



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**ATIK LASTİK VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ
ÇİMENTOLARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ÇİMENTO
HARÇLARININ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Lale ALPASLAN

HAZİRAN 2012

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Lale ALPASLAN tarafından hazırlanan ATIK LASTİK VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ ÇİMENTOLARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ÇİMENTO HARÇLARININ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.06.2012 tarih ve 2012/194 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye
(Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK
Düzce Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Kürşat YILDIZ
Gazi Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2012

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Lale ALPASLAN'ın Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Doç. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarımı ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22.06.2012

Lale ALPASLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında deneyimleriyle ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren, her türlü konuda yardımcı olan ve sabrını eksik etmeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Standart çimento deneylerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen başta SET Ambarlı Çimento Tesisi yöneticileri, Levent ÖZER ve tüm laboratuvar çalışanlarına; XRD analizlerini için D.P.Ü. Seramik Mühendisliği bölümüne, FT-IR analizini için D.P.Ü. Fizik bölümüne, SEM çekimleri için yardımcı olan Fatih Üniversitesi Biyonanoteknoloji laboratuvarı çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Deney numuneleri hazırlanmasında olanak sağlayan Zincirlikuyu İsov Yapı Meslek Lisesi İnşaat Teknolojisi alan şefi ve desteklerini esirgemeyen tüm İnşaat Teknolojisi öğretmenlerine teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2011.03.HD.011 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

Haziran 2012

Lale ALPASLAN

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT	3
1. GİRİŞ.....	6
2. GENEL KISIMLAR.....	9
2.1. ÇİMENTO	9
2.1.1. Çimentonun Tanımı.....	9
2.1.2. Çimentonun Tarihçesi	10
2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri	10
2.1.3.1. Kalker	11
2.1.3.2. Kil.....	11
2.1.3.3. Marn	12
2.1.3.4. Alçı Taşı.....	13
2.1.4. Çimento Hammadde Kompozisyonu	13
2.1.4.1. Silikat Modülü.....	13
2.1.4.2. Hidrolik Modül.....	14
2.1.4.3. Alümin Modülü.....	14
2.1.4.4. Kireç Doygunluk Faktörü	15
2.1.5. Çimento Hidratasyonu	16
2.1.5.1. C ₃ A Ana Bileşeninin Hidratasyonu.....	16
2.1.5.2. C ₄ AF Ana Bileşeninin Hidratasyonu.....	17
2.1.5.3. C ₃ S ve C ₂ S Ana Bileşeninin Hidratasyonu	17
2.1.5.4. Hidratasyon Isısı Ve Priz.....	18
2.2. PUZOLANLAR.....	19

2.2.1. Puzolanların Tarihçesi.....	20
2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması	21
2.2.3. Puzolanların Aktivitesi	23
2.2.4. Puzolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri.....	24
2.2.5. Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	24
2.2.5.1. Yüksek Fırın Cürufu	24
2.2.5.2. Atık Lastikler	25
2.3. MALZEME KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN	
ANALİZLER.....	27
2.3.1. X Işınları Kırınımı Tekniği İle Yapılan Analiz.....	28
2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi	
Tekniği İle Yapılan Analiz.....	28
2.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu	30
2.3.4. Zeta Potansiyel.....	31
2.3.4.1. Elektrokinetik Olay Ve Zeta Potansiyelin Ölçülmesi	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. MATERYAL	36
3.2. YÖNTEM.....	36
3.2.1. Fiziksel Analizler	37
3.2.1.1. Tane Boyut Analizi	37
3.2.1.2. Özgül Yüzey Tayini.....	37
3.2.1.3. Özgül Ağırlık Tayini	37
3.2.2. Kimyasal Analizler	38
3.2.3. Molekül Yapı Analizleri	38
3.2.4. Mineralojik Analizler	38
3.2.5. Elektrokinetik Analizler	38
3.2.6. Mikroyapı Analizleri	39
3.2.7. Standart Kıvam Tayini.....	39
3.2.8. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini.....	40
3.2.9. Hacim Genleşmesi Tayini	41
3.2.10. Eğilme Ve Basınç Dayanımı Deneyleri.....	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER	44

4.1.1. Fiziksel Analizler	44
4.1.2. Kimyasal Analizler.....	45
4.1.3. XRD Analizleri.....	46
4.1.4. Moleküler Analizler	47
4.1.5. Zeta Potansiyellerin Belirlenmesi	48
4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER.....	49
4.2.1. Su İhtiyacı, Priz Süreleri Ve Genleşme Deneyleri	50
4.2.2. Mikro Yapı Analizleri.....	52
4.3. ÇİMENTO HARÇ ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER	57
4.3.1. Eğilme Dayanımı.....	57
4.3.2. Basınç Dayanımı	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması (Massazza'ya göre)	22
Şekil 4.1. PÇ, YFC ve ALT'nin XRD analizi	46
Şekil 4.2. PÇ, ALT ve YFC'nin FT-IR spektrumları	47
Şekil 4.3. PÇ, ALT ve YFC'nin zeta potansiyeli	48
Şekil 4.4. Çimento hamurlarının su ihtiyacı.....	50
Şekil 4.5. Çimento hamurlarının genleşme değerleri.....	51
Şekil 4.6. Çimento hamurlarının priz süreleri	51
Şekil 4.7. PÇ (referans) çimento hamurunun SEM resmi	53
Şekil 4.8. YFC ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri	54
Şekil 4.9. ALT ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri	55
Şekil 4.10. YFC ve ALT ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri	56
Şekil 4.11. Çimento harç örneklerinin 2 gün sonundaki eğilme dayanımları	57
Şekil 4.12. Çimento harç örneklerinin 7 gün sonundaki eğilme dayanımları	58
Şekil 4.13. Çimento harç örneklerinin 28 gün sonundaki eğilme dayanımları.....	59
Şekil 4.14. Çimento harç örneklerinin 90gün sonundaki eğilme dayanımları.....	60
Şekil 4.15. Çimento harç örneklerinin 2 gün sonundaki basınç dayanımları.....	61
Şekil 4.16. Çimento harç örneklerinin 7 gün sonundaki basınç dayanımları.....	62
Şekil 4.17. Çimento harç örneklerinin 28 gün sonundaki basınç dayanımları	62
Şekil 4.18. Çimento harç örneklerinin 90 gün sonundaki basınç dayanımları	63

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Çimento örneklerine ait kodlar ve ikame oranları.....	36
Çizelge 3.2. Çimento harç örneklerine ait karışım miktarları	37
Çizelge 4.1. Malzemelerin fiziksel özellikleri.....	44
Çizelge 4.2. PÇ, YFC ve ALT'nin kimyasal özellikleri	45
Çizelge 4.3. Çimento hamurlarının kimyasal özellikleri.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Alümin, Al_2O_3
AM	Alümin modülü
ALT	Atık lastik tozu
C	Kireç, CaO
CH	Kalsiyum hidroksit (portlandit)
CS	Kalsiyum silikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
C₃S	Trikalsiyum silikat
C₂S	Dikalsiyum silikat
C₃A	Trikalsiyum alüminat
C₄AF	Tetrakalsiyum alüminaferrit
F	Demir oksit, Fe_2O_3
FT-IR	Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi
HM	Hidrolik modülü
LSF	Kireç doygunluk faktörü
M	Magnezyum oksit, MgO
PÇ	Portland çimentosu
Si	Silis, SiO_2
S	Kükürt trioksit, SO_3
SEM	Scanning Electron Microscope
SM	Silikat modülü
XRF	X-Işınları spektrometresi
XRD	X-Işınları difraksiyonu
YFC	Yüksek fırın cürufu

ÖZET

ATIK LASTİK VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ ÇİMENTOLARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ÇİMENTO HARÇLARININ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Lale ALPASLAN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK

Haziran 2012, 80 sayfa

Teknolojinin her geçen gün daha da ilerlemesiyle birlikte doğaya bırakılan endüstriyel atıklar, çevreye ve insan sağlığına önemli ölçüde zarar vermektedir. Bu atıkların yeniden değerlendirilmesi amacıyla çimento ve beton sektöründe geçmişten günümüze birçok çalışma yapılmıştır. Bu endüstriyel atıklardan ikisi yüksek fırın cürufu ve atık lastikler olarak dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, Portland çimentosu (PÇ), yüksek fırın cürufu (YFC) ve/veya ALT ikamelı çimentoların yüzey özelliklerinin etkileşim mekanizmaları araştırılmıştır. Çalışmada referans (PÇ), %5, %10, %15, %20 oranında YFC, %2,5, %5 oranında ALT, %2,5+2,5, %7,5+2,5, %5+5, %10+5, %15+5 YFC ve ALT, PÇ yerine ikame edilerek toplam 12 farklı çimento elde edilmiştir. PÇ, YFC ve ALT'nin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra PÇ, YFC ve ALT tanelerinin elektrokinetik potansiyelleri (zeta potansiyelleri) belirlenmiştir. PÇ, YFC ve ALT ile hazırlanan çimento hamur ve harç örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri standart çimento deneyleriyle tespit edilmiştir. Çimento hamuru örneklerinin 28 gün sonundaki mikro yapıları elektron mikroskop (SEM) ile görüntülenmiştir.

Çimento hamuru örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda; PÇ, ALT ve YFC'nin kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi değerlere bağlı olarak su miktarında, priz sürelerinde ve hacim genleşme değerlerinde farklılıklar meydana gelmiştir. Ayrıca ALT ve YFC, PÇ'ye göre farklı elektro kinetik davranışlar ve yüzey özellikleri göstermiştir. Tüm bu farklılıklar çimento harç örneklerinin eğilme ve basınç dayanımlarını etkilemiştir. Sonuç olarak YFC ve ALT'nin yüksek dayanım gösteren çimentolara belirli oranlarda katılmasıyla standart çimentoların elde edilebileceği, dolayısı ile çok fazla potansiyele sahip bu malzemelerin çimento sektöründe kullanılmasıyla da ekonomik ve ekolojik yarar sağlanabileceği düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler : Çimento, yüksek fırın cürufu, atık lastik tozu, zeta potansiyel, hidrasyon.

ABSTRACT

EFFECT OF SURFACE PROPERTIES OF CEMENTS REPLACED WASTE TIRE AND BLAST FURNACE SLAG ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

Lale ALPASLAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Construction
Education

Master of Science Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

July 2012, 80 pages

Industrial wastes, which are left to the nature, dramatically damage to person health and environment via progression of the technology with each passing day. Many studies have done in cement and concrete industry for re-assessing these wastes. Two of these industrial wastes that are blast furnace slag and waste tires take the attention.

Interaction mechanisms of the surface properties of cements, which consist of Portland cement (PC), blast furnace slag (BFS) and/or waste tire powder (WTP), were investigated in this work. In this work total 12 different cements, reference (PC) 5%, 10%, 15%, 20% BFS, 2,5%, 5% WTP, 2,5%+2,5, 7,5%+2,5, 5%+5, 10%+5, 15%+5 BFS and WTP, were obtained by the substitution of PC. Not only PC, WTP and BFS's physical, chemical, mineralogical and mechanical properties, but also PC, BFS and WTP's grains' electrokinetic potentials (zeta potentials) were determined. Physical and mechanical properties of cement paste and mortar samples, which were prepared by using PC, BFS and WTP, were determined by standard cement experiments. Micro structures of cement paste samples were observed by scanning electron microscopy (SEM) after 28 days gone.

The result of cement paste sample experiments, there were differences in setting time and volume expansion value that are depended on PC, WTP and BFS's chemical structure, specific surface and porosity values. In addition, WTP and BFS showed different electrokinetic behavior and surface properties to PC. All these differences did affect the flexural and compressive strengths of cement mortar samples. As a result, highly resistive cements can be obtained by participation of BFS and WTP in specific proportions, by this way it was considered that using these materials in cement industry provide economic and ecologic benefits.

Keywords : Cement, blast furnace slag, waste tire powder, zeta potential, hydration.

EXTENDED ABSTRACT

EFFECT OF SURFACE PROPERTIES OF CEMENTS REPLACED WASTE TIRE AND BLAST FURNACE SLAG ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

Lale ALPASLAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Construction
Education

Master of Science Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

July 2012, 80 pages

1. INTRODUCTION:

Both natural and synthetic pozzolanic additives is an area of intense research because of their advantages like cement affordability, reduction of permeability, providing chemical resistance, light weight, assessing waste products. It has been revealed that there are very limited studies on cement additives or substitution materials on the surface and interfacial interactions for years. It is considered that investigating not only physical and chemical properties of materials but also psycho-chemical properties is useful. This work is done for determining the behavior of the tire powder particle and its interactions with cement particle via zeta potential technique. For this reason, blast furnace slag (BFS) and waste tire powder (WTP) of the particle' behaviors were determined by zeta potential technique for the environmental damage that is commonly found in Turkey. Because the extensive research was done on the artificial pozzolan cement replacement or as an additive to use in class and many rare WTP, this work is done for elucidating the mechanism of interaction, and it could be a as model for the cement and concrete industry.

2. MATERIAL AND METHODS:

In the study, Portland cement (PC), blast furnace Slag (BFS) and / or waste tire powder (WTP) was used. CEN standard aggregate and Istanbul province tap water were used in the preparation in the cement mortar.

In the study, a total of 12 different mixtures are obtained with PC (M1) being the reference. The amount of PC is reduced by %, 10%, 15%, 20% by weight being substituted by the same amount of BFS and denoted by M2, M3, M4 and M5, respectively. Similarly, the amount of WTP substitution is 2.5% and 5% denoted by M6 and M7, respectively. Besides, in order to investigate the properties of ternary mixtures, the amount of PC is reduced by 2.5+2.5%, 7.5+2.5%, 5+5%, 10+5% and 10+10% by weight and substituted by amounts or different of BFS and WTP denoted by M8, M9, M10, M11 and M12, respectively. Chemical, physical, XRD, FT-IR, electro kinetic potential and SEM analyses are conducted for the samples used in the experiments. Water/cement ratio is 0.5 in all cement pastes and mortars. Cement pastes and mortars are prepared according to Turkish Standard. Water demand, volume expansion and setting time of cement paste samples are determined according to Turkish Standard. In the preparation of mortar mixtures for flexural and compressive strength experiments, 450 g of cement, 1350 g of standard sand and 225 ml of water are used in each mortar mixture according to Turkish Standard. Prepared mortars are poured into three-segmented rectangular prism moulds of size 40x40x160 mm. Flexural and compressive strengths of cement mortar samples are measured at the end of 2, 7, 28 and 90 days.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

According to results of the experiment, the fine particle size range and high specific surface area material with PC and then lower BFS are ordered. Volume expansions of these materials have expansion value under TS196 -3, where the lower limit value of 10 mm and it was found that it is not constitute any problem in terms of volume expansion. Depending on values in PC, WTP and BFS substituted cements such as chemical structure, specific surface and porosity WTP needs more water for hydration than BFS. According to decaying of mineralogical structure of compounds and amount of reactive compounds, WTP's setting time has been extended while BFS's setting time is getting shorten. PC and WTP have crystal structure; while the BFS has amorphous structure which is consisting SiO₂, Al₂O₃, and CaO. Pozzolanic properties are important

subtleties for coming together of particles surface loads. SEM images of cement pastes substituted PC, WTP, and BFS are analyzed, different diameters and hollow structures were formed during the formation of hydrated products both the reference cement paste particle interactions.

Due to the experimental results in the duration of hydration BFS is continued to pozzolanic reaction, therefore CHs in medium converted to CHS gel, so it could be said they contribute to flexural and compressive strength. In WTP-substituted cement mortars, it has been observed that a negative effect on compressive strength of cement, because WTP is not cement material. According to SEM pictures; WTP particle is covered with hydration products, but there was segregation because of inability to adherence and that is observed that it has a negative effect on the compressive strength. In general after 28 days, It has been obtained that M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 and M9 coded samples strength values were over the minimum compressive strength of 42.5 MPa for CEM I cement values. Even though M10, M11 and M12 coded mortar samples were below this value, they had value over the 32.5MPa. This is especially the relatively high strength cements which BFS, WTP, or the addition of certain amounts of both; it shows that a lower strength can be obtained from a standard cement at the first stage.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

Results of cement paste's experiments, there has been differences in PC, WTP and BFS's chemical structures, setting times and porosity values depending on the amount of water. In addition to this, WTP and BFS showed different electro-kinetic behavior and surface properties to PC. All these differences did affect the flexural and compressive strengths of cement mortar samples. As a result, highly resistive cements can be obtained by participation of BFS and WTP in specific proportions, by this way it was considered that using these materials in cement industry provide economic and ecologic benefits.

1. GİRİŞ

Son yıllarda Dünya'daki gelişmeler ve hızlı nüfus artışına paralel olarak ilerleyen teknoloji sayesinde doğadaki endüstriyel atıkların artmaya başlaması, çevreye ve insan sağlığına ciddi oranda zarar vermektedir (Emiroğlu ve diğ. 2009, Gönüllü 2004). Bu atıklar, zararlı etkilerinin azaltılması, enerji tasarrufunun sağlanması ve geri dönüşüm olarak kullanılması için günümüzde çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sektörler arasında çimento ve beton sektörü geniş bir yer tutmaktadır.

Çimento, yapılarda malzemeleri birbirine bağlamak için Dünya'da en fazla kullanılan bağlayıcı malzeme olarak yer almaktadır (Worrell ve diğ. 2000). Çimento, üretimi sırasında fazla miktarda enerji tüketimi ve atmosfere salmış olduğu CO₂ miktarı nedeniyle çok fazla eleştiri almakta ve bu zararlı etkilerini azaltmak için de dünyada yoğun araştırmaların yapıldığı bir malzemedir. Bu araştırmaların başında puzolan kullanımı gelmektedir.

Hem doğal (zeolit, tras vb.) hem de yapay (uçucu kül, taban külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) puzolanik katkılar, çimentoda ekonomiklik (Worrell ve diğ. 2000), permabiliteyi azaltması (Shiqun ve Della 1986), alkali agrega gelişiminin kontrolü (Prigione 1987), kimyasal direnç sağlaması (Saraswathy ve diğ. 2003), hafiflik (Khandaker ve Anwar 2004, Aruntaş ve Tokyay 1996), atıkların değerlendirilmesi (Fu ve diğ. 2002), betonun rötresini azaltması (Homwuttiwong ve Sirivivatnanon 2004, Kanna ve diğ. 1998) ve mukavemetlerde artış (Pekmezci ve Akyüz 2004, Turanlı ve diğ. 2004, Yılmaz ve diğ. 2007, Yılmaz ve Olgun, 2008) sağlaması gibi avantajları nedeniyle üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir alandır. Katkıları serbest halde, katı veya çözelti olarak çimento yapısında kalmakta, yüzey ile etkileşime girebilmekte ve çimento hamuru veya çimento bileşenleri ile birleşebilmektedir. Kullanılan katkı veya ikame malzemelerinin tip ve boyutu, hidrasyon ısı, oluşan hidrasyon ürünlerinin kompozisyonu, su ihtiyacı, priz süresi gibi özellikler; betonun mikro yapı ve durabilite gibi fizikokimyasal özelliklerini etkileyebilmektedir (Aydın ve diğ. 2005).

Kullanılan katkı veya ikame malzemesinin çimento hidrasyonuna, kimyasal yapıya ve C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jel yapısının oluşumuna etkileri hakkında bilgiler elde

etmek çalışmaları açısından önemlidir. Bu bilgileri elde edebilmek için kullanılan en önemli teknik zeta potansiyel ölçümüdür. Zeta potansiyel su içindeki katı taneciklerin birbirleriyle etkileşimlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, zeta potansiyel ölçümüyle çimento taneciklerinin, çevresini saran sıvı elektrolit ile çok hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte ve zamana bağlı olarak zeta potansiyeli değişmekte olduğunu göstermiştir (Hodne ve Saasen 2000, Nagele 1986). Bunun yanı sıra çimento süspansiyonundaki tanelerin zeta potansiyel ve yüzey yüklerinin, ortamdaki kalsiyum iyonlarının miktarına da bağlı olduğu ifade edilmektedir. Ca^{2+} düşük değerlerde Ca_3SiO_5 parçacıklarının üzerindeki C-S-H jellerinin zeta potansiyel değeri negatif olmakta, bu da tanelerin dağılmasına neden olmaktadır. Kalsiyum, C-S-H jelleri için potansiyel belirleyici bir katyon olarak yer almaktadır. Hidratasyon için zeta potansiyel ile geliştirilen C-S-H yüzey modelinden, C-S-H ile tane büyüklükleri ve hidratasyon ortamı arasında özel bir etkileşim olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan araştırmalardaki deneysel sonuçlara göre çimentonun reaktif çift tabaka ve dengede olmayan adsorpsiyon modeline göre yüzey davranışları gösterdiği, bunun sonucu olarak ayrıca çift tabaka teorisinin elektrolit ile okside olmuş tanecik ara yüzeylerine uygulanabileceğini göstermiştir (Nagele 1986, Nagele ve Schneider 1989, Nachbaur ve diğ. 1998). Sonuç olarak, mineral içerikli çimentolardan üretilmiş beton içindeki kimyasal yapı ayrıntılı olarak incelenmiş ve meydana gelen reaksiyonlar daha iyi anlaşılmıştır. Diğer taraftan çeşitli araştırmalara göre Portland çimentosu (PÇ) klinkerinin mineral katkılarıyla verdiği zeta potansiyel değerinin, Graham adsorpsiyon modelinin katkıları için de geçerli olduğu sonucuna varılmıştır (Nagele ve Schneider 1987, Nagele ve Schneider 1988).

Yıllardır çimento sektöründe kullanılan katkı veya ikame malzemeleri ile çimento arasında oluşan yüzey ve ara yüzey etkileşimleriyle ilgili yapılan çalışmaların oldukça sınırlı kaldığı görülmüştür. Halbuki bu malzemelerin özelliklerinin sadece fiziksel ve kimyasal bakımdan değil, fiziko kimyasal bakımdan da araştırılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, Türkiye’de yaygın olarak bulunan ve çevresel zararları nedeniyle üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı yapay puzolan sınıfındaki YFC’nin ve çimento ikame veya katkı malzemesi olarak kullanımına pek rastlanamayan atık lastik tozunun (ALT) zeta potansiyel tekniği ile tane davranışlarını belirlemek, çimento tanecikleri ile etkileşim mekanizmasını aydınlatmak ve bu tekniği çimento ve beton sektöründe bir model olarak yerleştirilmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Bu amaçla PÇ, YFC ve ALT'nin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra PÇ, YFC ve ALT tanelerinin elektrokinetik potansiyelleri (zeta potansiyel) belirlenmiştir. Ayrıca referans (PÇ), %5-%10-%15-%20 oranında YFC, %2,5-%5 oranında ALT, %2,5+2,5-%7,5+2,5-%5+5-%10+5-%15+5 YFC ve ALT ikameli hamur ve harç örneklerinin özellikleri, standart çimento deneyleri yapılarak incelenmiş ve tüm çimento hamuru örneklerinin 28 gün sonundaki mikro yapıları elektron mikroskop (SEM) ile görüntülenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİMENTO

Bu bölüm, çimentonun yapısı, özellikleri, üretimi ve çimento hidrasyonundan oluşmaktadır.

2.1.1. Çimentonun Tanımı

Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan, sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, aynı zamanda betonun en önemli hammaddesi olan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcı olarak ifade edilmektedir (TS EN-197-1 2002).

Çimento sözcüğü, Latince yontulmuş taş anlamındaki Caementum sözcüğünden türetilmiştir. Çimento, yapı malzemeleri grubuna dahil edilen bir inşaat malzemesidir. Çimentoya özelliklerini kazandıran hammadde bileşimi ve klinkerin ısısal işlemleridir. Klinker bileşimi, esas olarak hammadde karışımının kompozisyonuna sıkı sıkıya bağlıdır, bunu yanı sıra kullanılan yakıt cinsi ve yakıt içerisinde kül meydana getiren maddeler de klinker bileşimini etkileyen faktörlerdir (Dayı 2006).

Çimentonun temel ham maddeleri, kireç taşı ve kil ve/veya marn olarak yer almaktadır. Çimento üretiminde büyük tesislere ihtiyaç duyulmaktadır. Çimentonun kimyasal kompozisyonunda olan silisin, alümin ve demir oksitle birleşme özelliği vardır. Çimento üretiminde, bu maddeler belirli oranlarda karıştırılır ve yüksek sıcaklıkta (1350-1500 °C) pişirilir. Kireç taşından CaO, kilden SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ meydana gelmekte, bu maddeler yine yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikat ve alüminatları meydana getirmektedirler. Çimento üretiminde hammadde olarak, klinkere %3-6 oranında alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) katılmakta ve klinker ve alçı taşı birlikte öğütülmektedir. Alçı taşının görevi, çimentoda priz süresini ayarlamaktır. Klinkere öğütme sırasında katkı maddesi olarak %2-3 gibi az bir oranda, kireç taşı da katılabilmektedir. Kireç taşı klinkerden daha kolay öğütülebilmektedir. Böylece iri taneli klinker, ince taneli kireç taşı elde edilmekte, bu sayede taneler arasındaki boşluklar dolmakta, çimentonun mukavemeti ile

işlenebilirliğini artmakta ve çimento harçları ve beton daha kolay yayılmaktadır (Dayı, 2006).

2.1.2. Çimentonun Tarihçesi

Kullanılan en eski bağlayıcılardan biri çamurdur. Bugün hala çamur ile saman veya diğer bitki lifleri karıştırılarak bağlayıcı kapasiteleri artırılmış yapı blokları ve parçaları üretilmekte ve dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılmaktadır. Örneğin Mısırlılar alçıtaşı harcını Cheops Piramitlerinin (~300 MÖ) yapımında kullanmışlardır (Yeğınobalı 2001).

Romalılar ve Yunanlılar kil içeren kireç taşının kalsinasyonundan hidrolik kireci üretmişler ve dahası belli volkanik birikintilerin ince olarak öğütölüp kum ve kireçle karıştırıldığında normal kireç harcından daha dayanımlı ve suya dayanıklı olduğunun farkına varmışlardır. Ancak 18. yüzyıla kadar bağlayıcı maddelerin doğası anlaşılammıştır. Birkaç öncü çabadan sonra, Joseph Aspdin adında bir Leeds müteahhidi Portland çimentosunun (PÇ) patentini 1824 yılında almış ve daha sonra hidrolik bağlayıcıların kullanımı tüm Avrupa ve Kuzey Amerika'da yayılmıştır. Bu sayede de PÇ'nin üretiminde kullanılan ekipmanlar gelişmiştir (Yeğınobalı 2001).

İngiltere'de 1877 yılında döner fırındaki ilk gelişmeler başlamış ve 1885 yılında ilk döner fırının patentini Fredrick Ransome almıştır. Ransome'nin fırını o devirdeki çimento dünyasında devrim niteliğinde olsa da işlevsel döner fırın uzun yıllar sonra üretime girmiştir. Ransome'ın keşfinden birkaç sene sonra bazı öncü Amerikan mühendisleri döner fırını geliştirmişlerdir. Amerika'daki ilk ekonomik döner fırın "Hurry ve Seaman" Atlas Çimento Fabrikasında 1895 yılında üretime girmiştir. PÇ'nin üretiminin artmasıyla birlikte çimento ve hammaddelerinin özelliklerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalara başlanmış, çok sayıda deneyden sonra temel çimento deneylerine 1900 yılında standart getirilmiştir. O devirden bu yana tüm Dünya'da çimento standartlarına yenileri eklenmiştir (Yeğınobalı 2001).

2.1.3. Çimentonun Ana Hammaddeleri

Çimento üretiminde kullanılan ve jeolojide sedimanter kayalar olarak bilinen ana hammaddeler, kalker (kireçtaşı), kil ve/veya marndır. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan CaO için kalker; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Analizlerde Fe₂O₃ oranının düşük olduğu durumlarda uygun olan oranda demir cevheri

de ilave edilmektedir. Ayrıca marn gibi bu dört oksidi bünyesinde bulunduran malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Raporu 2001, Koçak 2008).

Bu bileşenler istenilen oranlarda tek bir hammaddede nadir olarak bulunmaktadır. Bu sebeple genellikle yüksek kireç içeren bir bileşen (kalker) ile düşük kireç, buna mukabil daha çok silis, alüminyum ve demir oksit içeren bir bileşenin (kil) uygun karışımının seçilmesi zorunludur. Bu iki ana bileşen genellikle kalker ve kil veya kalker ve marn olarak seçilmektedir (Atar 2006).

Çimento üretiminde kullanılan temel hammaddelerin uygunluk dereceleri, onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Hammadde karışımında CaCO_3 içeriğinin genellikle %75-79 arasında kalmasına ve bunun mümkün olduğunca sabit tutulması önemlidir. Çünkü CaCO_3 içeriğindeki küçük bir değişiklik, klinkerdeki dikalsiyum silikat ile trikalsiyum silikat yüzdelerinin değişmesine ve çimento mukavemetinin önemli derecede değişmesine neden olmaktadır (Atar 2006).

2.1.3.1. Kalker

Kalker, doğada kalsiyum karbonat olarak bulunmaktadır. Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) bulunan kayalar kalker ya da kireç taşı, doğada saf halde bulunanlar ise kalsit olarak ifade edilmektedir. Kalkerler doğada kalsit ve aragonit kristallerinden oluşmuş bir kayaç olarak bulunduğu gibi $\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$ şeklinde dolomit olarak da bulunur. Klinkerdeki CaO , ağırlıklı olarak bu bileşenlerden sağlanmaktadır (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı 2001, Mumcu 2005).

Kalkerin mineralojik incelemesinde, saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluştuğu görülür. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı $2,5-2,7 \text{ g/cm}^3$ arasındadır (Dayı 2006).

2.1.3.2. Kil

Çimento üretiminde kil, ikinci derecede önemli temel hammadde olarak yer almakta ve mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri bulunan kayaç olarak tanımlanmaktadır. Kil minerallerinin temel özelliği, kimyasal bileşimlerinde alüminyum

oksit (Al_2O_3) bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır (Koçak 2008).

Killer; ıslandıkları zaman plastiklik özelliği kazanarak istenilen şekli alabilmekte; sularını kaybettiklerinde rijitleşmekte, ancak tekrar ıslandıklarında tekrar plastiklik özelliği kazanmakta; pişirildiklerinde rijit bir bünye yapısı kazanmakta, tekrar ıslatıldıklarında artık plastik özellik kazanmamaktadır (Ulusoy 2008).

Killer içerisinde kaolinit grubu kil mineralleri ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ve montmorillonit grubu kil mineralleri iki önemli grubu oluşturmaktadır ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$) (Koçak, 2008). Çimento hammaddesi olarak kullanılacak kilin kimyasal ve mineralojik yapısının bilinmesi önemlidir. Killerin kimyasal analizinde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı yüzdeleri belirlenmekte, mineralojik analizlerde ise, kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve % miktarları tespit edilmektedir (Yalçın ve Gürü 2006).

2.1.3.3. Marn

Marn, %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalar olarak ifade edilmekte ve yeryüzünde yaygın olarak bulunmaktadır. Çimento klinkeri ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn, bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesi olarak nitelendirilmektedir. Bunun yanı sıra marn, kalkere göre daha kolay öğütülen, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olan bir malzemedir (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı 2001, Yalçın ve Gürü 2006).

2.1.3.4. Alçı Taşı

Alçı taşı, çorak ve kuru iklim şartları altında deniz suyunun buharlaşması sonucunda tortul kayalar olarak meydana gelmiş taşlar olarak ifade edilmektedir. Alçı taşı doğada, biri iki molekül kristal suyu içeren jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), diğeri susuz kalsiyum sülfat anhidrit minerali halinde olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Jips ve anhidrit doğada hiçbir zaman saf halde bulunmamakta, ayrıca bu iki mineral kararsız halde olup biri diğere dönüşebilmektedir. Çimento üretiminde alçı taşı, harcın priz süresini geciktirmek için kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006, Koçak 2008).

2.1.4. Çimento Hammadde Kompozisyonu

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olarak başlıca dört bileşeni içermektedirler. Genellikle çimentoda uygun hammadde karışımları, iki hammaddenin (kalker ve kil) karıştırılması ve bu karışıma küçük miktarlarda düzeltici malzemenin ilavesiyle elde edilmektedir. Fırına verilmek üzere hazırlanmış olan uygun hammadde karışımlarına farin adı verilmektedir. Çimento üretiminde gerek işletmecilik gerek verimlilik açısından mümkün olduğu kadar az sayıda bileşik ile çalışma tercih edilmektedir. Ancak, doğada çimento hammaddesi için ideal olan kompozisyonda tek başına bir bileşik bulmak mümkün olmadığı için, marn-kalker, kalker-kil veya marn-kalker-kil karışımları ile istenilen bileşim sağlanmaktadır (Targan 2002).

Döner fırından elde edilen klinkerin istenilen kimyasal ve mineralojik kompozisyonda olması önemlidir. Bunu için kullanılan kil ve kalkerin karışım oranları, bir takım kimyasal modüllere bağlı olarak belirlenmektedir. Üretilen PÇ'nin fiziksel özellikleri ve özellikle mukavemet değerleri, büyük ölçüde fırına beslenen farinin kimyasal bileşimine bağlıdır. Bunun için farini oluşturan bileşenler belirli oranda olmalıdır. Klinker içinde bulunan ana bileşenler arasındaki oranlar; silikat modülü, hidrolik modül, alümin modülü ve kireç doygunluk faktörü (LSF) ile kontrol edilir (Yalçın ve Gürü 2006). Bu modüller aşağıdaki formüllerle tanımlanmaktadır.

2.1.4.1. Silikat Modülü

Silikat Modülü (SM), fırın içinde katı fazın sıvı faza oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$SM = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.1)$$

Karışım içinde bulunan silis yüzdesinin, alüminyum oksit ve demir oksit toplamına oranı ile de ifade edilmekte ve ideal bir oran vermek çok zor olmaktadır. Genellikle silikat modülü, kullanılan hammadde cinsine göre 1,2-4 arasında değişik değerler alabilmekte ve genel olmamakla birlikte tercih edilen silikat modülü 2-2,5 arasındaki değerler olarak belirtilmektedir. Silikat modülü, farinin fırın içindeki durumunu ve klinker kalitesini etkilemesi açısından en önemli parametrelerden biri olarak ifade edilmektedir. Silikat modülü değerinin yüksek olması, döner fırında yanma işlemlerinin yetersiz olmasına, daha fazla yakıt kullanımına, sinterleşmenin güç olmasına ve daha yüksek ısılarda pişirme gereğine neden olmaktadır. Bu da elde edilen çimentonun yavaş priz almasına ve geç dayanım kazanmasına sebep olmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006, Targan, 2002).

2.1.4.2. Hidrolik Modülü

Portland çimentosu içinde bulunan bazik karakterli oksit olan kireç yüzdesi ile diğer asit karakterli oksitler, silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit yüzdeleri arasında hidrolik modül (HM) denilen bir bağıntı vardır. Bu bağıntı aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir;

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.2)$$

Hidrolik modül genellikle 1,7-2,3 değerleri arasında sınırlandırılmakta ve kaliteleri iyi olan çimentoların da çoğunlukla 2 civarında olduğu ifade edilmektedir. Hidrolik modülü 1,7'den küçük olan çimentoların, çoğunlukla dayanım değerlerinin yetersiz olduğu, 2,4 ve daha yüksek olan çimentoların ise hacimsel stabilitelerinin (dengelerinin) oldukça kötü olduğu belirlenmiştir (Yalçın ve Gürü 2006).

Hidrolik modül değeri arttıkça klinkerin pişmesi için gerekli sıcaklık değeri, elde edilen çimentonun erken dayanımı ve hidratasyon ısı artmakta, kimyasal etkilere karşı direnci azalmaktadır (Targan 2002).

2.1.4.3. Alümin Modülü

Alümin modülü (AM) çimento içinde bulunan alüminyum oksit yüzdesinin, demir oksit yüzdesine oranı olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki formülle ifade edilmektedir (Yalçın ve Gürü 2006).

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (2.3)$$

İyi kalitede bir klinker elde etmek ve en ekonomik sinterleşmeyi sağlamak için alümin modülü 1,3-1,6 arasında olması tavsiye edilmektedir. Alümin modülünün düşük olması, çimento bileşiklerinin düşük ısılarda oluşumunu sağlamakta, dolayısıyla fırında daha az yakıt harcanmasına neden olmaktadır. Bu modülün yüksek olması durumunda pişme güçleşmekte ve yakıt sarfiyatı fazla olmaktadır. Genellikle demir, çimento bileşiklerinin oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Demir oranının yüksek olması sert ve yoğunluğu fazla bir klinker oluşturmakta ve dolayısıyla öğütmede zorluklara neden olarak üretim maliyetini artırmaktadır (Mumcu 2005).

2.1.4.4. Kireç Doygunluk Faktörü

PÇ içinde hangi miktarda kalsiyum oksit bulunması gerektiği teorik olarak hesaplanabilmektedir. Eğer çimento içinde bulunan bütün silisyum dioksitin C₃S olarak, bütün demir oksidin eşdeğer miktardaki alüminyum oksitle C₄AF olarak ve artan alüminyum oksidin de C₃A olarak bağlandığı kabul edilirse, klinkerdeki kireç doygunluğu tam olarak gerçekleşmiş olur. Bu kabullere göre çimento içinde bulunan silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit tarafından bağlanan maksimum kalsiyum oksit miktarı teorik olarak hesaplanabilir (Yalçın ve Gürü 2006).

Eğer alüminyum modülü <0,64, yani molar olarak Fe₂O₃>Al₂O₃ ise bu durumda bütün Al₂O₃, klinker içinde C₄AF halinde bulursa, klinker içindeki maksimum kireç ve kireç doygunluk faktörü (LSF) için aşağıdaki bağıntı verilebilir (Koçak 2008).

$$LSF = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (2.4)$$

Çimento üretimi için uygun olan hammadde karışımındaki kireç doygunluk faktörü 0,85-0,90 arasındadır (Erdoğan 2010). LSF oranının 1'in üstünde olması çimentoda serbest kireç bulunduğunu ifade etmekte ve bu oran alit (C₃S) ve belit (C₂S) oranından etkilenmektedir. Serbest kirecin sabit değerlerine karşılık artan LSF değeri, belit aleyhine alit miktarının artmasına sebep olmaktadır (Koçak 2008).

2.1.4. Çimento Hidratasyonu

Çimentoyu oluşturan klinker bileşikleri, kimyasal potansiyel olarak aktif durumda bulunmakta ve aynı zamanda su ile kolaylıkla reaksiyona girerek çözünmektedir. Daha sonra çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana gelmektedir. Çimentoların su ile yaptıkları bu kimyasal reaksiyonlara hidratasyon denilmektedir (Yalçın ve Gürü 2006).

Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento su içinde yavaş yavaş çözünmekte ve hidrate hale gelerek tane yüzeyini jel halinde kaplamaktadır. Bu yüzden reaksiyona girmemiş klinker bileşiklerinin su ile etkileşimi önlenmiş olmakta, aynı zamanda da çözeltiliye geçen klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmektedir. Doymuş hale gelen klinker bileşikleri, çözünme hızını yavaşlatmakta ve hidratasyon hızının zamanla azalmasına neden olmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006).

Çimento bileşiklerinin tam olarak hidrate olması için uzun bir süre gerekmektedir. Örnek olarak; 28 gün sonunda tanecik yüzeylerinden hidratasyon penetrasyon derinliği 4 µm, 1 yıl sonunda ise 8 µm kadardır. 50 µm çapında bir klinkerin tam olarak hidrate olması için yaklaşık 5 yıla ihtiyaç duyulmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006).

Hidratasyon sırasında önce plastik kıvamda çimento hamuru oluşmakta, daha sonra oluşan hamur priz başlangıcında plastikliğini kaybetmekte, priz sonu ile de sertleşmekte ve dayanım kazanmaya başlamaktadır (Koçak 2008).

2.1.5.1. C₃A Ana Bileşenin Hidratasyonu

C₃A, su ile en hızlı reaksiyona giren çimento bileşenidir ve bu reaksiyon sonrasında çok yüksek ısı açığa çıkmaktadır. İlk olarak C₄AH₁₄ ve C₂AH₈ gibi ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak bu ürünler kararlı bir yapıda olmadığı için C₃A + 6H → C₃AH₆ (hidrogarnet) denklemi elde edilmektedir. Bu esnada ani priz meydana gelmekte ve işlenebilirlik özelliğinin olmamasına yol açmaktadır. Katılan çimento hamurunda çatlaklar görülmekte ve fazla dayanım elde edilememektedir. Bu reaksiyonu yavaşlatmak amacıyla alçı taşı klinker ile birlikte öğütülmektedir (Yeğınobalı 1999, Aruntaş 1996).

Alçılı ortamda C_3A 'nın hidratasyonu ile $C_3A + 3\bar{C}\bar{S}H + 26H \rightarrow C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ (etrenjit) reaksiyonu gelişmektedir. Etrenjit kısa iğneler şeklinde kristalleşmekte ve hacim genişmesi meydana getirmektedir. İleri yaşlarda çimento içinde monosülfat haline dönüşmektedir. Etrenjit oluşumu sırasındaki hacim genişmesi çimento hamuru henüz plastikken meydana geldiği için bir sakınca oluşturmamakta, ancak betonun sertleşmesinden sonra sülfatlar ortama girerse monosülfat hidrat tekrar etrenjite dönüşmekte ve bu nedenle hacim genişmesi olmakta ve dolayısıyla betonda çatlamlara yol açmaktadır (Yeğınobalı 1999).

2.1.5.2. C_4AF Ana Bileşenin Hidratasyonu

Gerçekte C_2A ve C_2F katı eriyiğinin ortalama bileşiği olan C_4AF 'nin hidratasyonu, hidratasyon hızı daha az olmakla birlikte C_3A 'nın hidratasyonuna benzemektedir. C_3A 'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demir oksit almaktadır. Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı bulunmadığında ya da belli bir değerin altında olduğunda, hidrogarnet ($C_4AF + (6+n)H \rightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) oluşmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006, Erdoğan 2010). Daha sonra alçılı ortamda sülfat yoğunluğuna bağlı olarak $C_4AF + 3\bar{C}\bar{S}H + 26H \rightarrow C_6A(F)\bar{S}_3H_{32}$ ve $C_4AF + \bar{C}\bar{S}H + 26H \rightarrow C_4A(F)\bar{S}H_{18}$ gibi, sırası ile etrenjit ve monosülfat hidrata benzeyen yapılarda bileşikler oluşmaktadır. (Neville 2006, Aruntaş 1996).

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde, C_4AF ana bileşenin göstereceği hidratasyon, C_3A ana bileşenin hidratasyonu kadar şiddetli olmasa bile oldukça hızlı olmakta ve açığa büyük miktarda ısı çıkarmaktadır. C_3A oranı düşük, C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi tam olarak bilinmemekle birlikte, demir iyonu içeren kalsiyum-alümina-monosülfat ürünlerinin, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmediği düşünülmektedir (Erdoğan 2010).

2.1.5.3. C_3S ve C_2S Ana Bileşenin Hidratasyonu

Çimentonun yaklaşık %75'ini oluşturan kalsiyum silikatların hidratasyonları sonucu lifli düzensiz yapı ile örgü yapı arasında değişen bir dizi hidrat meydana gelmektedir. CaO/SiO_2 orantıları ve kristal suyu miktarları değişmekle beraber fiziki yapıları boşluklu bir rijit jel olarak birbirine benzeyen bu hidratlar, C-S-H veya tobermorit jeli

olarak adlandırılır (Yeğınobalı 1999). C-S-H jelleri zayıf kristalli kolloidal parçacıklardan oluşmakta (C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0,1 \times 0,01 \mu\text{m}$ 'den daha küçüktür), ve lif şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen bulunmamaktadır. Elektron mikroskopla incelendiğinde C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedirler. C-S-H jellerinin yapısının bir parçası olarak kolloidal tabakada adsorbe durumunda su yer almakta ve katı kolloidal tabakalarının arasında çok küçük boyutlu jel boşlukları bulunmaktadır (Erdoğan 2010).

2.1.5.4. Hidratasyon Isısı Ve Priz

Çimentoyu oluşturan minerallerin her birinin su ile verdiği kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıların toplamına "hidratasyon ısısı" denilmektedir. Hidratasyon ısısı cal/g veya J/g birimiyle ifade edilmekte bir normal PÇ'nin toplam hidratasyon ısısı yaklaşık 120 cal/g (500 J/g) olarak belirtilmektedir (Erdoğan 1995).

Çimento bileşenleri tam bir kimyasal dengeye ulaşmadan katılaştıklarından yüksek enerjiye sahip olup su ile reaksiyonları ekzotermiktir, yani hidratasyon ısısı açığa çıkmaktadır. Hidratasyon süresince çimentonun kimyasal bileşimine de bağlı olarak ısı yayılımı, priz süresi ile ilişkilendirilebilir. Çimento bileşenlerinin hidratasyonları birbirinden tamamen bağımsız olmamaktadır. Sülfat iyonları kalsiyum alüminatların hidratasyonunu geciktirirken, kalsiyum silikatların hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Diğer oksit ve gayri saflıklar da bu dört ana bileşenin hidratasyonunu etkilemektedir. Buna rağmen ilk birkaç günde hızlıdan yavaş doğru C_3A , C_3S , C_4AF ve C_2S olarak sıralanabilmektedir (Yeğınobalı 1999).

Hidratasyon ısısı beton teknolojisinde hem yararlı hem de zararlı olabilmektedir. Soğuk havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz ve dayanım kazanmanın normal sürelerde yer almasına katkıda bulunmaktadır. Sıcak havalarda ise taze betonda kıvam kaybını hızlandırmaktadır. Kütle betonlarında havaya açık dış yüzeylere oranla iç bölgelerde ısının yükselmesi, sıcaklık farklarından dolayı ısıl gerilme ve çatlamalara neden olabilmektedir. Çimentonun hidratasyonu ile ilgili aşamalar çimentonun bileşimine ve iç yapısına ilaveten başka faktörlerden de etkilenmektedir. Ortam sıcaklığındaki artış reaksiyonları hızlandırmaktadır. Çimento inceliği doğal olarak hidratasyona yardımcı olmaktadır. Bazı araştırmacılara göre $25 \mu\text{m}$ 'den iri taneler yıllar sonra bile tamamen hidrate olmamaktadır. Jel teşekkülü için gerekli miktarın üzerindeki

yoğurma suyu katılma ve dayanım kazanma sürelerini uzatmaktadır. Bayat çimentolar da genellikle geç priz almaktadırlar (Yeğınobalı 1999).

Çimento hamurunda priz başlangıcı ve sona erişı göreceli kavramlar olup deney metoduna göre değişebilmektedir. Ancak, hemen hemen bütün ülkelerde bu amaçla vicat metodu uygulandığından bir görüş birliği oluşmuştur. Beton teknolojisinde priz süreleri önemlidir. Taze beton priz başlangıcından sonra işlenebilirliğini kaybetmektedir. Diğer taraftan prizin zamanında biterek betonun sertleşip dayanım kazanması beklenmektedir. Bu nedenlerle standartlarda genellikle prizin en erken 45-60 dakikadan sonra başlaması ve en geç 8-10 saat içinde sona ermesi öngörülmektedir. Dolayısı ile klinker bileşimine bağlı olarak katılacak alçı miktarına dikkat edilmesi gerekmektedir (Yeğınobalı 1999).

Hava ve inşaat koşullarına, çimento türüne bağlı olarak priz sürelerini hızlandırmak veya yavaşlatmak için kimyasal katkıları kullanılabilmektedir. Priz sırasında yalancı priz ile karőılaşılabilmektedir. Klinkerin yeterince soğumadan alçı taşı ile öğütölmesi sırasında, alçı taşı kısmen kristal suyunun bir bölümünü kaybederek normal alçıya dönüşebilir. Bilindiği gibi normal alçı 5-10 dakika içinde priz yapmakta ve katılaőmaktadır. Katılaőan çimento hamuru karıştırıldığında tekrar plastik kıvama dönüşüyorsa bunun gerçek priz değil, yalancı priz olduğu anlaőılmakta ve bir sakınca teşkil etmemektedir (Yeğınobalı 1999).

2.2. PUZOLANLAR

Puzolanlar doğal hallerinde bağlayıcılık özelliği bulunmayan ya da oldukça çok az olan, ancak öğütölerek ince taneli yapıya sahip olduklarında, normal sıcaklıkta ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleőtiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan, silikalı veya alüminalı malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan 2010). Ancak bütün silisli ve alüminli malzemeler puzolan olarak kabul edilmemektedir. Örnek olarak kuvars (SiO_2), mullit ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) ve sillimanit (SiAl_2O_5) puzolanik özelliğe sahip değildir (Aruntaş 1996).

Son yıllarda doğal ve yapay olarak birçok puzolanik madde çimentoya doğrudan katılarak ya da bir kısmını ikame etmek yolu ile kullanılmaktadır. Puzolanik

malzemeler esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃ içermektedirler (Yalçın ve Gürü 2006). Puzolanik malzemeler köken, yapı, kimyasal ve mineralojik bileşenleri bakımından oldukça farklıdır ve sulu ortamlarda bağlayıcı özelliğe sahip kararlı yeni hidratasyon ürünleri oluşturmak için kireçle birleşme eğilimine sahiptirler (Özkan 2009).

2.2.1. Puzolanların Tarihçesi

Konya-Çatalhöyük'teki Neolitik çağa ait evlerin harçları üzerinde bilim adamlarının yaptıkları araştırmalar, orada kullanılan harçların 8000 yıl eski olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sadece kil, kireç veya alçıdan oluşturulan harçların suya dayanıklı olmadıkları hatırlanacak olursa, oradaki harçların büyük bir olasılıkla volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olma gerçeği elde edilmektedir. Zira Çatalhöyük, Erciyes ve Hasandağı gibi dağların çok uzağında bir yer değildir. Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde üç dört bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır (Erdoğan 2010, Erdoğan ve Erdoğan 2007).

Ancak, puzolan tanımına giren malzemelere puzolan isminin verilmesi ve o tür malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanımı, MÖ 300 yılı civarında Romalılar tarafından başlatılmıştır. Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık potansiyelinin Romalılar tarafından keşfedilmesi ve bu tür malzemelerin pozzolana (puzolan) olarak anılmaya başlanması, Romalı ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio'nun MÖ 300 - MÖ 200 yılları arasında tamamladığı "Mimarlık Üzerine On Kitap" (De Architectura Libri Decem) isimli eserinin ikinci kitabında bahsedilmektedir. Vitruvius'a göre, Romalılar, pişirilmiş kilin veya öğütülmüş tuğla veya kiremidin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır. Romalılar volkanik külü, volkanik küllü toprağı veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan "Horasan harcı" da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir (Erdoğan 2010, Erdoğan ve Erdoğan 2007).

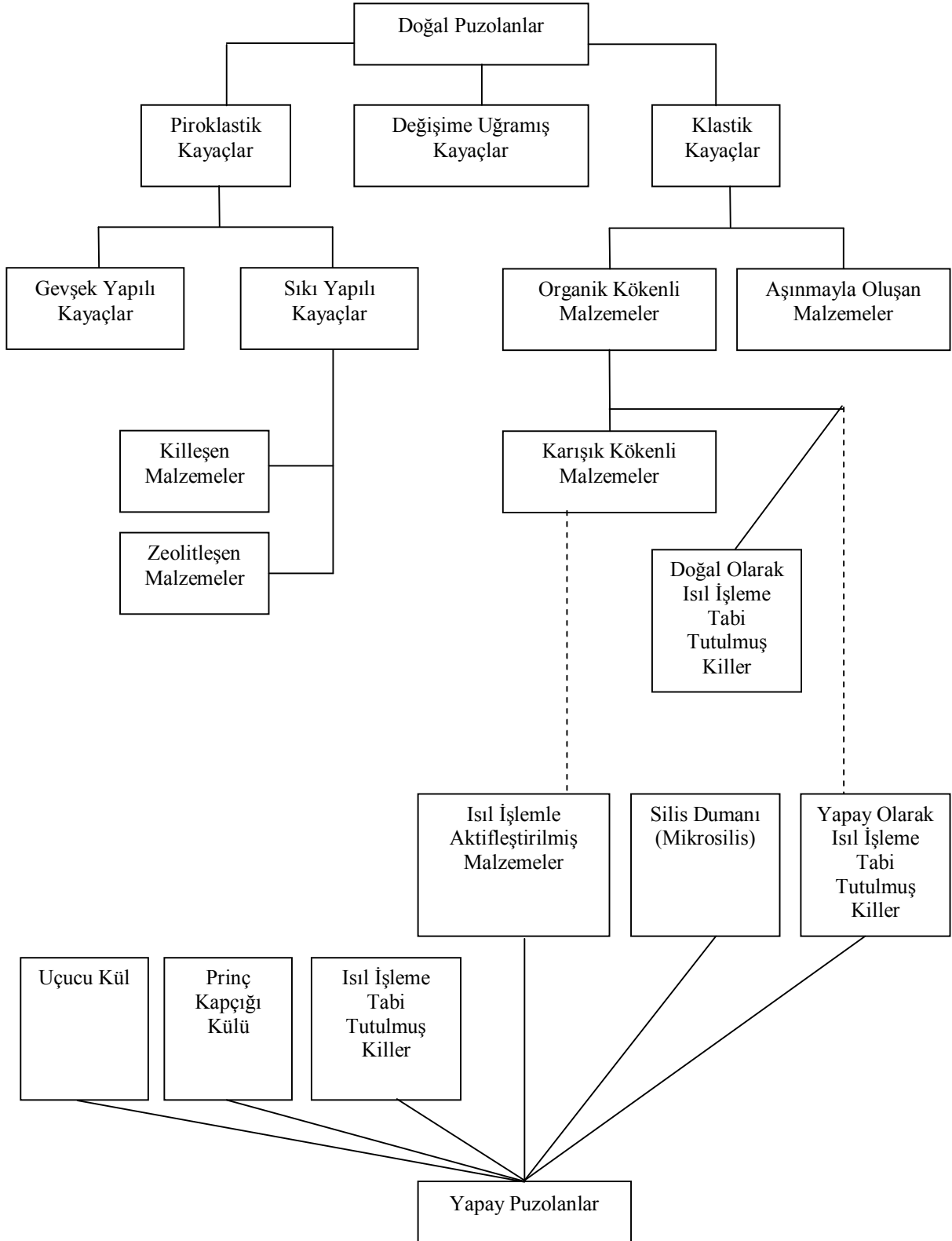
2.2.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Doğal puzolanlar; doğadaki volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, zeolit, diatomit ve diatomlu topraklar olarak örneklenebilmekte ve öğütmenin dışında bir işlem gerektirmemektedirler (Erdoğan 2010).

Yapay puzolanlar; çok az puzolanik özelliğe sahip olan veya hiç olmayan malzemelerin kimyasal ve/veya yapısal modifikasyonlarının bir sonucu oluşur. Yapay puzolanlar endüstriyel atıklar olup en çok tanınanları; silis dumanı, UK ve YFC'dir. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısıtılma tabii tutulması sonucunda elde edilen puzolanik malzemeler de yapay puzolan olarak sınıflandırılmaktadır (Özkan 2009).

Puzolanlar, birçok uzmana göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bunlar içerisinde popüler olan F. Massazza'nın yapmış olduğu puzolanların kökenini temel alan sınıflandırma şeklidir (Aruntaş 1996, Koçak 2008). Massazza'ya göre sınıflandırma Şekil 2.1'de verilmiştir.

Massazza'nın sınıflandırmasına göre doğal puzolanlar, bu sınırlandırmaya göre 3 ana gruba ayrılmaktadır. İlk grup olan piroklastik, eriyik haldeki magmanın şiddetle dışarı atılması sonucunda biçimlenmekte ve sonra hızla soğuması ile içinde gaz kabarcıkları bulunan cam gibi bir malzeme meydana gelmektedir. Bundan dolayı, bu malzemelerin kimyasal kompozisyonu yeryüzüne çıkan magmanın kompozisyonuna bağlıdır. İkinci gruba, değişime uğramış yüksek silisli malzemelerden meydana gelmektedir. Bu puzolanlar, su içinde eriyen oksitlerin ayrılması ile kimyasal değişime uğrayan genellikle açık renkli kayaların, durgun sularda farklı orijinli malzemelerle birlikte çökmesiyle şekillenirler. Bu malzemeler, genellikle puzolanik özelliği azaltan kil ile karışık olarak bulunmaktadır. Doğal puzolanların son grubu ise, kil ve diatomit toprağını içine alan klastik orijinlidir. Kilin puzolanik davranışının eksik olması, PÇ ikame malzemesi olarak kullanılmasına olanak vermemekle birlikte uygun sıcaklıklarda yapılan kalsinasyon, kilin puzolanik özelliğini önemli miktarda yükseltmektedir (Aruntaş 1996, Koçak 2008).



Şekil 2.1. Puzolanların Massazza'ya göre sınıflandırılması (Koçak, 2008)

2.2.3. Puzolanların Aktivitesi

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireç ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği puzolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır. Yüksek aktiviteye sahip puzolanların; yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarına, yüksek camsı faz miktarına, büyük özgül yüzey alanına sahip olduğu deneysel olarak belirlenmiştir (Dayı 2006).

Bir malzemenin puzolanlığının kanıtlanabilmesi için puzolanik aktivite deneyinde olumlu sonuç vermesi gerekmektedir. Bu deneyler doğal ve yapay puzolanlarda mekanik ve kimyasal deneyler şeklinde gerçekleştirilmektedir. Mekanik deneyler; puzolan-kireç, puzolan-çimento harç örnekleri üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir. Kimyasal deneyler ise puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidrasyon sonunda çözültide oluşan Ca(OH)_2 'i saptamaya dayanmaktadır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir. Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri ise puzolan içeren çimento hamurlarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit-emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir (Dayı 2006).

Genel olarak, puzolanların heterojen bir yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir. Bununla beraber, bu hususta ancak genel eğilimler açıklanabilir. Bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir (Erdoğan ve diğ. 1999, Koçak 2008).

- Diğer özellikler aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir.
- Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına (Blaine), buna mukabil uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
- Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
- Belirli sınırlar dahilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması Ca(OH)_2 bağlanmasını artırır.
- Zeolitik puzolanlar, camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.

□□Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar, farklı kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.

□□Puzolan-kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması, bağlanan kireç miktarını artırır.

2.2.4. Puzolanik Reaksiyon Ve Reaksiyon Ürünleri

Puzolanların ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyonu, puzolanik reaksiyon olarak adlandırılmaktadır. Bir puzolanın CH ile davranışı, camsı bileşik miktarı ve incelik gibi puzolanın bazı özellikleri kadar, sıcaklık ve katkı malzemeleri gibi bazı dış faktörler ile de ilişkilidir (Aruntaş 1996).

Kireç doğal puzolan tepkimesi sonucunda genel olarak kabul edilen puzolan reaksiyonlarının ürünleri aşağıda verilmektedir (Erdoğdu 1999).

□□C-S-H formunda kalsiyum silikat hidrat,

□□C₄ASH_X formunda kalsiyum alüminat hidrat, (X, 9-13 arasında değişken)

□□Hidrate olmuş gehlenit, C₂ASH₈

□□Kalsiyum karboalüminat, C₃A.CaCO₃H₁₂

□□Etrenjit, C₃A.3CaSO₄.H₃₂

□□Kalsiyum alüminatmonosülfat, C₄A.CaSO₄.H₁₂.

Bunlarla birlikte, bütün ürünler aynı zamanda bulunmayabilirler. Bulunmaları durumu kirecin kalsiyum hidroksit kullanılabilmesine, hidrasyon reaksiyonlarının derecesine, hidrasyon sırasında çevre koşullarına, puzolanın kimyasal ve mineralojik bileşenlerine bağlı olmaktadır (Aruntaş 1996, Erdoğdu 1999).

2.2.5. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılmış olan ikame malzemelerinden YFC ve atık lastik tozu (ALT) ile ilgili bazı temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.2.5.1. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufları çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından olan yapay puzolan olarak sınıflandırılmaktadır. Kimyasal kompozisyonları ve

özellikleri, elde edilen sanayi kuruluşlarının ürettiği ana üretim yöntemine bağlı olarak birbirlerinden çok farklılıklar göstermektedir (Tokyay ve Erdoğdu 1997).

Yüksek fırın cürufu esas itibariyle silis, kalsiyum alümino silis ve bazik esaslı bileşikler içeren ve fırınlarda demir üretimi sırasında ergimiş halde elde edilen bir atık üründür (Erdoğdu ve Kurbetçi 2003). Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi esas olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Ancak cürufun kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir (Yalçın ve Gürü 2006).

Kalsiyum içeriklerine ilave olarak, tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranı, yüksek fırın cüruflarının aktivitelerinde etkin olan temel faktörlerdir (Erdoğdu ve Kurbetçi 2003). Yüksek fırın cürufunun fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO , MgO ve SiO_2 miktarları toplamı yine en az 2/3 oranında ve $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ oranının ise 1'de fazla olması istenmektedir (Yeğınobalı 2003).

Yüksek fırın cüruflarının çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu, betonda işlenebilmeyi arttırmakta, priz süresini uzatmakta, terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Ayrıca çimentoda puzolan olarak kullanılmasıyla çimentonun mekanik özelliklerine katkı sağlamakta, asitli ortamda direnç sağlamakta ve sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır (Erdoğan 2010, Yazıcı 2006, Özkan 2008).

2.2.5.1. Atık Lastikler

Gelişmişlik düzeyi ve yaşam kalitesinin artmasıyla dünya genelinde karayollarında kullanılan araçların sayısı da artmaktadır. Bu taşıtlardan oluşan çok miktardaki ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri, değersiz bir atık olarak çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Zamanla artan bu atık lastiklerin stok hallerinin yerel yönetimler tarafından kontrol edilmesinde zorlanılmaktadır. Çünkü atık lastikler bir arada bulduklarında ciddi yangın tehlikesi bulunmakta ve hava koşullarının etkisiyle lastikler arasında böceklenmeler olabilmektedir. Ayrıca lastikler karmaşık kimyasal yapıya sahip olduklarından doğada geri dönüşümleri çok uzun zaman almaktadır. Bu nedenle atık lastiklerin geri dönüşümü önemli bir konu olarak gündemde yer almaktadır.

Lastiklerin temel bileşeni kauçuktur. Çapraz bağlı polimer özelliği olduğundan dış etken olmadığı sürece hiçbir şekilde şekil değiştiremezler (Emiroğlu 2006). Ayrıca yüksek ısı enerjisi değerine sahip otomobil lastiğinin çöp toplama alanlarında emniyetli olarak muhafaza edilmesi zordur ve beraberinde birçok çevresel problemleri (tutuşma riski, koku problemi, sinekler için üreme ortamı, içme suyu kaynaklarının kirlenmesi, yanarak hava kirliliğine sebep olma gibi) ortaya çıkarmaktadır. Birçok probleme neden olan atık lastiklerin değerlendirilmesi için çeşitli sektörlerde olduğu gibi çimento ve beton teknolojisinde de yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Koçak vd. 2012, Topçu 1995, Topçu ve Avcular 1997, Amari ve diğ. 1999, Sadioğlu 2006, Emiroğlu 2006).

Atık lastiklerin yanması sonucu ortaya çıkan enerji kömürden daha fazladır. Bunun yanı sıra kimyasal reaksiyonların oluşabilmesi için, çimento hammaddelerinin 1500°C'ye kadar ısıtılması gerekmektedir. Bu sıcaklığa erişmek ve sürekliliğini sağlamak için yüksek miktarlarda yakıt tüketilmektedir. Kullanılan yakıt genelde kömürdür. Bu aşamada, kömürün ısı enerjisi gibi ısı enerjisi elde edilebilecek atık maddelerin kullanımı gündeme gelmektedir. Çimento üretimi için gerekli enerjinin yüksek olmasından dolayı farklı yakıt alternatifleri araştırılmış ve bu bağlamda atık lastikler yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır (Tosun 2006). Ancak atık lastiklerin çimento fabrikalarında yakıt olarak kullanılmasının insan sağlığına ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle bir geri dönüşüm olmadığı düşünülmektedir.

Diğer taraftan inşaat sektöründe atık lastikler, birim ağırlıklarının düşük olmasından dolayı hafif agrega olarak değerlendirilmekte ve zemin dolgusu olarak kullanılmaktadır (Amari ve diğ. 1999, Humphrey 1999, Aiello ve Leuzzi 2010). Atık lastiklerin birim ağırlığın düşük olması, yalıtım özelliği, yüksek tokluk gibi avantajları nedeniyle asfalt ve beton agregası olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca atık lastikler güvertelerde, dalga kıranlarda ve demiryollarında şok emici olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra erozyon kontrolü, anayollarda gürültü bariyeri, bataklık ıslahı, yol dolgularında kaplama alt malzemesi, sıcak karışım asfalt kaplamalarında modifiye malzeme ve yürüyüş yollarında binalarda sismik izolatör gibi kullanım olanakları bulunmaktadır (Turgut ve diğ. 2007, Topçu 1995, Topçu ve Avcular 1997, Sugözü ve Mutlu 2007, Gönüllü 2004, Snelson ve diğ. 2009).

Son yıllarda atık lastiklerin çimento ve beton sektöründe kullanımı için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar özellikle kırıntı ve toz haline getirilmiş atık lastiklerin kullanımına yöneliktir (Koçak ve Alpaslan 2011, Doğan 2005). Beton karışımında kullanılmış araba lastikleri parçalanarak hafif agrega olarak istinat duvarları ve çarpma bariyerleri için hazırlanan betonlarda kullanılmaktadır. Çarpma bariyerlerinde atık lastik katkıli betonların kullanımıyla, çarpma sırasında ortaya çıkan enerjinin sömürmesiyle kazalarda ortaya çıkacak can kaybının azalacağı ifade edilmiştir (Atahan ve Sevim 2008).

Hafif beton dayanım kriterlerine göre beton sınıfları; taşıyıcı hafif beton, orta dayanımlı hafif beton ve düşük dayanımlı hafif beton olarak 3 sınıfa ayrılmıştır. Bu betonların minimum dayanımları sırasıyla 17, 7-17 MPa ve tanımlanmamış olarak sıralanmaktadır (Neville 2006). Yapılan bir araştırmada %20 oranında lastik agrega kullanımı ile taşıyıcı hafif beton üretiminin, yaklaşık %60 oranında lastik agrega kullanımı ile de orta dayanımlı hafif beton üretimi yapılabileceği ifade edilmiştir (Emiroğlu ve Yıldız 2010).

Literatüre bakıldığında atık lastiklerin beton içerisinde agrega olarak kullanılması sonucu basınç dayanımın, eğilme dayanımının ve elastisite modülü değerlerinin azaldığı bilinmektedir (Sadioğlu 2006, Aiello ve Leuzzi 2010, Benazzouk ve diğ. 2007, Benazzouk ve diğ. 2008, Ganjian ve diğ. 2009). Yapılan çalışmalara göre betonda ince öğütülmüş atık lastik kullanımı ile her ne kadar betonun çekme ve basınç dayanımı bakımından istenen sonuçlara ulaşılmassa da, sıcaklıktan kaynaklanan büzülme çatlaklarının büyük ölçüde azalması, titreşim ve darbelere karşı dayanım kazanması, daha düşük birim ağırlık ve yüksek tokluk kazanması gibi avantajlara sahip olduğu belirlenmiştir (Emiroğlu ve Yıldız 2010, Khaloo ve diğ. 2009). Ayrıca atık lastiklerin uygun olan diğer puzolanik malzemelerle ve kimyasal katkılarla birlikte uygun oranda kullanılması ile çekme ve basınç dayanımındaki bu dezavantajın da giderileceği düşünülmektedir.

2.3. MALZEME KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN ANALİZLER

Çalışmada ikame edilen malzemelere ait yapılan analizler ile ilgili temel bilgiler maddeler halinde sunulmaktadır.

2.3.1. X-Işınları Kırınımı Tekniği İle Yapılan Analiz

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanmaktadır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlamaktadır. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlamaktadır (Anonim 2011a).

2.3.2. Fourier Kızılötesi Dönüşüm Spektroskopisi Tekniği İle Yapılan Analiz

Moleküler bağ karakterizasyonunu belirlemek için infrared (titreşim) spektroskopisi (IR) kullanılmaktadır. İnfrared spektroskopisi, maddenin infrared ışınlarını absorplaması üzerine kurulmuş olan bir spektroskopi dalı olarak ifade edilmekte olan hızlı, ekonomik ve yıkıcı olmayan fiziksel bir yöntemdir. IR tekniği hem kristal kafes tanımlamalarının fiziksel parametrelerinin kaynağı hem de numuneler arası saf deneysel nitel ilişkilerin açığa çıkarılması bakımından çok yönlü bir özelliğe sahiptir. Katı yüzeyindeki gaz ve sıvı adsorbsiyonunun incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Karakaya 2006, Gündüz 1990).

Infrared tekniğinde, moleküllerdeki kimyasal bağların titreşim, eğilme, bükülme, sallanma gibi tüm hareketleri için gerekli olan enerji, infrared ışınların elektro manyetik enerjisinden absorplanmaktadır. Bu absorpsiyonlar sonucu elde edilen IR spektrumları, molekül içindeki fonksiyonel grupları göstermekte ve burada ölçülen absorpsiyonlar pikler ile ifade edilmektedir. İnfrared spektrumlar genellikle dalga numarası ile tanımlanmakta ve ölçülen absorpsiyonlar, konsantrasyona ve numune kalınlığına doğrudan bağlı olmaktadır. Kimyasal bağlar C-H, C-C gibi aynı miktarda aynı şekilde enerji absorplanmaktadır. Pikler yapılarına bağlı olarak kuvvetli, orta ve zayıf; şekillerine bağlı olarak da geniş, orta ve dar olarak tanımlanmaktadır. IR spektrumları, piklerin bulunduğu yere, yapılarına ve şekillerine göre incelenerek numunelerde malzeme cinsi tayin edilmektedir. Pik boyu ve pik alanı ölçülerek standartlar ile karşılaştırmak suretiyle miktar tayini de yapılabilmektedir (Anonim 2011b).

Malzeme içindeki kimyasal olarak bağlı yapıların titreşimsel hareketleri infrared rejimde frekanslara sahiptir. İnfrared deneylerde radyasyon demetinin şiddeti (ışık

frekansının birer fonksiyonu olarak) numune etkileşimi öncesi (I_0) ve sonrası (I) ölçülmekte, frekansa karşılık I/I_0 diyagramı infrared spektrumunu vermektedir (İssi 2005).

Bir madde monokromatik infrared ışın bandı ile aydınlatıldığında, moleküllerin titreşim hareketleri nedeniyle, infrared ışınlar az veya çok adsorbe edilmektedir. Deneylerde dalga boyu ile adsorpsiyon arasında çizilen grafik maddenin bir karakteristiğidir ve maddenin tanımlanmasında kullanılabilir. İnfrared ışınlarının dalga boyları 1000-300000 nm arasında olmasına rağmen infrared spektroskopisinde, genellikle dalga boylan 2500-25000 nm arasında olan ışınlardan yararlanılmaktadır. Bu aralığa yakın infrared ve infrared bölgesi denilmektedir. İnfrared spektroskopisinde ışınlar dalga boyları ile değil, daha çok dalga sayılarıyla verilmektedir. Dalga sayısı $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ cm^{-1} ,dir.

Buna göre yukardaki dalga boyları aralığı $\bar{\nu} = \frac{1}{2500} \cdot 10^{-7} = 4000 \text{ cm}^{-1}$ ve $\bar{\nu} = \frac{1}{25000} \cdot 10^{-7} = 400 \text{ cm}^{-1}$ 'dir. Dalga sayılan 400 cm^{-1} den daha küçük ışınların enerjileri rotasyon (dönme) enerjileri seviyesinde olduklarından dolayı havadaki moleküller tarafından bile kolaylıkla adsorbe edilmektedirler (Karakaya 2006, Gündüz 1990).

Moleküler analizler Fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) tekniği kullanılarak tanecik yüzeylerindeki molekül gruplarını tanımlamak için kullanılabilir. Bu amaçla yapılan çimento, katkı çimento ve puzolanlarla ilgili çalışmalarda infrared spektrumu başlıca 4 geniş band bölgesinde değerlendirilebilmektedir. Bunlar Si-Al, S, C ve OH titreşim ve deformasyon bağlarındaki titreşim sayılarından oluşmaktadır. Bu dalga boyundaki titreşim sayıları aralarındaki farklar bölgesel olarak değerlendirilebilmektedir (Puertas ve diğ. 2004).

FT-IR analizlerindeki birinci bölge $400-1100 \text{ cm}^{-1}$ bölgesidir. Bu titreşim dalgaları Si (Si-O ve Si-O-Si) ve Al (Al-O, Al-O-Al) bağlarına karşılık gelmektedir. Çimentonun bileşenlerinden kalsiyum silikatlar $930, 1000-1010 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayılarında, kalsiyum ve karbon titreşimleri ise $2920-2930$ ve $2850-2855 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayıları aralığında daha yoğundur. Bu kalsiyum silikat titreşimleri bütün çimentolarda görülmektedir. Fakat referans çimentoların titreşim bandları $1000-1010 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında daha yoğundur (Puertas ve diğ. 2004).

İkinci bölge ise S (kükürt) bölgesidir. S titreşim dalgaları üç bölgede (1100-1300, 1620-1685 ve 3100-3600 cm^{-1}) S-O bağı olarak görülmektedir. Bu bağlar çimento içeriğindeki alçı taşından kaynaklanmaktadır (Gomes ve Ferreira 2005).

700-1500 cm^{-1} titreşim dalgaları üçüncü bölgeyi göstermektedir. Bu bölgede C (C-O) titreşim bağları vardır. Ancak ikinci bağlar 2500-3000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında bulunmaktadır. Bu, çimentonun karbonasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Karakaya 2006, Varast ve diğ. 2005).

Su moleküllerini gösteren bölge ise dördüncü bölgedir. Bu bölgedeki titreşim ve deformasyon bağları (O-H) 3400-3450, 1620-1650 cm^{-1} dalga sayılarında bulunmaktadır. Bu bölgede katkısız çimento harç örneklerinde daha düşük dalga sayılarında (3409-3414 cm^{-1}) görülür. Bu susuz bileşiklerin varlığını göstermektedir. Bunun aksine PÇ harçlarında daha yüksek dalga sayılarında (3441-3446 cm^{-1}) oluşmakta ve daha az oranda susuz bileşikler göstermektedir. Hidrate edilmiş çimentolarda portlandit ve tobermorite sırasıyla 3650 ve 3630 cm^{-1} dalga sayılarında görülmektedir (Varast ve diğ. 2005, Puertas ve Fernandez-Jimenez 2003).

Bu bölgelerde oluşan dalga sayıları yardımıyla minerallerdeki moleküler bağ karakterizasyonu belirlenebilmektedir.

2.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı oluşu gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkanının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye itmiştir. Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütmelerde üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. İlk ticari taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope “SEM”) 1965'de kullanılmaya başlanmış, bundan sonra teknik gelişmeler birbirini izlemiştir (Anonim 2011c).

Optik mikroskobun yetersiz kaldığı büyütmelede doğrudan başvuru olan inceleme yöntemidir. Taramalı elektron mikroskobunda numune üzerine gönderilen elektron demeti numune ile etkileşime girerek değişik sinyaller oluşturmaktadır. Bu sinyaller (ikincil elektronlar, geri yansıyan elektronlar, x ışınları v.b.) uygun detektörlerle toplanarak görüntü eldesinin yanı sıra elementel bilgi de sağlanabilmektedir (İssi 2005).

Taramalı Elektron Mikroskobunda görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilmektedir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir (Anonim 2011d).

Taramalı elektron mikroskobu optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini incelemekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (Anonim 2011e).

2.3.4. Zeta Potansiyel

Üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı puzolanik malzemelerin çimento ile uyumlarının tanımlanabilmesi açısından en önemli faktörlerden biri, malzemelerin yüzey yüklerinin bilinmesidir. Puzolanların büyük bir bölümünü oluşturan mineraller polar sulu ortam ile temas geçtiklerinde yüzeylerinde yükler oluşmaktadır. Bu yükler mineral yüzeylerindeki iyon dağılımını etkilemektedir. Aynı yüklü iyonlar itilirken, farklı yüklü iyonlar yüzeye doğru çekilmektedir. Böylece biri mineral yüzeyinde diğeri

de sulu fazda olmak üzere iki tabaka şeklinde elektriksel çift tabaka oluşmaktadır. Bu tabakada yani mineral yüzeyinde bulunan iyonlar, mineral ile birlikte hareket etmekte ve aynı zamanda hidrate olmaktadır. Bu tabakada ölçülen potansiyel zeta potansiyel olarak tanımlanmaktadır. Zeta potansiyel her ne kadar yüzey potansiyeline eşit olmasa da, yüzey potansiyeli hakkında çok önemli değerler vermekte ve çimento biliminde kullanılmaktadır (Uçar ve diğ. 2010).

Sterm potansiyeli (□□□□) doğrudan ölçülemediğinden dolayı, elektrokinetik ölçümlerden yararlanılarak tahmin edilebilmektedir. Elektrokinetik özellikler, elektriksel çift tabakanın çözelti kısmında; mineral tarafındaki sabit tabaka ile diğer hareketli dağılmış iyonlar tabakasını ayıran kayma yüzeyi üzerindeki potansiyel büyüklüğüne bağlıdır. Yüklü mineral tanecikleri ile etrafındaki sulu çözeltinin birbirlerine göre hareketlerinde, çözelti-tane arasındaki kayma yüzeyindeki ölçülebilen potansiyele “Elektrokinetik Potansiyel” veya “Zeta Potansiyel” denir (Koçak 2008).

Su içerisinde belli bir yük kazanan tane, süspansiyon içerisindeki karşı yükteki iyonları çekmektedir. Buna bağlı olarak yüklü tanenin yüzeyinde güçlü bir bağ yüzeyi ve dışa doğru yayılmış bir yüzey oluşmaktadır. Tane yüzeyi ile bu yüzeye adsorblanmış iyon tabakası, kondansatörün tabakalarına benzediği için bu yapıya “elektriksel çift tabaka” denilmektedir (Uçar ve diğ. 2010).

Zeta potansiyel, elektriksel çift tabakanın kontrol altında tutulabildiği ve deneysel olarak ölçülebildiği bir büyüklüktür. Özellikle kolloidal sistemlerde, flokülasyon, koagülasyon ve stabilite, flotasyonda reaktiflerin adsorbsiyonu, hava kabarcıklarının mineral tanelerine yapışması olaylarının açıklanması ve zeta potansiyeline göre korelasyonları her zaman yapılmaktadır (Shaw 1970, Fuerstnau ve Chander 1985).

Zeta potansiyel aşağıdaki yöntemlerden birisi ile kontrol altında tutulabilir (Adamson 1967).

- Farklı iyonların konsantrasyonlarının ve değerliklerinin etkisi zeta potansiyel, elektrolit konsantrasyonu (elektriksel çift tabaka kalınlığının azalmasından) ve eklenen katyonların değerliliği arttıkça, düşer.

- Potansiyel belirleyen iyonlar zeta potansiyel doğrudan yüzey elektrik yüküne ve bu da potansiyel belirleyen iyonların miktarına bağlı olduğundan, bu iyonların ilavesiyle zeta potansiyelin hem işareti hem de yükü kolaylıkla değiştirilebilir.
- Aynı değerlikli iyonların atomik çapı aynı değerliliğe sahip iyonlarda atomik yarıçap arttıkça zeta potansiyel düşer.
- Hidrojen iyonu, yüksek değerlikli iyonlar ve kompleks organik kationlar kuvvetli olarak zeta potansiyeli azaltır ve hatta çok düşük konsantrasyonlarda bile işaretini değiştirir.
- Yüzey aktif maddelerin zeta potansiyele etkisi çok belirgindir.

2.3.4.1. Elektrokinetik Olay ve Zeta Potansiyelin Ölçülmesi

Elektrik yüklü bir yüzey ile bunu çevreleyen çözeltinin birbirine göre hareketi elektrokinetik olaylara neden olmaktadır. Elektrokinetik, elektriksel çift tabakanın hareketli kısmını yüzeyden ayırmaya girişildiği zaman meydana gelen dört olayla ilgilidir.

Elektriksel alan yüklü yüzeye uygulandığı zaman, elektriksel çift tabakanın her iki tabakasında da bir kuvvet oluşmaktadır. Yüklü yüzey ve buna bağlı olan kısımlar elektrik alanına paralel hareket etme eğiliminde iken elektriksel çift tabakanın hareketli kısmındaki iyonlar ise buna zıt yönde net bir yer değiştirme göstermektedirler. Bu sırada çözeltinin kendisi de iyonlarla beraber hareket ederek, bir akışa neden olmaktadır. Bunun tersi olarak da, eğer elektriksel çift tabakanın yüklü yüzey ve dağılmış iyonlar tabakası birbirine bağlı olarak hareket ettirilirse bir elektrik alanı oluşur. Burada mineral tanelerinin hareketi veya oluşan elektrik alanı, dört elektrokinetik olayı meydana getirmektedir (Uçar 1995, Uçar 2004). Bunlar:

Elektroforez; eğer sistemde yüklü parçacıklar sıvı içerisinde asılı halde duruyorsa ve sisteme bir elektrik alanı uygulanırsa, parçacıklar hareketsiz sıvı içerisinde hareket ederler. Buna “elektroforez” denir. Şiddeti bilinen bir elektrik alanı içerisindeki yüklü parçacığın hızının ölçülmesi, parçacığın net elektrik yükü veya yüzey potansiyeli hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

Elektroosmoz; uygulanan elektrik alana göre sıvının, yüklü ve hareketsiz kapileri veya poroz tıkaç formundaki katıdan geçerek hareket etmesi olayıdır. Sıvı hareket hızının

ölçülmesi ile sabit duran yüklü duvarın net elektrik yükü veya elektrik potansiyeli hakkında bilgi elde edilir.

Akma potansiyeli (Streaming potential); elektrolitin bir kapiler veya poroz tıkaç içerisinde geçişe zorlanmasıyla oluşur. Kapiler veya tıkaç net bir yük taşır ve akışla birlikte potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyel yükün (şarjın) ters iletkenlik, iyon difüzyonu ve daha az olarak elektroosmozis tarafından mekanik taşınmaya karşı çıkar. Bir galvanometre aracılığı ile kapilerin veya poroz tıkaçın uçları arasındaki potansiyel farkı ölçülerek yüzeydeki elektrik yükü ve potansiyeli hakkında bilgi edinilir.

Çökme potansiyeli (Sedimentation potential); yüklü parçacıkların gravite veya santrifüj kuvvetin etkisi altında hareketsiz sıvı içerisinde çökmesi ile oluşan potansiyel farkıdır.

Minerallerin zeta potansiyellerinin ölçülmesinde, yukarıdaki elektrokinetik tekniklerden en çok kullanılanı elektroforez yöntemidir. Bu yöntemde mineral süspansiyonu veya kolloid madde bir elektroliz cihazında elektrolit olarak kullanılmaktadır. Cihaza elektrik akımı verildiği zaman süspansiyondaki taneler yüklerine göre çözelti içindeki elektrik alanında hareket etmektedir. Hareketin hızı ve yönünden yararlanarak elektrokinetik potansiyeli (zeta potansiyeli) ve yüzey elektrik yükünün işaretini belirlemek mümkündür (Uçar 1995, Uçar 2004). Mineral tanelerinin elektroforetik hareketliliği, makro elektroforez ve mikro elektroforez adı verilen iki yöntem ile bulunabilir. Makro elektroforetik metoda göre çalışan cihazlardan en gelişmiş olanı Tiselius cihazıdır. Bu cihazda U şeklinde tüpün alt kısmına elektroforetik hareketliliği ölçülecek çözelti, onun üzerine de tüpün her iki ucuna da olmak üzere çözelti ile aynı iletkenliğe sahip saf bir sıvı ilave edilir. Bu sıvı içine her iki uca birer platin elektrot daldırılır ve elektrotlara bir potansiyel farkı uygulandığında saf sıvı-çözelti sınırının, çözeltideki taneciklerin hareketine göre anoda veya katoda hareket ettiği görülür. Bu yöntemle kolloid taneciklerinin yük işaretleri belirlenir ve hareketin hızından zeta potansiyeli de hesaplanabilir (Uçar 1995, Uçar 2004).

Mineral taneleri kararlı bir süspansiyon halinde ve mikroskop altında görülebilecek durumda ise parçacıkların elektroforetik hareketliliği doğrudan doğruya mikro elektroforez cihazı ile ölçülebilir. Mikro elektroforez cihazı, bir mikroskobun görüş alanına yerleştirilmiş yatay durumdaki ince yassı bir cam hücreden oluşur. Hücrenin her

iki ucunda platin elektrotlar bulunur. Platin elektrotlar 0,001-0,01 mol/dm³ konsantrasyona kadar uygundur. Aksi halde Cu/CuSO₄ veya Ag/AgCl elektrotları kullanılarak gaz oluşumu engellenebilir (Uçar 1995, Uçar 2004).

10 μ m'nin altına öğütülmüş mineral tanelerinden belirli bir miktar alınarak belirli bir miktar suyun içerisine aktarılıp, pH'sı ayarlanır. Bu sırada çözünme olmaması gerekir, eğer çözünme varsa denge oluncaya kadar bekletilir. Hazırlanan süspansiyon cam hücreye doldurulup hücre alettaki yerine konur ve elektrotlar da bu hücredeki yerlerine hava kabarcığı kalmayacak şekilde takılır. Hücre aydınlatılarak mikroskopta görüş alanı saptanır. Bu sırada hücre içerisinde tane çökmesinin olup olmadığı kontrol edilir. Çökme ancak iri tane olması durumunda söz konusudur. Elektrotlardan potansiyel ancak solüsyonun sabit olması durumunda verilebilir. Eğer solüsyon dengede değilse bir süre beklenerek dengeye gelmesi sağlanır. Elektrotlar aracılığı ile sisteme belirli bir potansiyel uygulandığında hücredeki koloidal taneler yüzeylerindeki net elektrik yükünün tersi işareti taşıyan elektrot yönünde hareket ederler. Hareketin hızı, mikroskobun okülerinde bulunan, bir aralığı 50 μ m olan retikül çizgilerinden, tanenin kat ettiği yol ve alete bağlı kronometre ile de bu yolu katediş zamanı ölçülerek bulunur (Uçar 1995, Uçar 2004).

Sisteme potansiyel uygulandığında, yüklü tanecikler hareket ederken genellikle belli bir yüzey yüküne sahip olan cam tüp hücreye bağlı olarak (elektroosmoz nedeniyle), sıvı da hareket eder. Tüp civarındaki sıvı akışı hücre tamamen kapalı olduğundan ters yönde bir akış ile dengelenir. Böylece sıvı akımıyla birlikte tanelerde hareket eder. Ters yöndeki akış hızı tüpün merkezinde maksimumdur ve tüpün içinde parabolik bir değişim gösterir. Bu parabol üzerinde öyle bir yer vardır ki her iki yöne doğru olan sıvı akışı birbirini dengeleyerek elektroosmozun etkisini yok ederek akış hızını sıfır yapar. İşte bu noktaya hareketsiz seviye (stationary level) denir. Hücrenin yapısına göre bu seviye değişmektedir. Silindirik bir hücre için bu seviye hücre duvarından itibaren hücre iç çapının %14,6'sı kadar mesafede iken, dikdörtgen kesitli bir hücre için genişliğin %20,4'ü kadar mesafededir. İşte tüp içerisinde gözlenen taneciğin ölçülen hızının elektroosmozdan etkilenmemesi için tüm ölçümlerin bu seviyede yapılması gereklidir. Bu seviyeye, cihazda bulunan mikrometrik vida yardımıyla ayarlama yapılır. Bu şekilde en az 10 ölçüm yapılır. Yapılan bu ölçümlerden uç değerler atılarak, bulunan ortalama zamandan tanelerin hızı bulunur (Uçar 1995, Uçar 2004).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Çalışmada, TS EN 197-1 standardına uygun Set İstanbul Çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42,5 R (PÇ 42,5 R) tipi çimento kullanılmıştır (TS EN 197-1 2002). Yüksek Fırın Cürufu (YFC) Zonguldak, Ereğli Demir-Çelik İşletmesinden ve atık lastik tozu (ALT) ise Ankara'da atıl lastik geri dönüşümü yapan ticari bir işletmeden temin edilmiştir. Atık lastik tozu; çeşitli sınıf ve boyutlardaki atık lastiklerin granül hale getirilme sırasında alta inen çok ince boyutlardaki toz malzemeden alınmış ve 125 µm elekten elenerek elde edilmiştir. Harç numunelerinin hazırlanmasında TS EN 196-1' e uygun olarak Set Trakya Çimento Sanayi tarafından üretilen standart kum ve İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır (TS EN 196-1 2002).

3.2. YÖNTEM

Bu bölüm; hammaddelerin hazırlanması ve karakterizasyonu, örneklerin hazırlanması ve yapılan deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan çimento hamur ve harç örneklerinin kodları ile ikame oranları Çizelge 3.1'de, karışım miktarları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento örneklerine ait kodlar ve ikame oranları

Kod	Çimento miktarı, %	YFC ikame miktarı, %	ALT ikame miktarı, %
M1	100	0	0
M2	95	5	0
M3	90	10	0
M4	85	15	0
M5	80	20	0
M6	97,5	0	2,5
M7	95	0	5
M8	95	2,5	2,5
M9	90	7,5	2,5
M10	90	5	5
M11	85	10	5
M12	80	15	5

Çizelge 3.2. Çimento harç örneklerine ait karışım miktarları

Kod	Çimento miktarı (g)	YFC miktarı (g)	ALT miktarı (g)	Su miktarı (ml)	Standart kum miktarı (g)	su/çimento
M1	450	0	0	225	1350	0,5
M2	427,5	22,5	0			
M3	405	45	0			
M4	382,5	67,5	0			
M5	360	90	0			
M6	438,75	0	11,25			
M7	427,5	0	22,5			
M8	427,5	11,25	11,25			
M9	405	33,75	11,25			
M10	405	22,5	22,5			
M11	405	45	22,5			
M12	405	67,5	22,5			

3.2.1. Fiziksel Analizler

Fiziksel analizlerde tane boyut dağılımı, özgül yüzey alanlarına ve özgül ağırlıkları belirlenmiştir.

3.2.1.1. Tane Boyut Analizi

PÇ, YFC ve ALT'nin tane boyut analizleri Malvern Hydro 2000 G marka cihaz ile yaş metot uygulanarak Kütahya Porselen AŞ'de yapılmıştır.

3.2.1.2. Özgül Yüzey Tayini

Özgül yüzey tayini Toni Teknik marka 6565 model Blaine cihazı ile TS EN 196-6 "Çimento Deney Metotları" standardına göre Set Çimento Ambarlı Tesisinde yapılmıştır (TS EN 196-6 2000).

Deney numunesi miktarı TS EN 196-6 "Çimento Deney Metotları" standardına göre belirlenerek deney, etüvde kurutulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-6 2000).

3.2.1.3. Özgül Ağırlık Tayini

Özgül ağırlıkları Quantachrome marka MVP-3 model piknometre cihazı ile Set Çimento Ambarlı Tesisinde belirlenmiştir.

3.2.2. Kimyasal analizler

Çimento, katkılı çimento ve malzemelerin kimyasal analizleri (XRF) ARL marka 8680 S model X-Ray spektrometresi ile TS EN 196-2'e göre Set Çimento Ambarlı Tesisinde belirlenmiştir (TS EN 196-1 2002).

3.2.3. Molekül yapı analizleri

Çalışmada kullanılan malzemelerin kafes ve moleküler yapısının belirlenmesi için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri yapılmıştır.

Bu testler Bruker marka Vertex 70 model FT-IR cihazı kullanılarak D.P.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları 400-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında ATR cihazı ile belirlenmiştir.

3.2.4. Mineralojik analizler

Çalışmada kullanılan malzemelerin mineralojik analizi, Rikagu marka miniflex model XRD (X-Işınları difraksiyonu) cihazı ile Cu K_{α} ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$) ışınması kullanılarak 10-70° açı aralığında 1°/dakika çekim hızı ile D.P.Ü. Seramik Mühendisliği laboratuvarında tespit edilmiştir.

3.2.5. Elektrokinetik Analizler

Hammaddelerin elektrokinetik (zeta) potansiyelleri mikroeletroforez adı verilen teknik kullanılarak ölçülmüştür. Mikroeletroforez tekniğinde, bir kapiler içerisindeki süspansiyon ortamında bulunan parçacıkların elektriksel bir alanda göç etme hızından yararlanılmaktadır. Elektroforez hücresi adı verilen bu kapilerin iki ucuna yerleştirilmiş elektrotlara bağlı bir güç kaynağı yardımıyla, kapiler içerisinde bir elektriksel alan oluşturulmaktadır. Kapiler içerisine transfer edilmiş süspansiyon içerisindeki kolloidal taneciklerin hareketi, mikroskop yardımıyla izlenerek, elektroforetik mobilite (hareketlilik) bulunmaktadır. Buradan da zeta potansiyeli schmulowski denklemi kullanılarak doğrudan alet tarafından belirlenmektedir. Bu amaçla, Zeta-Meter System 3.0 + marka zeta potansiyel ölçüm cihazı kullanılmıştır. Elektrokinetik özelliklerinin

belirlenmesi için hammaddeler, agat havanda 10 µm boyutunun altında kalacak şekilde öğütülmüştür.

Zeta potansiyel ölçümü için agat havanda ile iyice öğütülen bütün hammaddelerden yaklaşık 0,5 g numuneler alınarak, ayrı ayrı beherler içindeki 50 ml saf su içine konmuş ve 10 dk karıştırılarak HCl ve NaOH çözeltileri ile pH'leri ayarlanmıştır. Ayrıca betonun pH'sinin de 11-13 arasında olduğu dikkate alınarak çimento örneklerinin pH'si bu değerlerde tutulmaya çalışılmıştır. Daha sonra iri tanelerin çökmesi için 5 dk dinlendirildikten sonra zeta potansiyelleri ölçülmüştür. Çalışılan her pH değerinde yeteri kadar (min. 10) tanenin hareket hızlarına göre cihazın mikro işlemcisi tarafından Smoluchowski denklemine göre hesaplanarak zeta potansiyel değerlerine dönüştürülmüş ve cihaz tarafından ortalama zeta potansiyel değerleri belirlenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Karıştırma esnasında karışımın sıcaklığı 20 ± 2 °C olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan malzemelerin zeta potansiyel ölçümleri D.P.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3.2.6. Mikroyapı Analizleri

Hidratasyon sonrası elde edilen referans ve katkılı çimento hamurlarının 28. gündeki mikro yapı çalışmaları farklı büyütme oranlarında JEOL marka JSM 6060LV model değişken basınçlı tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak Fatih Üniversitesi Bio-nanoteknoloji laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.7. Standart Kıvam Tayini

Deney TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini" standardına göre 20 ± 2 °C oda sıcaklığında ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-3 2002). 500 gram numune için belirlenen ikame oranındaki malzeme ve çimento 1 gram doğrulukla tartılarak ve karışım suyu başlangıç olarak toplam numune ağırlığının %25'i kadar alınarak dereceli mezürle ölçülmüştür. Vicat aletine sonda takılarak vicat halkası (kalıp) ve taban camı ince yağ ile yağlanarak ve sonda cam levha üzerine indirilerek vicat aletinin göstergesi sıfıra ayarlanmıştır. Karıştırma kabına karışım için hazırlanan su katılarak 5-10 saniye

içerisinde temsili 500 gramlık numune suyun içerisine boşaltılmıştır. Boşaltma işlemi sonunda kronometre düşük hızda 90 saniye süreye ayarlanarak karıştırma mikseri çalıştırılmış ve 90 saniye sonunda karıştırma mikseri durdurularak 15 saniye dinlendirilmiştir. Uygun bir kazıyıcı ile karıştırma kabının iç çeperlerine yapışan hamur sıyrılarak karışıma eklenmiş ve mikser tekrar düşük hızda 90 saniye çalıştırılarak 180 saniyelik karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon yapmadan daha önce yağlanmış ve cam levha üzerine yerleştirilmiş vicat halkasına çimento hamuru yerleştirilmiş, kalıbın üstüne taşan çimento hamuru fazlalığı düzgün bir şekilde spatül yardımıyla alınmıştır. Vicat kalıbı ve taban plakası sondanın altında merkezlenecek şekilde cihaza yerleştirilerek sonda hamur ile temas edinceye kadar yavaşça indirilmiştir. Sonda serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile hamurun merkezine girmesi sağlanmış ve batma işlemi tamamlandığında sondanın alt yüzü ile taban plakası arasındaki mesafenin okuması yapılmıştır. Her batırma işleminden sonra sonda temizlenerek, kıvam için gerekli olan su miktarının tayini için sondanın cam levhaya olan uzaklığı 6 ± 1 mm oluncaya kadar su artırılarak ya da azaltılarak deneye devam edilmiştir. Mesafenin 6 ± 1 mm okunduğu durumda su miktarı, kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilmiştir.

3.2.8. Priz Başlama Ve Sona Erme Süresinin Tayini

Deney TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini” standardına göre 20 ± 2 °C oda sıcaklığında ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-3 2002). 500 gram numune için belirlenen ikame oranında malzeme ve çimento 1 gram doğrulukla tartılarak ve kıvam deneyinde bulunan karışım suyu miktarı dereceli mezürle ölçülmüştür. Vicat aletine iğne takılarak vicat halkası (kalıp) ve taban camı ince yağ ile yağlanmış, iğne cam levha üzerine indirilerek ve vicat aletinin göstergesi sıfıra ayarlanmıştır. Karıştırma kabına karışım için hazırlanan su katılarak 5-10 saniye içerisinde temsili 500 gramlık numune suyun içerisine boşaltılmıştır. Boşaltma işlemi sonunda kronometre düşük hızda 90 s süreye ayarlanarak karıştırma mikseri çalıştırılmış ve 90 s sonunda karıştırma mikseri durdurularak 15 s dinlendirilmiştir.

Uygun bir kazıyıcı ile karıştırma kabının iç çeperlerine yapışan hamur sıyrılarak karışıma eklenmiş ve mikser tekrar düşük hızda 90 saniye çalıştırılarak 180 saniyelik karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Hiçbir sıkıştırma veya vibrasyon yapmadan daha

önce yağlanmış ve cam levha üzerine yerleştirilmiş vicat halkasına çimento hamuru yerleştirilerek kalıbın üstüne taşan çimento hamuru fazlalığı düzgün bir şekilde spatül yardımıyla alınmıştır. Vicat kalıbı ve taban plakası cihaza yerleştirilerek hamur ile temas edinceye kadar yavaşça indirilmiş, iğne serbest bırakılarak kendi ağırlığı ile hamurun içerisine girmesi sağlanmış ve batma işlemi tamamlandığında iğnenin alt yüzü ile taban plakası arasındaki mesafenin okuması yapılmıştır. Her batırma işleminden sonra iğne temizlenmiştir. Aynı numuneye batırılma işlemleri, iğnenin hamura batırıldığı noktalar arasındaki ve kalıp kenarından olan mesafe en az 10 mm olacak şekilde ayarlanarak 10 dakika aralıklarla tekrarlanmıştır. Deneye başlandığı andan itibaren iğne ile taban plakası arasında okunan mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir.

Priz başlama süresi tespit edilen numune ile dolu vicat halkası ters çevrilerek taban plakası ile temas eden yüzey üste getirilerek priz sona erme süresi tayini yapılmıştır. Küçük batmaların doğru şekilde gözlemlenebilmesi için vicat iğnesi bağlantı halkası ile tutturulmuş, priz başlama süresinin tayinindeki işlemler uygulanarak batırma işlemi 15 veya 30 dakika aralıklarla tekrarlanmıştır. Deneye başlandığı andan itibaren iğnenin ilk 0,05 mm kadar hamura battığı ana kadar geçen süre en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sona erme süresi olarak kaydedilmiştir.

3.2.9. Hacim Genleşmesi Tayini

Deney TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: priz süresi ve genleşme tayini” standardına göre 20 ± 2 °C oda sıcaklığında ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-3 2002). İki adet Le Chatelier kalıbı ve cam levha yağlandıktan sonra kalıplar cam levhalar üzerine yerleştirilmiştir. Standart kıvam deneyinde belirlenen malzeme ve çimento miktarı kullanılarak iki adet temsili numune hazırlanmıştır. Doldurma sırasında kalıbın yarık kısmının açılmaması için uçlar bir pul ya da ip ile bağlanmıştır. Hazırlanan hamur kalıbın içine sıkıştırma veya vibrasyon uygulaması yapılmadan doldurulmuş ve kalıbın üst yüzeyi bir spatula ile kenar seviyesinde düzeltilmiştir. Daha sonra kalıbın üstüne cam levha ve ağırlık yerleştirilerek rutubet dolabında $24\pm 0,5$ saat muhafaza edilmiştir. $24\pm 0,5$ saat sonra ipler ve pullar çözüldükten hemen sonra çubuk uçları arasındaki açıklık 0,5 mm hassasiyetle ölçülmüştür. İkinci ölçüm için kalıplar üzerindeki cam levha kaldırılarak kalıbın çubukları yukarıya gelecek şekilde kaynatma suyuna daldırılma işlemi

gerçekleştirilmiştir. Kalıpların bulunduğu su ile dolu kaynatma kabı 30±5 dakika içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılmış, kaynama sıcaklığına ulaşıldıktan 3 saat ±5 dakika sonra kalıpların çubuk uçları arasındaki açıklık 0,5 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Üçüncü ölçüm için kalıplar kaynatma kabından alınarak laboratuvar ortamında 20±2 °C de soğumaya bırakılmış daha sonra çubuk uçları arasındaki açıklık 0,5 mm hassasiyetle ölçülmüştür. En son olarak da üçüncü ve birinci okumaların farkı alınarak mm cinsinden toplam hacim genişmesi kaydedilmiştir.

3.2.10. Eğilme Ve Basınç Dayanımı Deneyleri

Çalışmada kullanılan çimento harç örneklerinin (40x40x160 mm) hazırlanması; Deney TS EN 196-1 “Çimento Deney Metotları – Bölüm1: Dayanım tayini” standardına göre 20±2 °C oda sıcaklığında ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-1 2002). Tüm çimento harç örneklerinden her bir grup numune için su/çimento oranı 0,50 olarak belirlenmiş ve ikame oranlarına göre malzeme miktarları hazırlanmıştır. Çimento kalıpları temizlenerek yağlanmış ve mikser çalışmaya hazır duruma getirilerek, belirlenen su karıştırma kabı içerisine konularak üzerine ikame malzemesi ve çimento ilave edilmiştir. Bu işlemin hemen ardından mikser düşük hızda çalıştırılmış ve 30 saniye sonunda 1350 gram referans kumu 30 saniye içerisinde karışıma sürekli olarak ilave edilmiştir.

Daha sonra mikser yüksek hızda ayarlanarak karışıma 30 saniye daha devam edilmiş ve toplam 1,5 dakika süre sonunda mikser durdurulmuştur. Durdurma işleminin hemen ardından 15 saniye içerisinde kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harçlar lastik bir sıyrıcı yardımıyla kabın ortasına toplanmış, daha sonra karıştırma işlemine yüksek hızda 60 saniye daha devam edilmiş ve bu süre sonunda mikser durdurulmuştur. Kabın içerisindeki harç kalıbın her bir bölümüne iki tabaka halinde olacak şekilde doldurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Birinci tabakanın doldurulmasından hemen sonra sıkıştırma test aparatı (40x40x160 mm çimento numuneleri için) kullanılarak sıkıştırma işlemi yapılmış ve kalıp sarsma tablası cihazına sabitlenerek 1 dakika içinde 60 sarsma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sarsma işlemi sonunda ikinci tabaka için kalan harç kalıba yerleştirilerek birinci tabakadaki gibi uygulanan işlemler tekrarlanmıştır. Kalıp, sarsma tablasından dikkatlice alınarak harç fazlalığı, dik tutulan bir masterla her yöne bir kere olacak şekilde enine testere hareketi ile sıyrılarak alınmıştır. Kalıpların üstü 210x185 mm boyutlarındaki cam ile örtülerek numuneler %90 nem oranına sahip kür kabinine

alınmış ve 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda numuneler kür kabininden alınarak dikkatli bir şekilde kalıptan çıkarılmış, numuneler aralarında boşluk olacak şekilde yatay olarak kür suyu sıcaklığı 20 ± 1 °C olan kür havuzuna yerleştirilmiş ve basınç mukavemeti deneyi uygulanıncaya kadar bekletilmiştir.

Çimento eğilme dayanımı tayini için tüm çimento harç örnekleri 2, 7, 28 ve 90 gün kür havuzunda bekletildikten sonra alınmış daha sonra numunelerin TS EN 196-1 standardına uygun olarak eğilme dayanımı değerleri tespit edilmiştir (TS EN 196-1 2002). Prizma numune deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine ve uzunluk eksenine mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde mesnet silindirleri üzerine yerleştirilmiştir. Yük, yükleyici silindir vasıtası ile prizmanın karşı yan yüzünden dik olarak uygulanarak ve düzgün olarak 50 ± 10 N/s hızında olacak şekilde prizma numune kırılıncaya kadar artırılmıştır. Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (F_f) kaydedilerek eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir.

İki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanımı deneyine kadar ıslak bir bezle sarılarak muhafaza edilmiştir. Çimento basınç dayanımı tayini için yarım prizmalar, cihazın plakaları arasına $\pm 0,5$ mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plakadan veya yardımcı plakalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiştir. Yük 2400 ± 200 N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana kadar artırılarak kırılmadaki en büyük yük (F_c) kaydedilmiştir.

Çimento harç örneklerinin basınç dayanımları 2, 7, 28 ve 90 gün sonra TS-EN 196-1'e göre Atom-Technik marka cihaz kullanılarak Set Ambarlı Çimento Tesisinde belirlenmiştir (TS EN 196-1 2002).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular ve tartışma bölümü malzemelere uygulanan analizler, çimento hamuru örneklerine uygulanan deneyler ile eğilme ve basınç dayanımı deneyleri olmak üzere başlıca üç ana bölümden oluşmaktadır.

4.1. MALZEMELERE UYGULANAN ANALİZLER

Malzemelere fiziksel, kimyasal, minerolojik, moleküler ve zeta potansiyel analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçları gösterir çizelge ve şekiller, analizlerin ilgili bölümlerinde verilmiştir.

4.1.1. Fiziksel Analizler

Fiziksel analizlerde tane boyut aralığı, özgül yüzey alanları ve özgül ağırlıkları belirlenmiştir. PÇ, YFC ve ALT'nin elek üstü oranları ve yine aynı malzemeler ile çalışmada kullanılan çimentoların fiziksel özellikleri (özgül yüzey alan ve özgül ağırlık değerleri) Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzemeler	Boyut aralığı (elek üstü), %			Özgül ağırlık, g/cm ³	Özgül yüzey, cm ² /g
	> 45 µm	> 90 µm	> 200 µm		
PÇ	4,7	0,3	0,0	3,15	3504
ALT	45,4	17,9	2,2	1,70	2404
YFC	60,9	46,0	25,5	2,88	1848
M 1	6,2	0,2	0	3,15	3483
M 2	7,8	1,3	0	3,16	3578
M 3	10,4	3,7	0	3,15	3505
M 4	14,0	7,1	0,5	3,11	3233
M 5	10,9	3,9	0	3,10	3040
M 6	7,3	0,5	0	3,11	3667
M 7	7,5	0,5	0	2,88	3341
M 8	8,3	1,7	0	3,09	3547
M 9	11,5	4,0	0	3,06	3352
M 10	12,0	3,9	0	3,08	3354
M 11	12,1	4,2	0	2,98	3326
M 12	23,9	13,8	1,2	2,99	3009

Tüm elek üstü tane boyut aralığı değerlerine bakıldığında, PÇ'nin daha ince tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. PÇ, ALT ve YFC'nin 200 µm elek üstü oranlarına göre sırasıyla %0, %2,2 ve %25,5, 90 µm elek üstü oranlarına göre sırasıyla %0,3, %17,9 ve %46, 45 µm elek üstü oranlarına göre ise sırasıyla %4,7, %45,4 ve %60,9

olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.1). YFC ve ALT ikame oranına göre çimentoların boyut aralığı farklılık göstermiştir. Özgül yüzey alanı ile elek üstü oranları paralellik göstermiştir. En yüksek özgül yüzey alanına sahip malzemenin PÇ olduğu, daha sonra ALT ve YFC'nin sıralandığı görülmektedir (Çizelge 4.1).

PÇ'nin özgül ağırlığı 3,10 g/cm³ iken, YFC'nin 2,88 g/cm³, ALT'nin ise 1,70 g/cm³'dür (Çizelge 4.1). Bu nedenle fiziksel olarak düşük özgül ağırlığa sahip olan YFC ve ALT, PÇ'ye ikame edildiği zaman elde edilen YFC ve ALT ikameli çimentoların da özgül ağırlığını düşürmektedir

4.1.2. Kimyasal analizler

PÇ, YFC ve ALT'nin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.2'de, tüm çimento örneklerinin ise Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PÇ, YFC ve ALT'nin kimyasal özellikleri

Materyaller	PÇ	YFC	ALT
Kimyasal kompozisyonlar			
SiO ₂ (S)	19,88	37,61	18,30
Al ₂ O ₃ (A)	5,24	15,37	4,08
Fe ₂ O ₃ (F)	2,66	0,63	3,88
CaO (C)	63,50	33,09	9,94
MgO (M)	1,11	8,55	2,30
SO ₃	2,78	0,00	3,57
Na ₂ O	0,40	0,70	1,06
K ₂ O	0,78	0,96	0,45
Cl ⁻	0,0071	0,01	-
Kızdırma kaybı	3,72	0,17	-
C+ M/ S	-	1,11	-
Serbest CaO	1,43	0,10	0,10
Reaktif SiO ₂	-	29,04	-

Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonlarına göre PÇ yüksek oranda CaO içerirken, düşük oranda Al₂O₃, Fe₂O₃ ve SO₃ bileşiklerinden oluşmaktadır. ALT başlıca SiO₂ ve CaO içermektedir. YFC ise SiO₂, CaO ve Al₂O₃ ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ (S/A) oranı 2,45'dir. YFC'nin ise puzolanik özelliğinin belirlenmesinde yararlanılan C+M/S oranının 1,11 yani 1 den büyük olması puzolanik özelliğinin olumlu olduğunu göstermektedir (Yeğinobalı 2003).

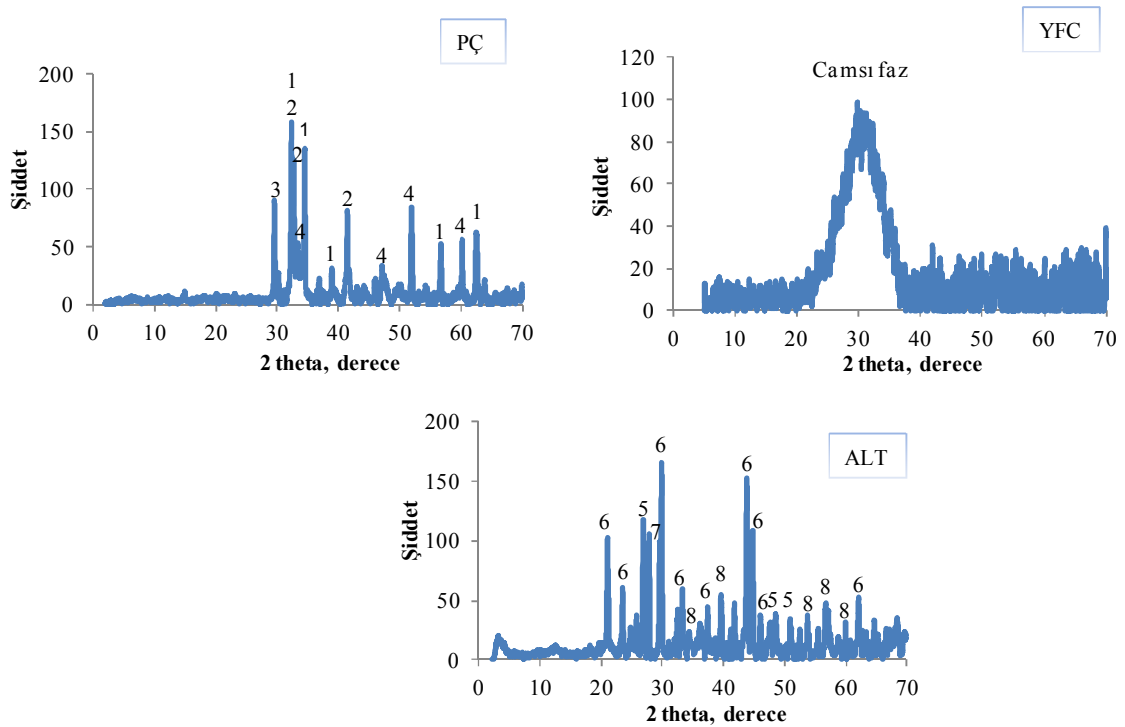
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyonlar	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
SiO ₂ (S)	19,84	20,20	20,89	22,00	23,43	19,67	19,66	19,85	21,36	20,72	21,37	22,18
Al ₂ O ₃ (A)	5,16	5,47	5,85	6,45	7,24	5,16	5,17	5,30	6,03	5,70	6,09	6,52
Fe ₂ O ₃ (F)	2,62	2,57	2,53	2,44	2,30	2,66	2,70	2,63	2,55	2,63	2,55	2,51
CaO (C)	63,48	62,35	61,32	59,53	57,33	62,44	61,25	61,71	59,93	59,95	58,93	57,37
MgO (M)	1,11	1,33	1,60	2,04	2,61	1,14	1,16	1,25	1,74	1,54	1,81	2,13
SO ₃	2,81	2,81	2,64	2,56	1,98	1,79	0,82	1,95	1,20	0,33	0,90	0,22
Na ₂ O	0,78	0,81	0,79	0,80	0,82	0,79	0,80	0,79	0,81	0,81	0,82	0,83
K ₂ O	0,41	0,79	0,44	0,46	0,47	0,43	0,46	0,44	0,54	0,54	0,54	0,56
Kızdırma kaybı	3,73	3,79	3,54	3,23	2,99	4,94	6,58	5,07	5,04	6,30	5,60	5,84
Serbest CaO	1,26	0,92	1,03	1,10	1,06	0,95	0,90	1,12	1,01	0,98	0,98	0,99

Analiz sonuçları PÇ, YFC ve ALT'nin kimyasal kompozisyonuna göre oluşmuştur. Bu kimyasal özellikler kullanılan malzemelerin oranına göre özellik kazanmıştır.

4.1.3. XRD Analizleri

XRD analizleri çalışmada kullanılan PÇ, YFC ve ALT'nin mineralojik yapısını belirlemek amacıyla yapılmıştır (Şekil 4.1).



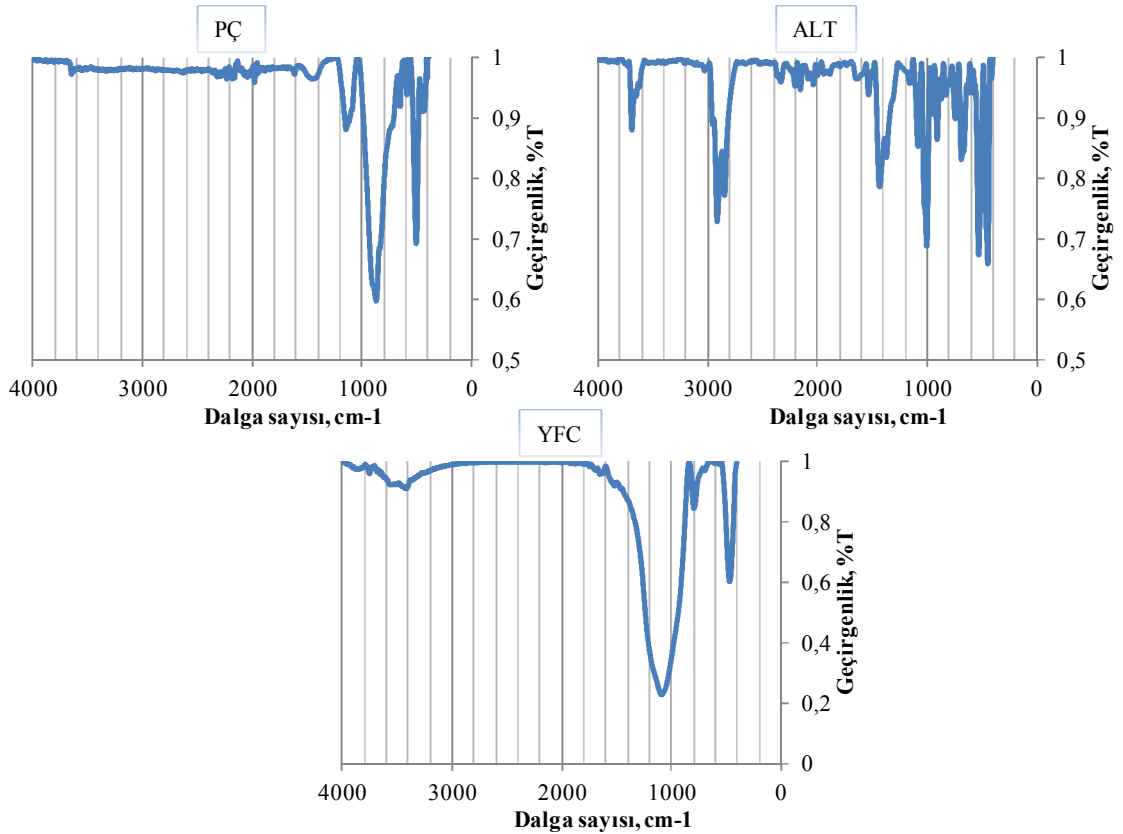
Şekil 4.1. PÇ, YFC ve ALT'nin XRD analizi

[(1: C₃S-Alit (3CaOSiO₃), 2: C₂S-Belit (2CaOSiO₃), 3: C₃A-Trikalsiyum alüminat (3CaO. Al₂O₃), 4: Brownmillerit (Ca₂(Al,Fe³⁺)₂O₅), 5: Kuvars (SiO₂), 6:Anglesite (PbSO₄), 7:Kalsit (CaCO₄), 8: Lead Karbonat Hidroksit (Pb₃(CO₃)₂OH₂)

PÇ ana bileşenlerini alit, belit, trikalsiyum alüminat ve brownmillerit oluşturmaktadır [93,94]. ALT'nin, Anglesite, Kalsit, ve Lead Karbonat Hidroksit ana bileşenlerinden oluşmaktadır. YFC'nin mineralojik bileşimine ait XRD'ye göre 2θ 'nın 20-40° bölgesinde SiO_2 , CaO ve Al_2O_3 den oluşan yoğun amorf yapı gözlenmektedir (Şekil 4.1).

4.1.4 Moleküler Analizler

FT-IR analizleri tanecikteki molekül gruplarını tanımlamak için kullanılabilir. Bu amaçla yapılan çimento ve puzolanlarla ilgili FT-IR çalışmalarında infrared spektrumu başlıca 4 geniş band bölgesinde değerlendirilmiştir. Bunlar Si-Al, S, C ve OH bağındaki hareketlerine karşı gelen piklerden oluşmaktadır (Puertas ve diğ. 2004, Gomes ve Ferreira 2005). Ayrıca, bu dalga boyundaki titreşim sayıları aralarındaki farklar bölgesel olarak değerlendirilebilir. Yapılan analizlerle elde edilen FT-IR sonuçlarından moleküllerin yüzey yapıları belirlenmiş ve Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2. PÇ, ALT ve YFC'nin FT-IR spektrumları

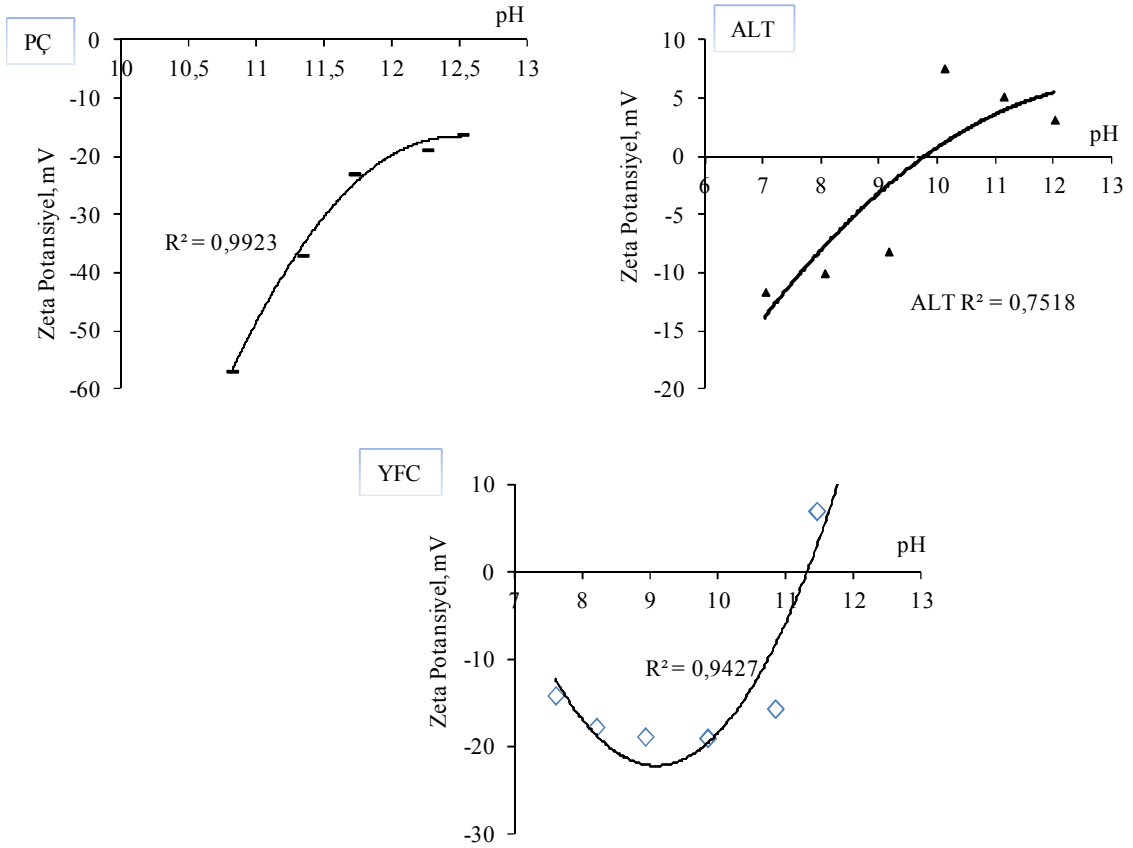
FT-IR spektroskopisinde katı kafeslerini oluşturan atomların titreşimleri $400-1600\text{ cm}^{-1}$, moleküler titreşimler ise $1600-4000\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde görülmektedir. PÇ'nin FT-IR analizi sonucunda 459, 515, 600, 660, 876, 1155, 1443, 1619, 3412 ve 3643 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim pikleri görülmektedir (Şekil 4.2). Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları 459 ve 515 cm^{-1} dalga sayısında titreşim pikleri vermektedir. Kafes yapılarındaki Si-O bağları 876 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki şeklindedir. PÇ'de alçıyı gösteren Kükürt-Oksijen bağları (S-O) 600 , 660 , 1155 ve 1619 cm^{-1} dalga sayısında görülmektedir. C-O bağları ise 1443 cm^{-1} dalga sayısında görülmektedir. Yapısındaki su iyonları ve moleküllerine ait titreşim pikleri 3412 ve 3643 cm^{-1} dalga sayılarında bulunmaktadır (Govin ve diğ. 2006, Gomes ve Ferreira 2005).

ALT'nin s FT-IR spektrumuna bakıldığında 3650 cm^{-1} de gözlenen pik yapıda -OH veya -NH grubunun olabileceğini, $1400-1500\text{ cm}^{-1}$ de gözlenen pik yapıda C=C (aromatik halka veya alkenlere ait) bağlarının olduğunu, $2800-2900\text{ cm}^{-1}$ de gözlenen pik yapıda C-H bağlarının olduğunu, 1000 cm^{-1} de gözlenen pik yapıda C-O (alkole ait) bağlarının olduğunu, 1100 cm^{-1} de gözlenen pik yapıda C-N bağlarının olduğunu, 975 cm^{-1} de gözlenen pik yapıda C-H (aromatik halkaya ait) bağlarının olduğunu göstermektedir (Şekil 4.2) (Fauser 1999).

YFC'nin FT-IR spektroskopisi sonucunda kafes yapılarındaki zincir şeklinde Si-O bağları 1087 cm^{-1} dalga sayısında titreşim pikleri görülmektedir (Şekil 3). Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağlarına 800 cm^{-1} dalga sayılarında rastlanmıştır. Yapısındaki Si-O-Si bağları ise 474 cm^{-1} dalga sayısında görülmektedir. $3400-3600\text{ cm}^{-1}$ dalga sayılarındaki bölgede su moleküllerinin pikleri görülmektedir (Şekil 4.2) (Varast ve diğ. 2005, Gomes ve Ferreira 2005).

4.1.5. Zeta Potansiyellerin Belirlenmesi

Yapılan çalışmalar sonucunda çimento harç örneklerinin dayanımlarında, taneciklerin koagülasyon veya flokülasyon özellikleri için zeta potansiyelinin $\pm 25\text{ mV}$ aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (Neubauer ve diğ. 1998, Termkhajornkit ve Nawa 2004). Bu durum dikkate alındığında çimento harcına ikame veya katkı malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin çimento ile birlikte zeta potansiyelinin belirlenmesi, taneciklerin uyumluluğu açısından önemlidir. PÇ ALT ve YFC taneciklerinin uyumunu belirlemek için zeta potansiyel ölçümleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. PÇ, ALT ve YFC'nin zeta potansiyeli

Zeta potansiyel mineral içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Buna göre, çimentonun yüzey yükü genellikle negatif (Neubauer ve diğ. 1999, Yılmaz ve diğ. 2009, Yoshioka ve diğ. 2002) ancak yapısına göre pozitif (Zhang ve diğ. 2001, Yoshioka ve diğ. 2002, Nachbaur ve diğ. 1998) de olabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre PÇ'nin bütün pH değerlerinde negatif yüklü olduğu görülmektedir (Şekil 4.3). Aynı zamanda PÇ'nin yapısında bulunan Ca^{2+} iyonları pH artışına bağlı olarak yüzey yükünü pozitif yüke doğru yaklaştırmıştır. PÇ'nin negatif yüklü olmasının nedeni Jips'ten ($CaSO_4$) gelen SO_4^{2-} iyonları ile kendi yapısında bulunan CO_3^{2-} , OH^- ve Si-O bağlarıdır (Şekil 4.2). Bu nedenle Ca^{2+} , H^+ , SO_4^{2-} ve OH^- PÇ için potansiyel belirleyen iyonlardır (Dorum ve diğ. 2010).

Çimentoya ikame edilen ALT ve YFC'nin zeta potansiyelleri incelendiğinde ALT pH 9,8, YFC ise pH 11,3'de sıfır yük noktasına sahiptir. Bu noktaların altında negatif, üstünde ise pozitif yüzey yükü oluşmaktadır. ALT ve YFC Si-O-H bağları ve bunların

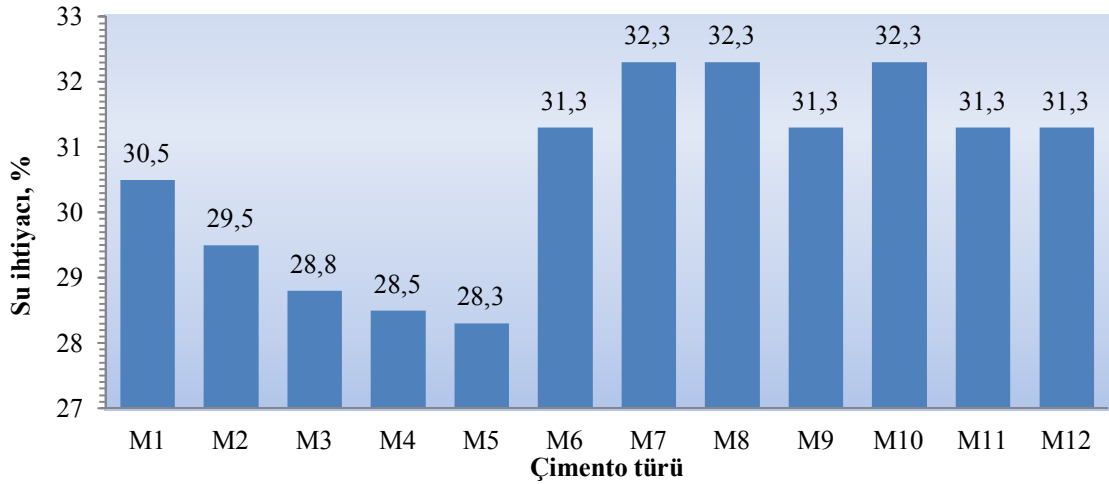
3400-3600 cm^{-1} bölgelerindeki yansımaları zeta potansiyel değerlerinin negatifliğini artırırken, YFC'nin Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonları zeta potansiyeli pozitif yapmaktadır (Şekil 4.3). Elde edilen analizler sonucunda ALT ve YFC'nin yüzey yükünün işaret değiştirmesi sonucunda PÇ ile hidrasyon ortamında koagülasyon açısından bir sakınca olmayacağını açıklanmaktadır (Dorum ve diğ. 2010) .

4.2. ÇİMENTO HAMURU ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER

Çimento hamuru örneklerine su ihtiyacı, genleşme, priz süreleri ve mikro yapı deneyleri yapılmıştır. Deneylerle ilgili çizelgeler, şekiller ve görüntüler sırasıyla verilmiştir.

4.2.1. Su İhtiyacı, Priz Süreleri Ve Genleşme Deneyleri

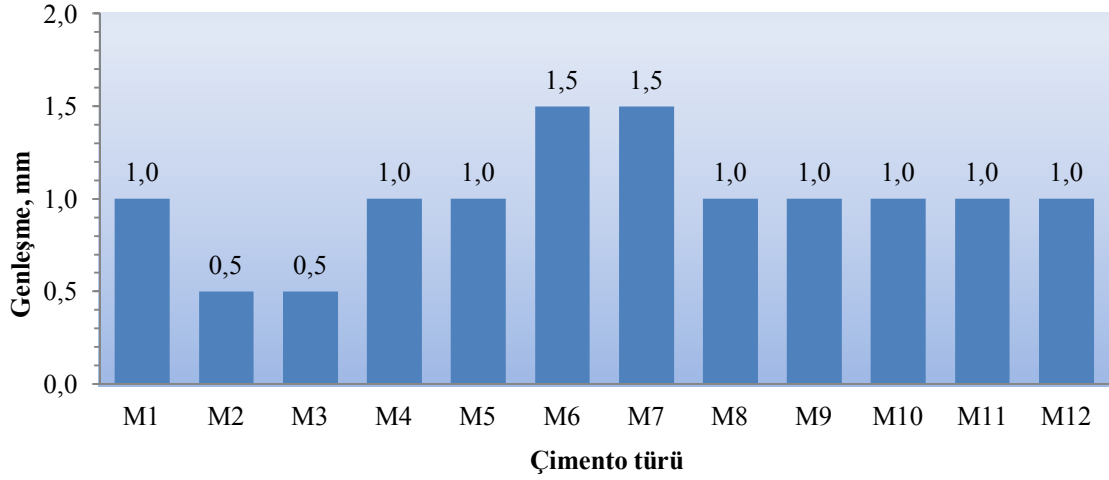
TS EN 196-3'e göre tüm çimento hamurlarının su ihtiyacı, genleşme ve priz süreleri deneylerine ait bulgular sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir (TS EN 196-3 2002).



Şekil 4.4. Çimento hamurlarının su ihtiyacı

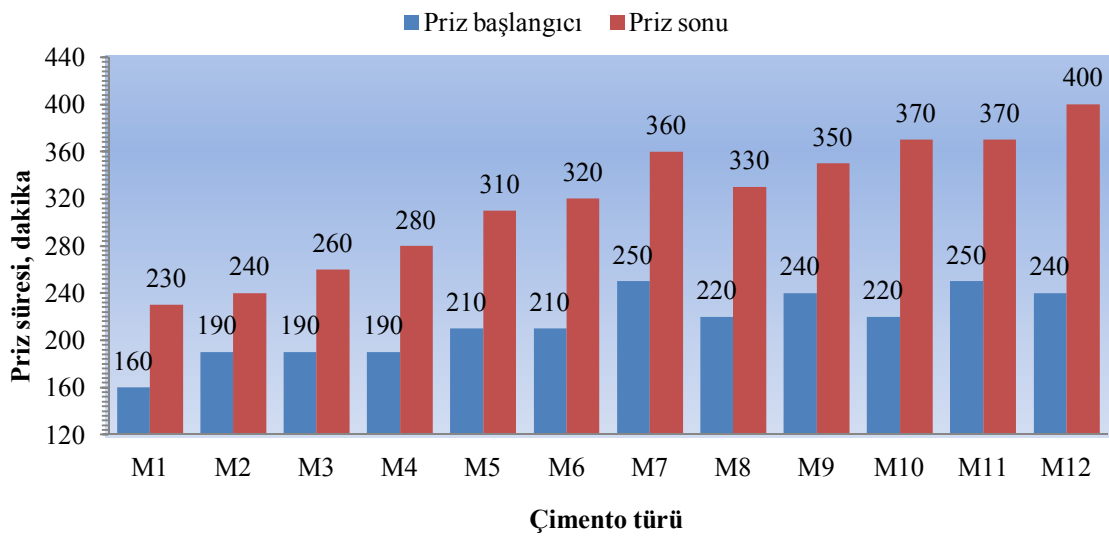
Çimento hamurlarının su ihtiyacı, çimentoların Blaine değerlerine bağlı olarak değişmiştir. YFC hamuru, PÇ hamuruna göre daha az oranda suya ihtiyaç göstermektedir (Şekil 4.4). Bu azalma M2, M3, M4 ve M5 kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %3,3, %5,6, %6,6 ve %7,2 oranında olmuştur. PÇ'ye katılan ALT oranı arttıkça özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarında göreceli bir artış söz konusudur. Bu artış M6 kodlu çimentoda %2,6 olurken M7 kodlu çimento hamurunda %5,9 olarak gerçekleşmiştir. ALT ve YFC ikameli çimento hamurlarında da PÇ'ye göre

göreceli bir artış gerçekleşmiştir (Şekil 4.4). Bu artış M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %5,9, %2,6, %5,9, %2,6 ve %2,6 oranında olmuştur.



Şekil 4.5. Çimento hamurlarının genleşme değerleri

Çimentoda bulunan fazla miktarda MgO ve CaO zamanla çimento hamurunda genişlemeye yol açmaktadır. Bu genişlemeler beton içerisinde çatlama ve hasarlara neden olmaktadır. Çimentodan kaynaklanan hacim genişlemelerini belirlemek için Le Chatelier deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre genleşme değerleri tüm çimento hamurlarında 1 ile 2 mm arasında meydana gelmiştir (Şekil 4.5). Sonuçlardan hacim genişmelerinin TS EN 196-3'te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşük çıktığı ve standartlar arasında olduğu belirlenmiştir (TS EN 196-3 2002, Dorum ve Tekin 2004).



Şekil 4.6. Çimento hamurlarının priz süreleri

Çalışmada kullanılan malzemelerin çimento hamurlarında, referans çimentoya göre priz süreleri uzamaktadır. Yapılan deneyler sonucundaki priz başlama süreleri kıyaslandığında 160 dakika ile en az sürenin referans çimento hamurunda olduğu, en fazla sürenin ise 250 dakika ile M7 ve M11 kodlu çimento hamurlarında olduğu görülmektedir. Bu artış, referans çimentoya göre M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurunda sırasıyla %18,8, %18,8, %18,8, %31,3, %31,3, %56,3, %37,5, %50,0, %37,5, %56,3 ve %50,0 oranında artmaktadır. Priz sonu süreleri ise yine 230 dakika ile en az sürenin referans çimento hamurunda olduğu, en fazla sürenin ise 400 dakika ile M12 kodlu çimento hamurlarında olduğu görülmektedir. Priz sonu sürelerinde artış, referans çimentoya göre M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurunda sırasıyla %4,4, %13,0, %21,7, %34,8, %39,1, %56,5, %43,5, %52,2, %60,9, %60,9 ve %73,9 oranında oluşturu (Şekil 4.6).

Genel olarak priz süreleri değerlendirildiğinde tüm çimento hamuru örneklerinde minimum priz başlama süresinin (60 dakika) üzerinde sağlandığı ve maksimum priz sonu sürelerinin (600 dakika) altında olduğu görülmektedir (TS EN 196-3 2002, Varast ve diğ. 2005).

Priz süresinin uygun aralıklarda olmasından dolayı da taze betonun taşınmasında ve yerleştirilmesinde güçlük çekilmeyeceği, dayanımın istenilen zaman aralığında kazanılabileceği, kalıp sökme sürelerinin uygun zamanlarda yapılabileceği ve böylelikle de betonun dış iklim koşullarından etkilenmeyeceği söylenebilir (Rytwo ve diğ. 2002).

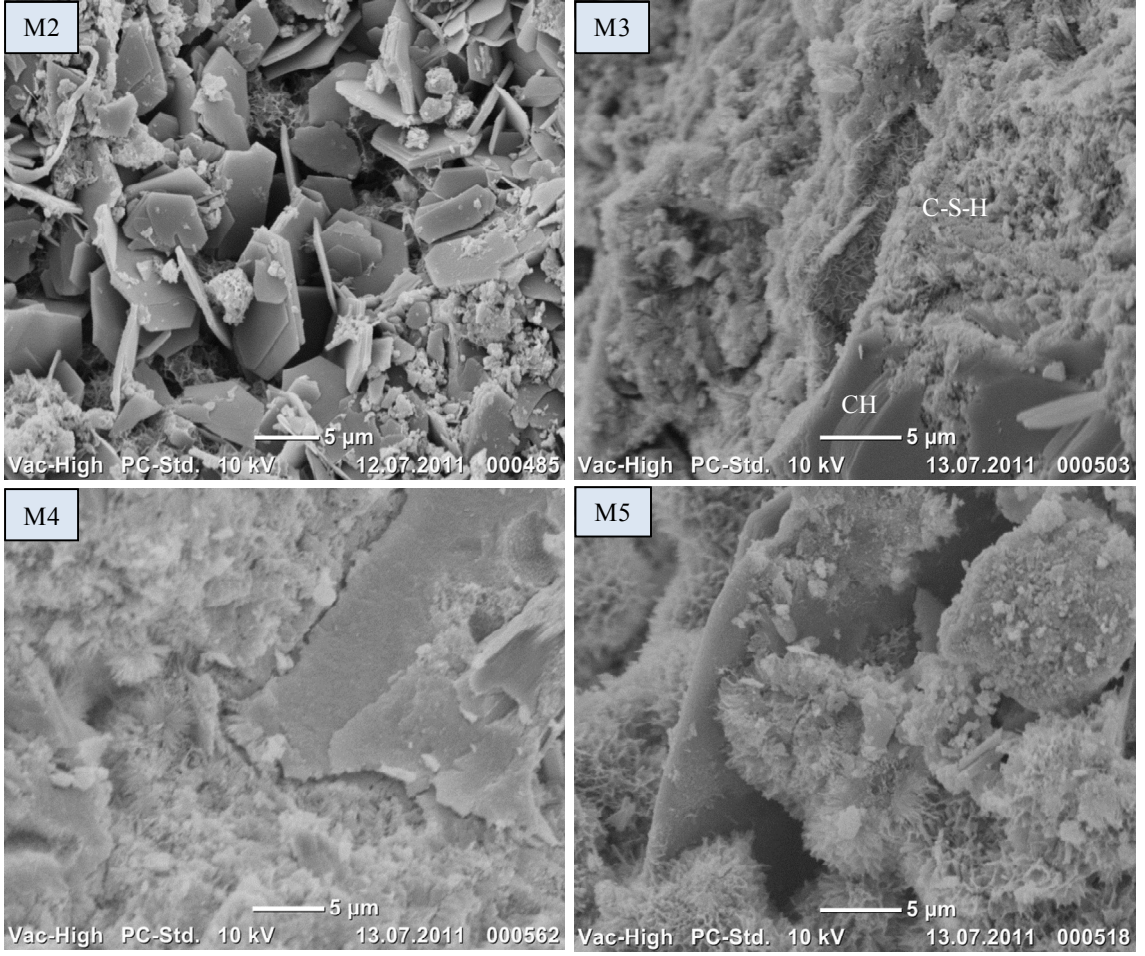
4.2.2. Mikro Yapı Analizleri

Çalışmada kullanılan çimento hamurlarının 28. hidratasyon günündeki mikro yapıları (SEM) PC'nin Şekil 4.7'de, YFC ikameli çimentoların Şekil 4.8'de, ALT ikameli çimentoların Şekil 4.9'da ve YFC ve ALT ikameli çimento hamurlarının ise Şekil 4.10'da verilmiştir.



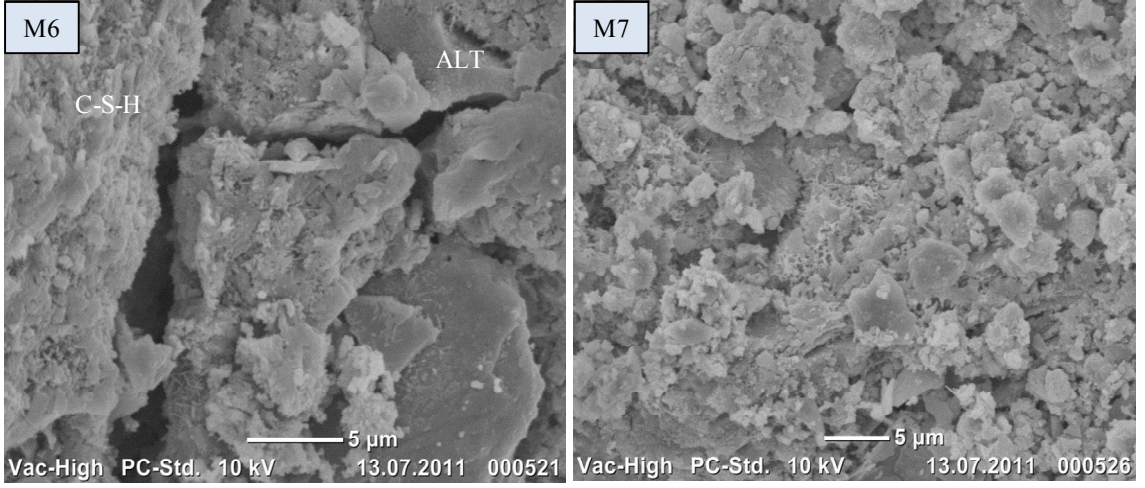
Şekil 4.7. PÇ (referans) çimento hamurunun SEM resmi

Referans çimento hamur örneğinin mikro yapısına göre hidrasyon ürünlerinin gelişimi net olarak görülmektedir. Yapıda gerek taneciklerin etkileşimleri, gerekse hidrate ürünlerin oluşumu sırasında farklı çapta boşluklu yapılar oluşmuştur (Şekil 4.7). CH ve C-S-H gelişimleri yoğun olarak izlenmektedir. Boşluklu yapılar, genelde tanecik sınırlarında oluşmuş olup yaklaşık 1 µm'den 4 µm çapına kadar değişmektedir. Tanecik sınırlarında oluşanlar genellikle farklı büyüklüklerdeki taneciklerin, farklı hidrasyon hızları göstermesinden kaynaklanmaktadır. Yüzeyde yoğun C-S-H oluşumları gözlenmiş, görüntülerde hegzagonal yapılı etrenjit oluşumuna rastlanmamıştır.



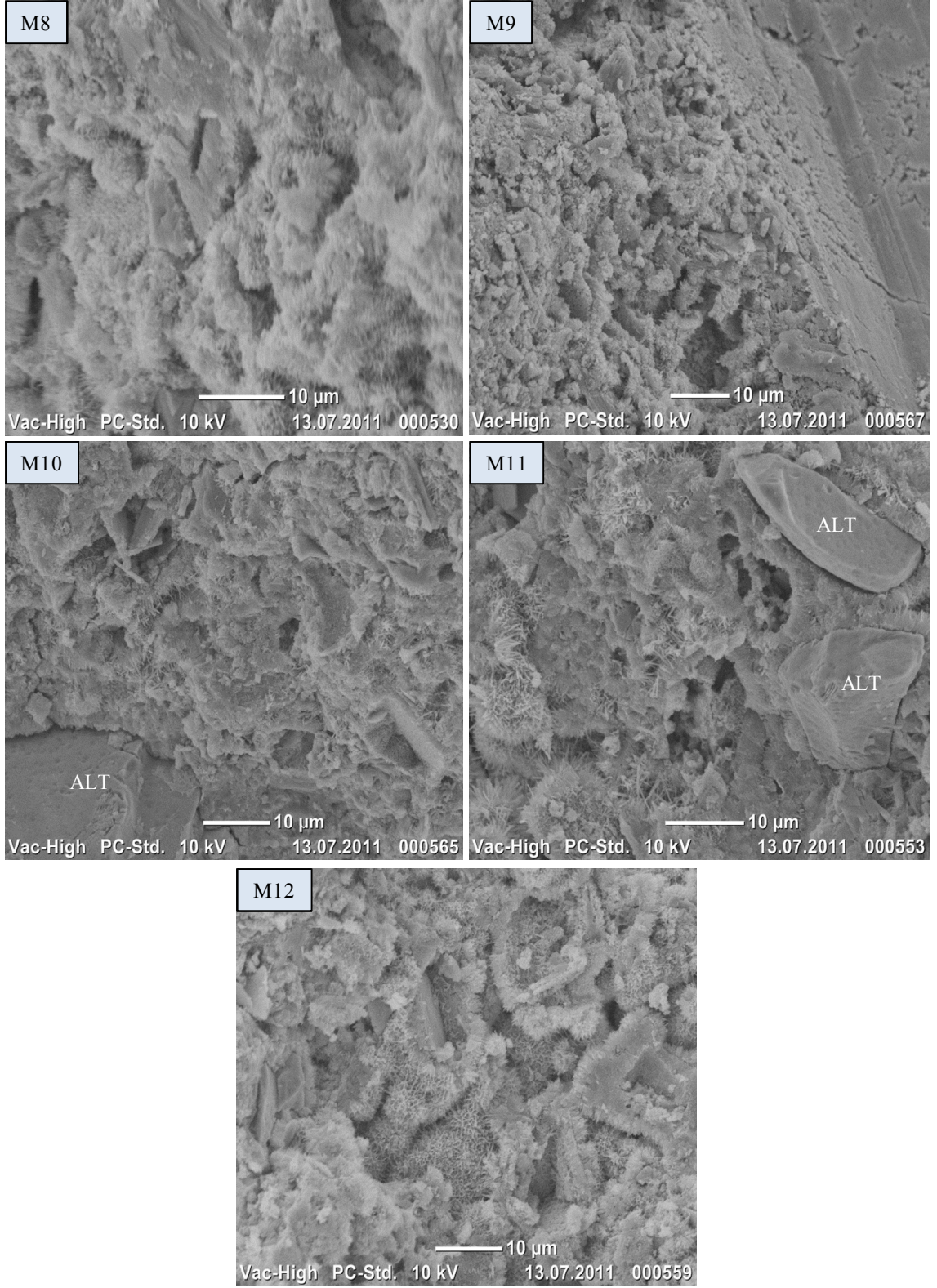
Şekil 4.8. YFC ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri

YFC ikameli çimento hamurunda hemen her tarafında amorf yapılı, köşeli YFC tanecikleri net olarak görülmektedir (Şekil 4.8). Bu hamurda referans çimentoya göre daha az tanecik sınırlarında boşluk göstermektedir. Bütün taneciklerin üstü beyaz renkli C-S-H hidratasyon ürünleriyle kaplıdır. Burada YFC taneciklerinin bir logo gibi dizilmiş ve aralarında çok az sayıda küçük boşluklar olduğu görülmektedir. YFC hamuru referans çimento ile kıyaslandığında, hidratasyon ürünlerinin çok daha yoğun olarak geliştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.9. ALT ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri

ALT ikameli çimento hamurunda diğer görüntülerde olduğu gibi yoğun hidratasyon ürünlerinin olduğu görülmektedir (Şekil 4.9). Ancak bu hamur özellikle M6 kodlu çimento hamurunda izleneceği gibi tane çevrelerinde aderans eksikliği nedeniyle bariz ayrışmalar ve çimento hamurunda zayıf bağ yapıları izlenmiştir. Burada da tanecik sınırlarında yer yer boşluk görülmekte ve taneciklerin üstünün beyaz renkli C-S-H hidratasyon ürünleriyle kaplı olduğu izlenmektedir.



Şekil 4.10. YFC ve ALT ikameli çimento hamurlarının SEM resimleri

YFC ve ALT ikameli çimento hamuru örneklerinde yine YFC ikameli çimento hamuru örneklerinde olduğu gibi yoğun hidrasyon ürünleri oluşmuştur. Özellikle M10 ve M11 kodlu çimento hamuru örneğinde görülen ALT tanesinin reaksiyon ürünleri ile

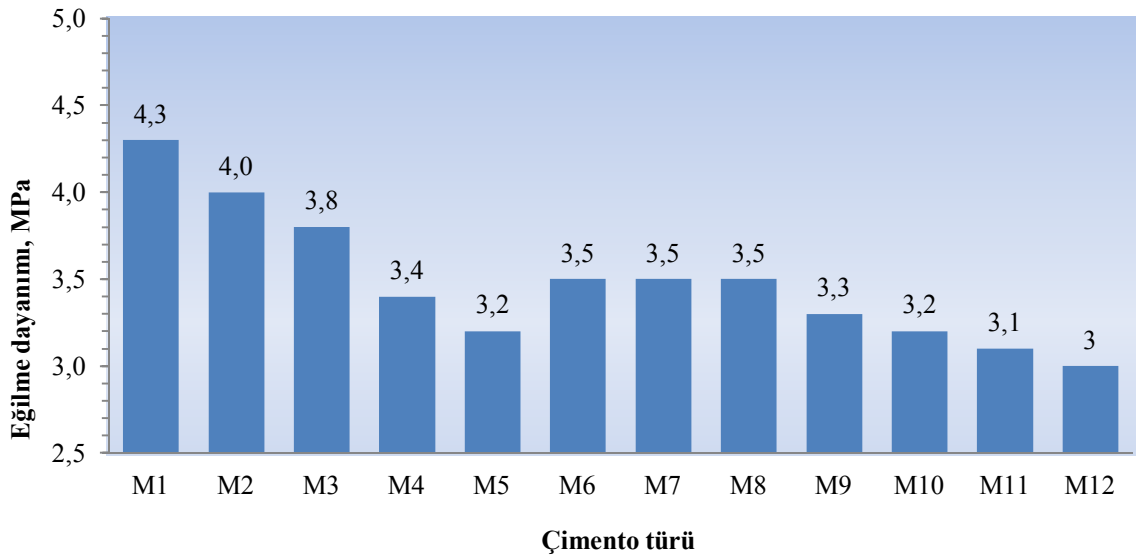
kaplandığı ancak tanenin çevresinden tamamen ayrıştığı net olarak izlenmektedir (Şekil 4.10).

4.3.ÇİMENTO HARÇ ÖRNEKLERİNE UYGULANAN DENEYLER

Çimento harç örneklerine 2, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında ve her bir seri için 3 örneğin ortalaması alınarak toplam 144 örnek üzerinde eğilme, 6 örneğin ortalaması alınarak toplam 288 örnek üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneylerle ilgili şekiller ve veriler sırasıyla irdelenmiştir.

4.3.1. EĞİLME DAYANIMI

Yapılan çalışmada 2 gün yaşında çimento harç örnekleri üzerinde belirlenen eğilme dayanımı verilerine ait değerler Şekil 4.11’de verilmektedir.



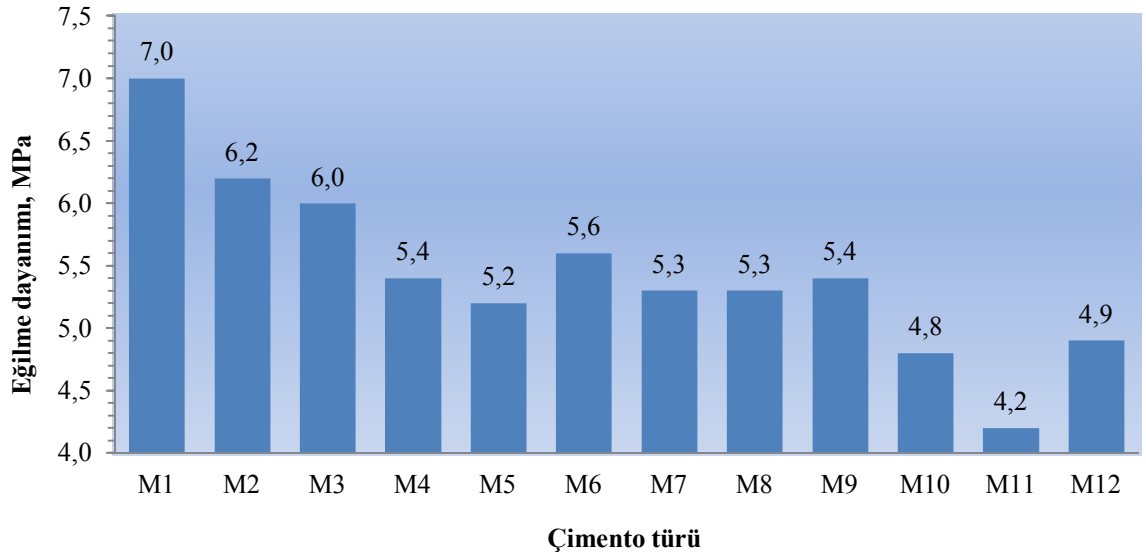
Şekil 4.11. Çimento harç örneklerinin 2 gün sonundaki eğilme dayanımları

Sonuçlar incelendiğinde hazırlanan çimento harç örneklerinin eğilme dayanımlarının malzeme türüne, ikame oranına, tane boyutuna, özgül yüzey alanlarına ve hidrasyon süresine göre farklı değerler aldığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre, 2 gün yaşında M12 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (3,0 MPa), referans çimento harç örneğinin ise en büyük (4,3

MPa) eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 2 gün sonunda yapılan eğilme dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %7,0, %11,6, %20,9, %25,6, %18,6, %18,6, %18,6, %23,7, %25,6, %27,9 ve %31,2 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.11).

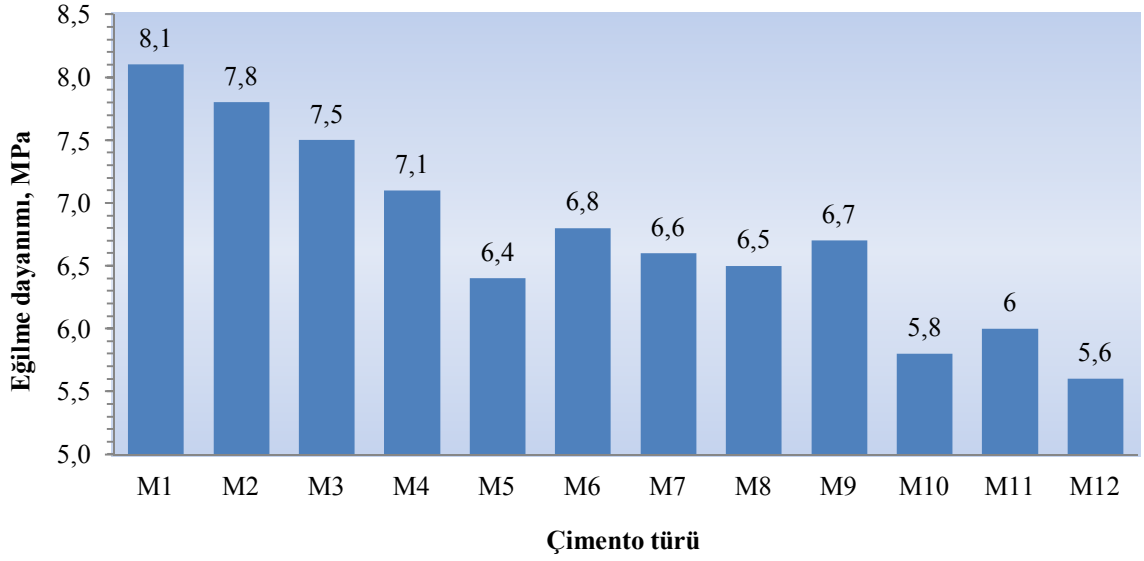
7 gün yaşındaki çimento harç örnekleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanımına ait değerler Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12. Çimento harç örneklerinin 7 gün sonundaki eğilme dayanımları

7 gün yaşında gerçekleştirilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre, M11 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (4,2 MPa), referans çimento harç örneğinin ise yine en büyük (7,0 MPa) eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 7 gün sonunda yapılan eğilme dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurunda sırasıyla %11,4, %14,3, %22,9, %25,7, %20,0, %24,3, %24,3, %22,9, %31,4, %40,0 ve %30,0 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.12).

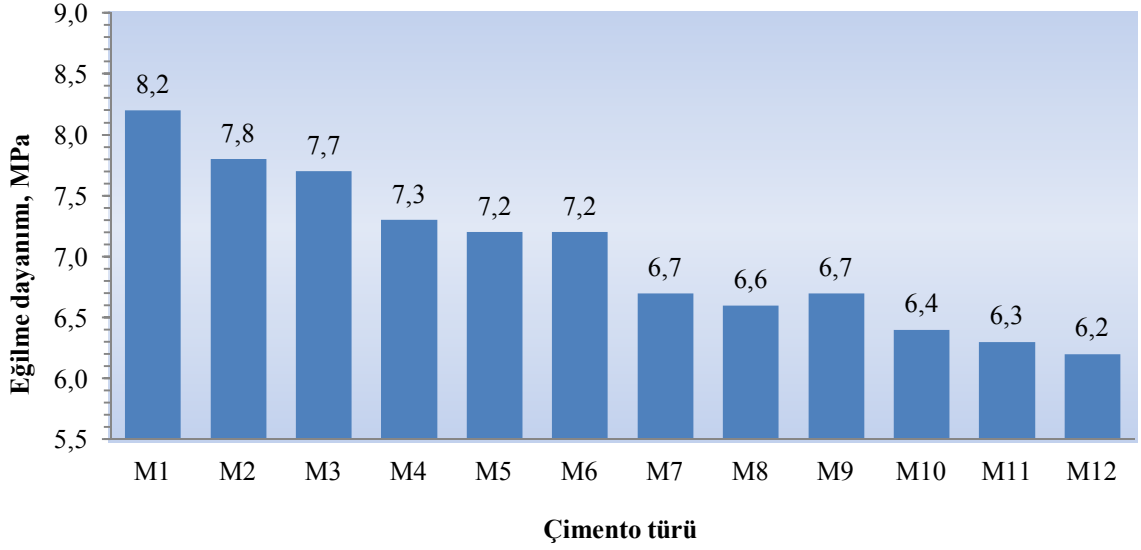
Çimento harç örnekleri üzerinde 28 gün yaşında gerçekleştirilen eğilme dayanımına ait değerler Şekil 4.13’de verilmektedir.



Şekil 4.13. Çimento harç örneklerinin 28 gün sonundaki eğilme dayanımları

Gerçekleştirilen 28 gün yaşındaki eğilme dayanımı sonuçlarına göre, M12 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (5,6 MPa), referans çimento harç örneğinin ise yine en büyük (8,1 MPa) eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 28 gün yaşında yapılan eğilme dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurunda sırasıyla %3,7, %7,4, %12,3, %21,0, %16,0, %18,5, %19,8, %17,3, %28,4, %25,9 ve %30,9 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.13). Sonuçlar incelendiğinde 2 ve 7 gün yaşındaki çimento harç örneklerine göre 28 gün yaşındaki tüm ikameli çimentoların eğilme dayanım gelişme hızlarının arttığı görülmektedir.

90 gün yaşında çimento harç örnekleri üzerinde yapılan eğilme dayanımına ait değerler Şekil 4.14'de verilmektedir.



Şekil 4.14. Çimento harç örneklerinin 90 gün sonundaki eğilme dayanımları

Son hidrasyon yaşı olan 90 gün sonunda gerçekleştirilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre, M12 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (6,2 MPa), referans çimento harç örneğinin ise yine en büyük (8,2 MPa) eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 90 gün sonunda yapılan eğilme dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento hamurunda sırasıyla %4,9, %6,1, %11,0, %12,2, %12,2, %18,3, %19,5, %18,3, %22,0, %23,2 ve %24,6 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.14).

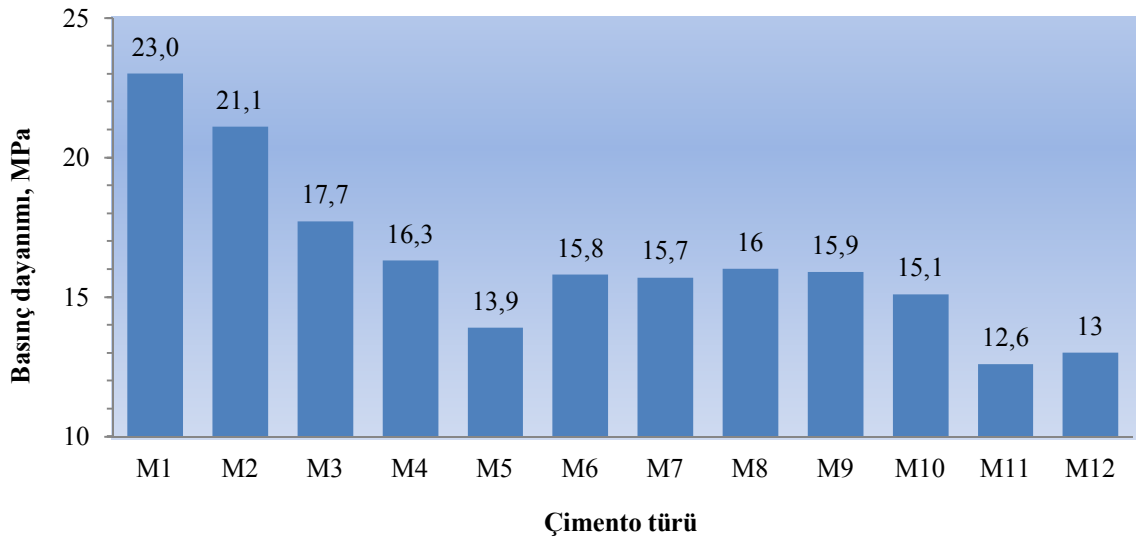
Sonuçlar incelendiğinde 90 gün yaşındaki referans çimentonun 28 gün yaşına göre eğilme dayanımında çok fazla bir artış olmazken diğer ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarında daha fazla artış görülmektedir. Bu da hidrasyon süresi ilerledikçe YFC'nin puzolanik reaksiyona devam ettiğini dolayısı ile ortamdaki CH'leri, CSH jeline dönüştürerek eğilme dayanıma katkı sağladığı söylenebilir. Bunun yanı sıra ALT'nin çimento malzemesi olmamasına rağmen eğilme dayanımına katkı sağladığı da sonuçlardan izlenmektedir.

4.3.2. BASINÇ DAYANIMI

Puzolanlar, çimento ile hidrasyonu sonucu oluşan portlandit ile tepkimeye girmekte ve bu nedenle çimento harcına ya da betona su karıştırıldıktan sonra, bir süre ortamda portlandit'in toplanma süresince PÇ'ye seyreltici bir etki yapmaktadır. Ancak zamanla

ortamda portlandit birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması, ileriki yaşlardaki dayanımlarının ise PÇ harç örneklerinin sonuçlarına ulaşması hatta bunları geçmesi beklenmektedir (Ernst ve diğ. 2000, Canpolat ve Yılmaz 2002).

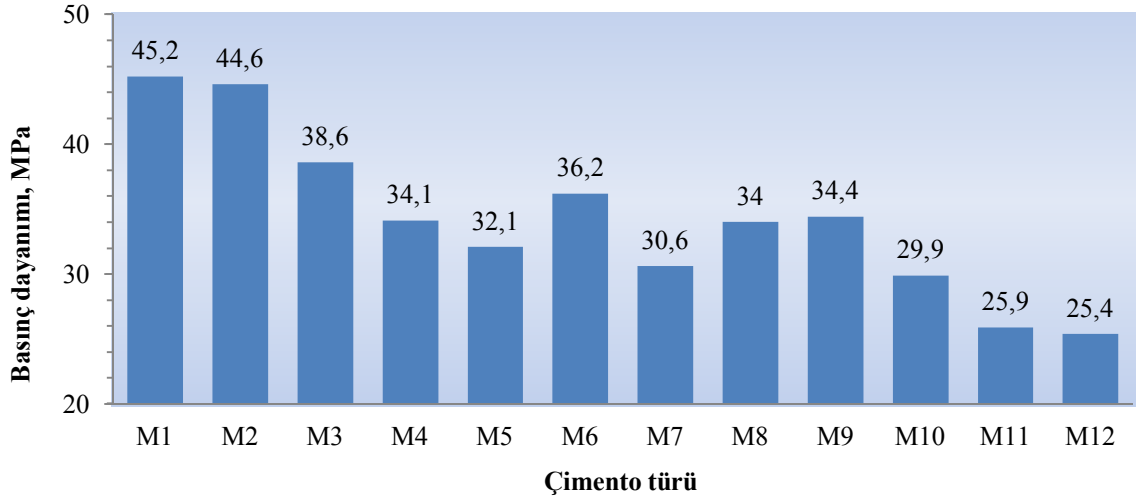
TS-EN 196-1'e göre 2 gün yaşındaki çimento harç örneklerinin basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve sonuçları Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Çimento harç örneklerinin 2 gün sonundaki basınç dayanımları

Gerçekleştirilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, 2 gün yaşında M11 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (12,6 MPa), referans çimento harç örneğinin ise en büyük (23,0 MPa) basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 2 gün sonunda yapılan basınç dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento harçlarında sırasıyla %18,3, %23,0, %29,1, %39,6, %31,3, %31,7, %31,4, %31,9, %34,3, %45,2 ve %43,5 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.15).

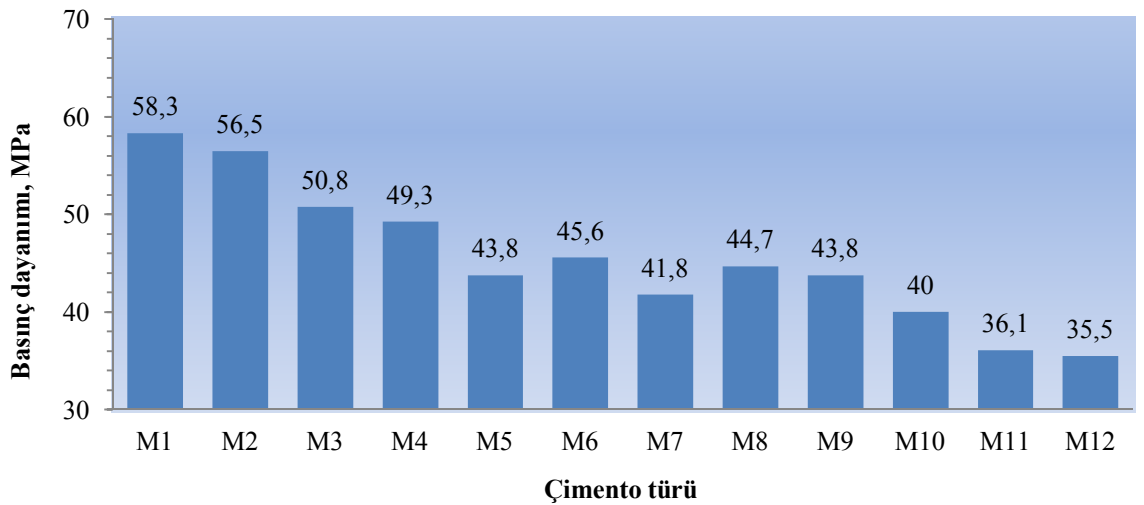
7 gün yaşındaki çimento harç örnekleri üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımına ait değerler Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16. Çimento harç örneklerinin 7 gün sonundaki basınç dayanımları

7 gün yaşında gerçekleştirilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, M12 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (25,4 MPa), referans çimento harç örneğinin ise en büyük (45,2 MPa) basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 7 gün sonunda yapılan basınç dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento harçlarında sırasıyla %1,3, %14,6, %24,6, %29,0, %19,9, %32,3, %24,8, %23,9, %33,8, %42,7 ve %43,8 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.16).

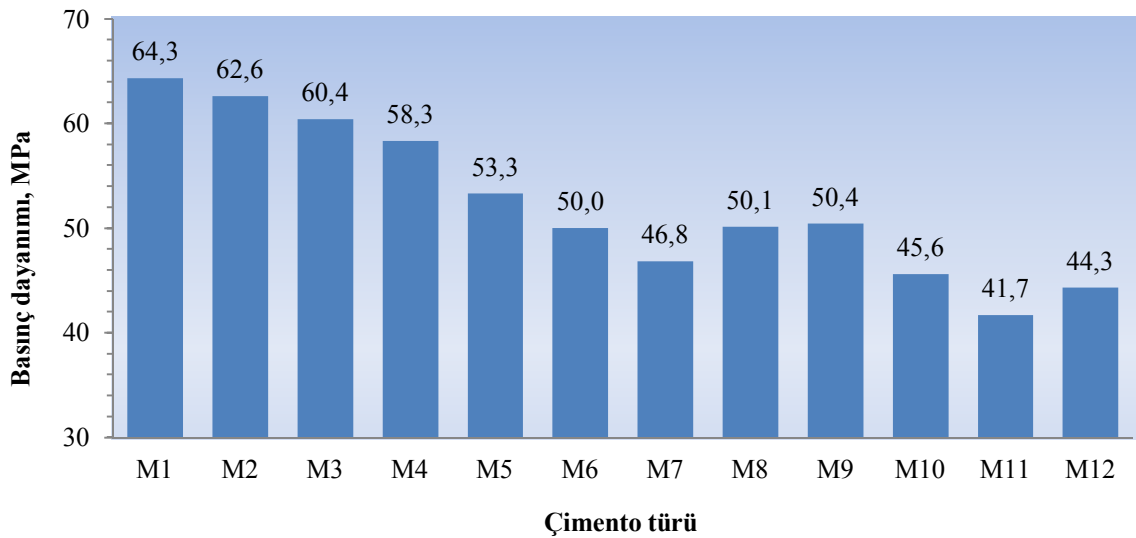
Çimento harç örnekleri üzerinde 28 gün yaşında gerçekleştirilen basınç dayanımına ait değerler Şekil 4.17’de verilmektedir.



Şekil 4.17. Çimento harç örneklerinin 28 gün sonundaki basınç dayanımları

Gerçekleştirilen 28 gün yaşıdaki basınç dayanımı sonuçlarına göre, M12 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (35,5 MPa), referans çimento harç örneğinin ise en büyük (58,3 MPa) basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 28 gün yaşında yapılan basınç dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento harçlarında sırasıyla %3,1, %12,9, %15,4, %24,9, %21,8, %28,3, %23,7, %24,9, %31,4, %38,1 ve %39,1 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.17). Sonuçlar incelendiğinde 2 ve 7 gün yaşıdaki çimento harç örneklerine göre tüm ikameli çimentoların basınç dayanım gelişme hızlarının arttığı görülmektedir.

90 gün yaşında çimento harç örnekleri üzerinde yapılan basınç dayanımına ait değerler Şekil 4.18'de verilmektedir.



Şekil 4.18. Çimento harç örneklerinin 90 gün sonundaki basınç dayanımları

Son hidrasyon yaşı olan 90 gün sonunda gerçekleştirilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, M11 kodlu çimento harç örneğinin en düşük (41,7 MPa), referans çimento harç örneğinin ise en büyük (64,3 MPa) basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. 90 gün sonunda yapılan basınç dayanımları esas alındığında referans çimento harç örneklerine göre, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ve M12 kodlu çimento harçlarında sırasıyla %2,6, %6,1, %9,3, %17,1, %22,2, %27,2, %22,1, %21,6, %29,1, %35,1 ve %31,1 oranında bir dayanım düşüklüğü sergilenmektedir (Şekil 4.18).

Sonuçlar incelendiğinde 90 gün yaşındaki referans çimentonun 28 gün yaşına göre basınç dayanımında çok fazla bir artış olmazken diğer ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarında daha fazla artış görülmektedir. Bu da hidrasyon süresi ilerledikçe YFC'nin puzolanik reaksiyona devam ettiğini dolayısı ile de ortamdaki CH'leri, CSH jeline dönüştürerek basınç dayanıma katkı sağladığı söylenebilir. Bunun yanı sıra ALT'nin çimento malzemesi olmaması, çok küçük oranlarda dahi basınç dayanımına olumsuz etki yaptığı gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak SEM resimlerinden de izlendiği gibi ALT tanesinin hidrasyon ürünleri ile kaplandığı ancak aderansındaki yetersizlik nedeniyle ayrışmaların olduğu ve bunun sonucunda da basınç dayanımında olumsuz etki yaptığı düşünülmektedir (Şekil 4.9, 4.10). Buna rağmen M8 ve M9 kodlu çimento harçlarında olduğu gibi YFC ile birlikte kullanılmasının nispeten olumlu etkisinin olduğu söylenebilir.

Çalışmada kullanılan hem ALT hem de YFC, elektrokinetik potansiyeline göre PÇ ile uyumlu olmasına rağmen, bu malzemelerle ikame edilen çimento harçlarının referans çimento harçlarına göre basınç dayanımlarındaki bu farklılığın nedeni tane boyutu ve özgül yüzey alanları ile hidrasyon aşamalarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca YFC ikameli çimento harçlarında puzolanın ortama girmesi ile C_3S ve C_3A 'nın azaldığı ve daha az CH'ın açığa çıktığı dolayısı ile erken yaştaki dayanımın azaldığı düşünülmektedir. Ancak puzolanik özelliğe sahip olan YFC'nin kalan CH'yi zamanla bağlayarak yeni (puzolanik) C-S-H jeline dönüştürmüş ve boşlukları tıkamış olduğu düşünülmektedir. Bu durum 28 gün yaşında çekilen SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır (Şekil 4.8, 4.9, 4.10). Dolayısıyla zamana bağlı olarak dayanımda artış görülürken ve dayanıklılıkta da bir artış olacağı düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirilirse 2 gün sonunda ortalama basınç dayanımları sadece %5 oranında YFC içeren çimento ile üretilmiş harç örneklerinde 21,1 MPa değeri ile minimum basınç dayanımı olan 20 MPa değerinin üzerinde gerçekleşmiştir. 28 gün sonunda M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 ve M9, kodlu harç örneklerinde elde edilen basınç dayanımı değerleri, 42,5 MPa olan Cem I çimentoları için minimum basınç dayanımı değerinin üzerinde elde edilmiştir. M10, M11 ve M12 kodlu harç örneklerinin bu değer altında kalmasına rağmen, TS EN 197-1'de en düşük dayanım olan 32,5 MPa değerinin üzerinde sağlandığı görülmektedir. (TS EN 197-1 2002, Varast ve diğ. 2005).

Bu durum özellikle yüksek dayanım gösteren çimentolara göreceli olarak YFC, ALT veya her ikisinin de belirli oranlarda katılmasıyla, ilk aşamada daha düşük dayanımlı bir standart imento elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak uzun sürede bu yöntemle YFC'nin puzolanik özelliğinden dolayı dayanımdan taviz verilmeden dayanıklılık şartının da sağlanmış olacağı düşnlmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler ve analizler sonucunda elde edilen bulgular genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Tüm elek üstü tane boyut aralığı ile özgül yüzey alanı değerlerine bakıldığında; en ince tane boyutu aralığına ve en yüksek özgül yüzey alanına sahip malzemenin PÇ, daha sonra ALT ve YFC olarak sıralandığı görülmektedir. Fiziksel olarak düşük özgül ağırlığa sahip olan YFC ve ALT, PÇ'ye ikame edildiğinde, elde edilen YFC ve ALT ikameli çimentoların özgül ağırlık değerlerini azaltmıştır.
- PÇ ve ALT kristal yapıya sahipken, YFC, SiO₂, CaO ve Al₂O₃ den oluşan yoğun amorf yapıya sahiptir.
- Çalışmada kullanılan YFC ve ALT, yüzey yükleri açısından PÇ ile uyumludur.
- ALT pH 9,8, YFC ise pH 11,3'de sıfır yük noktasına sahiptir. Bu noktaların altında negatif, üstünde ise pozitif yüzey yükü göstermektedir. Dolayısı ALT ve YFC hidrasyon ortamının pH'sinden etkilenmektedir. PÇ'nin yüzey yükü negatiftir ve pH değeri arttıkça yüzey yükü mutlak değer olarak azalmıştır.
- Yüzey yüklerinin zıt olması koagülasyon olayının artışı belirlemiştir.
- Tanelerin bir araya gelmesinde yüzey yükleri, incelikleri ve puzolanik özellikleri önem taşımaktadır.
- PÇ, ALT ve YFC ikameli çimentolarda kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi değerlere bağlı olarak gereken su miktarında göreceli bir farklılık olmuştur. ALT, YFC'ye göre hidrasyon için daha fazla suya ihtiyaç göstermektedir. Priz süreleri ise mineralojik yapının bozunması ve reaktif bileşiklerinin miktarlarına göre değişmektedir. ALT, YFC, ALT-YFC ikameli çimentolarda, referans çimentoya göre priz süreleri uzamaktadır.
- Hacim genleşmelerinin TS EN 196-3'te belirtilen 10 mm sınır değerinden düşük çıktığı ve hacim genleşmesi açısından herhangi bir problem oluşturmayacağı tespit edilmiştir.
- PÇ, ALT ve YFC ikameli çimento hamurlarının SEM görüntüleri incelendiğinde; referans çimento hamurunda gerek taneciklerin etkileşimleri, gerekse hidrate ürünlerin oluşumu sırasında farklı çapta boşluklu yapılar oluşmuştur. CH'lerin üstünde tabakalanmış veya iğnemsî şekilde kristallenmiş C-S-H gelişimleri yoğun olarak varlığı görülmüştür. YFC ikameli çimento hamurunda hemen her tarafında

amorf yapılı, köşeli YFC tanecikleri net olarak görülmektedir. Ayrıca YFC hamuru referans çimento ile kıyaslandığında, hidrasyon ürünlerinin daha yoğun olarak geliştiği gözlenmiştir. ALT ikameli çimento hamurunda da yoğun hidrasyon ürünlerinin olduğu, ancak tane çevrelerinde aderans eksikliği nedeniyle bariz ayrışmalar ve çimento hamurunda zayıf bağ yapıları oluşmuştur. YFC ve ALT ikameli çimento hamuru örneklerinde yine YFC ikameli çimento hamuru örneğinde olduğu gibi yoğun hidrasyon ürünleri oluşmuştur. Burada da ALT tanesinin reaksiyon ürünleri ile kaplandığı ancak tanenin çevresinden tamamen ayrıştığı net olarak görülmüştür.

- Gerçekleştirilen eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre hidrasyon süresi ilerledikçe YFC'nin puzolanik reaksiyona devam ettiği, dolayısı ile de ortamdaki CH'leri, CSH jeline dönüştürerek eğilme dayanıma katkı sağladığı söylenebilir. Bunun yanı sıra ALT'nin çimento malzemesi olmamasına rağmen eğilme dayanımına katkı sağladığı da sonuçlardan izlenmektedir.
- Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre hidrasyon süresi ilerledikçe YFC'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı ortamdaki CH'leri, CSH jeline dönüştürerek basınç dayanıma katkı sağladığı söylenebilir. ALT ikameli çimento harçlarında, ALT'nin çimento malzemesi olmaması nedeniyle basınç dayanımına olumsuz etki yaptığı gözlenmektedir. SEM resimlerine göre ALT tanesinin hidrasyon ürünleri ile kaplandığı ancak aderansındaki yetersizlik nedeniyle ayrışmaların olduğu ve bunun sonucunda da basınç dayanımında olumsuz etki yaptığı izlenmektedir. Buna rağmen M8 ve M9 kodlu çimento harçlarında olduğu gibi YFC ile birlikte kullanılmasının referans çimentoya göre nispeten olumlu etkisinin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ALT'nin, ekolojik nedenlerden dolayı üretimi çok fazla olan çimento sektöründe kullanımının çok önemli olacağı düşünülmektedir. Genel olarak 28 gün sonunda M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 ve M9, kodlu harç örneklerinde elde edilen basınç dayanımı değerleri, 42,5 MPa olan Cem I çimentoları için minimum basınç dayanımı değerinin üzerinde elde edilmiştir. M10, M11 ve M12 kodlu harç örneklerinin bu değerlerin altında kalmasına rağmen, TS EN 197-1'de en düşük dayanım olan 32,5 MPa değerinin üzerinde sağlandığı görülmektedir. Bu durum özellikle yüksek dayanım gösteren çimentolara göreceli olarak YFC, ALT veya her ikisinin de belirli oranlarda katılmasıyla, ilk aşamada daha düşük dayanımlı bir standart çimento elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak uzun sürede bu yöntemle puzolanların özelliklerinden dolayı dayanımdan taviz verilmeden dayanıklılık şartının da

sağlanmış olacağı, ayrıca ekonomiye ve ekolojiye katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki öneriler sıralanabilir:

- ALT ikameli çimento harçlarındaki eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin referans çimentoya göre aderans eksikliğinden dolayı düşük olduğu belirlenmiştir. Çimento harçlarındaki ALT'nin aderansının artırılması için ALT, çeşitli kimyasal (NaOH gibi) etkilere maruz bırakılabilir.
- Çimento ve beton sektöründe kullanılacak malzemelerin, çimentolarla etkileşimlerinin olumlu olup olmadığını belirlemek amacıyla diğer analiz tekniklerinin yanında zeta potansiyel, FT-IR ve yüzey özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarının da önemli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle çimentoların birlikte kullanılacağı malzemelerle uyumu, kısa zamanda uygulanabilen zeta potansiyel tekniği ile önceden belirlenirse diğer deneysel çalışmaların sonuçları hakkında önceden bir fikir sahibi olunarak, bu malzemelerle ilgili deneysel çalışmaların yapılmasına ya da yapılmamasına karar verilebilir.
- Diğer malzemelerin de zeta potansiyellerinin araştırılması ve sonuçlar arasında ilişki kurulmasında yarar olduğu düşünülmektedir.
- Kimyasal katkıların, çimento ve puzolanik malzemelerin çeşitli analitik teknikler ve zeta potansiyel analizleri kullanılarak meydana gelen yapısal değişiklikler de incelenmelidir.
- İmkanlar ölçüsünde farklı puzolanik malzemeler ile her hidrasyon aşaması için FT-IR, XRD ve SEM gibi meydana gelen yapısal değişikliklerin belirlenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adamson A.W., , *Physical chemistry of surface*, Interscience Publishers, U.S.A., (1967) 247.
- Aiello M.A., Leuzzi F., Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state, *Waste Management*, 30 (2010) 1696–1704.
- Amari T., Nicolas J.T., Iddo K.W., Resource Recovery From RubberTires, *Resources Policy*, 25 (1999) 179-188.
- Anonim, <http://www.centallab.metu.edu.tr/?q=node/61> (Erişim Tarihi: 2 Aralık 2011a).
- Anonim, <http://www.petkim.com.tr/Userfiles/File/uretim/kalitekontrol-teknikservis/Plastik.pdf>, (Erişim Tarihi: 14 Aralık 2011b)
- Anonim, http://www1.gantep.edu.tr/~sem_lab/index.php?option=com_content&view=article&id=3:taramal-elektron-mikroskobu&catid=6:doekueymanlar, (Erişim Tarihi: 4 Kasım 2011c).
- Anonim, <http://www.istanbul.edu.tr/eng2/metalurji/> (Erişim Tarihi: 10 Aralık 2011d).
- Anonim, <http://www.4shared.com/office/sto8LYEO/SEM>, (Erişim Tarihi: 14 Aralık 2011e).
- Aruntaş H.Y., Diatomitlerin imentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (1996) 12-17.
- Aruntaş H.Y., Tokyay M., Katkılı imento üretiminde diyatomitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, *imento ve Beton Dünyası*, 1 (4) (1996) 3-41.
- Atahan A.O., Sevim U.K., Testing and comparison of concrete barriers containing shredded waste tire chips, *Materials Letters*, 62, (2008) 3754–757.

- Atar N., Suda çözünen polimerlerin çimento ve beton özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (2006) 2-3.
- Aydın S., Aytaç A. H., Ramyar K., Çimento kompozisyonu ve kimyasal katkı kökeninin beton özelliklerine etkisi, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 1 (2005) 34.
- Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K., Roucoult J.M., Queneudec M., Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes, *Cement & Concrete Composites*, 29 (2007) 732–740.
- Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K., Roucoult J.M., Queneudec M., Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 573–579.
- Canpolat F., Yılmaz K., Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2 (2002) 1-11.
- Dayı M., Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2006).
- Doğan Ö., Lastik Agregalı Betonların Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A., Uçucu kül katkılı çimento hidrasyonuna elektrokinetik özelliklerin etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (2010) 449-457.
- Emiroğlu M., Atık Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı Ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2006)

- Emiroğlu M., Yıldız S., Keleştemur M.H., Katı Atıklarla Elde Edilmiş Betonlarda Dayanım Azalma Faktörünün Belirlenmesi, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük Üniversitesi, (2009) 2147-2149.
- Emiroğlu M., Yıldız S., Atık lastiklerin inşaat sektöründe kullanılması, *Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS)*, Ankara, Türkiye, (2010) 837-839.
- Erdoğan T.S., Erdoğan T.Y., *Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri, II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, (2007) 23-34.
- Erdoğan T.Y., *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ., Ankara, (2010).
- Erdoğan T., Türkiye'de üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları, *Türk Mühendis ve Mimarlar Birliği Dergisi*, Ankara, (1995) 16-27.
- Erdoğan K., Tokyay M., Türker P., *Traslar ve traslı çimentolar*, TÇMB/AR-GE/Y99.2, Ankara, (1999).
- Erdoğan Ş., Kurbetçi Ş., Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (2003) 115-120.
- Ernst W., Nathan M., Lynn P., Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry, *Energy*, 25 (12) (2000) 1189-1214.
- Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y., Wu, X., Studies on blended cement with a large amount of fly ash, *Cement and Concrete Research*, 32 (7) (2002) 1153-1159.
- Fausser P., Particulate Air Pollution with Emphasis on Traffic Generated Aerosols, *Risø National Laboratory*, Roskilde, Denmark, (1999) 27-29.
- Fuerstnau D. N., Chander S., Thermodynamics of flotation, advances in mineral processing, *Arbiter Symposium*, New Orleans, Louisiana, (1985) 121-136.

- Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1828–1836.
- Gomes C.E.M., Ferreira O.P., Analyses of microstructural properties of va/veova copolymer modified cement pastes, *Polimeros: Ciencia E Tecnologia*, 15 (3) (2005) 193-198.
- Govin A., Peschard A., Guyonnet R., Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood, *Cement Concrete Composites*, (2006) 12-20.
- Gönüllü M.T., Atık Lastiklerin Yönetimi, *Katı Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri Semineri*, (2004) 1-14.
- Gündüz T., *Instrumental analiz*, Bilge Yayıncılık, Ankara, (1990) 122-123.
- Hodne H., Saasen A., The effect of the cement zeta potential and slurry conductivity on the consistency of oil-well cement slurries, *Cement and Concrete Research*, 30 (11) (2000) 1767-1772.
- Homwuttiwong C.S., Sirivivatnanon V., Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34 (7) (2004) 1087-1092 .
- Humphrey D.N., Civil Engineering Application Of Tire Shreds, *The Tire Industry Conference*, (1999) 1-16.
- İssi A., Tarihi Buluntuların Karakterizasyon Teknikleri, *Ders Notları*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2005).
- Kanna V., Olson R.A., Jennings H.M., Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 28 (10) (1998) 1467-1477.
- Karakaya M.Ç., *Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri*, Bizim Büro Basımevi, Ankara, (2006) 541- 595.

- Khaloo A.R., Dehestani M., Rahmatabad P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles, *Waste Management*, 28 (2008) 2472–2482.
- Khandaker M., Anwar H., Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2) (2004) 283-291.
- Koçak Y., Çimento-Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2008).
- Koçak Y., Alpaslan L, Atık Lastiklerin Çimento ve Beton Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, (2011) 118-122.
- Koçak Y., Subaşı S., Yaman L., Uğur L.O., Ateş A., The Effect of the Rate of Waste Tire Powder Substitution on the Physical and Mechanical Properties of CEM II Cement, *1st International Conference on Architecture & Urban Design*, Tirana-Albania, (2012) 1235-1240.
- Mumcu U., Çimento üretimindeki istikrarlı hammadde bileşiminin sağlanması, kalite ve verimliliğin artırılması, *Çimento ve Beton Dünyası*, (2005) 45-49.
- Nachbaur L., Nkinamubanzi P.C., Nonat A., Mutin J.C., Electrokinetic Properties which Control the Coagulation of Silicate Cement Suspensions during Early Age Hydration, *Journal of Colloid Interface Science*, 202 (2) (1998) 261-268.
- Nagele E., The Zeta-potential of cement : Part II: Effect of pH-value, *Cement and Concrete Research*, 16 (6) (1986) 853-86.
- Nagele E., Schneider U., The zeta-potential of cement: Part IV. Effect of simple salts, *Cement and Concrete Research*, 17 (6) (1987) 977-982.
- Nagele E., Schneider U., The zeta-potential of cement:Pt.V: Effect of surfactants, *Cement and Concrete Research*, 18 (2) (1988) 257-264.

- Nagele E., Schneider U., The zeta-potential of blast furnace slag and fly ash, *Cement and Concrete Research*, 19 (5) (1989) 811-820.
- Neubauer C.M., Yang M., Jennings H.M., Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: effects of admixtures, *Advanced Cement Based Materials*, 8 (1) (1998) 17-27.
- Neville A.M., *Properties of concrete*, Pearson Education Limited, England, 78 (4) (2006) 8-18.
- Özkan Ö., Yüksek fırın ve çelikhane cürufu katkılı çimentolarla üretilen harçların sülfat dayanımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (1) (2008) 1-8.
- Özkan Ş., Kimyasal Etkilere Dayanıklı Çimento Üretimi Üzerine Bir Araştırma, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2009).
- Pekmezci B.Y., Akyüz S., Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (12) (2004) 2175-2179.
- Prigione S.G., Portland-zeolite-cement for minimizing alkali-aggregate expansion, *Cement and Concrete Research*, 17 (3) (1987) 404-410.
- Puertas F., Fernandez-Jimenez A., Blanco-Varela M.T., Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate, *Cement And Concrete Research*, 34 (1) (2004) 139-148.
- Puertas F., Fernandez-Jimenez A., Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes, *Cement & Concrete Composites*, 25 (2003) 287–292.
- Rytwo G., Trop D., Serban C., Adsorption of diquat, paraquat and methyl green on sepiolite: experimental results and model calculations, *Applied Clay Science*, 20 (6) (2002) 273–282.

- Sadioğlu O., Lastik Agregalı Betonları Üç Fazlı Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2006).
- Saraswathy V., Muralidharan S., Thangavel K., Srinivasan S., Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete , *Cement and Concrete Composites*, 25 (7) (2003) 673-680.
- Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri IV (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu*, Ankara, (2001) 17.
- Shaw D. J., *Introduction to colloid and surface chemistry*, Buttenvorths, Second Edition, (1970) 231.
- Shiqun L., Della M.R., Investigation of relations between porosity, pore structure, and C1– diffusion of fly ash and blended cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 16 (5) (1986) 749-759.
- Snelson, D.G., Kinuthia, J.M., Davies, P.A., Chang, S.R., Sustainable construction: Composite use of tyres and ash in concrete, *Waste Management*, 29 (2009) 360–367.
- Sugözü İ., Mutlu İ., Atık Taşıtlar Lastikleri Değerlendirme Yöntemleri, *Teknolojik Araştırmalar Dergisi*, 1 (1) (2009) 34-46.
- Targan Ş., Kula cürufu, bentonit, kül ve kolomanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (2002) 12-14.
- Termkhajornkit P., Nawa T., The fluidity of fly ash–cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, 34 (6) (2004) 1017-1024.
- Tokay M., Erdoğan K., Cüruflar ve cürüflü çimentolar, *TÇMB/AR-GE/Y97.2*, Ankara, 1 (1997) 30.

- Topçu İ.B., The Properties of Rubberized Concretes, *Cement and Concrete Research*, 34 (1995) 304-310.
- Topçu İ.B., Avcular N., Collosion Behaviours of Rubberized Concretes, *Cement and Concrete Research*, 27 (1997) 1893-1898.
- Tosun F., Çimento Fabrikalarında Alternatif Yakıt Olarak Katı Atıkların Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).
- TS EN-196-1, Çimento deney metodları-Bölüm 1: Dayanım tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002) 11-14.
- TS EN-196-2, Çimento deney metodları-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002) 12-21.
- TS EN-196-3, Çimento deney metodları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002) 2-8.
- TS EN-196-6, Çimento deney metodları-Bölüm 6: İncelik tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000) 3-5.
- TS EN-197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002) 3, 5, 8-10.
- Turanlı L., Uzal B., Bektas F., Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 34 (12) (2004) 2277-2282.
- Turgut P., Yeşilata B., Işiker Y., Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-2: Hurda Lastik Katkılı Betonlar İçin Ölçüm Sonuçları, *Makina Mühendis Dergisi*, 565 (2007) 33-39.
- Uçar A., Fluorit flatasyonuna yüzey özelliklerinin etkisi, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1995) 11-22.

- Uçar A., Kolloid ve yüzey kimyası, *Ders Notu*, Kütahya, (2004) 138-155.
- Uçar A., Koçak Y., Dorum A., Çimento Sektöründe Zeta Potansiyel, *e- Journal of New World Sciences Academy*, 5 (3) (2010) 308-318.
- Ulusoy A., Uçucu kül-tekstil fabrikası atık külü ve bazaltik pomzanın tuğla üretiminde katkı olarak kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, (2008).
- Varast M.J., De Buergo M.A., Fort R., Natural cement as the precursor of Portland cement: methodology for its identification, *Cement And Concrete Research*, 35 (2005) 2055-2065.
- Worrell E., Martin N., Price L., Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry, *Energy*, 25 (12) (2000) 1189-1214.
- Yalçın H., Gürü M., *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık, Ankara, (2006) 17-22, 44, 59, 73, 242.
- Yazıcı H., Yüksek fırın curufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (1) (2006) 51-58.
- Yeğınobalı A., Portland çimentosu (Bazı temel bilgiler), *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü*, Ankara, (1999).
- Yeğınobalı A., 21. Yüzyılın çimentoları, *Çimento ve Beton Dünyası*, 30 (2001) 36-39.
- Yeğınobalı A., Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (2003) 56-61.
- Yılmaz B., Uçar A., Öteyaka B., Uz V., Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, *Building and Environment*, 42 (2007) 3808-3815.
- Yılmaz B., Ertün T., Uçar A., Öteyaka B., Önce G., A study on the effect of zeolites (clinoptilolite) on volcanic tuff blended cement paste and mortars, *Magazine of Concrete Research*, , 61 (2) (2009) 133-142.

- Yılmaz B., Olgun A., Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008) 194-201.
- Yılmaz A., Değirmenci N., Possibility Of Using Waste Tire Rubber And Fly Ash With Portland Cement As Construction Materials, *Waste Manegement*, 29 (2009) 1541-1546.
- Yoshioka K., Tazawa E., Kawai K., Enohata T., Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, *Cement and Concrete Research*, 32 (10) (2002) 1507-1513.
- Zhang T., Shang S., Yin F., Aıshah A., Salmiah A., Ooi T.L., Adsorptive behavior of surfactants on surface of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 31 (7) (2001) 1009-1015.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALPASLAN, Lale
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.08.1985 İstanbul
Telefon : 0 (505) 335 58 92
Faks : -
E-posta : lalpadiah@mynet.com

Eğitim

<i>Derece tarihi</i>	<i>Eğitim Birimi</i>	<i>Mezuniyet</i>
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/ Yapı Öğret.	2009
Lise	İstanbul Atatürk Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010/2011	İsov Zincirlikuyu Yapı Mes. Lisesi	Öğretmen/İnşaat
2011/2012	Maltepe Küçükyalı Mes. Lisesi	Öğretmen/İnşaat

Yabancı Dil

İngilizce (ÜDS/KPDS/TOEFL : -)

Yayımlar

1. Akkaş A, ALPASLAN L., Arabacı S., 2010, Polipropilen Lif Katkılı Yarı Hafif Betonların Basınç Dayanımı Özellikleri, SDU International Tecnologic Science 2(1), 9-14.

2. Koçak Y., **ALPASLAN** Atık Lastiklerin Çimento Ve Beton Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, 2011, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) 16-18 Mayıs, Elazığ.