

**ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATIK MERMER TOZU VE ATIK
ALÇININ KULLANILABİLİRLİĞİ**

Gölsüm SAĞLAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

**ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATIK MERMER TOZU VE ATIK
ALÇININ KULLANILABİLİRLİĞİ**

Gölsüm SAĞLAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

Glsm SAĞLAM tarafından hazırlanan “ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATIK
MERMER TOZU VE ATIK ALÇININ KULLANILABİLİRLİĞİ” adlı bu tezin
Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G..

Bu alışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, O.D.T.

Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G..

Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G..

Tarih: 22/06/2012

Bu tez ile G.. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini
onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Gölsüm SAĞLAM

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ATIK MERMER TOZU VE ATIK ALÇININ KULLANILABİLİRLİĞİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gülsüm SAĞLAM

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2012

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, atık mermer tozu (MT), silis dumanı (SD) ve fosfojips (A)'nın çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, Afyon Çavdarlar Mermer Fabrikası'ndan MT, Bandırma Gübre Fabrikası'ndan A, Limak Ankara Çimento Fabrikası'ndan klinker ve doğal alçı, Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesi'nden SD temin edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal kompozisyonları, fiziksel ve mineralojik özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Doğal alçı ve klinkerin birlikte öğütülmesi ile PÇ 42.5, klinker ve fosfojipsin birlikte öğütülmesi ile AMT0 kontrol çimentoları üretilmiştir. Katkılı çimentoların tamamı ağırlıkça % 5 oranında A, farklı oranlarda klinker, MT ve SD'nin birlikte öğütülmesi ile elde edilmiştir. AMT katkı çimento üretiminde ağırlıkça % 3, 6, 9, 12, 15, 20 ve 25 oranında MT kullanılırken, AMTSD katkı çimento üretiminde % 3, 6, 9, 12, 15, 20 ve 25 oranlarında MT ile SD kullanılmıştır.

21±2 °C sıcaklık ve % 50-60 bağıl nemli laboratuvar ortamında üretilen katkı çimentolar kullanılarak TS EN 196-1'e göre çimento harçları üretilmiş ve ardından 40x40x160 mm boyutlarında harç prizma numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen harç numuneleri deney yaşına kadar kür havuzunda bekletilmiştir. Numuneler üzerinde 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında eğilme ve basınç dayanımı

deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, hem kontrol çimentoları olan PÇ 42.5 ve AMT0 ile hem de katkılı çimentolar ile kıyaslanmıştır.

Elde edilen deney sonuçlarına göre, kontrol çimentoları PÇ 42.5 ve AMT0 ile AMT ve AMTSD katkılı çimentoların kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri TS EN 197-1’de verilen sınır değerlere uygundur. AMT ve AMTSD katkılı çimentoların eğilme ve basınç dayanımları, erken yaşlarda PÇ 42.5 ve AMT0 kontrol çimentolarına göre azalmıştır. Bununla birlikte katkılı çimentoların dayanımları ilerleyen yaşlarda kontrol çimentolarına yakın sonuçlar göstermiştir. AMT ve AMTSD katkılı çimentolar birbirleri ile karşılaştırıldığında ise 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında en yüksek eğilme ve basınç dayanımları AMTSD3 çimentosunda elde edilmiştir. Sonuç olarak, atık mermer tozu, silis dumanı ve fosfojipsin çimento üretiminde birlikte kullanılabileceği belirlenmiştir.

Bilim Kodu	: 714.1.143
Anahtar Kelimeler	: Portland çimentosu, atık mermer tozu, fosfojips, silis dumanı, kimyasal kompozisyon, fiziksel ve mekanik özellikler
Sayfa Adedi	: 94
Tez Yöneticisi	: Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

THE USABILITY OF WASTE MARBLE POWDER AND PHOSPHOGYPSUM IN CEMENT PRODUCTION

(M.Sc. Thesis)

Gölsüm SAĞLAM

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

In this experimental study, the usability of waste marble powder (WMP), silica fume (SF) and the phosphogypsum (P) in cement production was investigated. For this purpose, WMP obtained from Çavdarlar marble factory, P obtained from Bandırma fertilizer plant, natural gypsum and clinker obtained from Limak Ankara cement factory and SF obtained from Etibank electrometallurgy industry. The chemical compositions, the physical and mineralogical properties of these materials were determined by tests. By grinding natural gypsum with clinker Portland cement PC 42.5 called as control cement and by grinding phosphogypsum with clinker PMP0 cement called also as control cement were produced. Blended cements are obtained by using 5% of P (by weight). PMP blended cement obtained at different ratios of 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 20% and 25% by weight of WMP. PMPSF blended cement obtained at different ratios of 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 20% and 25% by weight of WMP and SF.

Cement mortars were mixed using produced blended cements under the relative humidity of 50-60 % and at 21±2 °C temperature according to TS EN 196-1 standard and then 40 x 40 x 160 mm mortar prisms were obtained in laboratory conditions. Obtained mortar specimens were kept in curing pool until test age. Compressive and flexural strength tests were carried out on mortar specimens

at 3, 7, 28, and 90 days. The obtained test results were compared with to each other blended cements as well as to control cements PC 42.5 and PMP 0.

According to test results, the chemical compositions and physical properties of the control cements PC 42.5 and PMP0, blended cements PMP and PMPSF are suitable with the limit values in the TS EN 197-1. Flexural and compressive strengths of blended cements were decreased according to control cements in the early stages of curing. It has been observed that in the advancing stages of curing, however, the strength values of the blended cements indicated near results to the control cements. In addition to that; blended cements were compared with each other at 3, 7, 28, and 90 days of ages, the highest flexural and compressive strengths were obtained with the PMPSF3 cement. As a result, waste marble powder, silica fume and phosphogypsum can be used together in the cement production.

Science Code : 714.1.143

Key Words : Portland cement, waste marble powder, phosphogypsum, silica fume, chemical composition, physical and mechanical properties

Page Number : 94

Adviser : Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile beni her zaman yönlendiren, her konuda yardımcı olarak beni destekleyen tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a, tez çalışması boyunca tecrübelerinden yararlandığım ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım, Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU, Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK, Araş. Gör. Mustafa DAYI, Öğr. Gör. Hakan ÇAĞLAR'a, mermer tozunu sağlayan Afyon Çavdarlar Mermer Fabrikası'na, bazı malzemelerin temini ve deneylerin yapılmasına yardımcı olan LİMAK Ankara Çimento Fabrikası yetkilileri ile tüm laboratuvar personeline, Antalya Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesi yetkilileri ile satın alma personellerine, Bursa Çimento Fabrikası yetkilileri ve laboratuvar personellerine, Bandırma Gübre Sanayi' ne, arkadaşlarım Yavuz ÇİTOĞLU, Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR ve Onur ARSLAN'a, maddi ve manevi destekleriyle çalışmalarım boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Çimentolar	7
2.1.1. Çimentonun tanımı	7
2.1.2. Çimentonun tarihçesi	9
2.1.3. Çimento hammaddeleri	10
2.1.4. Fiziksel özellikler	12
2.1.5. Çimento hammaddelerindeki bileşenler	13
2.1.6. Çimentolarda karmaşık bileşikler	16
2.1.7. Çimentonun hidratasyonu	18
2.2. Puzolanlar ve Puzolanik Tepkimeler	23
2.2.1. Puzolanlar	23
2.2.2. Puzolanların sınıflandırılması	23
2.2.3. Puzolanik aktivite ve puzolanik reaksiyon	24
2.2.4. Puzolanik katkıların beton özelliklerine etkileri	25
2.3. Silis Dumanı (SD)	26
2.3.1. Silis dumanının tarihçesi	27
2.3.2. Silis dumanının çimento ve betona etkileri	27
2.3.3. Silis dumanı üretimi	28
2.4. Mermerin Tanımı	28
2.4.1. Mermerlerin sınıflandırılması	30

sayfa

2.4.2. Afyon bölgesi mermerlerinin özellikleri	31
2.4.3. Mermer ocaklarında ve mermer işleme tesislerinde oluşan atık	31
2.4.4. Atıkların sektörel olarak kullanımı	32
2.5. Alçının Tanımı	35
2.5.1. Alçının tarihçesi	36
2.5.2. Alçının özellikleri	37
2.5.3. Alçı çeşitleri	38
2.5.4. Alçının kullanım alanları	38
2.5.5. Atık alçı oluşumu ve miktarı	39
3. MATERYAL VE METOT	40
3.1. Materyal	40
3.1.1. Çimento	40
3.1.2. Klinker	41
3.1.3. Doğal alçı	41
3.1.4. Fosfojips	42
3.1.5. Atık mermer tozu	42
3.1.6. Silis dumanı	42
3.1.7. Standart CEN kumu	43
3.1.8. Karışım suyu	43
3.2. Metot	44
3.2.1. Deneyler kullanılan çimentoların üretilmesi	44
3.2.2. Deneyler kullanılan çimentolara ait fiziksel deneyler	46
3.2.3. Harç deneyleri	50
4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	53
4.1. MT, SD ve A'nın Kimyasal Kompozisyonları	53
4.2. MT, SD ve A'nın Mineralojik Özellikleri	53
4.3. MT, SD ve A Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri	55
4.3.1. Çimentoların standart kıvamına MT, SD ve A'nın etkisi	56
4.3.2. Çimentoların priz süresine MT, SD ve A'nın etkisi	57
4.3.3. Çimentoların hacim genleşmesine MT, SD ve A'nın etkisi	58

	sayfa
4.3.4. Çimentoların inceliğine MT, SD ve A'nın etkisi	59
4.3.5. Çimentoların özgül yüzeyine MT, SD ve A'nın etkisi.....	60
4.3.6. Çimentoların yoğunluğuna MT, SD ve A'nın etkisi	62
4.4. MT, SD ve A Katkılı Çimentolu Harçların Özellikleri	63
4.4.1. Harçların birim ağırlığına MT, SD ve A'nın etkisi	63
4.4.2. Harçların eğilme dayanımlarına MT, SD ve A'nın etkisi	65
4.4.3. Harçların basınç dayanımlarına MT, SD ve A'nın etkisi	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
5.1. Sonuçlar	76
5.2. Öneriler	77
KAYNAKLAR	78
EKLER.....	84
EK-1 Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları	85
ÖZGEÇMİŞ	94

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler.....	8
Çizelge 2.2. CaCO_3 ve kil içeriklerine göre çimento hammaddelerinin sınıflandırılması	11
Çizelge 2.3. Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi ve ana bileşen miktarı	17
Çizelge 2.4. Kalsiyum silikatların hidratasyonu	21
Çizelge 2.5. ASTM C 618'e göre doğal puzolanlara ait sınırlamalar	25
Çizelge 2.6. Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri.....	29
Çizelge 2.7. Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırılması	30
Çizelge 2.8. Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması	30
Çizelge 2.9. Yapı alçıların kimyasal özellikleri	37
Çizelge 3.1. PÇ 42.5 Kontrol çimentosunun özellikleri.....	40
Çizelge 3.2. Klinkerin kimyasal kompozisyonu	41
Çizelge 3.3. Doğal alçı ile fosfojipsin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	41
Çizelge 3.4. SD ve MT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri.	42
Çizelge 3.5. Standart CEN kumu özellikleri	43
Çizelge 3.6. Ankara şehir içme suyunun kimyasal özellikleri	43
Çizelge 3.7. Üretilen çimento tiplerinin karışım oranları	45
Çizelge 4.1. PÇ 42.5, AMT ve AMTSD katkılı çimentoların fiziksel özellikleri	55
Çizelge 4.2. Çimento tiplerinin birim ağırlıkları.....	64
Çizelge 4.3. Çimento tiplerinin eğilme dayanımları	66
Çizelge 4.4. Çimento tiplerinin basınç dayanımları.....	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. MT' nin X-ışınları kırınım eğrisi	54
Şekil 4.2. SD' nin X-ışınları kırınım eğrisi	54
Şekil 4.3. Fosfojips'in X-ışınları kırınım eğrisi	55
Şekil 4.4. Çimento tipi ile standart kıvam suyu ilişkisi	57
Şekil 4.5. Çimento tipi ile priz değerleri ilişkisi	58
Şekil 4.6. Çimento tipi ile hacim genleşmesi ilişkisi	59
Şekil 4.7. Çimento tipi ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri ilişkisi	60
Şekil 4.8. Çimento tipi ile özgül yüzey ilişkisi	61
Şekil 4.9. Çimento tipi ile yoğunluk ilişkisi.....	63
Şekil 4.10. Harçlarda çimento tipi ile birim ağırlık ilişkisi	65
Şekil 4.11. Harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	66
Şekil 4.12. Harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi	71

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Çimento üretiminde kullanılan klinker ve atık mermer tozu	85
Resim 1.2. Çimento üretiminde kullanılan doğal alçı taşı ve atık alçı (fosfojips)	85
Resim 1.3. Klinkerin öğütülmesinde kullanılan çeneli kırıcı ve çimento numunelerinin paketlenmesi	86
Resim 1.4. Malzemelerin etüvde kurutulması ve çelik bilyalar	86
Resim 1.5. Çimento üretiminde kullanılan bilyalı değirmen	87
Resim 1.6. Çimentoların bilyalı değirmenden alınması	87
Resim 1.7. Çimento tiplerinin öğütüldükten sonra elenmesi	88
Resim 1.8. Çimento tiplerinin paketlenmesi	88
Resim 1.9. İncelik tayininde kullanılan Sartorius Basic elektronik terazi ve Alpine incelik ölçüm cihazı	89
Resim 1.10. İncelik deneyinin yapılışı ve Micromeritics AccuPyc yoğunluk cihazı ..	89
Resim 1.11. Tonindustrie-Seger marka Blaine cihazı	90
Resim 1.12. Harç karışımlarının hazırlanması ve mikserde karıştırılması.	90
Resim 1.13. Harçların kalıplara konulması	91
Resim 1.14. Harçların kalıptan çıkarılıp tel sepetlere konulması ve laboratuvar koşullarında kür edilmesi	91
Resim 1.15. Harçların nemli bezle kurulanması ve tartılması	92
Resim 1.16. Harç numuneleri	92
Resim 1.17. Harç numunelerine eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanması	93
Resim 1.18. Harç numunelerine basınç dayanımı deneyi uygulanması	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
CaSO_4	Kalsiyum sülfat
Ca(OH)_2	Kalsiyum hidroksit
$\text{CaMg(CO}_3)_2$	Kalsiyum magnezyum karbonat
CO_2	Karbondioksit
$\text{CaMg(CO}_3)_2$	Kalsiyum magnezyum karbonat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
C_3A	Trikalsiyum alüminat
C_3S	Trikalsiyum silikat
C_2S	Dikalsiyum silikat
C_4AF	Tetrakalsiyum alüminoferrit
dk	Dakika
Fe_2O_3	Demir oksit
g	Gram
H_2O	Su
K.K.	Kızdırma kaybı
MgO	Magnezyum oksit
MgCO_3	Magnezyum karbonat
s	Saniye
SiO_2	Silisyum oksit
t	Ton
μm	Mikrometro

Kısaltmalar	Açıklama
A	Fosfojips
AMT0	% 5 atık alçılı kontrol çimentosu
AMT3	% 5 atık alçılı, % 3 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT6	% 5 atık alçılı, % 6 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT9	% 5 atık alçılı, % 9 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT12	% 5 atık alçılı, % 12 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT15	% 5 atık alçılı, % 15 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT20	% 5 atık alçılı, % 20 atık mermer tozu katkılı çimento
AMT25	% 5 atık alçılı, % 25 atık mermer tozu katkılı çimento
AMTSD3	% 5 atık alçılı, % 3 atık mermer tozu ve % 3 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD6	% 5 atık alçılı, % 6 atık mermer tozu ve % 6 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD9	% 5 atık alçılı, % 9 atık mermer tozu ve % 9 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD12	% 5 atık alçılı, % 12 atık mermer tozu ve % 12 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD15	% 5 atık alçılı, % 15 atık mermer tozu ve % 15 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD20	% 5 atık alçılı, % 20 atık mermer tozu ve % 20 silis dumanı katkılı çimento
AMTSD25	% 5 atık alçılı, % 25 atık mermer tozu ve % 25 silis dumanı katkılı çimento
ASKİ	Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi
CEM I	Portland çimentosu
MT	Atık mermer tozu
SD	Silis dumanı
PÇ	Portland çimentosu
PÇ 42.5	% 5 doğal alçılı kontrol çimentosu
REF	Referans

Kısaltmalar	Açıklama
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
XRD	X-Işınları difraksiyonu

1. GİRİŞ

Hidrolik özellikli denilen su altında da sertleşebilme gösterecek bir bağlayıcı elde edebilmek üzere yapılan çalışmalar 1755 yılında başlamıştır. 1776 yılında, İngiltere’de, parlamento tarafından Cornwall sahiline yakın olan Eddystone deniz fenerinin tekrar inşasıyla görevlendirilen bir İngiliz mühendisi olan John Smeaton, birçok fırtınaya dayanması gereken bir yapı için bir miktar kireç ve puzolanik malzeme ile deneysel çalışmalar yaptı. Daha sonra birçok mühendis tarafından geliştirilerek devam eden bu çalışmalar sürecinde en önemli nokta ise, bir İngiliz inşaatçısı olan Joseph Aspdin’nin 1824 yılında Portland çimentosunu (PÇ) bulması ve kullanılmaya başlanmasıdır [1].

Türkiye’de Kurtuluş Savaşı’nın kazanılmasının ardından, uygulanan kapitülasyonların da kalkmasıyla ciddi bir sanayileşme sürecinin temelleri atıldı. Günümüz teknolojisinin gelişmesine paralel olarak çimento teknolojisi de gelişmektedir. Bu gelişmeler özellikle, standart dışı yeni çimento karışımları araştırma, geliştirme ve bunların standardizasyonu alanlarında olmaktadır. Bir taraftan basınç dayanımı yüksek, korozyona ve kimyasal etkilere dayanıklı, yoğunluğu düşük standart üstü çimentolar üretilmeye çalışılırken, diğer yandan, çevreyi kirleten birçok sanayi atığının katkı maddesi olarak kullanılmasını amaçlayan, fakat daha ucuza mal olan standart altı çimentoların üretilmesi üzerinde durulmaktadır [2].

Çimentoların üretiminde çeşitli endüstriyel atıklardan yararlanılması, üretim maliyetinin düşürülmesi, ürünün çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi ve hammadde kaynaklarından tasarruf sağlanması gibi amaçlara hizmet etmektedir. Bu malzemelerin çoğunluğunu puzolanik özeliğe sahip olanlar meydana getirmektedir. Bu amaçla kullanılan endüstriyel atıklar içinde en önemlileri silisyum metalinin veya ferro-silisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen silis dumanı, mermer fabrikalarında kesme işlemi sırasında açığa çıkan atık mermer tozu ve gübre sanayi atığı olan fosfojips gibi malzemelerdir [2].

Doğal puzolanlar, diatomit hariç olmak üzere volkanik kökenli malzemelerdir. Doğal puzolanlar, piroklastik kayalar (volkan tüfleri, tras, killi malzemeler ve zeolitli maddeler vb.), değişik orjinli maddeler (beyaz İtalyan toprakları) ve kırıntı taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip puzolanik maddeler, öğütülerek kullanıldığı gibi bazıları doğal olarak kullanılmaktadır [3].

Yapay puzolanlar, sanayi üretimi sırasında açığa çıkan malzemelerdir. Yapılarında doğal puzolanlardaki oksit bileşenler (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) içermelerinden dolayı yapay puzolan denilmiştir. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi malzemelerdir [4].

1997’de imzalanarak 2005’te yürürlüğe giren küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslar arası Kyoto protokolü sözleşmesine göre; “Çimento, demir-çelik ve kireç fabrikaları gibi yüksek enerji tüketen işletmelerde atık işlemleri yeniden düzenlenecek” yönergesi ile hem çevrede atık diye tabir edilen bu malzemelerin çevre kirliliğinin önlenmesi hem de atık malzemelerin çimentoda kullanılması ile betonda kullanılan en pahalı bileşenlerden biri olan çimentonun maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Çimentoların teknik özellikleri ve miktarı, betonun performansına (mukavemet, durabilite) ve ekonomisine önemli derecede etki etmektedir. Bu yüzden puzolanik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere betona katılmaktadır [5].

Çimento içerisinde yaygın olarak kullanılan mineral katkılar granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, toz halindeki kireç taşı, volkanik kökenli doğal camsı malzemeler, silis dumanı, atık mermer tozu, metakaolin ve doğal puzolanların muadili olan taşimsı volkanik tüflerdir. Böyle mineral katkıların çimentonun öğütölme safhasında kullanılması daha çok kabul görmüştür. Mineral katkılar yönünden bakıldığında ikame oranı % 0-30 arasında değişmektedir [6,7].

Puzolanik malzemelerin beton içerisinde kullanılması maliyeti düşürüp ekonomik olmakla birlikte betonun bazı özelliklerine etki ettiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Ana hatlarıyla puzolanik katkıları betonun aşağıdaki özelliklerine etki etmektedirler:

Çevre şartlarına karşı dayanıklılığı artırır,

Alkali-silika reaksiyonu riskini minimize etmek için çimento bileşenlerinin alkali seviyesini düşürür,

Harçların ve betonların erken basınç dayanımlarını artırır (karbonat ilavesi durumunda),

Taze harç ve betonun işlenebilirlik, pompalanabilme ve sıkıştırma özelliklerini iyileştirir,

Sertleşmiş betonun ileri yaşlardaki basınç dayanımını artırır,

Taze betonun terleme ve ayrışmasını azaltır,

Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır,

Karbonasyon ve sülfat direncini artırır,

Taze betonun kompaktitesini artırır,

Priz süresini uzatır,

Hidratasyon ıslığını düşürür,

Beton yapıların ömrünü uzatır [6-11].

Yukarıda betona etki eden puzolanların teknik avantajların yanında inşaat sektörüne sağladığı ekonomik ve çevresel faydaları da bulunmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir:

Çimentoya mineral katkı ilave edilmesi çimento üretimini artırır dolayısıyla her ton çimento üretimi için gerekli yakıt ve elektrik enerjisi ihtiyacını azaltır,

Çimento hammaddesinin korunumunu sağlar,

Çimento üretiminde maliyeti düşürür,

Atık malzeme olarak birçok ciddi çevresel ve yok etme problemine neden olabilecek endüstriyel ürünleri kullanarak bu sorunları ortadan kaldırır,

Atıkları faydalı bir şekilde zenginliğe dönüştürür,

Böyle endüstriyel atıkların bertaraf edilmesi için yapılacak masraftan tasarruf sağlar,
Çok ihtiyaç duyulan yapı malzemelerinin mevcudiyetini artırır,
Hava ve su kirliliğindeki azalmaya katkı sağlar,
Sera gazlarından kaynaklanan küresel ısınmayı azaltır [12].

Konumu itibarı ile hareketli bir tektonik kuşakta yer alan ülkemizde tüm jeolojik devirlere ait araziler ve kaya grupları bulunmaktadır. Bu yüzden yer altı kaynakları ve puzolanik özelliğe sahip olan doğal mineral katkı maddeleri bakımından ülkemiz oldukça zengindir. Türkiye'deki doğal puzolan yatakları hakkındaki etüt ve envanter çalışmaları 1935 yılında kurulan Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Tamamının rezerv miktarları belirlenmemiş olmakla birlikte, ülkemizdeki yedi coğrafi bölgenin tamamında önemli doğal puzolan kaynakları mevcuttur [13,14]. Ancak ülkemizde bu kaynakların politik ve ekonomik sebeplerden dolayı yeterince kullanıldığı söylenemez.

Silis dumanı (SD) puzolanik özelliklerinden dolayı çimento veya betonda kullanılan atık malzemelerin en etkili olanlarından biridir. SD mineral katkı olarak bilinmektedir. Genellikle harç ve beton üretiminde çimentonun ağırlık yüzdesi oranında, çimentonun bir kısmı yerine (ikame metodu) veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılmıştır.

Elektronik endüstrisinde silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars (SiO_2) kumunun kömür ve yaprak haline getirilmiş odunla elektrik ark fırınlarında yüksek sıcaklıklarda indirgenmesi sonucu çok büyük miktarı SiO'dan oluşan gazlar açığa çıkmaktadır. Fırınların soğuk kısımları olan üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf yapıya sahip SiO_2 durumuna dönüşen çok ince katı parçacıklara dönüşerek SD'nı oluşturmaktadır. SD çimentodan yaklaşık 100 kat daha ince bir yapıya sahiptir [15].

Mermer, metamorfizma olayı sonucunda kalker ve dolomitik kalkerlerin yeniden kristalleşmesiyle meydana gelmiş bileşimdir. Bileşimlerinin % 90-98'i CaCO_3 'ten

(Kalsiyum karbonat) oluşmaktadır. Düşük oranda $MgCO_3$ (Magnezyum karbonat) içermektedir. $CaCO_3$ kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral “Kalsit” tir. Aynı zamanda az miktarda silika, feldspat, demiroksit, mika, florin ve organik maddeler bulunabilir [16].

Atık mermer tozu (MT), en küçük boyutlu mermer atıkları olup mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi esnasında açığa çıkan ve büyük çoğunluğunun tane inceliği 1 mm'nin altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminin suyla yapılması nedeniyle bu atıklar direkt olarak suya karışır ve fosfojips halinde çöktürme havuzlarından veya kek olarak arıtma tesislerinde depolanır. Atıklar, değişik özelliklere sahip mermer tozlarından ve içine karışan yabancı maddelerden oluşmaktadır [17].

Yapılan çalışmalar MT'nin kimyasal analizi sonucunda CaO miktarının en az % 40'larda olduğunu göstermektedir. Bu da MT'nin çimentoya ya ikame şeklinde ya da katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin kanıtıdır. Örneğin Alyamaç ve İnce [36], kendiliğinden yerleşen betonda MT'yi filler malzemesi olarak kullanmıştır. Bir başka çalışma ise Aruntaş vd. [18], MT'yi kendiliğinden yerleşen betonda çimento ile belli oranlarda yer değiştirilerek kullanmış ve kendiliğinden yerleşen betonun maliyetini düşürdüğünden dolayı % 15-20 oranlarında MT'nin kullanılabileceğini belirtmişlerdir [19].

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristal suyu bulunan türüne jips ($CaSO_4 + 2H_2O$) denir. Klinkere % 3-5 arasında alçıtaşı ilavesi çimentonun priz başı ve bitişini kontrol altına almak içindir. Alçıtaşı miktarının azlığı kadar fazlalığının da priz süresinin çabuklaştırılmasında rolü vardır. Onun için belirli oranda ilavesi şarttır. Jips ham halde çimento sanayinde prizlenmeyi geciktirmek için her gün artan miktarlarda kullanılmaktadır [19]. Bu da inşaat sektörünü maliyet açısından daha ucuz, alçıya alternatif olabilecek bir malzeme arayışına yönlendirmiştir. Fosfojips, yaş metotla fosforik asit üreten fabrikalarda yan ürün olarak ele geçen önemli bir endüstriyel atıktır. Fosforik asit büyük oranda fosfatlı gübre üretimi endüstrisinde kullanılmaktadır Ancak bu asidin

yaş yöntem ile üretiminden yan ürün olarak, “sentetik ham alçı, fosfatlı alçı taşı, kimyasal alçı, fosfojips” gibi adlarla tanımlanan ürün açığa çıkmaktadır. Gübre sanayisinin temel girdisi olan, 1 ton fosforik asit üretiminde 5 ton fosfojips açığa çıkmaktadır. Türkiye’ de bu yolla yılda 3 milyon ton atığın elde edildiği hesaplanmıştır [20].

Bu çalışmanın amacı; fosfojips, atık mermer tozu ve silis dumanının çimento üretiminde birlikte kullanılabilirliğini araştırmaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu deneysel çalışmada kullanılan atık alçı, atık mermer tozu ve silis dumanı katkılı çimentoların özelliklerine geçmeden önce; kullanılan malzemelerin puzolanik özelliklerinin araştırılması, çimento içerisinde nasıl bir tepkimeye neden olacağının yorumlanması ve malzemelerin kimyasal-fiziksel özelliklerinin bilinmesinin faydalı olacağı düşünülmüştür.

2.1. Çimentolar

2.1.1. Çimentonun tanımı

Çimento; başlıca kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitlerini ihtiva eden hammaddelerin karıştırılarak sinterleşme sıcaklığına kadar döner fırında pişirilmesi ile elde edilen klinkerin (alçı ve bir veya daha fazla cins katkı maddesi ilavesiyle) öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır [21].

TS EN 197-1'e göre üretilen çimentolara CEM çimentosu adı verilmektedir. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler ve sınır değerleri Çizelge 2.1'de görülmektedir. Çimentolar; CEM I Portland Çimentosu, CEM II Portland Kompoze, CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu, CEM IV Puzolanlı Çimento ve CEM V Kompoze Çimento olarak ana sınıfa ayrılmıştır [22].

CEM çimentosunda, reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve reaktif silisyum oksit (SiO_2) oranlarının toplamı kütlece en az % 50 olmalıdır. Çimento içindeki magnezyum oksit (MgO) oranı % 0,1 ile % 4 arasında olması gerekir. Eğer magnezyum oksit (MgO) oranı % 5'ten fazla olursa taze veya nemli betonlarda aşırı genleşme meydana getirebilir. Betonun hacim genleşmesine etki eden diğer bir çimento bileşeni ise serbest kireçtir (CaO). Hacim genleşmesi, aylar bazen de birkaç yıl sürebilir [22].

Çizelge 2.1. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler [22]

Malzeme	Kısaltma	Sınırlamalar
PÇ klinkeri	K	$C_3S+C_2S \geq \% 66,7$ $CaO/SiO_2 \geq 2,0$ $MgO < \% 5$
Granüle yüksek fırın cürufu	S	Camsı faz miktarı $\geq \% 66,7$ $CaO+SiO_2+MgO \geq \% 66,7$ $(CaO+MgO) / SiO_2 > \% 66,7$
Doğal puzolan	P	Reaktif $SiO_2 \geq \% 25$
Silisli uçucu kül	V	$KK \leq \% 5$ Reaktif $CaO \leq \% 5$ Reaktif $SiO_2 \geq \% 25$
Kireçli uçucu kül	W	$\% 5 \leq \text{Reaktif } CaO \leq \% 15$ Reaktif $SiO_2 \geq \% 25$ KK $\leq \% 5$ Hacim genişlemesi $< 10\text{mm}$ Reaktif $CaO \leq \% 15$ $G \geq 10 \text{ N/mm}^2$ KK $\leq \% 5$ Hacim genişlemesi $< 10\text{mm}$
Pişirilmiş şeyl	T	$G_{28} \geq 25 \text{ N/mm}^2$ Hacim genişlemesi $< 10\text{mm}$
Kalker	L	$CaCO_3 \geq \% 75$ Kil miktarı $\leq 1,2 \text{ g/100 g}$ Organik madde miktarı $\leq 0,2$
Silis dumanı	D	$\% 5 \leq \text{Reaktif } CaO \leq \% 15$ Amorf $SiO_2 \geq \% 85$ KK $\leq \% 4$ Özgül yüzey (BET) $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$

Çimento kimyasal analizlerinde kızdırma kaybı ve çözünmeyen kalıntı sıkça rastlanan bir ifadedir. Kızdırma kaybı; ağırlığı önceden bilinen ($1 \pm 0,05 \text{ g}$) çimento numunesinin yüksek sıcaklıkta ($\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) kızdırılması sonucunda meydana gelen ağırlıkça % olarak ifade edilen kayba denir. Çözünmeyen kalıntı ise, çimento veya agreganın standartlarda öngörülen hidroklorik asit konsantrasyonu etkisinde kaldığı halde çözünmeyen kısmın oranıdır [23].

Bu kayıp çimento içindeki üretim esnasında bünyesine aldığı nem ve öğütme sırasında havadan aldığı karbondioksittir. Kızdırma kaybı çimento cinsine bağlı olmak üzere en fazla % 4 olmalıdır.

Genellikle çimento çeşitlerine veya tiplerine bağlı olarak çimentonun içinde az da olsa potasyum, fosfor, sodyum ve manganez gibi maddeler bulunmaktadır. Çimento içinde bulunan sodyum oksit ve potasyum oksit miktarları beton için tehlikeli

maddelerdir. Bu maddeler alkali-agrega reaksiyonu gibi beton için tehlikeli olan reaksiyonlar başlatan ana maddelerdir [22].

2.1.2. Çimentonun tarihçesi

Uygarlığın başlangıcından itibaren insanoğlu taş parçalarını yapıştırıp birleştirecek bir malzeme bulmaya çalışmıştır. Daha o zamanlarda böyle bir uygulamanın inşaatlara esneklik ve çok yönlülük kazandıracağı anlaşılmıştır. En eski malzemelerden olan “çamur” dünyanın çeşitli ülkelerinde saman ve bitkisel liflerle karıştırılıp duvar elemanlarının üretilmesinde ve bağlayıcılık özelliklerinin geliştirilmesinde hala kullanılmaktadır. Çimento, eski Mısırlılar tarafından piramitlerin yapımında kullanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar ise volkanik tüf (sünger taşı) ile kireci karıştırarak harç yapıp kullanmıştır ve böyle yapılan yapıtların çoğu bugün de ayaktadır. Bütün betonlar, genellikle su kemeri inşaatlarının duvarlarında, köprü kemerlerinde, set duvarlarında ve Romalılar devri boyunca inşaatlarda kullanılmıştır. Romalılar zamanında birçok su kemeri ve deniz yapıtları inşa etmiştir. Bunların bir kısmının hala ayakta olması kireç-puzolan harçlarının dayanıklılığının bir göstergesidir [24].

1976 yılında İngiliz James Parker, yakılarak toz haline getirilmiş killi kireç taşı yumrularından Roma Çimentosu adını verdiği hidrolik çimento elde etmiştir. Kireç taşı ve kilin yapay karışımını yakarak çimento elde etme girişimi, ilk olarak 19. yüzyıl başlarında Fransa’da Vicat tarafından denenip başarılı olunmasına rağmen çimento üretimindeki daha sonraki gelişmeler Fransa’da olmamıştır [24].

İngiliz duvar ustası olan Joseph Aspdin, 1824 yılında killi bir kireç taşının kalsinasyonu ile yapay çimento üretimi patentini almış ve bu Portland çimentosu’nun başlangıcı olmuştur. Bu ürüne Portland ismini vermesine sebep ise İngiltere’de Portland Adası’nda çıkartılan ünlü yapı taşlarına benzemesidir [25]. Aspdin tarafından üretilen bağlayıcı, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugün kullanılan Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır. Kil ve kalker karışımı hammaddeyi yeterince yüksek

sıcaklıklara kadar pişirilip öğütülmesi sonucu çimento elde edilmesi, ilk olarak 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından gerçekleştirilmiştir [26].

Geçmişte yapılan araştırmalar neticesinde günümüzde en çok kullanılan Portland çimentosu ile yetinilmeyip; katkılı, puzolanlı değişik çimento tipleri ile ilgili AR-GE çalışmaları hızla devam etmektedir. Bu çalışmalar sadece kaliteli çimento arayışı ile sınırlandırılmayıp ekonomiklik, doğal çevrenin korunması ile ilgili konularda da araştırmalar sürmektedir [26].

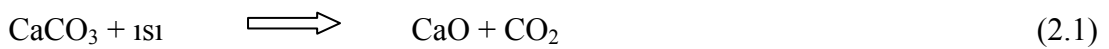
2.1.3. Çimento hammaddeleri

Kireçtaşı (kalker)

Yeraltı sularında travertenler şeklinde, deniz ya da tatlı sularda ise kimyasal organik veya mekanik çökeltme sonucu kalker yatakları oluşur. Oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere kalker üç ana grup altında toplanabilmektedir. Yaygın olarak oluşan kireçtaşlarının çoğu organik, kırıntılı ve kimyasal materyaller içermektedir.

Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) bulunan kayalara kalker ya da kireç taşı adı verilmektedir. Doğada saf halde bulunan tipine kalsit denir. Kalkerler doğada kalsit ve aragonit kristallerinden oluşmuş bir kayaç olarak bulunduğu gibi $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ şeklinde dolomit olarak da bulunur. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5 - 2,7 arasındadır [27-29].

Kireç, en az % 90 CaCO_3 içeren kireç taşının kireç fırınlarında 900-1000 °C'nin üzerinde kalsinasyonu sonucunda eşitlik 2.1'de kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir:



Kalsiyum oksit, su ile reaksiyonu girmesi sonucunda eşitlik 2.2’de ise sönmüş kireç meydana gelir [30].

Marn

Doğada bulunan, % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Yeryüzünde yaygın olarak bulunduğu için çimento hammaddesi olarak çok kullanılmaktadır. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğundan ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır [27-29]. Çimento üretiminde CaCO_3 ve kil miktarına göre kalkerden kile kadar olan karışım hammaddeleri Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi sınıflandırılmıştır [25].

Çizelge 2.2. CaCO_3 ve kil içeriklerine göre çimento hammaddelerinin sınıflandırılması [25]

Hammadde	CaCO_3 (%)	Kil (%)
Kalker	96-100	0-4
Marnlı kalker	90-96	4-10
Kalkerli marn	75-90	10-25
Marn	40-75	25-60
Killi marn	10-40	60-90
Marnlı kil	4-10	90-96
Kil	0-4	90-100

Kil

Çimento yapımında ikinci önemli hammadde kildir. Killerin içindeki ana maddeler alkali de içeren alüminyum silikat hidratlardır. Kilin içinde feldspat, kuvars, mika ve turmalin gibi maddeler bulunabilir. Kilin rengini içerisinde bulunan maddeler oluşturur. Kırmızı killerde demir oksit miktarı yüksektir. Mavimsi ve sarımsı killerde organik maddeler, sarı killerde alüminyum oksitleri bulunur. Kil mineralleri başlıca;

kaolen grubu, montmorillonit grubu, alkali ihtiva eden kil grubu gibi gruplara ayrılır [31,32].

2.1.4. Fiziksel özellikler

Hammaddenin inceliği

Tane büyüklüğü dağılımı (incelik), her fabrikaya göre değişik olup hammaddelerin özelliğine ve içindeki bileşenlere göre değişir. Genellikle farinin inceliği 90 μm elek üstü % 12, 200 μm % 2 civarında olması istenir. Kaba öğütülmüş farinde S.CaO miktarı yüksek olur. Yakıt tüketimi ve pişirme ısısı farin inceliğine bağlı olarak azalır. Hammadde ne kadar ince öğütülürse yüzey alanı o kadar büyür ve dolayısıyla da sinterlenir. Ancak gereğinden fazla ince öğütmek da fazla enerji kullanımını gerektireceğinden önerilmez [4].

Farinin homojenliği

Hammaddenin analizi sonunda birbirine karıştırılacak kalsiyum karbonat ve kil miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir. Hammaddelerin uygun oranlarda karışımını hem daha hassas yapabilmek, hem de bu maddeleri fırında daha iyi ve üniform pişirilmesini sağlayabilmek için hammaddeler pişirilmeden önce ince olarak öğütülür ve elde edilen bu malzemeye farin denir. Farin, ekseni etrafında yavaşça döndüğü için “döner fırın” adı verilen ve yaklaşık % 3-4 eğimle yatay olarak yerleştirilmiş silindir şeklindeki fırınlarda 1350-1450 °C civarında pişirilir. Fırın içerisinde pişirilen hammaddeler, uygulanan sıcaklığın etkisiyle kimyasal olaylar sonucunda klinker denilen ürünü oluşturur [33].

Elde edilen bu fırın malzemesinin iyi homojenize edilmesi ana üretim birimlerinin ekonomik çalışmasını da etkiler. Homojenleştirme, çimento üretiminde klinker ve çimento kalitesinin büyük ölçüde etkileyen en önemli aşamadır. Fırına verilen farinin % CaCO_3 cinsinden titrasyonunun $\pm 0,22$ 'den fazla olmaması gerekir [30]. CaCO_3 miktarının % 1'lik artışı C3S'in % 13'lük artışına C_2S 'i de % 11,5 azalmasına neden

olur. Fırın homojen olmayan farinle beslendiğinde klinker kalitesi bozulacağı gibi, pişirme sırasında da sorunlar ortaya çıkmaktadır [26].

Çimentonun inceliği

İncelik çimentonun önemli bir özelliğidir. Çimentoya aktivite kazandıran husus onun ince olarak öğütülmesidir. Çimento ne kadar ince ise dayanımı o kadar yüksek olur. PÇ 42.5 ile PÇ 52.5 çimentoları ince öğütülmüş çimentolardır. Bu incelik hidrasyon ısını yükselten bir diğer faktör olmaktadır. CEM IV ve CEM V çimentolarında da kolay öğütülebilen bazı doğal puzolanlar kullanıldığında incelik fazlaşır. Ancak bu ince bölüm, öğütülmüş klinker gibi aktivitesi belirgin olan bir bölüm değildir, yani hidrasyon ısını yükseltmesinde fazla etkinliği yoktur. Bunlar çimentonun su tutma, su kuma ve erken rötre kapasitesi üzerinde negatif etki meydana getirir. İncelik ‘Blaine özgül yüzeyi’ büyüklüğü ile nicelendirilir. Hava geçirgenliği ölçülerek saptanan bu büyüklük, bir gram çimentodaki tanelerin yüzeylerinin toplamı olarak tanımlanır (cm^2/g ve m^2/kg). Çimentolar da bu değer 3000 - 4000 cm^2/g arasında değerler alır [34].

TS EN 197-1’e göre çimento inceliği 90 μm elek üstü maks. % 1 olarak sınırlandırılmıştır. Ancak katkı çimentolarda incelik 90 μm elek üstünde % 0,4 civarında tutulması mukavemet sonuçlarını olumlu yönde etkilemektedir. Çimento inceliği, çimentoda istenilen mukavemetleri verecek kadar ince, çimento değirmeni çimento kapasitesini düşürmeyecek kadar yüksek değerde tutulmalıdır [4].

2.1.5. Çimento hammaddelerindeki bileşenler

Magnezyum oksit (MgO)

MgO , kalkerde dolomit halinde bulunur (CaCO_3 , MgCO_3). Esas klinker fazlarında % 2 ağırlığına kadar bağlı haldedir. Bundan fazlası klinkerde serbest MgO (periklas) halinde bulunur. Periklas, su ile $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ’ye dönüşür ancak diğer donma reaksiyonları bitmişse bu reaksiyon çok yavaş gerçekleşir. $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgO ’dan daha

büyük hacim kapladığı ve periklas tanelerinin bulunduğu yerde olduğu için betonda genleşme çatlaklarının oluşmasına neden olabilir [26]. Dolayısıyla çimentonun içerisindeki MgO oranı belirli sınır değerleri içerisinde olmalıdır.

Alkaliler

K_2O ve Na_2O esas olarak kil ve marnlı maddelerden gelirler. Bu bileşikler; feldspat, mika ve illit tanecikleri arasında dağılmışlardır. Küçük bir kısmı da katı yakıt maddeleri (kömür) küllerinde bulunur. Döner fırında hammaddenin pişirilmesi sırasında sinter bölgesinde alkalilerin bir kısmı buharlaşır ve alkali devresini harekete geçirir. Betonun belli ilave maddelerinin içinde alkalilere karşı hassas olan maddeler bulunur. Örneğin; opal (hidrate silis) çimento alkalileriyle reaksiyona girer ve uygun olmayan durumlarda genleşme olayına sebep olur. Bu yüzden elde bulunan hammaddelerden pişirilen klinkerin içindeki alkali miktarının uygun sınırı aştığı durumlarda, ön ısıtmadan önce uçucu alkalilerin bir kısmının fırın gazları ile birlikte by-pass ile uzaklaştırılması gerekir [26].

Kükürt (S)

Kükürt, hemen hemen tüm çimento hammaddelerinin içinde bulunur. Yakıtın ve farinin kükürdünden yanma ve buharlaşma sonucunda sinter bölgesinde gaz halinde SO_2 oluşur. Bu fırın gazından buharlaşmış alkali ile oksijen alıp, buhar halindeki alkali sülfata dönüşür. Alkali sülfat, daha soğuk fırın bölgelerinde ve ön ısıtıcıda pişecek maddenin üzerinde yoğunlaşır ve az bir kısmı tozla birlikte uçan alkali sülfat, pişecek madde ile sinter bölgesine dönerken, zor uçucu olması nedeniyle klinker içinde fırından çıkar. Eğer bütün alkalileri bağlamak için yeterli miktarda SO_2 yoksa, o zaman ortamda uçucu alkali karbonatları veya yüksek alkali klorürleri devresi başlar. Klinker fazlarına bağlı olmadıkları sürece alkali karbonatları, sinter bölgesinde yeniden buharlaşabilirler. SO_2 fazla olursa daha ön ısıtıcıdayken $CaCO_3$ ile reaksiyona girer ve fırına $CaSO_4$ olarak geri döner. Sinter bölgesinde tekrar ayrışarak fırın gazının SO_2 devresini büyütür [26].

Klorürler

Çimentonun ham maddesinde klorür miktarı genel olarak ağırlıkça % 0,01-0,1 arasında değişmektedir. Bu değer çok nadir olarak % 0,03'ü aşar. Klorürler, döner fırında alkalilerle reaksiyona girer, fırın gazı ile sürüklenir ve ön ısıtıcı da biriken alkali klorürler oluşur. Bunlar pişirilerek ham madde ile fırına geri dönerler, ancak alkali sülfatlardan farklı olarak sinter bölgesinde tamamen buharlaşırlar. Alkali klorürler, fırın ön ısıtıcısında kantitatif olarak birikirler ve sinter bölgesi ile ön ısıtıcı arasında fırın duruşuna kadar devrederler. Bu da fırın da oldukça büyük problemlere yol açar. Böylesi problemlerden korunmak amacıyla fırın gazlarının % 10-25 kadar miktarı ön ısıtıcıya girmeden by-pass edilir. Tecrübelerle göre farinde aşağı yukarı % 0,015 klorür bulunuyorsa by-pass gereklidir [26].

Florürler

Çimento hammaddelerinde % 0,3-0,8 arasında mevcuttur. Klorürlerin aksine florürlerin fazlaca uçarlılık özellikleri dolayısıyla fırın sisteminde zararlı devreler oluşturmazlar [26].

Fosfor

Genellikle doğal çimento hammaddesi içinde fosfor miktarı çok azdır. Eğer fosforca zengin malzemelerin işlenmesi gerekirse fosfor miktarı klinkerde % 2,5 olarak ayarlanmaktadır. Bu durumlarda % 0,5 fazla olan P_2O_5 miktarı bilhassa başlangıç mukavemetinde düşürücü etki gösterir [26].

Kızdırma kaybı

Kızdırma kaybı, su ve karbondioksitten oluşur. En basit şekliyle, su kısmen ilave edilen alçı taşından gelen $CaSO_4$, kısmen de serbest kirecin bir kısmına $Ca(OH)_2$ olarak bağlanmıştır. Serbest veya bağlı kirecin öğütme sırasındaki kısmi karbonizasyonuna bağlı olarak CO_2 miktarı az olabilir. CO_2 'nin başka bir kaynağı da

ilave edilen alçı taşından mevcut olabilecek CaCO_3 'ten ileri gelebilir. Bu durumda, LSF (kireç doygunluk faktörü) hesaplamaları gerçek rakamdan % 2 kadar yüksek çıkabilir. Çünkü burada CaCO_3 'ten oluşan CaO bağlı kireç gibi değerlendirilir. Havalandırılmış çimentoda genellikle suyun içinde eser miktarda kalsiyum alüminat ve silikat hidratlara bağlı hidratasyon suyu bulunur. Çimento komponentlerinin CO_2 bağlaması nedeniyle de CO_2 oranı yükselebilir [26].

2.1.6. Çimentolarda karmaşık bileşikler

PÇ, kalkerli ve killi hammaddelerin döner fırınlarda pişirilmesi sonucunda elde edilen klinkere, az miktar alçı ilave edilerek 0,5 - 80 μm boyutlarında öğütülmesi suretiyle elde edilir. Kimyasal açıdan ana bileşenlerini, kristal yapıdaki kalsiyum silikatlar ve alüminatlar oluşturur.

Döner fırına verilen hammadde karışımı, esas olarak kireç, silika, alümina ve demir oksitten meydana gelir. Bu oksitler, yüksek sıcaklıkta birbirleriyle reaksiyona girerek daha kompleks bileşikler oluştururlar [35].

Portland çimentosunda dört ana bileşik bulunur. Bunlar:

- | | | |
|--|-------|-----------------------------------|
| 1- C_3S ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) | ————→ | Trikalsiyum silikat |
| 2- C_2S ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), | ————→ | Dikalsiyum silikat |
| 3- C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) | ————→ | Trikalsiyum alüminat |
| 4- C_4AF ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) | ————→ | Tetrakalsiyum alüminoferrit [30]. |

C_3S ve C_2S çimentonun dayanımına etki eden bileşiklerdir. Bunlardan C_3S , çimentoya ilk dayanımını kazandırır. C_2S ise son dayanıma etki eder. C_2S 'nin ilk dayanıma etkisi azdır ve hidratasyon ısı C_3S 'ten daha düşüktür. Hidratasyon sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksit, C_3S 'e göre üç defa daha azdır. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin teşekkülü iki bakımdan önemlidir. Bu madde suda eriyebilir. Bu bakımdan yapı devamlı su içinde bulunuyorsa buradaki beton, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin devamlı bir şekilde erimesi sonunda gittikçe boşluklu bir hal alacak ve bir müddet sonra mukavemetin

azalması ile parçalanacaktır. Yani Ca(OH)_2 'nin teşekkül etmesi çimentonun kimyasal mukavemetinin düşük olmasına neden olacaktır. Diğer sakıncası Ca(OH)_2 'nin mekanik mukavemetinin düşük olmasıdır. Yüksek bir C_3S yüzdesi, ilk dayanımın yüksek olmasını ve düşük bir C_2S yüzdesi de yüksek ısı yayılmasını sağlar. Bunun karşısı ise dayanımının ağır artmasına ve düşük düzeyde ısı yayılmasına neden olur [4].

C_3A , çimentodaki hidratasyonu en hızlı olan bileşiktir. Hidratasyon ısısı en yüksektir. C_3A aynı miktardaki diğer bileşiklerden daha fazla ısı meydana getirir. Kısa zamanda priz ve sertleşme yapar. Kimyasal etkili agresif sulara dayanıklı değildir. Sülfatlı sularda ve sülfatlı zeminlerde C_3A yüzdesi yüksek çimentoların kullanılması sakıncalıdır. Bu çimentoda C_3A oranı, maks. % 5 ile sınırlandırılmıştır [4].

C_4AF , çimentonun erken dayanımına etki eder. C_3A 'ya yakın hızda hidratasyon yapar ve hidratasyonda yüksek ısı meydana getirir. MgO , pişirme esnasında başka maddelerle birleşmez. Klinkerin hızlı soğutulması sonucunda amorf bir yapı oluşturduğu için önemli bir sakınca oluşturmaz. Fakat yavaş soğutmada kristal hale geçer ve varlığı hacim artışına neden olur [4].

Çizelge 2.3. Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi ve ana bileşen miktar [36]

Oksit	Çimento kimyasındaki karşılığı	Oksijen miktarı (%)	Ana bileşen miktarı (%)
CaO	C	63,6	
SiO_2	S	20,7	$\text{C}_3\text{S}=51,9$
Al_2O_3	A	6,0	$\text{C}_2\text{S}=20,4$
Fe_2O_3	F	2,4	$\text{C}_3\text{A}=11,8$
SO_3	$\bar{\text{S}}$	2,1	$\text{C}_4\text{AF}=7,3$
MgO	M	2,6	
Na_2O	N	0,1	
K_2O	K	0,9	
Serbest CaO	-	1,4	
Cr	-	0,1	
Çözünmeyen kalıntı	Ç.K.	0,2	
Kızdırma kaybı	K.K.	1,4	

2.1.7. Çimentonun hidratasyonu

Hidratasyon, genel anlamda bir maddenin su ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan reaksiyon olarak tanımlanır [37,38]. Diğer bir ifade ile anhidro kristallerin hidrate kristallere dönüşümüdür.

Portland çimentosunun hidratasyonu ise, anhidrate kalsiyum silikat ve alüminat fazlarının hidrate olmuş ürünler oluşturmak için, su ile reaksiyona girmelerini kapsamaktadır [37]. Bu katı hidratlar anhidrate taneciklerden daha fazla yer kaplar ve sonuçta katı ve iç içe geçmiş bir kütle oluştururlar ki bunun porozitesi orijinal karışımın s/ç oranının bir fonksiyonudur.

Çimentonun hidratasyonu sonucunda suda çözünmeyen ve hidrolik bağlayıcı özelliği taşıyan sert bir madde oluşur. Bu proses priz (katılaşma) ve sertleşme şeklinde iki kademedede gerçekleşir. Çimento hamuru ilk önce priz alarak katılaşır ancak, henüz yeterli dayanıma sahip değildir. Daha sonra oluşan sertleşme kademesiyle dayanımda önemli ölçüde artış gerçekleşir. Priz zamanı klinker mineralojisi (özellikle serbest kireç oranı), klinker kimyası ve inceliğin bir fonksiyonudur. Genellikle çimentonun ince olması ve kireç seviyesinin yüksek olması daha kısa priz süresi anlamına gelir. Çimentonun hidratasyonu, tanelerin (1-200 μm) yüzeyinden merkeze doğru ilerleyerek gelişmektedir. Buna göre hidratasyonun suyun çimento taneleri etrafındaki hidrate tabaka boyunca difüzyonlanması şeklinde gerçekleştiği düşünülür [38].

Çimento ve su arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda sert ve katı bir kütle meydana gelir. Çimentonun katı bir kütle haline dönüşümü, aşağıda verilen reaksiyonlardan sonra gerçekleşmektedir:

1. Kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon ve hidroliz),
2. Çözünme ve kristalizasyon reaksiyonları,
3. Matrisdeki reaksiyonlar.

Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento hidratasyon reaksiyonları sırasında su içinde yavaş yavaş çözünür. Çözünme katı taneciklerin yüzeylerinde meydana gelir ve çözünen bileşikler hemen hidrate hale gelerek tane yüzeyini jel halinde kaplarlar. Böylece, henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Diğer taraftan, çözeltiliye geçmiş olan klinker bileşikleri de çözeltili içinde doymuş hale gelerek, çözünme hızının yavaşlamasına yol açar. Bu etkiler hidratasyon hızının zamanla azalmasına neden olur [38].

Çimento bileşenlerinin tam olarak hidrate olması için uzun sürenin geçmesi gereklidir. Örneğin, hidratasyonun 28. gününde tanecik yüzeyinde hidratasyonun taneciğin içine işleme derinliği ancak 4 mikron kadardır. Bu derinlik bir yıl sonra 8 mikrona ulaşabilir. Çimento taneciklerinin ortalama 50 mikron olduğu düşünülürse, böyle bir büyüklüğe sahip taneciğin tam olarak hidrate olabilmesi için yaklaşık 5 yılın geçmesi gereklidir. Ancak, tanecik boyutunun daha küçük olması halinde bu süre daha da kısalabilir. Çimentonun hidratasyon reaksiyonları arasında özellikle alüminat (C_3A) ve alitin (C_3S) hidratasyonları önemlidir. Belit (C_2S) ve alit benzer şekilde hidrate olur. Ferrit (C_4AF) ise fazla hidrolik nitelik taşımaz [38].

Portland çimentosu hidratasyonu ekzotermik reaksiyonları kapsar ve ısı açığa çıkarır. Reaksiyonların ilerleyişi, sabit sıcaklıklı iletim ısı ölçüm tekniği kullanılarak izlenebilir [39]. Çimento hidratasyon ısısı (ilk 48 saat boyunca) ince öğütülmüş yüksek oranda C_3S (>%60) ve yüksek oranda C_3A (>%10) içeren çimentolar için en yüksektir [37].

Diğer bir ifadeyle, ayrılan ısı miktarı çimento tipine ve katkıların oranına bağlı olarak değişir. Değişik tipteki Portland çimentoları içerisinde, klinker bileşiklerinin oranları da birbirinden farklıdır. Bu durum, söz konusu çimentoların hidratasyon ısılarının da farklı olmasına neden olur.

Örneğin, ASTM’de yer alan Tip III çimentosu en yüksek hidratasyon ısıasına; Tip IV çimentosu da en düşük hidratasyon ısıasına sahiptir. Hidratasyon ısıları arasındaki farklılık, çimentoların kimyasal faz bileşimi ile ilgilidir. Tip III çimentosunun en

yüksek hidratasyon ısısına sahip olmasının nedeni, hidratasyon sırasında en aktif bileşenler olan alit ve alüminatın fazla miktarda (alit % 57-alüminat % 11) olmasıdır. Buna karşılık, Tip IV çimentosu ise, hidrolik aktivitesi yüksek olan alit ve alüminat bileşenlerinden az miktarda içermekte, dolayısıyla diğer çimentoya kıyasla daha düşük hidratasyon ısısına sahip olmaktadır [37].

Isı çıkışı soğuk havalarda ve ısı artışının mukavemet artışını ve üretim işlemini hızlandırdığı prekast betonlarda bir avantajdır. Bununla birlikte kütle betonlarda betonun merkezi (çekirdeği) ile yüzeyi arasındaki ısı farkı termal çatlaklarla sonuçlanacak gerilmeler üretebilir [37].

Çimentoda sertleşme sırasında ısı ayrılması 1 ila 3 günde maksimum düzeyde olur. Daha sonra azalan bir hızda devam eder. Portland çimentosunun hidratasyonu kendini oluşturan bileşenlerinkine göre çok daha komplekstir [37]. Portland çimentosunun hidratasyonu hakkında genel bilgiler verildikten sonra, oldukça kompleks olan hidratasyon olayının daha iyi anlaşılabilmesi için, silikat fazların (C_3S ve C_2S) ve alüminat fazların (C_3A ve C_4AF) hidratasyonlarını ayrı ayrı ele almak daha uygun olacaktır.

C_3S ve C_2S 'in hidratasyonu

C_3S ve C_2S 'in her ikisi de C-S-H jeli diye bilinen amorf (belirli bir şekli olmayan) kalsiyum silikat hidrat oluşturmak için su ile reaksiyona girerler. C-S H jelleri beton içerisindeki kum ve agregaları bir birine bağlayan yapıştırıcıdır. Reaksiyonlar Çizelge 2.4'te özetlenmiştir [37].

C_3S , C_2S 'den çok daha reaktiftir. 20 °C'lik standart sıcaklık koşulları altında tipik bir çimentoda mevcut C_3S 'in 3 günde hemen hemen yarısı, 28 günde ise % 80'ni hidrate olacaktır. Bunun aksine C_2S 'in hidratasyonu hemen hemen 14 güne kadar başlamaktadır.

Çizelge 2.4. Kalsiyum silikatların hidratasyonu [37]

Mineral	Reaksiyon oranı	Reaksiyon ürünleri
C ₃ S	Orta	C-S-H (Ca/Si ≈ 1,7 CH)
C ₂ S	Yavaş	C-S-H (Ca/Si ≈ 1,7 Az miktarda CH)

C₃S ve C₂S'in her ikisi tarafından üretilen C-S-H jelleri, yaklaşık 1,7 gibi tipik bir Ca/Si oranına sahiptir. Bu oran C₃S'teki 3/1'lik orandan oldukça düşüktür. Fazla CaCH kristalleri olarak çökelmektedir. C₂S'in hidratasyonu da bir miktar CH oluşumuna neden olmaktadır. Aşağıdaki denklemler hidratasyon reaksiyonlarını yaklaşık olarak özetlemektedir [37]:



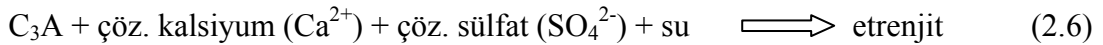
C₃S'in hidratasyonunun önemli bir özelliği, ilk karıştırmada su ile reaksiyona başlaması ve daha sonra reaksiyonların ertelendiği bir periyoda geçmesidir. Reaksiyonların ertelendiği bu süreç, uygulamada oldukça önemlidir. Çünkü bu durum betonun sertleşmeye başlamadan önce yerleştirilmesine ve sıkıştırılmasına imkân sağlar. Bu bekleme periyodunu açıklamak için birçok teori geliştirilmiştir. Bunlardan en ünlüsüne göre, başlangıçtaki reaksiyon C₃S'in yüzeyinde koruyucu bir C-S-H tabakası oluşturmaktadır ve bu C-S-H tabakası tahrip olduğunda veya yaşlanmayla veya yapı değişikliği ile daha geçirgen bir hale geldiğinde, bu bekleme periyodu son bulur [37].

Bir elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde büyük C₃S ve C₂S tanecikleri etrafında oluşan C-S-H jelinin oldukça yoğun ve özelliği olmayan bir görüntüsünün olduğu görülmektedir. Bu malzemeler başlangıçta anhidrate malzemeler üzerinde bir reaksiyon çerçevesi oluşturur, fakat hidratasyon ilerledikçe susuz malzemeler tedricen yer değiştirir ve sadece çok iri parçalar (30 mikrondan daha büyük) yıllar

süren hidrasyondan sonra bile, reaksiyona girmemiş bir çekirdek olarak kalacaklardır. Bu yoğun hidrasyon dâhili ürün olarak bilinmektedir [37].

C₃A ve C₄AF'nin hidrasyonu

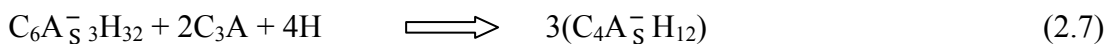
Laboratuarda hazırlanan C₃A ve C₄AF'in su ile yaptığı reaksiyonlar (kalsiyum sülfat ve kalsiyum hidroksitin olduğu ve olmadığı durumlarda) üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır [40]. Bulgular dikkatlice yorumlandığında endüstriyel klinker içerisindeki alüminat fazların, sentetik olarak hazırlanan klinkerlerden çok farklılık gösterdiği ve çimento hidrasyonunun önemli miktardaki reaktif silikadan ve alkali mevcudiyetinden, oldukça güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir. Çözünabilir kalsiyum sülfatın bulunmadığı durumlarda C₃A müteakiben C₂AH₆ 'ya dönüştürmek üzere C₂AH₈ ve C₄AH₁₉ oluşturur. Eğer son olarak suyla karıştırılmadan önce alçı (CsH₂ veya Cs^{1/2}H) C₃A ile öğütülürse, başlangıç reaksiyonları C₃A kristalleri yüzeyinde oluşan bir koruyucu etrenjit tabakası ile kontrol edilir. Reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenebilir [37]:



Alçının susuz halinin daha hızlı çözünmesi, yeterli miktarda çözünmüş kalsiyum ve sülfat iyonları sağlar ve son olarak bölünen veya oldukça reaktif olan C₃A formlarının reaksiyonlarının kontrolünde oldukça etkili olacaktır.

Birçok ticari Portland çimentosunda, etrenjit oluşumunu sürdürecekt sülfat mevcut değildir. Mevcut sülfat tüketildiği zaman etrenjit, monosülfat diye bilinen ve daha az SO₃ içeren bir fazını oluşturmak üzere C₃A ile reaksiyona girer [40].

Bu reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenebilir.



2.2. Puzolanlar ve Puzolanik Tepkimeler

2.2.1. Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan veya çok az olan ancak ince öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve rutubetli ortamda çimento hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan sönmüş kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşikler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır [5, 37, 41, 42]. Diğer bir ifade ile puzolan kalsiyum hidroksit veya açığa kalsiyum hidroksit çıkaran (Portland çimentosu klinkeri gibi) malzemelerle karıştırıldığında su içinde sertleşebilen doğal ve yapay tüm inorganik malzemeleri kapsamaktadır [42]. Ancak bu, tüm silisli ve alüminli malzemelerin puzolan olduğu anlamına gelmez [13].

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir [13]. Puzolan ismi birbirinden farklı volkanik kökenli ürünler için kullanılmaktadır. Puzolanlar esas olarak silika ve alüminden meydana gelirler ki, bu da onlara asit karakteri ile kireç ve alkalilerle kuvvetli bir birleşme eğilimi verir. Onlar aslında çok küçük boşluklardan meydana gelen camsı ürünlerdir ve bu nedenle büyük yüzey alanlarına sahiptirler. Kristal fazları sınırlıdır ve meydana geldikleri magmanın özelliklerini taşırlar [43].

2.2.2. Puzolanların sınıflandırılması

En yaygın kabul gören sınıflandırma sistemi, puzolanların kökenlerini esas alan sınıflandırma sistemidir. Bu sistemde puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki genel gruba ayrılmaktadırlar [43].

Doğal puzolanlar öğütmenin dışında bir işlem gerektirmezler. Yapay puzolanlar ise orijinalinde hiç veya çok az puzolanik özelliğe sahip malzemelerin kimyasal ve/veya

yapısal modifikasyonlarının bir sonucudur. Yapay puzolanlar ya belirli üretim metotlarının kalıntısıdır ya da seçilmiş hammaddelerden özel olarak üretilirler [43].

Doğada bol miktarda bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısı işlem görmüş killer ve şeyller ve diatomlu topraklar doğal puzolanlar içerisinde yer alan puzolanlardır. Diatomit hariç bütün doğal puzolanlar volkanik kaynaklıdır [44].

Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler ise yapay puzolanlar arasında yer alırlar.

2.2.3. Puzolanik aktivite ve puzolanik reaksiyon

Puzolanik aktivite terimi, puzolanların aktif bileşenleri ile kireç ve su arasında meydana gelen tüm reaksiyonları kapsar [45]. Diğer bir ifade ile puzolanik aktivite; puzolanların bir takım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle rutubetli ortamda reaksiyona girme ve sertleşme kapasiteleridir. Puzolanik aktivite aynı zamanda; puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği ve ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği olarak da ifade edilebilir [38]. Bir yapay puzolanı değerlendirmek ve kullanmak için, onun puzolanik aktivitesini belirlemek esastır [45].

Puzolanik aktivite; bir takım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) sulu ortamda reaksiyona girme ve sertleşme kapasitesidir. Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu amprik olarak belirlenmiştir [4]:

- Yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı,
- Yüksek camsı faz yüzeyi,
- Büyük özgül yüzey.

Çizelge 2.5. ASTM C 618'e göre doğal puzolanlara ait sınırlamalar [46]

Oksit miktarı (%)		F Sınıfı	C Sınıfı	N Sınıfı
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Min.	>70	>50	>70
SO ₃	Max.	<5	<5	<4
Kızdırma kaybı	Max.	<12	<6	<10
Suda çözünebilen alkaliler	Max.	<1,5	<1,5	<1,5

2.2.4. Puzolanik katkıların beton özelliklerine etkileri

Puzolanlar, beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oranın % 15 - % 45 arasında olduğu yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Kaliteli puzolanlar, optimum ölçülerde kullanıldıklarında betonda;

- Traslı çimentolarda, beton dökümü esnasında hâsıl olan hidrasyon ısı düşüktür. Bu nedenle su buharlaşması çok az olduğundan, hidrasyon olayı çok daha iyi ve yavaş gerçekleşir, bu da betonun suyunun ani kaybolmasını önler [47].
- Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır, puzolan malzemeler çimentodan çok daha ince olduklarından dolayı taze betonun kompazitesini arttırırlar, yani harç içerisindeki boşlukları doldururlar. Bu da daha boşluksuz beton üretimini sağlamaktadır [47].
- Betonun çatlamasını önler. Beton prizini alırken kalsiyum silikatlara dönüşmeyip açıkta kalan bir miktar sönmüş kireç (Ca(OH)₂), havadan CO₂ olarak CaCO₃'e dönüşmektedir. Bu esnada hacim büzülerek azaldığı için yüzeyde çatlaklar oluşur. Bu durum Portland çimentoları içindir. Traslı çimentolarda ise, Tras serbest Ca(OH)₂ ile birleşerek yeni bileşim oluşturur ve buradaki karbonatlaşmayı önler. Bu da çatlamaları önlemektedir [47].
- Traslı çimento betonunda C-S-H fazla oranda oluşur ve bu bileşenin sıkı yapısından dolayı betonun geçirimsizlik özelliğini artırır (İngiltere de Portlandlı çimento ile inşa edilen bir barajda mikro çatlaklar görülmüş, ancak traslı çimento ile inşa edilen diğer bir barajda bu gibi çatlaklıkların oluşmadığı görülmüştür) [47].

- Traslı çimentolarda trikalsiyum alüminat miktarı az olduğundan, beton sülfatlı sulara ve bileşimlere daha dirençli olur [47].
- Normal Portland çimentolu betonlarda harcın içine klor sızarak demirlere ulaşır. Bu da demirin korozyona uğramasına sebebiyet vermektedir. Traslı çimento kullanıldığında, trasın aktif silisinin oluşturduğu C-S-H geçirimsizlik sağladığından klor sızarak demirlere yetişememekte ve bundan dolayı korozyon olayı da önlenmiş olmaktadır (1 kg CaO, 1.07 kg SiO₂ bağlar (CaSiO₂)) [47,48].
- En önemli husus, çimento üretim maliyetini düşürmesidir. Çünkü tras veya diğer puzolanlar, yakılmadan sadece öğütülme masraflarıyla klinkere katılmaktadır. Bunların katılma nispeti % 20-30'a yükselince, çimento miktarı bu oranda azalmaktadır. Türkiye gibi ısıtma enerjisinin pahalı olduğu bir ülkede çimento maliyetini de bu oranda düşürmektedir [47].
- Puzolanlar, fazla kullanıldıkları zaman zararlı da olabilirler.

Bu durumda;

- Su ihtiyacını arttırmazlar,
- Donma ve çözünmeye karşı direnci düşürürler,
- Sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltırlar,
- Kuruma büzülmesini arttırmazlar [47].

2.3. Silis Dumanı (SD)

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 SD parçacıkları

olarak elde edilmektedir [49]. Kaynakları ne olursa olsun puzolanların esas silistir [50].

SD, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 μm 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO_2) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür [47].

2.3.1. Silis dumanının tarihçesi

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak elde edilen SD'nin değerlendirilmesi konusunda ilk çalışma 1952'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Bu konudaki uygulama ve çalışmalar daha ziyade İskandinav ülkelerinde 1980'li yıllara kadar yavaş gelişmiştir. 1983 yılında yapılan uçucu kül, SD ve cüruf gibi yan ürünlerin betonda kullanımını konu alan uluslararası konferanslar dizisi büyük bir ilgi görmüş ve 1992 yılında yapılan konferans İstanbul'da gerçekleşmiştir [51].

2.3.2. Silis dumanının çimento ve betona etkileri

- SD, puzolanik özelliğinden dolayı çimento ve betonda en yaygın kullanılan endüstriyel atıklardan biridir [52].
- Çimentodan 100 kat daha ince bir malzeme olan SD çimento hamuru içindeki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurur, betonun geçirimsizliğini artırır, dolayısıyla beton içerisindeki alkali reaksiyonların oluşumunu ve sülfatın oluşumunu engeller.
- Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirerek mukavemeti artırır.
- İçerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon üzerinden kalsiyum hidroksiti Ca(OH)_2 bağlayarak betonun durabilitesini artırır [17].

- SD ince olması nedeniyle betonun su kusmasını azaltır [17].
- SD aşırı ince parçalara ve yüksek reaktiviteye sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip (≥ 100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanıma sahip beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır [53].

2.3.3. Silis dumanı üretimi

SD, ferrokrom tesislerinin atık malzemesi olup, bağlayıcılığı, erken ve nihai dayanıma katkısı, hafifliği, inceliği gibi üstün özellikleri sayesinde atık bir malzeme olmaktan çıkıp çimentodan kat kat pahalı bir madde olmuştur. Türkiye'de Antalya Ferrokrom ve Elazığ Ferrokrom Tesisleri'nden elde edilebilir. Atık bir malzeme iken fiyatının bu derece artmasının sebebi arz talep dengesizliğidir. Bir kaç sene sonrasının atığı önceden satılmaktadır. Etibank Elektrometalurji Antalya Ferrokrom Tesisleri'nde 2011-2012 yıllarında aylık elde edilen SD miktarı ortalama 35-40 ton arasındadır. İlerleyen yıllarda ferrokrom üretiminin kademeli olarak artırılması planlanırken atık miktarının da 2-3 katına çıkacağı öngörülmektedir [54].

2.4. Mermerin Tanımı

Bilimsel anlamda, hakiki mermer "kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomitik kireçtaşlarının [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] ısı ve basınç altında metamorfizmaya uğrayarak, yeniden kristalleşmesi sonucunda ilksel kayacından farklı bir yapı kazanmasıyla oluşan bir kayadır." şeklinde tanımlanır. Endüstriyel anlamda ise, ekonomik olarak kesilebilen ve parlatılabilen, bir ticari değeri olan her türlü kayaç mermer ismi altında adlandırılmaktadır. Petrografik olarak da masif, kabaca tekdüze irilikte (geçirdiği metamorfizma şekline göre) kalsit kristallerinin arasında boşluk bırakmaksızın dizildiği bir mozaik olarak tanımlanabilir [55].

2.4.1. Mermerlerin sınıflandırılması

Mermerler, günümüze kadar birçok açıdan sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Burada sadece mineral tane boyutları ve mineral bileşim oranlarına göre yapılan mineralojik sınıflandırma ile türleri hakkında bilgi verilmiştir [56].

Mermerlerin mineral tane boyutuna göre sınıflandırılması

Mermerler mineral tane boyutuna göre aşağıda sınıflandırılmıştır:

İnce taneli mermerler	< 1 mm
Orta taneli mermerler	1 mm - 5 mm
İri taneli mermerler	> 5 mm - 1-2 cm [56].

Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri

Mermerler mineral bileşim ve oranına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.6. Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri [56]

Kayaç adı	İçerdiği diğer mineraller (kalsit hariç)	Kalsit	Yapı ve doku
Hakiki mermer	Mika, kuvarsit, opak mineraller (hematit, pirit) vb.	% 95	Masif, taneli
Kaşıst	Klorit, epidot, mika, lepidolit	% 60-70	Şistli, yönlü
Sipolen	Flogoplt, tremotil, diopsi plajiyoklas, granat minerali	% 80	Şistli, yönlü
Magmatik kökenli mermer	Epidot, diopsit, granat minerali, olivin	% 80-90	Masif, taneli
Skam	Plajiyoklas + cevher minerali	-	-

Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırılması

Mermerler yapısına ve dokusuna göre Çizelge 2.7'de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.7. Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırma [56]

Kayaç	Görünüm ve özellikleri
Masif	Kompakt, ince ve iri tanelidir
Laminai mermer	İri taneli, renkli şeritli görünümünde, şeritler farklı mineral veya elementler içerir
Şistli mermer	Yapraklı yapıda, önemli miktarda mika içerir
Breşik mermer	Kırıklanmış, tekrar ikincil minerallerle bağlanmıştır. Ara dolgular farklı renk ve mineral içerikli olabilir
İri taneli mermer	Tane boyutu 5 mm'den büyük tane türleridir

Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması

Mermerler jeolojik bakımdan Çizelge 2.8'de görüldüğü şekilde sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.8. Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması [56]

I.Grup	Tam kristalleşmiş taşları içine alır. Renkleri genellikle beyaz ve açık gridir. Bileşimlerinde birçok yabancı madde bulunur
II.Grup	Omks ve travertenler içerir. Yapılarında yalnız CaCO_3 vardır. Soğuma boşluğu içerirler. Kolay işlenebilir ve iyi cila kabul ederler.
III.Grup	Magmatik kökenli mermerleri içerirler. Andezit, dasit, granit, bazalt, diabaz, gabro, serpantin vb.

2.4.2. Afyon bölgesi mermerlerinin özellikleri

Afyon mermerleri, mineralojik bileşimlerine göre değişik renk ve desen sergilemektedir [57].

Afyon yöresi mermerlerinin değişik türlerinden alınan örneklerden 20 adet ince kesit yapılmıştır. Bu ince kesitler polarizon mikroskopta detaylı bir şekilde incelenmiş ve mermerleri oluşturan mineraller arasında ilişkiler belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu, numunelerde hâkim olan kalsit minerallerine ilaveten bazı örneklerde klorit, serisit, kuvars ve demir (mağnetit, limonit) mineralleri saptanmıştır. Kalsit kristalleri 0,2 mm – 0,8 mm arasındaki boyutlardadır. Gronoblastik dokuya sahiptir. Yeşil şist fasiyesinde yer alan Afyon beyaz mermeri Païeozoyik yaşlı olup, metamorfizmaya uğramış klasik bir mermerdir. Bu mermerler, literatürde " Afyon metamorfiten " olarak isimlendirilen birim içerisinde mercek şeklindedir ve Neojen volkanitleri

tarafından özetlenmektedir. Afyon kaplanpostu, yapı ve doku itibariyle Afyon beyazından farklıdır ve gri renkli bir görünüme sahiptir. Değişik boyutta açık gri - koyu gri breşimsi karakter arz eden yamalar şeklindedir. Bu dokusuna izafeten, kaplanın derisine benzediği İçin "kaplan postu" ismi verilmiştir. Afyon yöresi mermerlerde blok ve plaka verme özelliği ile kenar - köşe kesilmesi, şekillendirilebilme, yeteneği ve kesilebilme hızları son derece iyidir. Bu durum, petrografi, mineralojik ve fiziksel özelliklerinden (mineral cinsi, tane boyutu, yapı ve doku gibi) kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu özelliklerinin yanında cila tutma özelliği de son derece iyidir [58].

2.4.3. Mermer ocaklarında ve mermer işleme tesislerinde oluşan atık

MT, en küçük boyutlu mermer atıkları olup mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi esnasında açığa çıkan ve büyük çoğunluğu 1 mm'nin altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminin suyla yapılması nedeniyle bu atıklar direkt olarak suya karışır ve fosfojips halinde çöktürme havuzlarından veya kek olarak arıtma tesislerinde depolanır. Atıklar, değişik özelliklere sahip mermer tozlarından ve içine karışan yabancı maddelerden oluşmaktadır [59].

Mermer günümüzde kullanımı en çok tercih edilen bir inşaat hammaddesidir. Mermerin doğal bir malzeme oluşu çok kullanılma tercihinin en büyük nedenidir. 2002 yılında Afyonkarahisar-İscehisar bölgesindeki 17 adet mermer ocağı işletmesinde yaklaşık 172 000 m³'lük blok mermer üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim Türkiye blok mermer üretiminin % 12'sini karşılamaktadır [60]. Ocaklardaki blok mermer üretimi sırasında ortalama olarak üretimin % 40-60'ı atığa çıkmaktadır [61].

Ortalama atık miktarı % 50 olarak kabul edilirse; yıllık artık miktarı: 148000 m³/yıl x 0,5 = 74000 m³ / yıl olarak bulunabilir. Ayrıca, günümüzden hareketle bu güne kadar birikmiş ocak artıklarını hesap etmek istersek yaklaşık 1100000 m³ x 2,7 t/m³ = 2997000 t ocak atığından bahsetmek mümkün olacaktır [59].

Mermer ocaklarında blok alınmasını sınırlayan en önemli unsur mermer yatağındaki kırık ve çatlakların durumudur. Bu tür atıkların oluşmasına ocağın jeolojik yapısının yanı sıra yanlış üretim metotları da neden olabilmektedir [59].

Ocaklarda mermer atıklarının oluşmasına sebep olan bir diğer etken de sayalama işlemidir. Ocakların tektonik yapısına uygun olarak elde edilen çok büyük şekilsiz kütleler, çeşitli yöntemlerle istenilen ebatlarda alt, üst ve yanlarından kesilirler. Kesim sonucu ortaya çıkan bu atıklar ve blok elde edilmesi sonucu oluşan diğer tüm atıklar bir tarafta biriktirilir. Bu atıklar yükleyiciler vasıtasıyla kamyonlara yüklenerek pasa döküm sahasına dökülmekte ve yığınlar oluşturularak çevrede istenmeyen görüntüler oluşmaktadır. Bu tip ocak işletmeleri, çevrenin özelliğine bağlı olarak etki yaratmaktadırlar. Eğer mermer vb. taş ocakları yerleşim merkezi ve yol kenarı gibi bölgelere uzak ise çevre tahribatı insanlar tarafından görülmediği için kamuoyu tepkisini çekmemektedir. Her işletme, yeryüzü topoğrafyasının bozulması vb. gibi bazı estetik kayıpların yanı sıra çevrenin kendine özgü niteliklerinin de yok olmasına neden olmaktadır [59].

2.4.4. Atıkların sektörel olarak kullanımı

Yapı ve inşaat sektöründe kullanımı

İnşaat alanında mozaik, yapıtaşı, çimento, harç, ince agrega ve sıva olarak kullanıldığı gibi kireç elde edilen en önemli hammaddelerden biridir. Ayrıca mimaride süsleme hammaddesi, dolgu malzemesi ve/veya tarımsal amaçlı katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır [58].

Çimento sanayinde

Çimento, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve eser miktarda MgO ihtiva eden, ana hammadde olarak da kireçtaşı ve kıltaşı karışımı olan, klinkerleşme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra alçıtaşı gibi, tras ve katkı maddeleri gibi maddelerin öğütülerek homojen bir şekilde karıştırılmasıyla elde edilen bir bağlayıcıdır. Çimentonun bünyesinde her ne

kadar çok miktarda CaCO_3 bileşimli hammaddeler kullanılıyor olsa bile, mermerin yapısı ve oluşum mekanizmasından dolayı çimento sanayiinde özellikle beyaz çimento üretiminde kullanılır [58].

Seramik sanayinde

Seramik sanayiinde yaklaşık % 5-6 civarında mermer kullanılabilmektedir. Seramik bünye ve seramik sırları üretiminde CaO olarak reçeteye kalsit, dolomit ve mermerden hammadde olarak girebilir. Karışık ve katkılı akçini çamurlarının mineralojik bileşiminde % 5-20 arasında CaCO_3 kullanılır. Bu CaCO_3 çok ince öğütülmüş mermer halinde bileşime katılması gerekir. Özsüz bir seramik hammaddesidir ve seramik çamurunda gözenekliliği azaltır. Bünyedeki CaO sırdaki SiO_2 ile reaksiyona girerek bir ara tabaka oluşturur. Bu ara tabaka sayesinde gerilimleri emerek çatlamları önler [58].

Plastik sanayinde

Plastik malzemelere doluluk ve sıklık vermek amacı ile bünyeye çeşitli dolgu maddeleri katılmaktadır. Bu dolgu maddelerinden biri de mermerdir. Ayrıca, mermer plastik bünyeye girince yüksek sıcaklığa karşı dayanım ve taneli yapı kazandırma gibi özellikleri bünyeye katar [58].

Kağıt sanayinde

CaCO_3 kağıt sektöründe dolgu ya da kaplama malzemesi olarak kullanılır. Özellikle sigara kağıdı başta olmak üzere (düzenli yanmayı sağlar) gazete kağıdı, kaliteli kitap ve dergi kağıtları üretiminde kullanılmaktadır. CaCO_3 , yağ emme özelliğinden dolayı matbaada mürekkebin hızlı kurumasını sağlar [58].

Tarım ve gübre sanayinde

Topraktaki kalsiyum miktarına bağlı olarak toprağın ihtiyaç duyduğu kireç miktarı ile onun asit, baz ya da nötr karakteri ile PH değeri belirlenir. Toprak için ihtiyaç

duyulan kalsiyum miktarı sürekli olarak doğal etkilerle (yağmur gibi) azaldığı için belirli sürelerde toprağa kalsiyum ilavesi (mermer atıkları ya da kireç gibi maddelerle) yapmak toprak ıslahı için gereklidir [58].

Yem sanayinde

CaCO_3 ya da CaO olarak kanatlı hayvanların yemlerinde hayvan yemi olarak kullanımı oldukça yaygındır. Kullanım esnasında tane boyutu 2 mm' nin altında olması gerekir. Katkı oranı genellikle % 10 civarındadır. Kanatlı hayvan yemine katılacak olan katkının en az % 92 oranında CaCO_3 içermesi gerekir [58].

Boya sanayinde

Boya malzemesi içerisine yardımcı madde olarak katılan kalsit (CaCO_3) özellikle sulu boyalar için önemlidir. Boya imalinde katkı olarak kullanılacak olan kalsitin $10\mu\text{m}$ boyutunun altında ve çok saf olması istenir [58].

Şeker sanayinde

Ocaklardan üretilen kireçtaşı (CaCO_3) yakıldığında açığa çıkan karbondioksit (CO_2) toplanır. Bu esnada kireçtaşında sönmemiş kireç haline gelir. Bu kireç şeker eldesi için kullanılır. Şeker eldesi esnasında üretilen şerbete bir miktar kireç katılır. Bu işlem ham şerbetteki yabancı maddeleri dibe çöktürür [58].

Metalürji sanayinde

Kireçtaşı yüksek fırınlarda çelikten, fosfor ve silis temizlemede ve metalleri parlatmada kullanılır. Kireçtaşı eriyikleri SO_2 , H_2S , ve H gazlarını absorbe etmektedir. Metalürjide kullanılan kireçtaşlarının da boyutlarının 1,2 - 15 mm, sülfür max. % 5, fosfor % 0,01'den az ve MgCO_3 oranının max. % 10 olması istenir [58].

Cam sanayinde

Kalsiyumca zengin kireçtaşları şişe ve pencere camı, magnezyumca zengin olan kireçtaşları ise özel cam imalinde kullanılırlar. Bu sektörde kullanılacak olan kireçtaşlarının da CaCO_3 oranının % 98,5, FeO oranının % 0,2, organik madde % 0,3 ve geride kalan silikat oranının % 1,0 olması aranan özellikler olarak sıralanabilir [58].

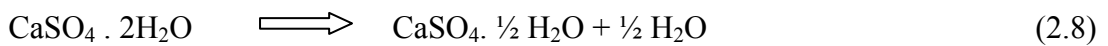
Kimya sanayinde

Karbit yapımında kullanılır. Ca-karbit elektrik fırınlarında kireçtaşı ve kok kömürlerinin şarjı sonucu elde edilir. Kok ile kireçtaşı % 40 - 60 arasındadır. Bu işlem için kullanılacak kireçtaşı saf ve yüksek kalsiyumlu olmalıdır. Ayrıca, fosfor miktarı % 1 den az, MgO oranının % 5 den az, FeO oranının % 5 den az ve SiO_2 oranının ise % 1 - 2 den az olması istenir [58].

2.5. Alçının Tanımı

Alçı, kimyasal bileşimi $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olan alçıtaşının yaklaşık yarım molekül kristal suyu kalacak veya hiç kalmayacak şekilde kızdırılarak suyunun uçurulması ve öğütülmesi ile elde edilen ve su ile karıştırılınca tekrar katılaşarak bağlayıcılık özelliği kazanan bir yapı malzemesidir. Bu madde suyun etkisiyle katılaşp sertleştiğinden hidrolik bağlayıcılar sınıfından bir yapı malzemesidir. Beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı türü olan alçı, su ile karıştırıldığında kısa süre içinde katılaşma özelliği gösterir [20].

Alçıtaşı kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristal suyu bulunan türüne jips ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) denir. Alçıtaşı tabiatta 6 şekilde bulunur. Bunlar; anhidrit, bassanit, jips, albatr, ipek jipsi ve selenittir.



Alçıtaşı; 110-150 °C ‘de dehidratasyonu sonucu β – form kalsine alçının oluşumu eşitlik 2.8’de görülmektedir. Doğal anhidrit susuz kalsiyum sülfattır. Doğada genellikle alçıtaşı ile birlikte yataklandığı görülür. Bazı ülkelerdeki sülfürik asit üretimi dışında yakın tarihlere kadar fazla bir kullanım alanı bulunamamıştır. Ancak 30 yıldan bu yana kimya endüstrisinde ve inşaat malzemeleri yapımında önem kazanmış bulunmaktadır. Diğer bir jips çeşidi olan bassanit, anhidrit ile jips arasında ayrı bir mineral fazı oluşturmaktadır. Jips doğada bol miktarda bulunur [30].

Alçı yapımında kullanılan alçıtaşı (jips), çoğunlukla beyaz ve yumuşak bir mineral olup, özgül ağırlığı 2,3; sertliği 1,5 - 2 civarındadır. Asitlerden etkilenmez, suda az çözünür. Türkiye’de alçıtaşı, Burdur, Kütahya, Ankara, Bandırma, İstanbul dolaylarında bulunmaktadır [20].

2.5.1. Alçının tarihçesi

Alçı bilinen en eski bağlayıcı maddelerden biridir. Eski Mısır uygarlığının birçok yapıtında bağlayıcı madde olarak, Yunan ve Roma yapılarında duvar sıvası, renkli fresk olarak kullanıldığı bilinmektedir [20].

XIV. Yüzyılda İtalya’ da stucco (su, alçı, boya, mermer tozu) adı altında kullanılmıştır. Osmanlı devrinde ise alçı vitray tekniği ile pencerelerde ve duvarlarda süsleme olarak uygulanmıştır [62]. Selçuklulardan kalma eserlerde alçı kullanıldığı bilinmektedir (Akşehir/Konya). Yine Erzurum’ da alçı sıvalı 200 yıllık evlerin varlığı dikkate alındığında oldukça eski tarihlerden beri binaların inşasında alçı kullanıldığı anlaşılmaktadır [63].

1666 yılındaki Londra yangınından sonra ahşap binaları yangından koruduğu gözlenen alçı sıva Fransa da zorunlu hale getirilmiş ve sıva alçısı Plaster of Paris (Paris alçısı) ismini almıştır. İç mekânlarda tavan süslemesi olarak kartonpiyer adı altında kullanılmaya başlanmıştır [20].

1700'lerden itibaren alçıtaşı toprak ıslahında özellikle de sebze, yerfıstığı, pamuk, patates gibi ürünlere kalsiyum ve kükürt sağlayıcı gübre olarak kullanılmıştır [20].

2.5.2. Alçının özellikleri

Fiziksel özellikler

İncelik: Katkılı normal alçı, susuz alçı, katkısız susuz alçı 1,25 mm göz açıklığındaki elek üzerinde kütlece % 20, 0,16 mm göz açıklığındaki elek üzerinde kütlece % 0,5'den fazla kalıntı bırakmamalıdır [63].

Priz Süresi: Normal alçıların priz süresi, 8 dakikadan az olmamalıdır. Katkılı normal alçı, susuz alçı, katkılı susuz alçının priz süresi ise, en az 20 dakika olmalıdır. Saten alçının priz süresi 130 dakikadan fazla olmalıdır [63].

Basınç Dayanımı: Yapı alçılarının basınç dayanımı en az 7 N/mm², saten alçının basınç dayanımı de en az 2.5 N/mm² olmalıdır [63].

Kimyasal özellikler: Yapı alçılarının kimyasal özellikleri Çizelge 2.9'da verilen değerlere uygun olmalıdır [63].

Çizelge 2.9. Yapı alçılarının kimyasal özellikleri [64]

Kimyasal özellikleri	Normal alçı ve katkılı normal alçı	Susuz alçı ve katkısız susuz alçı
Bağlı su (kızdırma kaybı)	En çok % 9, en az % 4	En çok % 0,3
Kalsiyum oksit (CaO)	En az % 24	En az % 27
Çözünebilen Mg tuzları (MgO olarak)	En çok % 0.3	En çok % 0,3
Kükürt trioksit (SO ₃)	En az % 34	En az % 38
Klorür (NaCl olarak)	En çok % 0,5	En çok % 0,5

2.5.3. Alçı çeşitleri

Alçı; alçı taşının hafifçe pişirilmesi ve öğütülmesiyle elde edilen bir maddedir. Ticarete kullanılan alçı karışık bir üründür. Çünkü içinde değişik miktarlarda kalsiyum sülfat, anhidritler veya hidritli maddeler bulunabilir ve ona göre nitelikleri değişebilir. Başlıca alçı çeşitleri:

Şaplı Alçı: 150 °C ‘de pişirilerek bir şap eriyiğine batırılan alçı taşlarının 600-700 °C ‘de pişirildikten sonra ince öğütülmesiyle elde edilir.

Yüksek Basıncılı Alçı: Rutubete doymuş havada düşük ısı ile hazırlanmış yarı-hidrat ve sülfat-anhidrit türleri bulunan alçıdır [65].

2.5.4. Alçının kullanım alanları

Alçının hem maliyeti ve doğada kolay bulunabilirliği dolayısıyla birçok kullanım alanının kendisine yer edinmiştir [64].

İnşaat sektöründe kullanılan alçılar

- İnşaat alçısı
- Kartonpiyer alçısı
- Saten perdah alçısı
- Perlitli sıva alçısı
- Makine sıva alçısı
- Derz dolgu alçısı
- Yapıştırma alçısı (alçı plaka, duvar blok)
- İki yüzü kartonlu alçı plaka [64].

Kalıp alçıları

- Teksir kalıbı alçısı
- Porselen kalıp alçısı

- Seramik kalıbı alçısı
- Kiremit kalıbı alçısı [64].

Alçı taşı

- Tüvenan alçıtaşı
- Mikronize edilmiş alçıtaşı [64].

Tıpta kullanılan alçılar

- Diş alçısı
- Ortopedik alçı [64].

2.5.5. Atık alçı oluşumu ve miktarı

Doğal alçıların dışında, değişik endüstrilerin atık maddelerinden kimyasal (sentetik) alçı adı verilen bir tür alçı üretmek olanaklıdır. Ancak kimyasal bileşimleri doğal alçıtaşı ile aynı olmakla birlikte bunların içinde alçının özellikleri üzerinde etkili olan bazı yabancı maddeler (çeşitli safsızlıklar) bulunur. Kimyasal alçıların doğal alçı taşı yerine kullanılabilmesi için genellikle bu safsızlıkların etkisiz hale getirilmesi gerekmektedir. Bunları etkisiz duruma getirmek için oldukça pahalı yıkama veya değişik yöntemler kullanılır. Örneğin, fosforik asit üretiminde, kalsiyum fosfatın sülfürik asit ile işleme sonucu, kimyasal bileşimi $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olan kimyasal alçı elde edilir. Fosforik asit büyük oranda fosfatlı gübre üretimi endüstrisinde kullanılmaktadır. Apatit veya fosfat kayasına sülfürik asit etki ettirilerek fosforik asit elde etme yöntemi, yaş yöntem adıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu asidin yaş yöntem ile üretiminden yan ürün olarak, “sentetik ham alçı, fosfatlı alçı taşı, kimyasal alçı, fosfojips” gibi adlarla tanımlanan ürün açığa çıkmaktadır. Gübre sanayisinin temel girdisi olan, 1 ton fosforik asit üretiminde 5 ton fosfojips çıkmaktadır. Türkiye’ de bu yolla yılda 3 milyon ton atığın elde edildiği hesaplanmıştır. Kimyasal alçılar arasında fosfojips ve kömür ile çalışan termik santrallerin SO ve SO₃ içeren baca gazlarının desülfürizasyonu sonucunda oluşan desülföjips en büyük miktarı oluşturmaktadır [64].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneysel çalışmada, Portland çimentosu klinkeri, doğal alçı, CEN standart kumu; fosfojips, atık mermer tozu ve silis dumanı kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada kontrol çimentosu olarak laboratuvarında üretilen PÇ 42.5 çimentosu kullanılmıştır. PÇ 42.5 kontrol çimentosunun TS EN 196-2 Çimento deney metotları-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi [66], TS EN 196-3 Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini [67], TS EN 196-6 Çimento deney metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini [68] ve TS EN 196-1 Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini [69] standartlarına göre belirlenen fiziksel, kimyasal ve mekanik deney sonuçları fabrika raporlarından alınmış ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PÇ 42.5 Kontrol çimentosunun özellikleri

Analiz	Oksit	Değer	Analiz	Deneysel	Değer
Kimyasal, %	SiO ₂	20,32	Fiziksel	Özgül yüzey, cm ² /g	3198
	Al ₂ O ₃	5,38		Hacim genleşmesi, mm	1
	Fe ₂ O ₃	3,3		Su ihtiyacı, g	28,3
	CaO	63,58		Priz başı, dk	170
	MgO	1,65		Priz sonu, dk	235
	SO ₃	2,97		Yoğunluk	3,15
	Na ₂ O ₃	0,15	Mekanik	Basınç dayanımı, MPa	
	K ₂	0,71		3 gün	33,10
	Cl	0,012		7 gün	37,48
	HCl	0,29		28 gün	42,25

3.1.2. Klinker

Çalışmada kullanılan klinker, Limak Ankara Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Klinkerin kimyasal analizi TS EN 196-2'ye [66] standardına göre belirlenmiş ve deney sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Klinkerin kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	Klinker
CaO	65,69
SiO ₂	21,24
Al ₂ O ₃	5,42
Fe ₂ O ₃	3,48
MgO	-
SO ₃	0,87
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	0,79
K.K.	0,12

3.1.3. Doğal alçı

Çalışmada kullanılan doğal alçı, Limak Ankara Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Doğal alçının özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Doğal alçı ile fosfojipsin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Oksit	Doğal alçı (%)	Fosfojips (%)	Fiziksel özellikler	
CaO	32,33	39,62	Fosfojips	
SiO ₂	1,76	-	Yoğunluk (g/cm ³)	
Al ₂ O ₃	0,48	-	Yaş olarak	0,58
Fe ₂ O ₃	0,14	-	Sıkıştırılmış	1,62
MgO	0,27	-		
SO ₃	44,35	43,76		
Na ₂ O	0,05	-		
K ₂ O	0,05	-		
Cr ₂ O ₃	0,008	-		
K.K.	20,00	16,62		

3.1.4. Fosfojips

Katkılı çimento üretiminde kullanılan fosfojips (A) Bandırma Gübre Sanayi'nden temin edilmiştir. Fosfojipse ait kimyasal özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

3.1.5. Atık mermer tozu

Deneysel araştırmada Afyon Çavdarlar Mermer Fabrikası'ndan temin edilen atık mermer tozu (MT) kullanılmıştır. Çizelge 3.4'te MT'nin kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. SD ve MT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Oksit (%)	SD	MT	Fiziksel özellikler		
SiO ₂	94,62	1,92	Özellik	SD	MT
Al ₂ O ₃	0,20	0,38	Özgül yüzey (cm ² /g)	20000	-
Fe ₂ O ₃	0,20	0,03	Yoğunluk (g/cm ³)	2,36	2,72
CaO	1,40	54,34	40 µm üstü kalan (%)	-	51,23
MgO	-	0,39	90 µm üstü kalan (%)	-	32,35
SO ₃	0,21	0,08			
Na ₂ O	-	0,18			
K ₂ O	-	0,05			
K.K.	-	42,80			

3.1.6. Silis dumanı

Deneysel çalışmalarda katkı malzemesi olarak atık alçı, atık mermer tozu ile birlikte SD kullanılmıştır. SD, Antalya'da üretim yapan Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesi'nden temin edilmiştir. SD, silisyum metali veya ferro silisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek saflıkta kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur. Deneylerde kullanılan SD üzerinde herhangi bir işlem yapılmamıştır. SD'nin özgül yüzeyi BET metodu ile belirlenmiştir. SD'ye ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

3.1.7. Standart CEN kumu

Çimento harç numunelerinin hazırlanmasında; Limak Ankara Çimento Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 196-1'e [69] uygun Rilem-Cembureau standart kumu kullanılmıştır. Kullanılan standart CEN kumunun özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Standart CEN kumu özellikleri

Oksit	(%)	Elek göz açıklığı (mm)	Kalan (%)
SiO ₂	93,05	2	-
Al ₂ O ₃	3,11	1,6	5,23
Fe ₂ O ₃	0,37	1	33,02
CaO	0,17	0,5	65,74
MgO	0,03	0,16	86,21
SO ₃	0,07	0,08	99,12
K ₂ O	1,50	Nem	0,11
Na ₂ O	1,10		

3.1.8. Karışım suyu

Harç karışımlarında çimentoya zararlı olabilecek organik madde ve madensel tuzları ihtiva etmeyen Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır. Karışım suyunun, ASKİ'nin resmi internet sitesinden alınan, kimyasal analiz sonuçları [70] Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ankara şehir içme suyunun kimyasal özellikleri [70]

Parametre	Analiz sonucu	TS 266 sınır değeri	Sağlık Bak, insani tüketim amaçlı sular yönetmelik sınır değerleri
Bulanıklık (NTU birimi)	0,58	5	1
Koku	Yok	Yok	Yok
Bakiye lor (mg/l)	0,6		En çok 0,5
İletkenlik	17,87	250	250
Amonyum (mg/l)	0,06	0,5	0,5
Nitrit (mg/l)	0,006	0,5	0,5
Sülfat (mg/l)		250	250
Demir (mg/l)	< 3	200	200
Alüminyum (mg/l)		200	200

3.2. Metot

SD, MT, A ve doğal alçının kimyasal analizleri Limak Ankara Çimento Fabrikası'nda, SD ve MT'nin mineralojik analizleri MTA Genel Müdürlüğü Mineraloji Araştırmalar Koordinatörlüğü Laboratuvarında yaptırılmıştır. Harç deneyleri, Limak Ankara Çimento Fabrikası Fizik Laboratuvarı ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.1. Deneylerde kullanılan çimentoların üretilmesi

Deneysel çalışmanın ilk bölümünü, PÇ 42.5, AMT ve AMTSD katkılı çimentoların üretiminde kullanılan klinker, doğal alçı, A, MT ve SD'nin kimyasal kompozisyonları, fiziksel özellikleri ve mineralojik özelliklerinin tespit edilmesi oluşturmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise A, MT ve SD Membert marka etüvde $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saat süre ile kurutulmuştur. Daha sonra katkılı çimento üretiminde Portland çimentosu klinkeri kullanılmıştır. Klinkerin içerisinde çok iri parçalar bulunduğundan bu parçalar iriliği bilye büyüklüğü olacak şekilde Retsch marka uzun çeneli kırıcıdan geçirilerek kırılmıştır. Üretilen çimento tipleri ve karışım oranları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Üretilen çimento tiplerinin karışım oranları

Çimento tipi	Klinker (%)	Doğal alçı (%)	A (%)	MT (%)	SD (%)	Toplam (%)
PÇ 42.5	95	5	-	-	-	100
AMT0	95	-	5	-	-	100
AMT3	92	-	5	3	-	100
AMT6	89	-	5	6	-	100
AMT9	86	-	5	9	-	100
AMT12	83	-	5	12	-	100
AMT15	80	-	5	15	-	100
AMT20	75	-	5	20	-	100
AMT25	70	-	5	25	-	100
AMTSD3	89	-	5	3	3	100
AMTSD6	83	-	5	6	6	100
AMTSD9	77	-	5	9	9	100
AMTSD12	71	-	5	12	12	100
AMTSD15	65	-	5	15	15	100
AMTSD20	55	-	5	20	20	100
AMTSD25	45	-	5	25	25	100

Çimentoları öğütmek için bilyalı değirmen kullanılmıştır. Değirmendeki bilyalar farklı çaplarda ve dairesel şekilde olup toplam ağırlığı 30 kg'dır. Üretilen çimentoların tamamında öğütme süresi 2,5 saat sabit alınmıştır. Çimento üretiminde kullanılan hammadde ve atık malzemeler, 3 kg'lık partiler halinde 0,01 g hassasiyetli Denver Instrument marka terazide tartılmış ve bilyalı değirmende öğütülmüştür. Öğütülen numuneler değirmenden çıkarıldıktan sonra karışım içinde öğütülmemiş iri taneler bulunduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle numuneler 250 µm'luk elekten elenmiş ve elek altına geçen çimento havanın bağıl neminden etkilenmemesi için ağzı kapalı 2 ayrı torba içerisine konulup etiketlendikten sonra laboratuvarında muhafaza edilmiştir.

PÇ 42.5 kontrol çimentosu, Çizelge 3.7'de verilen oranlarda PÇ klinkeri ve doğal alçı ile hazırlanmıştır. Diğer kontrol çimentosu olan AMT0 ise yine Çizelge 3.7'de verilen oranlarda PÇ klinkeri, A ve MT kullanılarak üretilmiştir.

AMT katkılı çimentoların üretiminde; ağırlıkça A % 5 ve MT % 3, % 6, % 9, % 12, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında karıştırılarak öğütülmüştür.

AMTSD katkılı çimentoların üretilmesinde SD çok ince bir atık olduğundan öğütme işlemine tabi tutulmadan karışımda kullanılmıştır. AMTSD katkılı çimentolar ağırlıkça A % 5 ve MT % 3, % 6, % 9, % 12, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında karıştırılarak öğütülmüştür. Ardından SD karışımda kullanılan MT oranları kadar yani ağırlıkça % 3, % 6, % 9, % 12, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında hazırlanan karışıma ilave edilmiş ve bu karışım, bilyeleri içinden çıkartılmış değirmende homojen bir karışım elde etmek amacıyla 5 dk süre ile karıştırılmıştır. Tüm AMTSD çimento tiplerine ayrı ayrı bu işlem uygulanmıştır.

Tüm çimento tiplerine öğütme işlemi yapılmış ve her bir çimento karışımından 3 kg olacak şekilde ortamın neminden etkilenmesi için çift naylon torba içerisine konulmuş, ayrıca deney süresince herhangi bir yanlışlığa meydan vermemek için torbaların üzerlerine numune adları yazılmıştır.

3.2.2. Deneylerde kullanılan çimentolara ait fiziksel deneyler

Standart kıvam tayini deneyi

Standart kıvam tayini deneyi, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini” [67] standardına göre yapılmıştır. Deneyde, Vicat sondası ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlıkta Sartorius Basic marka elektronik terazi kullanılmıştır. Üretilen çimento numunesinden, 450 g tartılmış ve çimento kütlesinin % 25 - % 30’u kadar suyla 3 dakika karıştırılarak çimento hamuru hazırlanmıştır. Karıştırma işleminden hemen sonra altında 12x12 cm boyutlarında cam bir levha üzerinde bulunan Vicat halkasına içerisinde hava kalmayacak şekilde 1 dakika içerisinde yerleştirildikten sonra Vicat sondası ve Vicat halkasındaki çimento üst seviyesine 1 mm kalacak şekilde indirilerek hamur içerisine serbest bırakılmıştır. Sondanın ağırlığı ile sondanın yavaş yavaş hamurun içerisine

girmesi gözlenmiş ve cam levhaya 5-7 mm kaldığı an standart kıvam olarak tespit edilmiştir. Çimentoların standart kıvam deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Priz süresi tayini deneyi

Priz başlangıcı ve sona erme süreleri, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini” [67] standardına göre yapılmıştır. Deneyde Limak Ankara Çimento Fabrikası’ndaki RMU-Testing Equipment marka otomatik Vicat aleti ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlıkta Sartorius Basic marka elektronik terazi kullanılmıştır. Vicat aleti üzerinde takılı olan özel kağıda çimento hamurunun priz başlangıcı ve priz sonu kayıt edilmiştir. Standart kıvam tayininde kullanılan çimento hamurları, priz sürelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Vicat halkası, otomatik Vicat aletine konulmuş ve Vicat aletinin iğnesi temizlenerek her beş dakikada bir çimento hamuruna batacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra deney sonucunun daha doğru olabilmesi için iğnenin her batışından sonra iğne bir bez yardımı ile temizlenmiştir. Burada çimento hamuruna batan iğnenin, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı ana kadar geçen süre, priz başlangıcını vermektedir. Priz başlangıcından sonra her 5 dakikada iğnenin hamura batması devam etmiş ve iğnenin en çok çimento hamuruna 1 mm girdiği an, priz sona erme süresi olarak tespit edilmiştir. Otomatik Vicat aletinde iğnenin her batışı, halkanın değişik yerlerine olmuş ve dıştan içe doğru çapı küçülen spiral bir şekilde batma işlemi devam etmiştir. Deneyler sonunda tespit edilen priz başlangıç ve sona erme süreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Hacim genleşmesi deneyi

Hacim genleşmesi deneyi, TS EN 196-3 [67] standardına göre yapılmıştır. Deneyde Le Chatelier aleti ve kaynatma kabı kullanılmıştır. Çimentoda serbest halde CaO ve MgO bulunabilir. Bu maddeler, su ile reaksiyona girerek hacim artışına sebep olabilir ve betonda çatlak gibi bazı hasarlara neden olabilir. Bu nedenle çimentoda hacim genleşmesi deneyi yapılmaktadır. Deney, standart kıvam deneyi için hazırlanan çimento hamurundan alınan 20-30 g hamur ile yapılmıştır. Çimento hamuru, 5x5 cm

ebadındaki yağlanmış cam bir levha üzerine konulan yağlanmış olan Le Chatelier halkası içerisine hava boşluğu en az olacak şekilde yerleştirilmiştir. Hamurun üzerine spatula ile düzelttikten sonra üst kısmı 5x5 cm ebadındaki cam levha ile kapatılmıştır. Alet üzerine cam levhanın kalkmaması için bir ağırlık konulduktan sonra çubuk uçlarının açıklığı ölçülmüştür (a). Le Chatelier aletinin durumu bozulmadan $24 \pm 0,5$ saat 20 ± 1 °C ve % 98'den az olmayan bağıl nem içerisinde sıcaklığı tekrar ölçülerek kaydedilmiştir (b). Sonra Le Chatelier aleti, çubuklar yukarı gelecek şekilde su dolu kaynatma kabının içerisine yerleştirilmiş ve 30-45 dk içerisinde kaynamaya başlayacak şekilde ısıtılmıştır. Kaynamaya 4 saat devam edilmiş ve kaynayan suyun buharlaşıp uçmaması için ağzı kapalı tutulmuştur. Le Chatelier aleti, bu sürenin sonunda kaynatma kabının içerisinden çıkarılmış ve laboratuvar sıcaklığına gelinceye kadar soğutularak çubuk uçlarının açıklığı bir kez daha ölçülmüştür (c). Toplam hacimsel genleşme katsayısı 10 mm'yi geçmemelidir. (b-a), (c-b) ve (c-a) mm cinsinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. (c-a) mm cinsinden toplam hacim genleşmesi bulunmuştur. (b-a) 4 mm ve (c-a) 10 mm olmalıdır. Hacim genleşmesi deneyi, PÇ 42.5, AMT ve AMTSD katkılı çimento tipleri için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çimento incelik tayini deneyi

Çimento incelik tayini deneyi, TS EN 196-6 [68] standardına göre yapılmıştır. Deneyde emiş kapasitesi 12500 Pa olan Alpine marka incelik ölçüm cihazı (hava basıncı ile otomatik emme sistemi) kullanılmıştır. 105 °C $\pm$ 2 °C'de kurutulmuş çimento numuneleri, 0,1 g duyarlılıkta Sartorius Basic marka elektronik terazide 20 g tartılarak alınmıştır. 20 g'lık numuneler, ayrı ayrı 40 μ m ve 90 μ m eleklerde 2500 Pa emiş gücü ile 3 dk emiş gücü uygulanmıştır. Eleme işlemi sonunda, elekler üzerinde kalan miktarlar her seferinde tartılarak kaydedilmiştir. Elek üzerinde kalanlar, bir sonraki elek üzerine aktararak işleme devam edilmiş ve numunelerin tane büyüklükleri tespit edilmiştir. Deney PÇ 42.5 ile AMT ve AMTSD katkılı çimentolar için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Yoğunluk

Çimentoların yoğunluk deneyleri, küçük bir metal tüp içerisine belli bir miktar numune konulmuş ve 0,1 g duyarlılıkta Sartorius Basic marka elektronik terazide tartılmıştır. Tartılan bu ağırlık bir yere not edilmiştir. Daha sonra numunenin olduğu bu tüp Şekil 3.12’de görülen Micromeritics AccuPyc marka yoğunluk cihazı içerisine konulmuş ve cihazın ağzı sıkıca kapatılmıştır. Deney süresi malzemenin inceliğine göre değişmekte olup yaklaşık 20-30 dk sürmüştür. Cihazdan analiz değeri okunmuş ve cihazdan numune dolu tüp çıkarılarak tekrar tartılmıştır. Gerekli işlemler yapıldıktan sonra numunenin yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Yoğunluk tayini deneyi PÇ 42.5 ile AMT ve AMTSD katkılı tüm çimento tipleri için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Özgül yüzey (Blaine) deneyi

Özgül yüzey deneyleri, Tonindustrie-Seger marka Blaine cihazı kullanılarak TS EN 196-6 [68] standardındaki tanım ve tariflere uygun olarak yapılmıştır. Blaine cihazı, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgül yüzeyini tayin etmek için kullanılan bir cihazdır. Deney numunesi miktarı, TS EN 196-6’da [68] belirtilen hesaplama yöntemi ile belirlenmiş ve etüv kurusu çimentolar üzerinde deney gerçekleştirilmiştir.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta}} \quad (3.1)$$

Burada;

S: Özgül yüzey, (cm²/g)

K: Cihaz sabiti,

e: Yatağın porozitesi,

t: Ölçülen zaman, (sn)

ρ : Çimentonun yoğunluğu (g/cm³)

η : Çizelgeden alınan deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi (Pa.s)’dir.

Özgöl yüzey (Blaine) deneyi, PÇ 42.5 ile AMT ve AMTSD katkılı tüm çimento tipleri için ayrı ayrı yapılmış ve özgöl yüzey değerleri TS EN 196-6 'da [68] verilen formül ile hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

3.2.3. Harç deneyleri

Harç numunelerin hazırlanması

Çimentoların dayanım tayini deneyleri, TS EN 196-1'e [69] uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarında üçlü çelik harç kalıpları kullanılarak yapılmıştır. Deney için 450 g çimento, 1350 g standart kum, 225 g içme suyu kullanılmıştır. Harç karışımları Ele marka harç karışım cihazında hazırlanmıştır.

Harç yapılırken; karışım kabına önce su konmuş, sonra çimentonun tamamı kaba dökülerek karıştırıcı 30 s çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda aynı hızla devam ederken 1350 g standart kum yavaş yavaş karışıma ilave edilmiş ve 1 dk sonunda kumun tamamı harç karışımına boşaltılmıştır. Daha sonra karıştırıcı yüksek hıza alınıp 30 s daha çalıştırılmış ve toplam 1,5 dk sonunda durdurulmuştur. Kabin yüzeyindeki harçlar kazınarak kabin üzeri nemli bir bezle örtülerek 60 s bekletilmiştir. Daha sonra karıştırıcı yüksek hızda 1 dk daha çalıştırılarak harç karışımı hazırlanmıştır. Kalıplara harç yerleştirme işlemi iki aşamada yapılmıştır. Önce kalıplar saniyede bir vuruş yapabilen otomatik sarsma tablasına yerleştirilmiş ve harcın, kalıp başlığı takılan kalıplara ilk olarak yarısı boşaltılmıştır. Sarsma makinası çalıştırılarak 1 dk içinde 60 vuruş yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Sonra kabin içinde kalan harcın tamamı kalıp içine boşaltılmış ve sarsma makinası tekrar 1 dk içinde 60 vuruş yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Kalıplar sarsma makinasından alınarak, harçların yüzeyleri spatula yardımı ile düzeltilmiş, numunenin adı üzerine yazılmıştır. Oda sıcaklığı 20 ± 2 °C'de % 90'dan fazla nispi nem bulunan oda koşullarında kalıpların üzerleri cam levha ile örtülmüştür. Numuneler kalıpta TS EN 197-1'e [22] göre 24 saat kalıpta bekletilmiştir.

Kalıptan bir gün sonra çıkarılan harç numuneleri, kodlandıktan sonra 3'lü çelik tel sepetlere konulmuştur. Numuneler 3, 7, 28 ve 90 gün boyunca kür havuzunda 20 ± 2 °C sıcaklık ile % 100 nisbi nem ortamında kür edilmiştir. Numunelerin içerisine konulan kür kabındaki su ara ara kontrol edilerek su eklenmiştir. Numuneler, deneyden 15 dk önce kür havuzundan çıkarılmış ve nemli bez ile kurularak birim ağırlıklarını öğrenmek için Denver Instrument marka terazide tartılmıştır. Her bir çimento tipi için 3 adet birim ağırlık okuması yapılmıştır ve Çizelge 4.2'deki değerler elde edilmiştir. Son olarak numunelere TS EN 196-1'e [69] göre eğilme ve basınç deneyi uygulanmıştır.

Harçların birim ağırlık deneyi

Her bir çimento tipi eğilme ve basınç dayanım testine tabi tutulmadan önce Denver Instrument marka terazide tartılmıştır. Tartım işlemi her bir çimento tipine 3, 7, 28 ve 90 günlük numunelerinin toplam ağırlığının ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Birim ağırlık, numunenin ağırlığının hacmine bölünmesi ile hesaplanmıştır. Deney sonuçları 3 deney numunesinden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyleri, Ele Autotest 250 marka eğilmede çekme ve basınç deney cihazı kullanılarak TS EN 196-1'e [69] göre yapılmıştır. Cihazın yükleme hızı 0,05 kN/sn olarak alınmış ve bütün deneylerde aynı yükleme hızı kullanılmıştır. Her harç numunesi için 3 deney numunesi kırılarak aritmetik ortalamaları dayanım değeri olarak alınmıştır. PÇ 42.5 ile AMT ve AMTSD katkılı çimento harçlarının 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarındaki eğilme dayanımı TS EN 196-1'de verilen [69] aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır. Deney sonuçları 3 deney numunesinden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.2)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı, MPa,

b : Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm,

F_f : Prizma şekilli numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük, N,

l : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm'dir. [67].

Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi ELE Autotest 250 eğilmede çekme ve basınç deney cihazı kullanılarak TS EN 196-1'e [69] göre yapılmıştır. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanarak ortadan ikiye bölünen harç prizmaları üzerinde, bu deneyden hemen sonra gerçekleştirilmiştir. Deney cihazının yükleme hızı 2,4 kN/s olarak ayarlanmış ve bütün deneyler buna göre yapılmıştır. Deney sonuçları, 6 deney numunesi kırıldıktan sonra aritmetik ortalamaları alınarak belirlenmiştir. 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında dayanım değerleri elde edilmiştir. PÇ 42.5, AMT ve AMTSD katkılı tüm çimento harçlarının basınç dayanım sonuçları TS EN 196-1'de verilen aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır ve deney sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir [69].

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.3)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı, MPa,

F_c : Kırılmadaki en büyük yük, N,

1600 : Yükleme plakaların veya uzatma plakalarının alanı (40 mm x 40 mm) mm²'dir [70].

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

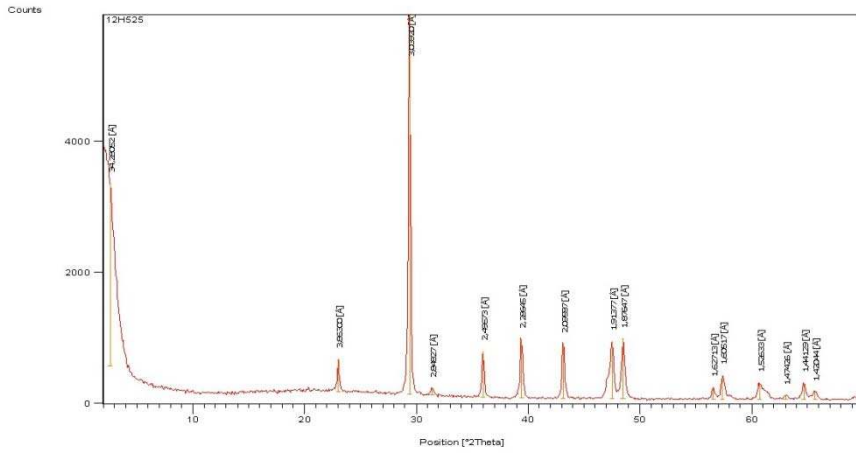
4.1. MT, SD ve A'nın Kimyasal Kompozisyonları

MT ve SD'nin deneylerle belirlenen kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. ASTM C618'e [46] göre bir puzolanda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının ağırlıkça en az % 70, kükürt trioksit (SO_3) değerinin en çok % 5 olması öngörülmektedir. Çizelge 3.4'te SD'nin içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının % 95.02 olup sınır değerinden çok yüksek olduğu görülmektedir. MT'nin içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı ise % 56,64 olup C sınıfı puzolan bir malzemeye göre sınır değerinin üsyünde olduğu görülmektedir. SO_3 değerinin ise SD ve MT için sırasıyla % 0,21 ve % 0,08 ile sınır değerden çok düşük olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan SD ve MT yukarıdaki özellikler bakımından birbirleriyle kıyaslandığında, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı bakımından SD'nin MT den ~ % 68, SiO_2 miktarı bakımından ise ~ % 74 yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte SD'nin SO_3 değeri MT'den ~ % 163 daha fazladır. TS EN 197-1'de [22] SD içinde en az % 85 SiO_2 olması istenmektedir. Deneylerde kullanılan SD içinde % 94,62 SiO_2 bulunduğundan bu şartın sağlandığı görülmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan doğal alçı ile fosfojipsin (A) kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te görülmektedir. Doğal alçı ve A'nın içinde bulunan CaO ve SO_3 değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında sırasıyla doğal alçıda % 32,23 ve % 44,35 ile A'da % 39,62 ve % 43.76 olduğu görülmektedir. Buna göre A, CaO ve SO_3 değerleri bakımından doğal alçıya yakın özellikler göstermektedir.

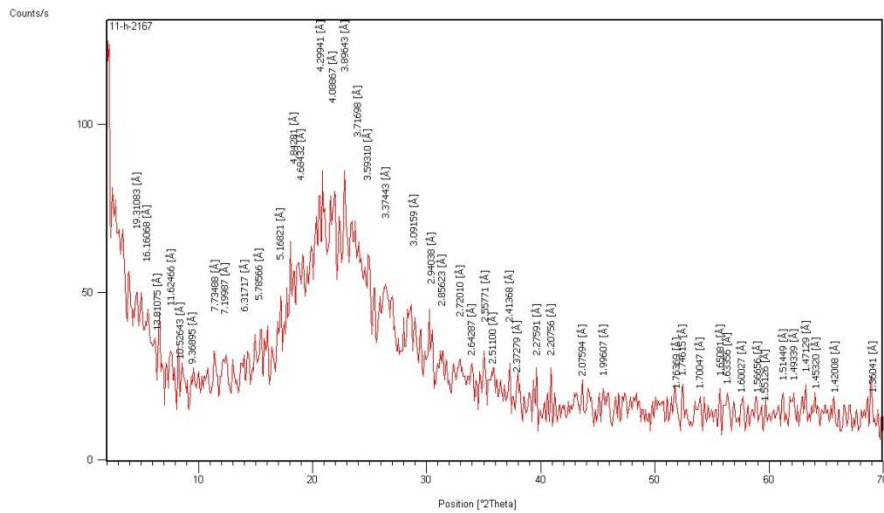
4.2. MT, SD ve A'nın Mineralojik Özellikleri

MT, SD ve A'nın X-ışını kırınım eğrileri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.1'de görülen MT'nin XRD kırınım eğrisi incelendiğinde daha çok kalsit mineralinin olduğu ve ilaveten klorit, kuvars, demir (magnetit, limonit) mineralleri saptanmıştır.



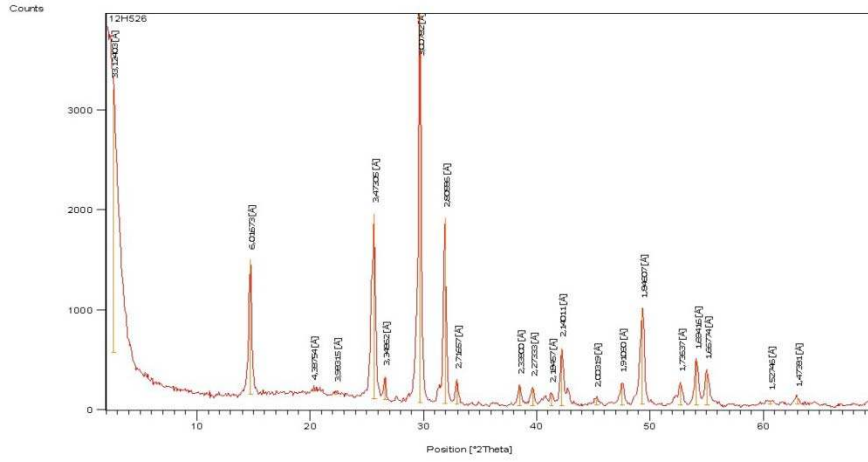
Şekil 4.1. MT'nin X-ışınları kırınım eğrisi

Şekil 4.2'de görülen SD'nin XRD kırınım eğrisi incelendiğinde SD içindeki hakim fazın amorf silika olduğu görülmektedir. Ayrıca SD içinde ana mineral olarak kuvars, opal CT (kristobalit ve tridimit) ve karışık tabakalı kil minerallerinin bulunduğu ve esas olarak amorf silikadan oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.2. SD'nin X-ışınları kırınım eğrisi

Şekil 4.3'te görülen A'nın XRD kırınım eğrisi incelendiğinde A içindeki hakim fazın kalsit ve sülfat olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Fosfojips'in X-ışınları kırınım eğrisi

4.3. MT, SD ve A Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri

Kontrol çimentoları PÇ 42.5 ve AMT0 ile MT, SD ve A katkılı AMT ve AMTSD çimentolarına ait fiziksel özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PÇ 42.5, AMT ve AMTSD katkılı çimentoların fiziksel özellikleri

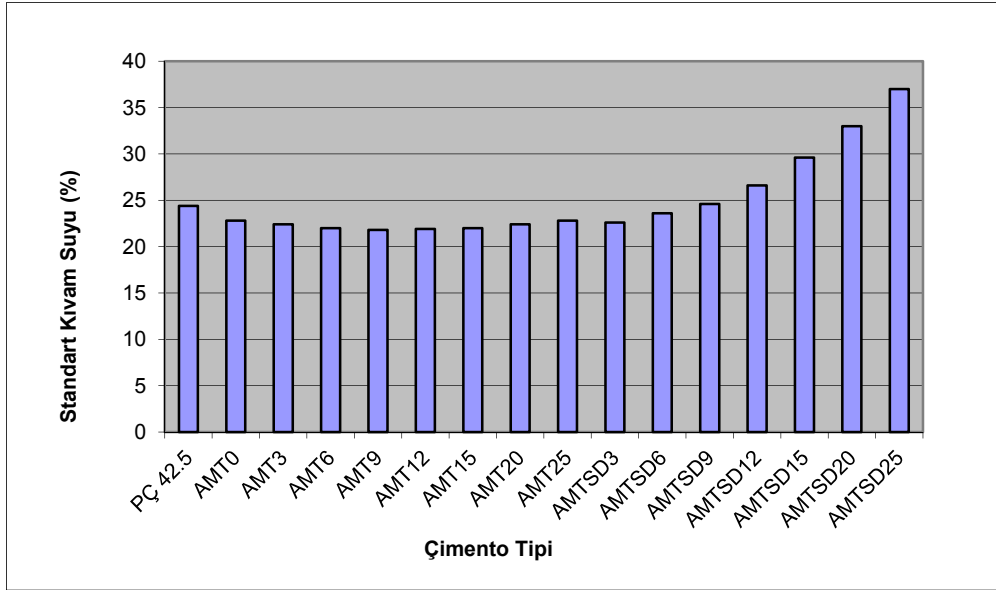
Çimento tipi	Standart kıvam suyu (%)	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)	Hacim genleşmesi (mm)	40 µm üstü kalan (%)	90 µm üstü kalan (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
PÇ 42.5	24,4	170	235	1	25,0	2,5	3,15	3198
AMT0	22,8	310	410	1	33,2	15,3	3,15	2698
AMT3	22,4	320	415	1	40,2	17,9	3,15	2946
AMT6	22,0	345	425	4	40,8	18,2	3,14	2979
AMT9	21,8	340	410	2	41,3	18,5	3,13	2997
AMT12	21,9	350	405	2	42,5	19,2	3,12	3243
AMT15	22,0	320	370	1	43,1	19,9	3,11	3400
AMT20	22,4	300	365	1	43,9	20,3	3,10	3702
AMT25	22,8	290	360	1	44,6	21,5	3,09	4444
AMTSD3	22,6	335	360	2	39,2	14,4	3,12	4012
AMTSD6	23,6	315	355	2	40,3	17,6	3,08	6867
AMTSD9	24,6	305	340	2	40,8	17,4	3,05	7326
AMTSD12	26,6	290	325	3	41,9	18,7	3,02	9998
AMTSD15	29,6	230	310	2	42,7	19,0	2,89	10710
AMTSD20	33,0	190	300	1	43,1	19,9	2,85	10812
AMTSD25	37,0	175	285	5	44,0	20,8	2,82	11154

4.3.1 Çimentoların standart kıvamına MT, SD ve A'nın etkisi

PÇ 42.5 ve AMT0 kontrol çimentoları ile AMT ve AMTSD çimento hamurlarının standart kıvam suyu ihtiyaçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.4'te ise çimento tipi ile standart kıvam suyu ilişkisi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kontrol çimentosu AMT0'ın standart kıvam suyu ihtiyacı PÇ 42.5'e göre azalmıştır. Başka bir deyişle fosfojips ile üretilen çimento tipinin su ihtiyacı doğal alçı ile üretilen PÇ 42.5'e göre daha azdır.

Yine Şekil 4.1'den AMT0'a göre MT katkılı çimentoların kıvam suyu ihtiyacı çimento içindeki MT oranı % 9'a kadar azalırken bu orandan sonra artış göstermektedir. Standart kıvam suyu ihtiyacı en düşük ve en yüksek olan çimento hamurları sırasıyla AMT9 ve AMT25 olarak belirlenmiştir. Çimento karışımındaki MT oranı % 12'ye ulaştığında kıvam suyu ihtiyacı tekrar artış göstermekte, karışımındaki MT oranı artmaya devam ettikçe su ihtiyacı da artmaktadır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi AMTSD çimento hamurlarında ise standart kıvam suyu ihtiyacı SD ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu grupta standart kıvam suyu ihtiyacı en düşük ve en yüksek olan çimento hamurları sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni; Çizelge 3.5'ten de görüldüğü gibi SD'nin ince ve özgül yüzeyi çok yüksek bir malzeme olmasıdır. Çimento içerisinde kullanılan SD oranı artışı, çimentonun özgül yüzey alanını arttırdığından çimentonun suya olan ihtiyacını da doğrusal olarak arttırmaktadır.



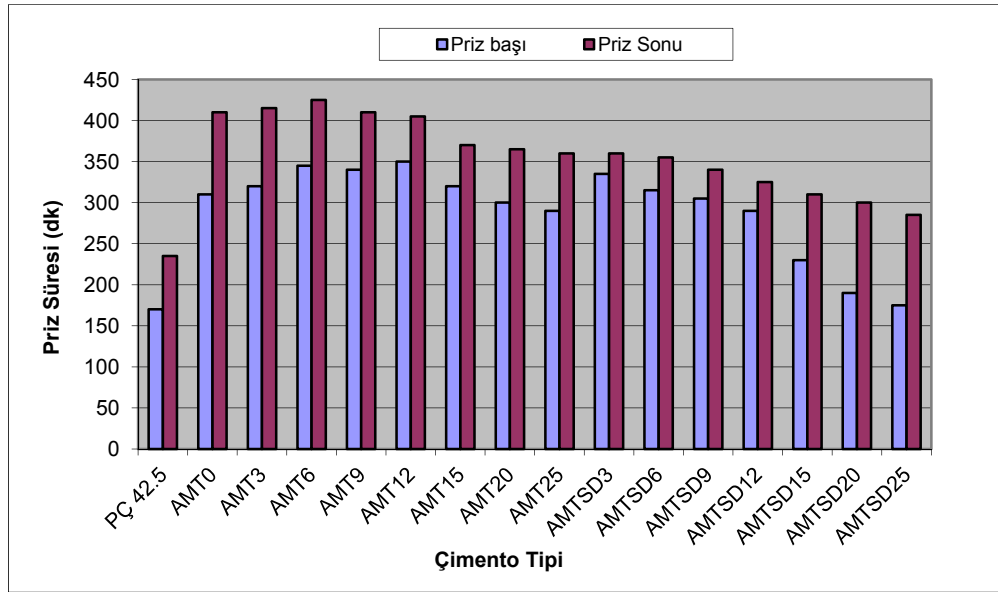
Şekil 4.4. Çimento tipi ile standart kıvam suyu ilişkisi

4.3.2. Çimentoların priz süresine MT, SD ve A'nın etkisi

Çimentoların priz süresi deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile priz süreleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir. TS EN 197-1'e göre çimentoların 1 saatten (60 dk) önce prize başlamaması gerekmektedir. Deneye tabi tutulan çimentolar arasında en düşük priz başı ve priz sonu değerleri kontrol çimentosu olan ve laboratuvarında üretilen PÇ 42.5'te elde edilmiştir. Diğer kontrol çimentosu olan AMT0'ın priz başı ve priz sonu değerlerinin PÇ 42.5'e göre sırasıyla 140 dk ve 175 dk fazla olduğu görülmektedir. Buna neden olarak AMT0 karışımında alçı olarak fosfojips kullanılması gösterilebilir. Genel olarak çimento üretiminde doğal alçı yerine kullanılan fosfojipsin priz sürelerini arttırdığı söylenebilir.

AMT çimentolarının priz başı değerleri kontrol çimentosu AMT0'a göre, karışımında kullanılan MT oranı % 12'ye kadar artmış, bu orandan sonra azalma göstermiştir. AMT çimentolarının priz sonu değeri ise AMT0'a göre, karışımında kullanılan MT oranı % 6'ya kadar artmış, bu orandan sonra azalmıştır. Bu grupta priz başı değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMT25 ve AMT12, priz sonu değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar ise sırasıyla AMT25 ve AMT6 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi AMTSD çimentoların priz başı ve priz sonu değerleri ise SD ile ters orantılı olarak azalma göstermiştir. Bu grupta hem priz başı hem de priz sonu değerleri bakımından en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMTSD25 ve AMTSD3 olarak belirlenmiştir.

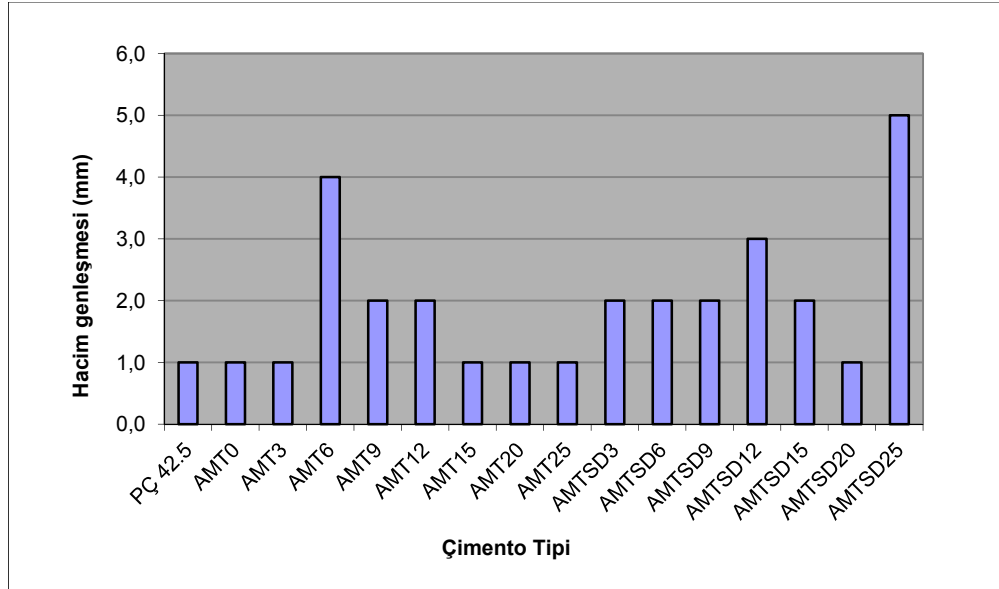


Şekil 4.5. Çimento tipi ile priz değerleri ilişkisi

4.3.3. Çimentoların hacim genişlemesine MT, SD ve A'nın etkisi

Çimentoların hacim genişmesi deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile hacim genişmesi arasındaki ilişki ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir. TS EN 197-1'e göre çimento hamurunda hacim genişmesi değeri en çok 10 mm ile sınırlandırılmıştır. Kontrol çimentoları PÇ 42.5 ve AMT0 dahil olmak üzere MT ve SD katkılı bütün çimentoların hacim genişmesi değerleri standartta verilen sınır değerinin oldukça altındadır. PÇ 42.5, AMT0, AMT3, AMT15, AMT20, AMT25 ve AMTSD20 çimentolarındaki hacim genişmesi değerleri 1 mm olarak birbirlerine eşit tespit edilmiştir. AMT çimento grubunda hacim genişmesi değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMT0, AMT3, AMT15, AMT20, AMT25 ve AMT6'da elde edilmiştir.

AMTSD çimento grubunda ise hacim genleşmesi değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMTSD20 ve AMTSD25 olarak belirlenmiştir.



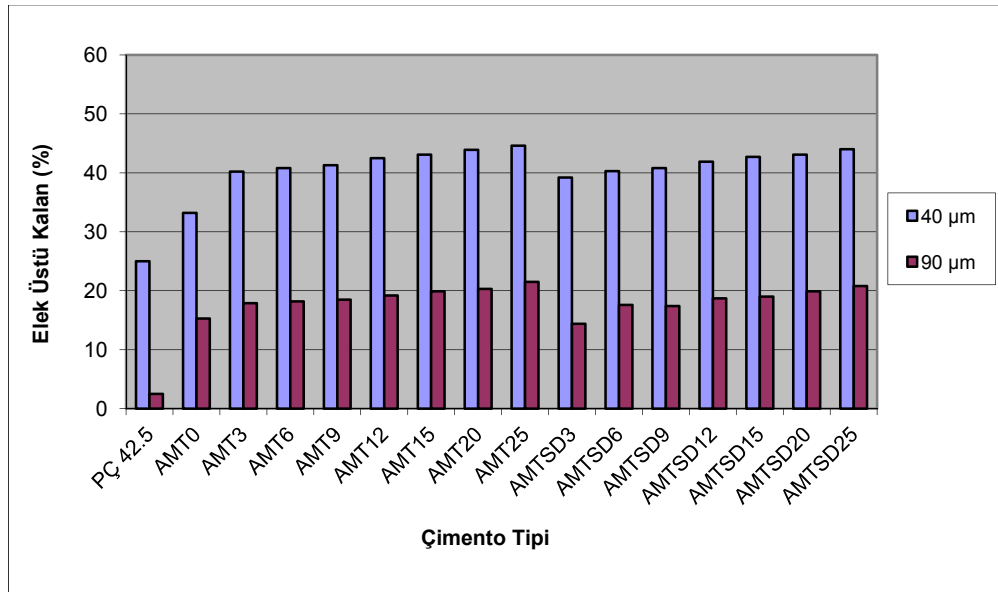
Şekil 4.6. Çimento tipi ile hacim genleşmesi ilişkisi

4.3.4. Çimentoların inceliğine MT, SD ve A'nın etkisi

Çimentoların 40 μm ve 90 μm elek üstü kalan deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile 40 μm ve 90 μm elek üstü değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir. İlgili standart TS EN 197-1'de çimentoların 40 μm ve 90 μm elek üstü değerleri ile ilgili olarak herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır. PÇ 42.5 ile AMT0 kontrol çimento tiplerinin 40 μm ve 90 μm elek üstü değerlerine bakıldığında AMT0 kontrol çimentosunda daha yüksek değerler elde edildiği görülmektedir.

AMT çimentolarının 40 μm ve 90 μm elek üstü değerleri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT oranı arttıkça elek üstü kalan değerlerde artış göstermiştir. Başka bir deyişle MT oranı ile 40 μm ve 90 μm elek üstü değerleri arasında doğru bir ilişki vardır. Bu grupta 40 μm ve 90 μm elek üstü değerleri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMT3 ve AMT25 olarak belirlenmiştir.

AMTSD çimento grubunda ise 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT ve SD oranı arttıkça elek üstü kalan değerlerde artış göstermiştir. Başka bir deyişle MT ve SD oranı ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri arasında doğru bir ilişki vardır. Bu grupta 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Çimento tipi ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri ilişkisi

4.3.5. Çimentoların özgül yüzeyine MT, SD ve A'nın etkisi

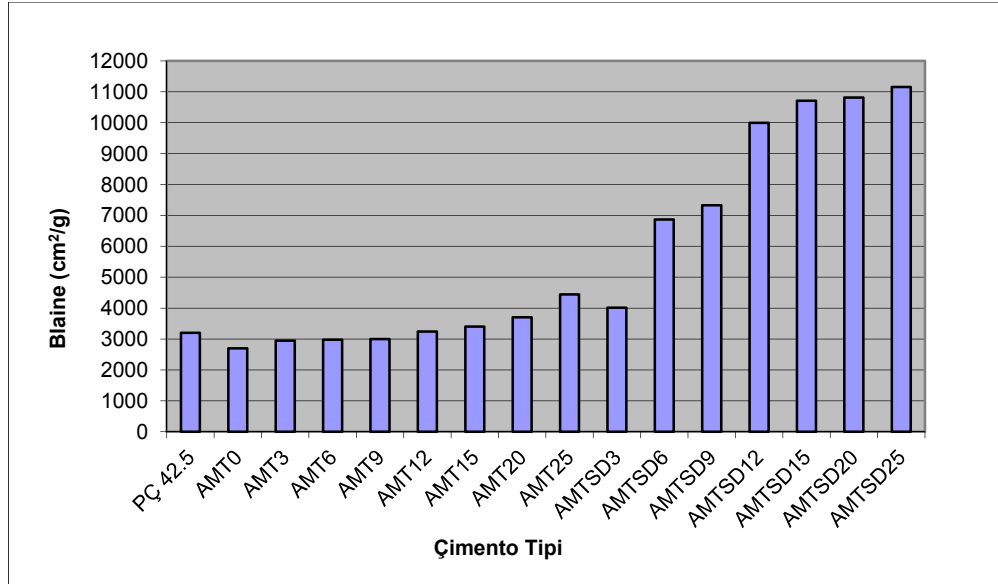
Çimentoların özgül yüzey deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile özgül yüzey arasındaki ilişki ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü tarafından 2002'de yürürlükten kaldırılan TS 10156 katkı çimento standardına göre katkı çimentoların özgül yüzeyinin en az 2800 cm²/g olması öngörülmüşken, yürürlükteki TS EN 197-1'de çimentoların özgül yüzeyi ile ilgili olarak herhangi bir sınırlama getirilmemiştir.

Kontrol çimentoları PÇ 42.5 ile AMT0 birbirleriyle karşılaştırıldığında, AMT0'ın özgül yüzeyinin PÇ 42.5'ten daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, öğütme

süresi eşit olduğundan karışımda kullanılan A'nın öğütülebilirliğinin az, diğer bir ifade ile daha sert bir malzeme olması ile açıklanabilir.

AMT çimentolarının özgül yüzey değerleri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, 40 μm ve 90 μm elek üstü değerlerinde olduğu gibi karışımda kullanılan MT oranı arttıkça özgül yüzey değerleri de artış göstermiştir. Başka bir deyişle MT oranı ile özgül yüzey değerleri arasında doğrusal bir orantı vardır. Bu grupta özgül yüzey değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar 40 μm ve 90 μm elek üstü değerlerinde olduğu gibi sırasıyla AMT3 ve AMT25 olarak belirlenmiştir.

AMTSD çimento grubunda ise özgül yüzey değeri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT ve SD oranı arttıkça özgül yüzey değerleri artış göstermiştir. Başka bir deyişle MT ve SD oranı ile özgül yüzey değeri arasında doğru bir ilişki vardır. Bu grupta özgül yüzey değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar 40 μm ve 90 μm elek üstü değerlerinde olduğu gibi sırasıyla AMT3 ve AMT25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Çimento tipi ile özgül yüzey ilişkisi

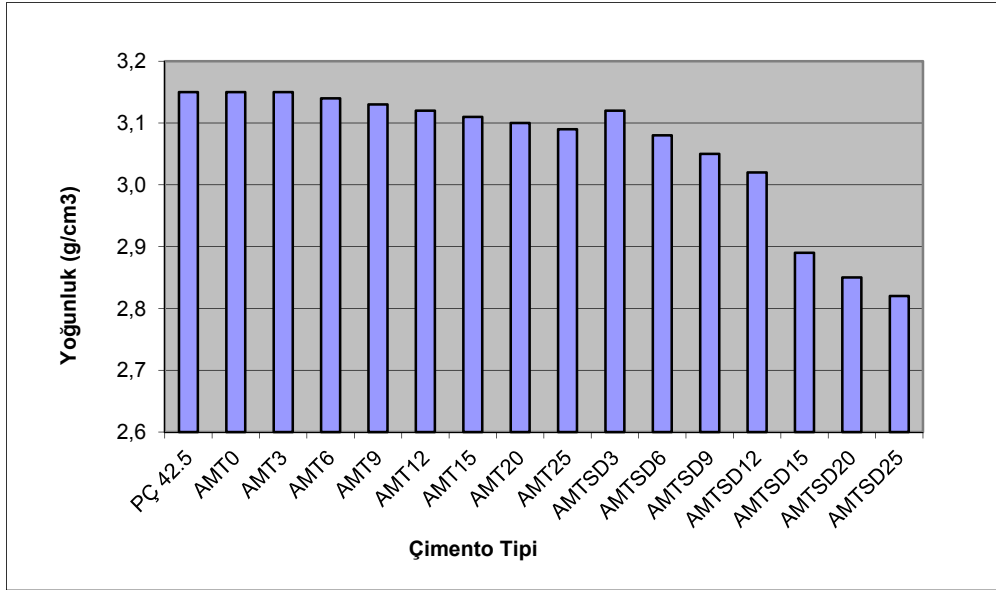
4.3.6. Çimentoların yoğunluğuna MT, SD ve A'nın etkisi

Çimentoların yoğunluk deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile yoğunluk arasındaki ilişki ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Çimentonun yoğunluğu ile ilgili TS EN 197-1'de herhangi bir sınırlama yoktur.

Kontrol çimentoları PÇ 42.5 ile AMT0 birbirleriyle karşılaştırıldığında, her iki çimentonun yoğunluğunun da eşit olduğu görülmektedir.

AMT çimentolarının yoğunluk değerleri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT oranı arttıkça yoğunluk değerleri çok az da olsa azalmıştır. Başka bir deyişle MT oranı ile yoğunluk değerleri arasında ters bir orantı vardır. Bu grupta yoğunluk değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMT25 ve AMT3 olarak belirlenmiştir.

AMTSD çimento grubunda ise yoğunluk değeri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT ve SD oranı arttıkça yoğunluk değerleri azalmıştır. Başka bir deyişle MT ve SD oranı ile yoğunluk değeri arasında ters bir orantı vardır. Bu grupta yoğunluk değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMTSD25 ve AMTSD3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Çimento tipi ile yoğunluk ilişkisi

4.4. MT, SD ve A Katkılı Çimentolu Harçların Özellikleri

4.4.1. Harçların birim ağırlığına MT, SD ve A'nın etkisi

Harçların birim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.2'de, harçlarda çimento tipi ile birim ağırlık arasındaki ilişki ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Çimento harçlarının birim ağırlıkları

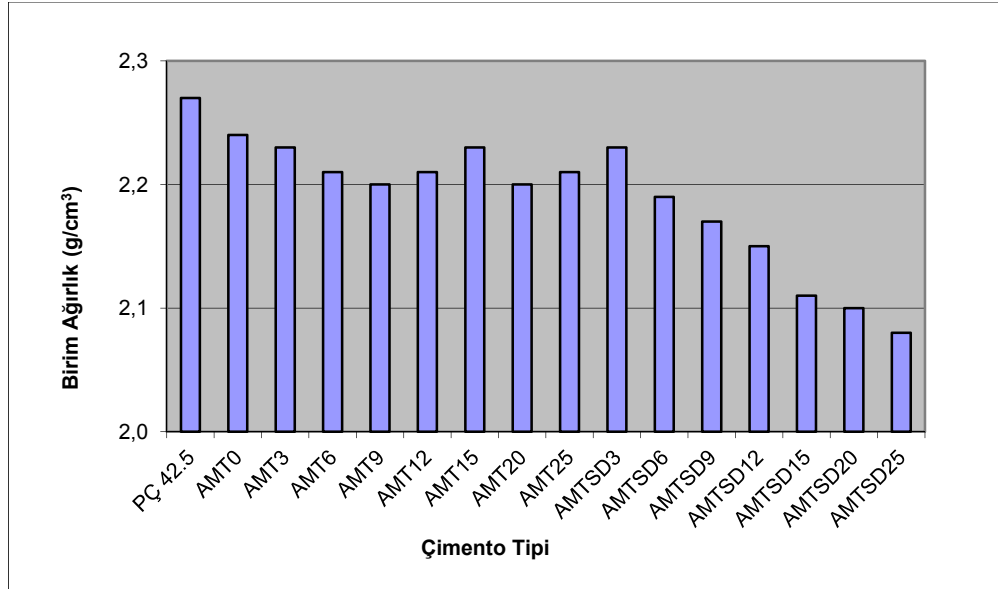
Çimento tipi	Birim ağırlık (g/cm ³)
PÇ 42.5	2,27
AMT0	2,24
AMT3	2,23
AMT6	2,21
AMT9	2,20
AMT12	2,21
AMT15	2,23
AMT20	2,20
AMT25	2,21
AMTSD3	2,23
AMTSD6	2,19
AMTSD9	2,17
AMTSD12	2,15
AMTSD15	2,11
AMTSD20	2,10
AMTSD25	2,08

Kontrol çimento harçları PÇ 42.5 ile AMT0 birbirleriyle karşılaştırıldığında, AMT0'ın birim ağırlığının PÇ 42.5'ten az olduğu görülmektedir.

AMT çimento harçlarının birim ağırlık değerleri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT oranı arttıkça birim ağırlık değerleri genel olarak azalmıştır. Bu grupta birim ağırlık değeri en düşük ve en yüksek olan çimento harçları sırasıyla AMT9 ile AMT20 ve AMT3 ile AMT15 olarak belirlenmiştir.

AMTSD çimento grubunda ise çimento harçlarının birim ağırlık değeri kontrol çimentosu AMT0 ile karşılaştırıldığında, karışımda kullanılan MT ve SD oranı arttıkça birim ağırlık değerleri azalmıştır. Başka bir deyişle MT ve SD oranı ile birim ağırlık değeri arasında ters bir orantı vardır. Bu grupta birim ağırlık değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar sırasıyla AMTSD25 ve AMTSD3 olarak belirlenmiştir. Buna neden olarak şunlar söylenebilir: AMTSD çimentoları daha çok suya ihtiyaç gösterdiğinden harç karışımı AMT grubuna göre daha katı kıvamda

olmuştur. Dolayısıyla harçlar kalıpların içerisine tam olarak yerleşmemekte, bu da numunelerin boşluklu olmasına neden olmaktadır.



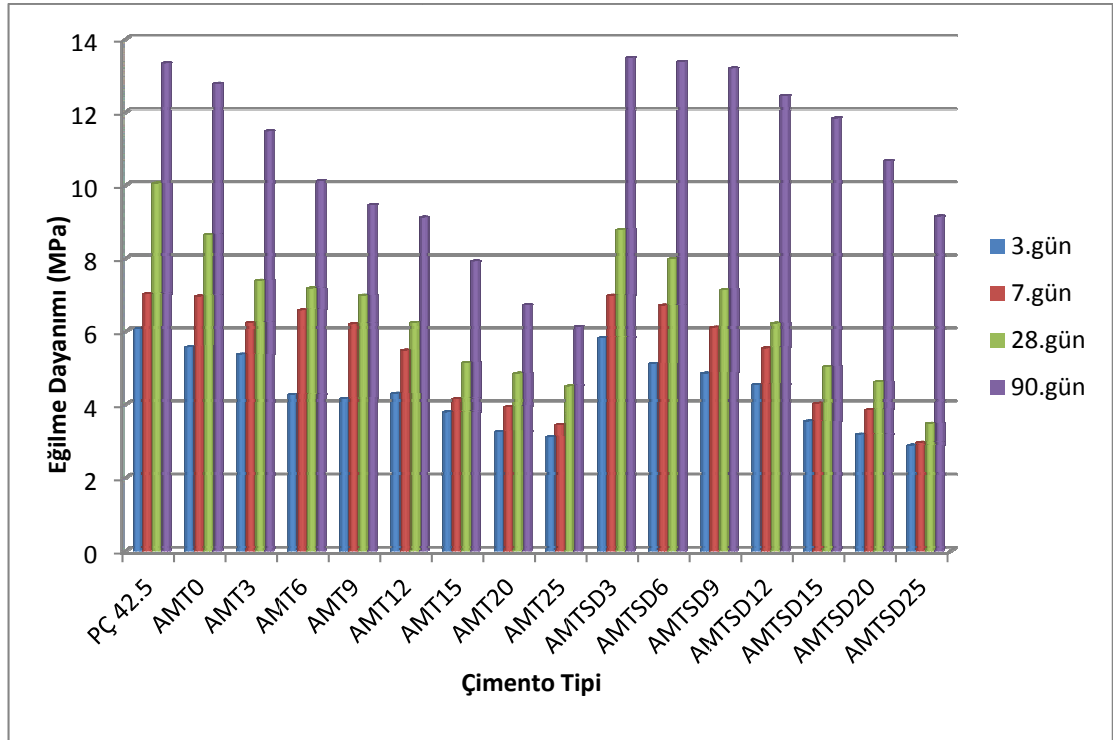
Şekil 4.10. Harçlarda çimento tipi ile birim ağırlık ilişkisi

4.4.2. Harçların eğilme dayanımlarına MT, SD ve A'nın etkisi

Laboratuvarıda üretilen MT, SD ve A katkılı çimento harçlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3'te, harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çimento tiplerinin eğilme dayanımları

Harç Tipi	Eğilme Dayanımı (Mpa)			
	Numune yaşı (gün)			
	3	7	28	90
PÇ 42.5	6,07	7,02	10,05	13,34
AMT0	5,57	6,96	8,78	12,78
AMT3	5,37	6,24	7,39	11,48
AMT6	4,27	6,58	7,18	10,12
AMT9	4,16	6,20	6,98	9,46
AMT12	4,30	5,48	6,24	9,12
AMT15	3,79	4,15	5,14	7,92
AMT20	3,25	3,93	4,85	6,72
AMT25	3,11	3,44	4,50	6,13
AMTSD3	5,82	6,98	8,64	13,49
AMTSD6	5,12	6,71	7,98	13,38
AMTSD9	4,85	6,11	7,13	13,20
AMTSD12	4,54	5,54	6,22	12,45
AMTSD15	3,54	4,03	5,03	11,83
AMTSD20	3,18	3,85	4,62	10,67
AMTSD25	2,88	2,96	3,48	9,15



Şekil 4.11. Harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi

Kontrol çimento harçlarının 3 günlük eğilme dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 eğilme dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 3 günlük eğilme dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 92 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 3 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 89, % 70, ~ % 69, ~ % 71, ~ % 62, ~ % 54 ve % 51'dir. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 96, ~ % 77, ~ % 75, % 77, % 68 % 58 ve ~ % 56'dır. Sonuç olarak 3 günlük eğilme dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 3 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 96, ~ % 84, ~ % 80, ~ % 75, ~ % 58, ~ % 52 ve ~ % 47 iken, AMT0 eğilme dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 105, ~ % 92, ~ % 87, ~ % 82, ~ % 64, ~ % 57 ve ~ % 52 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı eğilme dayanımı AMT0'dan yüksektir.

3 günlük eğilme dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, çimentoda kullanılan MT oranı % 12'ye kadar AMTSD dayanımları AMT'den, kullanılan MT oranı % 15 ve üzerinde ise AMT dayanımları AMTSD grubundan yüksek elde edilmiştir.

Kontrol çimento harçlarının 7 günlük eğilme dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 eğilme dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 3 günlük eğilme dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 99 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 7 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 89, ~ % 94, ~ % 88, ~ % 78, ~ % 59, ~ % 56 ve % 49'dur. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 90, ~ % 95, ~ % 89, ~ % 79, ~ % 60 ~ % 56 ve ~ % 49'dur. Sonuç olarak 7 günlük eğilme dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 7 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 99, ~ % 96, ~ % 87, ~ % 79, ~ % 57, ~ % 55 ve ~ % 42 iken, AMT0 eğilme dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 100, ~ % 96, ~ % 88, ~ % 80, ~ % 58, ~ % 55 ve % 43 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı eğilme dayanımı AMT0'dan yüksektir.

7 günlük eğilme dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, çimentoda kullanılan MT oranı % 6'ya kadar AMTSD dayanımları AMT'den, kullanılan MT oranı % 9 ve üzerinde ise AMT dayanımları AMTSD grubundan yüksek elde edilmiştir.

Kontrol çimento harçlarının 28 günlük eğilme dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 eğilme dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 28 günlük eğilme dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 87 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 28 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 74, ~ % 71, ~ % 69, ~ % 62 ~ % 51, ~ % 48 ve % 45'tir. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla

~ % 84, ~ % 82, ~ % 80, ~% 71, ~% 59, ~% 55 ve ~ % 51'dir. Sonuç olarak 28 günlük eğilme dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 28 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 86, ~% 79, ~ % 71, ~ % 62, % 50, ~ % 46 ve ~% 35 iken, AMT0 eğilme dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 98, ~ % 91, ~ % 81, ~ % 71, ~ % 57, ~ % 53 ve % 40 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı eğilme dayanımı AMT0'dan yüksektir.

28 günlük eğilme dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, çimentoda kullanılan MT oranı % 9'a kadar AMTSD dayanımları AMT'den, kullanılan MT oranı % 12 ve üzerinde ise AMT dayanımları AMTSD grubundan yüksek elde edilmiştir.

Kontrol çimento harçlarının 90 günlük eğilme dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 eğilme dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 90 günlük eğilme dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 96 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 90 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; % 86, ~ % 76, ~ % 71, ~ % 68 ~ % 59, ~ % 50 ve ~ % 46'dır. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 90, ~ % 79, ~ % 74, ~ % 71, ~ % 62, ~ % 53 ve ~ % 48'dir. Sonuç olarak AMT grubunda 90 günlük eğilme dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 90 günlük eğilme dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 eğilme dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 101, ~ % 100, ~ % 99, ~ % 93, ~ % 89, ~ % 80 ve ~ % 69 iken, AMT0 eğilme dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 105, ~ % 105, ~ % 103, ~ % 97, ~ % 93, ~ % 83 ve ~ % 72 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı eğilme dayanımı AMT0'dan yüksektir.

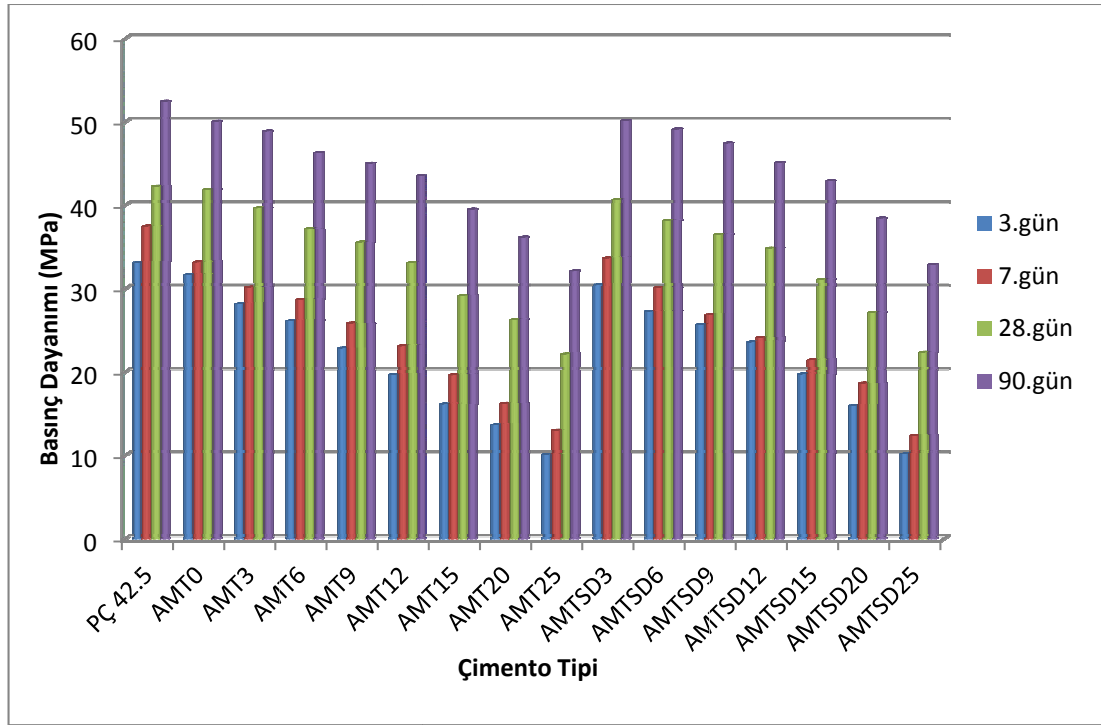
90 günlük eğilme dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, bütün oranlardaki AMTSD dayanımları AMT grubundaki dayanımlardan yüksek elde edilmiştir.

4.4.3. Harçların basınç dayanımlarına MT, SD ve A'nın etkisi

Laboratuvarda üretilen MT, SD ve A katkılı çimento harçlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.4'te, harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Çimento tiplerinin basınç dayanımları

Harç Tipi	Basınç Dayanımı (Mpa)			
	Numune yaşı (gün)			
	3	7	28	90
PÇ 42.5	33,10	37,48	42,25	52,45
AMT0	31,65	33,18	41,85	50,05
AMT3	28,15	30,15	39,66	48,88
AMT6	26,12	28,67	37,15	46,28
AMT9	22,85	25,85	35,56	45,01
AMT12	19,67	23,11	33,11	43,54
AMT15	16,14	19,64	29,15	39,50
AMT20	13,64	16,22	26,24	36,15
AMT25	10,10	12,98	22,13	32,10
AMTSD3	30,45	33,65	40,65	50,15
AMTSD6	27,25	30,12	38,14	49,12
AMTSD9	25,66	26,85	36,48	47,44
AMTSD12	23,58	24,13	34,83	45,10
AMTSD15	19,74	21,43	31,08	42,92
AMTSD20	15,95	18,64	27,12	38,45
AMTSD25	10,18	12,36	22,35	32,88



Şekil 4.12. Harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi

3 günlük basınç dayanımları arasında en yüksek basınç dayanımı beklendiği gibi PÇ 42.5 harcında elde edilmiştir. Kontrol çimento harçlarının 3 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 basınç dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 3 günlük basınç dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı $\sim$ % 96 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 3 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla % 85, % 79, % 69, % 59, % 49, % 41 ve % 31'dir. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla $\sim$ % 89, % 83, % 72, % 62, $\sim$ % 51 % 43 ve $\sim$ % 32'dir. Sonuç olarak 3 günlük basınç dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 3 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla; $\sim$ % 92, % 82, $\sim$ % 78, % 71, $\sim$ % 60, % 48 ve $\sim$ % 31 iken, AMT0 basınç dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla $\sim$ % 96, % 86, % 81, $\sim$ % 75, $\sim$ % 62, $\sim$ % 50 ve % 32 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı basınç dayanımı AMT0'dan yüksektir.

3 günlük basınç dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, AMTSD grubu harçların basınç dayanımları bütün katkı oranlarında AMT grubu harçların dayanımlarından daha yüksek elde edilmiştir.

7 günlük basınç dayanımları arasında en yüksek basınç dayanımı beklendiği gibi PÇ 42.5 harcında elde edilmiştir. Kontrol çimento harçlarının 7 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 basınç dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 7 günlük basınç dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı $\sim$ % 86 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 7 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla ~ % 80, ~ % 77, ~ % 69, ~ % 62, ~ % 52, ~ % 43 ve ~ % 35'tir. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 91, ~ % 86, ~ % 78, ~ % 70, ~ % 59, ~ % 49 ve ~ % 39'dur. Sonuç olarak 7 günlük basınç dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 7 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 90, ~ % 80, ~ % 72, ~ % 64, ~ % 57, ~ % 50 ve ~ % 33 iken, AMT0 basınç dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 101, ~ % 91, ~ % 81, ~ % 73, ~ % 65, ~ % 56 ve ~ % 37 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı basınç dayanımı AMT0'dan yüksektir.

7 günlük basınç dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, çimentoda kullanılan MT oranı % 15'e kadar AMTSD dayanımları AMT'den, kullanılan SD oranı % 20 ve üzerinde ise AMT dayanımları AMTSD grubundan yüksek elde edilmiştir.

28 günlük basınç dayanımları arasında en yüksek basınç dayanımı beklendiği gibi PÇ 42.5 harcında elde edilmiştir. Kontrol çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 basınç dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 28 günlük basınç dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 99 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 28 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla ~ % 94, ~ % 88, ~ % 84, ~ % 78, ~ % 69, ~ % 62 ve ~ % 52'dir. Bu

gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 95, ~ % 89, ~ % 85, ~ % 79, ~ 70, ~ % 63 ve ~ % 53'tür. Sonuç olarak 28 günlük basınç dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 28 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 96, % 90, ~ % 86, % 82, ~ % 74, % 64 ve ~ % 53 iken, AMT0 basınç dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 97, ~ % 91, ~ % 87, ~ % 83, ~ % 74, ~ % 65 ve ~ % 50 olarak bulunmuştur.

28 günlük basınç dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, AMTSD grubu harçların basınç dayanımları bütün katkı oranlarında AMT grubu harçların dayanımlarından daha yüksek elde edilmiştir.

90 günlük basınç dayanımları arasında en yüksek basınç dayanımı beklendiği gibi PÇ 42.5 harcında elde edilmiştir. Kontrol çimento harçlarının 90 günlük basınç dayanımları birbirleriyle kıyaslandığında, PÇ 42.5 basınç dayanımı AMT0 harcından daha yüksek elde edilmiştir. AMT0 harcı 90 günlük basınç dayanımının PÇ 42.5 dayanımını karşılama oranı ~ % 95 olarak gerçekleşmiştir.

AMT grubu harçlarının 90 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMT3 ve AMT25 harçlarında elde edilmiştir. AMT katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla ~ % 93, ~ % 88, ~ % 86, ~ % 83, ~ % 75, ~ % 69 ve ~ % 61'dir. Bu gruptaki harçların diğer kontrol harcı AMT0 dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 98, % 92, % 90, % 87, ~ % 79, % 72 ve ~ % 64'tür. Sonuç olarak 90 günlük basınç dayanımlarında AMT0 harcına en yakın dayanım AMT3 harcında elde edilmiştir.

AMTSD grubu harçların 90 günlük basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek ve en düşük dayanımlar sırasıyla AMTSD3 ve AMTSD25 harçlarında elde edilmiştir. AMTSD katkılı harçların kontrol harcı PÇ 42.5 basınç dayanımını karşılama oranı sırasıyla; ~ % 96, ~ % 94, ~ % 90, ~ % 86, ~ % 82, ~ % 73 ve ~ % 63 iken, AMT0 basınç dayanımını karşılama oranı ise sırasıyla ~ % 102, ~ % 98, ~ % 95, ~ % 90, ~ % 86, ~ % 77 ve ~ % 66 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre AMTSD3 çimento harcı basınç dayanımı AMT0'dan yüksektir.

90 günlük basınç dayanımları bakımından AMT ve AMTSD harçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, AMTSD grubu harçların basınç dayanımları bütün katkı oranlarında AMT grubu harçların dayanımlarından daha yüksek elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, atık mermer tozu, silis dumanı ve fosfojipsin belirli oranlarda klinker ile birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimento ve harçlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Çimentonun standart kıvam suyu ihtiyacını fosfojips doğal alçıya göre azaltmaktadır. AMT katkılı çimentolarda MT'nin standart kıvam suyu ihtiyacına etkisi belirgin değildir. AMTSD katkılı çimentolarda ise karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça standart kıvam suyu ihtiyacı da artmaktadır.
2. Çimentonun priz sürelerini fosfojips doğal alçıya göre arttırmaktadır. AMT katkılı çimentolarda MT düşük oranlarda priz sürelerini arttırmakta, yüksek oranlarda ise azaltmaktadır. AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça priz süreleri azalmaktadır.
3. Çimentonun hacim genleşmesine fosfojipsin etkisi doğal alçı ile aynıdır. AMT ve AMTSD katkılı çimentolarda MT ve SD'nin hacim genleşmesi üzerine etkisi belirgin değildir.
4. Çimentonun 40 µm ve 90 µm elek üstü değerlerini fosfojips doğal alçıya göre arttırmakta, başka bir deyişle çimento inceliğini azaltmaktadır. AMT katkılı çimentolarda MT ve AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça inceliği azalmaktadır.
5. Çimentonun özgül yüzeyini fosfojips doğal alçıya göre azaltmaktadır. AMT katkılı çimentolarda MT, özgül yüzeyi düşük oranlarda belirgin olarak değiştirmemekte, yüksek oranlarda ise artırmaktadır. AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça özgül yüzey de artmaktadır.
6. Çimentonun yoğunluğuna fosfojipsin etkisi doğal alçı ile aynıdır. AMT ve AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD arttıkça yoğunluk değerleri azalmaktadır.
7. Çimentonun birim ağırlığını fosfojips doğal alçıya göre azaltmaktadır. AMT katkılı çimentolarda MT, birim ağırlığı genel olarak azaltmaktadır. AMTSD

katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça birim ağırlıklar azalmaktadır.

8. Harçların eğilme dayanımına fosfojipsin etkisi doğal alçıya yakındır. AMT katkılı çimentolarda MT oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır. AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır. Bütün numune yaşlarında en yüksek eğilme dayanımları AMT3 ve AMTSD3 çimento harçlarında elde edilmiştir.
9. Harçların basınç dayanımına fosfojipsin etkisi doğal alçıya yakındır. AMT katkılı çimentolarda MT oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. AMTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Bütün numune yaşlarında en yüksek basınç dayanımları AMT3 ve AMTSD3 çimento harçlarında elde edilmiştir.
10. Bütün numune yaşlarında AMTSD katkılı çimento harçlarının basınç dayanımları AMT katkılı çimento harçlarından yüksek elde edilmiştir.
11. Fosfojips Portland çimentosu üretiminde doğal alçı yerine kullanılabilir.
12. Mermer tozu, silis dumanı ve fosfojips birlikte çimento üretiminde kullanılabilir.

5.2. Öneriler

1. Çimento üretiminde fosfojips değişik oranlarda kullanılması araştırılabilir.
2. Mermer tozu ve silis dumanının daha yüksek oranlarda kullanımının çimento özelliklerine etkisi araştırılmalıdır.
3. Atık malzemelerin çimento içerisinde değerlendirilmesiyle, hem çevresel hem de ekonomik açıdan faydalar sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: As Beton, “Beton Elemanları Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ.”
http://www.as-beton.com/pdf/portland_cimentosunun_icadi.pdf, Ankara, (2005).
2. Ergi, E., Bilgin, S., Asan, A., Zeybek, S., “Endüstriyel Atık Katkılı Çimentoların Beton Dayanımı ve Donatı Korozyonuna Etkileri”, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 312-313, (2007)
3. Ramachhandran, V. S., Beaudoin, James J., “Concrete Admixtures Handbook”, *Noyes Publications*, New Jersey, 42 (2001).
4. Okucu, A., “Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Pozolanik Özellikleri”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 1-54 (1998).
5. Aruntaş, H.Y., “Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Pozolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-55 (1996).
6. Rafat, S., “Waste Materials and By-Products in Concrete”, *Department of Civil Engineering Thapar University*, India, 978-3-540-74293-7 (2008).
7. Fragoulis, D. et. al., “Zeollitic tuffs of Kimolos Island, Aegan Sea, Greece and their industrial potential”, *Cement and Concrete Research*, 27: 889-995 (1997).
8. Rousekova, I., Bajza, A. and Zivica, V., “Silica fame-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator”, *Cement and Concrete Research*, 27: 1825-1828 (1997).
9. Dhir, R. K., El-Mohr, M. A. K., Dyer, T. D., “Developing chloride resisting concrete using PFA”, *Cement and Concrete Research*, 27: 1633-1639 (1997).
10. Khatri, R. P., Sirivivatnunun, “Role of permeability in sulphate attack”, *Cement and Concrete Research*, 27: 1179-1189 (1997).
11. Grzeszczyk, S., Lipouski, G., “Effect of contents and particle size distribution of high calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 27: 907-916 (1997).
12. Ulusu, H., “Erzincan ve Nevşehir Yöresi Pomzalarının Çimentolu Sistemlerde Kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-71 (2006).
13. Taşkın, C., “Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 1-43 (1999).

14. Leckebush, R., “Türkiye’deki doğal puzolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı üzerine incelemeler”, **Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi**, Ankara, 1-27 (1984).
15. Çağatay, İ.H., Özdemir, E., “PÇ ve Silis Dumanı Mineral Katkısını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi”, **Çukurona Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi**, 1-2 (2009).
16. İnternet: Wikipedi, “Özgür Ansiklopedi Mermer”,
<http://tr.wikipedia.org/wiki/Mermer> (2012).
17. Ünal, O., Uygunoğlu, T., “Afyon Mermer Tozu ve Soma Uçucu Kül Katkılı Betonların Donma-Çözülme Özellikleri ve Ekonomik Değerlendirilmesi”, **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, (13-14 Mayıs 2004).
18. Aruntaş, H.Y., Dayı, M., Tekin, İ., Birgül, R., Şimşek, O., “Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Mermer Tozunun Etkisi”, **2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, , Ankara, 173-180 (2007).
19. İnternet: Azramaden, “Alçıtaşı, Maden işletmeciliği”,
<http://www.azramaden.com.tr> (2012).
20. Ün, H., “Yapı Malzemesi”, **Pamukkale Üniversitesi**, Denizli, 1-10 (2007).
21. “Çimento Sanayii Ön Raporu”, **Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı**, Ankara, 28-29 (2006).
22. TS EN 197-1, “Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolat- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, **Türk Standartları Enstitüsü**, 2-15, (2002).
23. Şimşek, O., “Beton ve Beton Teknolojisi”, **Seçkin Yayınevi**, Ankara, 75-119 (2004).
24. Postacioğlu, B., “Bağlayıcı Maddeler”, **Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi**, İstanbul, 5-38 (1986).
25. Ünal, M., “Atık Seramik Karoların Çimento Üretiminde Kullanılması”, **Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 1-22 (1998).
26. Eskin, C.C., “Çimentoların Katkı Maddeleri ile Birlikte veya Ayrı Öğütülmesinin Beton Dayanımı Üzerindeki Etkileri”, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1-41 (1998).
27. “DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı**, Yayın No: DPT:2614-ÖİK:625, Ankara, (2001).

28. Mumcu, U., “Çimento Üretimindeki İstikrarlı Hammadde Bileşiminin Sağlanması, Kalite ve Verimliliğin Arttırılması”, *Çimento ve Beton Dünyası*, 55: 45-49, (2005).
29. “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, *Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu*, Ankara, 17 (2001).
30. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, “Yapı Malzemeleri - I (Alçı - Kireç - Kum - Çakıl - Mıcır - Boya Toprakları - Tuğla Kiremit) Çalışma Grubu Raporu”. *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu*, DPT : 2615 - ÖİK : 626, Ankara, 2 - 5 (2001).
31. Bulgu, M., “Perlitin Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği”, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1-40, (2008).
32. Yalnız, H., “Çimento Sanayi Hammadde Ocağı Üretim Planlaması”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, İzmir, 178. (2006).
33. Kocataşkın, F., “Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyorsunuz”, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 1-20 (1978).
34. Akman, M., “Beton Teknolojisine Giriş”, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 21-29 (1994).
35. Mindess, S., Young, J.F., “Concrete”, Prentice-Hall Inc., *New Jersey*, 41-94 (1981).
36. Erdoğan, T.Y., ”Beton”, *METU Press*, Ankara, 11-63, 169-208, 572-604, (2003).
37. Moir, G.,”Cements”, Advanced Concrete Technology”, *Constituent Materials*, Ed. J. Newman, B. S. Choo, Elsevier, 1st ed. Oxford, 1-45 (2003).
38. Ertün. T., Türker, P., “Çimento Kimyası”, *TÇMB Yayını*, Ankara, 39-43 (2004).
39. Taylor, H. F. W., “Cement Chemistry”, *Thomas Telford*, London, 113-225, (1997).
40. Odler, I., “Hydration, setting and hardening of Portland cement”, In Hewlet, P. C. (ed.) *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, *Arnold*, London, 260-263, (1998).

41. Ramyar, K., Dönmez, H., Andiç, Ö., “Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması”, **TÇMB**, Proje No: **UNİPR 00/23**, Ankara, 11-55 (2002).
42. Massazza, F., “Pozzolana and Pozzolanic Cements”, Lea’s Chemistry of Cement and Concrete 4thed., **John Wiley & Sons Inc.**, New York, 471-617 (1998).
43. Cook, D. J., “Naturel Pozzolanalar, Calcined Clay, Shale and Other Soils, Rice Husk Ash - Cement Replecament Materials”, Swamy, R. N. (Edit.) **Surrey University Press**, 1-70 (1986).
44. Aruntaş, H.Y., Albayrak, M., Saka, H.A., Tokyay, M., “Investigation of Diatomite Properties from Ankara-Kızılcahamam and Çankırı-Çerkeş Regions”, **Turkish Journal of Engineering and Environmental Science**, 22, (4) 337-343, (1998).
45. Yeğınboğalı, A., Dilek, F.T., ‘Silis Dumanı Katılmış Çimento Harçlarının Sülfat Direnci’, **TÜBİTAK Proje No: INTAG-608 Sonuç Raporu**, Ankara, 1-5 (1994).
46. ASTM C 618, “Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, **ASTM, Philadelphia**, 2-16 (1985).
47. Gündeşli, U., “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması”, **Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 1-50 (2008).
48. Özturan, T., “Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği”, **2. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, 1-10 (1991).
49. Malhotra, V.M., “Mineral Admixtures. Concrete Construction Engineering Handbook”, **Nawy Edward G. CRC Pres**, New York, 27-36, (1997).
50. Kuşçu, M., Bağcı, M. “Afyon Mermer Sektörü ve Türkiye Mermer Sektöründeki Yeri”, **Türkiye IV. Mermer Sempozyumu**, Sempozyum Kitabı, pp.127-137, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 1-10, (2003).
51. Kıvrak, J., “Silis Dumanı Katkılı Kerpiçlerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması”, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1-18, (2207).
52. Temiz, H., Yeğınobalı, A., “Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Özellikleri”, **İnönü Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu, Malatya, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl.**, Ankara, 1-60.
53. Şimşek, O., “Yapı Malzemesi”, **2. Ankara Üniversitesi Basımevi**, 2-90, (2000).

54. Eti Elektrometalurji A.Ş., “Yıllık Üretim Raporu (yayınlanmamış)”, **Eti Elektrometalurji A.Ş. Antalya**, 1-10, (2012).
55. Ergi, E., Bilgin, S., Asan, A., Zeybek, S., “Endüstriyel Atık Katkılı Çimentoların Beton Dayanımı ve Donatı Korozyonuna Etkileri”, **Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, 1-20 (2002).
56. Engin, Ö., Sümer, A., Tolluoğlu, A., Ü., Erkan, Y., **Türkiye II. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, Afyon, 1-20 (1997).
57. Karaman, S., Şahin, S., Örüng, İ., Pabuçcu, K., “Ağaç Yaprığı ve Pomza Katkılı Alçı Kompozitlerin Tarımsal Yapılarda Kullanılabilme Olanaklarının Araştırılması”, **Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 1 (1) : 1 – 8 (2006).
58. Kavas, T., Kibıcı, Y., “Afyon Bölgesi Mermer Atıklarının Portland Kompoze Çimentosu Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanım Olanakları”, **Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM’2001) Bildiriler Kitabı**, Afyon, 328-333, (2001).
59. Gürer, C., Akbulut, H. “Ocak Atığı Mermerler İçin Alternatif Bir Atık Değerlendirme Yöntemi”, **6.Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi**, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 1-10 (2005).
60. Çelik, M.Y., “Mermer Atıklarının (Parça-Tozların) Değerlendirilmesi”, **Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyonkarahisar 1-10 (1996).
61. Onargan, T., Köse H., **Mermer, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, İzmir (1997).
62. Tesarek, P., Drchalova, J., Klisko, J., Rovnanikova, P., Cerni, N., “Fuel Gas Desulfurization Gypsum : Study of Basic Mechanical, Hydric and Thermal Properites”. **Construction and Building Materials**, Makale baskıda, 1 – 10 (2006).
63. Küçükyavuz, O., “Alçı Üretim Tesisi Sanayi Profili”. **T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Sanayi Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Yayınları**, Ankara, 2 (1997).
64. Özdemir, O., “Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri**, Ankara, 1-62 (2007).
65. Yalçın, H., Gürü, M., “Malzeme Bilgisi”, **Palme Yayıncılık**, Ankara, 437 – 450 (2002).

66. TS EN 196-2, “Çimento Deney Metotları - Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, 22-32, (2010).
67. TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: “Priz Süresi ve Genleşme Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2-6,(2012).
68. TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları - Bölüm 6: “İncelik Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, 2-11,(2010).
69. TS EN 196-1, “Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: “Dayanım Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, 16-18, (2009).
70. İnternet: Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi “Aralık Ayı Su Analizi”, <http://www.aski.gov.tr/m.asp?TID=48&bolge=YENIMAHALLE&PN=1&TPN=1#arsiv> (2011).

EKLER

EK-1. Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.1. Çimento üretiminde kullanılan klinker ve atık mermer tozu



Resim 1.2. Çimento üretiminde kullanılan doğal alçı taşı ve atık alçı (fosfojips)

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.3. Klinkerin öğütülmesinde kullanılan çeneli kırıcı ve çimento numunelerinin paketlenmesi



Resim 1.4. Malzemelerin etüvde kurutulması ve çelik bilyalar

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları

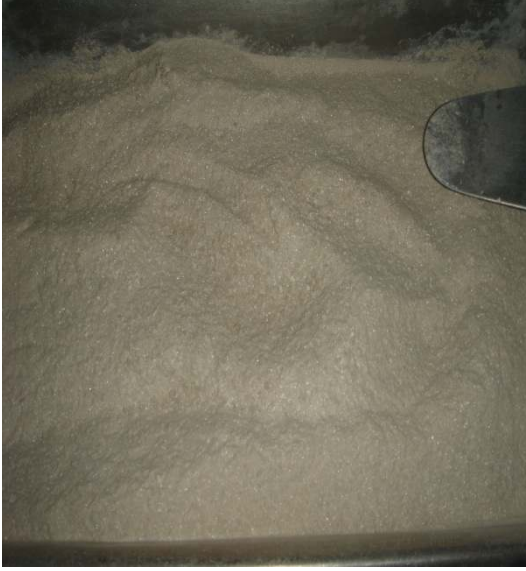


Resim 1.5. Çimento üretiminde kullanılan bilyalı değirmen



Resim 1.6. Çimentoların bilyalı değirmenden alınması

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.7. Çimento tiplerinin öğütüldükten sonra elenmesi



Resim 1.8. Çimento tiplerinin paketlenmesi

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları

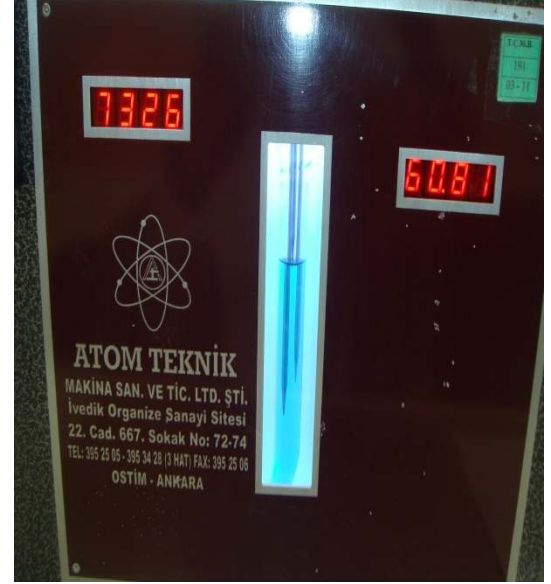


Resim 1.9. İncelik tayininde kullanılan Sartorius Basic elektronik terazi ve Alpine incelik ölçüm cihazı



Resim 1.10. İncelik deneyinin yapılışı ve Micromeritics AccuPyc yoğunluk cihazı

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.11. Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı



Resim 1.12. Harç karışımlarının hazırlanması ve mikserde karıştırılması.

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.13. Harçların kalıplara konulması



Resim 1.14. Harçların kalıptan çıkarılıp tel sepetlere konulması ve laboratuvar koşullarında kür edilmesi

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.15. Harçların nemli bezle kurulanması ve tartılması



Resim 1.16. Harç numuneleri

EK-1 (Devam) Yapılan deneysel çalışma fotoğrafları



Resim 1.17. Harç numunelerine eğilmede çekme deneyi uygulanması



Resim 1.18. Harç numunelerine basınç deneyi uygulanması

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SAĞLAM, Gülsüm
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 12.02.1985 Bartın
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (532) 704 84 33
e-mail : gsglm.saglam@gmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü	2010
Ön Lisans	Ankara Üniversitesi KMYO. İnşaat Teknikeri	2007
Lise	Bartın Köksal Toptan Lisesi Sayısal / Yabancı dil ağırlıklı	2003

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Halk oyunları, basketbol, sosyal projeler ve gönüllülük faaliyetleri, yapı tasarımı gezi inceleme aktivitelerine katılma.