

152389

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTONUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ÜRETİLEN
STANDART HARCIN MUKAVEMETİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

152389

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mimar Gülru ÖZDÖL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Nisan 2004

Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Mayıs 2004

Tez Danışmanı: Prof.Dr.Erol GÜRDAL

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr.Halit Yaşa ERSOY (MSÜ)

Doç.Dr.Mustafa Erkan KARAGÜLER (İTÜ)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu çalışmada, bana rehberlik eden, destek ve anlayışını esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr. Erol GÜRDAL başta olmak üzere; yapmış oldukları tüm katkı ve yardımlarından dolayı, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi biriminden Doç.Dr.Mustafa KARAGÜLER, Dr.Mahmut KÖSE, Araş.Gör.Şebnem KULOĞLU ve teknisyen İbrahim ÖZTÜRK'e, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'nden Araş.Gör.Bekir Yılmaz PEKMEZCİ ve Araş.Gör.Hakan ATAHAN'a, tecrübelerini benimle paylaşan arkadaşlarım Y.Mimar M.Fehmi BİLGE, Y.Mimar N.Ayşe DURAN ve İnş.Y.Müh.Bora YAĞLI'ya tüm yardımlarından ötürü teşekkür ederim.

Mayıs 2004

Gülru ÖZDÖL



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı	1
1.3. Çalışmanın Yöntemi	1
2. MALZEME ve YÖNTEM	2
2.1. Çimento	2
2.1.1. Çimentonun Tanımı ve Tarihçesi	2
2.1.2. Çimento Türleri	6
2.1.3. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	10
2.1.3.1. Ana Hammaddeler	10
2.1.3.1.1. Kireç Komponenti	10
2.1.3.2. Katkı Maddeleri	11
2.1.3.2.1. Puzolanik Maddeler	11
2.1.3.2.2. Uçucu Küller	12
2.1.3.2.3. Sülfatlar	12
2.1.3.2.4. Granüle Yüksek Fırın Cürufu	13
2.1.4. Çimento Üretim Prosesi	13
2.1.5. Çimentonun Özellikleri	20
2.1.5.1. Sertleşme Sırasındaki Özellikler	20
2.1.5.2. Sertleşmiş Çimento Hamurunun Özellikleri	27
3. DENEY YÖNTEMLERİ ve ÇİMENTO ÖZELLİK TAYİNLERİ	32
3.1. Çimento Özgül Yüzey Tayini (TS 24)	32
3.1.1. Cihazlar	32
3.1.2. Blaine Aletinin Kalibrasyonu	33
3.1.3. Deneyin Yapılışı	35
3.1.4. Hesaplama	36
3.1.5. Deney Sonuçları	36

3.2. Çimento Tane Büyüklüğü Tayini (TS 24)	40
3.2.1. Cihazlar	40
3.2.2. Deneyin Yapılışı	40
3.2.3. Hesaplama ve Değerlendirme	41
3.2.4. Deney Sonuçları	42
3.3. Çimentonun Priz Süresi Tayini (TS 24)	44
3.3.1. Normal Kıvam Tayini	44
3.3.2. Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri Tayini	45
3.3.3. Deney Sonuçları	47
3.4. Çimento Hidratasyon Isısı Tayini (TS 687)	49
3.4.1. Cihazlar	49
3.4.2. Reaktifler	50
3.4.3. Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi	50
3.4.4. Kuru Çimentonun Çözünme Isısının Tayini	52
3.4.5. Hidrate Olmuş Çimentonun Asitte Çözünme Isısının Tayini	53
3.4.6. Çimento Hidratasyon Isısının Tayini	54
3.4.7. Deney Sonuçları	54
3.5. Mukavemet Deneyleri (TS 24)	58
3.5.1. Deney Numunesinin Hazırlanması	58
3.5.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemet Deneyleri	62
3.5.3. Deney Sonuçları	65
4. SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR	79
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ	87

KISALTMALAR

PÇ	: Portland Çimentosu
KÇ	: Katkılı Çimento
CÇ	: Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu
TÇ	: Traslı Çimento
BPC	: Beyaz Portland Çimentosu
HÇ	: Harç Çimentosu
UKÇ	: Uçucu Kül Çimento
SDÇ	: Sülfatlara Dayanıklı Çimento
EYÇ	: Erken Dayanımı Yüksek Çimento
PCC	: Portland Cürufllu Çimento
PLÇ	: Portland Kalkerli Çimento
PKÇ	: Portland Kompoze Çimento
KZÇ	: Kompoze Çimento
PZÇ	: Puzolanik Çimento
ÇİSAN	: Türkiye Çimento Sanayii Ticaret Anonim Şirketi
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı
kgf	: kilogram force
m	: metre
cm	: santimetre
mm	: milimetre
gr	: gram
%	: yüzde
°C	: santigrad derece
N	: newton
μ	: mikron
μm	: mikron metre
sn	: saniye
"	: saniye
cal	: kalori
MPa	: mega pascal

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Çimentonun Bileşenleri 18
Tablo 2.2	Çimentonun Bileşenlerinin Hidratasyon Reaksiyonları 22
Tablo 2.3	Çimento Ana Bileşenlerinin Hidratasyon Isıları 23
Tablo 2.4	Çimento Jeli Fiziksel Özellikleri 24
Tablo 3.1	PKÇ/B 32,5R Elek Analizi Değerleri 42
Tablo 3.2	PKÇ/A 42,5R Elek Analizi Değerleri 42
Tablo 3.3	PÇ 42,5R Elek Analizi Değerleri 43
Tablo 3.4	PZÇ/B 32,5R Elek Analizi Değerleri 43
Tablo 3.5	Karıştırma Hızları 60
Tablo 3.6	Mekanik Deney Yapılacak PKÇ/B 32,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları 65
Tablo 3.7	PKÇ/B 32,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemeti Değerleri 66
Tablo 3.8	Mekanik Deney Yapılacak PKÇ/A 42,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları 67
Tablo 3.9	PKÇ/A 42,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemeti Değerleri 68
Tablo 3.10	Mekanik Deney Yapılacak PÇ 42,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları 69
Tablo 3.11	PÇ 42,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemeti Değerleri 70
Tablo 3.12	Mekanik Deney Yapılacak PZÇ/B 32,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları 71
Tablo 3.13	PZÇ/B 32,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemeti Değerleri 72
Tablo 3.14	Tüm Numunelerin Çekme ve Basınç Mukavemet Değerleri 73
Tablo 3.15	Numunelerin Granülometrisi 74
Tablo 3.16	Numunelerin Laboratuarda Ölçülen Fiziksel Özellik Değerleri ile Fabrikadan Gelen Sonuçların Karşılaştırılması 77

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Döner Fırının Dış Görünüşü.....	14
Şekil 2.2 : Çimento Ana Bileşenlerinin Basınç Mukavemeti Grafiği.....	18
Şekil 2.3 : Çimento Klinkerinin Soğuması.....	19
Şekil 3.1 : Blaine Aleti	32
Şekil 3.2 : Çimentonun Özgül Yüzey Değerinin Ölçümü	35
Şekil 3.3 : Elek Sarsma Makinesi	41
Şekil 3.4 : Çimento Numunelerinin Elek Analizi Grafiği	44
Şekil 3.5 : Vicat Sondası ve Vicat Aleti	45
Şekil 3.6 : Vicat İğnesi ve Vicat Aleti	46
Şekil 3.7 : PKÇ/B 32,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu.....	47
Şekil 3.8 : PKÇ/A 42,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu.....	47
Şekil 3.9 : PÇ 42,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu.....	48
Şekil 3.10 : PZÇ/B 32,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu.....	48
Şekil 3.11 : Kalorimetre Kabı	49
Şekil 3.12 : Karıştırma Kabı	59
Şekil 3.13 : Sarsma Tablası.....	60
Şekil 3.14 : Kalıplar.....	61
Şekil 3.15 : Numunelerin Suda Bekletilmesi.....	62
Şekil 3.16 : Eğilme ve Basınç Mukavemetini Ölçen Hidrolik Pres.....	62
Şekil 3.17 : Eğilme Deneyi.....	63
Şekil 3.18 : Basınç Mukavemetinin Ölçümü	64
Şekil 3.19 : Numunelerin Eğilme Halinde Hesaplanmış Çekme Mukavemetleri.....	73
Şekil 3.20 : Numunelerin Basınç Mukavemetleri.....	73
Şekil A.1 : PKÇ/B 32,5R Elek Analizi.....	81
Şekil A.2 : PKÇ/A 42,5R Elek Analizi.....	81
Şekil A.3 : PÇ 42,5R Elek Analizi.....	82
Şekil A.4 : PZÇ/B 32,5R Elek Analizi.....	82
Şekil B.1 : Nuh Çimento Fabrikası'nın PKÇ/B 32,5R Kalite Sertifikası.....	83
Şekil B.2 : Nuh Çimento Fabrikası'nın PKÇ/A 42,5R Kalite Sertifikası.....	84
Şekil B.3 : Nuh Çimento Fabrikası'nın PÇ 42,5R Kalite Sertifikası.....	85
Şekil B.4 : Nuh Çimento Fabrikası'nın PZÇ/B 32,5R Kalite Sertifikası.....	86

ÖZET

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı sistemi olan betonarmenin, girdilerinden birisi çimentodur. Yıllardan beri bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimento, başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin karışımından oluşmuştur. Hammaddelerin farklı oranlarda karışımı ile ve katkı maddelerinin eklenmesi ile farklı tipte çimentolar üretilir. Ülkemizde 15 tip çimento üretilmektedir. Farklı tipte çimentolar farklı özellikler gösterir. Bu tezin konusu da farklı tipte çimentoların özelliklerinin ve bu özelliklerle bağlantılı olarak mukavemetteki değişimlerinin incelenmesidir.

Günümüzde yapılarda oluşan hasarların ve doğal afetler sonucu meydana gelen yıkımların en önemli sebeplerinden biri uygun malzeme kullanılmamasıdır. Üretilen farklı tipte çimentolar farklı yapı ihtiyaçlarını karşılamak için yapılmışlardır. Ayrıca bunların alt grupları da bulunmaktadır. Çimento dayanımı 32,5; 42,5; 52,5 sayılarından biri ile belirtilir. Bu sayı standart deneyde çimento numunesinin 28 gün içinde ulaşması gereken basınç dayanımının MPa olarak değeridir. Ayrıca bir R harfi bulunuyorsa bu çimentonun erken dayanımlı olduğunu ve 2 gün içinde standartta belirtilen dayanıma ulaşacağını gösterir. Çimento, içindeki mineral katkı miktarına göre de sınıflandırılır. Standart sınırlardan daha az katkı bulunduğu A harfi, çok katkı bulunduğu ise B harfi ile ifade edilir. Ana hammaddeler olarak kireçtaşı, kil ve marndan oluşan çimentoya katkı maddesi olarak da puzolanik maddeler, uçucu küller, sülfatlar, granüle yüksek fırın cürufu belirli oranlarda eklenebilir. Kısacası farklı amaçla kullanılmak üzere çok sayıda çimento tipi piyasada mevcuttur. Bilinçsiz uygulamalar sonucu ortaya çıkan tatsız durumlarda ise “çimento” hammaddeli betonarme yapılara kusur bulunmaktadır.

Çimento yaş, yarı kuru ve kuru sistem olmak üzere 3 şekilde üretilir. Kuru sistem şu anda yaygın olarak kullanılan sistemdir ve hammadde karışımının kurutularak öğütülüp toz halinde iken pişirilmesi ve değirmenlerde öğütülmesi ile elde edilir. Üretimi ise şu aşamalardan oluşur; hammaddelerin hazırlanması, farin hazırlama ve homojenleştirme, kalsinasyon, klinkerin soğutulması, öğütme ve paketlenme.

Çimentonun özellikleri sertleşme sırasındaki özellikler ve sertleşmiş çimento hamurunun özellikleri olmak üzere ikiye ayrılır. Sertleşme sırasındaki özellikler hidrasyon, hidrasyon ısı, priz ve sertleşme, priz ve sertleşmenin ayarlanması, yalancı priz, hacim genişmesi ve taze karışımların reolojisi. Sertleşmiş çimento hamurunun özellikleri ise çimento hamurunun iç yapısı, mekanik mukavemet, yük altında deformasyon, rötre ve şişme, geçirimsizlik, donmaya dayanıklılık ve kimyasal etkilere dayanıklılıktır.

Çalışmanın literatür araştırması kısmında elde edilen bu bilgilerin ışığında deneysel çalışmada PKÇ/B 32,5R, PKÇ/A 42,5R, PÇ 42,5, PZÇ/B 32,5R tipte çimentoların özgül yüzey değeri, tane büyüklüğü, priz süresi ve kuru çimento çözünme ısıları

hesaplanır. 2, 7, 28 günlük eğilmede çekme ve basınç mukavemetleri de ölçülen numunelerin özellikleri ve mukavemetleri arasında karşılaştırma yapılmıştır.



Deney sonuçlarına göre;

1. Özgül yüzey değeri en küçük olan çimento numunesi (PÇ 42,5) en yüksek eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerine, özgül yüzey değeri en yüksek olan çimento numunesi (PZÇ/B 32,5R) ise en küçük eğilmede çekme ve basınç mukavemetine sahip olduğu,
2. Tane büyüklüğü en ince olan çimento numunesinin (PKÇ/B 32,5R) eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri düşüktür. Tane büyüklüğü en kalın olan çimento numunesi (PKÇ/A 42,5R) eğilmede çekme ve basınç mukavemeti en yüksek olan numune olduğu,
3. Priz süresi en uzun olan numunenin (PÇ 42,5) eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değeri en yüksek, en kısa olan numunenin (PZÇ/B 32,5R) ise en düşük değerlere sahip olduğu,
4. En yüksek kuru çimento çözünme ısisına sahip çimento numunesi (PKÇ/A 42,5R) en yüksek eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerine, en düşük kuru çimento çözünme ısisına sahip çimento numunesi (PZÇ/B 32,5R) ,ise en düşük eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerine sahip olduğu bağıntıları bulunmuştur.

PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT

SUMMARY

Concrete is one of the most widespread building systems in the world and cement is one of the raw materials of concrete. Cement, which is made up of silisium, calcium, aluminium and iron oxids is being used as binding material for years. Different types of cement can be produced by using different rates of materials and there are 15 types of cement in our country. Different types of cement have different properties. The subject of this thesis is the different properties of different type of cements and the change of resistance according to this different properties.

Generally one of the most important reasons of building damages and natural disaster caused ruins is the wrong material selection. Different types of cement is produced to be used in different situations.

In the second section of the thesis, cement, producing cement and the properties of cement is told. Cement is produced with limestone, clay and marn as main raw materials. Puzolanic materials, flying ashes, sulfats, granule high furnace ashes can be used as supplement material. Cement is produced in three ways; wet, semi-dry and dry systems. Dry system is the most widespread system which is used in producing cement.

The third section of the thesis is the experimental part. There are 4 different types of cement and 5 experiments are made to them. These are specific surface value, piece size value, setting time value and dry cement solving temperature value. Also the resistance of the cement made samples at 2., 7. and 28. days are measured.

At the 4. section; the values are compared. The cement types used at the experiments are PKÇ/B 32,5R, PKÇ/A 42,5R, PÇ 42,5 and PZÇ/B 32,5R.

According to the results;

1. The cement which has maximum spesific surface value (PÇ 42,5) has the maximum resistance. The cement which has minimum spesific surface value (PZÇ/B 32,5) has the minimum resistance.
2. The cement which has minimum piece size (PKÇ/B 32,5R) has low resistance. The cement which has maximum piece size (PKÇ/A 42,5R) has maximum resistance.
3. The cement which has the longest setting time (PÇ 42,5) has maximum resistance. The cement which has the shortest setting time (PÇ 42,5) has minimum resistance.

4. The cement which has maximum dry cement solving temperature value (PKÇ/A 42,5R) has maximum resistance. The cement which has minimum dry cement solving temperature value (PKÇ/A 42,5R) has minimum resistance.



1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Çimento, yıllardır bağlayıcı olarak kullanılan hidrolik bir malzemedir. Başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen çimento, farklı üretim yöntemleri ve farklı kalitelerde üretilir. Ülkemizde 15 tip çimento üretilmektedir. Farklı çimento türlerinde, fiziksel özellikler çimentoların üretim yöntemleri ve kalitelerine göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada çimento ile farklı çimento türleri ve çimentoların özellikleri ile ilgili literatür çalışması yapılmış, çimento özgül yüzey tayini, tane büyüklüğü tayini, priz süresi tayini ve hidratasyon ısısı tayini deneyleri ile mukavemet deneyleri örneklere uygulanarak, çimentoların üretim şekilleri ve bileşimleri arasındaki farklılıkların çimento özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın kapsamı, çimentonun tanımı, tarihçesi ve türleri, çimentonun özelliklerinin araştırılması, seçilen üç tip çimentonun özgül yüzeyi, tane büyüklüğü, priz süreleri ve hidratasyon ısılarının bulunması, mukavemet deneylerinin uygulanması ve sonuçların karşılaştırılmasından oluşmaktadır.

1.3 Çalışmanın Yöntemi

Araştırmada izlenen yöntem, çimento, çimento türleri ve özellikleri ile ilgili genel bir literatür çalışmasının ardından yapılan deneysel çalışma ile farklı tipteki çimentoların özelliklerinin karşılaştırılması olmuştur.

2. MALZEME ve YÖNTEM

2.1 Çimento

2.1.1 Çimentonun Tanımı ve Tarihçesi

Tanım: Çimento; silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin (kalker, kil, marn ve demir cevheri gibi) belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen farin adlı karışımın sinterleşme sıcaklığına gelinceye kadar pişirilip, elde edilen klinkerin alçıtaşı (CaSO_4) ve katkı maddeleriyle öğütülmesiyle oluşturulan hidrolik bağlayıcıdır [1]..

Latince COEMETUM, Fransızca CEMENT, Almanca ZEMENT olarak geçen ismi Türkçeye de İtalyanca'daki CEMENTO'dan girmiştir [1]..

Tarihçe: Eski eserler üzerinde yapılan araştırmalar sonucu, ilk bağlayıcı malzemeler olarak alçı ve kireçten söz ediliyor. 190 – 200 °C sıcaklıklarda pişirilen alçıtaşıdan adı alçı üretilirken, kalker (kireçtaşı) 900 °C üzeri sıcaklıkta pişirilince hava kireci elde edilmesi de alçının daha da önce kullanıma girdiğini kanıtlar. Ancak her iki bağlayıcı da suya karşı dirençsizdir ve hava kireci su içinde sertleşemez. Bu durum kullanım ve dayanıklılıklarını etkiler [2]..

Bağlayıcı maddeler rastlanan en eski yapılar Roma, Yunan ve Girit devirlerine ait kalıntılardır. Eski Romalılar hava kirecini Vezüv yanardağının eteklerindeki Puzzouli kasabası civarındaki volkanik tüflerle birlikte ince öğütülerek daha yüksek dayanımlı ve suya dirençli bir bağlayıcı elde ettiler. Benzer bir malzemeyi Santorini adasındaki tüflerle Eski Yunanlılar elde ederken, Orta Doğu ve Avrupa'da da pişmiş tuğla ve kiremit tozları kullanılarak benzer bir malzeme geliştirildi. Kendi başına bağlayıcı

özellik göstermeyen ancak kireçle birleştğinde suda sertleşebilen ve hidrolik bir bağlayıcı oluşturan bu malzemeye “puzolan” denir [2].

IX. ve XI. yüzyıllarda bağlayıcı malzemelerin teknolojisi çok gelişmezken gözlenen örneklerde kötü işçilik, iyi pişmemiş kireç ve puzolanik maddelerin yokluğu farkediliyor. Bu dönemde kalker yerine killi kalker 1000 °C’de pişirilerek hava kireci yerine hidrolik özelliğe sahip su kireci elde edilmeye başlandı [2].

1750’li yıllarda İngiltere’de John Smeaton yapacağı Eddystone Deniz Feneri binası için kalker, kil ve alçı bileşimlerine puzolan katıp elde ettiği su kireçlerinin deniz suyuna direncini inceleyerek su kirecinin özelliklerini geliştirdi. 1800’lü yılların başlarında benzer çalışmalar Fransa’da Louis Vicat tarafından devam ettirildi. Su kireci hakkındaki parçalı bilgileri biraraya getiren Vicat killi taşlar ve kalker taşlarını belirli oranlarda karıştırıp pişirerek Roman çimentosuna benzer bir su kirecini yapay olarak elde etti. Kalker oranı fazla olduğunda kireç gibi sönebilen maddeyi su kireci veya hidrolik kireç olarak adlandırdı. Killi taş oranı fazla olduğunda ise elde edilen madde kireç gibi sönmüyor fakat yüksek hidrolik özelliklere sahip oluyordu. Vicat buna da tabi çimento dedi. Tabi çimento 1800’lü yıllarda Fransa, İngiltere ve Amerika’da üretilmeye başlandı [2].

1824 yılında ise, Joseph Aspdin adlı bir İngiliz duvarcı, suni Portland çimentosunu keşfetti ve patentini aldı. Doğal killi kalkerler yerine 3 kısım kalker ve 1 kısım kili karıştırıp yüksek sıcaklıkta pişiren Aspdin üstün dayanım ve dayanıklılığa sahip portland çimentosunu elde etti [2].

Türkiye’de çimento tarihi: 18. yüzyıldaki teknolojik gelişmeler Batı dünyasında yapı üretiminde yeniliklere yol açarken Osmanlı’da da levanten sınıfı bu yeni malzemenin ve yapım tekniklerinin olanaklarına başvuruyordu. Büyük kentlerde apartman ve işhanları bu teknoloji ile gerçekleşirken, hızlanan demiryolu ve liman inşaatları da çimento tüketimi için yeni pazarlar oluşturunuyordu. 19. yüzyıl sonlarında ve 20. yüzyıl başlarında ise özellikle İstanbul’da çıkan büyük yangınlar sonucu oluşan zararlar imar yönetmeliklerinde değişiklikler yaratıyor ve kargir yapı sistemi teşvik ediliyordu. Bu da çimento ve beton kullanımı açısından pazarı genişletiyordu [3].

Sanayileşmede geciken Osmanlı İmparatorluğu ise çimentoyu ithal ediyordu. İthalat yapılan başlıca ülkeler Avusturya, Almanya, Fransa ve Belçika idi. Bağlayıcı özelliği nedeniyle çok eskiden bu yana bilinen ve kullanılan çimento kireçle birlikte Osmanlı'da ilk kullanıldığında tarih 19. yüzyılın ikinci yarısıdır. Bu tarihe kadar Horasan harcı kullanıldığı biliniyor. Yüzyılın son çeyreğinde ise betona geçilmeye başlanıyor. İlk kullanımlarda bahçe elemanları, heykeller ve carreau-cement denilen zemin döşemeleri gerçekleştiriliyor [3].

Başlangıçta bu tür dekoratif elemanlarda kullanılan beton, betonarme karkas taşıyıcı sistem olarak 20. yüzyılın başlarına kadar uygulanamıyor. İlk uygulamalar ise zamanın ünlü mimarları Kemalettin ve Vedat Bey'ler tarafından gerçekleştiriliyor [3].

Betonarme uygulamalar arttıkça ithalatla karşılaşılan ulaşım ve taşıma zorlukları çimentonun ülkede üretilmesi için yeni sanayi yatırımlarına bir talep oluşturmuştur. II. Meşrutiyet'le şirketlerin de kurulması teşvik edilirken 1906 yılında İstanbul'da ilk çimento şirketi Linardos kurulmuştur. Bunu “Yerli Çimentoları Osmanlı Anonim Şirketi ve Trabzon Tuğla ve Kiremit ve Çimento Anonim Şirketi” izler, ancak bu firmaların üretim değil ithalat ve ihracat yaptıkları bilinmektedir [3].

Bu girişimlerin ardından 1910 yılında İstanbul'da “Memalik-i Osmaniyye'de Suni Çimento ve Hidrolik Kireç İmaline Mahsus Arslan Osmanlı Anonim Şirketi” adıyla Rum asıllı Osmanlı vatandaşları bir şirket kurmuştur ve Darıca'nın Taşlıman mevkiinde yaş sistemle su kireci ve çimento üretim fabrikası kurulmuştur. Bunu kısa bir süre sonra 1911 yılında bir Alman şirketi tarafından Eskişehir'da suni portland çimentosu ve su kireci üretim fabrikası kurulması izlemiştir [3].

Yine Rum asıllı Osmanlı vatandaşları tarafından kurulan bu şirkette üretimdeki fark kullanılan sistemdir. Kuru sistemle çalışan fabrikada portland çimentosunun yanı sıra tuğla, kiremit, boru, karo ve diğer inşaat malzemeleri de üretilmiştir. Daha sonraki yıllarda yine bazı firmaların kurulduğu anlaşılmaktadır. 1919 yılına kadar 9 tane çimento şirketi kurulmuştur. 1930'lu yıllara kadar su kireci üretimi çimento üretimine göre daha fazla olmuştur [3].

Çimento üretimi yapan Darıca ve Eskişehir çimento fabrikaları kuruldukları yıllardan itibaren devletin de desteğiyle (her türlü resmi ortaklı sözleşmesinde bu şirketlerin

ürettiği çimentoların kullanılması öngörölmüş) kapasitelerini artırmış ama tüketimi karşılayamamıştır. Bu açık ithalat yoluyla kapatılmıştır. Savaş yıllarının ağır koşulları her iki şirketin de 1919 yılında iflas etmesine neden olmuştur ancak 1920 yılında iki şirket birleşip yeni bir şirket kurmuştur. Böylece çimento sanayi Cumhuriyet Türkiye'si dönemine bir şirket, iki fabrika ve birkaç su kireci fabrikası ile zayıf ve zor koşullarda başlamıştır [3].

Cumhuriyetin ilk yıllarında inşaat sektörünün kapasitesi çok sınırlı olduğu için ülkenin yeniden imarı için gerçekleştirilen projelerde kullanılan yapı malzemelerinin büyük bölümü ithal edilmektedir. 1923-1929 yılları arasında 4 yeni çimento fabrikası kurulmuştur ancak bu fabrikalar da talebi karşılayamamıştır. 1930-1950 yılları arasında çimento üretiminde devletçilik uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu yıllar arasında devlet ilk çimento fabrikasını çeşitli nedenlerle biraz gecikerek 1943 yılında Sivas'ta kurmuştur. 1950'li yıllara çimento sektörü 5 tanesi özel sektörün olmak üzere 6 fabrika ile girmiştir. Özel girişimciliği destekleyen ve ithalatı kolaylaştıran hükümetin çabaları sonuç vermeyince çimento sektöründe devlet girişimine geçilmesi gerekmiştir. 50'li yıllar çimento üretiminin düzenlenmesi ve geliştirilmesini sağlayacak sektörün kurumsallaştığı yıllardır. Bu dönemde Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş. (ÇİSAN) ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) kurulmuştur. Bu yıllarda yetkili kurum olan ÇİSAN, 4 tane fabrikanın geliştirilmesini ve 9 tane fabrikanın kurulmasını sağlamıştır [3].

1960-1980 yılları arasındaki dönemin başlangıcı askeri müdahale nedeniyle zor olmuştur. Ancak genel olarak bakıldığında bu dönemde üretim büyük ölçüde artmış, 1969 yılında ithalat durmuş 1973 yılında ise ihracat başlamıştır. Bu dönemde ÇİSAN'ın 50'li yıllarda ihale edip tamamlayamadığı 6 fabrika tamamlanmış ve 1969 yılında özel sektöre ait 4 fabrika kurulmuştur. 1972-1978 yılları arasında 7 adet daha çimento fabrikası işletmeye alınmıştır. Bu dönem çimento yan ürün şirketlerinin de kurulduğu bir dönemdir. Kağıt torba, çimento sanayinde kullanılan tuğla, bilya, silpeps, plaka ve diğer döküm malzemelerini üretmek için fabrikalar kurulmuştur. 1980 yılında sektörde 34 çimento fabrikası etkindir. 13'ü özel sektöre ait bu fabrikaların kalan 21'inin 17'si Türkiye Çimento Sanayi T.A.Ş. tarafından yönetilmektedir, kalan 4 tanesi ise ÇİSAN'ın ortağı olduğu fabrikalardır. Bu dönemde yaşanan en önemli sorunlardan biri de fiyatlarla ilgilidir. Satış fiyatlarının saptanması 1960 yılında çıkan kanunla açıklığa kavuşmuştur ancak bu konunun

bölgeler arasında yarattığı adaletsizlik, Türkiye’deki fiyatların Avrupa’dakilere göre düşük olması, yerli kraft kağıdının dünya kraft kağıdı fiyatlarına göre yüksek olması sektörün yine de zorda kalmasına sebep olmuştur [3].

1980 sonrası çimento sektörünün altın yılları olarak tanımlanmaktadır. 80’li yılların başında yaşanan krizin ve terör olaylarının etkisiyle duraklamaya giren sektör ithalatla yeniden canlanmıştır. Bu dönemde fiyatlar serbest bırakılmış ve ÇİTOSAN’a ait fabrikalar özelleştirilmiştir. 1986 yılında yayınlanan yasa ile KİT’lerin özelleştirilmesine olanak tanınmıştır ve hazırlanan planla KİT’ler satış önceliklerine göre sıralanmıştır. Buna göre ÇİTOSAN “Çoğunluğu Satılabilir KİT” olarak “Birinci Derecede Öncelikli KİT” olarak satılabilir hale gelmiştir. Ve 27 çimento fabrikası yerli ve yabancı sektöre devredilmiştir. Fiyatların serbest bırakılması da her kuruluşa esneklik sağladığı gibi rekabet ortamı yaratmış ve fiyatları düşürmüş, dünya piyasalarındaki rekabet gücünü de artırmıştır. Özelleştirme süreci doğal olarak sıkıntılı ve zor bir dönem olmuştur [3].

2002 yılı itibarı ile Türkiye’de 39 entegre çimento fabrikası ve 19 öğütme paketleme tesis uluslararası standartlara uygun üretim yapmaktadır. Tüm fabrikalar özel sektöre aittir. Yaklaşık bir asırlık bir süreyi geride bırakmış “Çimento Sektörü” 1998 yılında dünya çimento üretiminde %2,42’lik oranla sekizinci sıraya, Avrupa ülkeleri üretiminde ise %15,01’lik oranla birinci sıraya yerleşmiştir ve Avrupa ile dünyanın en büyük çimento üreticilerinden biridir [3].

2.1.2 Çimento Türleri

- **Portland Çimentosu (PÇ)**

Yapay çimento olarak da bilinen portland çimentosunun ilkel maddeleri kalker (kireçtaşı) ve kil (tebeşir) dir. Portland çimentosu üretiminde belirli miktarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içeren hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır, erime (sinterleşme) sıcaklığına kadar pişirilir, fırından çıkan ve klinker denilen fındık veya ceviz büyüklüğündeki malzeme soğutulur ve öğütülür. Öğütme işleminde priz süresini ayarlamak için klinkere belli oranda alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) eklenir ve portland çimentosu elde edilir [1].

Piştirilmek üzere hazırlanan hamurun %23 – 31 oranı kil içeren portland çimentosunun bileşimi;

Silis oksidi (SiO_2)	% 20 - 23
Alümin (Al_2O_3)	% 6.5 – 8.5
Demiroksit (FeO)	% 2 - 4
Kireç (CaO)	% 60 - 65
Manyezi (MgO)	% 2'den az

Kalsiyum sülfat (anhidrit) (CaSO_4) % 2'den az içerir.

Portland çimentoları, 28 günlük basınç dayanımlarına göre;

Portland çimentosu 32.5 (PÇ 32.5)

Portland çimentosu 42.5 (PÇ 42.5)

Portland çimentosu 52.5 (PÇ 52.5) olmak üzere üç tiptir [1].

- **Katkılı Çimento (KÇ 32.5)**

Bileşiminde en fazla %19 puzolanik madde ve buna karşılık olarak en az %81 portland çimento klinkerinin bir miktar alçıtaşıyla –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu (CÇ 32.5, CÇ 42.5)**

Yüksek fırında demir cevheri işlenerek pik demirle aynı anda ortaya çıkan, ani soğutulmayla puzolanik aktivite kazanan ve granül hale gelen içeriğinde kalsiyum, magnezyum ve alüminyum silikatları olan bazik karakterli maddeye granüle yüksek fırın cürufu denir [7].

Yüksek fırın cüruf çimentosu ise kütlece %20 – 80 portland çimento klinkeri ve %80 – 20 granüle yüksek fırın cürufunun bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ile birlikte ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [1].

- **Traslı Çimento (TÇ 32.5)**

Tras, silisli ve alümino asitli volkanik bir tüftür. Yalnız başına hidrolik özellik göstermeyen tras ince öğütülüp normal sıcaklık altında sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birlikte kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösterir. Traslı çimento ise kütlece %20 - 40 tras ile %80 - 60 portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Beyaz Portland Çimentosu (BPÇ 32.5, BPÇ 42.5)**

Özel nitelikli kil ile kireçtaşının birlikte pişirilmesiyle elde edilen beyaza yakın klinkerin bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen beyaz renkli bir hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Harç Çimentosu (HÇ 16)**

Ağırlık olarak en az %40 portland çimento klinkeri ve en çok %60 puzolanik maddelerin bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [1].

- **Uçucu Küllü Çimento (UKÇ 32.5)**

Ağırlıkça karşılıklı olarak %10-30 oranında uçucu kül ve %90-70 oranında portland çimento klinkerinin bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [1].

- **Sülfatlara Dayanıklı Çimento (SDÇ 32.5)**

C_3A (trikalsiyum alüminat) miktarı en çok %5 olan portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı –kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) ilavesi ile öğütülerek elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Sülfatlı Cüruf Çimentosu**

Ani soğutulmuş granüle hale getirilmiş yüksek fırın cürufu ile içinde en az %5 kükürt trioksit bulunacak şekilde alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$), katalizör olarak da az miktarda portland çimento klinkeri ve portland çimentosunun

öğütölüp, homojen olarak karıştırılmasından meydana gelen hidrolik bir bağlayıcıdır [1].

- **Erken Dayanımı Yüksek Çimento (EYÇ 52.5)**

Özel şekilde üretilen klinkerin alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütölmesi sonucu elde edilen erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Bu çimentonun potansiyel analizinde içerik olarak en az %55 trikalsiyumsilikat (C_3S), en çok %20 dikalsiyumsilikat (C_2S), en çok %15 trikalsiyumalüminat (C_3A) ve de ağırlık olarak en çok %10 tetrakalsiyumalüminoferrit (C_3AF) bulunur [1].

- **Portland Cürufllu Çimento (PCC/A, PCC/B)**

Belirli oranlarda portland çimentosu klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütölmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır [6].

- **Portland Kalkerli Çimento (PLÇ/A, PLÇ/B)**

Belirli oranlarda portland çimentosu klinkeri ile kalkerin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütölmesi neticesinde elde edilen çimentodur [1].

- **Portland Silis Dumanlı Çimento (PSFÇ)**

Belirli oranlarda portland çimentosu klinkeri ile silis dumanının, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütölmesi neticesinde elde edilen çimentodur [1].

- **Portland Kompoze Çimento (PKÇ 32.5, PKÇ 42.5, PKÇ 52.5)**

Portland kompoze çimento, belirli oranlarda portland klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütölmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Kompoze Çimento (KZÇ/A, KZÇ/B)**

Kompoze çimento belirli oranlarda portland çimentosu klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcıdır [6].

- **Puzolanik Çimento (PZÇ/A, PZÇ/B)**

Farklı özellikteki birçok hidrolik bağlayıcının veya hidrolik bağlayıcılarla kimyasal bakımdan atıl maddelerin miktarları usulüne göre tesbit edilmiş, mükemmelen homojenleştirilmiş ve çok ince öğütülmüş olan karışımlarından meydana gelir [1].

Hidrolik bağlayıcılardan birisi ile volkanik puzolanlar tras, pişmiş kil vb. yüksek fırın letyesinden başka puzolanların karışımı. %65-89 veya %45-64 oranında portland çimentosu klinkeri ile %11-35 veya %36-55 oranında katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı -kalsiyum sülfat dihidrat- ($\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi neticesinde elde edilen çimentodur [1].

2.1.3 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Ana hammaddeler ve katkı maddeleri olarak ikiye ayrılır.

2.1.3.1 Ana Hammaddeler

Ana hammaddeler kireç komponenti ve kil komponentinden oluşur.

2.1.3.1.1 Kireç Komponenti

- **Kireçtaşı (Kalker)**

Kimyasal bileşiminde %90 kalsiyum karbonat (CaCO_3) veya minerolojik bileşiminde en az %90 kalsit minerali içeren kayalara kalker veya kireçtaşı denir [7].

Çimento bileşiminde kullanılacak kalker;

Kalsiyum oksit içeriğinden hesaplanan kalsiyum karbonat (CaCO_3) miktarı kütlece en az %75 olmalıdır. Deneyde kullanılan kalker, özgül yüzeyi yaklaşık $5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olacak şekilde standarda uygun olarak öğütülmelidir [8].

Toplam organik karbon miktarı;

LL: küttelece %0.20'yi aşmamalı

L: küttelece %0.50'yi aşmamalıdır [8].

Çimento üretiminde kullanılan kalkerin ve kalker yataklarının belirlenen kimyasal özelliklerinin yanında fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pişebilir nitelikte olması da önemli ve maliyeti düşüren faktörlerdir [1].

- **Kil**

Kimyasal bileşimi %90'a kadar kil minerali içeren kayalara kil minerali denir. Çimentoda hammadde olarak kullanılan kil, depolama havzasında birikmesi sonucu oluşmuş çoğu killi ve kireçli topraklardır. Kil; volkanik kütlelerin çeşitli doğa olayları sonucunda ayrışıp, su etkisiyle sürüklenip belli bir yerde birikmesi ile oluşur. Kuruduğunda büzülüp, ıslandığında genleşen, sıkıştığında suyunu veren kilin aslı sulu alüminyum silikat ($Al_2O_3 \bullet SiO_2 \bullet nH_2O$) içeren geçirimsiz, ince taneli, plastik bir topraktır [1].

- **Marn**

%50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denir. Çimento klinkerinde ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütülür yüksek sıcaklıkta pişirilir. Dolayısıyla marn ideal bir çimento hammaddesidir. Kalkere göre daha yumuşak olan marnın kırılması ve öğütülmesi sırasında harcanan enerji çok düşüktür ve bu nedenle tercih edilir [1,7].

2.1.3.1.2 Kil Komponenti

2.1.3.2 Katkı Maddeleri

Çimentonun kalitesini artırmak ve standartlara uygun hale getirmek için katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddeleri; tras, demir cevheri, yüksek fırın curufu ve uçucu küldür [8].

2.1.3.2.1 Puzolanik Maddeler

Puzolanik madde kendi başına hidrolik bağlayıcı özellik göstermeyen ancak ince olarak öğütüldüğünde, normal çevre sıcaklığında ve suyun varlığında kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tepkimeye girerek bağlayıcı özellik gösteren maddelerdir. Tepkimeye girdiğinde kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluşturan puzolanik maddeler alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir [1].

Puzolanlar asıl olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) ten oluşur. Bu maddelerden kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitlerden oluşur. Sertleşme için reaktif kalsiyum oranı ihmal edilebilirken reaktif silisyum dioksit miktarı kütlece %25.0'den az olmamalıdır. Puzolanik madde üretim ve teslim durumuna göre seçilmeli, homojenize edilip, kurutulup, ısıtılardan geçirildikten sonra öğütülmelidir. Uçucu kül ve silis dumanı da puzolanik maddelerdir [1].

- **Doğal Puzolan**

Belirtilen özelliklere genel olarak uygun kimyasal ve minerolojik bileşimi ile uyan volkanik tüflerdir [8].

- **Doğal Kalsine Edilmiş Puzolan**

Genel özelliklere uygun, ısıtıl ile aktifleştirilmiş volkanik orjinli malzemeler, killeri, şistler ve tortul kayalardır [8].

2.1.3.2.2 Uçucu Küller

Uçucu kül, pülverize kömür yakılan fırınlardan atılan baca gazındaki toz taneciklerinin elektostatik veya mekanik yollarla çöktürülmesi ile elde edilir [8].

Uçucu küller silissi veya kalkersi yapıda olabilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu kül ise hidrolik özelliklere ek olarak puzolanik özellikler içerir. Uçucu külün kızdırma süresi standarda göre belirlenerek ancak bir saat olarak tutulur ve kütlece %5'i geçmemelidir [8].

- **Silissi Uçucu Kül**

Silissi uçucu kül çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip küresel parçacıklardan oluşan ince bir tozudur. Esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) ten oluşur. Geriye kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler içerir [8].

- **Kalkersi Uçucu Kül**

Kalkersi uçucu kül reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) ten oluşan hidrolik ve/veya puzolanik özelliğe sahip ince bir tozudur. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler içerir [8].

2.1.3.2.3 Sülfatlar

Kalsiyum sülfat, jips (kalsiyum sülfat dihidrat, $\text{CaSO}_4 \bullet 2\text{H}_2\text{O}$) hemi hidrat ($\text{CaSO}_4 \bullet 1/2\text{H}_2\text{O}$) veya anhidrit susuz kalsiyum sülfat (CaSO_4), veya bunların karışımları olabilir. Ayrıca bazı endüstriyel proseslerin yan ürünü olarak da temin edilebilir. Kalsiyum sülfat üretim sırasında çimentonun diğer bileşenlerine prizi kontrol için ilave edilir [8].

2.1.3.2.4 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Demir cevheri yüksek fırında eritilip arıtılırken uygun bileşimdeki erimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilen maddeye granüle yüksek fırın cürufu denir. Kütlece en az 2/3 oranda camsı curuf ihtiva eden granüle yüksek fırın cürufu uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellik gösterir [7, 8].

Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az 2/3'ü kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO_2) toplamından ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşikler ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içerir [8].

2.1.4 Çimento Üretim Prosesi

Çimento üretimi üç şekilde gerçekleşir:

- **Yaş Sistem**

Yaş sistemle çimento üretimi kalker ve kil karışımına %30 – 40 oranında su ilave edilip öğütme işleminden sonra çamur haline getirilen karışımın pişirilmesi gerçekleşir. Gerekli düzeltmeleri yapılmış ve homojenize edilmiş çamur zincirli uzun fırınlara sevk edilip, zincir bölgesinde nemini kaybeder, orta bölümde kalsine olur ve çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkerize olup soğutucuya dökülür [1].

Bu sistem ancak hammadde çok nemli ise ve sedimanter marn ve kilden oluşuyorsa ekonomiktir [1].

- **Yarı Kuru Sistem**

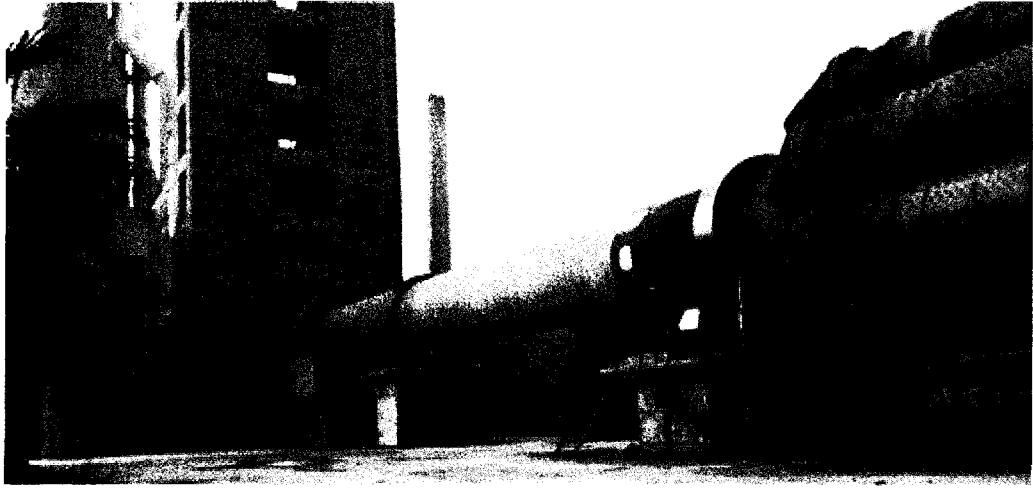
Yarı kuru sistemle çimento üretiminde hammaddeler kuru olarak öğütülür ve eğik duran döner bir tabak üzerine konulup su püskürtülerek leblebi veya fındık büyüklüğünde granüller haline getirilir. Daha sonra Lepol ızgarasında kurutulup pişirmeye verilen bu granüller sevkedildikleri hareketli ızgarada nemini kaybedip kısmen kalsine olur ve kısa döner fırında kalsinasyonu tamamlayıp klinkerizasyonları gerçekleşir [1].

- **Kuru Sistem**

Kuru sistemde çimento üretiminde hammadde karışımı yani kalker ve kil kurutularak öğütüldükten sonra toz halinde iken pişirilir ve çimento değirmenlerinde öğütülür. Kuru sistemde hammadde konkasörde kırılır ve farin değirmeninde öğütülerek homojenize edilir. Öğütme işlemi sırasında farin, fırından alınan yanma gazları ile kurutulur. Bu kurutma ve ısıtma işlemleri yaş ve yarı kuru sistemdeki gibi döner fırında gerçekleşmez. Bu nedenle de fırın boyu diğerlerine göre kısadır. Kuru sistem fırında sadece kalsinasyon ve sinterleşme işlemleri yapılır [1].

Yaş ve kuru sistem arasındaki en önemli fark kavurma ve soğutma aşamalarında döner fırında harcanan yakıt miktarı ile ilgilidir. Yaş sistemde harcanan enerji 1200–1650 kcal/kg iken kuru sistemde bu değer 550–650 kcal/kg'dır [1].

Ülkemizde yaş sistemle üretim yapan fırınların büyük bir bölümü 1965–1973 yılları arasında üretim kapasitelerinin artırılması amacıyla, 1974 yılından itibaren ise yakıt tasarrufu sağlamak için kuru sisteme çevrilmiştir [1].



Şekil 2.1 Döner Fırının Dış Görünüşü

Entegre bir çimento tesisinde çimento üretimi kısaca şu şekilde gerçekleşmektedir; [2].

- **Hammaddelerin hazırlanması**

Çimento hammaddelerinin belirli bir şekilde orantılanmış karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir. Bunları alümin ve demir oksit ile daha az miktarda magnezyum, alkali oksitler ile diğer maddeler takip eder [2].

Kireç (CaO), kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girerken silis (SiO_2) için başlıca kaynak kildir. Alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) de genellikle kilden gelen maddelerdir. Öğütülmüş hammaddeler fırında pişerken bu oksitler önce serbest kalıp sonra sıcaklık arttıkça aralarında yeni bileşikler oluşturur. Bu aşamada kireç miktarının yeterli oluşu ve hammaddelerin gerekli oranda birleştirilmesi önemlidir, kontrol edilmelidir [2].

Öğütülmüş hammaddenin yani unun bileşimi bazı formüllerle kontrol edilir. Hammaddeler, kendi bileşimleri esas alınarak yapılan ayarlamalardan sonra karıştırılıp öğütülürler ve oluşan farin adlı bileşim ön ısıtma aşamasına gönderilir [2].

Çimentonun oluşumu ve su ile hidratasyonu sırasında karmaşık kimyasal reaksiyonlar içerir ve bu nedenle de bazı kısaltmalar yapılır ve çimento kimyasına özgü semboller kullanılır: [2].

$\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$, $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$ vb.

- **Farin hazırlama ve homojenleştirme**

Hammadde karışımı olan farinin etkin bir şekilde ısıtılıp kalsine edilebilmesi için önce öğütülmesi gerekir. Öğütme, düşey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleşir [2].

- **Farin pişirilmesi (Kalsinasyon)**

Farinin pişirilmesi çimento üretiminin en önemli aşamasıdır. Farinin pişirilmesinin aşamaları ise şunlardır: [2].

Farin ilk olarak ön ısıtma ile ısıtılır. Böylece fırına girmeden önce enerji tasarrufu sağlanmış olur. Farin ön ısıtma kulelerinde siklon adı verilen seri bölmelerde egzoz gazı içinde ısınır ve kısmen kalsine olur [2].

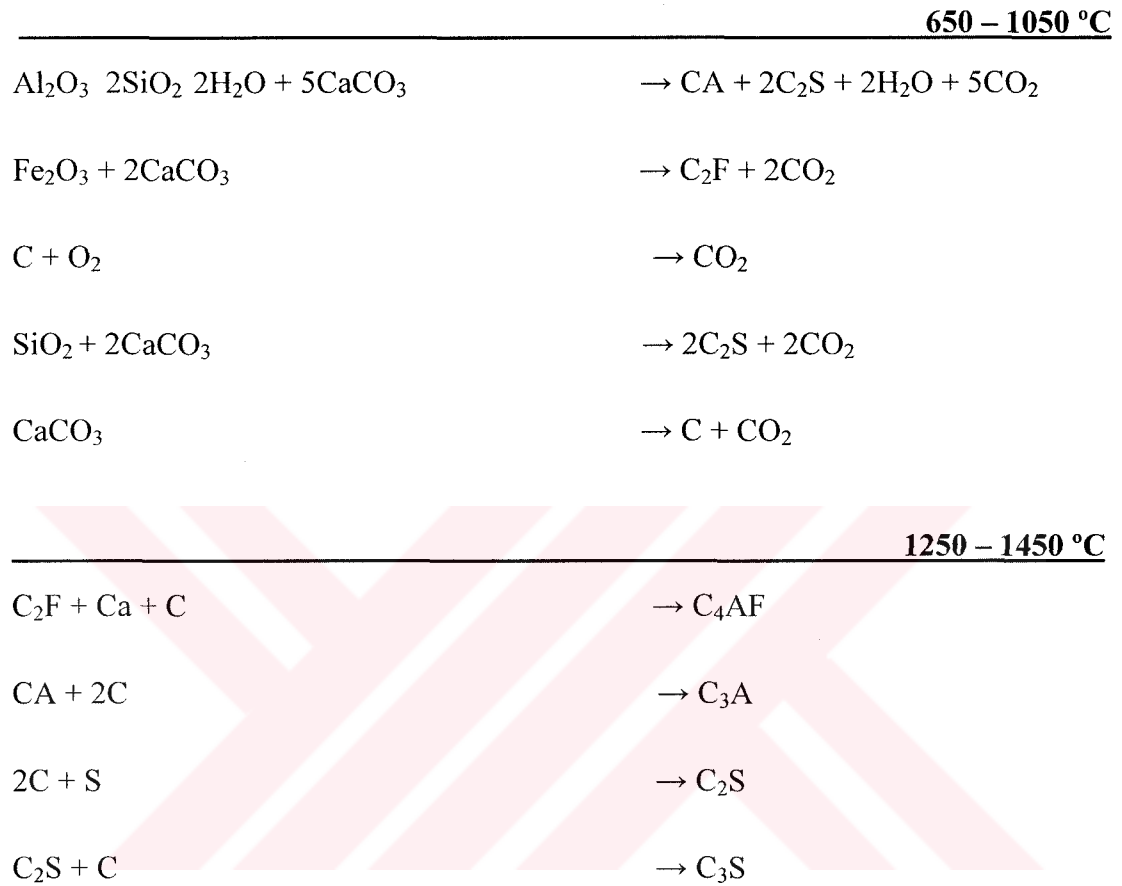
Bazı ön ısıtma işlemlerinde kulenin altında döner fırından hemen önce bir ön kalsinasyon ünitesi mevcuttur. Son siklondan buraya sıcak hava ve yakıtla gelen farin tanelerinde kalsinasyon, hammaddelerin karbondioksitten arındırılması %95 oranlarına kadar gerçekleşebilir [2].

Döner fırın kalsinasyonun en önemli aşamasıdır. Çapı 3–7 m, uzunluğu ise 50–75 m olan fırın 50 mm kalınlığında sacdan yapılmıştır ve refrakter tuğla astarlıdır. Döner fırın, endüstri tesislerindeki en büyük proses elemanı olarak kabul edilmektedir. %3–4 eğimli bu fırına malzeme yukarı uçtan girer ve dakikada 1,5–4 devir yapan fırınla birlikte dönerek, kayıp ilerleyerek alt uçtaki aleve doğru ilerler. Bu aşamada CO_2 malzemeden tamamen ayrışır ve kimyasal reaksiyon başlar [2].

Döner fırının alt ucunda alev çıkan bir boru bulunur. Borudan çıkan beyaz kor haldeki alevin sıcaklığı 1870°C 'ye kadar çıkar. En sıcak bölgede sıcaklığı 1480°C 'ye çıkan kalsine malzeme erimeye ve sıvılaşmaya başlar. Sıvılaşan bu ince taneli

malzeme birbirine yapışarak daha büyük boyda klinker tanelerini oluşturur ve fırından çıktıktan sonra soğutma işlemine tabi tutulur [2].

Döner fırında klinker oluşumuna kadarki kimyasal reaksiyonlar şunlardır;



Hammaddeler kireç, silis ve alümin döner fırında sıcaklık arttıkça önce serbest hale gelip sonra yeni bileşikler oluştururlar [2].

Oluşan klinkerin bileşiminin %90'ından fazlası karma oksit formunda dört ana bileşenden oluşur. Bu dört ana bileşen C_4AF , C_3A , C_2S , C_3S 'dir. Her birinin su ile reaksiyon hızları, çıkardıkları ısı miktarları ile bağlayıcılık değeri olarak çimentoya katkıları farklıdır [2].

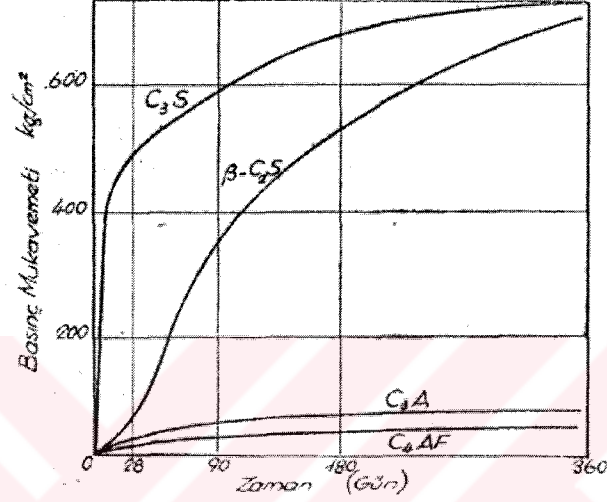
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$: Su ile reaksiyonu ve bağlayıcılık özelliği fazla olmayan bir bileşendir [2].

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$: Su ile çabuk reaksiyona giren ve çok miktarda ısı açığa çıkaran bir bileşendir. Çimento hamurunun çabuk katılaşmasına neden olur ve bu

etkiyi yavaşlatmak için klinker alçıtaşı ile öğütülür. Bağlayıcı özelliği az olan bu bileşen yıpratıcı sülfat etkilerine karşı çimento direncini azaltır [2].

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$: Su ile reaksiyonu yavaş olan ve az miktarda ısı açığa çıkaran bu bileşenin bağlayıcılık özelliği kendini ilerki yıllarda gösterir [2].

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$: Su ile reaksiyonu da çıkardığı ısı da orta değerde olan C_3S 'nin bağlayıcılık özelliği yüksektir ve ilk yıllardan itibaren kendini gösterir [2].



Şekil 2.2 Çimento Ana Bileşenlerinin Basınç Mukavemeti Grafiği [4]

Kalker ve kil gibi hammaddeleri orantılayarak farin oluşturulurken bu dört ana bileşenin miktarlarını değiştirerek yeni bir hammadde veya katkı kullanmadan oluşacak çimentoya farklı özellikler kazandırmak mümkündür [2].

Tablo 2.1 Çimentonun Bileşenleri [5]

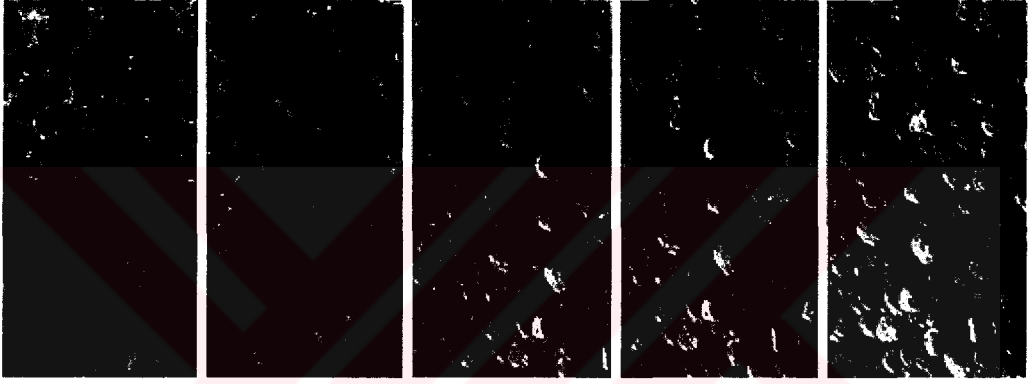
Bileşen	Reaksiyon Hızı	Bağlayıcı Değeri	Hidratasyon Isısı
C_3S	Orta (İlk hafta)	Kuvvetli	Orta
C_2S	Yavaş (İlk yıl)	Kuvvetli	Az
C_3A	Ani (İlk dakika)	Zayıf	Çok
C_4AF	Ani (İlk dakika)	Zayıf	Çok

Bu 4 ana bileşenin dışında çimentoda kalan %10'luk kısmı serbest CaO, MgO ile alkali oksitler ve SO₃ oluşturur [2].

- **Klinkerin Soğutulması**

Döner fırından yaklaşık 1300°C'de çıkan klinkerler ızgara plakalar üzerinde yavaşça ilerlerken basınçlı dış hava verilerek soğutulur. Soğutma hızı klinker iç yapısının etkilenmemesi için kontrol edilmelidir [2].

Ortamdan elde edilen ısı enerjisi klinker üretimi için gerekli olan miktarın üçte birine yakın bir değerdir ve tekrar fırının ısıtılması ile ön kalsinasyonda kullanılır [2].



Şekil 2.3 Çimento Klinkerinin Soğuması [2]

- **Öğütme**

Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi ile elde edilir. Yaklaşık 2 cm çapındaki klinkere ağırlıkça %3–5 arasında kalsiyum sülfat katılarak çimento tanesi inceliğine kadar yani 40 mikronun altında, genellikle de 15–20 mikron (0,0015–0,0020 cm) öğütmek gerekir [2].

Klinker ve alçının öğütülmesi için genellikle bilyalı değirmenler kullanılır. Yaklaşık 3 m çapındaki çelik silindir şeklindeki değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik bilyalarla doldurulmuş bölmeler vardır. Klinker bu bölmelerde parçalanır ve son bölmede istenen incelik elde edilir. Klinker eğer öğütücüye soğutucudan doğrudan geldiyse, son aşamada 50–100°C arası bir sıcaklıktadır. Bu nedenle öğütme aşamasında değirmen içine basınçlı su verilerek sıcaklığın artması önlenir [2].

Çimentoya katılan kalsiyum sülfat priz süresi kontrolü için zorunludur. Son yıllarda öğütmeyi kolaylaştırıcı kimyasallar da öğütme aşamasında eklenir. Bu aşamada portland çimentosuna bazı mineraller katılarak değişik tipli çimentolar da üretilir [2].

- **Paketleme**

Fabrika veya öğütme tesisinde elde edilen çimento silolarda depo edildikten sonra iki şekilde piyasaya sürülür: [2].

Torbalı çimento: Üç katlı özel kraft kağıttan torbalarda 50 kg olarak piyasada mevcuttur. Daha çok küçük ölçekli inşaat ve kullanım yerlerinde kullanılır [2].

Dökme çimento: Silodan özel tankerlere alınarak hazır beton tesislerindeki veya inşaat sahasındaki beton santrallerine sevk edilir [2].

2.1.5 Çimentonun Özellikleri

2.1.5.1 Sertleşme Sırasındaki Özellikler

- **Hidratasyon**

Henry Louis Le Chatelier 1887 yılında yayınladığı araştırmalarında hidratasyonu çimento bileşenleri olan iki kalsiyum silikatın ve kalsiyum alüminatın su ile bağımsız reaksiyonları olarak tanımlıyordu. Bu tanım bugün de geçerliliğini sürdürmektedir. Henry Le Chatelier kireç suyu ve silis jeli ile yaptığı deneyler sonucu C_3S ve C_2S 'nin su ile girdiği reaksiyonda bir kalsiyum-silikat-jeli (CaO , SiO_2 , $2.5 H_2O$) ve $Ca(OH)_2$ oluştuğunu gözlemlemiştir [5].

1935 yılında Lea ve Desin de hidratasyonun muhtelif bileşenlerin reaksiyonları toplamı olduğunu belirterek klinker bileşenlerinin birbirleri ile reaksiyonları beklenmediğinden $CaO - SiO_2 - H_2O$ ve $CaO - Al_2O_3 - H_2O$ üçlü sistemlerinde ayrı ayrı faz dengelerini araştırmışlardır [5].

Birinci sistemde oluşan bileşenler çimento hamurundaki gibi $Ca(OH)_2$ 'ye doymuş bir ortamda

$3CaO$, $2SiO_2$, nH_2O ve $2CaO$, SiO_2 , nH_2O arasında değişir [5].

İkinci sistemde ise;

$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ ve $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 13\text{H}_2\text{O}$ sonuçlarını verir [5].

Araştırmaların geliştirilmesi için bir sonraki aşamada $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ sistemine kalsiyum sülfat yani alçıtaşı eklenir [5].

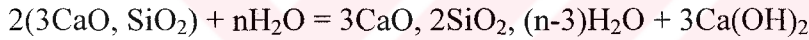
$\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ sisteminin hidratasyon sonucu ise denge şartlarında önce yüksek sülfatlı kalsiyum sülfoalüminat

$3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{CaSO}_4 - 31\text{H}_2\text{O}$ olur [5].

Sonra ise alçak sülfatlı

$3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaSO}_4 - 12\text{H}_2\text{O}$ oluşur [5].

1960 yılında ise X-ışını difraksiyonu çalışmaları çimento hamurunun incelenmesinde önemli yer tutmuştur. Çalışmaları sonucunda Robert Copeland ve Cantro C_3S ve $\beta\text{C}_2\text{S}$ 'nin hidratasyonu sonucunu;



$2(2\text{CaO}, \text{SiO}_2) + n\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO}, 2\text{SiO}_2, (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$ olarak bulmuşlardır [5].

Burada kristalin içerisine alınan su moleküllerinin sayısı, n ; hidratasyonun devam etme süresine bağlıdır. Amerika'da yapılan araştırmalarda su-çimento oranı 0,4 olan çimento hamurunda C_3S 'nin 1 yıl sonunda %95, 6,5 yıl sonunda ise %100 hidrate olduğu sonucu çıkarken; C_2S bu derece hızlı bir reaksiyon gerçekleştirmez. C_2S ise 1, 6,5 ve 13 yıl sonunda %81,4, 87,6 ve 98,2 oranlarında hidrate olur. Bu sonuçlar bağımsız bileşenlerin bağımsız olarak hidrate olduğunun da ispatıdır [5].

Hidratasyon için gerekli olan su miktarı kütleme'ye bağlıdır. Powers'ın yaptığı araştırmalara göre çimentonun tam olarak hidratasyona uğraması için gerekli su miktarı çimento ağırlığının minimum %44'üdür. Ancak hamurun doygun durumda kalması için gerekli olan su miktarı da buna eklenmelidir, yoksa hidratasyon durabilir [5].

Tablo 2.2 Çimento Bileşenlerinin Hidratasyon Reaksiyonları [5].

Bileşen	Su ile Hidratasyon Reaksiyonu
C ₃ S	$3\text{CaO}, \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaO}, \text{SiO}_2, (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ $2(3\text{CaO}, \text{SiO}_2) + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, 2\text{SiO}_2, (n-3)\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$
C ₂ S	$2\text{CaO}, \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaO}, \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O}$ $2(\text{CaO}, \text{SiO}_2) + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, 2\text{SiO}_2 + (n-1)\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
C ₃ A	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O} + \text{ISI}$ $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 13\text{H}_2\text{O}$
C ₃ A+ Alçı	$3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O} + 3(\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}) + 19\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 31\text{H}_2\text{O}$ $2(3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaSO}_4, 31\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3(3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaSO}_4, 12\text{H}_2\text{O})$
C ₄ AF	$4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 + (n+6)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{H}_2\text{O} + \text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, n\text{H}_2\text{O}$

- **Hidratasyon ısısı**

Çimentonun hidratasyon ısısı, kuru çimentonun çözünme ısısı ile hidrate çimentonun çözünme ısısı arasındaki fark olarak tanımlanır. Çimentonun hidratasyonu sırasında önemli miktarda ısı açığa çıkar. Betonarme binalar gibi (yüzey:hacim) oranı büyük yapı elemanlarından oluşan yapılarda bu ısı betonun sıcaklığını çok yükseltmeden dışarıya kaçabilir. Ancak baraj gibi masif betonlarda buna imkan yoktur ve sıcaklık artar. Bu yüksek sıcaklıkta beton sertleşir. Bir iki sene sonra yapı havanın ortalama sıcaklığına iner, soğur ve büzölmek ister. Büzölmenin önlendiğı temel gibi yerlerde önemli çatlaklar oluşur [5].

Hidratasyon ısısı ile ilgili olarak ilk araştırmalar bu nedenle gerçekleştirilmiştir. 1913 yılında Beals, 1931 yılında A.C.Davis ve G.E.Troxel araştırmalarını yayınlamışlardır. Fakat 1932’de Woods, Steinour ve Starke’nin yaptığı erime ısısı metodu 3 günden başlayarak istenilen yaştaki çimentoların hidratasyon ısısını ölçmedeki en uygun metot olarak kabul edilir [5].

Bu metotta iki ölçü yapılır. Kuru çimento tozu üzerinde ve istenen herhangi bir yaştaki sertleşmiş çimento hamurundan alınıp, kurutulup öğütülmüş örnek üzerinde. Çimento ve hidrate olmuş çimentonun asit içindeki erime ısılarının farkı, çimento hamurunun hidratasyon ısıdır [5].

Bu araştırmalar çimento hamurundaki su-çimento oranının da hidratasyon ısısında etkili olduğunu gösterir. Su-çimento oranı arttığında hidratasyon artar. Sıcaklık da aynı şekilde etki gösterir [5].

Tablo 2.3 Çimento Ana Bileşenlerinin Hidratasyon Isıları [5]

Bileşen	Hidratasyon Isısı, cal/gr							
	3 gün	7 gün	28 gün	3 ay	1 yıl	6.5 yıl	13 yıl	Tam hidratasyon ısıları *
C_3S	58	53	80	104	117	117	122	120
C_2S	12	10	25	42	54	53	59	62
C_3A	12	372	329	311	279	328	324	207
C_3AF	69	118	118	98	90	111	102	100

Lerch ve Bogue'a göre; (su:çimento = 0,40, sıcaklık = 21°C)

- **Priz ve sertleşme**

Priz, bir bağlayıcının belirli şartlar altında normal hamur iken plastik halden katı hale geçtiği zaman içinde meydana gelen olaydır. Sertleşme ise prizden sonra gerçekleşen mekanik mukavemetlerin az veya çok süratli bir şekilde yavaş yavaş artmasıdır. Priz ve sertleşme kavramları birbirine karıştırılmamalıdır. Portland çimentosunun prizi ve sertleşmesi hakkında iki teori vardır. Birinci teori olan Henry Louis Le Chatelier teorisi alçının prizindeki gibi girift kristal iğnelerinin büyümesine dayanır [5].

İkincisi Wilhelm Michaelis'in teorisi ise, hidrate kalsiyum silikatın kolloidal yapısı nedeniyle kolloidal veya jel karakterine çimento hidratasyonunu dayandırmıştır. Buna göre jel kuruyup büzüldüğünde tutkal gibi agrega tanelerini bağlayıp birleştirir. 1918 yılında Faraday tartışmalarında geniş bir biçimde ele alınan bu iki zıt teorisinin

bugün her ikisinin de doğru olduğu ve jel teorisinin gerçeği daha iyi açıkladığı kabul edilmektedir [5].

Çimento taneciklerinin hızla suyu emerek etraflarını kolloid bir madde, bir “sol” ile sardıkları, bu “sol”un statik elektrik yüklerini kaybedip bir jel haline geldiği, jel kurumaya başlayınca tanecikleri kristalleştirdiği ve küçük plakçıklar veya iğnecikler şeklinde büyüyerek hidrate olmayan çimento toprakları ile agrega tanelerini bağladığı sanılmaktadır. Hidratasyon sırasında oluşan ürünler içe ve dışa büyüyerek bir tabaka oluştururlar ve bu tabaka pratik olarak bir jeldir. Powers ve arkadaşları bu jelin çeşitli özelliklerini incelemiştir. Bu araştırmalar sonucu şu sonuçlar elde edilmiştir: [5].

Tablo 2.4 Çimento Jeli Fiziksel Özellikleri [5]

Özgül Yüzey	$650 \text{ m}^2/\text{cm}^3 = 250 \text{ m}^2/\text{gr}$
Tane Çapı	87 A° çapında bir küreye denk
Boşluk Çapı	15 A° mertebesinde
Birim Ağırlığı	$2.15 - 2.65 \text{ gr}/\text{cm}^3$
Porozite	%26
Su Geçirimsizlik Katsayısı	$7 \times 10^{-11} \text{ cm/san.}$

- **Priz ve sertleşmenin ayarlanması**

Döner fırınlar kullanılmaya başlanmadan önce yapılmış olan çimentolar için zaten yavaş priz yaptıklarından dolayı prizi geciktirecek önlemler alınması gerekmezken döner fırın ürünlerinin çok çabuk sertleşmeleri prizin ayarlanması gereğini ortaya çıkarmıştır. İlk olarak klinkerler fazla havaya maruz bırakılarak priz ayarlanmış, 1875 yılında ise ilk olarak geciktirici olarak alçıtaşı kullanılmaya başlanmıştır. Alçıtaşının hızlandırıcı etkilerinin de olması geciktiriciden çok ayarlayıcı olarak değerlendirilmesini gerektirir [5].

Çimentonun ilk andaki hidratasyon reaksiyonları ile ilgili olarak yapılmış araştırmalar C_3A taneciklerinin etrafa ani olarak 3CaO , Al_2O_3 , 3CaSO_4 , $31\text{H}_2\text{O}$

oluşturur ve C_3A 'nın çabuk priz yapmasını önler, bu durumda alçı prizi ayarlamada etkindir. Çimento hidratasyonunun ilk aşamalarındaki olaylar 4 devrede gerçekleşir. Bunlar; (1) hızlı bir ilk reaksiyon, (2) reaksiyonsuz bir devre, (3) hızlanan bir reaksiyon devresi-priz, (4) yavaşlayan bir reaksiyon devresi-sertleşme'dir [5].

Alçıtaşı prizi ayarlamasının dışında sertleşmiş çimento hamurunun ilk mukavemetleri ve hacim değişiklikleri üzerinde de rol oynar. Gereğinden az ya da çok oluşu mukavemeti değiştirir, hacim değişimlerinin artmasına yol açar. Her çimento için çimento inceliği ve bileşimine bağlı optimum bir alçıtaşı yüzdesi vardır. Bunun üstündeki alçıtaşı yüzdeleri harap edicidir, çünkü çimento prizini yaptıktan sonra da kalsiyum-sülfat-alüminat oluşumuna devam eder, geciken genleşmelere yol açar [5].

Kalsiyum klorürün de düşük konsantrasyonlarda (%1'den az) prizi geciktirdiği, yüksek konsantrasyonlarda (%1'den fazla) prizi hızlandırdığı bilinir. Prizi hızlandırıcı bir başka madde de hidratasyon reaksiyonlarını katalist olarak etkileyen trietanolamin'dir. Prizi bozucu-geciktirici maddeler arasında ise plastikliği artırmak için kullanılan kalsiyum-ligno-sülfonat, kurşun, bakır, çinko tuzları, boratlar, alkali fosfatları, kazein ve şeker vardır [5].

Çimentonun sertleşmesindeki bu değişiklikler atmosfer veya sıcaklık şartlarına maruz kalma sonucu ortaya çıkabilir. Çimentonun hava ile teması su buharı ve karbondioksit ile reaksiyon yapmasına sebep olur, bu da prizi ya geciktirir ya da hızlandırır [5].

- **Yalancı priz**

1899 yılından bu yana bilinen, betonun karılması sırasında veya karılmanın hemen ardından kıvamda gerçekleşen koyulaşmaya yalancı priz denir. Bu olay çoğunlukla klinkerin öğütülmesi sırasında ilave edilen alçıtaşının öğütme değirmeninde yüksek sıcaklık nedeniyle suyunu kaybetmesi ile piyasa alçısı haline geçmesi ve beton içinde ani priz yapması şeklinde gerçekleşir. Koyulaşmayı önlemek ve betonu eski kıvamına getirmek için uzun süre karmaya devam etmek gerekir. Bir diğer neden de çimentonun havalanmasıdır. Bu nedenler öğütme değirmenini soğutarak ve çimentonun havalanmasını önleyerek engellenebilir [5].

- **Hacim genleşmesi**

Portland çimentosu ile yapılan harç ve betonlarda aranan en önemli özelliklerden biri hacim sabitliğidir. Bozuk çimento kullanılması sonucu doğmuş anormal hacim artışı betonda önemli çatlamalara ve yavaş yavaş gerçekleşen bozulmalara yol açar. Portland çimentosunda hacim gelişmesine sebep olan nedenlerden biri çimento bileşimindeki CaO ve MgO bileşenleridir [5].

Çimentoda serbest CaO bulunması ilkel maddelerin doğru karıştırılmaması, yeterli derecede öğütülmemiş olması ya da uygun karıştırılmış ve öğütülmüş bir karışımın az pişirilmiş olmasından dolayıdır. MgO ise çimentoda çoğunlukla çok pişmiş, kristalleşmiş (periklas) şekilde bir gayirsaflık (yapaylık) olarak bulunur [5].

Hacim genleşmelerinin incelenmesi normal kür şartlarında uzun zaman gerektirir, bu nedenle hızlandırılmış deney metotları kullanılır. Bu deneylerin amacı CaO ve MgO'nun hidrasyonunu artırmaktır [5].

Bu deney metotları:

Pide Deneyleri: Çimento hamurundan yapılmış pideler 24 saat nemli ortamda korunur, 3-5 saat suda kaynatılır, gözle muayene edilir [5].

Le Chatelier Deneyi: 30 mm çapında ve yüksekliğinde çimento hamuru silindirler 24 saat suda tutulur, 3-6 saat suda kaynatılır, Le Chatelier iğnesi ile oluşan hacim genleşmesi ölçülür [5].

Otoklav Deneyi: Otoklav genellikle silindirik, buhar basınçlı bir kaptır. Çimento hamurundan yapılmış prizmatik çubuklar 24 saat nemli ortamda tutulur, 5 saat istime (buhara), 3 saat de 215°C sıcaklık ve 20 atmosfer buhar basıncının etkisinde tutulur sonra boy uzamaları ölçülür [5].

1940 yılından bu yana otoklav deneyi kabul görmektedir [5].

- **Taze karışımların reolojisi**

Reoloji cisimlerin deformasyonları ile ilgili olarak araştırma yapan bilim dalıdır. Taze çimento hamuru, harç ve betonlarının reolojik özellikleri pratikte son derece önemlidir. “İşlenebilme özelliği” adı altında gözönüne alınır ve çimento ile yapılan

karışımların hareket ve sıkışma kabiliyetini belirten faktörlerin, bu arada özellikle su miktarı, karışım oranı, incelik, granülometri gibi değişkenlerin etkisi altındadır. Bu özelliklerin incelenmesi ve ölçülmesinde henüz çözülmesi mümkün olmayan bir güçlük vardır [5].

Taze karışımlar iki durumda olabilirler. Sulu halde sürekli, plastik bir kütle, kuru halde ise yer yer boşluklu ve düzensiz bir kütle halinde bulunurlar. Sulu haldeki kütle reolojisi yer değiştirme, kuru haldeki kütleinki ise sıkışmadır. Bu iki farklı durumdaki kütle ölçme metodlarının da ikiye ayrılmasını gerektirir [5].

Plastik veya akıcı durumda işlenecek karışımlar ele alındığında burada malzemenin sürekli ve pek az boşluklu bir kütle olduğu görülür. Malzemenin işlenmesi hacimde değişiklik yapmamakta, kütle başka yerlere, kalıptaki boş kısımlara gitmesini sağlamaktadır. Bu durumdayken gerçekleştirilen işleme çalışmasına hakim kanun kuvvet-deformasyon bağıntısıdır [5].

İkinci durumdaki kuru karışımlar ise başlangıçta sürekli bir kütle şeklinde değildir ve işlenmelerindeki en önemli çalışma sıkıştırma olacaktır. Bunlar alacakları sıkıştırma enerjisi yolu ile incelenmelidir [5].

2.1.5.2 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Özellikleri

Çimento hamurunun özellikleri; kapiler boşlukların miktarına, yani jel konsantrasyonuna, jel özelliklerine, jel suyuna ve jeldeki katı yüzler arasındaki çekme kuvvetlerine bağlıdır [5].

- **Çimento hamurunun iç yapısı**

Çimentonun hidratasyonu ve sertleşmesi sonucu tobermorit benzeri kolloid boyutunda son derece büyük bir iç yüzeye sahip jel sisteminde lif yapıları oluşur. Su ile karıştırılıp sertleşmeye bırakılmış bu çimento hamuru içinde hidratasyon ile oluşan bu jelin dışında kalsiyum hidroksit kristalleri, bazı ikinci derecede bileşenler, hidrate olmamış çimento taneleri ile başta su ile dolmuş boşluklar da vardır. Dolu hacimlerden arta kalan bu boşluklara kapiler büyüklükte oldukları için kapiler boşluklar denir ve sertleşmiş jel tarafından sarılı münferit boşluklardır. Bu boşluklar

jel içindeki %26 oranındaki jel boşlukları sisteminden farklıdır ve daha büyük boyuttadırlar [5].

- **Mekanik mukavemet**

Sertleşmiş çimento hamurunun mukavemeti ile iç yapısı arasında şimdiye kadar bir temel bağıntı kurulmamıştır. Feret formülü, Abrams formülü gibi ampirik bağıntılar mevcuttur. Bu bağıntıları çimento hamuru üzerinde araştıran Powers mukavemetin kapiler boşluklar azaldıkça yani jelin konsantrasyonu arttıkça arttığını gözlemiştir [5].

Buna göre jel kalitesinin çimento cinsine ve özelliklerine bağlı kabul edilmektedir. Powers'a göre çimento mukavemetinin en büyük kaynağı moleküller arasındaki 'Van der Waals' kuvvetleridir. Ancak arada kimyasal bağlar da vardır. Hidratasyon sırasında çimento taneciklerinin etrafında iğne şeklinde jel kristalleri girift bir şekilde ara boşlukları doldurur, kohezif ve kimyasal bağlarla taneleri kenetler böylece çimento hamurunun mukavemet ve rijitliğini ve hidratasyonun zamanla ilerlemesini sağlar [5].

İğnelerden oluşan böyle bir yapının mukavemet ve deformasyonu ile ilgili olarak Reinius bir teori geliştirmiştir. Çimento hamuruna etkiyen basınç kuvvetinin tanelerden diğerine jel kristalleri ağı ile geçtiğini kabul eden Reinius farklı yönlerde etkiyen kuvvetlerin yaptığı etkiyi araştırmıştır. Eğik kristallerin taneleri iterek birbirinden uzaklaştıracağını, dik iğnelerin ise çekmeye çalışıp uzaklaşan taneleri yerlerinde tutacağını düşünmüştür [5].

Çekmeye çalışan dik kristallerin uzaması çimento hamurunun basınç altında yanal genişlemesinin kanıtıdır. Kristallerde çekme mukavemetinin az oluşu da çimento hamurunun neden basınç kuvvetine paralel çatlak ve yayılmalar göstererek kırıldığını açıklar [5].

- **Yük altında deformasyon**

Çimento hamurunun hızlı, yavaş ve sürekli basınç yüklemesi altında gösterdiği farklı deformasyonlar jel bünyesi ile tarif edilir. Özellikle sürekli yükler altında gösterdiği krip (sünme) deformasyonları önemli bir özelliğidir. Eugene Freyssinet, krip'in yani sünmenin sebebini, sürekli basınçların jeldeki katı yüzlerle jel suyu arasında etkiyen

kuvvetlerin dengesini bozması olarak açıklamıştır. Bu durum, jel suyunun bir kısmının yeni denge oluşuncaya kadar kapiler boşluklara kaçmasına ve burada da buharlaşmasına sebep olur [5].

- **Rötre ve şişme**

Basınç altında krip deformasyonları yapan çimento hamuru, sıcaklık ve nem değişimleri nedeniyle de büzülür veya şişer. Kuru havada saklanınca büzülen ve rötre yapan çimento hamuru, suya konursa şişer ve genişler. Arka arkaya ıslanma ve kuruma işlemleri tekrarlanırsa çimento hamuru sonsuza dek şişmeye ve büzülmeye devam eder. Bu özellikleriyle birlikte hidratasyona devam etmesi, çimento hamurunu canlı bir dokuya benzetir [5].

Rötre, şişme olaylarını açıklamak için iki önemli teori ortaya atılmıştır. Her iki teori de bu olayı çimento hamurunda mevcut olan sıvı fazdaki basınç değişimleri ve buna bağlı olarak iç kuvvetlerin etkisi ile açıklamıştır [5].

Birinci teori Robert L'Hermite kapiler teorisidir. Buna göre çimento hamurunun boşlukları içindeki sıvı fazlı kapiler kuvvetlerin rötreye sebep olduğunu savunmaktadır. İkincisi ise Powers'ın jel teorisidir. Powers'a göre sertleşmiş çimento hamurundaki iç yüzler nem absorbe ederler. Su molekülleri ve iç yüzler arasında bir çekme kuvveti vardır ve moleküller kendilerine açık tüm jel yüzlere yayılır, karşı bir yüzey nedeniyle yayılması önlenmişse karşı yüzler arasında birbirini itecek bir basınç oluşur ve hamur şişer. Bunun tam tersi yani buharlaşma yolu ile su alınması gerçekleşirse, jel yüzlerini iten kuvvet azalır, Van der Waals kuvvetleri jel taneciklerini birbirine yaklaştırır ve rötre olur [5].

Rötre ve şişme; sıcaklık, nem ve zaman gibi kür şartlarına, ikinci olarak örnek boyut ve şekli gibi deney şartlarına ve üçüncü olarak da çimento cinsi, agrega cinsi, katkıları, karışım oranları, su miktarı gibi bileşim şartlarına bağlıdır [5].

- **Geçirimlilik**

Sertleşmiş çimento hamuru içinde su ve nem akışına yarayan iki tip boşluk vardır. Jel boşlukları ve kapiler boşluklar. Çok küçük çaplı olan jel boşlukları çok büyük emilme bağları ile yüzlere bağlanır ve akımda rol oynamaz. Kapiler boşlukların

Çapları küçükten be değişir, miktar ve şekilleri karışımın su-imento oranı, hidratasyon derecesi ve imento cinsine bağlı olarak değişmektedir [5].

Kapiler boşluklar geçirimliliği sağlar. Geçirimlilik boşluk miktarı ile doğru orantılı bir özellik değildir. Boşlukların dağılımı ve sürekliliği geçirimlilik üzerinde etkilidir. Geçirimlilik doğrudan deney yoluyla saptanabilecek bir özelliktir [5].

Geçirimlilik imento özellikleri, agrega granülometrisi gibi malzeme özelliklerine, imento dozajı, yoğurma suyu miktarı, su-imento oranı, katkı maddeleri gibi karışım özelliklerine, karma ve işlem metotları ile nem ve sıcaklık şartlarına bağlı olarak değişir [5].

- **Donmaya dayanıklılık**

Sertleşmiş imento hamurunun donma ve çözülme tekrarlarına yani atmosferik etkilere dayanımı boşluklarındaki sulara bağlıdır. Jel boşluklarındaki su katı yüzlerin çekimi altındadır ve sıfır derece altındaki sıcaklıklarda donmaz ve zararı yoktur. Ancak kapiler boşluklardaki su donmaya başladığında jel boşluklardaki suyu da eker ve hacmini genişletir bu da bir buz basıncına neden olur, ayrıca bu boşluklarda suyun akımı yavaş olacağı için oluşan yüksek basınç gerilimi değerini uzun süre korur. Bu da birkaç kez tekrarlanınca harabiyete neden olur [5].

Su- imento oranının değeri hamur içindeki kapiler boşlukları ifade eder ve hamurun donmaya dayanıklılığı su-imento oranı ile hamur içine sürüklenmiş hava miktarına bağlıdır. Hamur içine sürüklenmiş küçük hava boşlukları malzemeyi hem elastiki yapar, hem de kapiler boşlukları kesip hidrostatik buz basınçlarının yayılmasını engeller. Bu tip malzemeler iklim şartlarının gerektirdiği yerlerde kullanılmaktadır [5].

Harç ve betonların dayanıklılığı imento hamuru ve agreganın dayanıklılığına bağlıdır. Dayanıklı beton için dayanıklı imento hamuru, yani düşük su-imento oranı, hava sürükleyen katkı ile sağlam, boşluksuz ve dayanıklı agrega seçmek gerekir [5].

- **Kimyasal etkilere dayanıklılık**

Çimentoların kimyasal etkilere dayanıklılığını ölçmek zordur ve uzun süreli deneylerle incelenir. Daha çabuk ve genel bilgi edinmek için bileşimine bakılır. Genel olarak kireci az olan (yüksek fırın) veya puzolan ilave edilmiş (traslı) çimentolar CO₂ içeren sulara dayanıklıdır. C₃A bileşeni az, puzolan ilave edilmiş, alüminli ve süpersülfatlı çimentolar sülfatlara karşı dayanıklıdır [5].

Uzun süreli deneylerde eriyiklere Na₂SO₄, MgSO₄ çözeltilerine konan harç örnekleri gözlenir. Mukavemetleri, boyları ölçülür. Sülfatın etkileri önemlidir. Şişme, dökülme, mukavemette azalma ve önemli uzamalara sebep olur [5].

Genel olarak çimentoya karşı bazların zararsız, asitlerin zararlı etkileri olduğu bilinmektedir. Portland çimentosunun hamur, harç ve betonların CO₂ ile reaksiyonları önemlidir. Bu reaksiyon mukavemet ve sertliği artırır, çatlakları kendiliğinden onarır ve geçirimsizliği artırır. Ayrıca betonun yavaş ve geri dönmeyen büzülmesi ve ağırlık artmaları da bununla açıklanır. Kullanım sırasında bu durumlarla karşılaşmamak isteniyorsa, beton ürünler yapay bir karbonatasyona tabi tutulmalıdır [5].

3. DENEY YÖNTEMLERİ ve ÇİMENTO ÖZELLİK TAYİNLERİ

3.1 Çimento Özgöl Yüzey Tayini

3.1.1 Cihazlar

TS24'e göre özgöl yüzey 1 gr çimentonun içindeki tanelerin cm^2 olarak yüzeyleri toplamıdır. Özgöl yüzey tayini deneyini uygulamak için laboratuarda bulunan Blaine aleti kullanılmıştır [7].



Şekil 3.1 Blaine Aleti

Şekil 3.1 de resmi bulunan Blaine aleti, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çalışır ve cihaz, numune hücresi, delikli disk, piston ile manometreden oluşur. Korozyona dayanıklı bir metal veya camdan yapılmış olması gereken numune hücresi altında bulunan yuva ile manometreye takılır [9].

Delikli disk ve piston hücre içine yerleştirilen parçalardır. Delikli disk korozyona dayanıklı bir metalden yapılmıştır, 1mm çapında 30-40 deliği bulunur ve hücre içine etrafında boşluk kalmadan rahatça sığabilmektedir. Piston hücre içine çok rahat girebilecek bir çapta değildir. Üzerinde hücreye oturacak düzgün bir başlığı olan pistonun kenarında hücreye girerken havanın boşalmasını sağlamak için bir yarık bulunmaktadır. Manometre ise bir U borusundan oluşur, bir kolu üzerindeki başlığa hücre yerleşir ve Blaine aletinin tahta gövdesine sıkıca tutturulmuştur [9].

Özgül yüzey tayini deneyinde kullanılan diğer cihazlar süzgeç kağıdı, kronometre ve manometre sıvısıdır. Manometre sıvısı dibütil ftalat'tır. Bu sıvı uçucu olmayan, bozulmayan, su çekmeyen, vizkozitesi düşük bir sıvıdır [9].

3.1.2 Blaine Aletinin Kalibrasyonu

Blaine aleti örnekler üzerinde kullanılmadan önce inceliği bilinen bir örnek ile kalibre edilir. Kalibrasyondan sonra alet için bir K sabiti tayin edilir. Bunun için öncelikle örneğin hacmi tayin edilmelidir. Hacmin tayini için hücreye delikli disk ve iki adet filtre kağıdı düzgünce yerleştirilir, hiçbir hava kabarcığı kalmayacak şekilde hücreye cıva doldurulur [9].

Cıvanın fazlası cam bir lamel ile atılır ve hücrede kalan cıva darası alınmış bir kaba boşaltılıp, 0,0001 gr hassasiyetli bir terazide tartılır. (m_1) Aynı işlem özgül yüzeyi belli olan bir çimento örneği ile yapılır. İki filtre kağıdı arasına yerleştirilen 2,80 gr örnekten boş kalan hücre kısmına cıva doldurulur. Fazlası atılıp hücre içinde kalan cıva darası belli bir kaba alınıp, tartılır (m_2) [9].

Örneğin hacmi şu şekilde hesaplanır;

$$V = \frac{m_1 - m_2}{D} \quad (3.1)$$

V = örnek hacmi

m_1 = çimento yokken tartılan cıva kütlesi (gr)

m_2 = çimento varken tartılan cıva kütlesi (gr)

D = cıvanın deney sıcaklığındaki yoğunluğu (gr/cm^3)

Bu işlem bir kez daha gerçekleştirilir. İki deneyin ortalaması alınır. Bu iki deney arasındaki fark $0,01 \text{ cm}^3$ 'ten büyük olmamalıdır. Fark bu değerden büyük olduğunda yeni örneklerle yeni ölçümler yapılmalıdır [9].

Daha sonra ayar örneği kütlesi belirlenir. Ayar kütlesi şu bağıntıyla belirlenir:

$$m = d \times V \times (1 - e) \quad (3.2)$$

m = alınacak örnek kütlesi (gr)

d = örneğin yoğunluğu (gr/cm^3)

V = belirlenen örnek hacmi (cm^3)

e = gözeneklilik (0,5)

Kütlesi belirlenen örnek tartılır. Hücrenin dibine disk yerleştirilir, üzerine düzgün bir şekilde süzgeç kağıdı yerleştirildikten sonra tartılan örnek huni ile hücreye boşaltılır. Örnek hafifçe masaya vurularak yerleştirilir ve pistonla düzeltilir, üzerine bir tane daha süzgeç kağıdı konulur. Piston hücreye, piston başı hücrenin üst kısmına gelecek şekilde yerleştirilir. Sonra piston yavaşça hücreden çıkarılır [9].

Örnek de yerleştirildikten sonra deneye başlanır. Bu aşamada manometredeki sıvı seviyesi U borusunun en alt çizgisinde olmalıdır. Hücre dışına vazelin sürüldükten sonra deneye başlanır. Hücre ağzı son elin başparmağıyla kapatılır ve manometredeki hava borudaki sıvı en üst seviyeye gelene kadar lastik bir pompa ile emilir. Bu çizgiye geldiğinde musluk kapatılır ve sıvı bu seviyede tutulur. Musluk açılarak sıvının akışı sağlanır [9].

Sıvı seviyesi ikinci çizgiye geldiğinde kronometre çalıştırılır ve üçüncü çizgiye geldiğinde durdurulur. Belirlenen oda sıcaklığında bu akış süresi (t) tayin edilir. İki yeni ayar numunesi ile akış süreleri tekrar belirlenir ve üç deneyin aritmetik ortalaması alınır [9].

Akış süresi de belirlendikten sonra aletin K sabiti şu bağıntıyla belirlenir:

$$K = \frac{S \times d \times (1 - e) \times \sqrt{\eta}}{\sqrt{e^3} \times \sqrt{t}} \quad (3.3)$$

K = alet sabiti

S = ayar numunesi özgül yüzeyi (cm²/gr)

d = ayar numunesi yoğunluğu (gr/cm³)

e = gözeneklilik (0,5)

η = deney sıcaklığında hava vizkozitesi (poise)

t = ölçülen akış süresi (sn)

Kalibrasyon manometre sıvısı azaldığı, süzgeç kağıdı tipi ve cinsi değiştiği durumlarda tekrarlanmalıdır [9].

3.1.3 Deneyin Yapılışı

Deneyde kullanılacak çimento miktarı, gözenekliliği ayar örneği ile aynı olacak şekilde “Ayar Örneği Miktarı” hesabında belirtildiği gibi hesaplanır. Oda sıcaklığı belirlenir ve hücreye yerleştirilen örneğin akış süresi ölçümü yapılır [9].



Şekil 3.2 Çimentonun Özgül Yüzey Değerinin Ölçümü

3.1.4 Hesaplama

Özgöl yüzey şu bağıntı ile hesaplanır ve tam sayıya yuvarlanır;

$$S = K \times \frac{\sqrt{e^3} \times \sqrt{t}}{d \times (1 - e) \times \sqrt{\eta}} \quad (3.4)$$

S = çimento örneğinin özgül yüzeyi (cm²/gr)

K = alet sabiti

e = gözeneklilik (0,5)

t = ölçülen akış süresi (sn)

d = çimento örneğinin yoğunluğu (gr/cm³)

η = deney sıcaklığında hava vizkozitesi, (poise)

Bu ölçüm aynı çimentodan alınan yeni bir örnekle bir kez daha tekrarlanır. Ortalamaları deney sonucu olarak alınır. Aradaki fark %2'den büyük olursa yeni örneklerle deney tekrarlanmalıdır [9].

3.1.5 Deney Sonuçları

Numune hacmi tayini;

$$V = \frac{m_1 - m_2}{D}$$

Bu bağıntıda D, belirli hava sıcaklığındaki cıvanın yoğunluğudur. Blaine aletinde ilk olarak hücreye delikli disk ve süzgeç kağıdı yerleştirilir. Hücre bundan sonra tamamen cıva ile doldurulur, fazlası bir spatula ile alınır ve cıva darası belli bir kaba alınıp tartılır. (m₁)

Kabın darası: 18,05433 gr

m₁ = 84,72963 gr

İkinci işlemde hücrede iki süzgeç kağıdı arasına çimento konur ve bunların üzeri tamamen cıva ile doldurulur. Cıva yine darası belli bir kaba alınıp tartılır. (m_2)

$$m_2 = 60,01302 \text{ gr}$$

$$V_1 = \frac{84,7296 - 60,0130}{13,55}$$

$$V_1 = 1,824 \text{ cm}^3$$

Aynı işlem yeni bir ayar örneği ile tekrar edilir.

$$m_1 = 84,69576 \text{ gr}$$

$$m_2 = 60,12305 \text{ gr}$$

$$V_2 = \frac{84,6957 - 60,1230}{13,55}$$

$$V_2 = 1,814 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{ortalama}} = 1,819 \text{ cm}^3$$

Hacim tayininden sonra ayar örneği kütlesi belirlenir;

$$m = d \times V \times (1-e)$$

$$m = 3,15 \times 1,819 \times (1-0,5)$$

$$m = 2,86 \text{ gr}$$

Bu değer ortalama olarak 2,80 gr alınır.

Bu işlemden sonra ayar örneği belirtilen şekilde hücreye yerleştirilir ve akış süresi belirlenir. Aynı işlem iki kez daha farklı ayar örnekleri ile tekrarlanıp üç değer in ortalaması akış süresi olarak alınır.

$$\text{Oda sıcaklığı} = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 49''$$

$$t_2 = 50''$$

$$t_3 = 52''$$

$$t_{ortalama} = 51''$$

Bu işlemden sonra aletin K sabiti belirlenir;

$$K = \frac{S \times d \times (1 - e) \times \sqrt{\eta}}{\sqrt{e^3} \times \sqrt{t}}$$

$$K = 31,60$$

Farklı numuneler için yapılan ölçümler şöyledir;

I. numune; PKÇ/B 32,5 R (Üretim tarihi; Şubat 2002)

Oda sıcaklığı: 19,5°C

$$t_1 = 71''$$

$$t_2 = 72''$$

$$t_3 = 70''$$

$$t_{ortalama} = 71''$$

$$S = 31,60 \times \frac{\sqrt{(0,5)^3} \times \sqrt{71}}{2,97 \times 0,5 \times \sqrt{0,0001808}}$$

$$S = 4736 \text{ (Blaine, cm}^2\text{/gr)}$$

II. numune; PKÇ/A 42,5R (Üretim tarihi; Eylül 2002)

Oda sıcaklığı: 19,5°C

$$t_1 = 73''$$

$$t_2 = 74''$$

$$t_3 = 71''$$

$$t_{ortalama} = 72''$$

$$S = 31,60 \times \frac{\sqrt{(0,5)^3} \times \sqrt{72}}{3,01 \times 0,5 \times \sqrt{0,0001808}}$$

$$S = 4700 \text{ (Blaine, cm}^2/\text{gr)}$$

III. numune, PÇ 42,5 (Üretim tarihi; Eylül 2002)

Oda sıcaklığı: 19,5°C

$$t_1 = 59''$$

$$t_2 = 60''$$

$$t_3 = 60''$$

$$t_{\text{ortalama}} = 60''$$

$$S = 31,60 \times \frac{\sqrt{(0,5)^3} \times \sqrt{60}}{3,15 \times 0,5 \times \sqrt{0,0001808}}$$

$$S = 4087 \text{ (Blaine, cm}^2/\text{gr)}$$

IV. numune; PZÇ/B 32,5R (Üretim tarihi; Ekim 2003)

Oda sıcaklığı: 20°C

$$t_1 = 74''$$

$$t_2 = 79''$$

$$t_3 = 73''$$

$$t_{\text{ortalama}} = 75''$$

$$S = 31,60 \times \frac{\sqrt{(0,5)^3} \times \sqrt{75}}{2,92 \times 0,5 \times \sqrt{0,0001808}}$$

$$S = 4844 \text{ (Blaine, cm}^2/\text{gr)}$$

3.2 Çimento Tane Büyüklüğü Tayini

3.2.1 Cihazlar

Tane büyüklüğü tayini deneyi için TS24'te belirtilen ve laboratuarda kullanılan 90 ve 212 μm göz açıklıklı elekler ve elek sarsma makinesi kullanılır.

3.2.2 Deneyin Yapılışı

Deney laboratuarda kullanılan 90 ve 200 μm göz açıklıklı eleklerle el ile elenerek veya elek sarsma makinesi kullanarak gerçekleştirilir [9].

Deneyin el ile elenerek gerçekleştirilmesi şu şekilde olur;

105°C $\pm$ 5°C'lik etüvde kurutulmuş çimentodan 100 gr 0,1 hassasiyetli bir terazide tartılır. Bu örnek altında toplama tavası bulunan 90 μm göz açıklıklı eleğe konur ve üstü kapatılır. Çimentoda topraklar varsa bunlar eleğe konmadan önce ufalanmalıdır. Elek 25 dakika boyunca dakikada yaklaşık 125 hareket yaparak elenir. Elek her 25 harekette yatay olarak 90° döndürülür ve sert bir yere 5 kez vurulur. 10 dakikada bir eleğin deliklerinin tıkanmasını önlemek için eleğin altı ince bir kıl fırça ile toplama tavasına fırçalanır. 25 dakika sonunda eleğin üstünde kalan çimento tartılır. Tekrar eleğe konup 5 dakika daha elenir. Tekrar tartım yapılır ve aradaki fark 0,1 gr'dan az oluncaya kadar elemeye devam edilir. 90 μm göz açıklığı eleğin üzerinde kalan çimento tartılır (m_1) [9].

90 μm elek üstü kalıntısı 200 μm göz açıklıklı eleğe konur. Elek toplama tavası ve kapak kapatılır. 5 dakika elenir. Elek üstü kalıntısı tartılır ve 1 dakika daha tekrar elenir. Tartımlar arasındaki fark 0,05 gr'dan az oluncaya kadar bu işleme devam edilir. Elek üstü kalıntısı tartılır (m_2) [9].

Elek sarsma makinesi ile yapılan deney ise şu şekilde gerçekleşir;

105°C $\pm$ 5°C'lik etüvde kurutulmuş çimentodan 100 gr 0,1 hassasiyetli bir terazide tartılır. 200 μm göz açıklığına sahip elek üste 90 μm göz açıklığına sahip elek alta ve toplama tavası en alta konmak üzere elekler sıralanır, kapak kapatılır ve elek sarsma makinesine konur. Şekil 3.3 de resmi bulunan cihaz elek sarsma makinesidir [9].



Şekil 3.3 Elek Sarsma Makinesi

15 dakika elenir. 200 μm elek üstü kalıntısı tartılır. (m_2) 90 μm elek üstü kalıntısı alınır, darası belli bir kapta tartılır. Tekrar eleğe konup 5 dakika daha el ile elenir, tekrar tartılır. Aradaki fark 0,1 gr'dan az oluncaya kadar işleme devam edilir. 90 μm elek üstü kalıntısı tartılır. (m) 90 μm elek üstü toplam kalıntısı ($m_1 = m + m_2$)'dir [9].

3.2.3 Hesaplama ve Değerlendirme

m_1 ve m_2 kalıntıları sırasıyla 90 μm ve 200 μm göz açıklıklı elekler üstünde kalan yüzdeleri verirler [9].

Deney, sonuçlar 90 μm elek açıklığı olan elek için %1'den ve 200 μm göz açıklığına sahip elekte %0.3'den farklı olmayacak şekilde tekrarlanır ve ortalamaları alınır. İki elek için de bu değerleri aşarsa deney tekrarlanmalıdır [9].

3.2.4 Deney Sonuçları

İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Malzeme Laboratuvarı'nın elek imkanları standartta belirtilenden daha fazladır ve bu nedenle deney 200 μm , 125 μm , 63 μm ve 32 μm 'lik eleklerle gerçekleştirilmiştir.

Buna göre deney sonuçları şöyledir;

Tablo 3.1 I. numune; PKÇ/B 32,5 R (Üretim tarihi; Şubat 2002)

Elek Açıklığı	Elek Üstü	Elekten Geçen	Elekten Geçen %
250 μm	0,0 gr	99,7 gr	100
200 μm	0,2 gr	99,5 gr	99,8
125 μm	11,7 gr	87,8 gr	88,1
63 μm	69,2 gr	18,6 gr	18,7
32 μm	17,0 gr	1,6 gr	1,6
Toplama kabı	1,6 gr		

Tablo 3.2 II. numune; PKÇ/A 42,5R (Üretim tarihi; Eylül 2002)

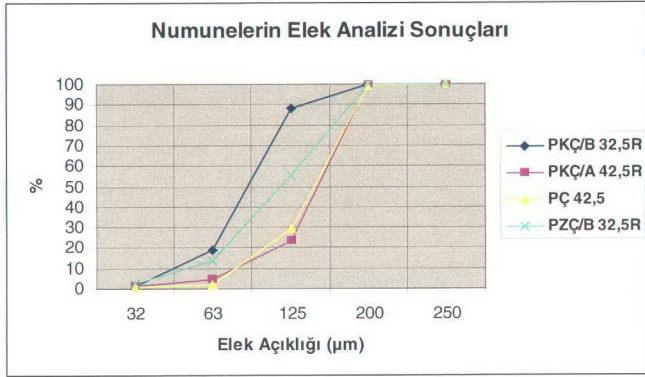
Elek Açıklığı	Elek Üstü	Elekten Geçen	Elekten Geçen %
250 μm	0,0 gr	99,8 gr	100
200 μm	0,0 gr	99,8 gr	100
125 μm	76,0 gr	23,8 gr	23,8
63 μm	19,4 gr	4,4 gr	4,4
32 μm	2,8 gr	1,6 gr	1,6
Toplama kabı	1,6 gr		

Tablo 3.3 III. numune; PÇ 42.5 (Üretim tarihi; Eylül 2002)

Elek Açıklığı	Elek Üstü	Elekten Geçen	Elekten Geçen %
250 µm	0,0 gr	100 gr	100
200 µm	0,4 gr	99,6 gr	99,6
125 µm	70,2 gr	29,4 gr	29,4
63 µm	27,4 gr	2,0 gr	2,0
32 µm	1,6 gr	0,4 gr	0,4
Toplama kabı	0,4 gr		

Tablo 3.4 IV. numune; PZÇ/B 32.5R (Üretim tarihi; Ekim 2003)

Elek Açıklığı	Elek Üstü	Elekten Geçen	Elekten Geçen %
250 µm	0,0 gr	99 gr	100
200 µm	0,0 gr	99 gr	100
125 µm	43,9 gr	55,1 gr	55,6
63 µm	41,2 gr	13,9 gr	14,0
32 µm	11,3 gr	2,6 gr	2,6
Toplama kabı	2,6 gr		



Şekil 3.4 Çimento Numunelerinin Elek Analizi Grafiği

3.3 Çimentonun Priz Süresi Tayini

3.3.1 Normal Kıvam Tayini

TS 24'e göre normal kıvam, Şekil 3.5'de resmi bulunan vicat aleti sondasının serbest bırakıldığı andan itibaren yarım dakika içinde çimento hamuru içinde cam levhaya 5 mm–7 mm uzaklık kalıncaya kadar batabilmesini sağlayan kıvamdır. Bu deney $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve %50-%60 nisbi neme sahip bir odada yapılmalıdır. Deneyde laboratuarda kullanılan vicat aleti, silindir şeklindeki vicat sondası ve vicat halkası kullanılır [9].

Deney şu şekilde gerçekleştirilir;

0,1 hassasiyetli bir terazide tartılan 300 gr çimento tercihen metal bir kaba (küre kesmesi şeklinde 25–30 cm çapında ve 8–10 cm derinliğinde) konur. Kaptaki çimentonun ortasına çimento kütlesinin %25–%30'u kadar içilebilir musluk suyu eklenir ve kap iç yüzeyine uygun profilde bir kaşıkla karıştırılır. Çimento ile su karıştırıldığı andan itibaren 3 dakika boyunca yoğurmaya devam edilir. Bu sürenin sonunda 1 dakika içinde hamur vicat halkasına yerleştirilir. Silindir şeklindeki sonda levhanın üzerinde durduğunda alet göstergesi sıfıra getirilir. Halkanın altında 12×12 cm'lik cam, pleksiglas veya metal levha bulunmalıdır ve halka ile levha yağlanmış olmalıdır. Halkanın içine konan hamurun yüzeyi spatula ile düzeltilir [9].

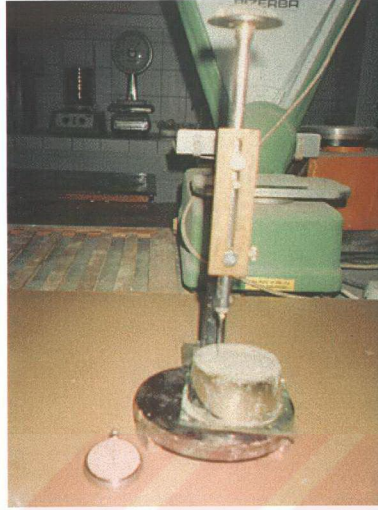


Şekil 3.5 Vicat Sondası ve Vicat Aleti

Sonda hamurun üst yüzeyine dokunacak şekilde indirilir ve serbestçe bırakılır, kendi ağırlığı ile hamurun içine girer. Hamur için kullanılan su yeterli ise sonda 30 saniye içinde levhaya 5–7 mm kalıncaya kadar iner. Suyun yeterli olmadığı durumlarda uygun kıvam bulununcaya kadar deney tekrarlanmalıdır [9].

3.3.2 Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri Tayini

TS 24'e göre priz başlama süresi çimento ile suyun karıştırılmaya başladığı andan itibaren vicat iğnesinin cam levhaya 3 mm–5 mm uzaklık kalıncaya kadar inmesine sebep olan kıvama ulaşması için geçen zaman, priz bitme süresi ise, yine çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren vicat iğnesinin hamura 1 mm'den fazla giremeyeceği kıvama ulaştığı ana kadar geçen süredir [9].



Şekil 3.6 Vicat İğnesi ve Vicat Aleti

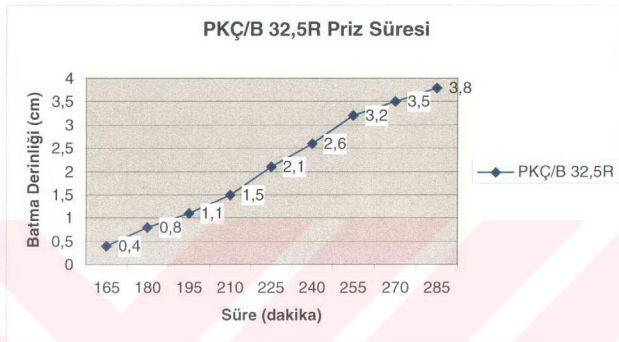
Priz başlama ve sona erme süreleri tayini deneyi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %50-%60 nisbi nemi olan laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmelidir. Deney sırasında vicat halkası sarsılmamalıdır. Deney için vicat aletine vicat iğnesi takılır. Aletin üst tablasına 27,5 gr'lık ağırlık konur ve alet göstergesi iğne levhaya indiğinde sıfırı gösterecek şekilde ayarlanır. Normal kıvam tayini deneyinde belirtilen şekilde hazırlanan normal kıvamlı hamur halkaya yerleştirilip iğne hamur yüzeyine gelene kadar indirilir, yan taraftaki vida ile sıkıştırılır. Sonra vida gevşetilip iğnenin hamurun içine girmesi sağlanır.

Priz başlangıç süresinin tespiti için iğne her 5 dakikada bir hamura batırılır, ancak iğne bir kez girdiği yere bir daha batırılmamalıdır. İğne her batıştan sonra bir bez ile silinmelidir. İğne cam levhaya 3 mm–5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamış sayılır. Çimento ile suyun karıştığı andan itibaren geçen süre priz başlama süresini verir. Priz sona erme süresini tespit için priz başladığı andan itibaren her 15 dakikada bir iğne tekrar batırılır. İğnenin hamura en çok 1 mm girebildiği kıvam oluşuncaya kadar batırmaya devam edilir. Bu süre priz bitiş süresidir [9].

3.3.3 Deney Sonuçları

I. numune; PKÇ/B 32,5R (Üretim tarihi; Şubat 2002)

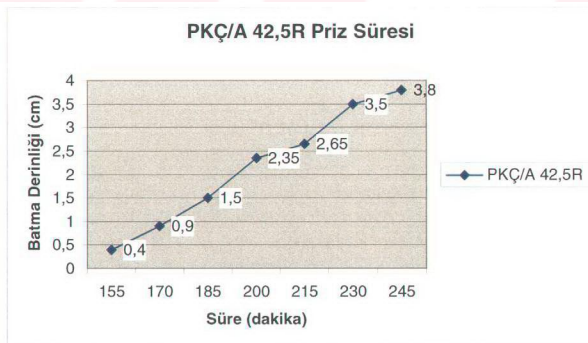
Numunenin normal kıvamı 300 gr çimento ve 105 gr su ile sağlanmıştır. Deney sırasında nem oranı %73, sıcaklık 23°C'dir.



Şekil 3.7 PKÇ/B 32,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu

II. numune; PKÇ/A 42,5R (Üretim tarihi; Eylül 2002)

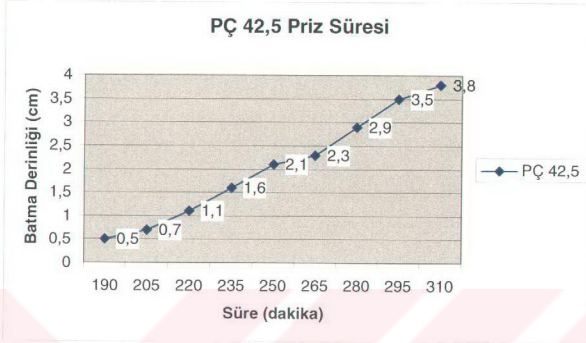
Numunenin normal kıvamı 300 gr çimento ve 112 gr su ile sağlanmıştır. Deney sırasında nem oranı %71, sıcaklık 20°C'dir.



Şekil 3.8 PKÇ/A 42,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu

III. numune; PÇ 42,5R (Üretim tarihi; Eylül 2002)

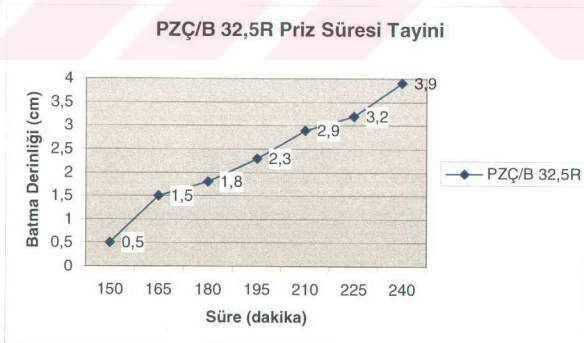
Numunenin normal kıvamı 300 gr çimento ve 93 gr su ile sağlanmıştır. Deney sırasında nem oranı %65, sıcaklık 22.5°C'dir.



Şekil 3.9 PÇ 42,5 Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu

IV. numune; PZÇ/B 32,5R (Üretim tarihi; Ekim 2003)

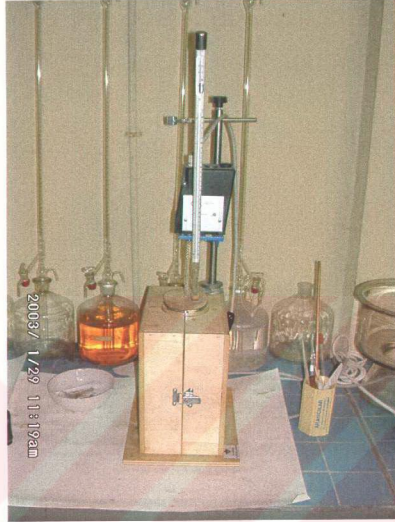
Numunenin normal kıvamı 300 gr çimento ve 102 gr su ile sağlanmıştır. Deney sırasında nem oranı %45, sıcaklık 19°C'dir.



Şekil 3.10 PZÇ/B 32,5R Priz Süresi Tayini Deneyi Sonucu

3.4 Çimento Hidratasyon Isısı Tayini

3.4.1 Cihazlar



Şekil 3.11 Klorimetre Kabı

Çimentonun hidratasyon ısısını ölçmek için laboratuarda bulunan hidratasyon ısısı cihazı, 800 μm ve 150 μm göz açıklığında elekler, kronometre ve tartı kabı kullanılır. Hidratasyon ısısı cihazı kalorimetre kabı, Beckman termometresi, motor ve karıştırıcı ile huniden oluşur. Kalorimetre kabı yalıtılmış bir kabın içine mantar destekler üstüne yerleştirilmiş cam bir termostur. Üstüne yerleştirilen mantar kapakta Beckman termometresi, huni ve karıştırıcı için delikler bulunur [10].

Beckman termometresi istenilen 6°C'lik ısı aralığında ölçüm yapabilecek şekilde ayarlanan bir termometredir. Deneyden önce oda sıcaklığında 0°C-1°C olacak şekilde ayarlanır. Hidratasyon ısısı kabı ayrıca sabit hızda dönen bir karıştırıcı ile örnekleri kaba dökmek için kullanılan huniden oluşur [10].

3.4.2 Reaktifler

Deneyde çinko oksit, nitrik asit, derişik hidroflorik asit ($d=1,15$, %40) ve saf parafin reaktif olarak kullanılır. Deneyde kullanılan çinko oksit ilk önce 900°C – 950°C sıcaklıktaki fırında bir saat kızdırılıp soğuduktan sonra havanda ezilip toz haline getirilir. $150\text{ }\mu\text{m}$ göz açıklıklı elekten elenir. Desikatörde saklanan çinko oksit deney yapılacağı zaman yine 900°C – 950°C sıcaklıktaki fırında kızdırılıp , desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulur. $0,0001\text{ gr}$ hassasiyetli terazide 7 gr tartılır ve kalorimetre kabına dökülür [10].

Deneyde kullanılan derişik nitrik asitten 127 ml alınır. ($d=1,42$, %70) damıtık su ile bir litreye tamamlanır. Birkaç litre hazırlanan bu çözelti ayarı belli bir bazik çözelti ile titre edilerek tam 2N 'e ayarlanmalıdır [10].

3.4.3 Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi

İlk olarak kalorimetre kabının ısı kapasitesi ölçülür. Belli miktarda çinko oksit ile asit çözeltisi kalorimetre kabında reaksiyona sokulur ve açığa çıkan ısının kalorimetre kabında oluşturduğu sıcaklık artışı ölçülür. Deney yapılırken ilk önce kalorimetre kabı asite dayanıklı hale gelmesi için parafinle kaplanır. Kabin içine oda sıcaklığının 4°C – 5°C altına kadar soğutulmuş 400 gr 2N nitrik asit ile 8 ml derişik hidroflorik asit konur ve tartılır. 425 gr oluncaya kadar 2N nitrik asit eklenir ve bu karışım 30 dakika bekletilir. Karıştırıcı mantara, termometreye ve kalorimetre kabına değmemesine dikkat edilerek çalıştırılır. Huni ve termometre yerine yerleştirilir. Huninin kapakla mesafesi 6 cm ve çözeltiyle mesafesi 1 cm olmalıdır. Beckman termometresi ise alt ucu sıvı yüzeyinden 3 cm aşağıda olacak şekilde yerleştirilmeli ve bu konumunu deney süresince korumalıdır [10].

Asit karışımı 20 dakika boyunca karıştırılır ve 1 dakika ara ile sıcaklık ölçümü yapılır. 20 dakika sonundaki son ölçüm (θ_0) kaydedilir. Reaktifler kısmında belirtilen şekilde hazırlanan çinko oksit de huniden akıtılır. Bu işlem iki dakikayı aşmamalıdır. Çinko oksitin hunide kalan kısmı bir fırça ile karışıma atılır [10].

Kalorimetre kabındaki sıcaklık yükseliş her 1 dakikada ölçülerek 20 dakika devam edilir. 20 . dakikadaki değer (θ_{20}) kaydedilir. Isı kaçışını ölçmek için 20 dakika daha ölçüm yapılır. 40 . dakikadaki son okuma (θ_{40}) kaydedilir, okumaya son verilir [10].

Kalorimetre kabının ısı kapasitesi şu şekilde hesaplanır;

İlk önce kaptaki sıcaklık yükselişi hesaplanır;

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 \quad (3.5)$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) \quad (3.6)$$

R_0 = gözlenen sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

θ_0 = örnek kalorimetre kabına konulduğu andaki sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{20} = örnek konduktan sonra 20. dakikada okunan sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{40} = örnek konduktan sonra 40. dakikada okunan sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

R = düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

Kalorimetre kabının ısı kapasitesi ise şu bağıntı ile hesaplanır;

$$C = W \left[\frac{256.1 + 0.1(30 - t) + 0.12(T - t)}{R} \right] \quad (3.7)$$

C = kalorimetre kabının ısı kapasitesi, (cal/gr)

W = çinko oksit kütlesi, (gr)

t = kalorimetre kabının son sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)

(Bu sıcaklık Beckman termometresinin sıfırına karşı gelen sıcaklığa θ_{20} eklenerek elde edilir.)

T = çinko oksitin kalorimetre kabına konulurken sıcaklığı (oda sıcaklığı), ($^{\circ}\text{C}$)

R = düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

Not: Çinko oksitin 30°C’da asitte çözünme ısısı 256,1 cal/gr’dır. Bu değer 30°C sıcaklıktan daha aşağı sıcaklıklarda her bir derece santigrat için 0,1 cal daha fazladır. Çinko oksitin ısınma ısısı 0,12 cal/gr’dır [10].

3.4.4 Kuru Çimentonun Çözünme Isısının Tayini

Desikatörde bekletilen çimento örneğinden 0.0001 gr hassasiyetli terazide 3 gr tartılır. Aynı miktarda bir örnek de kızdırma kaybı tayini için platin kroze içine tartılır [10].

Kalorimetre kabının ısı kapasitesi tayini deneyinde olduğu gibi bir uygulama yapılır ve kabın sıcaklık artışı ölçülür. Kaybedilen değerlerle düzeltilmiş sıcaklık yükselişi (R) hesaplanır [10].

Kuru çimentonun çözünme ısısı şu bağıntıyla hesaplanır;

$$H_1 = \frac{R \times C}{W_k} - 0,2 (T-t) \quad (3.8)$$

Bağıntıdaki 0,20 katsayısı, cal/gr°C cinsinden anhidr çimentonun yaklaşık özgül ısısını ifade eder.

H_1 = kuru çimentonun asitte çözünme ısısı, (cal/gr)

R = düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, (°C)

C = kalorimetre kabının ısı kapasitesi (cal/gr)

T = örnek kalorimetre kabına konulduğu andaki oda sıcaklığı, (°C)

t = kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)

W_k = kızdırma kaybı, (gr)

Bağıntıdaki “ W_k ” yani kızdırılmış örnek kütlesi ise şu şekilde hesaplanır;

Platin kroze tartılmış örnek önce 900°C – 950°C sıcaklıktaki bir fırın içinde en az 1,5 saat tutulup, desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulur ve tartılır [10].

$$W_k = \frac{A}{B} W \quad (3.9)$$

W_k = kızdırma kaybı, (gr)

A = kızdırılmadan sonraki kütlesi, (gr)

B = kızdırılmadan evvelki örnek kütlesi, (gr)

W = kalorimetre kabına konulmuş olan örnek kütlesi, (gr)

3.4.5 Hidrate Olmuş Çimentonun Asitte Çözünme Isısının Tayini

Sıcaklığı deney odasında $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'a getirilmiş 150 gr çimento hazırlanır ve 60 ml damıtık su ile bir kap içinde 5 dakika karıştırılır. Elde edilen çimento hamuru 50 ml hacminde dört plastik şişeye eşit parçalar halinde doldurulur. Tıpa ile şişe ağzları kapatılır, hamur ile tıpa mesafesi 1 cm kalmalıdır. Şişe ağzı nem kaçmasını engellemek için parafine batırılır [10].

Şişelerdeki örnekler $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir odada dik olarak istenen süre, genelde 7 ve 28 gün, bekletilir. Bu sürelerin sonunda şişe içindeki kısmen hidrate çimento alınır. 20 dakika içinde örnek alınır ve 800 μm göz açıklığında elekten geçecek şekilde elenir, hemen tartı kabına alınıp kapağı kapatılır. Nem kaybetmemesi ve CO_2 almaması gerekir [10].

Örnekten $4,18 \pm 0,05$ gr tartılır, biri kalorimetre kabı, biri de kızdırma kaybı tayini için. Kuru çimentonun çözünme ısısının tayini deneyindeki uygulama ile sıcaklık yükselişi ölçülür [10].

Hidrate olmuş çimentonun asitte çözünme ısısı şu şekilde hesaplanır;

$$H_2 = \frac{R \times C}{W_k} - 0,4 (T - t_h) - 0,3 (t - t_h) \quad (3.10)$$

H_2 = 7 veya 28 gün hidratize olmuş çimentonun asit içinde çözünme ısısı, (cal/gr)

R = düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

C = kalorimetre kabının ısı kapasitesi (cal/gr)

T = örnek kalorimetre kabına konulduğu andaki oda sıcaklığı, (°C)

W_k = kızdırma kaybı, (gr)

t = kuru çimentonun asit içinde çözünme ısısı tayininde kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)

t_h = hidrate çimentonun asit içinde çözünme ısısı tayininde kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)

Bağıntıdaki W_k şu şekilde hesaplanır;

Platin krozeye tartılmış 4,18 gr±0,05 gr çimento örneği ıslaktır ve 1 saat 100°C-110°C etüvde bekletilir. Etüvden alınan örnek en az 5 saat 900°C-950°C'lik bir fırında kızdırılır. Desikatörde oda sıcaklığına soğutulan örnek tartılır [10].

$$W_k = \frac{A}{B}W \quad (3.11)$$

W_k = kalorimetre kabına konulan kızdırılmış örneğin kütlesi, (gr)

A = kızdırılmış örnek kütlesi, (gr)

B = kızdırılmadan önceki örnek kütlesi, (gr)

W = kalorimetre kabına konulan ıslak örnek kütlesi, (gr)

3.4.6 Çimento Hidratasyon Isısının Hesaplanması

Çimento hidratasyon ısısı şu bağıntıyla hesaplanır;

$$H = H_1 - H_2 - 0,1(t_h - 25,0) \quad (3.12)$$

H = çimento hidratasyon ısısı, (cal/gr)

H_1 = kuru çimentonun asitte çözünme ısısı, (cal/gr)

H_2 = hidrate olmuş çimentonun asitte çözünme ısısı, (cal/gr)

t_h = hidrate çimentonun asit içinde çözünme ısısı tayininde kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)

3.4.7 Deney Sonuçları

Hidratasyon ısısı deneyi kuru çimento örnekleri için İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Kimya Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Kalorimetre kabının ısı kapasitesi;

$$C = W \left[\frac{256,1 + 0,1(30 - t) + 0,12(T - t)}{R} \right]$$

$C = 411 \text{ cal/gr'dır.}$

Kuru çimentoların çözünme ısıları ise şöyledir;

I. numune: PKÇ/B 32,5R (Üretim tarihi; Şubat 2002)

Oda sıcaklığı: 20,5 °C

Numune sıcaklığı: 20 °C

Çözelti sıcaklığı: 19,7 °C

R hesaplanır;

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20})$$

$$\theta_0 = 0,70 \text{ °C}$$

$$\theta_{20} = 3,91 \text{ °C}$$

$$\theta_{40} = 3,95 \text{ °C}$$

$$R_0 = 3,91 - 0,70$$

$$R_0 = 3,21 \text{ °C}$$

$$R = 3,21 - (3,95 - 3,91)$$

$$R = 3,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_k = \frac{A}{B} W$$

$$W = 2,9305 \text{ gr}$$

$$A = 23,9502 - 20,3753$$

$$A = 3,5749 \text{ gr}$$

$$B = 3,8716 \text{ gr}$$

$$W_k = \frac{3,5749}{3,8716} \times 2,9305$$

$$W_k = 2,7059 \text{ gr}$$

$$H_1 = \frac{3,17 \times 411}{2,7059} - 0,2 [20,5 - (19,7 + 3,95)].$$

$$H_1 = 481,49 + 0,63$$

$$H_1 = 482,12 \text{ cal/gr}$$

II. numune: PKÇ/A 42,5R (Üretim tarihi; Eylül 2002)

Oda sıcaklığı: 20,4 °C

Numune sıcaklığı: 20 °C

Çözelti sıcaklığı: 19,3 °C

$$\theta_0 = 0,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{20} = 3,89 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{40} = 3,90 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

R hesaplanır;

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20})$$

$$R_0 = 3,89 - 0,24$$

$$R_0 = 3,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 3,65 - (3,90 - 3,89)$$

$$R = 3,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W_k = \frac{A}{B} W$$

$$W = 2,9413 \text{ gr}$$

$$A = 17,2372 - 13,6858$$

$$A = 3,5514 \text{ gr}$$

$$B = 3,7652 \text{ gr}$$

$$W_k = \frac{3,5514}{3,7652} \times 2,9413$$

$$W_k = 2,7743 \text{ gr}$$

$$H_1 = \frac{3,64 \times 411}{2,7743} - 0,2 [20,4 - (19,3 + 3,90)].$$

$$H_1 = 539,25 + 0,56$$

$$H_1 = 539,81 \text{ cal/gr}$$

III. numune: PZÇ/B 32,5R (Üretim tarihi; Ekim 2003)

Oda sıcaklığı: 20,4 °C

Numune sıcaklığı: 20 °C

Çözelti sıcaklığı: 19,8 °C

$$\theta_0 = 0,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{20} = 3,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{40} = 3,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

R hesaplanır;

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20})$$

$$R_0 = 3,81 - 0,59$$

$$R_0 = 3,22 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R = 3,22 - (3,88 - 3,81)$$

$$R = 3,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$W_k = \frac{A}{B} W$$

$$W = 2,9347 \text{ gr}$$

$$A = 23,3856 - 20,0680$$

$$A = 3,3176 \text{ gr}$$

$$B = 3,4971 \text{ gr}$$

$$W_k = \frac{3,3176}{3,4971} \times 2,9347$$

$$W_k = 2,7841 \text{ gr}$$

$$H_1 = \frac{3,15 \times 411}{2,7841} - 0,2 [20,4 - (19,8 + 3,88)]$$

$$H_1 = 465,02 + 0,74$$

$$H_1 = 465,76 \text{ cal/gr}$$

3.5 Mukavemet Deneyleri

3.5.1 Deney Numunesinin Hazırlanması

Mukavemet deneyleri için gerekli harç 1 kısım çimento, 3 kısım kum ve $\frac{1}{2}$ kısım suyun – ki bu da 450 gr çimento, 1350 gr kum ve 225 gr su karışımı olur – karıştırılması ile hazırlanır. Harç $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve %50 - %60 nisbi neme sahip laboratuarda Şekil 3.12’de görülen karıştırıcı ile karıştırılır. Paslanmaz çelikten yapılmış karıştırıcı kabının kapasitesi 4,7 litredir ve hem karıştırıcı kabı hem de kendi ekseninde dönen bir karıştırıcı kanadı vardır [9].



Şekil 3.12 Karıştırma Kabı

Karışım şu şekilde hazırlanır;

Karıştırma kabına 225 gr su konur ve üzerine 450 gr çimento eklenir. Karıştırıcı düşük hızda 30 saniye çalıştırılır. Bu sürenin sonunda 1350 gr kum karıştırma devam ederken yavaş yavaş eklenir. 1 dakika sonunda kumun eklenmesi bitmiş olmalıdır. 1 dakikanın sonunda yüksek hızda 30 saniye daha karıştırmaya devam edilir [9].

90 saniyenin sonunda karıştırıcı durdurulur ve 15 saniye içinde karıştırma kabının kenarlarına bulaşmış harç temizlenir. Kabin üzeri örtülüp 75 saniye beklendikten sonra karıştırıcı 1 dakika daha yüksek hızda çalıştırılır. Böylelikle harç 4 dakikanın sonunda kalıplara konmaya hazır hale gelmiştir [9].

Tablo 3.5 Karıştırma Hızları

Hızlar	Karıştırıcı Kanadının	
	Kendi Eksenî Etrafında Dönme Hızı (devir/dakika)	Kabın Eksenî Etrafında Dönme Hızı (devir/dakika)
Düşük Hız	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek Hız	285 ± 10	125 ± 10

Harç hazırlandıktan sonra laboratuarda kullanılan en az 400 Vickers sertliğinde çelikten üretilmiş kalıplara yerleştirilir. Kalıplar üç numuneyi aynı anda hazırlayabilmek için üç ayrı bölmeye sahiptir [9].

Kalıplar şu boyutlara sahiptir;

Uzunluk = 160 mm ± 0,4 mm

Genişlik = 40 mm ± 0,1 mm

Yükseklik = 40 mm ± 0,1 mm

Et kalınlığı = En az 10 mm

Açıları = 90° ± 0,5°



Şekil 3.13 Sarsma Kabı

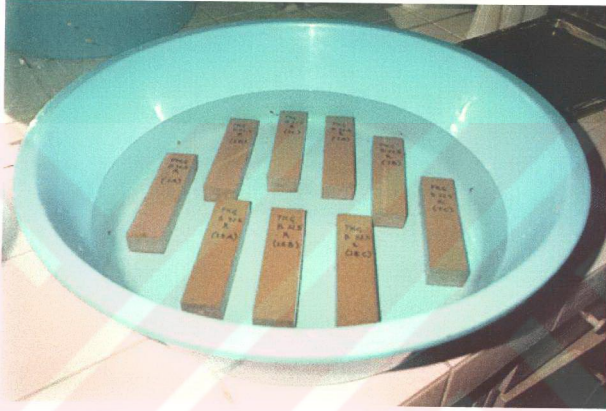
Ayrıca kalıpların üzerine harcın kalıplar içine doldurulmasını sağlamak için bir başlık takılır. Başlığın dik kenarlarının yüksekliği 20 – 40 mm’dir [9].

Harç bundan sonra kalıplara yerleştirilir. Kalıplar ince bir yağ ile yağlanır ve sarsma tablasına yerleştirilir. Dikdörtgen şeklindeki sarsma tablasından ve altındaki eksantrik diskten oluşan sarsma makinesi elektrik motoruyla hareket ettirilen diskle tablayı 15 mm yüksekliğe kaldırıp serbest olarak düşürür. Kalıp yarısına kadar doldurulur. Sarsma aleti çalıştırılıp 1 dakika içinde 60 sarsma yapılır. Alet durdurulur kalıbın diğer yarısı da doldurulur ve sarsma aleti 1 dakika daha çalıştırılır. Sarsma tablası tekrar durdurulur ve kalıp bir masterla düzeltilir [9].



Şekil 3.14 Kalıplar

Kalıp üzeri suyun buharlaşarak kaybını engellemek için streç folyo ile kapatılır ve $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve en az %90 nisbi nemli bir odada bekletilir. 20–24 saat sonra kalıplar sökülür ve ebatları ölçülüp, tartılan harç prizmaları numaralanıp $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki musluk suyuna yerleştirilir ve kırılacakları güne kadar bekletilir. Döküm sırasında üstte olan yüzeyler yine üstte olacak şekilde ayrı ayrı tamamen suya temas edecek şekilde dururlar. Bekletilme suyu her 14 günde bir değiştirilir, prizmalar kırılmadan 15 dakika önce sudan çıkarılıp kurulanır ve kırım için alete yerleştirilir [9].



Şekil 3.15 Numunelerin Suda Bekletilmesi

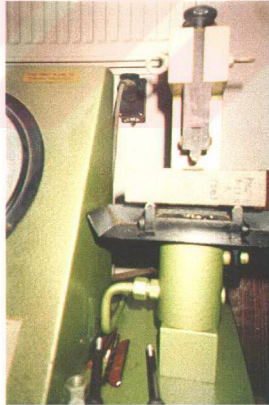
3.5.2 Eğilmede Çekme ve Basınç Mukavemet Deneyleri

Eğilmede çekme aletinin duyarlılığı 1000 kgf (10000 N)’den az yüklerde %1’dir. Aletin yükleme düzeni birbirinden 100 mm $\pm$ 0,5 mm uzaklıkta 10 mm çaplı iki destek silindirden oluşur. Bu iki silindirin tam ortasında aynı çapta bir yükleme silindiri vardır. Bu üç silindirin eksenlerinin düşey düzlemleri paraleldir ve deney boyunca böyle kalmalıdır [9].



Şekil 3.16 Eğilme ve Basınç Mukavemetini Ölçen Hidrolik Pres

Destek silindirleri ve yükleme silindiri prizmada yükün eşit dağılımını sağlayacak ve burulma gerilimi oluşturmayacak şekilde kendi merkezleri etrafında aşağı yukarı ayarlanabilirler. Prizmalar kalıptan çıkan yan yüzlerinden biri üzerine uzunlamasına destek silindirleri üzerine konur, P yükü yükleyici silindirler ile karşı yüzden dik olarak uygulanır. Yükleme hızı saniyede $5 \text{ kgf} \pm 1 \text{ kgf}$ ($50 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$) olarak ayarlanır [9].



Şekil 3.17 Eğilme Deneyi

Eğilmede çekme mukavemeti şu şekilde hesaplanır; (σ_R)

$$\sigma_R = 1.5 \frac{P \times L}{b \times a^2} \quad (3.12)$$

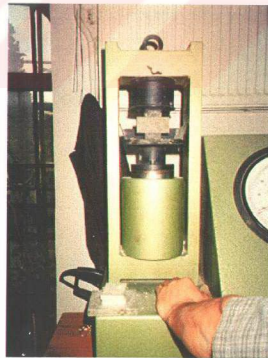
a, b = prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (mm)

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

L = destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (mm),

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

Eğilmede çekme mukavemeti tayini deneyinde iki parçaya bölünmüş yarım prizmalar basınç mukavemeti tayini deneyine kadar nemli bir yerde saklanır. Prizmalar Şekil 3.17'de görülen kırma presinde kırılır. Basınç mukavemeti tayini için kullanılan kırma presinin duyarlılığı en küçük yüklerde bile en az %1,5'tur. Yükleme basınç saniyede 10–20 kgf/cm² (N/mm²) artacak şekilde yapılır. Sonuçlar ise çimentonun 3 eğilmede çekme ve 6 basınç deneyinde elde edilen değerlerin ayrı ayrı ortalamalarının alınması ve tam sayıya yuvarlatılmasıyla bulunur. Ortalama değerden %10'dan çok fark gösteren mukavemet değerleri hesaba katılmaz [9].



Şekil 3.18 Basınç Mukavemetinin Ölçümü

3.5.3 Deney Sonuçları

4 adet numune üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları şöyledir;

I. numune; PKÇ/B 32,5R

Tablo 3.6 Mekanik Deney Yapılacak PKÇ/B 32,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları

Numune	Ağırlık gr (suya girerken)	Ağırlık gr (sudan çıkınca)	a (mm)	b (mm)	l (mm)
2A	593,6	596,3	41,16	40,06	100
2B	595,8	598,3	40,93	40,20	100
2C	595,8	599,1	41,01	40,38	100
7A	596,2	601,0	40,26	40,95	100
7B	597,4	602,2	40,27	41,65	100
7C	591,5	596,7	40,37	41,17	100
28A	597,8	604,2	40,26	41,32	100
28B	596,6	603,0	40,57	41,22	100
28C	600,9	608,0	40,21	42,02	100

Tablo 3.7 PKÇ/B 32,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Değerleri

Numune	P _{Çekme}	P _{Basınç}	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)
2A	1250	19000	2,76	11,50
		19000		11,50
2B	1350	19000	3,01	11,58
		18000		10,95
2C	1300	18000	2,87	10,87
		18000		10,87
7A	2550	41000	5,75	24,88
		40000		24,27
7B	2500	43000	5,55	25,66
		42000		25,06
7C	2550	43000	5,70	25,90
		43000		25,90
28A	3150	62000	7,04	37,26
		68000		40,86
28B	3850	67000	8,54	40,14
		65000		38,95
28C	3400	68000	7,51	40,28
		71000		42,06

II. numune; PKÇ/A 42,5R

Tablo 3.8 Mekanik Deney Yapılacak PKÇ/A 42,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları

Numune	Ağırlık gr (suya girerken)	Ağırlık gr (sudan çıkınca)	a (mm)	b (mm)	l (mm)
2A	581,9	585,4	40,17	40,69	100
2B	589,5	593,3	40,42	41,10	100
2C	581,8	585,2	40,48	40,19	100
7A	598,8	605,0	40,42	41,44	100
7B	588,8	594,6	40,19	41,11	100
7C	595,2	600,9	40,34	41,56	100
28A	596,4	604,2	40,50	41,21	100
28B	593,1	602,0	40,27	41,70	100
28C	589,4	597,9	40,31	40,94	100

Tablo 3.9 PKÇ/A 42,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Değerleri

Numune	P _{Çekme}	P _{Basınç}	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)
2A	2100	33000	4,80	20,19
		34000		20,81
2B	2300	35000	5,14	21,07
		35000		21,07
2C	2200	32000	5,01	19,67
		34000		20,90
7A	3500	76000	7,75	45,37
		75000		44,78
7B	3100	77000	7,00	46,61
		76000		46,00
7C	3450	80000	7,64	47,73
		76000		45,35
28A	3800	102000	8,43	61,11
		101000		60,52
28B	4000	101000	8,87	60,15
		108000		64,32
28C	4400	103000	9,92	62,42
		104000		63,03

III. numune; PÇ 42,5

Tablo 3.10 Mekanik Deney Yapılacak PÇ 42,5 Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları

Numune	Ağırlık gr (suya girerken)	Ağırlık gr (sudan çıkınca)	a (mm)	b (mm)	l (mm)
2A	610,9	614,0	40,11	40,65	100
2B	612,1	615,9	40,07	40,80	100
2C	605,7	608,8	40,12	40,45	100
7A	604,2	610,2	40,14	41,37	100
7B	610,9	616,4	40,16	40,80	100
7C	606,8	611,8	40,21	40,80	100
28A	614,1	616,2	40,59	42,33	100
28B	611,8	620,1	40,33	40,97	100
28C	607,2	622,2	40,23	42,57	100

Tablo 3.11 PÇ 42,5 Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Değerleri

Numune	P _{Çekme}	P _{Basınç}	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)
2A	2000	32000	4,59	19,63
		34000		20,86
2B	2200	33000	5,04	20,18
		33000		20,18
2C	2500	39000	5,76	24,03
		43000		26,49
7A	3550	78000	7,99	46,96
		79000		47,56
7B	3750	78000	8,55	47,62
		66000		40,29
7C	3650	79000	8,30	48,14
		77000		46,92
28A	3950	101000	8,50	58,79
		99000		57,62
28B	4250	102000	9,56	61,54
		104000		62,95
28C	3950	103000	8,60	60,13
		91000		53,12

IV. numune; PZÇ/B 32,5R

Tablo 3.12 Mekanik Deney Yapılacak PZÇ/B 32,5R Numunelerinin Ağırlık ve Boyutları

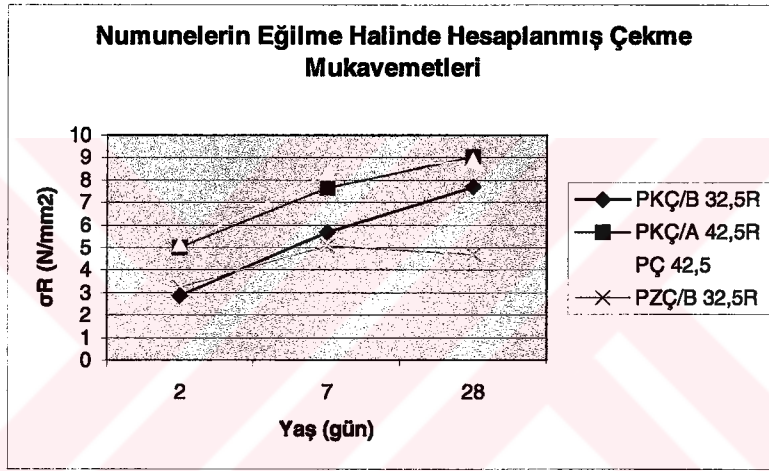
Numune	Ağırlık gr (suya girerken)	Ağırlık gr (sudan çıkınca)	a (mm)	b (mm)	l (mm)
2A	586,2	591,6	39,86	42,15	100
2B	592,4	597,3	40,34	42,04	100
2C	583,6	587,8	40,27	41,22	100
7A	591,6	597,8	39,95	42,09	100
7B	581,7	588,1	40,25	41,66	100
7C	583,8	588,4	40,11	40,66	100
28A	591,0	595,8	40,00	41,86	100
28B	588,7	594,2	40,18	41,82	100
28C	586,8	590,3	40,44	41,15	100

Tablo 3.13 PZÇ/B 32,5R Numunelerinin Eğilmede Çekme ve Basınç Değerleri

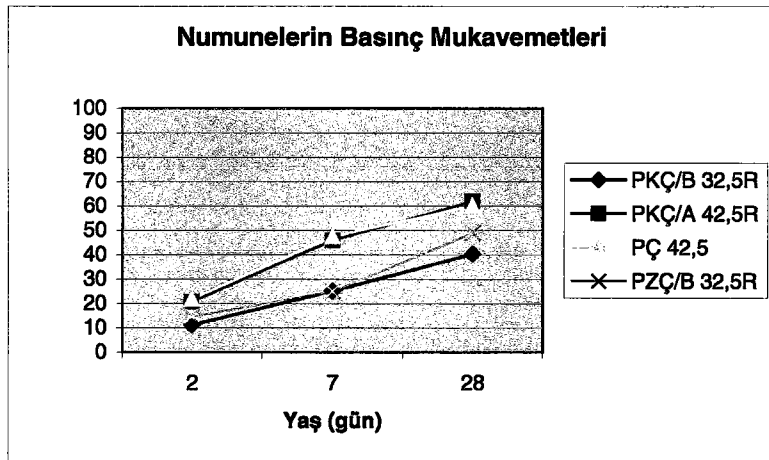
Numune	P _{Çekme}	P _{Basınç}	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)
2A	1350	25000	3,02	14,88
		25000		14,88
2B	1550	26000	3,40	15,33
		26000		15,33
2C	1500	23000	3,36	13,85
		24000		14,46
7A	2400	42000	5,36	24,98
		43000		25,58
7B	2200	36000	4,89	21,47
		41000		24,49
7C	2200	41000	5,04	25,14
		41000		25,14
28A	2050	86000	4,59	51,37
		74000		44,20
28B	2200	81000	4,89	48,21
		70000		41,67
28C	2100	72000	4,68	42,27
		79000		47,48

Tablo 3.14 Tüm Numunelerin Eğilmede Çekme ve Basınç Değerleri

Numune	PKÇ/B 32,5R		PKÇ/A 42,5R		PÇ 42,5		PZÇ/B 32,5R	
	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)	σ_R (N/mm ²)	σ_b (MPa)
2	2,88	11,21	4,98	20,62	5,13	21,90	3,26	14,79
7	5,67	25,28	7,64	45,97	8,28	47,44	5,10	25,07
28	7,70	40,46	9,07	61,92	8,89	60,12	4,72	49,02



Şekil 3.19 Numunelerin Eğilme Halinde Hesaplanmış Çekme Mukavemetleri



Şekil 3.20 Numunelerin Basınç Mukavemetleri

4. SONUÇLAR

Portland kompoze çimento, portland çimentosu ve puzolanik çimento numuneleri, PKÇ/B 32,5R, PKÇ/A 42,5R, PÇ 42,5 ve PZÇ/B 32,5R üzerinde yapılan özgül yüzey, tane büyüklüğü, priz süresi ve kuru çimento çözünme ısısı tayini deneyleri ile mukavemet deneylerinin sonuçları şöyledir;

- 4 numuneye uygulanan özgül yüzey tayini deneyi değerlerinin büyükten küçüğe sonuçları şöyledir;

$$\text{PZÇ/B 32,5R} = 4844 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

$$\text{PKÇ/B 32,5R} = 4736 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

$$\text{PKÇ/A 42,5R} = 4700 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

$$\text{PÇ 42,5} = 4087 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

- Tane büyüklüğü tayini deneyinin sonuçlarına göre çimento numunelerinin inceliklerinin karşılaştırılması için incelik modülleri hesaplanır;

Tablo 3.15 Numunelerin Granülometrisi

Malzeme	Elek Açıklığı (μm)				
	32 (μm)	63 (μm)	125 (μm)	200 (μm)	250 (μm)
PKÇ/B 32,5R	1,6	18,7	88,1	99,8	100
PKÇ/A 42,5R	1,6	4,4	23,8	100	100
PÇ 42,5	0,4	2,0	29,4	99,6	100
PZÇ/B 32,5R	2,6	14,0	55,6	100	100

$$\text{İncelik Modülü} = \sum \frac{(100 - P_x)}{100}$$

$$\text{PKÇ/B 32,5R'nin incelik modülü} = \frac{98,4 + 81,3 + 11,9 + 0,2 + 0}{500} = 0,38$$

$$\text{PKÇ/A 42,5R'nin incelik modülü} = \frac{98,4 + 95,6 + 76,2 + 0 + 0}{500} = 0,54$$

$$\text{PÇ 42,5'nin incelik modülü} = \frac{99,6 + 98 + 70,6 + 0,4 + 0}{500} = 0,53$$

$$\text{PZÇ/B 32,5R'nin incelik modülü} = \frac{97,4 + 86 + 44,4 + 0 + 0}{500} = 0,45$$

Buna göre çimento numunelerinin inceliklerine göre sıralanması şu şekilde gerçekleşir; PKÇ/A 42,5R > PÇ 42,5 > PZÇ/B 32,5R > PKÇ/B 32,5R

- Priz süresi tayini deneylerine göre çimento numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri şöyledir;

PÇ 42,5 = 190' priz başlama
310' priz sona erme

Numune normal kıvama 300 gr çimento ve 93 gr su ile gelmiştir.

PKÇ/B 32,5R = 170' priz başlama
285' priz sona erme

Numune normal kıvama 300 gr çimento ve 105 gr su ile gelmiştir.

PKÇ/A 42,5R = 155' priz başlama
245' priz sona erme

Numune normal kıvama 300 gr çimento ve 112 gr su ile gelmiştir.

PZÇ/B 32,5R = 150' priz başlama
240' priz sona erme

Numune normal kıvama 300 gr çimento ve 102 gr su ile gelmiştir.

- Üç numune üzerinde gerçekleştirilen kuru çimento çözünme ısısı ölçüm sonuçları büyükten küçüğe şöyledir;

$$\text{PKÇ/A 42,5R} = 539,81 \text{ cal/gr}$$

$$\text{PKÇ/B 32,5R} = 482,12 \text{ cal/gr}$$

$$\text{PZÇ/B 32,5R} = 465,76 \text{ cal/gr}$$

Deneyler sonucunda PKÇ/B 32,5R numunesinin özgül yüzeyi yüksektir, ki özgül yüzey 1 gr çimentonun cm^2 olarak kapladığı alandır. İnceliği diğer üç numuneye göre en düşük değerde olan PKÇ/B 32,5R'nin priz alması uzun sürmektedir. Numunenin priz süresi 4 saat 45 dakikadır. PZÇ/B 32,5R, PKÇ/A 42,5R ile PKÇ/B 32,5R üzerinde yapılan kuru çimento çözünme ısısı ölçümüne göre PKÇ/B 32,5R numunesi orta değerdedir. Numune eğilmede çekme mukavemetine göre 3. sırada, basınç mukavemetine göre ise en düşük değerdedir.

PKÇ/A 42,5R özgül yüzey değerine göre 3. sırada yer alır. Tane büyüklüğü en yüksek ve priz süresi en kısa olan numunedir. Priz süresi 4 saat 5 dakikadır. PKÇ/A 42,5R çözünme ısısı en yüksek olan çimentodur. Numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemeti PÇ 42,5'tan sonra en yüksek değerlerdedir.

PÇ 42,5 tüm numunelerin içinde en düşük özgül yüzey değerine sahiptir. Tane büyüklüğü PKÇ/A 42,5R'den biraz daha ince olan PÇ 42,5 en uzun sürede prizini alan numunedir. Prizini 5 saat 10 dakikada alır. Çözünme ısısı ölçülmemiş numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemetleri PKÇ/A 42,5R ile birlikte en yüksek değerlerdedir. Ancak çok az farklarla PÇ 42,5'un mukavemeti daha fazladır.

PZÇ/B 32,5R özgül yüzey değeri en yüksek olan numunedir. Bu numune PKÇ/B 32,5R'den sonra en ince taneli yapıya sahiptir. PZÇ/B 32,5R en kısa sürede prizini alan numunedir. Priz süresi 4 saattir. Eğilmede çekme ve basınç mukavemetleri de en düşük değerlerdedir.

Nuh Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiş numunelerin kullanıldığı deneylerde Nuh Çimento Fabrikası'nın belirttiği değerlerle laboratuarda bulunmuş değerlerin karşılaştırılması şöyledir;

Tablo 3.16 Numunelerin Laboratuarda Ölçülen Fiziksel Özellik Değerleri ile Fabrikadan Gelen Sonuçların Karşılaştırılması

Malzeme	Nuh Çimento Fabrikası'nın Değerleri					Laboratuarda Bulunan Değerler				
	Özgül Yüzey	Priz		Basınç Muk.		Özgül Yüzey	Priz		Basınç Muk.	
		Başlama	Bitiş	2.gün	28.gün		Başlama	Bitiş	2.gün	28.gün
PKÇ/B 32,5R	4549	203	262	16,0	44,5	4736	170	285	11,2	40,5
PKÇ/A 42,5R	4718	181	251	25,1	56,9	4700	155	245	20,65	61,9
PÇ 42,5	3614	217	288	25,7	59,4	4087	190	310	21,9	60,1
PZÇ/B 32,5R	4497	197	275	14,9	38,8	4844	150	240	14,7	49,0

Bu durumda çimento numunelerinin özellikleri arasındaki bağlantı şu şekildedir;

1. Özgül yüzeyi en küçük olan numune (PÇ 42,5) tane büyüklüğü en büyük ikinci değere sahip, priz süresi en uzun numunedir. Bu çimentonun eğilmede çekme ve basınç mukavemeti en yüksek değerlerdir. Özgül yüzey değeri en büyük olan numune (PZÇ/B 32,5R) ise, ikinci en ince tane büyüklüğüne sahiptir, priz süresi en kısa numunedir ve kuru çimento çözünme ıssısı da diğerlerine göre küçüktür. Numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemeti en düşük değerlerdir.
2. Tane büyüklüğü tayini deneyine göre tane büyüklüğü en küçük olan çimento numunesi (PKÇ/B 32,5R) ikinci en yüksek özgül yüzey değerine, ikinci en uzun priz süresi değerine ve ikinci en yüksek kuru çimento çözünme ıssısı değerine sahiptir. Numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri en düşük ikinci değerlerdir. Tane büyüklüğü en yüksek numune (PKÇ/A 42,5R) ise ikinci en düşük özgül yüzey değerine, ikinci en kısa priz süresi değerine ve en yüksek

kuru çimento çözünme ıslısına sahiptir. Numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri en yüksek değerlerdir.

3. Priz süresi en yüksek numune (PÇ 42,5), özgül yüzey değeri en düşük, tane büyüklüğü ikinci yüksek değere sahip çimentodur. Eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri ise en yüksek değerlerdir. Priz süresi en kısa numune (PZÇ/B 32,5R) ise özgül yüzey değeri en yüksek, tane büyüklüğü ikinci düşük değere sahip, kuru çimento çözünme ıslısı en düşük çimentodur. Eğilmede çekme ve basınç mukavemeti ise en düşük değerlerdedir.
4. Kuru çimento çözünme ıslısı en yüksek olan çimento numunesi (PKÇ/A 42,5R) ikinci en küçük özgül yüzey değerine, en yüksek tane büyüklüğüne ve ikinci en kısa priz süresi değerine sahiptir. Bu çimentonun eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri de en yüksek değerlerdir. Kuru çimento çözünme ıslısı en küçük olan numune (PZÇ/B 32,5R) en yüksek özgül yüzey değerine, ikinci en küçük tane büyüklüğü değerine, en kısa priz süresine sahiptir. Bu numunenin eğilmede çekme ve basınç mukavemet değerleri de en küçük değerlerdir.

Hidratasyon ıslısı yüksek olan çimentolar kütle betonlarında kullanılmamalıdır. Bu tip çimentolar örneğin barajlar gibi kütle betonlarında kullanıldıklarında sıcaklık artışı çok fazla olur, beton bu sıcaklıkta iken sertleşir. Hava değişiklikleri sonucu havanın yıllık ortalama sıcaklığına inip soğuyunca büzülür ve büzülmenin önlendiği yerlerde (mesela temellerde) önemli çatlaklar oluşur. Ayrıca bu yüksek sıcaklık nedeni ile iç kısımlarda beton yanma yapabilir ve mukavemeti düşer. Kütle betonlarında hidratasyon ıslısı düşük çimentoların kullanılması daha sağlıklıdır. Yüksek olanlar ise “yüzey:hacim” oranı büyük yapı elemanlarında, örneğin betonarme binalarda kullanılabilir. Bu tür yapılarda oluşan ısı, betonun sıcaklığını fazla yükseltmeden kaçır.

5. Eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri en küçük olan numune (PZÇ/B 32,5R) özgül yüzey değeri en yüksek, tane büyüklüğü ikinci küçük değere sahip, priz süresi en kısa ve kuru çimento çözünme ıslısı en düşük olan numunedir. Eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerleri en yüksek olan numune (PÇ 42,5) ise en düşük özgül yüzey değerine, ikinci en yüksek tane büyüklüğü değerine ve en yüksek priz süresine sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] İNCESU Y., 2000. Çimento Sektörü Raporu, Başbakanlık, ANKARA
- [2] YEĞİNOBALI A., 2003. “Yeni Bir Çağın Malzemesi” Çimento, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, ANKARA
- [3] SEY Y., 2003. Türkiye Çimento Tarihi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, İSTANBUL
- [4] POSTACIOĞLU B., BURSALI S., 1949. Çimento ve Beton Lugatı, Teknik Üniversitesi Matbaası, İSTANBUL
- [5] KOCATAŞKIN F., 1965. Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz?, Teknik Üniversitesi Matbaası, İSTANBUL
- [6] ÖZKUL H., TAŞDEMİR M.A., TOKYAY M., UYAN M., 1999. Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği, ANKARA
- [7] HASOL D., 1998. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, YEM Yayın, İSTANBUL
- [8] TÜRK STANDARDI, 2002. TS EN 191-1, Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA
- [9] TÜRK STANDARDI, 1985. TS 24, Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA
- [10] TÜRK STANDARDI, 1985. TS 687, Çimentonun Kimyevi Analiz Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA
- [11] TÜRK STANDARDI, 1986. TS 23, Çimentodan Numune Alma Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA
- [12] ATAHAN H., 2002. Düşük su/çimento Oranlı Betonlarda Özelliklerin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı, *Doktora Tezi*
- [13] TOYDEMİR N., GÜRDAL E., TANAÇAN L., 2000. Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme, Literatür Yayınları, İSTANBUL
- [14] ERİÇ M., 1994. Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yayınları, İSTANBUL
- [15] ERDOĞAN T., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., ANKARA
- [16] NEVILLE A.M., 1995. Properties of Concrete, LONDON

[17] **ALGAN N.M.**, 1935. Çimento Kimyası, Yüksek Mühendislik Mektebi, İSTANBUL

[18] **GANI M.**, 1997. Cement and Concrete, Chapman&Hall, LONDON

[19] **YALÇIN H., GÜRÜ M.**, 2002. Malzeme Bilgisi, Palme Yayıncılık, İSTANBUL

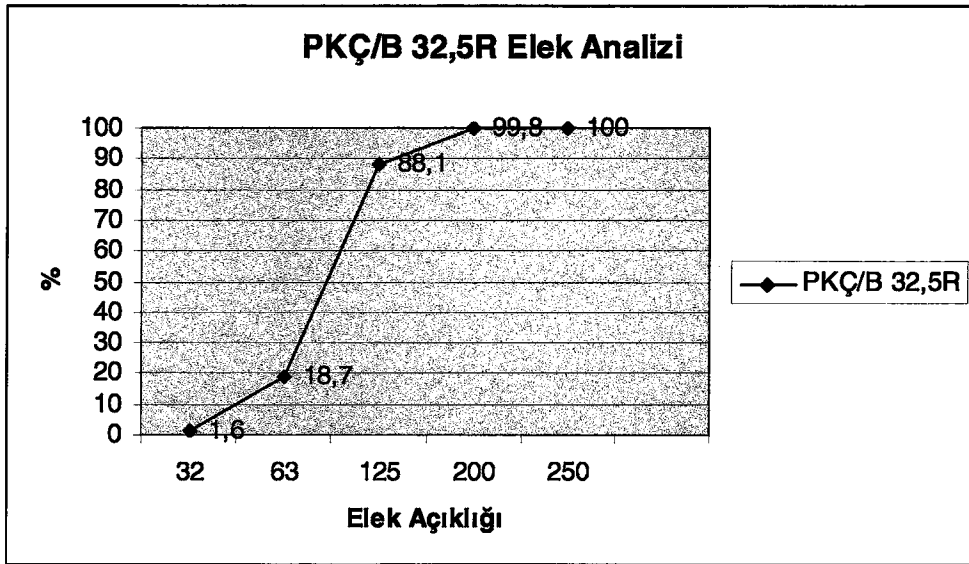
[20] **AKMAN S.**, 1987. “Yapı Malzemeleri”, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İSTANBUL

[21] **ONARAN K.**, 2000. “Malzeme Bilimi”, Bilim Teknik Yayınevi, İSTANBUL

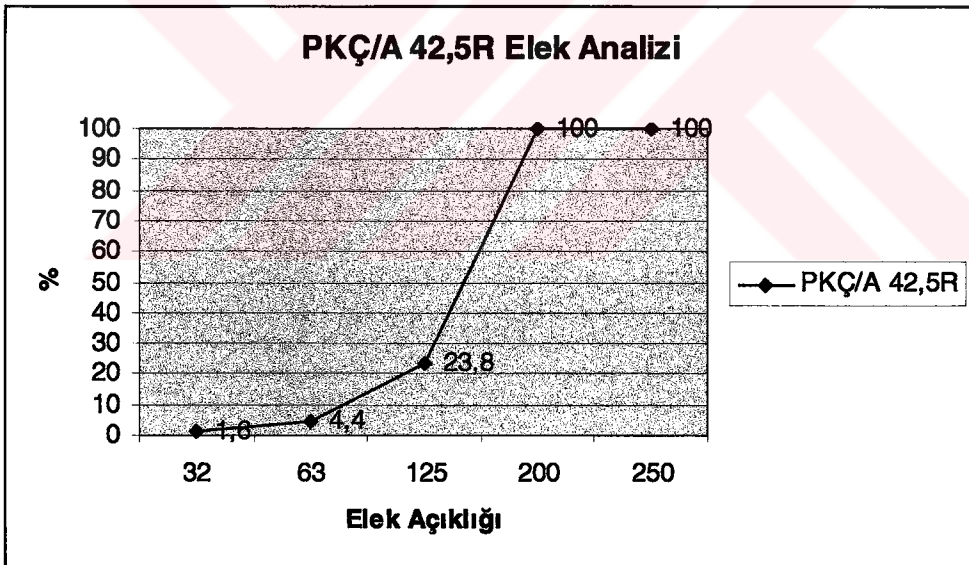
[22] **HORNBISTEL C.**, 1961. “Materials for Architecture”, Reinhold Publishing Corporation, NEW YORK



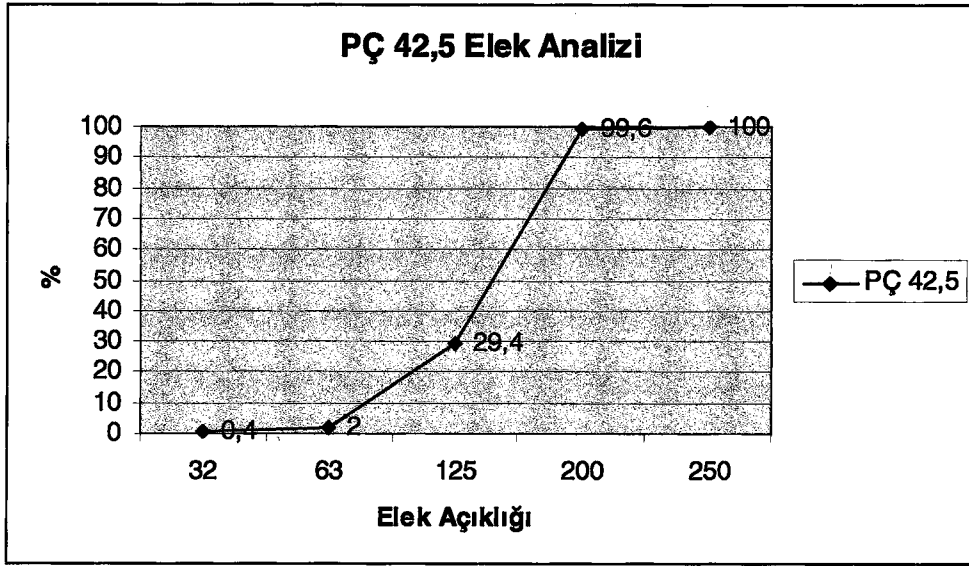
EK A



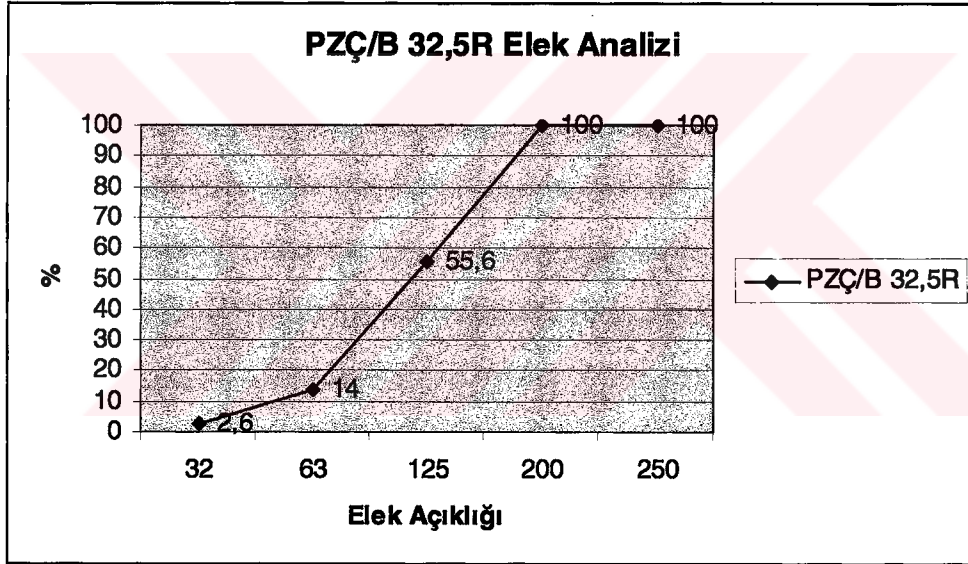
Şekil A.1 PKÇ/B 32,5R Elek Analizi



Şekil A.2 PKÇ/A 42,5R Elek Analizi



Şekil A.3 PÇ 42,5 Elek Analizi



Şekil A.4 PZÇ/B 32,5R Elek Analizi

EK B

nuh çimento sanayi a.ş.				No : NÇ/KGM/0670/02	
Kalite Kontrol Laboratuvarı				Tarih : 09/10/2002	
41 800 Hereke / Kocaeli					
Tel : 0 - 262 - 511 39 75 (19 hat)					
Fax : 0 - 262 - 511 39 94					
E.mail: gunseli.kaya@nuhcimento.com.tr					
KALİTE SERTİFİKASI					
Numune cinsi : PORTLAND KOMPOZE ÇİMENTO					
Standardı : TS 12143 PKÇ/B 32,5R					
Alınış Tarihi : 01-28/02/2002					
Açıklama :					
Kimyasal Analiz Sonuçları(*) %			Fiziksel Analiz Sonuçları(*)		
SiO ₂			Özgül Ağırlık (g / cm ³)	2.97	
Al ₂ O ₃			Donma Süresi	Başlangıç	Son
Fe ₂ O ₃			(Vicat, dakika)	203	262
CaO			Hacim Sabitliği	3	
MgO			(Le Chatelier, mm)		
SO ₃	2.28		İncelik		
Serbest Kireç	1.13		Özgül Yüzey		
Toplam Alkali			(Blaine, cm ² / g)	4549	
Na ₂ O + 0,658 K ₂ O			200 µ elek bakiye %		
Klorür	0.0081		90 µ elek bakiye %	0.6	
Toplam Katkı	31.57		32 µ elek bakiye %	14.0	
Modüller			Dayanım Sonuçları		
Kireç Standardı (LSF)			Basınç Dayanımı	Kg / cm ²	
Hidrolik Modül (H.M.)			1 gün		
Silikat Modülü (S.M.)			2 gün	160	
Ton Modülü (Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃)			3 gün		
Minerolojik Bileşim %			7 gün		
C ₃ S			28 gün	445	
C ₂ S			Kalite Güvence		
C ₃ A			Müdür Yardımcısı		
C ₄ AF			Halim TEKKESİN		
					
			Kalite Güvence		
			Müdürü		
			Günseli KAYA		
					
(*) Kimyasal analizlerde TS 687; fiziksel analizlerde TS 24 uygulanmıştır.					
Kalite Kontrol Laboratuvarımız TSE Yeterlilik Belgesi' ne sahiptir.					
					

Şekil B.1 Nuh Çimento Fabrikası'nın PKÇ/B 32,5R Kalite Sertifikası

nuh çimento sanayi a.ş.

Kalite Kontrol Laboratuvarı

41 800 Hereke / Kocaeli

Tel : 0 - 262 - 511 39 75 (19 hat)

Fax : 0 - 262 - 511 39 94

E.mail: gunseli.kaya@nuhcimento.com.tr



No : NÇ/KGM/0669/02

Tarih : 09/10/2002

KALİTE SERTİFİKASI

Numune cinsi : PORTLAND KOMPOZE ÇİMENTO

Standardı : TS 12143 PKÇ/A 42,5R

Alınış Tarihi : 01-30/09/2002

Açıklama :

Kimyasal Analiz Sonuçları(*) %

SiO ₂	
Al ₂ O ₃	
Fe ₂ O ₃	
CaO	
MgO	
SO ₃	2.84
Serbest Kireç	0.86
Toplam Alkali Na ₂ O + 0,658 K ₂ O	
Klorür	
Toplam Katkı	15.71

Fiziksel Analiz Sonuçları(*)

Özgül Ağırlık (g / cm ³)	3.01	
Donma Süresi (Vicat, dakika)	Başlangıç 181	Son 251
Hacim Sabitliği (Le Chatelier, mm)	3	

İncelik

Özgül Yüzey (Blaine, cm ² / g)	4718
200 µ elek bakiye %	
90 µ elek bakiye %	0.0
32 µ elek bakiye %	4.6

Modüller

Kireç Standardı (LSF)	
Hidrolik Modül (H.M.)	
Silikat Modülü (S.M.)	
Ton Modülü (Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃)	

Dayanım Sonuçları

Basınç Dayanımı	Kgf / cm ²
1 gün	
2 gün	251
3 gün	
7 gün	
28 gün	569

Minerolojik Bileşim %

C ₃ S	
C ₂ S	
C ₃ A	
C ₄ AF	

Kalite Güvence
Müdür Yardımcısı

Halim TEKKEŞİN

Halim TEKKEŞİN

Kalite Güvence
Müdürü

Günseli KAYA

Günseli KAYA

(*) Kimyasal analizlerde TS 687; fiziksel analizlerde TS 24 uygulanmıştır.



Kalite Kontrol Laboratuvarımız TSE Yeterlilik Belgesi' ne sahiptir.

Şekil B.2 Nuh Çimento Fabrikası'nın PKÇ/A 42,5R Kalite Sertifikası

nuh çimento sanayi a.ş.

Kalite Kontrol Laboratuvarı

41 800 Hereke / Kocaeli

Tel : 0 - 262 - 511 39 75 (19 hat)

Fax : 0 - 262 - 511 39 94

E.mail : gunseli.kaya@nuhcimento.com.tr



No : NÇ/KGM/0619/02

Tarih : 09/10/2002

KALİTE SERTİFİKASI

Numune cinsi : PORTLAND ÇİMENTO

Standardı : TS 19 PÇ 42,5

Alınış Tarihi : 05/09/2002

Açıklama :

Kimyasal Analiz Sonuçları(*) %

SiO ₂	20.12
Al ₂ O ₃	4.51
Fe ₂ O ₃	3.61
CaO	63.37
MgO	1.05
SO ₃	2.63
Çözünmeyen Kalıntı	0.74
Kızdırma Kaybı	2.50
Serbest Kireç	1.03
Toplam Alkali	
Na ₂ O + 0,658 K ₂ O	0.66
Klorür	0.0083

Fiziksel Analiz Sonuçları(*)

Özgül Ağırlık (g / cm ³)	3.15
Donma Süresi (Vicat, dakika)	Başlangıç : 217 Son : 288
Hacim Sabitliği (Le Chatelier, mm)	3

İncelik

Özgül Yüzey (Blaine, cm ² / g)	3614
200 µ elek bakiye %	
90 µ elek bakiye %	0.2
32 µ elek bakiye %	10.2

Modüller

Kireç Standardı (LSF)	96.13
Hidrolik Modül (H.M.)	2.24
Silikat Modülü (S.M.)	2.48
Ton Modülü (Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃)	1.25

Dayanım Sonuçları

Basınç Dayanımı	Kgf / cm ²
1 gün	
2 gün	257
3 gün	
7 gün	440
28 gün	594

Minerolojik Bileşim %

C ₃ S	57.91
C ₂ S	13.99
C ₃ A	5.84
C ₄ AF	10.99

Kalite Güvence
Müdür Yardımcısı

Halim TEKKEŞİN Y.

Beşhan

Kalite Güvence
Müdürü

Günseli KAYA

G.K.

(*) Kimyasal analizlerde TS 687; fiziksel analizlerde TS 24 uygulanmıştır.

Kalite Kontrol Laboratuvarımız TSE Yeterlilik Belgesi' ne sahiptir.



Şekil B.3 Nuh Çimento Fabrikası'nın PÇ 42,5R Kalite Sertifikası

nuh çimento sanayi a.ş.

Kalite Kontrol Laboratuvarı

41 800 Hereke / Kocaeli
Tel : 0 - 262 - 511 39 75 (19 hat)
Fax : 0 - 262 - 511 39 94
E.mail : gunseli.kaya@nuhcimento.com.tr

No : NÇ/KGM/0094/04
Tarih : 25.02.2004

KALİTE SERTİFİKASI

Numune cinsi : PUZOLANİK ÇİMENTO
Standartı : TS 12144 PZÇ/B 32,5 R
Alınış Tarihi : 01-31/10/2003
Açıklama :

Kimyasal Analiz Sonuçları(*) %

SiO ₂	
Al ₂ O ₃	
Fe ₂ O ₃	
CaO	
MgO	
SO ₃	2.64
Çözünmeyen Kalıntı	
Kızdırma Kaybı	
Serbest Kireç	
Toplam Alkali	
Klorür	0.0089

Fiziksel Analiz Sonuçları(*)

Özgül Ağırlık (g / cm ³)	2.92
Donma Süresi (Vicat, dakika)	Başlangıç Son 197 275
Hacim Sabitliği (Le Chatelier, mm)	2

İncelik

Özgül Yüzey (Blaine, cm ² / g)	4497
200 µ elek bakiye %	
90 µ elek bakiye %	
32 µ elek bakiye %	13.3

Modüller

Kireç Standardı (LSF)	
Hidrolik Modül (H.M.)	
Silikat Modülü (S.M.)	
Ton Modülü (Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃)	

Dayanım Sonuçları

Basınç Dayanımı	Kgf / cm ²
1 gün	
2 gün	149
3 gün	
7 gün	
28 gün	388

Minerolojik Bileşim %

C ₃ S	
C ₂ S	
C ₃ A	
C ₄ AF	

Kalite Güvence Müdürü
Günseli KAYA

Günseli Kaya

(*) Kimyasal analizlerde TS 687; fiziksel analizlerde TS 24 uygulanmıştır.

Şekil B.4 Nuh Çimento Fabrikası'nın PZÇ/B 32,5R Kalite Sertifikası

ÖZGEÇMİŞ

“Çimentonun Fiziksel Özelliklerinin Üretilen Standart Harcın Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması” isimli yüksek lisans tezinin yazarı Gülru Özdöl; 27.09.1978’de Amasya’da doğdu. Samsun Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra 1996 yılında İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü’nü kazandı. 2000 yılında lisans eğitimini tamamladı, aynı yıl Alanya Meryan Otel Revizyon Projesi’nde şantiye sorumlusu olarak çalışmaya başladı. 2001 yılında Alanya’daki görevini tamamlayıp İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisansa başladı. Yüksek lisans eğitimi sırasında bir yıl süreyle Arkitera Mimarlık Merkezi’nde çalıştı.

