µm) ve aralıklı (200–250µm) yapay hava kabarcıkları oluşturulması beton için kritik doygunluk değerinin etkisiz kılınması anlamına gelmektedir [17]. Betonun boşluk yapısında jel boşluklarının boyutu Angström mertebesinde olduğu için, bu boşluklarda bulunan su molekülleri komşu katı yüzeylere çekim kuvvetleri ile sıkıca bağlıdır ve bu durumda sıfır derecenin altındaki

sıcaklıklarda dahi kristalleşip donmazlar ve betona zarar veremezler. Buna karşılık çimento hamurundaki kılcal boşluk sistemi ise, çap ve şekillerine, karışımın su-çimento oranına, hidrasyon derecesine, çimento cinsine ve katkı maddelerine göre çok değişken ve suyun donması sırasında asıl zararı meydana getiren boşluk sistemidir [5]. Kapiler boşluklara girebilen su donar ve genişler. Çözülmeyi takip eden yeniden donma sonunda bu genişleme miktarı gittikçe artar.

Puzolanlı çimentoların hidrasyon hızlarının aynı incelikteki Portland çimentolarına göre daha yavaş olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, puzolanlı çimento içeren betonlar donma çözülme döngülerine karşı yeterli dayanıklılığı aynı incelikteki Portland çimentolu betonlara göre biraz daha geç kazanırlar. Literatürdeki veriler; puzolan içeren çimentoların katkısız çimento ile aynı erken dayanımı verecek kadar ince olması halinde veya yeteri kadar uzun kürlemeden sonra donma çözülme döngülerinde Portland çimentolarıyla benzer ya da daha iyi performans sergileyebileceğini göstermektedir.

Betonun donmaya karşı dayanıklılığı, su / çimento oranının azalması ve donma etkisi ile karşılaşmasından önceki kür süresinin uzaması ile artmaktadır [6]. Bununla birlikte, donma çözülme döngülerine karşı betonda dayanıklılık sağlamak için betona hava sürüklenmesi en kabul görmüş uygulamadır. Betona hava sürüklenmesi halinde betonların dayanımları aynı olmak kaydıyla betonda doğal puzolan, uçucu kül ya da mikro silika kullanımının Portland çimentosu kullanımıyla karşılaştırıldığında donma – çözülme dayanıklılığı açısından olumsuz etkileri olmadığı düşünülmektedir [20]. Bununla birlikte doğal puzolan kullanılmasıyla betonun içine belli bir miktar hava sürüklenmesini sağlayabilmek için gerekli katkı miktarı artmaktadır. Bu sebepten katkı miktarı her zaman olduğu gibi doğal puzolan kullanıldığında da deneysel çalışmalarla belirlenmelidir.

Portland çimentosuna %15'den fazla silis dumanı ikamesi donma-çözülme dayanımının ve mevcut hava içeriğinin düşmesine sebep olmaktadır [21].

Yüksek fırın cürufu çimentoların betonların donma – çözülme direncine etkileri, dayanım ve betonun hava miktarı sabit tutulduğu sürece, Portland çimentolarının etkilerinden farklı değildir. Ancak cüruf miktarının çok yüksek olduğu çimentolarda az bir miktar düşüş görülebilir. Diğer yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının beton içindeki gözenek

boyutlarında, gerek fiziksel gerekse hidrasyon sonucunda azalmaya neden olması betonun donma çözülme direncini yükselttiği görüşü de öne sürülmektedir. Yapılan tüm araştırmalarda hemfikir olunan bir sonuç cürufu çimentoların, betonda sabit bir hava miktarı sağlamak için, Portland çimentolarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duydukları hususudur.

2.4.1.2.4. İslanma Kuruma Etkisine Dayanıklılık

Zararlı su ve/veya havanın betonda oluşturduğu ve kimyasal sebeplere dayanan betondaki korozyon hasarı, fiziksel etkenler sonucu daha büyük boyutlara ulaşır. İslanma kuruma etkisi betonun kimyasal korozyonunu şiddetlendiren bir faktör olmaktadır.

Zararlı suların betona etkisi üç ana grupta toplanabilir;

I grup korozyon, betonun yıkanmasıdır. Düşük karbonat sertlikli suların beton öğelerinden bazılarını çözmesi ve yıkayarak, beton külesinden uzaklaştırması şeklinde meydana gelir. Beton, boşluklu ve suyun çözme yeteneği yüksekse, bu korozyon iç bölgelere doğru ilerleyebilir. Tatlı su oranı nispeten yüksek bölgelerdeki deniz yapılarında bu korozyona rastlanmaktadır. Puzolanlı çimentoların bu tür korozyona daha dayanıklı olmaları serbest kireçlerinin düşük olması nedeniyle mümkündür.

II. grup korozyon, kimyasal tepkimeler sonucu betonun çözülmesidir. Çimentonun esas öğeleri ile kimyasal reaksiyona giren ve kimyasal maddeler taşıyan suların yaptığı bir korozyon türüdür. Korozyon ürünü ya yıkanır veya ayrık bir amorf kütle oluşturur. Asitli suların, (asit karbonik vb.) Mg^{2+} iyonu içeren suların hasarları bu tür korozyona örnektir. Bu korozyon, dolu ve iyi sıkıştırılmış betonlarda da meydana gelebilir. Su basınç gradyanının varlığı, diğer bir deyişle tek yanlı ıslanan betonlarda bu korozyon daha şiddetli biçimde görülmektedir. Korozyon ürünlerinin bazılarında tıkama mekanizması gelişebilir, bu durumda korozyon durur veya gecikir.

III. grup korozyon, çözünürlüğü düşük tuzların beton boşluklarında kristalleşmesi ve yapıyı katı fazda genişleterek patlatmasıdır. Beton teknolojisinde geniş biçimde incelen sülfat problemi bu korozyon grubuna girer. Beton boşlukları içine süzülen SO_4^{2-} anyonları, serbest kireçle birleşerek alçı taşına ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dönüşür, oluşan bu kristal katı cisim, çeperlere basınç yaparak tahribata yol açar. İkinci aşamada çimentonun trikalsiyum alüminatı (C_3A) ile birleşen alçı taşı etrenjit'e ($Candlot \text{ tuzu} = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) dönüşür. Bu kez

hacim artışı daha büyüktür. Alçı taşında molar hacim artışı 41cm^3 mertebesinde, etrenjitte 254cm^3 mertebesindedir.[22]

Islanma kuruma ve tuzların kristalizasyon basınç etkileri, sıçrama ve gelgit bölgesinde, dalgaların ve su içinde yüzen cisimlerin aşındırıcı etkisi ile birlikte kendisini göstermektedir. Ayrıca kapiler yolla emilen deniz suyunun atmosfere açık bölgelerde buharlaşması da benzer etkiyi ortaya çıkarır. Bir yüzü ıslak diğer yüzü kuru olan iskele, rıhtım gibi yapılarda bu sebeple oluşan hasarlara daha sık rastlanmaktadır. Batic ve diğ. [24] tarafından yapılan bir çalışmada, sülfat etkisine maruz bırakılan beton numuneler ıslanma kuruma, donma çözülme ve sürekli olmak üzere doygun çözeltide yıpratıcı ortamda bekletilmiş ve hasar ölçüm deneyleri yapılmıştır. Buna göre en az hasar doygun çözeltide bekletilen numunelerde, en fazla hasar ıslanma kuruma etkisine bırakılan numunelerde görülmüştür.

Puzolanlı çimentolarla üretilen ve mukavemetleri yeterli düzeyde olan betonlarda kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalacağından özellikle ıslanma kuruma etkisine maruz betonlarda olumlu yönde tesir etmesi beklenmektedir. Tekrarlı ıslanma kuruma ve aşınma sonucu önce ince agregaların beton kütesinden ayrılmaya başladığı, açığa çıkan kaba agregaların da zamanla yok olduğu ve daha fazla çimento hamuru bağlayıcı matrisinin zamanla bu etkilere açık hale geldiği görülür. Bu durumda, su emmesi düşük agregaların seçilmesi gerekmektedir [17].

2.4.2. Ekolojik ve Ekonomik Etki:

Dünyada yıllık beton üretimi yaklaşık 5 milyar tondur. Çimento üretiminin de 2010'lu yıllarda 2 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Dünyadaki karbon dioksit emisyonlarının kabaca %7'si Portland çimentosu üretiminden gelmektedir. Bir sera gazı olan karbon dioksitin küresel ısınmaya katkıda bulunduğu bilinmektedir. İlaveten, çimento hammaddelerinin $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar pişirilmesi önemli miktarda fosil yakıt tüketimi gerektirmektedir [12].

Alüminyum ve çelikten sonra üretimi en fazla enerji gerektiren madde Portland çimentosudur [25]. Gerçekte, çimento ve beton endüstrileri su, kum, çakıl ve kırma taş gibi doğal kaynakların en büyük kullanıcısı sayılabilirler. Bu nedenlerle, sürdürülebilir gelişme ve çevrenin korunması konularında uluslararası çabalara yardımcı olunması gerekliliği açıktır [12]. Bunun bilincinde olan çimento ve beton endüstrileri giderek artan bir şekilde çimento

yerine kısmen mineral katkıları ve özellikle elektrik üretimi yapan termik santraller, çelik üretimi yapan işletmeler gibi endüstriyel tesislerin atıklarının kullanımına imkân tanıma yoluna yönelmektedirler.

Mineral katkıların çimento üretiminde kullanımının, çevreye olumlu etkisinin yanı sıra doğal ham maddelerden, yakıt ve elektrik enerjisinden tasarruf sağlayarak maliyetlere de olumlu etkisi olmaktadır.

2.5. ÇİMENTO TİPLERİ - BİLEŞİM VE İŞARETLEME

TS EN 197–1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplamaktadır.

Ana Tipler:

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland -Kompoze Çimento
- CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
- CEM IV Puzolanik Çimento
- CEM V Kompoze çimento

Bu ana tipler Tablo 2.2'de gösterilen toplam 27 çimento tipini kapsamaktadır. Çimentoların tablodaki bileşimleri ana bileşenler ile minör ilave bileşenlerden oluşmaktadır.

2.5.1. Ana Bileşenler

Çimento ana bileşenleri; klinker ile tabloda belirtilen ve miktarları kütlece %5'in üzerinde olan ana bileşen katkılarıdır. Tiplerin ve çimento ana bileşenlerinin belirlenmesinde aşağıdaki semboller kullanılmıştır:

- 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
- K: Klinker
- S: Granüle yüksek fırın cürufu
- D: Silis dumanı

- P: Doğal puzolan
 - Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan
 - V: Silissi uçucu kül
 - W: Kalkersi uçucu kül
 - T: Pişmiş şist
 - L: Kalker (*TOC %0.5)
 - LL: Kalker (TOC %0.2)
- (*TOC: Toplam organik karbon)

Yukarıdaki ana bileşenlerin özellikleri standartta belirtilen hususlara uygun olmalıdır.

2.5.2. Minör İlave Bileşenler

Her çimento tipine kütlece %0–5 arasında bir minör ilave bileşen katılabilmektedir. Bu madde o çimentoda ana bileşen olarak kullanılmamış bir mineral katkı veya çimento özelliklerini iyileştirecek başka bir inorganik madde olabilmektedir. Genel çimentoların tipleri ve bileşimleri ile ilgili genel bilgiler Tablo 2.2’ de verilmiştir.

2.5.3. Bileşim Oranları

Tablo 2.2’ de belirtilen çimento tipleri için verilen bileşim yüzde değerleri klinker, ana bileşen katkı ve minör ilave bileşen katkılarının toplamı esasına göredir. Yani bunların toplamı 100 olmalıdır. Katılacak alçı taşı 100’e ilave edilecektir. Miktarı kütlece %5’i geçen katkılar ana bileşen kabul edilecektir. Portland kompoze, puzolanik ve kompoze çimentolarda toplam ana bileşen katkı yüzdesi en az iki değişik katkı maddesi kullanılarak elde edilmelidir.

2.5.4. Dayanım Sınıfları

Çimentolar için 3 standart dayanım sınıfı belirlenmiştir. Bunlar 32.5, 42.5 ve 52.5 tir. Bu değerler TS EN 196-1’e göre tayin edilen ve MPa olarak ifade edilen 28 günlük basınç dayanımları ile ilişkilidir. TS EN 197-1’de karakteristik değerler olarak belirtilmişlerdir.

Ayrıca, her standart dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımlanmıştır. Bu amaçla kullanılan sembollerden,

N: Normal erken dayanım sınıfını,

R: Yüksek erken dayanım sınıfını belirtmektedir.

Tablo 2.2 - Genel çimentolar [4]

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Bileşim (kütlece % olarak)										Minör ilave Bileşen		
			Ana Bileşenler												
			Klinker	Yüksek Fırın Curufu	Silis dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker				
K	S	D	P	Doğal Kalsine Edilmiş Q	Silissi V	Kalkersi W	T	L	LL						
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM II	Portland - Curufu Çimento	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Uçucu Külü Çimento	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	0 - 5	
	Portland - Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5	
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5	
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5	
		CEM II/B-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5	
	Portland - Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80 - 94	←----- 6 - 20 -----→										0 - 5	
CEM II/B-M		65 - 79	←----- 21 - 35 -----→										0 - 5		
CEM III	Yüksek Fırın Curufu Çimento	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5	
CEM IV	Puzolanlı Çimento	CEM IV/A	65 - 89	←----- 11 - 35 -----→										0 - 5	
		CEM IV/B	45 - 64	←----- 36 - 55 -----→										0 - 5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	←----- 18 - 30 -----→										0 - 5
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50	←----- 31 - 50 -----→										0 - 5

2.5.5. Çimento İçin Standart İşaretleme:

Genel çimentolar standart numarası ve Tablo 2.2'de belirtilen ifadelerle dayanım sınıfları (Tablo 2.3) ilave edilerek tanımlanırlar. Ayrıca CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM IV/A, CEM VI/B, CEM V/A ve CEM V/B çimentolarında, klinkerin yanındaki diğer ana bileşenlerin sembolleri de parantez içinde yazılmalıdır bu konu ile ilgili örnekler aşağıda verilmiştir:

Tablo 2.3 - Gerekli mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler [19]

Dayanım Sınıfı	Besiç Dayanımı (MPa)			Priz Başlama Süresi (dakika)	Çerleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standard dayanım		
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75
32.5 R	≥ 10.0	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 10
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
42.5 R	≥ 20.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	
52.5 R	≥ 30.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45
TS EN 196-1					TS EN 196-3

Örnekler;

- Dayanım sınıfı 32.5 olan, yüksek erken dayanımlı Portland çimentosu:
TS EN 197-1- CEM I 32,5 R
- Toplam olarak kütlece %66-80 arasında granüle yüksek fırın cürufu içeren, dayanım sınıfı 32,5 olan yüksek fırın cürufu çimento:
TS EN 197-1- CEM III / B 32,5 N
- Toplam olarak kütlece %6-20 arasında tras (doğal puzolan) içeren, dayanım sınıfı 42.5 olan, normal erken dayanımlı Portland puzolanlı çimento:
TS EN 197-1- CEM II /A-P 42,5 N
- Toplam olarak kütlece %31-50 arasında granüle yüksek fırın cürufu ve %31-50 arasında silissi uçucu kül içeren, 32.5 dayanım sınıfında kompoze çimento:
TS EN 197-1- CEM V / B (S-V) 32.5 N
- Toplam olarak kütlece %6-20 arasında granüle yüksek fırın cürufu, silissi uçucu kül ve kalker (TOC miktarı %0,2'den az) içeren, 32.5 dayanım sınıfında, yüksek erken dayanımlı Portland kompoze çimento:
TS EN 197-1- CEM II /A-M (S-V-LL) 32.5 R

2.6. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Mineral katkıların çimento üretiminde kullanımının, çevreye olumlu etkisinin yanı sıra doğal ham maddelerden, yakıt ve elektrik enerjisinden tasarruf sağlayarak maliyetlere de olumlu etkisi olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, ülkemizde TS EN 197-1 standardı esas alınarak üretilmekte olan yeni tip katkılı ve katkısız çimentoların, TS EN 206-1'de belirtilen çevresel etki koşulları

altında dayanım ve dayanıklılık özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, üç tür katkı (yüksek fırın cürufu – Ereğli, uçucu kül – Çatalağzı, tras – Kaytazdere / Karamürsel), üç farklı oranda (%9, %14, %19) ayrı öğütme tekniği ile Portland çimentosuna katılarak, birbirlerine yakın inceliklerde ($3500 \text{ cm}^2/\text{g} \sim 3700 \text{ cm}^2/\text{g}$) dokuz tip katkılı çimento ve referans Portland çimentosu üretilmiştir. Çimentolarla imâl edilen standart harç numuneleri ilk 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. 28. günün ardından birinci grup numuneler donma – çözülme etkisine, ikinci grup numuneler ıslanma – kuruma etkisine, üçüncü grup numuneler ise kür havuzunda standart kür etkisine maruz bırakılmıştır. Her üç grup numunede basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinin yanı sıra ultrases hızı ölçümü ve ağırlık değişimi tayini yapılmıştır. Elde edilen bulgular üç farklı katkı türünün, çimentonun mekanik ve durabilite özelliklerine, katkılı çimentoların referans çimento ve birbirleri ile mukayese edilmesine imkân tanımaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. KULLANILAN MALZEMELER

3.1.1. Portland Çimentosu Klinkeri

Deneylerde Set Çimento Italcementi Group Anadolu Çimentoları T.A.Ş.'den temin edilen TS EN 197-1'de belirtilen özelliklere haiz olan Portland çimentosu klinkeri kullanılmıştır.

3.1.2. Kalsiyum Sülfat (Alçı)

Prizi kontrolü için kalsiyum sülfat üretim sırasında çimentonun diğer bileşenlerine Tablo 3.4.'de gösterilen oranlarda ilâve edilmiştir. Kalsiyum sülfat, jips (alçı taşı, kalsiyum sülfat dihidrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemî hidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) veya anhidrit (susuz) kalsiyum sülfat (CaSO_4), veya bunların karışımları olabilmektedir. Jips ve anhidrit doğal olarak bulunur. Kalsiyum sülfat aynı zamanda bazı endüstriyel proseslerin yan ürünü olarak da temin edilebilir. Bu çalışmada doğal alçı taşı kullanılmıştır.

3.1.3. Doğal Puzolan (Tras)

Doğal puzolan olarak İzmit – Karamürsel Kaytazdere bölgesinden çıkarılan tras kullanılmıştır. Trasın kimyasal analizi Tablo 3.1.'de sunulmuştur.

3.1.4. Uçucu Kül

Çatalağzı termik santralinden temin edilen uçucu külün kimyasal analiz değerleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

3.1.5. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası T.A.Ş. (Erdemir)'nin yan ürünü yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC'nin kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.1.'dedir.

Tablo 3.1 – Mineral katkıların kimyasal bileşimi (%)

	K.K	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	0	42,21	14,44	0,63	31,88	8,33	0,98	0,16	1,11
UÇUCU KÜL	5,85	60,53	17,22	4,86	5,31	1,91	1,36	2,5	0,65
TRAS	0,85	59,72	26,04	6,46		3,02	0,44	0,09	4,57

3.1.6. Kum (CEN Standart Kumu)

Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası'ndan temin edilen, TS EN 196-1 Madde 5.1.2'ye uygun, 1350 ± 5 gram ağırlığında plastik torbalarda muhafaza edilen referans kum kullanılmıştır.

Tablo 3.2. – CEN referans kumunun tanecik büyüklük dağılımı

Kare göz açıklığı mm	Kümülatif elekte kalan %
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

3.2. ÇİMENTO ÜRETİMİ

3.2.1. Öğütme İşlemi

Portland çimentosu ve mineral katkı malzemelerinin öğütme işleminde (Şekil 3.1) dakikada 165 devirle çalışan yatay öğütme değirmeni kullanılmıştır.

Araştırmada ilk olarak klinker ile alçıtaşı birlikte öğütülerek Referans CEM I 42,5 N çimentosu üretilmiştir. Daha sonra tras, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu öğütme işlemine tabi tutulmuştur.

Tablo 3.3-Referans CEM I 42,5 N ve katkıların öğütme devir sayıları

	Devir
Referans CEM I 42,5 N	14100
Referans CEM I 42,5 N (Karışım için)	13000
Yüksek Fırın Cürufu	41300
Uçucu Kül	-
Tras	5000



Şekil 3.1. (a) Bilyalı öğütme değirmeni



(b) Değirmen içi

3.2.2. Çimento Üretimi

Referans çimento 3708 cm²/g incelikteki %100 Portland çimentosundan oluşmaktadır. Katkılı çimentolar mineral katkıların her birinden %9, %14 ve %19 oranlarında Portland çimentosuna ikâme edilerek üretilmiştir. İncelik tayini değerlerinden özgül yüzey (Blaine), elek analizine göre hidrasyonun gelişimini daha fazla etkilemektedir. Bu sebeple referans çimento ile katkıli çimentoların özgül yüzeylerinin yakın değerler (3500 cm²/g–3700 cm²/g) olması hedeflenmiştir. Bu amaçla, karışım için hazırlanan Portland çimentosunun özgül yüzey değeri 3450 cm²/g da tutulmuştur. Tablo 3.4.'de reçeteleri belirtilen karışımlar hazırlanarak ayrı öğütme tekniği ile 9 tip katkıli çimento ve referans Portland çimentosu üretilmiştir.

Tablo 3.4.- Üretilen çimentoların kodları ve karışım oranları

	Ağırlık (%)						
	ALÇI	KLİNKER	Referans CEM I 42,5 N	YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	UÇUCU KÜL	TRAS	TOPLAM
Referans CEM I 42,5 N	5,0	95,0	100				100
CEM II/A -S (%9)	4,6	86,5	91	9			100
CEM II/A -S (%14)	4,3	81,7	86	14			100
CEM II/A -S (%19)	4,1	77,0	81	19			100
CEM II/A -V (%9)	4,6	86,5	91		9		100
CEM II/A -V (%14)	4,3	81,7	86		14		100
CEM II/A -V (%19)	4,1	77,0	81		19		100
CEM II/A -P (%9)	4,6	86,5	91			9	100
CEM II/A -P (%14)	4,3	81,7	86			14	100
CEM II/A -P (%19)	4,1	77,0	81			19	100

Üretilen çimentoların fiziksel deney sonuçları Bölüm 4'de, kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.5.'de gösterilmiştir.

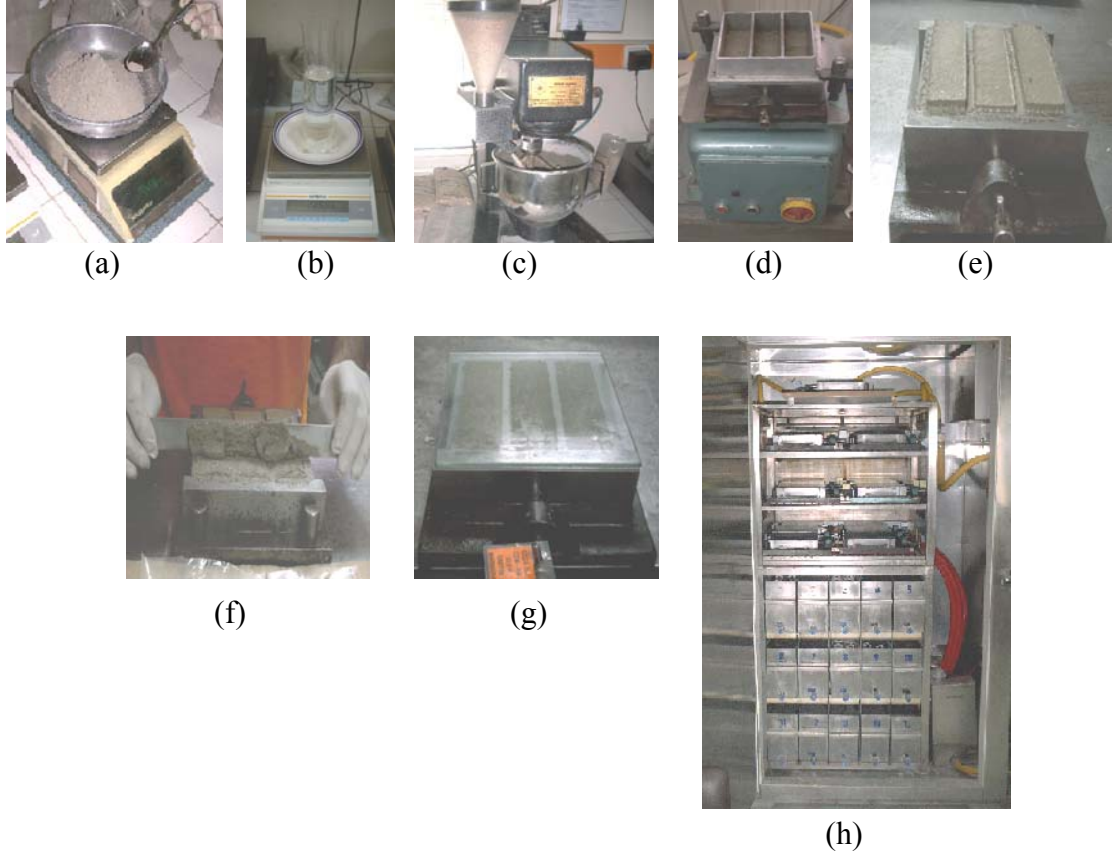
Tablo 3.5. - Çimentoların kimyasal özellikleri

	Bileşim %								
	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Referans CEM I 42,5 N	1,36	21,41	5,31	2,98	64,72	1,99	0,64	0,28	3,43
CEM II/A -S (%9)	0,85	25,31	6,94	2,53	58,73	3,63	0,70	0,39	3,18
CEM II/A -S (%14)	1,03	24,16	6,48	2,64	59,94	3,23	0,68	0,32	3,22
CEM II/A -S (%19)	1,08	23,17	6,02	2,77	61,98	2,76	0,67	0,28	3,33
CEM II/A -V (%9)	1,74	24,13	6,09	3,09	57,93	1,91	0,68	0,65	3,07
CEM II/A -V (%14)	2,07	26,86	6,87	3,21	56,63	2,00	0,73	0,70	2,93
CEM II/A -V (%19)	2,36	28,99	7,50	3,29	53,20	1,99	0,77	0,87	2,75
CEM II/A -P (%9)	1,26	24,66	7,06	3,27	59,23	2,10	0,98	0,31	3,12
CEM II/A -P (%14)	1,31	26,69	8,16	3,46	54,99	2,11	1,18	0,25	2,89
CEM II/A -P (%19)	1,27	28,58	9,08	3,65	52,85	2,16	1,37	0,27	2,75

3.3 HARÇ ÜRETİMİ

Harçlar TS EN 196–1 standardı esas alınarak üretilmiştir. Çimentolara su ve kum karıştırılarak harç üretimine başlanır. Bu işlem aşağıda verilen sıralamayla yapılır.

- Kum miktarı sabit olup 1350 gramdır
- Su/Çimento oranı, 0,5 olarak alınır.
- Çimento 450, su 225 gr olarak alınır.
- Karıştırma kabına su + çimento konduktan sonra yerine yerleştirilir.
- Kum haznesine kum konur.
- Harç karıştırıcı çalıştırılır.
- Hazırlanan kalıp şok aletine yerleştirilir
- Kalıba dökülen birinci tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılır. İkinci tabaka harç kalıba yerleştirilir ve cihaz 60 vuruşa set edilir.
- Kalıp şok aletinden çıkarıldıktan sonra üzerindeki fazlalık ıspatula ile alınır ve rutubet dolabına konur. Rutubet dolabı, beton kalıplarının kırılacakları güne kadar muhafaza edildikleri dolaptır. Kalıplar ilk 24 saatleri tamamlanıncaya kadar bu dolap içinde tutulurlar. Bu bölümün sıcaklığının 20 ± 1 °C olarak tutulması gerekmektedir. Rutubetin ise, minimum %90 olması gerekir. Kalıplar ilk 24 saatten sonra, içi su dolu çekmecelerin içine konur. (Şekil – 3.2)



Şekil 3.2. Harç üretimi ve numunelerin muhafazası

Şekil 3.2. (a) Çimento tartımı

Şekil 3.2. (b) Su tartımı

Şekil 3.2. (c) Harç mikseri

Şekil 3.2. (d) Şok aleti

Şekil 3.2. (e) Harç kalıbı

Şekil 3.2. (f) Harç kalıbının yüzey masterlanması

Şekil 3.2 (g) Cam kapak muhafazası

Şekil 3.2 (h) Kür dolabı

3.4 YAPILAN DENEYLER

Deneyle, fiziksel, mekanik ve durabilite olmak üzere 3 grupta ele alınmıştır.

3.4.1. Fiziksel Deneyle

3.4.1.1. Yoğunluk Tayini

AccuPyc 1330 Pycnometer cihazı (Şekil 3.3) kullanılarak çimentoların ve katkı malzemelerinin yoğunlukları tayin edilmiştir. Yoğunluk tayin cihazı 2–3 dakika süre zarfında zayıtsız olarak yoğunluk tayinini yer değiştirilmiş gazın ölçümü prensibi ile belirleyebilmektedir.

Yer değiştirilmiş gaz ölçümü prensibi kısaca şöyle açıklanabilir;

Cihaz, numunenin konulduğu haznede ve ikinci ve boş olan hazneye numunenin tahliyesi esnasında, basınç değişimini gözlemleyerek katı numune fazının hacminin hesaplanmasına müsaade etmektedir. Gaz molekülleri hızlı bir şekilde numune içindeki küçük boşlukları doldurur böylelikle sadece yer değiştirilmiş gaz sayesinde doğru olarak katı fazın hacmi belirlenir [26].



Şekil – 3.3 Tane yoğunluğu cihazı

Aygıt numuneden gazın otomatik olarak temizlenmesini sağlar ve birbirini takip eden uyumlu sonuçlar bulana değin analizi tekrarlar. Bu çalışmada yoğunluk tayini deneyinde uçucu gaz olarak azot gazı kullanılmıştır.

3.4.1.2. Elek Analizi

TS EN 196–6 standardı esas alınarak elek analizi deneyi yapılmıştır. Şekil 3.4.’deki Alpine elek makinesi kullanılmıştır. Deneyin yapılışı aşağıdaki sıra ile yapılmaktadır;

- 10,00 gr numune hassasiyetle tartılır.
- 40 mikron elekten 3 dakika elenir.
- 40 mikron elek üzerinde kalan bakiye tartılır.
- Tartılan bakiye 90 mikron elekten 2 dakika elenir.
- 90 mikron bakiyesi tartılır.
- 90 mikron bakiyesi 200 mikron elekten 2 dakika elenir.
- 200 mikron elek üzerinde kalan tartılır.
- Elek üstü bakiyesi yüzde olarak hesap edilir.



Şekil 3.4. Alpine elek makinesi

3.4.1.3. İncelik (Blaine)

TS EN196–6 standardına göre “hava geçirgenlik metodu” ile incelik (Blaine) deneyi yapılmıştır. Bu deneyde Blaine cihazı kullanılmıştır. Deneyin prensibi çimentonun inceliği, belirlenmiş boyutlarda ve porozitedeki sıkıştırılmış bir çimento yatağından sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesiyle spesifik (özümlü) yüzey olarak ölçülür. Standart şartlar altında çimentonun özgül yüzeyi, sıkıştırılmış çimento yatağından geçen belirli bir hava miktarının geçtiği süre olan (t), \sqrt{t} ile orantılıdır. Çimento yatağındaki tek tek gözeneklerin büyüklüğü ve sayısı çimento tane büyüklüğü dağılımına bağlıdır ve bu aynı zamanda belirlenen hava akışı için geçen zamanı da belirler. Metot mutlak olmaktan ziyade

mukayese metodudur. Böylece özgül yüzeyi bilinen referans bir numune cihazın kalibrasyonu için gereklidir. Geçen zaman saniye cinsinden okunur



Şekil 3.5. Blaine aleti

Özgül yüzey S , 3.1'de verilen eşitlikle hesaplanır.

$$S = \frac{K}{\eta} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (cm^2 / g) \quad (3.1)$$

Burada,

K = cihaz sabiti,

e^* = yatağın porozitesi,

t = ölçülen zaman, (s)

ρ = çimentonun yoğunluğu (g/cm³)

η = Çizelge 1'den alınan deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi (Pa.s)

* $e = 0,500$ porozite için (20 ± 2 °C'da)

$$S = \frac{524,2K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (cm^2 / g) \quad (3.2)$$

3.4.1.4. İncelik (Lazerli Tanecik Ölçümü)

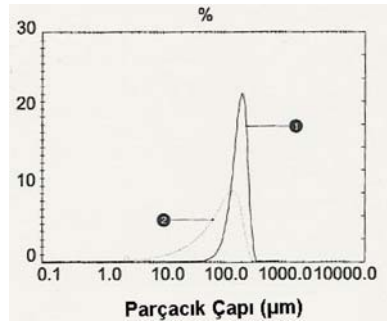
Çimentoların tane boyutları Master Sizer (Malvern Instruments, Master Sizer Scirocco 2000) cihazı kullanılarak 1 µm ilâ 1000 µm arasında tanecik dağılımı sınıflandırılmıştır. Bu deneyde numunenin, belirli bir tane büyüklüğü üzerinde kalan kısmının hacimsel yüzdesi tayin edilmektedir. Mastersizer ile elde edilen sonuçların anlamını kavrayabilmek için, açıklanması gereken birkaç temel kavram vardır. Bunlar;

- Sonuçlar hacim bazlıdır.
- Sonuçlar eşdeğer küreler şeklinde ifade edilir.
- Dağılım parametrelerinin elde edilmesi

Hacim bazlı sonuçlar;

İlk ve muhtemelen en önemli nokta, sonuçları yorumlarken, bu teknikle elde edilen temel büyüklük dağılımının hacim bazlı olduğunun unutulmamasıdır. Örneğin, "dağılımın %11'i 6.

97 – 7. 75 mikron büyüklük kategorisinde yer alır" sonucunu elde edildiğinde bu, çapları belirtilen aralıkta bulunan parçacıkların toplam hacminin, dağılımdaki bütün parçacıkların toplam hacminin %11'ini oluşturduğu anlamına gelir. Bu noktayı aydınlatmak için sayısal bir örneği göz önünde bulundurmak yararlı olacaktır. Bir modelin 2 farklı boyutta parçacıktan oluştuğunu farz edilsin. Numunenin %50'si 1 mikron, %50'si ise 10 mikron olsun. Parçacıkların küre şeklinde olduğunu varsayıldığında, büyük parçacıkların her birinin hacmi küçük parçacıklardan birinin hacminin 1000 katıdır. Sonuç olarak, hacim dağılımı olarak bakıldığında, büyük parçacıklar, toplam hacmin %99.9'unu temsil eder. Aşağıdaki grafik bunu daha gerçekçi bir dağılım için göstermektedir. Örnekteki eğri hacim dağılımının (1) sayı dağılımına (2) dönüştürülmesinin sonucunu göstermektedir. Tabii ki, tek-boyutlu dağılımlarda belirli bir çapa sahip parçacıkların %100'ü, hacim dağılımına bakıldığında yine numunenin %100'ünü oluşturur, sayı veya hacim olarak belirtilmeleri fark oluşturmamaktadır.



Şekil 3.6. Parçacık hacim dağılımının (1) sayı dağılımına (2) dönüştürülmesi

Malvern yazılımı, sonuçların hacim dağılımı haricindeki dağılımlara dönüştürülmesini sağlamaktadır (örneğin sayı dağılımı), fakat dönüşümler sistematik hatalara eğilimli olduğundan dolayı hacim bazlı tayinler esas alınmıştır.

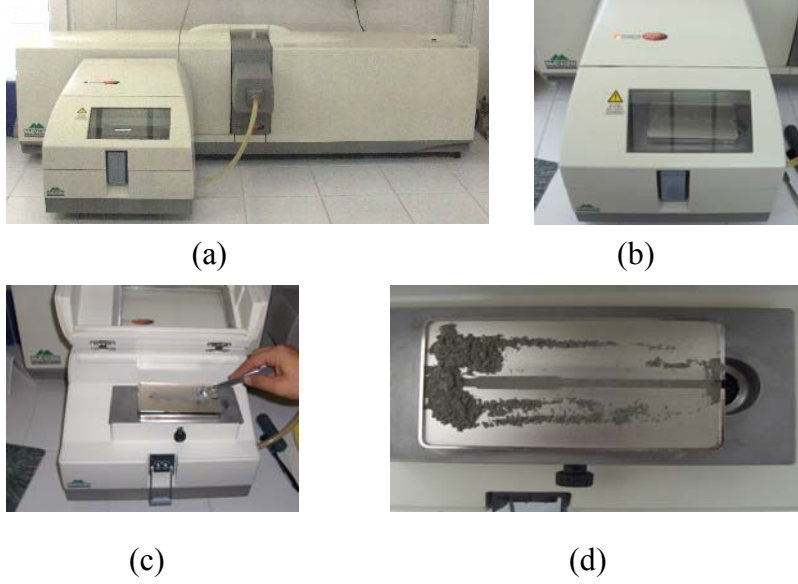
Eşdeğer küreler;

Mie teorisinde, ölçülen parçacıkların kusursuz küreler olduğu varsayılmaktadır. Düzensiz şekle sahip parçacıkları tanımlamaya yarayacak sayıyı bulmanın bir yolu, asıl parçacığın bazı özelliklerini hayali küresel parçacıkla karşılaştırmaktır.

Elde edilmiş dağılım parametreleri;

Analiz edilen dağılım, büyüklük aralıklarından oluşmuş kümelerle ifade edilir. Bu kümeler, en iyi çözünürlüğü verecek optik şekle ve detektör geometrisine uyacak şekilde optimize edilmişlerdir. Bütün parametreler bu temel dağılımdan elde edilir.

Dağılım parametreleri ve elde edilmiş çaplar temel dağılım kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama, her bir büyüklük aralığının katkılarının toplamı kullanılarak yapılır. Her aralık için temsili çap, büyüklük aralığının sınırlarının geometrik ortalaması hesaplanarak elde edilir:



Şekil 3.7. Master Sizer cihazı

Şekil 3.7. (a) Master Sizer cihazı

Şekil 3.7. (b) Numune haznesi

Şekil 3.7. (c) (d) Numune yerleştirme

3.4.1.5. Normal Kıvam Tayini

Deney şartlarını standardize etmek için, normal kıvam adı verilen kıvamda hamur yapılır. Bu maksatla çimentoya ilâve edilmesi gereken su miktarı çimento ağırlının %25 i ile %30 u arasında değişebilir. Her çimento için bu miktarın tayin edilmesi lâzımdır. 300 gr. çimento alınır, yukarıdaki limitler arasında herhangi bir su miktarı ile 3 dakika karıştırılıp hamur yapılır ve en çok 1 dakika içinde hamur 40 mm. yüksekliğindeki vicat halkası içine yerleştirilmelidir. Vicat halkasının içi ve halkanın alt kısmındaki cam levhanın üstü ince bir yağ ile yağlanmalıdır. Hamur yüzeyi bir ıspatula ile düzeltildikten sonra, silindirik şeklindeki sonda camın üzerine kadar indirilerek aletin göstergesi sıfıra getirilir. Bu çubuk kalıptaki hamurun yüzü ile temas ettirilip 300 gr. değerinde olan kendi ağırlığı altında batmaya bırakılır. Eğer sonda çubuğunun ucu dipten 5–7 mm. mesafeye kadar batarsa kıvam normaldir

ve kullanılan su oranı doğrudur. Değilse su oranı değiştirilerek normal kıvam elde edilinceye kadar deney tekrarlanır ve çimento için gereken su miktarı belirlenir.

3.4.1.6. Priz Süreleri Tayini

TS EN 196–3 standardı esas alınarak çimentoların priz süresi otomatik vicat cihazı ile tayin edilmiştir. Otomatik olarak 5 dakikalık periyotlarla çimento hamuruna iğne batırılır. İğnenin çimento hamuruna 1 mm den daha fazla girmediği zaman gelince işlem tamamlanır.



Şekil – 3.8. Otomatik Vicat aleti

3.4.1.7. Hacim Genleşmesi:

Çimento içersine ikincil olarak bir miktar CaO ve MgO bulunabilir. Bu maddeler su ile temasa girip şişerek çimentonun harap olmasına sebep olurlar. Bunu kontrol etmek maksadı ile TS EN 196–3 standardında tarif edilen 30 mm. çapında ve 30 mm. yüksekliğinde silindirik ve bir doğrultmanı boyunca yarık bulunan Le Chatelier halkası içine hamur doldurulur, 24 saat su içinde bırakılır. Eğer hamurda sertleşme esnasında bir şişme olursa halka yarık boyunca açılacaktır. Açılma miktarını ölçmek üzere yarığın her iki tarafına 15 cm uzunluğunda birer iğne lehimlenmiştir. Bunlar açılmayı büyülterek gösterirler. Hamur doldurulduğunda iğnelerin arası ölçülür a_0 , 24 saat suda bekletilir, bundan sonra kaynayan su içine konur ve 4 saat kaynatılıp iğnelerin arası tekrar ölçülür, a_1 .

$$a_1 - a_0 < 10 \text{ mm. olmalıdır.}$$



Şekil 3.9. Le Chatelier iğnesi ve Le Chatelier halkası

3.4.2. Mekanik Deneyler

Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneylerinden oluşur. Deneyler TS EN 196–1 standardı esas alınarak yapılmıştır.

3.4.2.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi harç üretiminin ardından 7. ve 28. günlerde uygulanmıştır. Deney aletinin yükleme düzeni birbirinden 100 mm ± 0,5 mm uzaklıkta olan 100 mm çaplı iki destek silindirden ibarettir. Bu iki silindirin tam orta yerinde aynı çapta üçüncü bir yükleme silindiri vardır. Bu üç silindirin eksenlerinden geçen düşey düzlemler birbirine paralel olmalı ve deney süresince paralel kalmalıdır. Harç prizmaları, kalıptan çıkmış yan yüzeylerinden biri üzerine ve uzunluğuna ekseni destek silindirler eksenine dik gelecek şekilde destek silindirler üzerine konur. Yükleme hızı saniyede 5 kgf±1kgf (50 N ± 10 N) olacak şekilde ayarlanmalıdır. Eğilmede çekme mukavemeti σ_R aşağıdaki bağıntı ile tam sayıya yuvarlatılarak hesaplanır:

$$\sigma_R = 1,5 \frac{PL}{b^3} \quad (3.3)$$

Burada;

b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (cm), (4 cm)

P = Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, (kgf), (N)

L = Destek silindirlerinin eksenleri arasındaki uzaklık, (cm), (10 cm)

σ_R = Eğilmede çekme mukavemeti, (kgf/cm²), (N/mm²)

$L = 10$ cm ise

$\sigma_R = 0,234 P$ 'dir.



Şekil – 3.10. Eğilme dayanımı cihazı

3.4.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi standart kür etkisindeki numunelere 7. ve 28. günlerde tatbik edilmiştir. Eğilme deneyi sonunda oluşan her yarım prizma Şekil 3.9’da belirtilen cihaz kullanılarak yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deneye tâbi tutulur. Yarım prizmalar, cihazın plâkaları arasına $\pm 0,5$ mm.den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plâkadan veya yardımcı plâkalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilir. Yük (2400 ± 200) N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana kadar artırılır.

Basınç dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\sigma_c = P/1600 \quad (3.4)$$

Burada;

σ_c : Basınç dayanımı (N/mm^2),

P: Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600: Plâkaların veya yardımcı plâkaların ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) alanı (mm^2) dir.



Şekil – 3.11. Pres makinası

3.4.3. Durabilite Deneyleri

3.4.3.1. Donma – Çözülme Deneyi

Üretilen harçların donma dayanıklılığını belirlemek için; ASTM C666’da tanımlanan yöntemlerden biri tercih edilmiştir. Bu yöntemde donma ve çözülme su içinde gerçekleştirilir. Numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilmesinin ardından donma – çözülme dolabına yerleştirilir ve $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında donma çözülme döngüsüne tâbi tutulur. Donma çözülme deneyine başlanılmadan önce ve başlanılmasının ardından 15. günde ultrases geçiş

hızı, ağırlık değişimi ve 28.günde ise bu deneylerin yanı sıra eğilme ve basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır.

Donma çözülme deneyinin 2.gününden itibaren soğutma cihazı 7 gün boyunca en düşük -2 °C'ye kadar soğutmuştur. Bu arızanın giderilememesinden dolayı 10. günden itibaren deneye yeni bir soğutma cihazı temin edilerek devam edilmiştir.

3.4.3.2. Islanma - Kuruma Deneyi

Islanma kuruma etkisinin üretilen harçlarda meydana getirdiği tahribatın belirlenmesi amacıyla, numuneler tekrarlı ıslanma-kuruma deneyine maruz bırakılmışlardır. 28 günlük standart kürü takiben ıslanma etkisi 22 ± 2 °C suda, kuruma etkisi 100 °C sıcaklıktaki etüvde oluşturulmuştur. Islanma kuruma etkisi 24 saatlik periyotlarla toplam 28 gün sürdürülmüştür. Islanma kuruma döngüsüne başlanılmadan önce ve başlanılmasının ardından 15. günde ultras es geçiş hızı, ağırlık değişimi ve 28. günde ise bu deneylerin yanı sıra eğilme ve basınç dayanımı ölçümleri yapılmıştır.

3.4.3.3. Hasar Ölçüm Deneyleri

3.4.3.3.1. Ultras es Hızı

Ultras es hızı ölçümüne başlamadan önce ölçüm yapılacak numuneler kurumaya bırakılarak daha sonra deneye tâbi tutulmuşlardır. Hız değerleri, numune boyunun alette ölçülen zamana bölünmesi ile elde edilmiştir.

3.4.3.3.2. Ağırlık Değişimi Deneyi

Ağırlık değişiminin belirlenmesi amacıyla 0,01 g hassasiyetli terazi kullanılmış tüm tartım işlerinden önce harçların yüzeyi kurulanmıştır. Ağırlık değişimi yüzdesi aşağıdaki formülle bulunmuştur.

$$W_D = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.5)$$

W_D : Ağırlık değişimi (%)

W_t : t süredeki ağırlık değişimi (g)

W_0 : Başlangıçtaki (28. gündeki) ağırlık (g)

4. BULGULAR

4.1. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI

4.1.1. Puzolanik Katkıların Fiziksel Deney Sonuçları

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve tras katkılarında, Tablo 4.1.'de görüldüğü gibi Blaine değerlerinin yakın olmasına rağmen 40 μ ve 90 μ elek üstü kalıntıları uçucu külde ve trasta yüksek fırın cürufuna kıyasla çok daha fazladır. Bu bulgu, incelik tayininde özgül yüzey ve elek analizi deneylerinin birbirlerinin alternatifi olmadığını göstermesi açısından önemlidir.

Tablo 4.1-Referans ve katkıların elek analizi, yoğunluk ve özgül yüzey değerleri

	Elek Üstü Bakiye(%)		Yoğunluk (g/cm ³)	BLAINE (cm ² /g)
	90 μ	40 μ		
Referans CEM I 42,5 N	0,7	11,3	3,19	3708
Referans CEM I 42,5 N (Karışım için)	1,1	12	3,1	3450
Yüksek Fırın Cürufu	3	0,3	2,9	4414
Uçucu Kül	24,1	44,9	2,3	4674
Tras	10,9	41,2	2,6	4700

4.1.2. Referans ve Katkılı Çimentoların Fiziksel Deney Sonuçları

Üretilen kontrol çimentosu ve katkılı çimentoların fiziksel deney sonuçları Tablo 4.2'de sunulmuştur. Çimentoların tümünde, özgül yüzey değerleri 3500 cm²/gr – 3700 cm²/gr aralığındadır. Kıvam tayini %su içeriği değerleri katkı ilavesi ile az da olsa artmakta, en fazla artış %19 uçucu kül, %14 tras ve %19 tras katkılı çimentolarda görülmektedir. Çimentoların elek analizi değerleri, katkıların elek analizi sonuçlarına paralel olarak, uçucu küllü ve traslı çimentolarda fazla olmaktadır.

Tablo 4.2. Referans ve katkılı çimentoların elek analizi, yoğunluk, özgül yüzey, priz sonu, kıvam tayini ve genleşme değerleri

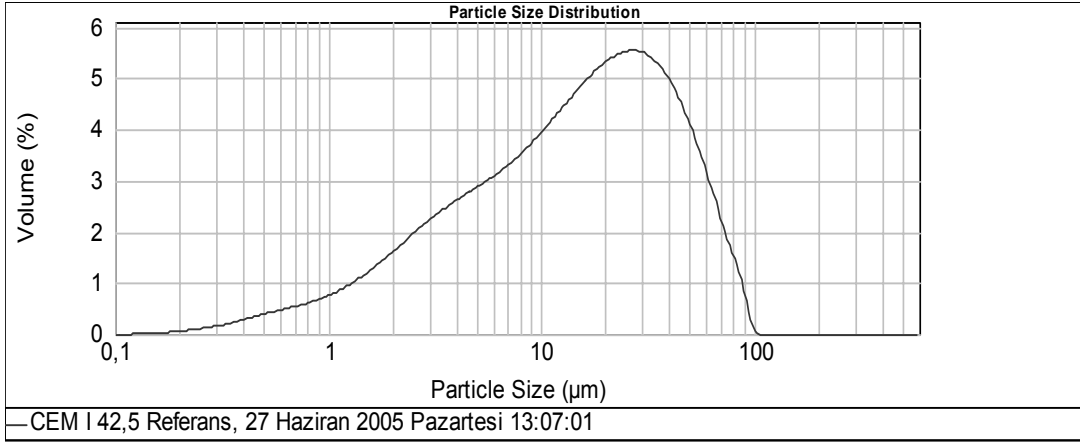
	Elek üstü kalıntı (%)		BLAINE, (cm ² /gr)	Yoğunluk, (gr/cm ³)	dk. (s)	KIVAM TAYİNİ, (%SU)	GENLEŞME, (mm)
	90 µ	40 µ					
Referans CEM I 42,5 N	0,7	11,3	3708	3,19	270	26,3	1
CEM II/A -S (%9)	0,5	11,5	3673	3,16	300	27,0	1
CEM II/A -S (%14)	0,5	11,0	3659	3,15	260	26,5	1
CEM II/A -S (%19)	0,7	10,5	3637	3,13	310	27,3	3
CEM II/A -V (%9)	2,9	14,0	3638	2,96	300	28,0	1
CEM II/A -V (%14)	3,9	16,0	3590	3,04	280	28,3	1
CEM II/A -V (%19)	4,9	18,3	3621	2,88	290	28,8	2
CEM II/A -P (%9)	1,5	14,1	3515	3,11	290	28,0	1
CEM II/A -P (%14)	2,1	15,4	3693	3,06	310	29,0	2
CEM II/A -P (%19)	2,3	17,1	3658	3,04	290	29,0	0

4.1.2.1. Referans ve Katkılı Çimentoların Lazerli Tanecik Ölçümü Sonuçları

Kontrol çimentosu CEM I 42,5 N ve CEM II/A-S (%14), CEM II/A-S (%19) yüksek fırın cürufu katkılı çimentoların lazer granülometri sonuçları (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel)) Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5’de, tanecik dağılımı grafikleri Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.’de verilmiştir. Şekil 4.4.’de ise üç çimentonun granülometri eğrileri aynı grafik üzerinde sunulmuştur. Bu verilerden anlaşılmaktadır ki, üretilen yüksek fırın cürufu katkılı çimentoların tanecik dağılımı, referans Portland çimentosunun tanecik dağılımına çok yakındır.

Tablo 4.3. –Referans CEM I 42,5 N lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

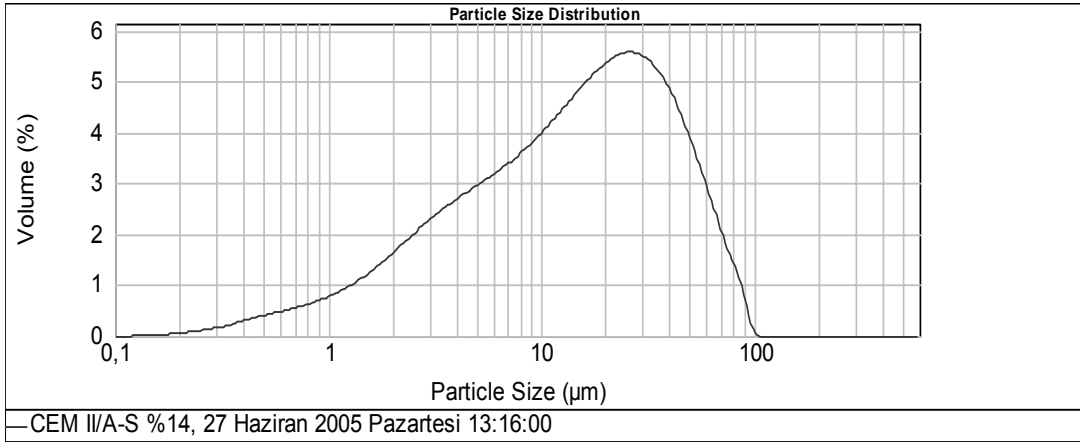
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,22	3,236	84,90	10,471	61,09	33,884	22,31	109,648	0,00	354,813	0,00
1,072	95,87	3,467	83,82	11,220	59,23	36,308	19,91	117,490	0,00	380,189	0,00
1,148	95,49	3,715	82,70	12,023	57,32	38,905	17,58	125,893	0,00	407,380	0,00
1,230	95,08	3,981	81,54	12,882	55,33	40,000	16,67	134,896	0,00	436,516	0,00
1,318	94,64	4,266	80,34	13,804	53,28	44,668	13,20	144,544	0,00	467,735	0,00
1,413	94,16	4,571	79,11	14,791	51,16	47,863	11,18	154,882	0,00	501,187	0,00
1,514	93,65	4,898	77,84	15,849	48,97	51,286	9,30	165,959	0,00	537,032	0,00
1,622	93,09	5,248	76,53	16,982	46,73	54,954	7,57	177,828	0,00	575,440	0,00
1,738	92,49	5,623	75,19	18,197	44,42	58,884	6,01	190,546	0,00	616,595	0,00
1,862	91,84	6,026	73,81	19,498	42,07	63,096	4,62	204,174	0,00	660,693	0,00
1,995	91,15	6,457	72,39	20,893	39,67	67,608	3,41	218,776	0,00	707,946	0,00
2,138	90,40	6,918	70,93	22,387	37,22	72,444	2,39	234,423	0,00	758,578	0,00
2,291	89,61	7,413	69,43	23,988	34,75	77,625	1,55	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	88,76	7,943	67,87	25,704	32,25	83,176	0,86	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	87,87	8,511	66,26	27,542	29,75	89,125	0,31	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	86,92	9,120	64,60	29,512	27,25	95,499	0,02	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	85,93	9,772	62,88	31,623	24,76	102,329	0,00	331,131	0,00		



Şekil 4.1. - Referans CEM I 42,5 N Lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.4 - CEM II/A -S (%14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

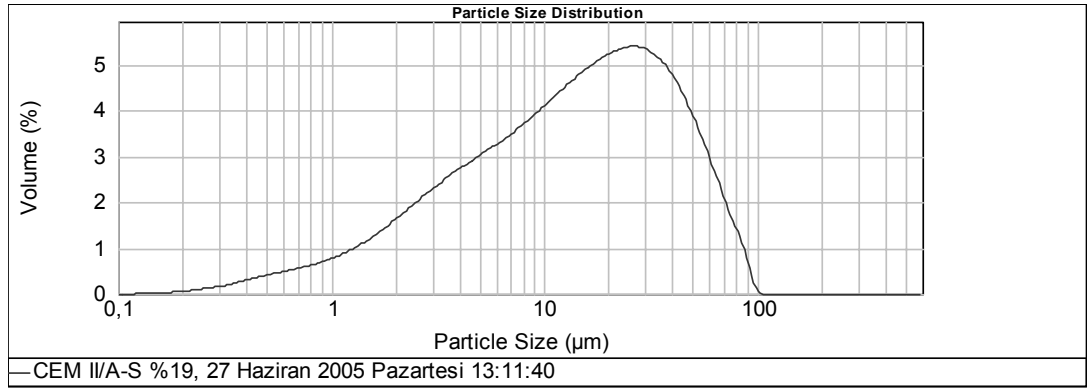
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,16	3,236	84,66	10,471	60,31	33,884	21,29	109,648	0,00	354,813	0,00
1,072	95,80	3,467	83,56	11,220	58,44	36,308	18,92	117,490	0,00	380,189	0,00
1,148	95,42	3,715	82,41	12,023	56,51	38,905	16,63	125,893	0,00	407,380	0,00
1,230	95,00	3,981	81,22	12,882	54,51	40,000	15,74	134,896	0,00	436,516	0,00
1,318	94,56	4,266	79,99	13,804	52,44	44,668	12,37	144,544	0,00	467,735	0,00
1,413	94,07	4,571	78,72	14,791	50,31	47,863	10,44	154,882	0,00	501,187	0,00
1,514	93,55	4,898	77,42	15,849	48,11	51,286	8,65	165,959	0,00	537,032	0,00
1,622	92,99	5,248	76,07	16,982	45,85	54,954	7,02	177,828	0,00	575,440	0,00
1,738	92,38	5,623	74,69	18,197	43,53	58,884	5,57	190,546	0,00	616,595	0,00
1,862	91,72	6,026	73,28	19,498	41,15	63,096	4,28	204,174	0,00	660,693	0,00
1,995	91,02	6,457	71,82	20,893	38,72	67,608	3,17	218,776	0,00	707,946	0,00
2,138	90,26	6,918	70,32	22,387	36,25	72,444	2,23	234,423	0,00	758,578	0,00
2,291	89,45	7,413	68,78	23,988	33,75	77,625	1,45	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	88,60	7,943	67,19	25,704	31,23	83,176	0,81	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	87,69	8,511	65,55	27,542	28,71	89,125	0,30	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	86,73	9,120	63,86	29,512	26,21	95,499	0,02	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	85,72	9,772	62,12	31,623	23,73	102,329	0,00	331,131	0,00		



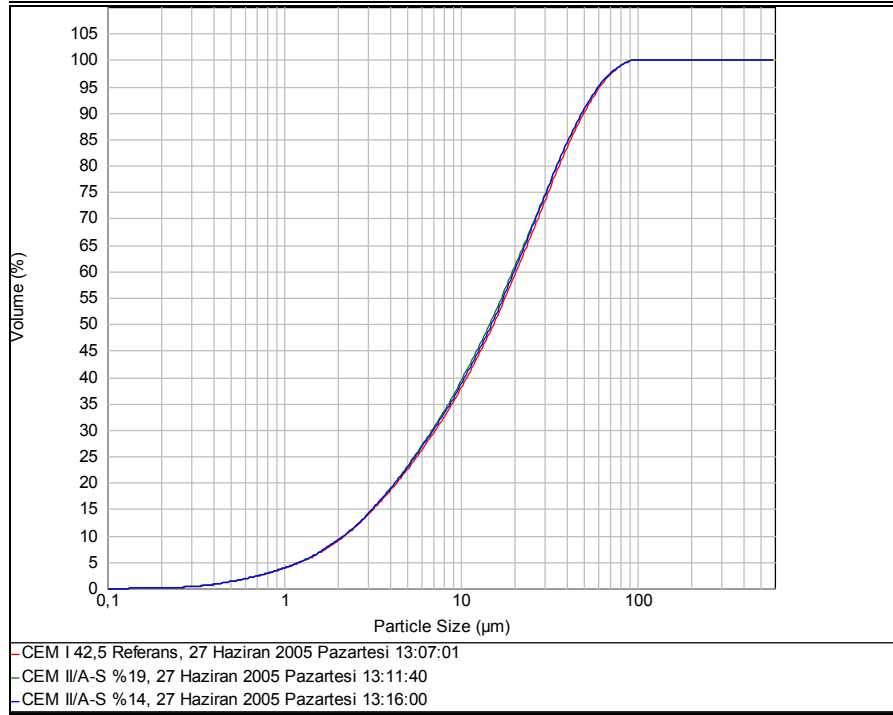
Şekil 4.2.- CEM II/A -S (%14) lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.5.- CEM II/A -S (%19) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,13	3,236	84,63	10,471	59,66	33,884	21,17	109,648	0,00	354,813	0,00
1,072	95,78	3,467	83,52	11,220	57,74	36,308	18,85	117,490	0,00	380,189	0,00
1,148	95,39	3,715	82,36	12,023	55,77	38,905	16,60	125,893	0,00	407,380	0,00
1,230	94,98	3,981	81,15	12,882	53,74	40,000	15,73	134,896	0,00	436,516	0,00
1,318	94,54	4,266	79,90	13,804	51,65	44,668	12,40	144,544	0,00	467,735	0,00
1,413	94,05	4,571	78,61	14,791	49,51	47,863	10,47	154,882	0,00	501,187	0,00
1,514	93,53	4,898	77,28	15,849	47,31	51,286	8,68	165,959	0,00	537,032	0,00
1,622	92,97	5,248	75,91	16,982	45,07	54,954	7,05	177,828	0,00	575,440	0,00
1,738	92,37	5,623	74,49	18,197	42,78	58,884	5,58	190,546	0,00	616,595	0,00
1,862	91,71	6,026	73,04	19,498	40,45	63,096	4,27	204,174	0,00	660,693	0,00
1,995	91,01	6,457	71,54	20,893	38,08	67,608	3,14	218,776	0,00	707,946	0,00
2,138	90,25	6,918	69,99	22,387	35,68	72,444	2,19	234,423	0,00	758,578	0,00
2,291	89,45	7,413	68,40	23,988	33,26	77,625	1,41	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	88,59	7,943	66,76	25,704	30,82	83,176	0,78	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	87,68	8,511	65,07	27,542	28,38	89,125	0,28	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	86,71	9,120	63,32	29,512	25,95	95,499	0,02	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	85,70	9,772	61,52	31,623	23,54	102,329	0,00	331,131	0,00		



Şekil 4.3.- CEM II/A -S (%19) Lazerli tanecik dağılımı

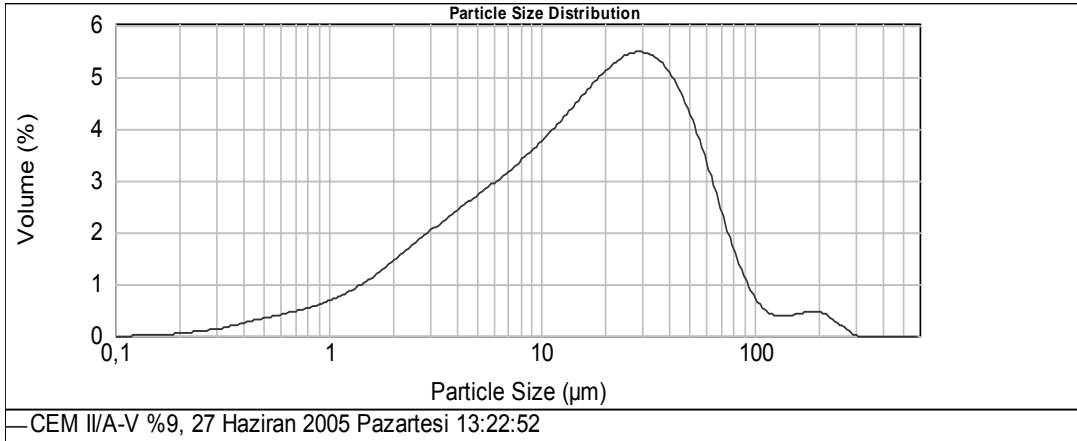


Şekil 4.4. - CEM I 42,5, CEM II/A –S %14 ve CEM II/A –S %19 Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı

CEM II/A-V (%9), CEM II/A-V (%14) ve CEM II/A-V (%19) uçucu kül katkıli çimentoların lazer granülometri sonuçları (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel)) Tablo 4.6, Tablo 4.7, Tablo 4.8’de, tanecik dağılımı grafikleri Şekil 4.5., Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.’de verilmiştir. Uçucu kül katkıli çimentoların granülometri eğrileri Şekil 4.8.’de görüldüğü gibi referans çimento ile benzerlik göstermekle birlikte referans çimentosuna göre kısmen daha iridir. Uçucu küllü çimentolar içerisinde, %19 uçucu kül içeren CEM II/A-V (%19) çimentosu diğerlerine kıyasla daha iri olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6.- CEM II/A -V (%9) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

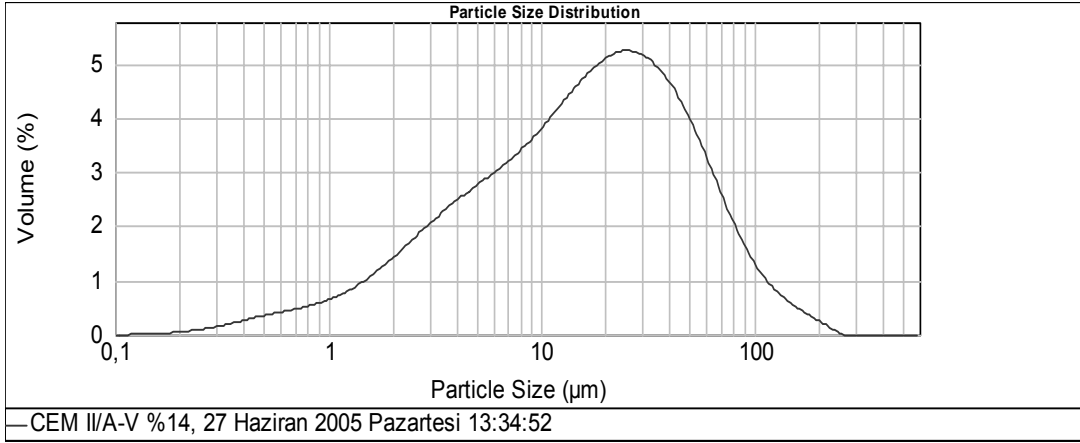
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,74	3,236	86,63	10,471	64,07	33,884	26,49	109,648	2,35	354,813	0,00
1,072	96,42	3,467	85,64	11,220	62,30	36,308	24,07	117,490	2,13	380,189	0,00
1,148	96,09	3,715	84,62	12,023	60,48	38,905	21,69	125,893	1,94	407,380	0,00
1,230	95,72	3,981	83,55	12,882	58,60	40,000	20,76	134,896	1,77	436,516	0,00
1,318	95,33	4,266	82,44	13,804	56,65	44,668	17,18	144,544	1,60	467,735	0,00
1,413	94,91	4,571	81,29	14,791	54,64	47,863	15,08	154,882	1,42	501,187	0,00
1,514	94,45	4,898	80,10	15,849	52,56	51,286	13,11	165,959	1,22	537,032	0,00
1,622	93,96	5,248	78,86	16,982	50,42	54,954	11,29	177,828	1,02	575,440	0,00
1,738	93,42	5,623	77,59	18,197	48,22	58,884	9,63	190,546	0,81	616,595	0,00
1,862	92,85	6,026	76,27	19,498	45,95	63,096	8,14	204,174	0,60	660,693	0,00
1,995	92,23	6,457	74,91	20,893	43,63	67,608	6,85	218,776	0,40	707,946	0,00
2,138	91,56	6,918	73,51	22,387	41,26	72,444	5,74	234,423	0,23	758,578	0,00
2,291	90,86	7,413	72,06	23,988	38,84	77,625	4,81	251,189	0,12	812,831	0,00
2,455	90,10	7,943	70,56	25,704	36,39	83,176	4,05	269,153	0,03	870,964	0,00
2,630	89,30	8,511	69,02	27,542	33,92	89,125	3,45	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	88,45	9,120	67,42	29,512	31,43	95,499	2,99	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	87,56	9,772	65,77	31,623	28,95	102,329	2,62	331,131	0,00		



Şekil 4.5.- CEM II/A -V (%9) Lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.7.- CEM II/A -V (%14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

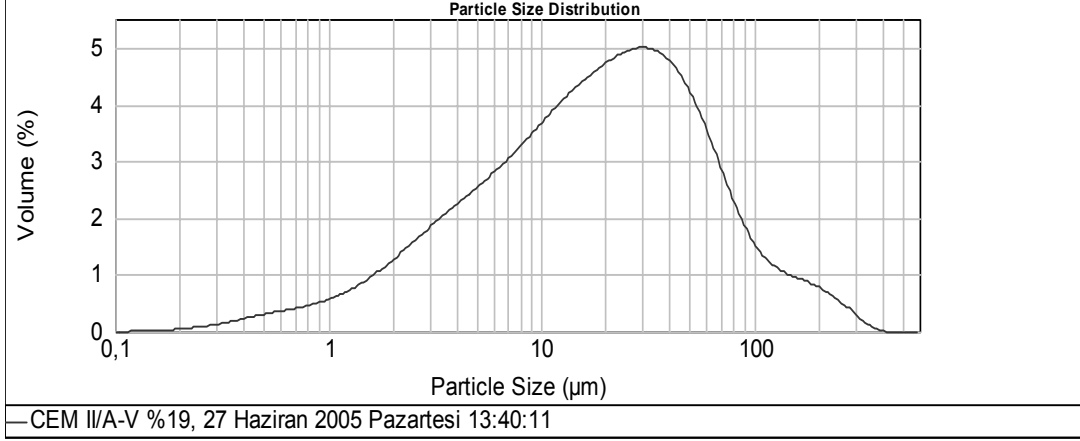
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,69	3,236	86,69	10,471	63,86	33,884	26,80	109,648	2,64	354,813	0,00
1,072	96,39	3,467	85,69	11,220	62,08	36,308	24,57	117,490	2,18	380,189	0,00
1,148	96,07	3,715	84,65	12,023	60,23	38,905	22,39	125,893	1,78	407,380	0,00
1,230	95,73	3,981	83,56	12,882	58,31	40,000	21,54	134,896	1,43	436,516	0,00
1,318	95,35	4,266	82,42	13,804	56,32	44,668	18,27	144,544	1,13	467,735	0,00
1,413	94,94	4,571	81,25	14,791	54,28	47,863	16,35	154,882	0,88	501,187	0,00
1,514	94,50	4,898	80,04	15,849	52,17	51,286	14,54	165,959	0,66	537,032	0,00
1,622	94,02	5,248	78,78	16,982	50,00	54,954	12,84	177,828	0,47	575,440	0,00
1,738	93,50	5,623	77,49	18,197	47,77	58,884	11,26	190,546	0,31	616,595	0,00
1,862	92,94	6,026	76,16	19,498	45,50	63,096	9,81	204,174	0,18	660,693	0,00
1,995	92,33	6,457	74,79	20,893	43,20	67,608	8,50	218,776	0,09	707,946	0,00
2,138	91,68	6,918	73,38	22,387	40,86	72,444	7,31	234,423	0,02	758,578	0,00
2,291	90,97	7,413	71,92	23,988	38,50	77,625	6,26	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	90,21	7,943	70,41	25,704	36,13	83,176	5,32	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	89,41	8,511	68,86	27,542	33,77	89,125	4,51	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	88,55	9,120	67,25	29,512	31,42	95,499	3,79	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	87,65	9,772	65,59	31,623	29,09	102,329	3,17	331,131	0,00		



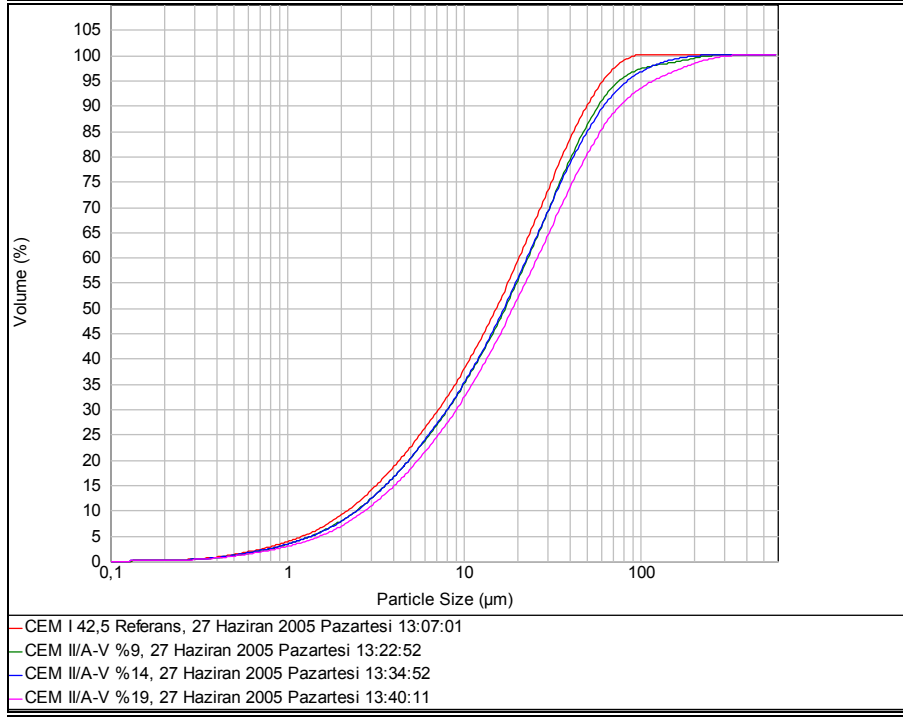
Şekil 4.6.- CEM II/A -V (%14) Lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.8.- CEM II/A -V (%19) lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	97,13	3,236	88,20	10,471	66,74	33,884	31,59	109,648	5,74	354,813	0,04
1,072	96,87	3,467	87,30	11,220	65,01	36,308	29,35	117,490	5,16	380,189	0,00
1,148	96,58	3,715	86,35	12,023	63,23	38,905	27,14	125,893	4,63	407,380	0,00
1,230	96,28	3,981	85,36	12,882	61,39	40,000	26,26	134,896	4,13	436,516	0,00
1,318	95,94	4,266	84,34	13,804	59,51	44,668	22,87	144,544	3,66	467,735	0,00
1,413	95,58	4,571	83,26	14,791	57,57	47,863	20,85	154,882	3,21	501,187	0,00
1,514	95,19	4,898	82,15	15,849	55,59	51,286	18,92	165,959	2,79	537,032	0,00
1,622	94,76	5,248	80,99	16,982	53,56	54,954	17,09	177,828	2,38	575,440	0,00
1,738	94,29	5,623	79,79	18,197	51,50	58,884	15,38	190,546	1,99	616,595	0,00
1,862	93,79	6,026	78,55	19,498	49,39	63,096	13,80	204,174	1,63	660,693	0,00
1,995	93,25	6,457	77,25	20,893	47,25	67,608	12,36	218,776	1,30	707,946	0,00
2,138	92,66	6,918	75,91	22,387	45,07	72,444	11,05	234,423	1,00	758,578	0,00
2,291	92,03	7,413	74,52	23,988	42,86	77,625	9,88	251,189	0,74	812,831	0,00
2,455	91,35	7,943	73,07	25,704	40,63	83,176	8,84	269,153	0,52	870,964	0,00
2,630	90,63	8,511	71,57	27,542	38,38	89,125	7,92	288,403	0,33	933,254	0,00
2,818	89,87	9,120	70,02	29,512	36,11	95,499	7,10	309,030	0,18	1000,000	0,00
3,020	89,05	9,772	68,40	31,623	33,85	102,329	6,38	331,131	0,09		



Şekil 4.7.- CEM II/A -V (%19) Lazerli tanecik dağılımı



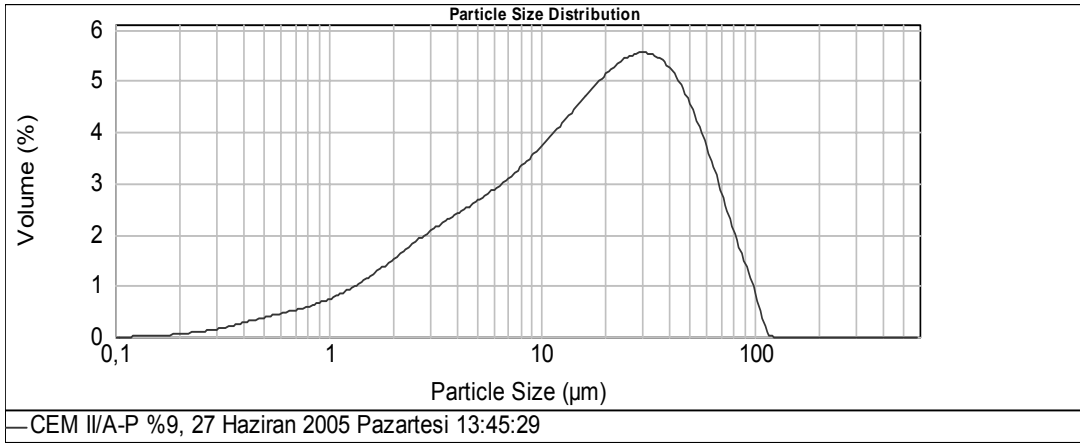
Şekil 4.8.- CEM I 42,5, CEM II/A –V(%9), CEM II/A –V(%14) ve CEM II/A –V(%19) Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı

CEM II/A-P (%9), CEM II/A-P (%14) ve CEM II/A-P (%19) tras katkılı çimentoların lazer granülometri sonuçları (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel)) Tablo 4.9, Tablo 4.10, Tablo 4.11’de, tanecik dağılımı grafikleri Şekil 4.9., Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.’de verilmiştir. Tras katkılı çimentoların granülometri eğrileri Şekil 4.12.’de görüldüğü gibi diğer kontrol çimentosu ile benzerlik göstermesinin yanı sıra kontrol çimentosuna göre kısmen daha iridir. Trashlı çimentolar içerisinde, 30μ ’nun üzerindeki tane boyutlarında, %14 tras içeren CEM II/A-P

(%14) çimentosunun taneciklerinin diğer katkılı çimentolardan sapmanın başladığı ve kısmen iri olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9.- CEM II/A -P (%9) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

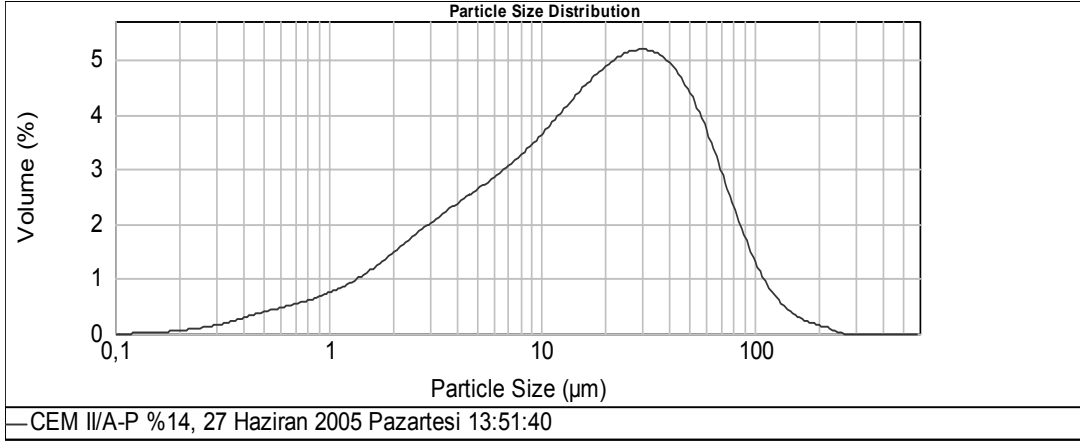
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,44	3,236	85,85	10,471	63,74	33,884	26,21	109,648	0,04	354,813	0,00
1,072	96,10	3,467	84,87	11,220	62,00	36,308	23,74	117,490	0,00	380,189	0,00
1,148	95,74	3,715	83,84	12,023	60,19	38,905	21,31	125,893	0,00	407,380	0,00
1,230	95,34	3,981	82,78	12,882	58,32	40,000	20,35	134,896	0,00	436,516	0,00
1,318	94,92	4,266	81,69	13,804	56,38	44,668	16,64	144,544	0,00	467,735	0,00
1,413	94,47	4,571	80,56	14,791	54,38	47,863	14,44	154,882	0,00	501,187	0,00
1,514	93,98	4,898	79,39	15,849	52,32	51,286	12,36	165,959	0,00	537,032	0,00
1,622	93,45	5,248	78,19	16,982	50,19	54,954	10,41	177,828	0,00	575,440	0,00
1,738	92,88	5,623	76,95	18,197	47,99	58,884	8,60	190,546	0,00	616,595	0,00
1,862	92,27	6,026	75,68	19,498	45,74	63,096	6,96	204,174	0,00	660,693	0,00
1,995	91,62	6,457	74,36	20,893	43,42	67,608	5,50	218,776	0,00	707,946	0,00
2,138	90,93	6,918	73,00	22,387	41,06	72,444	4,21	234,423	0,00	758,578	0,00
2,291	90,19	7,413	71,59	23,988	38,64	77,625	3,10	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	89,40	7,943	70,13	25,704	36,19	83,176	2,17	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	88,58	8,511	68,62	27,542	33,71	89,125	1,41	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	87,71	9,120	67,05	29,512	31,21	95,499	0,79	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	86,80	9,772	65,43	31,623	28,70	102,329	0,32	331,131	0,00		



Şekil 4.9.- CEM II/A -P (%9) Lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.10.- CEM II/A -P (%14) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

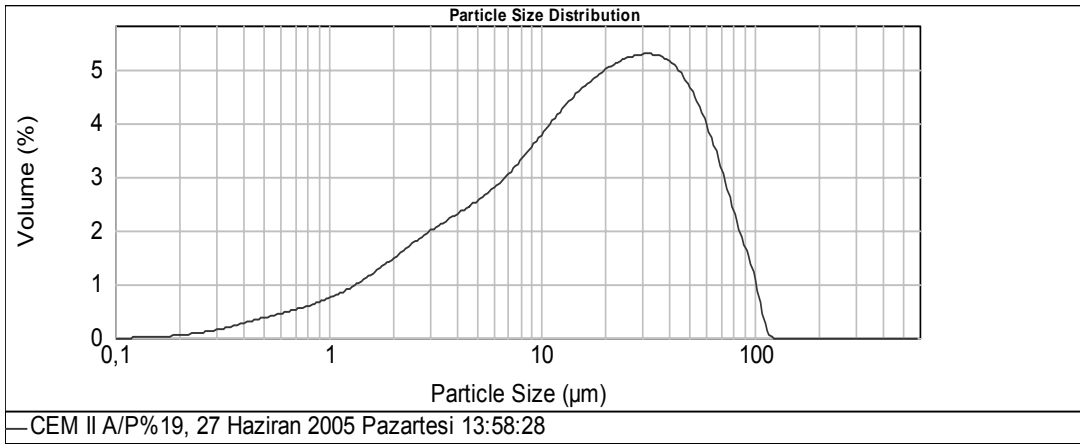
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,30	3,236	85,94	10,471	64,13	33,884	28,29	109,648	1,95	354,813	0,00
1,072	95,96	3,467	84,97	11,220	62,43	36,308	25,98	117,490	1,53	380,189	0,00
1,148	95,59	3,715	83,96	12,023	60,67	38,905	23,70	125,893	1,19	407,380	0,00
1,230	95,20	3,981	82,91	12,882	58,85	40,000	22,79	134,896	0,91	436,516	0,00
1,318	94,78	4,266	81,83	13,804	56,96	44,668	19,29	144,544	0,70	467,735	0,00
1,413	94,34	4,571	80,71	14,791	55,02	47,863	17,19	154,882	0,52	501,187	0,00
1,514	93,85	4,898	79,56	15,849	53,02	51,286	15,19	165,959	0,39	537,032	0,00
1,622	93,34	5,248	78,36	16,982	50,96	54,954	13,29	177,828	0,28	575,440	0,00
1,738	92,78	5,623	77,13	18,197	48,85	58,884	11,51	190,546	0,19	616,595	0,00
1,862	92,19	6,026	75,87	19,498	46,69	63,096	9,86	204,174	0,12	660,693	0,00
1,995	91,56	6,457	74,56	20,893	44,48	67,608	8,37	218,776	0,06	707,946	0,00
2,138	90,88	6,918	73,21	22,387	42,23	72,444	7,02	234,423	0,01	758,578	0,00
2,291	90,16	7,413	71,82	23,988	39,95	77,625	5,82	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	89,40	7,943	70,39	25,704	37,63	83,176	4,77	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	88,60	8,511	68,90	27,542	35,30	89,125	3,88	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	87,75	9,120	67,37	29,512	32,96	95,499	3,12	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	86,87	9,772	65,78	31,623	30,62	102,329	2,48	331,131	0,00		



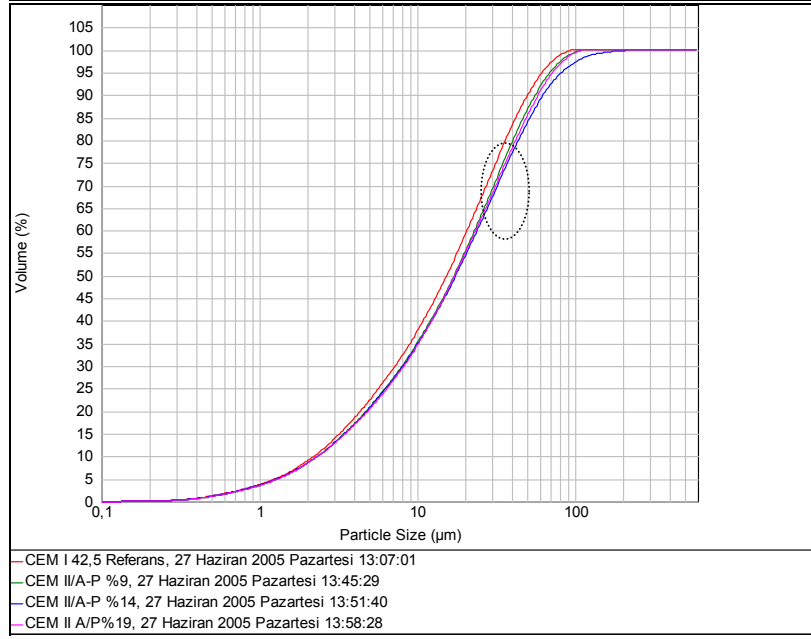
Şekil 4.10.- CEM II/A -P (%14) Lazerli tanecik dağılımı

Tablo 4.11. - CEM II/A -P (%19) Lazerli tanecik dağılımı (Elek Üstü Kalıntı (Hacimsel))

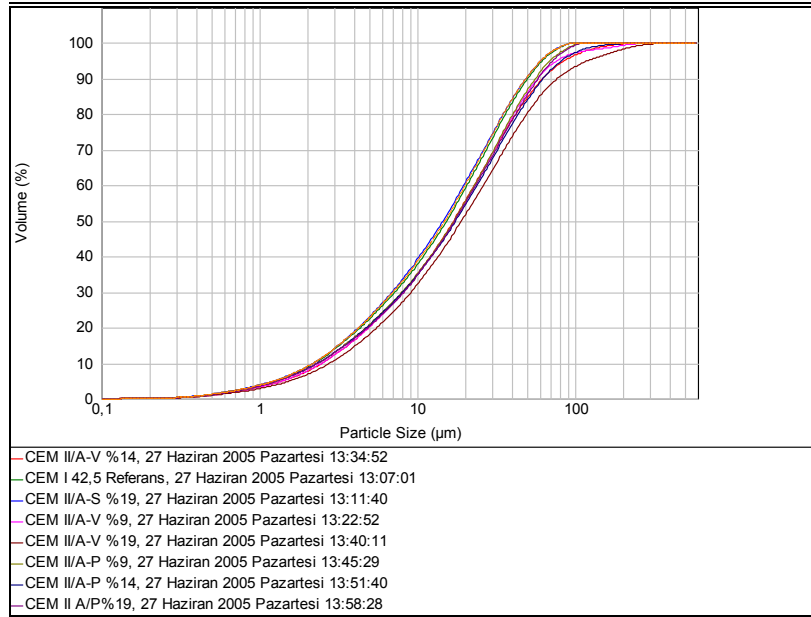
Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %	Size (µm)	Vol Over %
1,000	96,43	3,236	86,04	10,471	64,31	33,884	27,35	109,648	0,05	354,813	0,00
1,072	96,09	3,467	85,09	11,220	62,52	36,308	24,97	117,490	0,00	380,189	0,00
1,148	95,72	3,715	84,11	12,023	60,67	38,905	22,61	125,893	0,00	407,380	0,00
1,230	95,33	3,981	83,09	12,882	58,75	40,000	21,67	134,896	0,00	436,516	0,00
1,318	94,91	4,266	82,04	13,804	56,77	44,668	18,00	144,544	0,00	467,735	0,00
1,413	94,45	4,571	80,95	14,791	54,74	47,863	15,79	154,882	0,00	501,187	0,00
1,514	93,97	4,898	79,83	15,849	52,65	51,286	13,66	165,959	0,00	537,032	0,00
1,622	93,44	5,248	78,67	16,982	50,51	54,954	11,63	177,828	0,00	575,440	0,00
1,738	92,88	5,623	77,48	18,197	48,33	58,884	9,73	190,546	0,00	616,595	0,00
1,862	92,28	6,026	76,24	19,498	46,11	63,096	7,97	204,174	0,00	660,693	0,00
1,995	91,64	6,457	74,95	20,893	43,85	67,608	6,36	218,776	0,00	707,946	0,00
2,138	90,96	6,918	73,61	22,387	41,55	72,444	4,93	234,423	0,00	758,578	0,00
2,291	90,24	7,413	72,22	23,988	39,23	77,625	3,67	251,189	0,00	812,831	0,00
2,455	89,48	7,943	70,77	25,704	36,88	83,176	2,60	269,153	0,00	870,964	0,00
2,630	88,68	8,511	69,25	27,542	34,51	89,125	1,72	288,403	0,00	933,254	0,00
2,818	87,83	9,120	67,67	29,512	32,13	95,499	1,00	309,030	0,00	1000,000	0,00
3,020	86,96	9,772	66,02	31,623	29,74	102,329	0,41	331,131	0,00		



Şekil 4.11.- CEM II/A -P (%19) Lazerli tanecik dağılımı



Şekil 4.12.- CEM I 42,5, CEM II/A -P(%9), CEM II/A -P(%14) ve CEM II/A -P(%19) Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı



Şekil 4.13- CEM I ve CEM II Çimentolarının elek altı tanecik dağılımı

Katkılı ve kontrol çimentolarının granülometri eğrileri birlikte verildiği Şekil 4.13.'de, katkılı çimentoların tane dağılımı referans çimento ile paralellik göstermektedir. Çimentoların tane boyutları küçükten büyüğe doğru gruplandırılırsa, 2µ-100µ aralığında, referans çimento cüruf katkılı çimentolarla benzerlik göstermekte, bunları tras katkılı çimentolarla uçucu kül katkılı çimentolar izlemektedir. %19 Uçucu kül katkılı CEM II/A-V(%19) çimentosunun diğerlerine kıyasla daha iri olduğu göze çarpmaktadır.

4.2. MEKANİK DENEYLERİN SONUÇLARI

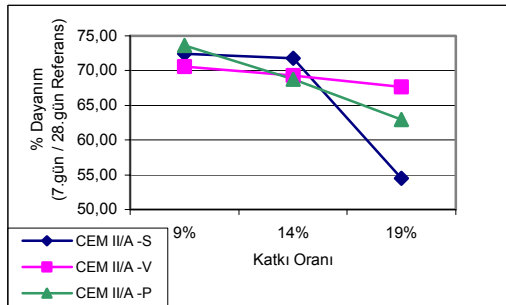
Kür havuzunda bekletilen harç numunelerinde 7. ve 28. günlerde yapılan eğilme ve basınç deneylerinin sonuçlarının yanı sıra 7. gün ve 28. gün dayanımlarının referans çimentonun 28. gün dayanımına oranları yüzde olarak Tablo 4.12. ve Tablo 4.13’de verilmiştir.

7 günlük süreçte katkıli çimentolar ile üretilen harçların erken basınç dayanımları, referans harcın dayanımına kıyasla daha düşük olmaktadır. Katkı oranının artışı ile birlikte dayanım kayıpları da artmaktadır. En düşük erken dayanım, %19 cüruf katkıli çimentoda görülmektedir.

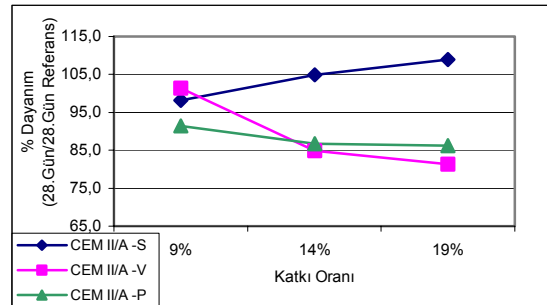
7–28 günlük periyotta ise %14 ve %19 cüruf katkıli çimentolar ile %9 oranında uçucu kül katkıli çimento referans çimentonun dayanımını aşmaktadır. Bu çimentolar arasında en iyi performansı cüruf katkıli çimentolar göstermektedir. 28. günün sonunda %19 uçucu kül içeren çimento en düşük dayanımı vermiştir.

Tablo 4.12.- 7. Gün ve 28. Gün Basınç Dayanımı

	Bağıl Dayanım %(7.gün/ 28.gün Referans)	7 GÜN (N/mm ²)	28 GÜN (N/mm ²)	Bağıl Dayanım %(28. Gün / 28. gün Referans)
Referans CEM I 42,5 N	87,18	34,4	39,4	100,0
CEM II/A -S (%9)	72,41	28,5	38,7	98,2
CEM II/A -S (%14)	71,83	28,3	41,4	105,0
CEM II/A -S (%19)	54,51	21,5	43,0	109,0
CEM II/A -V (%9)	70,56	27,8	40,0	101,4
CEM II/A -V (%14)	69,29	27,3	33,5	84,8
CEM II/A -V (%19)	67,61	26,6	32,1	81,4
CEM II/A -P (%9)	73,60	29,0	36,1	91,4
CEM II/A -P (%14)	68,78	27,1	34,2	86,7
CEM II/A -P (%19)	62,94	24,8	34,0	86,2



(a)



(b)

Şekil 4.14. Kür havuzunda bekletilen numunelerde basınç dayanımının referans numunenin basınç dayanımına oranı (%)

Şekil 4.14. (a) 7. Gün/28. Gün Referans

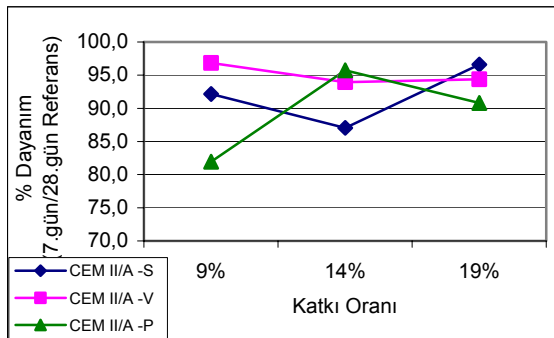
Şekil 4.14. (b) 28. Gün/28. Gün Referans

28 gün standart kürün ardından, üç farklı oranda katkı içeren, üç tip katkıli çimento içerisinde referans çimentoya en yakın dayanıma sahip olanlar; %9 oranında katkı içeren cüruf, uçucu kül ve tras katkıli çimentolardır.

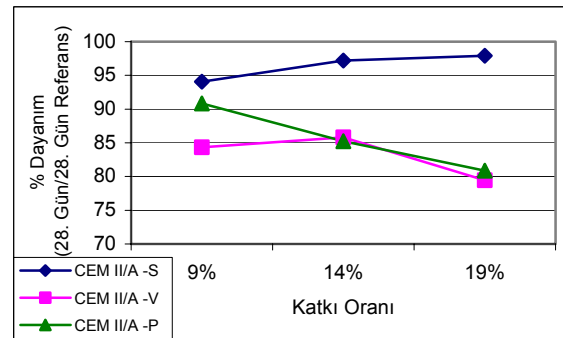
28 günlük numuneler üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneyinde tüm katkıli çimentolar kontrol numunesinden daha düşük dayanım değerleri almıştır. Katkıli çimentolar arasında, cüruf katkıli çimentolar referans çimentoya yakın değerler alarak, basınç dayanım sonuçlarına benzer şekilde, eğilme dayanımı açısından en iyi performansı göstermişlerdir.

Tablo 4.13.- 7. Gün ve 28. gün eğilme dayanımı

	Bağlı Dayanım % _{7.gün/28.gün Referans}	7 GÜN (N/mm ²)	28 GÜN (N/mm ²)	Bağlı Dayanım % _{28.gün/28.gün Referans}
Referans CEM I 42,5 N	107,2	5,67	5,29	100
CEM II/A -S (%9)	92,2	4,88	4,98	94
CEM II/A -S (%14)	87,1	4,61	5,14	97
CEM II/A -S (%19)	96,6	5,11	5,18	98
CEM II/A -V (%9)	96,8	5,12	4,46	84
CEM II/A -V (%14)	93,9	4,97	4,54	86
CEM II/A -V (%19)	94,4	4,99	4,20	79
CEM II/A -P (%9)	82,0	4,34	4,80	91
CEM II/A -P (%14)	95,7	5,06	4,51	85
CEM II/A -P (%19)	90,8	4,80	4,28	81



(a)



(b)

Şekil 4.15. Kür havuzunda bekletilen numunelerde eğilme dayanımının referans numunenin eğilme dayanımına oranı (%)

Şekil 4.15. (a) 7. Gün/28. Gün Referans, Şekil 4.15. (b) 28. Gün/28. Gün Referans

4.3. HASAR ÖLÇÜM DENEYLERİNİN SONUÇLARI

4.3.1. Donma Çözölmeye Maruz Bırakılan Numuneler

28 günlük standart kürün ardından donma / çözölmeye dolabında kürlenmiş numuneler üzerinde, 15. ve 28. günlerde, yapılan ultrases hızı ve ağırlık ölçümü deney sonuçları ve değişim oranları Tablo 4.14 ve Tablo 4.15’de verilmiştir.

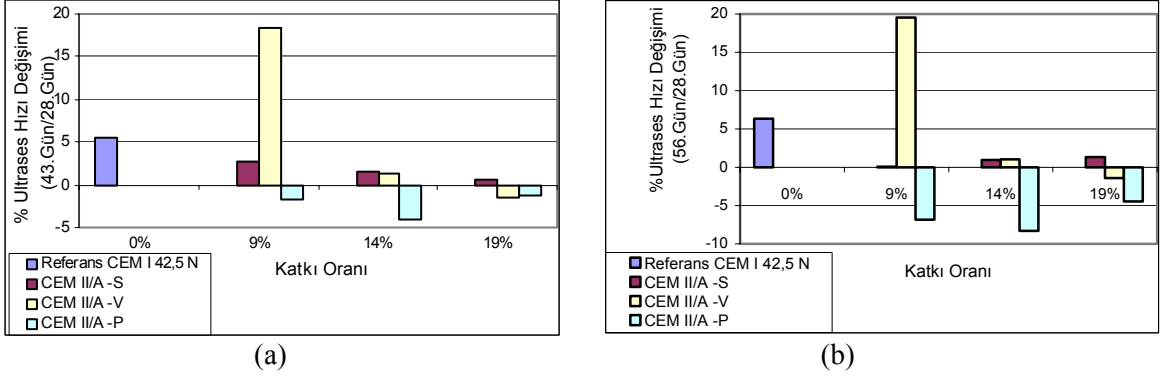
Bu sonuçlara göre ilk 15 günlük dönemde ağırlık değişimlerinin pozitif yönde olduğu belirlenmiştir. Ultrases hızı değişimlerinde ise %19 uçucu kül ve tras katkılı çimentolarda az miktarda kayıplar görölmüş, %9 uçucu kül içeren çimentoda hız değişiminin belirgin bir biçimde arttığı tespit edilmiştir.

15 – 28 günlük süreçte ağırlık kayıpları sınırlı oranlarda da olsa görölmeye başlanmıştır. Ultrases hızı ölçüm sonuçlarına göre tras katkılı çimentoların tümünde hız düşüşleri görölmüş olup, %9 uçucu kül içeren çimentoda hız değişiminin pozitif yönde devam ettiğine tanık olunmuştur.

İlk 15 günlük periyotta hasarın belirgin bir şekilde görölememesinin, Madde 3.4.3.1’de belirtilen sebepten dolayı, 2.gününden itibaren soğutmanın 7 gün boyunca en fazla -2°C ’ye kadar yapılabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4.14.- Donma / çözölmeye etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı

	28. Gün (km/s)	43. Gün (km/s)	Bağıl Hız Değişimi %(43.gün-28.gün)	56. Gün (km/s)	Bağıl Hız Değişimi %(56.gün-28.gün)
Referans CEM I 42,5 N	4,03	4,26	6	4,29	6
CEM II/A -S (%9)	4,02	4,12	3	4,02	0
CEM II/A -S (%14)	4,10	4,17	2	4,14	1
CEM II/A -S (%19)	4,27	4,30	1	4,33	1
CEM II/A -V (%9)	3,42	4,05	18	4,09	20
CEM II/A -V (%14)	4,12	4,17	1	4,16	1
CEM II/A -V (%19)	4,01	3,96	-1	3,96	-1
CEM II/A -P (%9)	3,99	3,92	-2	3,72	-7
CEM II/A -P (%14)	4,02	3,86	-4	3,69	-8
CEM II/A -P (%19)	4,14	4,09	-1	3,96	-4

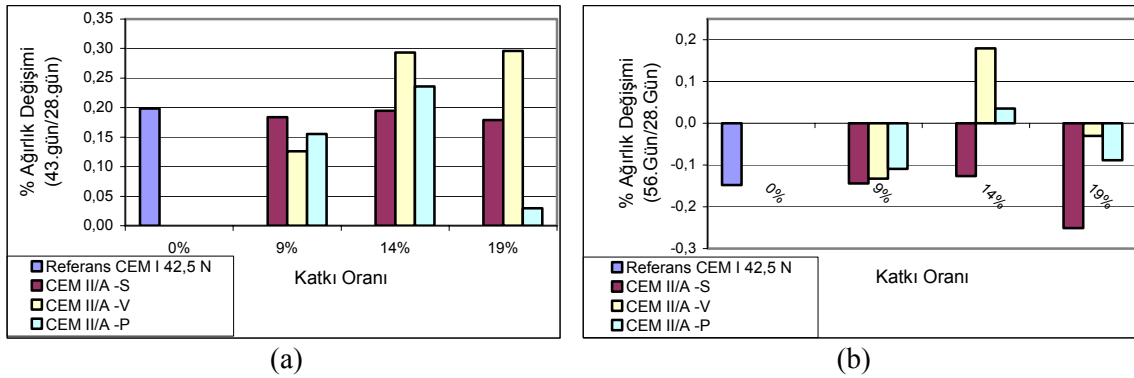


Şekil 4.16. Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişim oranı (%)

Şekil 4.16. (a) 15. Gün, Şekil 4.16. (b) 28. Gün

Tablo 4.15.- Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi

	28. Gün (gr)	43. Gün (gr)	W_{43} (%)	56. Gün (gr)	W_{56} (%)
Referans CEM I 42,5 N	587,3	588,5	0,2	586,4	-0,1
CEM II/A -S (%9)	579,8	580,9	0,2	579,0	-0,1
CEM II/A -S (%14)	581,8	583,0	0,2	581,1	-0,1
CEM II/A -S (%19)	559,0	560,0	0,2	557,6	-0,3
CEM II/A -V (%9)	554,7	555,4	0,1	554,0	-0,1
CEM II/A -V (%14)	557,1	558,7	0,3	558,1	0,2
CEM II/A -V (%19)	551,5	553,1	0,3	551,3	0,0
CEM II/A -P (%9)	578,9	579,8	0,2	573,3	-0,1
CEM II/A -P (%14)	564,8	566,1	0,2	564,6	0,0
CEM II/A -P (%19)	563,7	563,8	0,0	562,7	-0,2



Şekil 4.17. Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişim oranı (%)

Şekil 4.17. (a) 15. Gün, Şekil 4.17. (b) 28. Gün

4.3.2. Islanma Kurumaya Maruz Bırakılan Numuneler

Islanma / kuruma etkisine tâbi tutulan numunelerde 28 günlük standart kürün ardından 15. ve 28. günlerde ultrases hızı ve ağırlık ölçümü yapılmış, meydana gelen değişimler izlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.16 ve Tablo 4.17’de verilmiştir.

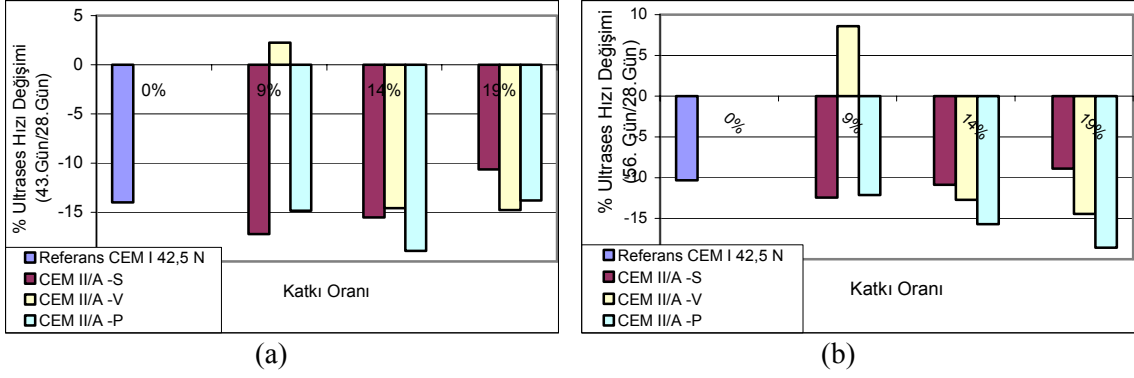
Tablo 4.16 ve Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, islanma / kuruma etkisine bırakılan numuneler üzerinde yapılan ultrases hızı ölçümlerinde, 0–15 ve 15–28 günlük süreçlerde bir numune dışında diğer tüm numunelerde belirgin düşüşler görülmektedir. En büyük performans kaybı ise %19 tras katkılı çimentoda meydana gelmektedir.

Islanma / kuruma etkisine bırakılan numunelerde, hasarın zamanla artması beklenmesine rağmen 28. günde oluşan hızdaki değişim 15. güne kıyasla daha az olmaktadır.

%9 uçucu kül katkılı çimentoda ultrases geçiş hızı kaybı görülmemekte ve zamanla hız değişimi pozitif yönde olmaktadır.

Tablo 4.16.- Islanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı

	28. Gün (km/s)	43. Gün (km/s)	Bağıl Hız Değişimi %(43.gün-28.gün)	56. Gün (km/s)	Bağıl Hız Değişimi %(56.gün-28.gün)
Referans CEM I 42,5 N	4,13	3,55	—14	3,70	—10
CEM II/A -S (%9)	4,21	3,49	—17	3,69	—12
CEM II/A -S (%14)	4,12	3,48	—16	3,67	—11
CEM II/A -S (%19)	4,00	3,57	—11	3,64	—9
CEM II/A -V (%9)	3,51	3,59	2	3,82	9
CEM II/A -V (%14)	4,13	3,53	—15	3,61	—13
CEM II/A -V (%19)	4,12	3,51	—15	3,52	—14
CEM II/A -P (%9)	4,34	3,69	—15	3,81	—12
CEM II/A -P (%14)	4,10	3,33	—19	3,46	—16
CEM II/A -P (%19)	4,09	3,52	—14	3,33	—19



Şekil 4.18. İslanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişim oranı (%)

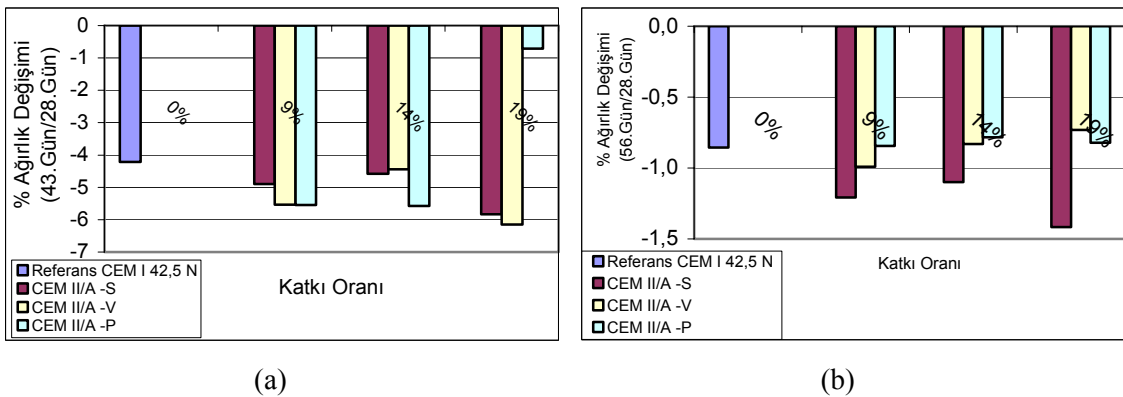
Şekil 4.18. (a) 15. Gün, Şekil 4.18. (b) 28. Gün

İslanma / kuruma deneyi yapılan numunelerde 28 günlük periyodun sonunda ağırlık değişimi, Tablo 4.17 ve Şekil 4.19'de görüldüğü gibi, tüm numunelerde kayıplarla sonuçlanmıştır.

28. gün sonunda oluşan ağırlık kaybı 15. güne kıyasla daha az olmaktadır ve ultrases hızı kaybı sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Tablo 4.17.- İslanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi

	28. Gün (gr)	43. Gün (gr)	W ₄₃ (%)	56. Gün (gr)	W ₅₆ (%)
Referans CEM I 42,5 N	557,5	534	-4	552,7	-0,9
CEM II/A -S (%9)	571,6	544	-5	564,7	-1,2
CEM II/A -S (%14)	578,7	552	-5	572,3	-1,1
CEM II/A -S (%19)	562,7	530	-6	554,7	-1,4
CEM II/A -V (%9)	562,3	531	-6	556,7	-1,0
CEM II/A -V (%14)	558,5	534	-4	553,8	-0,8
CEM II/A -V (%19)	543,5	510	-6	539,5	-0,7
CEM II/A -P (%9)	564,1	533	-6	559,3	-0,8
CEM II/A -P (%14)	571,2	539	-6	566,7	-0,8
CEM II/A -P (%19)	563,8	560	-1	559,2	-0,8



Şekil 4.19. İslanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişim oranı (%)

Şekil 4.19. (a) 15. Gün, Şekil 4.19. (b) 28. Gün

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu araştırmada yapılan deneysel çalışmalara göre elde edilen sonuçlar, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

5.1. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI

- I. Üretilen kontrol çimentosu ve katkıli çimentoların özgül yüzeyleri yakın ($3500 \text{ cm}^2/\text{gr} - 3700 \text{ cm}^2/\text{gr}$) değerlerdedir. Buna rağmen elek analizi sonuçları, iri taneciklerin uçucu külde ve trasta yüksek fırın cürufuna kıyasla daha fazla bulunduğunu işaret etmektedir. Bu konuyla ilgili daha önce yapılan bir çalışmada, 40μ ve 90μ elek üstü bakiyeleri eşitlenmiş çimentoların Blaine değerleri belirgin farklılıklar göstermiştir [27]. Bu bulgular, inceliğin tayin edilmesinde Blaine ve elek analizi deneylerinin birbirlerinin alternatifi olmadıklarını göstermektedir. Tanecik dağılımının daha belirgin olarak görülebilmesi için, elek analizi ve Blaine deneylerine ek olarak lazerli tanecik ölçümü deneyinin yapılması faydalı olmaktadır.
- II. Gerek uçucu külün toz tutucu filtrelerde tutulmasının ardından tekrar öğütülmeye tâbi tutulmaması, gerekse trasın öğütme işleminde belli bir inceliğin aşılmasından sonra “sarma” olarak ifade edilen partiküllerin birleşerek kümelenmesi, tanecik büyüklüğü dağılımının homojenliğini bozmaktadır. Yüksek fırın cürufunun öğütülebilirliği diğer katkılara göre daha zordur fakat tanecik dağılımı daha homojen olmaktadır.
- III. Lazerli tanecik ölçümü deneyi, katkıli çimentoların granülometrileri eğrileri ile referans çimentonun granülometri eğrisinin yakın değerlerde olduğunu göstermektedir.

5.2. MEKANİK DENEY SONUÇLARI

- I. Erken yaşlarda, çimentolarda katkı miktarı arttıkça dayanım kayıpları artmaktadır ve tüm katkıli çimentoların basınç dayanımları CEM I 42,5 N referans çimentosunun

dayanımından düşük değerler almaktadır. Bu sonuç, puzolanların dayanımı artıran etkilerinin görülebilmesi için gereken ve klinkerin hidratasyonu ile açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in, 7 günlük süreçte yeteri kadar oluşmamasından dolayı beklenen bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır.

- II. 7–28 günlük süreçte %14 ve %19 yüksek fırın cürufu katkılı CEM II A/S çimentoları ile %9 uçucu kül katkılı CEM II A/V çimentosunun dayanımlarının katkısız çimentonun dayanımından fazla olduğu görülmektedir. En büyük dayanım değerine %19 cüruf katkılı CEM II A/S (%19) çimentosu sahip olmaktadır. Uçucu kül katkılı ve tras katkılı çimentolarda 28. gün sonunda katkı oranının artmasıyla dayanım düşüşlerinin, puzolanik etkinin görülebilmesi için gerekli olan serbest kirecin henüz istenen miktarda oluşmadığından ve puzolanların ortamdaki seyreltici etkilerinin devam ettiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer etkinin yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda meydana gelmemesi, yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliğinin yanı sıra zayıf bağlayıcı olması ile açıklanabilir.
- III. 28 günlük standart kürün ardından, üç farklı tür ve üç farklı oranda katkı içeren 9 tip çimento arasında referans çimentonun dayanımına en yakın dayanımı, %9 oranında katkı içeren CEM II A/S (%9), CEM IIA/V (%9) ve CEM II A/P (%9) çimentoları sağlamaktadır.
- IV. Tüm katkılı çimentolarda eğilme dayanımı değerleri referans çimentonun eğilme dayanımı değerinden küçük değerler almıştır. Katkılı çimentolar arasında eğilme dayanımı açısından en iyi performansı %19 cüruf katkılı CEM IIA/S (%19) çimentosu göstermiştir.

5.3. HASAR ÖLÇÜM DENEYİ SONUÇLARI

5.3.1. Donma – Çözülme Etkisi

- I. Donma / çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerin 15 günlük dönem sonunda ağırlık kaybına uğramadığı görülmektedir. Buna karşın 28. günün sonunda %14 oranında uçucu kül ve puzolan katkılı numuneler haricindeki tüm numunelerde ağırlık kayıpları izlenmiştir. İlk 10 günlük süreçte deney şartlarında yapılan zorunlu değişiklik, hasarın gelişimini yavaşlatmış olmasına rağmen tüm çimentolara eşit şekilde tesir

ettiğinden, performansların rölatif olarak karşılaştırılmalarına engel teşkil etmemiştir. Bununla birlikte 15. ve 28. günlerde %19 uçucu kül içeren CEM II A/V (%19) ve traşlı CEM II-A/P çimentolarının ultrases hızlarında düşüşler gözlenmektedir. Ultrases ve ağırlık kaybı deneyleri birlikte değerlendirildiğinde, donma / çözülme döngüsünün oluşturduğu olumsuz etkiden en fazla zararı tras katkılı CEM II A/P çimentoları görmüştür. Bu sonuç 28. günlük standart kürün ardından puzolanlı çimentoların dayanımlarına paralel olarak, donma çözülme etkisine karşı durabilite özelliklerinin de yetersiz olduğunu göstermektedir.

- II. Kontrol numunesinde, yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda ve %9, %14 oranında uçucu kül katkılı numunelerde ultrases hızı artışları görülmüş en belirgin artışa %9 oranında uçucu kül içeren CEM II-A/V(%9) çimentosunda rastlanılmıştır. Uçucu külün, donma / çözülmeye olan dayanıklılığının olumsuz yönde etkilenmesine sebep olarak, puzolanik etkinin %14 ve %19 katkılı çimentolarda daha yavaş görülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu da hidrasyon sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 'in ortamda istenen miktarda bulunmadığını göstermektedir.
- III. 28 günlük süre zarfında hasarın tespit edilebilmesi açısından ultrases hızı ölçümü ağırlık değişimi ölçümüne kıyasla daha hassas sonuçlar vermektedir.
- IV. 28. gün sonunda yakın dayanım değerlerine sahip olan çimentolarda, ultrases hızı ölçüm sonuçlarına göre, en fazla hasarı tras katkılı CEM II A/P (%9) çimentosu görmektedir. %9 oranında cüruf katkılı CEM II A/S çimentosunda ultrases hızı geçişinde değişiklik tespit edilmemektedir. Kontrol numunesinde ise ultrases hızı artışı %6 iken, CEM II A/V (%9) çimentosunda %20 olmaktadır. Böylelikle özgül yüzey ve 28. gün basınç dayanım değerleri birbirlerine yakın olan %9 oranında katkı içeren çimentolar arasında, uçucu küllü çimentonun puzolanik özelliğini etkin bir şekilde göstermektedir. Bu da donma / çözülme etkisine karşı %9 oranında uçucu kül içeren numunenin, referans numuneye kıyasla daha dayanıklı olmasına neden olmaktadır.

5.3.2. Islanma – Kuruma Etkisi

- I. Tüm numunelerde belirgin bir şekilde ağırlık kaybı ve ultrases hızı düşüşü görülmesine karşın %9 oranında uçucu kül içeren CEM II A/V(%9) numunesinde ıslanma / kuruma etkisindeki ultrases hızı zamanla artarak 28. gün sonunda %9'a ulaşmıştır. Bu sonuç % 9

uçucu kül katkılı çimentonun donma / çözülmeye karşı gösterdiği performansa benzerlik göstermektedir. Bu da puzolanik özelliğin belirgin bir biçimde kendisini göstermesiyle açıklanabilmektedir.

- II. Islanma / kuruma etkisi, donma / çözülme etkisine kıyasla numuneler üzerinde olumsuz etkisini daha belirgin bir şekilde göstermektedir. Islanma / kuruma etkisine bırakılan numunelerde en fazla hasar %19 tras katkılı numunelerde gözlenmektedir.
- III. Islanma kuruma deneyinin olumsuz etkisini zamanla artması beklenirken, 28. günde oluşan hasar 15. güne kıyasla daha az olmaktadır. Bu durum ilk 15 günlük periyotta hidrasyon hızının, hasarın oluşma hızından yavaş, 15 ilâ 28 günlük süreçte ise hızlı olduğunu göstermektedir.
- IV. 28 günlük sürecin ardından uçucu kül ve tras katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça ıslanma kuruma etkisine olan dayanıklılık azalmakta, yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda ise katkı oranı arttıkça dayanıklılık artmaktadır. Bu da yüksek fırın cürufunun zayıf bağlayıcı özelliğinin, durabileteye olumlu yönde etki ettiğini göstermektedir.
- V. 28 gün sonunda yakın dayanımlara sahip çimentolar arasında ultrases hızı ölçüm sonuçlarına göre katkısız çimentoda, cüruf ve tras katkılı çimentolarda hasar görülmüştür. Uçucu kül katkılı numunede ise hasar tespit edilememiştir.

Genel Sonuçlar

- 28 günlük standart kürün ardından yakın özgül yüzey değerlerine sahip katkılı çimentolar arasında %14 ve %19 oranında yüksek fırın cüruf katkılı çimentoların ve %9 oranında uçucu kül katkılı çimentoların dayanımları katkısız çimentonun dayanımından daha büyük bulunmuştur.
- Uçucu kül katkılı ve tras katkılı çimentolarda 28. günün sonunda katkı oranının artması ile dayanım düşmüş; yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda ise artmıştır.
- 28 günlük standart kürün ardından, üç farklı tür ve üç farklı oranda katkı içeren 9 tip çimento arasında referans çimentonun dayanımına en yakın dayanımı, %9 oranında

katkı içeren CEM II A/S (%9), CEM IIA/V (%9) ve CEM II A/P (%9) çimentoları ile sağlanmıştır.

- Tüm katkılı çimentoların erken yaşlardaki eğilme ve basınç dayanımları referans çimentonun dayanımından düşük değerler almıştır.
- 28 günlük standart kürün ardından, donma / çözülme ve ıslanma / kuruma etkisine maruz bırakılan numuneler içinde en iyi performansı % 9 oranında uçucu kül içeren CEM II-A/V (%9) çimentosu göstermiştir.
- Uçucu kül katkılı çimentolarda katkı oranının artması ile donma / çözülmeye olan dayanıklılığının olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Bu ise 28. gün sonunda %14 ve %19 oranında uçucu kül içeren çimentolarda puzolanik etkinin oluşması için gereken Ca(OH)_2 'in ortamda yeterli miktarda olmadığını göstermiştir.
- Donma / çözülme döngüsünün oluşturduğu olumsuz etkiden en çok etkilenen tras katkılı CEM II A/P çimentoları olmuştur.
- 28 günlük sürecin ardından uçucu kül ve tras katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça ıslanma kuruma etkisine olan dayanıklılık azalmış, yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarda ise katkı oranı arttıkça dayanıklılık artmıştır.
- Islanma / kurumaya maruz bırakılan tüm numuneler arasında, tras katkılı çimentolar diğer çimentolara oranla yıpratıcı koşullara karşı daha az dayanıklılık göstermiştir.

İleriye Yönelik Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak ileride yapılacak olan araştırmalarda aşağıda belirtilen önerileri dikkate almak faydalı olacaktır.

- I. Puzolanların toplam silis miktarını ile birlikte aktif silis içeriği de belirlenmelidir.
- II. Mineral katkılarda tanecik dağılımı, elek analizi ve Blaine deneylerinin yanı sıra lazerli tanecik ölçümü ile desteklenmelidir.

- III. Islanma-kuruma deneyi sonucunda meydana gelen hasarda deneyler daha sık zaman aralıklarında ve uzun sürede yapılmalıdır. İç yapının değişimi, elektron mikroskobu ve X ışını difraktometrisi ile incelenmelidir.
- IV. Hızlandırılmış dayanıklılık deneyleri ile birlikte doğal şartlara daha yakın uzun süreli deneyler de yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] MEHTA, P.K., 1983, "Pozzolanic and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review," *The use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, American Concrete Institute special publication SP-79*., ed. V. M. Malhotra., Detroit., 1-46
- [2] GÜNEYİSİ, E., ve diğ., 2003, "Katkılı ve Katkısız Çimentolu Betonların Değişik Kür Koşulları Altında Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *Çimento ve Beton Dünyası*, 45 (4),56-73
- [3] BARADAN ve YAZICI, 2003, "Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(10), 62-69
- [4] TS EN 197-1, 2002, "*Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 91.100.10
- [5] AKMAN, M.S., 1990, "*Yapı Malzemeleri*", T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Sayı 1408
- [6] MASSAZA, F., 1997, "Pozzolans and Durability of Concrete", *1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, Turkish Cement Manufactures' Association*, ,İstanbul,1-22
- [7] HEWLETT P.C., 1998, "*Lea's Chemistry of Cement and Concrete*", John Wiley and Sons Inc., Fourth Edition, New York
- [8] ERDOĞAN, T.Y., 2004, "*Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*", Türk Hazır Beton Birliği, İstanbul, 975-92122-1-8
- [9] TOKYAY ve ERDOĞDU, 2003, "*Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar*",TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-03-08
- [10] YEĞİNOBALI, A., 2003, "*Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı*", TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-14-3
- [11] MAZLUM F., 1989, "*Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi*", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- [12] NEHDI, M., 2004, "Sürdürülebilir Gelişme İçin Çok Bileşenli Çimentolar", *Çimento ve Beton Dünyası*, 47 (3),44-52
- [13] YEĞİNOBALI, A., 2003, "Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar" *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(9), 56-61
- [14] ERDOĞDU, K., ve diğ., 2003, "*Traslar ve Traslı Çimentolar*", TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-13-5

- [15] MASSAZA, F., 1980, “Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements”, *Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cements*, Paris
- [16] TÜRKER, P., ve diğ., 2003, “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-18-6
- [17] BARADAN, B., ve diğ., 2002, “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 975-441-189-1
- [18] MORTUREUX, B., ve diğ., 1980, “Comprasion of Reactivity of the Different Pozzolans”, *Proceeding of 7th International Congress of Chemistry of Cements*, Paris, Vol.4,110-115
- [19] TS EN 196-1, 2002, “Çimento Deney Metodları - Bölüm 1: Dayanım”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 91.100.10
- [20] MEHTA, P.K., 1987, “Natural Pozzolans”, *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, ed. V.M. Malhotra, 1-33
- [21] MALHOTRA, V.M., 1986, “Mechanical Properties, and Freezing and Thawing Resistance of Non Air Entrained and Air Entrained Condensed Silica Fume Concrete using ASTM Test C666, Procedures A and B, *2nd International. Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid*, Vol. 2, 1069-64, ed. V.M. Malhotra
- [22] AKMAN, M.S., 1992, “Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi”, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Sayı 1481
- [23] POSTACIOĞLU, B., 1986, “Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Cilt 1; Bağlayıcı Maddeler”, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul
- [24] BATIC, O.R., ve diğ., 2000, “Secondary Ettringite Formation in Concrete Subjected to Different Curing Conditions”, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), 1407-1412
- [25] SWAMY, R.N., 1993, “Fly ash and slag: standards and specifications – help or hindrance?”, *Materials and Structures*, 26 (1993) , 600-613
- [26] Micromeritics AccuPyc 1330 Pycnometer Tecniqe Overview, “http://www.micromeritics.com/products/accupyc_technique_overview.aspx” [Ziyaret Tarihi: 02.Temmuz.2005]
- [27] KILINÇKALE, F.M., ve diğ., 2004, “Mineral Katkı Maddelerinin Çimento Harcının Özelliklerine Etkileri”, *XVIII. Ulusal Kimya Kongresi*, Kars,

ÖZGEÇMİŞ

Kemal ÇELİK, 05 Ocak 1981'de Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Ahiler İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini İnönü Lisesi'nde ve lise öğrenimini Özel Ankara Muradiye Fen Lisesi'nde tamamlayarak 1997 yılında mezun oldu. Aynı yıl öğrenimine başladığı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. 2002 yılında aynı bölümde yüksek lisans öğrenimine başlayarak İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.