

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## HAFİF BETON ÜRETİMİ

Kimya Müh. Sumru YALÇINALP

F.B.E Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

93700

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN

Prof. Dr. Salih Dincer

Doç. Dr. Ahmet Ekerim

S. Pınar  
Fahri Dincer  
A. Ekerim

İSTANBUL, 2000

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. BETON ve BETON BİLEŞENLERİ .....	2
2.1 Beton .....	2
2.1.1.1 Betonun özellikleri .....	3
2.1.2 Betonun avantajları .....	4
2.1.3 Betonun dezavantajları .....	4
2.1.4 Beton çeşitleri .....	5
2.1.4.1 Ağır betonlar .....	5
2.1.4.2 Normal betonlar .....	5
2.1.4.3 Hafif betonlar .....	6
2.2 Beton Bileşenleri .....	7
2.2.1 Bağlayıcı maddeler .....	7
2.2.1.1 Kireç (CaO) .....	7
2.2.1.2 Puzolanlar .....	7
2.2.1.3 Çimento .....	8
2.2.1.3.1 Çimento çeşitleri .....	10
2.2.1.3.1.1 Portland çimentoları .....	10
2.2.1.3.1.2 Doğal çimentolar .....	11
2.2.1.3.1.3 Puzolanik çimentolar .....	12
2.2.1.3.1.4 Yüksek fırın cüruf çimentosu .....	12
2.2.1.3.1.5 Alüminli çimentolar .....	12
2.2.1.3.1.6 Özel çimentolar .....	12
2.2.1.3.2 Türkiye’de üretilen çimentolar .....	13
2.2.1.3.3 Çimentoların inceliği .....	17
2.2.1.3.4 Çimentoların prizi .....	18
2.2.1.3.5 Hidratasyon ısısı .....	18
2.2.1.3.6 Çimentoların rötresi .....	18
2.2.1.3.7 Fırındaki reaksiyonlar .....	19
2.2.2 Agregalar .....	19

3.	HAFİF BETON .....	21
3.1	Hafif Beton .....	21
3.2	Hafif Betonun Tarihçesi .....	21
3.3	Hafif Betonların Sınıflandırılması .....	22
3.4	Hafif Betonun Özellikleri .....	23
3.5	Hafif Betonun Üstünlükleri ve Sakıncaları .....	26
3.6	Hafif Agregalar .....	28
4.	HAFİF BETON BİLEŞENLERİ ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	31
4.1	DeneySEL Çalışmalarda Kullanılan Aletlerin Tanıtılması .....	31
4.2	Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler .....	37
4.2.1	Agrega birim ağırlığı tayini .....	37
4.2.1.1	Agrega sıkışık birim ağırlığı tayini .....	37
4.2.1.2	Agrega gevşek birim ağırlığı tayini .....	37
4.2.2	Agrega özgül ağırlığı tayini .....	38
4.2.2.1	İnce agrega özgül ağırlığı tayini .....	38
4.2.2.2	İri agrega özgül ağırlığı tayini .....	39
4.2.3	Agrega su emme oranı tayini .....	40
4.2.4	Granülasyon .....	41
4.3	Kullanılan Malzeme Tanımlanması .....	42
4.3.1	Agrega .....	42
4.3.1.1	Kum .....	42
4.3.1.1.1	Özgül ağırlık .....	42
4.3.1.1.2	Birim ağırlık .....	43
4.3.1.1.3	Su emme .....	43
4.3.1.1.4	Kimyasal özellikleri .....	43
4.3.1.2	Ham perlit hafif agregası .....	43
4.3.1.2.1	Granülasyon .....	45
4.3.1.2.2	Özgül ağırlık .....	46
4.3.1.2.3	Birim ağırlık .....	47
4.3.1.2.4	Su emme .....	47
4.3.1.2.5	Kimyasal özellikleri .....	48
4.3.1.3	Genleştirilmiş perlit agregası .....	48
4.3.1.3.1	Özgül ağırlık .....	49
4.3.1.3.2	Birimi ağırlık .....	49
4.3.1.3.3	Su emme .....	50
4.3.1.3.4	Kimyasal özellikleri .....	50
4.3.1.4	Andezit .....	50
4.3.1.4.1	Granülasyon .....	51
4.3.1.4.2	Özgül ağırlık .....	52
4.3.1.4.3	Birim ağırlık .....	52
4.3.1.4.4	Su emme .....	52
4.3.1.4.5	Kimyasal özellikleri .....	53
4.3.1.5	Pomza agregası .....	53
4.3.1.5.1	Granülasyon .....	54
4.3.1.5.2	Özgül ağırlık .....	55
4.3.1.5.3	Birim ağırlık .....	55
4.3.1.5.4	Su emme .....	55
4.3.1.5.5	Kimyasal özellikleri .....	56

4.3.2	Çimento .....	56
4.3.2.1	Kimyasal özellikleri .....	56
4.3.3	Alçıtaşı .....	57
4.3.3.1	Bor mineralleri ve bileşiklerine genel bakış .....	57
4.3.3.2	Bor kirliliği ve atıkların değerlendirilmesi .....	58
4.3.3.3	Alçıtaşının mineralojisi .....	64
4.3.3.4	Bor jips atığından alçı eldesi .....	64
4.3.4	Kimyasal katkı maddeleri .....	65
4.3.4.1	Grace VRDA 90 .....	65
4.3.4.2	Sika Lightcrete I 500 .....	65
4.4	Beton Karışımları .....	66
4.4.1	Kabul edilen ilkeler ve bileşim hesapları .....	66
4.4.2	Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve saklama koşulları .....	68
4.5	Taze ve Sertleşmiş Betonlar Üzerinde Yapılan Deneyler .....	68
4.5.1	Taze betonun işlenebilirlik özelliğinin belirlenmesi .....	68
4.5.2	Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi .....	69
4.5.3	Betonda priz süresinin tayini .....	69
4.5.4	Sertleşmiş betonda su emme oranı tayini .....	70
4.5.5	Sertleşmiş betonun basınç mukavemeti tayini .....	70
5.	<b>SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER</b> .....	71
5.1	Beton Dizaynları .....	71
5.2	Taze Beton Birim Ağırlıkları .....	72
5.3	Taze Beton Priz Deneyi Sonuçları .....	73
5.4	Sertleşmiş Betonda Basınç Mukavemeti Sonuçları .....	77
5.5	Sertleşmiş Betonda Su Emme Oranları .....	77
5.6	Değerlendirmeler .....	78
<b>KAYNAKLAR</b> .....		<b>80</b>

## SİMGE LİSTESİ

$\lambda$	Termik iletkenlik katsayısı
W	Numune ağırlığı
B	Numune birim ağırlığı
V	Ölçü kabı hacmi
$\gamma$	Özgül ağırlık
m	Numune su emme oranı
$A_{sb}$	Sertleşmiş beton kuru ağırlığı
$B_{sb}$	Sertleşmiş beton suya doymun yüzey kuru ağırlığı



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.1	Mikser ..... 31
Şekil 4.2	Pres ..... 32
Şekil 4.3	Çökme hunusu ..... 33
Şekil 4.4	Numune kalıpları ..... 33
Şekil 4.5	Priz aleti ..... 34
Şekil 4.6	Titreşimli elek ..... 35
Şekil 4.7	Kür tankı ..... 36
Şekil 4.8	İri ham perlit agregası ..... 44
Şekil 4.9	İnce ham perlit agregası ..... 44
Şekil 4.10	Ham perlit agregası I granülasyon eğrisi ..... 45
Şekil 4.11	Ham perlit agregası II granülasyon eğrisi ..... 46
Şekil 4.12	Genleştirilmiş perlit agregası ..... 49
Şekil 4.13	Andezit ..... 51
Şekil 4.14	Andezit'in granülasyon eğrisi ..... 52
Şekil 4.15	Pomza agregası ..... 54
Şekil 4.16	Pomza agregası granülasyon eğrisi ..... 55
Şekil 4.17	Standart alçının X-Ray sonucu ..... 60
Şekil 4.18	170 C°'de döner fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu ..... 61
Şekil 4.19	170 C°'de tav fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu ..... 62
Şekil 4.20	Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'ün bir arada karşılaştırıldığı rapor ..... 63
Şekil 5.1	Pomza betonu priz deneyi ..... 73
Şekil 5.2	Pomza + alçıtaşı betonu priz deneyi ..... 73
Şekil 5.3	Genleştirilmiş perlit betonu priz deneyi ..... 74
Şekil 5.4	Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi ..... 74
Şekil 5.5	Ham perlit betonu priz deneyi ..... 75
Şekil 5.6	Ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi ..... 75
Şekil 5.7	Andezit + ham perlit betonu priz deneyi ..... 76
Şekil 5.8	Andezit + ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi ..... 76

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Basınç mukavemetlerine göre hazır betonlar ..... 6
Çizelge 2.2	Portland çimentosunun kimyasal analizi ..... 10
Çizelge 2.3	Çimentonun ana bileşenleri ..... 11
Çizelge 2.4	Çimentoların bileşimi ..... 14
Çizelge 2.5	Gerekli kimyasal özellikler ..... 15
Çizelge 2.6	Fiziksel özellikler ..... 16
Çizelge 2.7	Gerekli mekanik özellikler ..... 17
Çizelge 3.1	Hafif betonların sınıflandırılması ..... 22
Çizelge 3.2	Hafif beton özellikleri ..... 24
Çizelge 3.3	Hafif beton ve normal betonun çimento içerikleri ..... 25
Çizelge 3.4	Hafif agrega birim ağırlıkları ..... 28
Çizelge 3.5	Hafif agregaların tipik özellikleri ..... 30
Çizelge 4.1	Akpınar kumu elek analizi ..... 42
Çizelge 4.2	Akpınar kumu kimyasal analizi ..... 43
Çizelge 4.3	Ham perlit agregası elek analizi ..... 45
Çizelge 4.4	Ham perlit agregası özgül ağırlığı ..... 46
Çizelge 4.5	Ham perlit agregası birim ağırlığı ..... 47
Çizelge 4.6	Ham perlit agregası su emme yüzdesi ..... 47
Çizelge 4.7	Ham perlit agregası kimyasal analizi ..... 48
Çizelge 4.8	Genleştirilmiş perlit agregası su emme oranı ..... 50
Çizelge 4.9	Genleştirilmiş perlit agregası kimyasal analizi ..... 50
Çizelge 4.10	Andezit'in elek analizi ..... 51
Çizelge 4.11	Andezit'in su emme oranı ..... 52
Çizelge 4.12	Andezit kimyasal özellikleri ..... 53
Çizelge 4.13	Pomza agregası elek analizi ..... 54
Çizelge 4.14	Pomza agregası su emme oranı ..... 55
Çizelge 4.15	Pomza agregası kimyasal analizi ..... 56
Çizelge 4.16	Çimento kimyasal özellikleri ..... 56
Çizelge 4.17	Önemli bor mineralleri ve bileşikleri ..... 57
Çizelge 4.18	Sanayide kullanılan önemli bor bileşikleri ..... 58
Çizelge 4.19	Etibank Bandırma Fabrikası borik asit çamuru analiz sonuçları ..... 58
Çizelge 4.20	Borik asit atığının kimyasal bileşimi ..... 59
Çizelge 5.1	Beton dizaynları ..... 71
Çizelge 5.2	Taze beton birim ağırlıkları ..... 72
Çizelge 5.3	Sertleşmiş beton basınç mukavemetleri ..... 77
Çizelge 5.4	Sertleşmiş betonda su emme oranları ..... 77

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yapılması için her türlü olanağı sağlayan ve yüksek lisans öğrenimim süresince bilgisi, desteği ve tavsiyeleriyle beni her konuda yönlendiren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e, tezin bana verilmesine katkılarından dolayı Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Salih DİNÇER'e, tez çalışmamın her anında ve her konuda yardımlarıyla yanımda olan sevgili arkadaşım Arş. Gör. Emek MÖRÖYDOR'a, deneysel çalışmalarımın SET Beton Cendere Tesislerinde yapılmasına imkan sağlayan SET Beton Genel Müdürü Sayın Mehmet Kozikoğlu'na, deneysel çalışmalarım sırasında tecrübeleriyle ve tüm sabrıyla bana yol gösteren SET Beton Cendere Tesisleri Laboratuvar Teknisyeni Sayın İrfan AKKABA'ya, her konuda yardımlarını esirgemeyen SET Beton Cendere Tesisleri yöneticilerinden Sayın Selahattin HASDEMİR, Gülseren YILMAZ ve SET Çimento Ambarlı Tesisi Laboratuvar Şefi Sayın Levent ONAT'a, önerileri, tavsiyeleri ve malzeme temini konusunda beni her zaman destekleyen ER-PER Erzincan Mollaköy Perlit İşletmesi'nin sahibi Sayın Düzgün ÜRÜN Bey'e, yine malzeme temini konusunda Sayın Prof. Dr. Atilla Aykol'a, üniversite öğrenimim süresince her zaman yanımda olan, yardımına koşan, desteği ve sevgisiyle beni hiç yalnız bırakmayan sevgili arkadaşım Kimya Yük. Müh. Nurcan TUĞRUL'a ve bu günlerime ulaşabilmemde en büyük pay sahibi olan, sevgilerini, güvenlerini hiç eksik etmeyen, hayatımın her döneminde ve tüm öğrenim yaşamımda olduğu gibi çalışmalarım sırasında da her türlü ilgi ve desteği gördüğüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

Bor, oldukça geniş olan kullanım alanları ile vazgeçilmez bir endüstriyel hammadde olarak çok önemli bir maden haline gelmiştir ve bu önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Dünya bor rezervlerinin % 60 gibi büyük bir kısmı Türkiye’de bulunmaktadır. Bu nedenle cevherlerimizin en verimli şekilde üretilmesi ülkemiz açısından oldukça önemlidir. Bununla beraber her yıl yaklaşık % 30-50 nem ve % 10-12 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren 250 bin ton katı atık oluşmakta ve bunun yanında atık göletinde de aynı içerikli yaklaşık 4 milyon ton birikmiş katı atık bulunmaktadır. Bu atıkların teknolojik koşullara uygun olarak değerlendirilmesi hem ekonomik açıdan hem de çevrenin korunması bakımından ülkemiz için önemli bir prosestir.

Bu çalışmada borik asit atıkları katılarak beton kalitesini yükseltmek ve dünyanın en zengin rezervine sahip olan Türkiye'deki bor minerallerinin kullanım alanları genişletme çabalarına katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Bu amaçla bor mineralleri, bor bileşikleri, atıkları ve beton hakkında bilgiler toplanmıştır.

Hafif betona % 3 ihtiva edecek şekilde borik asit atığı (laroks) katılarak elde edilen betonun priz başlangıcı, priz sonu ve basınç dayanımı özellikleri tespit edilmiştir.



## **ABSTRACT**

Boron, with its spread using field is an important raw-material, which of importance increases day by day.

Since the % 60 of world's boron resources are in Turkey, the productive using of these resources is so significant for our country. Every year 250.000 ton wet-waste including approximately % 10-12  $B_2O_3$  arises beside the 4 million ton solid-waste which is accumulated in the lake of waste including the same percentage. The evaluation of these waste accordance with the technological circumstances is an essential process for Turkey in both economy and the protection of environment.

In this study, the aim is to improve the quality of concrete by mixing it with larox and contribute to the exertions of expending the using fields of boron minerals in Turkey which has the richest reserve in the world. With this aim, information about boron minerals, production technologies of boron compounds and concrete has been gathered.

The beginning of freezing, end of freezing, presure resistance features of the lightweight concrete obtained by adding larox to the including % 3 of  $B_2O_3$ , have been determined.



## 1. GİRİŞ

Ülkemiz, dünya bor cevherlerinin büyük bir kısmına sahip olmasına rağmen bor ve türevlerinin üretiminde ne yazık ki dünya piyasalarında olması gerektiği yere henüz gelememiştir.

Özellikle de bor türevlerinin üretimi sırasında meydana gelen atıkların değerlendirilmemesi ülkemiz için büyük bir ekonomik kayıp olmasının yanında, bu atıkların % 2'lik kısmının gölette çözünerek yeraltı sularına karışması büyük bir çevre sorunudur.

Bu atıkların teknolojik koşullara uygun olarak değerlendirilmesi hem ekonomik açıdan hem de çevrenin korunması bakımından ülkemiz için önemli bir prosestir. Bu sorunun çözümü için başta Etibank olmak üzere birçok büyük kuruluşumuz önderliğinde atıkların değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Daha önce boraks fabrikasyon atığı kullanılarak yapılan çalışmaların sonucunda prefabrike inşaat elemanları imalatı, tuğla ve seramik üretimi; borik asit atığı kullanılarak ise çimento üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada ise borik asit fabrikasyonu atığı kullanılarak alçı üretilmiş ve hafif beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu sayede beton kalitesini arttırmak, priz süresini ayarlamak ve dünyanın en zengin rezervlerine sahip olan Türkiye'de bor atıklarının değerlendirilmesini sağlamak, dolayısıyla çevreye verdiği zararı önlemek amaçlanmıştır.

## 2. BETON ve BETON BİLEŞENLERİ

### 2.1 Beton

Beton; kum, çakıl, kırmataş veya hafif agreganın, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen, istenilen şekli alabilecek plastik bir yapı malzemesidir (Ulus, 1998). Hazır beton ise TS 11222'ye göre; çimento, doğal veya yapay agrega, su ve gerektiğinde kimyasal katkıdan meydana gelen, bileşenleri tesiste beton santralında ölçülen, su ölçme ve karıştırma işlemi beton santralında veya transmikserde yapılarak teslim edilen taze betondur (TS 11222, 1994). Betonlar birim ağırlıkları yaklaşık 2100 – 2500 kg/m<sup>3</sup>, kübik basınç dayanımları ise 153 kgf/cm<sup>2</sup>'den 1020 kgf/cm<sup>2</sup>'ye kadar çıkabilecek şekilde üretilebilirler (Clarke, 1993). Betonda kullanılan çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Kum ise, iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompozitesini artırır. Çakıl veya kırmataş taneleri de bir bakıma betonun iskeletini oluşturur.

Beton üretmeden önce, betonu meydana getiren malzemenin özellikleri saptanır. Eğer bu özellikler betonun yapımına elverişli ise, malzemenin özelliklerine bağlı olarak ve istenilen şartları yerine getirecek şekilde beton bileşimi hesaplanır. Genel olarak bu işlem 1 m<sup>3</sup> betonu meydana getirmek için gerekli çimento, kum, iri agrega ve su miktarını hesaplamak suretiyle yapılır. Betonun homojen bir bileşime sahip olabilmesi için betoniyer denilen aletler kullanılır. Beton bileşimini oluşturan malzeme, ölçülerek betoniyere konulur ve belirli bir süre burada karıştırılır. Betoniyerden alınan karışım uygun araçlar ile döküleceği yere nakledilir. Burada beton önceden hazırlanmış kalıplar içine dökülür. Bu esnada betonun kalıplara mümkün olduğunca az boşluk bırakılarak doldurulması gerekir. Bunun için beton, kalıba döküldükten sonra sıkıştırılmalıdır. Bu konuda en iyi sonuçlar vibratör denilen aletlerin kullanılması ile alınmaktadır. Bu aletlerin çalışması betonda bir titreşim meydana getirmekte ve bunun sonucunda vibratör çalıştığı sürece beton sıvı karakteri kazanmaktadır. Böylelikle beton döküldüğü kalıbı en iyi şartlar altında ve kendi yapısı içinde mümkün olduğu kadar az boşluk bırakarak doldurmaktadır. Kalıbına yerleştirilen betonun basınç mukavemeti zamanın artan fonksiyonudur. Bu mukavemetin belirli bir değer almasını sağlayacak bir süre beklendikten sonra kalıp ve iskele alınır (Postacıoğlu, 1987).

### 2.1.1 Betonun özellikleri

Beton üreticilerin ve kullanıcıların asıl hedefi, elde edilecek sertleşmiş betonun istenilen özellikleri sağlayabilmesidir. Sertleşmiş beton;

- 7, 28 veya daha sonraki günler için hedeflenen dayanıma sahip olmalı,
- Yeterli durabiliteye (çevre etkenlerine karşı dayanıklılığa) sahip olmalı; yani sertleşmiş beton, zamanla karşılaşılabileceği donma – çözülme, sülfat hücumları, asitler, agregadaki reaktif silis ile çimento alkalileri arasında yer alabilecek alkali – silis reaksiyonları, aşınma ve benzeri etkenlere yeterli dayanıklılığı gösterebilmeli,
- Yeterli hacim sabitliğine sahip olmalı; yani, sertleşmiş beton, aşırı büzülme veya genişleme nedeniyle çatlaklar göstermemelidir.

Sertleşmiş betondan beklenen önemli özellikler, beton yapımında kullanılan malzemelerin özellikleri ve oranlarına bağlı olduğu kadar, taze betonun karılma, taşınma, yerleştirilme, sıkıştırılma, yüzeyinin düzeltilmesi ve bakım (kür) işlemleri ile yakından ilgilidir.

Taze betondan beklenen önemli özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- İstenilen işlenebilme,
- İstenilen priz süresi,
- İstenilen ölçüde hidrasyon ısı ve bu ısının açığa çıkma hızı,
- En az terleme yapacak, üniform beton kompozisyonudur.

Taze betonun işlenebilme ve terleme özellikleri ile, çimento ve su arasındaki reaksiyonların oluşma hızı, miktarı ve hidrasyona bağlı olarak, priz süresi, hidrasyon ısı miktarı ve hızı hem çimento inceliği hem de çimento kompozisyonu tarafından önemli ölçüde etkilenen özelliklerdir.

Sertleşmiş betonun dayanım kazanma hızı ve miktarı ile çimento hamurunun gözenekliliği ve dayanıklılığı da, yine çimentonun ne ölçüde ve hızda hidrasyon yaptığına bağlı özelliklerdir (Erdoğan-I, 1995).

### 2.1.2 Betonun avantajları

Betonun, diğer yapı malzemelerinden daha önemli kılan özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Betonun uzun vadede diğer yapı malzemelerine kıyasla daha ekonomik olması,
- Yüksek basınç mukavemetlerine sahip olması,
- Korozyon ve dış etkilerden çok az etkilenmesi,
- Plastik durumdayken istenilen şeklin kolayca verilebilmesi,
- Çelik ile birlikte sınırsız kullanım alanına sahip olması,
- Betondaki çatlakların çeşitli malzemelerle (epoksi) tamir edilebilmesi,
- Kolayca pompalanabilirliklerinden, çok zor ve yüksek olan yerlere de kolayca yerleştirilebilmeleri,
- Dış etkilere ve ateşe karşı dayanıklı olmaları,
- Bazı endüstri atıklarının beton üretiminde kullanılabilmesidir.

### 2.1.3 Betonun dezavantajları

Sertleşmiş ve taze betonun kullanılmasının sakıncalarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür:

- Çekme gerilmeleri çok düşük olduğu için, çekme gerilmesinin oluşabileceği bölgelerde donatısız kullanılamaması,
- Taze betonda kuruma anında büzülme (rötre) ve sertleşmiş betonlarda nem ile temaslarında genişleme oluşur. Bu durumun montaj noktalarında özel tedbirlerin alınmasını gerektirmesi,
- Isı değişimi ile de betonlar büzülme ve genişleme gösterirler. Bu sebepten dolayı montaj noktalarında çatlaklar oluşur. Bu çatlakların oluşmasını önlemek için özel tedbirlerin alınmasının gerekliliği,
- Kalıcı yükler altında sünme göstererek ön gerilmeli betonlarda gerilme kaybına sebep olmaları,
- Agregası – alkali reaksiyonunun oluşma ihtimalinin bulunması,
- Tamamen geçirimsiz bir malzeme olmaması,

- Sünek olmamasından dolayı depreme dayanıklı yapıların dizaynını zorlaştırmasıdır (Ulus, 1998).

#### 2.1.4 Beton çeşitleri

Betonlar genelde birim ağırlıklarına göre isimlendirilirler. Betonların birim ağırlıkları ise üretiminde kullanılan malzemelerin birim ağırlıklarına bağlı olarak değişmektedir. Birim ağırlıklarına göre betonlar; ağır, normal ve hafif beton olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

##### 2.1.4.1 Ağır betonlar

Birim ağırlığı  $2500 \text{ kg/m}^3$ 'den büyük olan ve radyografi tesislerinde, atom pil ve reaktörlerinde meydana gelen zararlı ışınları dışarı sızdırmamak için kullanılan betonlardır. Bu bakımdan cisimlerin içine girebilme kabiliyeti yüksek olan nötron ışınları ile  $\gamma$  ışınları tehlikelidir. Ağır betonlar her iki ışına karşı iyi bir izolasyon fonksiyonu görürler.

Ağır betonlar ağır agrega kullanarak klasik betondan pek az farklarla üretilir. Bu amaçla iri agrega olarak kullanılan belli başlı malzemeler; magnetit, limonit ve barittir.

##### 2.1.4.2 Normal betonlar

Kum, çakıl veya kırmataşın, su ve çimento ile belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, taze iken plastik kıvamda, sertleştiğinde ise rijit bir yapı kazanan yapı malzemesidir. Bu betonların birim ağırlıkları kullanılan agreganın yapısına bağlı olarak  $2100$  ile  $2600 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir. Normal beton dünyada en çok kullanılan beton çeşitidir. Bu betonların birim ağırlıkları fazla olduğundan ısı iletimleri ve basınç mukavemetleri diğer yapı malzemelerine göre daha yüksektir. Bundan dolayı bu betonlar genelde taşıyıcı olarak kullanılırlar (Postacıoğlu, 1987; Clarke 1993).

TS 11222, normal agregalarla üretilmiş, endüstriyel tesislerde hazırlanan, kullanıma hazır olarak teslimi yapılan taze hazır betonları, basınç mukavemetlerine göre şöyle sınıflandırmıştır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Basınç mukavemetlerine göre hazır betonlar (TS 11222, 1994)

Beton sınıfı	Karakteristik basınç mukavemeti (kgf/cm <sup>2</sup> ) (28 gün)	
	Silindir numune	Küp numune
BS 14	143	163
BS 16	163	204
BS 18	184	229
BS 20	204	255
BS 25	255	306
BS 30	306	377
BS 35	357	459
BS 40	408	510
BS 45	459	561
BS 50	510	612

#### 2.1.4.3 Hafif betonlar

Birim ağırlığı normal betonlardan belirli şekilde düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Genel olarak birim ağırlığı 1800 kg/m<sup>3</sup>'den küçük olan betonlar hafif beton sınıfına girmektedir (Postacıoğlu, 1975). Uluslararası standart beton üretim merkezi ise hafif betonu, kuru birim ağırlığı 1200 ile 2000 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen beton olarak tarif etmektedir. Bu betonların birim ağırlıkları kullanım amacına göre değişmektedir. Isı yalıtım amacıyla kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 300 ile 800 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, taşıyıcı olarak kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 2000 kg/m<sup>3</sup>'e kadar yükselebilmektedir (Ulus, 1998).

## 2.2 Beton Bileşenleri

### 2.2.1 Bağlayıcı maddeler

Bağlayıcı madde olarak bilinen ve ince toz halinde bulunan malzemeye su ilave edilerek meydana getirilen hamurun, başlangıçta sahip olduğu plastikliği zamanla kaybetme ve bunu izleyerek sertleşme özelliği vardır. Bu özelliği sayesinde bağlayıcı madde, tanelerden oluşan muhtelif malzemede taneleri birbirine bağlamakla istenilen şekil ve boyutta yapı elemanlarının elde edilmesini sağlar. Bağlayıcı maddeler; kireç, puzolan ve çimento olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılır.

#### 2.2.1.1 Kireç (CaO)

Kireç  $\text{CaCO}_3$ 'ün  $900^\circ\text{C}$ 'in üstünde pişirilmesiyle elde edilir. Kalkerden başka,  $\text{CaCO}_3$  ile  $\text{MgCO}_3$ 'ü aynı zamanda içinde bulunduran dolomit taşlarının da yüksek derecede pişirilmesiyle kireç elde edilir. Bu kireç CaO ve MgO'den oluşur. Amorf bir görünüme sahip beyaz bir maddedir. Kübik sistemde kristalleşme yapar.  $1690^\circ\text{C}$ 'de buharlaşmaya  $2570^\circ\text{C}$ 'de ergimeye,  $2850^\circ\text{C}$ 'de kaynamaya başlar. Silis, alümina ve demir oksit ile birleşme özelliği vardır.

#### 2.2.1.2 Puzolanlar

Volkanik küllerin bünyesinde olduğu gibi, "içerisinde silis ve alümin bulunduran ve söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan bütün malzemeler"e genel bir isim verilerek puzolan denilmektedir. Puzolanların tek başına bağlayıcılık özelliği yoktur (Postacıoğlu, 1975). Bu malzemeler çok ince taneli durumda olduklarında (veya ince olarak öğütüldüklerinde) ve kalsiyum hidroksitle rutubetli bir ortamda kimyasal reaksiyona girdikleri takdirde, hidrolik bağlayıcılık değeri kazanmaktadırlar (Erdoğan, 1995).

**Silis ( $\text{SiO}_2$ ):** Doğada bol şekilde bulunan silisin 4 çeşidi vardır.

1. Kuvars
2. Tridimit
3. Kristobalit
4. Amorf silis (fulgurit)

**Alümin ( $Al_2O_3$ ):** Alümin doğada renksiz korendon halinde bulunur. Saf olduğu zaman saydamdır, yabancı maddeler içinde bulunduğu grimsi ve mavimsi renkler alır (Postacıoğlu, 1975).

Puzolanlar; doğal puzolanlar ve bir üretim sırasında yan ürün olarak ya da atık malzeme olarak elde edilen yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar.

1. Doğal puzolanlar: Volkanik küller, volkanik tüfler (traslar), pomza taşları ve opalin çeşitleridir. Bu örneklerin dışında pişirildiği zaman puzolanik özellik kazanan killeri ve şeylleri de bu sınıf içerisinde sayabilmek mümkündür.

2. Yapay puzolanlar: Termik santrallarda elektrik üretimi için yakıt olarak kullanılan öğütülmüş kömürden atık malzeme olarak elde edilen ve “uçucu kül” denilen ince küller; silikon metali veya alaşımlarını elde ederken ortaya çıkan silis buharının yoğunlaştırılması sonucu elde edilen “mikrosilis” veya “silis dumanı”; bazı cüruflar bu sınıfa girer (Erdoğan-II, 1995).

### 2.2.1.3 Çimento

Çimentolar, taneli malzemenin boşluğunda yer alan ve su ile birleştiğinde önce bir hamur meydana getiren, sonra da sertleşerek dayanım kazanan ve böylece bir kütle meydana gelmesini sağlayan, genel bileşenleri itibariyle, kil ve kireç bünyeli bağlayıcı malzemedir.

Çimento ve suyun bir araya gelmesiyle elde edilen çimento hamuru, başlangıçta plastik bir yapıya sahiptir ve bu iki malzemenin birleştiği andan itibaren aralarında hidrasyon (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar) başlamaktadır. Hidrasyonun devam etmesiyle, başlangıçta plastik yapıya sahip olan çimento hamuru giderek plastikliğini kaybetmekte, zamanla katılaşarak sert bir malzeme durumunu almaktadır.

Çimento hamurunun bağlayıcılık kazanma hızı ve miktarı, çimento ile su arasındaki hidrasyonun ne mükemmellikte oluştuğuna bağlıdır. Hidrasyonun ne hızda ve mükemmellikte olabileceği konusu ise, sıcaklık ve rutubet ortamlarına ek olarak büyük ölçüde, çimento kompozisyonuna, çimento inceliğine ve betonda kullanılan çimento miktarına bağlıdır. Hidrasyon ürünlerinin artması, çimento hamuru içerisindeki kapiler boşlukların

azalmasını da sağladığından, çimentonun ne ölçüde hidratasyon yaptığı konusu, sadece çimento hamurunun (betonun) dayanımını değil, dayanıklılığını da etkilemektedir.

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar sırasında, “hidratasyon ısı” denilen bir miktar ısı açığa çıkmaktadır. Hidratasyon ısısının açığa çıkma hızı ve miktarı üzerinde çimentonun hidratasyon hızının ve hidratasyon miktarının çok büyük payı bulunmaktadır. Betonun maruz kaldığı sıcak ve soğuk hava koşulları da, hidratasyon hızını etkilediği için, hidratasyon ısısının hızı ve miktarı üzerinde etkili olmaktadır (Erdoğan-I, 1995).

Çimentolar az miktarda bulunan demiroksit ( $Fe_2O_3$ ) kristal yapıya sahiptir. Pişirme esnasında hem kireçle ve hem de alüminatla birleşerek ferro alüminat kalsitleri oluşturur. Çimentonun gri renk olmasına bu madde sebep olmaktadır. Bu itibarla beyaz çimentolarda demiroksit pratik olarak bulunmamaktadır (Postacıoğlu, 1975).

Çimentodaki MgO ile  $K_2O$  ve  $Na_2O$  gibi alkali oksitler, hammadde içerisinde yer alan ve çimentonun olumlu özelliklerine önemli katkıları olmayan maddelerdir. MgO genleştirici etkisi olan  $MgCO_3$ 'ün oluşmasına, alkaliler ise agregada bulunabilecek reaktif silisle reaksiyona girerek, yine genleştirici etkisi olan, alkali – silis jellerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar yavaş olduğundan, o zamana kadar sertleşen betonda yaratacakları genleşmeler beton için son derece zararlı olmaktadır (Erdoğan-I, 1995). Bu jeller su emdikçe hacimlerinde bir genişleme olur. Bu genişlemeler de betonda çatlakların oluşmasına, basınç ve diğer mukavemetlerin de düşmesine sebep olur. Meydana gelen bu olay alkali - agrega reaksiyonu olarak bilinmektedir ve bu reaksiyonun oluşması birkaç yıl sürmektedir. Çimentoda ayrıca öğütülmeden önce katılmış bulunan jipsten dolayı az miktar  $SO_3$  bulunabilir. Çimento üretiminde kullanılan kömürde bir miktar kükürt bulunabilir. Kömürün yanması sonunda oluşan  $SO_3$ 'ün bir kısmı çimentoya karışır. Aynı zamanda ilkel malzeme içinde kükürdün var olması nedeniyle da çimentoda bir miktar  $SO_3$  bulunabilir. Çimentodaki  $SO_3$  miktarı genel olarak küçük bir değer olmakla birlikte bunun varlığı yine bazı hallerde çimentonun kullanılmasında önemli zararlar meydana getirir.

Çimentolar çeşitli yapılarda çok farklı şekillerde kullanılmaktadır. Çimentodan her kullanıldığı yerde değişik ve belirli bazı özelliklere sahip olması istenir. Bu özellikleri yerine getirmeyen çimentonun o yerde kullanılması mukavemetin düşük olması, dayanıklılığın azalması, çatlakların meydana gelmesi gibi çok önemli zararlara yol açar. Bu nedenle çimentonun genel özellikleri hakkında bazı bilgilere sahip olunmalıdır (Postacıoğlu, 1975).

### 2.2.1.3.1 Çimento çeşitleri

İnşaat sektöründe, kullanım amaçlarının farklılığından dolayı farklı özelliklere sahip çimentolar üretilmektedir. Bunlar;

1. Portland çimentoları
2. Doğal çimentolar
3. Puzolanlı çimentolar
4. Yüksek fırın çimentoları
5. Alüminli çimentolar
6. Özel çimentolardır (Şanbaşıoğlu, 1997).

#### 2.2.1.3.1.1 Portland çimentoları

Portland çimentosu, uygun oranlarda birleştirilen kalkerli ve killi hammadde karışımının, döner fırında yaklaşık 1450°C'a kadar pişirilmesiyle elde edilen ve klinker denilen ürünün, soğuduktan sonra, küçük bir miktar (%3 – %6) alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilmektedir. Portland çimentosunun tipik kimyasal analizi Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2 Portland çimentosunun kimyasal analizi (Erdoğan-I, 1995)

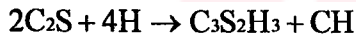
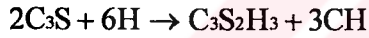
Ana oksitler	Formülü	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60 – 67
Silis	SiO <sub>2</sub>	S	17 – 25
Alümin	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3 – 8
Demir	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0.5 – 6
Kükürt trioksit	SO <sub>3</sub>	S	1 – 3
Manezit	MgO	M	0.1 – 4
Alkaliler	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	N + K	0.1 – 1.3

Hammadde karışımında bulunan oksitler, döner fırın içerisindeki sıcaklık etkisiyle, oldukça karmaşık bir takım reaksiyonlara girerek bileşenler oluşturmaktadır. Portland çimentosu klinkerinde (ve çimentoda) oluşan dört ana bileşenin isimleri Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Çimentonun ana bileşenleri (Erdoğan-I, 1995)

Ana bileşenler	Sembolleri
Di.kalsiyum.silikat ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ )	$\text{C}_2\text{S}$
Tri.kalsiyum.silikat ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ )	$\text{C}_3\text{S}$
Tri.kalsiyum.alüminat ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ )	$\text{C}_3\text{A}$
Tetra.kalsiyum.alüminoferrit ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	$\text{C}_4\text{AF}$

Portland çimentosu ve su birleştirildiği takdirde, çimentodaki her bileşen ayrı ayrı hidrasyon yapmakta, ayrı hidrasyon ürünleri oluşturmakta ve bunların toplam etkisi, çimentonun hidrasyon etkisi olarak ortaya çıkmaktadır. Çimentoların bağlayıcılık değerini tayin eden bileşenler, kalsiyum silikatlı bileşenler olan  $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$ ’dir. Bu bileşenlerin hidrasyon reaksiyonları, çimento kimyasındaki bileşenleri ile şu şekilde gösterilmektedirler;



Burada CH, kalsiyum hidroksittir;  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  ise, tobermorit ismi verilen (kısaca C – S – H jeli) çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlayan hidrasyon ürünüdür (Erdoğan-I, 1995).

### 2.2.1.3.1.2 Doğal çimentolar

Doğal çimentolar kalkerli ve killi maddeler karışımının erime noktası altında bir sıcaklığa kadar kızdırılmaları sonucu elde edilen bir bağlayıcıdır. İngilizlerin “Roman”, Amerikalıların “Rock Cement”, Belçikalıların ve Fransızların “Tabii Çimento” adı altında kullandıkları çimentolar bu tiptir. Tabii çimentolar kireç ile portland çimentosu arasında bir bağlayıcıdır. Doğrudan doğruya tabiatın çıktığı şekilde kızdırılarak yapıldığı için diğer çimentolara nazaran kimyasal yapısı çok değişiktir (Kocaçitak, 1978).

### **2.2.1.3.1.3 Puzolanik çimentolar**

%65 – 89 veya %45 – 64 oranında portland çimentosu klinkeri ile %11 – 35 veya %36 – 55 oranında katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi neticesinde elde edilen çimentodur. Bu tür çimentolar genellikle su geçirimsizliği az, sülfatlı sulara dayanıklı, hidrasyon ısısı düşük, donmaya dayanıklılığı az olan çimentolardır. Baraj, liman ve temel inşaatlarında çok kullanılan çimento türüdür.

### **2.2.1.3.1.4 Yüksek fırın cüruf çimentosu**

Ani soğutularak granül hale getirilmiş bazik yüksek fırın cürufu ile, portland çimento klinkeri ve alçı taşının belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmeleri sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

Portland çimentosu üretimi için kullanılan klinkere alçı taşı yanında, birdenbire soğutularak topak hale getirilmiş bazik yüksek fırın cürufu katılarak öğütülür. Yüksek fırın cürufu ülkelere göre %20 – %80 oranında katılır. Portland çimentosundan daha dayanıklı olduğu için ve deniz suyuna, sülfatlı sulara dayanıklı olduğundan liman inşaatlarında yaygın olarak kullanılır.

### **2.2.1.3.1.5 Alüminli çimentolar**

Alüminli bileşenleri zengin bir çimento cinsi olup, bu özelliğini hammaddesinin kalker ve düşük nitelikteki boksit veya diaspor olmasından almaktadır. Diğer çimentolara göre kısa sürede sertleşmeleri ve yüksek dayanım kazanmaları belirgin özellikleridir.

### **2.2.1.3.1.6 Özel çimentolar**

- a) Beyaz çimento: Demir ve titan oksitten arındırılmış kalker ve kaolenin kullanımı ile normal portland çimentosu gibi elde edilen, ancak üretiminin dikkatle yapılması sonucunda rengi beyaz olan, dayanımı fazla olmayan, daha çok süs olarak kullanılan çimentodur.
- b) Renkli çimentolar: Normal portland çimentosunun veya beyaz çimentonun çeşitli pigmentlerle renklendirilmesi sonucu elde edilen çimentodur.
- c) Sıva çimentosu: Normal çimentoların sıva işleminde yeterli kolaylığı sağlamaması nedeniyle daha plastik özelliğe sahip çimentolar üretilmiştir. Bu çimentolar normal portland çimentosuna değişik katkıların katılmasıyla yapılmıştır.

d) Su geçirmez çimentolar: Normal portland çimentosuna öğütülme sırasında kalsiyum stearat veya sabunlaşmayan bir yağ ilave etmek veya alçının tannik asitle karışımının katılmasıyla elde edilen çimentolardır.

e) Derin kuyu çimentoları: Normal portland çimentosu hammaddesine belirli ölçüde demir oksit ilave edilerek karışımdaki bütün alüminyum oksitlerin demir oksitle birleşip  $C_4AF$  elde edilmesiyle oluşturulan çimentolardır. Kükürt korozyonuna, tuzlu su etkisine dayanıklıdır. Yüksek ısı ve basınç altında sertleşme özelliğine sahip olan bu tür çimentolar petrol kuyularında kullanılırlar (Şanbaşoğlu, 1997).

#### 2.2.1.3.2 Türkiye’de üretilen çimentolar

Türkiye’de PÇ 32.5, PÇ 42.5 ve PÇ 52.5 olarak üç tip portland çimentosunun ve onbir diğer çimento tiplerinin üretimi için Türk Standartları bulunmaktadır. Bu çimentoların isimleri ve Türk Standartlarınca aranan fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7’de gösterilmiştir (Tonak, 1995).

Çizelge 2.4 Çimentoların bileşimi (Tonak, 1995)

Adı	Sembolü	TS numarası	Tras (%)	Cüruf (%)	Uçucu kül (%)
Portland çimentosu 32.5	PÇ 32.5	TS 19	—	—	—
Portland çimentosu 42.5	PÇ 42.5	TS 19	—	—	—
Portland çimentosu 52.5	PÇ 52.5	TS 19	—	—	—
Erken dayanımı yüksek çimento	EYÇ 52.5	TS 3646	—	—	—
Beyaz portland çimentosu 32.5	BPÇ 70 BPÇ 85	TS 21	—	—	—
Beyaz portland çimentosu 42.5	BPÇ 70 BPÇ 85	TS 21	—	—	—
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	TS 10156	Maksimum 19		
Traslı çimento	TÇ 32.5	TS 26	20 – 40	—	—
Cürufllu çimento 32.5	CÇ 32.5	TS 20	—	20 – 80	—
Cürufllu çimento 42.5	CÇ 42.5	TS 20	—	20 – 80	—
Uçucu küllü çimento	UKÇ 32.5	TS 640	—	—	10 – 30
Sülfatlara dayanıklı çimento	SDÇ 32.5	TS 10157	—	—	—
Süper sülfat çimentosu	SSÇ 32.5	TS 809	—	Min. 65	—
Harç çimentosu	HÇ 16	TS 22	Maksimum 60		

Çizelge 2.5 Gerekli kimyasal özellikler (Tonak, 1995)

Adı	Sembolü	Kızdırma kaybı (%) maks	Çözünmeyen kalıntı (%) maks	SO <sub>3</sub> (%) maks	MgO (%) maks	Cl (%) maks
Portland çimentosu 32.5	PÇ 32.5	4.0	1.5	3.5	5.0	0.1
Portland çimentosu 42.5	PÇ 42.5	4.0	1.5	3.5	5.0	0.1
Portland çimentosu 52.5	PÇ 52.5	4.0	1.5	3.5	5.0	0.1
Erken dayanımı yüksek çim.	EYÇ 52.5	4.0	1.5	3.5	5.0	0.1
Beyaz portland çim. 32.5	BPÇ 70 BPÇ 85	5.0	5.0	4.0	5.0	0.1
Beyaz portland çim. 42.5	BPÇ 70 BPÇ 85	5.0	5.0	4.0	5.0	0.1
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	4.0	—	3.5	5.0	0.1
Traslı çimento	TÇ 32.5	5.0	—	3.5	5.0	0.1
Cürüflü çimento 32.5	CÇ 32.5	5.0	—	3.5	10	0.1
Cürüflü çimento 42.5	CÇ 42.5	5.0	—	3.5	10	0.1
Uçucu küllü çimento	UKÇ 32.5	5.0	29.0	4.0	5.0	0.1
Sülfatlara dayanıklı çimento	SDÇ 32.5	5.0	1.5	3.5	5.0	0.1
Süper sülfat çimentosu	SSÇ 32.5	—	3.0	Min 4.5	9.0	0.1
Harç çimentosu	HÇ 16	—	50.0	—	—	—

Çizelge 2.6 Gerekli fiziksel özellikler (Tonak, 1995)

Adı	Sembolü	Priz Başlama Süresi (dakika) min	Priz Sona Erme Süresi (saat) maks	Hacim Genleşmesi (mm) min	Özgül yüzeyi (cm <sup>2</sup> /gr) min
Portland çimentosu 32.5	PÇ 32.5	60	10	10	2800
Portland çimentosu 42.5	PÇ 42.5	60	10	10	2800
Portland çimentosu 52.5	PÇ 52.5	60	10	10	2800
Erken dayanımı yüksek çim.	EYÇ 52.5	45	6	10	3500
Beyaz portland çim. 32.5	BPÇ 70	45	10	10	2800
	BPÇ 85	45	10	10	2800
Beyaz portland çim. 42.5	BPÇ 70	45	10	10	2800
	BPÇ 85	45	10	10	2800
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	60	10	10	2800
Trashlı çimento	TÇ 32.5	60	10	10	2800
Cürüflü çimento 32.5	CÇ 32.5	60	10	10	2800
Cürüflü çimento 42.5	CÇ 42.5	60	10	10	2800
Uçucu küllü çimento	UKÇ 32.5	60	10	10	2800
Sülfatlara dayanıklı çimento	SDÇ 32.5	60	10	10	2800
Süper sülfat çimentosu	SSÇ 32.5	45	10	5	4000
Harç çimentosu	HÇ 16	60	24	10	2800

Çizelge 2.7 Gerekli mekanik özellikler (Tonak, 1995)

Adı	Sembolü	Basınç mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )		
		2 günlük mukavemet	7 günlük mukavemet	28 günlük mukavemet
Portland çimentosu 32.5	PÇ 32.5	10	21	32.5
Portland çimentosu 42.5	PÇ 42.5	20	31.5	42.5
Portland çimentosu 52.5	PÇ 52.5	25	35.5	52.5
Erken dayanımı yüksek çimento	EYÇ 52.5	30	40	52.5
Beyaz portland çimentosu 32.5	BPÇ 70 BPÇ 80	10	21	32.5
Beyaz portland çimentosu 42.5	BPÇ 70 BPÇ 80	20	31.5	42.5
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	10	21	32.5
Traslı çimento	TÇ 32.5	10	21	32.5
Cürüflu çimento 32.5	CÇ 32.5	10	16	32.5
Cürüflu çimento 42.5	CÇ 42.5	10	21	42.5
Uçucu küllü çimento	UKÇ 32.5	10	21	32.5
Sülfatlara dayanıklı çimento	SDÇ 32.5	10	21	32.5
Süper sülfat çimentosu	SSÇ 32.5	10	21	32.5
Harç çimentosu	HÇ 16	—	10	16

### 2.2.1.3.3 Çimentoların inceliği

Klinker tanelerinin boyutları ne kadar küçültülüyorsa, yani taneler ne kadar inceltilyorsa, çimentonun inceliği o kadar fazlalaşiyor demektir. İnceliği yüksek olan bir çimentoyu meydana getiren taneler çok küçük boyutlara sahip bulunmaktadır.

Genel olarak çimentolarda boyutları 90 $\mu$ 'dan büyük olan tane miktarının %14'ü geçmemesi istenir. Bu özellik hemen hemen yerine gelmektedir. Çimentoda 90 $\mu$ 'dan çok daha küçük boyutta taneler bulunmaktadır. Tane boyutları veya çapları, 6.5 $\mu$ 'a inebilmektedir.

#### **2.2.1.3.4 Çimentoların prizi**

Priz, bağlayıcı maddelerin katılaşması veya plastik deformasyon yapma kabiliyetini kaybetmesi demektir. Priz bakımından bilinmesi gerekli iki karakteristik vardır ki bunlardan biri priz başlama süresi, diğeri de priz sona erme süresidir. Bir bağlayıcı madde hamuruna başlangıçta kolaylıkla şekil verilirken bir süre geçtikten sonra hamurun durumunda birdenbire olan bir değişme sonunda hamur şekil verilmeye karşı bir direnç gösterir. Bu olay prizin başladığını ortaya koymaktadır. Diğeri bir deyişle priz başlaması bu olayın normal gelişmesinde ani bir değişiklikle kendini belli eder. Buna karşılık priz başladıktan sonra olayın gelişmesinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır.

Çabuk priz yapan çimentolar, her türlü su kaçaklarını önlemek amacıyla yapılan işlemlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Çok yavaş priz yapan bağlayıcı maddelerin çatlamadan fazla deformasyon yapma kabiliyeti vardır. Çok fazla deformasyona maruz kalan yapı elemanlarında bu cins bağlayıcı maddelerin kullanılması önerilir.

#### **2.2.1.3.5 Hidratasyon ısısı**

Bağlayıcı maddeler priz ve sertleşme esnasında bir miktar ısı açığa çıkartırlar ki buna hidratasyon ısısı denir. Bu ısı doğrudan çimentoyu oluşturan bileşenlerin su ile yapmış oldukları kimyasal reaksiyonda veya hidratasyonda meydana gelmektedir. Hidratasyon olayının uzun sürmesi sonunda ısı da uzun süre meydana gelmekte veya açığa çıkan ısının toplam miktarı senelerce artmaya devam etmektedir.

#### **2.2.1.3.6 Çimentoların rötresi**

Rötre tamamen çimentonun sebep olduğu bir olaydır. Bu itibarla betonun yaptığı rötre, bu malzemede saf çimento hamuruna nazaran çok daha az çimento bulunmasından dolayı bir hayli düşüktür. Bununla beraber betonda meydana gelen rötre, normal şartlar dahilinde üretilen bir betonda 100 kg/cm<sup>2</sup>'lik bir gerilmenin meydana getirdiği deformasyon mertebesinde dir. Bu sebeple betonun rötresi bir çok bakımdan yapılarda göz önünde bulundurulmalıdır.

### 2.2.1.3.7 Fırındaki reaksiyonlar

Ham malzeme fırına konulduktan sonra sıra ile şu olaylar gerçekleşir;

1. İlk olay malzeme karışımının içinde bulunan suyun buharlaşmasıdır: Bu olay 100°C veya daha alçak bir sıcaklıkta tamamlanır.
2. Kildeki bileşim suyunun ayrılması: Kilin içinde bulunan en önemli madde  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  formülüne sahip bulunan kaolinitdir. 500°C civarındaki bir sıcaklıkta su molekülünün kaolinitten ayrılması ile bu madde ayrışma yapar. Bunun sonunda amorf silisden, amorf alümin meydana gelir. Daha yüksek sıcaklık derecesinde amorf alümin kristal alümine dönüşür.
3. Kalsiyum karbonatın ayrışımı: Birbirine iyi bir şekilde karışmış bulunan kalsiyum karbonat ile kuvars arasındaki reaksiyonlar 600°C’de yavaş bir şekilde başlar. Fakat 900°C’de kalsiyum karbonatın ayrışmasından sonra bu reaksiyonlar önemli derecede hızlanır.
4. Kireç ile silisin birleşmesi: 1200°C’den itibaren kireçle silisin birleşmesi yani silikatların oluşması belirli bir şekilde başlar. Fırındaki sıcaklığın 1500°C’ye ulaşması ile bu reaksiyonlar çok daha hızlanır. Bu arada kireç de alüminle birleşerek alüminatlar oluşur (Postacıoğlu, 1975).

### 2.2.2 Agregalar

Bağlayıcı maddeler genel olarak mineral kökene sahip belirli boyutta sert tanelerden ibaret bulunan ve agregası ismi verilen malzeme ile birlikte kullanılır (Postacıoğlu, 1987). TS 706’ya göre agregası; doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin, genellikle 100 mm’ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerinin bir yığıdır. Agregalar; doğal ve yapay, iri ve ince agregası diye sınıflandırılabilir. Doğal agregası; teraslardan, nehirlerden, denizlerden, göllerden ve taş ocaklarından elde edilen kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıllı agregasıdır. Yapay agregası; yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıllı agregasıdır. İri agregası; 4 mm göz açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregasıdır. İnce agregası ise; 4 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçen agregasıdır (TS 706, 1980).

Özgül ağırlıklarına göre agregaları şu şekilde sınıflandırabiliriz;

**Ağır agregalar:** Atom reaktörlerinde ve benzeri yerlerde meydana gelen ve organları tahrip eden  $\gamma$  ve X ışınlarından korunmak için birim ağırlığı  $3200 \text{ kg/m}^3$ 'den büyük olan betonun üretimine ihtiyaç vardır. Bu özellikte bir beton da ancak ağır agregaya kullanılması ile elde edilebilir. Bu amaçla kullanılan belli başlı agregaların cinsleri, bileşimleri ve bunların özgül ağırlıkları aşağıda verilmiştir:

Barit	$\text{BaSO}_4$	özgül ağırlık = $4200 \text{ kg/m}^3$
Magnetit	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	özgül ağırlık = $4600 \text{ kg/m}^3$
Limonit	$2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	özgül ağırlık = $3700 \text{ kg/m}^3$

**Hafif agregalar:** Hafif agregalar ile, içinde fazla boşluk bulunması nedeniyle birim ağırlığı düşük agregalar anlaşılmaktadır. Bu tür agregaların kullanım amacı da hafif beton elde etmektir. Hafif betonun yapılarda kullanılmasının taşıyıcı elemanlara gelen yükleri azaltmak, ısı iletkenlik katsayısının küçük bir değer almasını sağlamak ve ısı kaybını önlemek gibi yararları vardır. Beton üretiminde kullanılan hafif agregaları doğal ve yapay olarak iki gruba ayırabiliriz.

- Doğal hafif agregalar: Doğal hafif agregaların içinde en önemlisi volkanik bir kökene sahip olan sünger taşıdır. Bu taş çok fazla boşluklu bir yapıya sahip olduğu için, bunların parçalanmasından meydana gelen agregaların birim ağırlığı  $750 \text{ kg/m}^3$  dolayındadır. Hafif doğal agregaya olarak kullanılan diğer bir malzeme tüftür. Volkanik kökenli olan tüfün de birim ağırlığı  $1400 \text{ kg/m}^3$  civarındadır.

- Yapay hafif agregalar: Yapay hafif agregalar, ısıl işleme maruz bırakılarak genişmesini sağlamak suretiyle elde edilen agregalardır. Bu şekilde üretilen genişleştirilmiş kil ve şist agregalarının birim ağırlığı  $650 - 1200 \text{ kg/m}^3$  aralığında değerler almaktadır. Vermikülit ve perlitin genişmesi sonucunda çok daha fazla miktarda boşluk elde edilir. Dolayısıyla birim ağırlıkları  $160 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar düşmektedir (Postacıoğlu, 1987).

### 3. HAFİF BETON

#### 3.1 Hafif Beton

Birim ağırlığı normal betonlardan belirli şekilde küçük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Hafif betonlar, kuru birim ağırlıkları  $300 - 2000 \text{ kg/m}^3$  arasında olan, kübik basınç dayanımları ise  $10 \text{ kgf/cm}^2$ 'den  $612 \text{ kgf/cm}^2$ 'ye kadar çıkabilecek şekilde üretilebilen betonlardır (Clarke, 1993). Genel olarak birim ağırlığı  $1800 \text{ kg/m}^3$ 'den küçük bulunan betonlar hafif beton sınıfına girer (Postacıoğlu, 1987). ASTM C-330-69'a göre, birim ağırlıkları  $1840 \text{ kg/m}^3$ 'ü geçmeyen ve silindir basınç dayanımı  $173 \text{ kgf/cm}^2$ 'yi aşan betonlar hafif beton sınıfına girer kabul edilmektedir (Karagüler, 1988). DIN 1045'e göre ise, birim ağırlığı  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'ün altında olan betonlar hafif betondur (DIN 1045, 1988).

Hafif betonlar çimento, birim ağırlığı düşük hafif agrega ve normal agregadan meydana gelmektedir. Agrega karışımında hafif agrega miktarının artırılmasıyla daha hafif veya birim ağırlığı daha düşük olan betonlar elde edilmektedir (Postacıoğlu, 1987).

#### 3.2 Hafif Betonun Tarihçesi

Doğal kaynaklardan hafif agrega üretiminin tarihi Romalılar dönemine kadar uzanıyor ve günümüze kadar devam ediyor. 19. Yüzyıl sonlarında betonarmenin gelişmesiyle ve gelişmiş ülkelerin çoğunda doğal gözenekli agrega yataklarının nadir bulunması veya hiç varolmaması nedeniyle, yapay agrega üretimi için araştırmalar başladı. 20.Yüzyılın başlarında demir üretimi endüstriyel altyapının temelini oluşturduğu için, gelişmeler yüksek fırın cürufu üzerinde yoğunlaştı. Bununla birlikte 1970'li yılların başında geliştirilen yüksek fırın cüruflarında kayda değer gelişmeler meydana geldi. Böylece günümüzde taşıyıcı betonlar için uygun olan daha pürüzsüz yüzeyli cüruf içerikli agregalar üretildi. Cürufla karşılaştırıldığında, 1913'lü yılların öncesinde Amerika'da yapılan araştırmalar kil ve şistlerin yakıldıklarında genleştiklerini ispatlamıştı.1917 yılında, hafif beton üretiminde kullanılabilecek geliştirilmiş kil ve şist agregalarını üretecek döner fırın sistemi, Hayde tarafından dizayn edildi. Bu sistem ilk olarak 1919'da USS Selma isimli okyanus tipi geminin inşasında kullanıldı. Taşıyıcı hafif beton ilk olarak 1921'li yıllarda St. Louis'de Park Plaza Otel inşaatında uygulanmıştır. 1950'lerden sonra ise, hafif betonunun birçok büyük yapıda kullanıldığını görmek mümkündür. Bunların içinde en göze batan örnekler; St. Louis'deki Busch Memorial Stadyumu, Washington D.C.'deki Watergate Blokları, Chicago'daki Lake Point Kuleleri ve

University of Illinois at Urbana-Champaign'deki Kongre Salonudur (Mindess ve Young, 1981; Clarke, 1993).

### 3.3 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonları, kullanım amaçlarına ve elde edilişlerine göre sınıflandırmak mümkündür. Birim ağırlık – mukavemet temelinde, hafif betonları kullanım amaçlarına göre;

- Düşük mukavemet – düşük birim ağırlıklı, yalıtım hafif betonları
- Orta mukavemetli, hem taşıyıcı hem yalıtım hafif betonları
- Yüksek mukavemetli, taşıyıcı hafif betonlar

şeklinde sınıflandırmak mümkündür (Mindess ve Young, 1981; Clarke, 1993). Hafif betonların kullanım amaçlarına göre sınıflandırılması Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Hafif betonların sınıflandırılması (Clarke, 1993)

Özellik	Hafif beton sınıfı		
	Taşıyıcı	Taşıyıcı / yalıtım	Yalıtım
Basınç mukavemeti (kgf/cm <sup>2</sup> )	612 – 153	> 36	> 6
Isı aktarım katsayısı (W/mK)	—	< 0.75	< 0.30
Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1600 – 2000	1450 – 1600	<<1450

**Taşıyıcı hafif betonlar:** Taşıyıcı hafif betonlar, birim ağırlıkları 1400 ile 1900 kg/m<sup>3</sup> arasında olan betonlardır (Neville, 1996). Birim ağırlıkları 1600 ile 2000 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen betonlar olarak da tanımlanmaktadır (Clarke, 1993). TS 2511'e göre ise taşıyıcı hafif beton, kurumuş halde havadaki birim ağırlığı 1900 kg/m<sup>3</sup>'den az olan ve en az 160 kgf/cm<sup>2</sup> basınç dayanımına sahip olan betondur (TS 2511, 1977).

Bu tür betonların betonarme yapılarda kullanılmasıyla daimi yükün %25 gibi belirgin bir ölçüde azalması sağlanmaktadır. Bundan dolayı betonarme yapı tekniğinde taşıyıcı hafif beton kullanılması eğilimi gittikçe artmaktadır. Bu tür yapı malzemesinin kullanılmasının başlıca nedeni, yapının tüm ağırlığının azaltılmasını sağlayarak taşıyıcı elemanların kesitlerini küçültmek ve böylelikle işin maliyet bedelini düşürmektir (Postacıoğlu, 1987).

Taşıyıcı hafif beton için basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör, normal betonda olduğu gibi su/çimento oranıdır. Taşıyıcı hafif betonun karışım hesabını üç faktör etkiler:

- Basınç dayanımı: Su/çimento oranına bağlıdır,
- İşlenebilirlik: Agreganın türüne bağlı olarak su içeriğine göre değişir,
- Birim ağırlık: Agreganın ve çimento içeriğine bağlıdır (TS 2511, 1977).

**Taşıyıcı olmayan hafif betonlar:** Bu betonlar genelde izolasyon amacı ile kullanılırlar. Birim ağırlıkları 300 ile 1200 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, basınç mukavemetleri de 50 ile 170 kgf/cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir (Ulus, 1998).

Hafif betonlar, elde edilme şekline göre ise üç genel yöntem altında sınıflandırılabilirler:

- Normal agreganın yerine, boşluklu olan, doğal veya yapay yolla elde edilmiş hafif agregalar kullanarak elde edilen hafif beton,
- Beton içinde fiziksel veya kimyasal yolla boşluk oluşturularak elde edilen gaz ve köpük beton,
- Betonda ince agreganın kullanılmayarak elde edilen hafif betonlar (Karagüler, 1988).

### 3.4 Hafif Betonun Özellikleri

#### – Mühendislik Özellikleri

Hafif betonların mühendislik özellikleri büyük ölçüde karışım dizaynı içinde kullanılan materyallere bağlıdır. Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi, yüksek porozite ve agreganın kendisine özgü zayıflığına rağmen, bazı hafif agregalarla beton mukavemetini 422 kgf/cm<sup>2</sup>’e kadar çıkarmak mümkündür. Hafif betonlarda mukavemet ve birim ağırlık arasındaki ilişki, kullanılan agreganın cinsine ve kumun miktarına bağlıdır.

Çizelge 3.2 Hafif beton özellikleri (Mindess ve Young, 1981)

Agrega tipi	Agrega birim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç mukavemeti (kgf/cm <sup>2</sup> ) (28 günlük)	Beton birim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )
Genleştirilmiş vermikülit ve perlit	64 – 240	5 – 35	400 – 1120
Pomza	480 – 880	14 – 39	720 – 1120
Köpürmüş cüruf	480 – 960	14 – 56	960 – 1520
Sinterleştirilmiş yakıt külü	640 – 960	29 – 70	1120 – 1280
Genleştirilmiş kil veya şist	560 – 1040	56 – 85	960 – 1200
Klinker	720 – 1040	21 – 70	720 – 1520
Doğal agrega	1360 – 1600	42 – 141	1600 – 1920
Hafif agrega	480 – 1040	29 – 70	880 – 1200
Köpürmüş cüruf	480 – 960	105 – 422	1680 – 2080*
Sinterleştirilmiş yakıt külü	640 – 960	141 – 422	1360 – 1760*
Genleştirilmiş kil veya şist	560 – 1040	141 – 422	1360 – 1840*

\*Bu nispeten ağır betonlar ince hafif agregaya yerine doğal kum kullanılarak elde edilmiştir.

Yüksek mukavemet değerine ulaşmak için, düşük w/c (su/çimento) oranı istenmektedir. Ancak hafif agregaların çoğunda karşılaşılan yüksek absorpsiyon değeri, kıvam için gerekli olan w/c oranını hesaplamayı zorlaştırır. Yüksek mukavemet sağlamak için, hamurda düşük w/c oranına ihtiyaç duyulmasının anlamı, aynı mukavemetteki normal betonla karşılaştırıldığında, taşıyıcı hafif betonlarda daha fazla çimento içeriğinin gerektiğini ifade etmektedir (Çizelge 3.3). Bunun yanı sıra, hafif agregaların fiziksel özelliklerinden dolayı beton kıvamı çalışılabilirliği sağlamak için istenen akıcı kıvamdan daha fazladır. Yüksek porozitelerinden dolayı hafif agregalar daha düşük elastisite modülüne sahiptirler. Bunun

Bunun sonucu olarak da, hafif betonların elastisite modülü normal betonlarından daha düşüktür (Mindess ve Young, 1981).

Çizelge 3.3 Hafif beton ve normal betonunun çimento içerikleri (Mindess ve Young, 1981)

Basınç mukavemeti (kgf/cm <sup>2</sup> )	Çimento içeriği (kg/m <sup>3</sup> )	
	Hafif beton	Normal beton
173	255 – 420	210 – 330
214	285 – 450	210 – 360
286	330 – 510	240 – 420
357	390 – 570	300 – 450

#### – Fiziksel Özellikleri ve Dayanıklılık

Hafif betonun ısıyla genleşme katsayısı normal betonun genleşme katsayısıyla aynı, fakat fazla miktardaki hava boşluklarından dolayı ısı iletkenliği oldukça düşüktür. Isı iletkenliği birim ağırlığına bağlıdır. Düşük ısı iletkenlik katsayısı, hafif betonun aleve dayanıklılığının normal betondan daha fazla olduğunu ifade eder.

Hafif agregalar, kayaların çoğundan daha kolay ufalanabilir, bu nedenle hafif betonlar ağır yıpranma koşulları için uygun değildir. Bununla birlikte sentetik agregaların birçoğu oldukça sert yüzeylere sahiptirler ve bu agregalardan yapılmış hafif betonlar ağır yıpranma koşulları altında hemen hemen normal betonlar kadar performans gösterirler. Doğal kumun kullanımı ve yüksek basınç mukavemeti aşınma dayanımını artırır.

Hafif betonun donma – erime dayanımı normal betonunkine benzerdir. Beton donma ve erime'ye maruz kaldığında hava girişi kullanılmalıdır. Agreganın nem içeriği kritik olabilir. Çünkü agregalar doyumluğa yakın oldukları zaman, agrega gözenekleri içindeki suyun donması dolayısıyla hacim genleşmesi, gözenek içindeki suyun dışarı çıkmasına neden olacaktır. Bu fazla suyu barındırmamak için gerekli olan yeterli hava miktarı mevcut değilse, hidrolik baskı hataya neden olabilir. Bu durumdan kaçınmak için ya agregalar karıştırma sırasında mümkün olduğunca az nem içeriğine sahip olmalı, ya da beton donma sıcaklığına

maruz kalmadan önce suyun uzaklaştırılması için yeteri kadar zamana sahip olmalıdır. Direnç; hava girişiyle, düşük w/c oranıyla, yeterli kürle ve kullanımdan önceki kurutma periyodu ile arttırılabilir (Mindess ve Young, 1981).

#### – Taze Betonun Özellikleri

Hafif beton plastik konumda normal betonla aynı özelliklere sahiptir. Karışımları, sentetik agreganın doğasından dolayı, normal beton karışımlarına göre oldukça sert olmaya eğilimlidirler. Bu yüzden, hava girişi sadece çalışılabilirliği arttırmak için arzu edilebilir bir durumdur. Karıştırmadan sonra agrega büyük miktarda su absorbe etmeye devam ediyorsa, slamp (çökme) kaybı ciddi bir problem olabilir. Agreganın rutubetli koşullarda bekletilmesi veya karışım suyunun üçte ikisinin çimento eklenmeden önce agrega ile karıştırılmasıyla bu durumdan kaçınılabilir.

Çökme, yerleştirmeyi ve mastarlamayı sağlayabilecek limitler arasında olmalıdır. Bu değerlerde minimum 5 cm, maksimum 10 cm ile sınırlı kalmalıdır. Çünkü bu değerlerin üstündeki slamplar daha hafif kaba agregaların karışımdan segregasyonuna, altındaki değerler ise beton içerisindeki boşlukların artmasına neden olurlar. Hafif betonların düşük birim ağırlıklarından dolayı daha düşük slamplara sahip olma eğilimleri unutulmamalıdır. Yerleştirme sırasında, normal beton için tavsiye edilen yöntemler kullanılarak segregasyondan kaçınılmalıdır (Mindess ve Young, 1981).

### 3.5 Hafif Betonun Üstünlükleri ve Sakıncaları

Hafif betonların normal betonlara kıyasla üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

a) Hafif betonların yapılarda kullanılmasıyla yapıların tüm ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Daha küçük ölü yükten dolayı elde edilen üstünlükler;

- Yükün azalmasıyla taşıyıcı elemanların kesit boyutlarını küçültmek mümkündür,
- Daha küçük temel boyutlarından dolayı temel maliyeti azalır,
- Betonarme elemanlarının donatısı azalır,
- Kalıp ve iskele maliyeti azalır,
- Taşıma ve yerleştirme masraflarından ekonomi sağlar.

b) Hafif betonların daha iyi ısı izolasyonu, dona dayanıklılık ve yangın direnci gibi özelliklerinden ileri gelen üstünlükleri ise;

- Isı yalıtım değeri daha yüksektir. Hafif betonun ısı yalıtım değeri normal betonun ısı yalıtımının on katı kadardır. Bu değerler sabit olmayıp kullanılan agreganın yapısına ve elde edilen betonun yoğunluğuna bağlıdır,
- Hafif betonların termik iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) çok küçük değerler alır. Bu sayede hafif beton kullanılması halinde, iç hacimlerde 20°C dolayındaki sıcaklığa çok daha az yakıt kullanarak ulaşmak mümkün olacaktır,
- Hafif betonlar yüksek ısı yalıtımına sahip oldukları için yangın ve dona dayanımının normal betondan daha iyi olduğu belirtilmektedir.

c) Hafif betonlar, betonarme yapıların depreme dayanıklılığını artırması bakımından önemlidir. Hafif betonların kullanılması sonucunda yapının tüm ağırlığının azalmasıyla, deprem sırasında daha küçük dinamik kuvvetler oluşacaktır. Dinamik etkilerin azalmasıyla, bunların oluşturacağı gerilmeler küçülecek ve depreme dayanıklılık artmış olacaktır.

d) Hafif betonların kullanılış bakımından da bazı üstünlükleri vardır:

- Prefabrikasyona daha müsait oldukları için, yapım hızları oldukça fazladır,
- Kolaylıkla kesilebilme, delinebilme ve tamir edilebilme özellikleri vardır (Postacıoğlu, 1987; Karagüler, 1988).

Hafif betonların sakıncaları ise şu şekilde sıralanabilir:

- Hafif agregaların fiyatı normal agregalardan genellikle yüksektir,
- Hafif betonların karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri daha fazla özen ister,
- Hafif agregalı betonlarda ön emdirme işlemi için özel silolar gereklidir,
- Boşluklu oldukları için dayanımları düşüktür. Agreganın tipine bağlı olmakla birlikte, normal betonla benzer dayanımlar elde etmek için daha fazla çimento kullanmak gereklidir,
- Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar. Hafif betonlar yüksek poroziteye sahip olduklarından dolayı, donatıları korozyondan koruyucu bir etki sağlayamamaktadır,
- İyi ısı yalıtımı sağlamakla birlikte, bu özelliklerini koruyabilmeleri için neme karşı yalıtımları gereklidir,

- Hafif betonların elastisite modülü düşük değerler alır (yani aynı yük altında fazla deformasyon yaparlar),
- Sünme ve rötre değerleri normal betondan daha yüksektir,
- Düşük çekme dayanımına sahip olduğu için daha fazla kayma donatısına gereksinme olur (Karagüler, 1988).

Hafif betonların, yukarıda sayılan bazı sakıncaların önemli olmadığı beton bloklar ve duvar panoları gibi yapı elemanlarında da değerlendirilmesi mümkündür.

### 3.6 Hafif Agregalar

Yoğunluğu  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'den az olan veya kuru özgül ağırlığı  $1200 \text{ kg/m}^3$ 'den az olan agregalar hafif agrega olarak tanımlanır (Clarke, 1993). TS 1114'e göre ise hafif agrega, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton imalinde kullanılan, gevşek birim ağırlığının en büyük değeri  $1200 \text{ kg/m}^3$ 'ü aşmayan, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agrega olarak tanımlanmaktadır (Çizelge 3.4). TS 1114 tabii hafif agregayı; meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış bulunan, tuf, bims (pomza), sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. gibi kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlamaktadır. Suni hafif agregayı ise; yüksek fırın cürufu, kil, uçucu kül, kuvars, perlit, obsidiyen, vermikülit, şist, arduvaz vb. gibi inorganik elemanlardan genellikle ısıtma, bazı hallerde sinterleştirme, gaz veya köpük oluşturma yolu ile gözenekleştirerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agrega olarak tanımlamaktadır (TS 1114, 1986).

Çizelge 3.4 Hafif agrega birim ağırlıkları (TS 1114, 1986)

Agrega türü	Gevşek birim ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ ) (maks)
İnce agrega	1200
İri agrega	1000
Karışık agrega	1100

Yukarıda verilmiş olan hafif agregası sınıflandırması agregaların oluşumlarına göre yapılmıştır. Eğer hafif agregaları hafif betonlarda olduğu gibi fonksiyonlarına göre sınıflandırırsak;

- Perlit ve vermikülit ile yalıtım hafif betonu,
- Pomza taşı ve volkanik cürufar ile hem taşıyıcı hem yalıtım hafif betonları,
- Genleştirilmiş kil, şist, cüruf ve arduvaz ile ise taşıyıcı hafif beton üretilebilmektedir (Neville, 1996).

Gözenekli yapılarından dolayı hafif agregaların özgül ağırlığı normal agregalarinkinden daha azdır. Hafif agregaların özgül ağırlığı aynı zamanda parça büyüklüğü ile de değişir. İnce agregalar için özgül ağırlık, iri agregalarinkinden daha fazladır. Bu durum, tane boyutu küçüldükçe büyük hava boşluklarının ezilmesi ve ince agregaların daha düşük poroziteye sahip olması sonucunda meydana gelir. Suya doygun yüzey kuru agregası elde etmenin zorluğundan dolayı, hafif agreganın özgül ağırlık ve absorpsiyon değerini tam olarak belirlemek zordur. Aynı granülasyonu ve parça şeklini sağlayan agregalar için birim ağırlık, özgül ağırlık ile orantılıdır.

Hafif agregaların parça şekli ve yüzey dokusu farklı üretim metotlarından dolayı oldukça değişir. Şekil, boyutları aynı olmakla birlikte yuvarlak veya köşeli olabilir. Yüzey dokusu ise, küçük gözeneklerle kaplı veya düzensiz küçük ve büyük gözeneklerle kaplı olarak sınıflandırılabilir. Hafif agregaların bu karakteristikleri çalışılabilirliği, su ihtiyacını, çimento içeriğini etkiler. Hafif agregaların tipik özellikleri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Gözenekli yapılarından dolayı hafif agregalar, normal agregalarla kıyaslandıklarında daha fazla su absorplama yeteneğine sahiptirler. 24 saatlik absorpsiyon testi temel alındığında, gözenek yapılarından dolayı genel olarak kuru ağırlıklarının %5’i ile %20’i arasında su absorplarlar.

Betonda kazanılan basınç dayanımı, agreganın kendisine bağlıdır. Bunu açıklayabilmek için tavan basınç dayanımı denilen bir ifade kullanılmıştır. Bir beton karışımı tavan basınç dayanımına, sadece benzer karışımlar aynı agregaya fakat maksimum çimento içeriğine sahip olduklarında ulaşırlar. Bu basınç değeri genelde iri agregadan etkilenir. Hafif agregaların çoğunda, agregaların iri kısımlarının maksimum boyutlarının azaltılmasıyla, bu tavan

değerinin yükseltilebileceği bulunmuştur. Bununla birlikte, agreganın maksimum boyutu azaltıldıkça birim ağırlık da yükselecektir (ACI E1-78, 1978).

Çizelge 3.5 Hafif agregaların tipik özellikleri (Clarke, 1993)

Tip	Şekil	Su absorpsiyonu (%)	Kuru özgül ağırlık* (kg/m <sup>3</sup> )
Genleştirilmiş kil	Yuvarlak	12 – 14	350 – 500
Genleştirilmiş arduvaz	Köşeli / düzensiz	10 – 15	560 – 720
Genleştirilmiş şist	Yuvarlak	12 – 14	500 – 800
Pomza	Köşeli / düzensiz	30 – 40	500 – 880
Sinterleştirilmiş uçucu kül	Yuvarlak	9 – 15	800 – 850
Topaklanmış, genleştirilmiş cüruf	Pürüzsüz / düzensiz	3 – 5	850 – 950

\* Hafif agreganın iri kısmı ( ince kısmı daha yoğundur )

#### 4. HAFİF BETON BİLEŞENLERİ ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

##### 4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Aletlerin Tanıtılması

**Mikser:** Beton denemelerinde, Atika markalı, 125 lt maksimum kapasiteli, 53 kg ağırlığında, 550 Watt güçle çalışan, dakikada 28 devir yapan, davul tipi beton mikseri kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Mikser

**Pres:** Beton denemelerinde, basınç dayanıklılık testi için Tonipact 5000 markalı, kırım hızı 11.3 kN/s'ye ayarlı, pres kapasitesi 3 ton olan, pres kullanılmıştır.



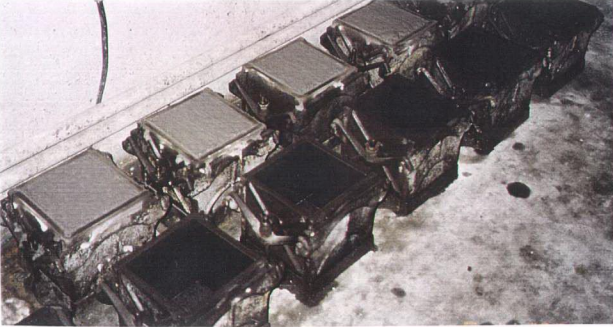
Şekil 4.2 Pres

**Çökme hunisi:** Taze betonun çökmesini bulmak için, taban çapı 203 mm ve üst yüzü 102 mm çapında, yüksekliği ise 305 mm olan, saçtan yapılmış kesik huni ve 60 cm boyunda ve 16 mm çapında ucu yuvarlatılmış çelik çubuk kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Çökme hunisi

**Numune kalıpları:** Beton numunelerini almak için, 15x15x15 cm'lik, demir döküm kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Numune kalıpları

**Priz aleti:** Priz deneyi için; sonda adı verilen, prinçten yapılmış ve toplam boyu 65 mm olan dolu silindirik bir çubuk, sonda için askı sistemi, terazi ve numune kabından meydana gelen bir sistem kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Priz aleti

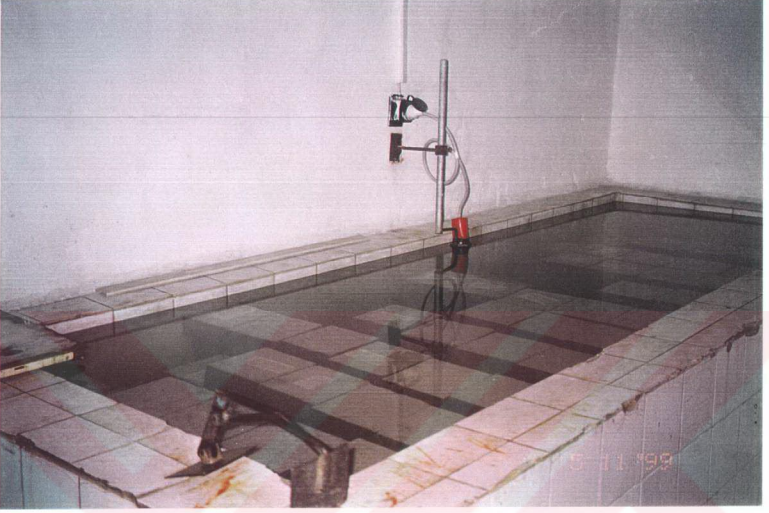
**Birim ağırlık kapları:** Sıkışık ve gevşek birim ağırlık tayinlerini yapabilmek için 4.970, 7.980, 11.050, 14.340 dm<sup>3</sup>'lük hacmi belli, demir birim ağırlık kapları kullanılmıştır.

**Titreşimli elek:** Sekiz farklı boyutta elekten meydana gelen, titreşim yapabilen ve titreşimi ayarlanabilen bir elek makinesi kullanılmıştır.



Şekil 4.6 Titreşimli elek

**Kür tankı:** Sıcaklığı  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'ye termostatla ayarlanan, numunelerin en az 5 cm üstünde kalacak şekilde içi suyla dolu bir havuz kullanılmıştır.



Şekil 4.7 Kür tankı

**Etüv:** Malzemelerin kurutulması için, Memmert markalı,  $200^{\circ}\text{C}$  kapasiteli, hava çıkışının ayarlanabildiği bir etüv kullanılmıştır.

## 4.2 Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler

### 4.2.1 Agregata birim ağırlığı tayini

TS 4834'e göre birim ağırlık, bir malzemenin ağırlığının hacmine bölünmesiyle elde edilen değerdir (TS 4834, 1986). 105°C ± 5°C'de etüvde 24 saat bekletilen genleştirilmiş perlit, pomza, doğal perlit ve andezit agregalarının sıkışık ve gevşek birim ağırlıkları TS 3529'a göre tayin edilmiştir (TS 3529, 1980).

#### 4.2.1.1 Agregata sıkışık birim ağırlığı tayini

Bu deney için önceden darası alınmış ve hacmi bilinen, su geçirmez, kullanma sırasında biçimi bozulmayacak kadar dayanıklı metalden yapılmış, silindir biçimli bir ölçü kabı kullanılmıştır. Ağırlığı ( $W_1$ ) tartılarak saptanmış ölçü kabı, etüvde kurutulan deney numunesi ile üç eşit kademede doldurulmuştur. Her kademe şişleme çubuğu yardımı ile yüzeyin her tarafına yayılacak şekilde 25 vuruş yapılarak şişlenip, sıkıştırılmıştır. Üçüncü kademe şişlendikten sonra numune yüzeyi şişleme çubuğu ile düzeltilmiştir. Numune ve ölçü kabı tartımı ( $W_2$ ) alınmıştır. Bulunan değerler kullanılarak, agregata sıkışık birim ağırlığı (4.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (TS 3529, 1980).

$$B_s = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.1)$$

Burada;

$B_s$  = Sıkışık birim ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)

$W_1$  = Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

$W_2$  = Sıkışık agregata ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

$V$  = Ölçü kabı iç hacmi (m<sup>3</sup>)

#### 4.2.1.2 Agregata gevşek birim ağırlığı tayini

Bu deney için önceden darası alınmış ve hacmi bilinen, su geçirmez, kullanma sırasında biçimi bozulmayacak kadar dayanıklı metalden yapılmış, silindir biçimli bir ölçü kabı kullanılmıştır. Ağırlığı ( $W_1$ ) tartılarak saptanmış ölçü kabı, etüvde kurutulmuş numune ile doldurulmuştur. Sonra numunenin yüzeyi şişleme çubuğuyla düzeltilmiştir. Numune ve ölçü

kabı tartımı ( $W_2$ ) alınmıştır. Bulunan değerler kullanılarak, gevşek birim ağırlığı (4.2) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır (TS 3529, 1980).

$$B_g = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.2)$$

Burada;

$B_g$  = Gevşek birim ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)

$W_1$  = Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

$W_2$  = Gevşek agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

$V$  = Ölçü kabı iç hacmi (m<sup>3</sup>)

#### 4.2.2 Agregaya özgül ağırlığı tayini

TS 4834'e göre özgül ağırlık, bir malzemenin ağırlığının boşluksuz kütlesine bölünmesiyle elde edilen değerdir (TS 4834, 1986). Agregaya özgül ağırlığı, numunenin hacminin suyla yer değiştirmesi yardımıyla hesaplanmıştır. TS 3526'a göre özgül ağırlık ince agregaya ve iri agregaya için iki ayrı yöntemle tayin edilmektedir. Genleştirilmiş perlit agregasının özgül ağırlık tayini bu yöntemlerden sadece ince agregaya özgül ağırlık tayini kullanılarak yapılmıştır. Pomza, doğal perlit ve andezit numuneleri için, 4.75 mm'lik (4 no'lu) elek altında kalan ince agregalar ve üstünde kalan iri agregalar için özgül ağırlık tayini ayrı ayrı yapılmıştır. Agregalar 105°C ± 5°C'de etüvde 24 saat bekletilip, kuru ve suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlıkları hesaplanmıştır (TS 3526, 1980). TS 4834'e göre suya doymuş kuru yüzey, agreganın (veya betonun) yapısındaki boşlukların su ile dolu, yüzeyinin ise kuru olduğu durumdur (TS 4834, 1985).

##### 4.2.2.1 İnce agregaya özgül ağırlığı tayini

Bu deney için 500 ml'lik bir balon jöje, numuneyi kurutmak için ocak, vakum pompası ve kesik koni biçimli metal bir kalıp kullanılmıştır. Numune 105°C ± 5°C'de etüvde 24 saat bekletilip kurutulmuştur. Oda sıcaklığına kadar soğutulmuş olan numune 24 saat su içerisinde bekletilmiş ve bu süre sonunda ince taneler kaybolmayacak şekilde suyu süzülerek akıtılmıştır. Numune daha sonra ısıtıcı yardımıyla suya doymuş yüzey kuru duruma kadar kurutulmuştur. Bu değişim agreganın koyu renkten açık renge geçişinin başladığı anın hemen sonrasındır. Suya doymuş yüzey kuru durumu kesik koni yöntemi ile kesin olarak anlaşılır.

Numune koni biçimli metal kalıba gevşek olarak yerleştirilip, üst yüzeyi sıkıştırma çubuğu ile 25 kez hafifçe tokmaklanır ve kalıp yavaşça yukarı çekilir. Numune koniliğini devam ettiriyorsa serbest nem var demektir. Bir süre daha kurutmaya devam edilir ve bir kez daha kesik koni yöntemi uygulanır. Suyu doymuş yüzey kuru hale gelen numuneden eşit miktarda iki tartım alınmıştır. Birinci tartım  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletilip tartımı ( $W_1$ ) olarak kaydedilmiştir. İkinci tartım ( $W_2$ ) olarak kaydedilmiş ve balon joje içine konulup ölçü çizgisine kadar suyla doldurulmuştur. Vakum pompası yardımıyla içeride kalan hava kabarcıkları çıkartılıp, çizgiye kadar bir miktar daha su ilave edilmiştir. Balon jolenin içindekilerle birlikte tartımı ( $W_3$ ) olarak kaydedilmiştir. Daha önceden balon joje ve çizgiye kadar doldurulmuş olan suyun birlikte tartımı ( $W_4$ ) olarak alınmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak (4.3) eşitliği yardımıyla ince agrega kuru özgül ağırlığı, (4.4) eşitliği yardımıyla da ince agrega suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$\gamma_k = \frac{W_1}{W_2 + W_4 - W_3} \quad (4.3)$$

$$\gamma_d = \frac{W_2}{W_2 + W_4 - W_3} \quad (4.4)$$

Burada;

$\gamma_k$  = İnce agrega kuru özgül ağırlığı

$\gamma_d$  = İnce agrega suya doymuş yüzey kuru özgül ağırlığı

$W_1$  = İnce agrega etüv kurusu ağırlığı (g)

$W_2$  = İnce agrega suya doymuş yüzey kuru ağırlığı (g)

$W_3$  = Balon joje, su ve suya doymuş yüzey kuru numunenin toplam ağırlığı (g)

$W_4$  = 500 ml çizgisine kadar dolu ölçü kabı ağırlığı (g)

#### 4.2.2.2 İri agrega özgül ağırlığı tayini

Bu deney için 20 kg çekerli 1 g'a duyarlı ve su içinde tartım yapabilen bir terazi, 4 mm göz açıklı elek telinden yapılmış kafes örgülü bir sepet, tel sepeti içine alabilecek büyüklükte bir kova ve kurutma havlusu ya da kağıdı kullanılmıştır. Numune  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde 24 saat bekletilip kurutulmuştur. Oda sıcaklığına kadar soğutulmuş olan numune 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Suyu süzülen numune kurutma havlusu yardımıyla suya doymuş yüzey kuru hale getirilmiştir. Bu agrega numunesinden eşit iki tartım alınmıştır. Birinci tartım  $105^{\circ}\text{C} \pm$

5°C'de etüvde 24 saat bekletilip, numunenin havadaki kuru tartımı ( $W_1$ ) olarak kaydedilmiştir. Suya doymun yüzey kuru haldeki ikinci tartım ( $W_2$ ) olarak alınmıştır. İkinci tartım tel sepete konmuş ve  $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 'deki suyla dolu kova içine su yüzeyinden en az 5 cm daha aşağıda kalacak şekilde daldırılmıştır. Hava kabarcıklarının çıktığından emin olduktan sonra tel sepet terazinin kefesine bağlanmıştır. Tel sepetin darası alındıktan sonra, doymun malzemenin sudaki ağırlığı ( $W_3$ ) olarak kaydedilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak (4.5) eşitliği yardımıyla iri agregaya kuru özgül ağırlığı, (4.6) eşitliği yardımıyla da iri agregaya suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$\gamma_k = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \quad (4.5)$$

$$\gamma_d = \frac{W_2}{W_2 - W_3} \quad (4.6)$$

Burada;

$\gamma_k$  = İri agregaya kuru özgül ağırlığı

$\gamma_d$  = İri agregaya suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı

$W_1$  = İri agregaya etüv kuru ağırlığı (g)

$W_2$  = İri agregaya suya doymun yüzey kuru durumda havadaki ağırlığı (g)

$W_3$  = İri agregaya suya doymun yüzey kuru durumda sudaki ağırlığı (g)

#### 4.2.3 Agregaya su emme oranı tayini

Beton karışımında suyun bir kısmı çimento hidratasyonu için, geri kalan kısmı ise betonda çalışabilirliği sağlamak için kullanılır. Agregaya eklenecek su miktarını hesaplayabilmek için absorpsiyon kapasitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Absorpsiyon kapasitesi, agreganın absorplayebileceği maksimum su miktarını ifade eder. Bu miktar da, agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı ile etüv kuru ağırlığı arasındaki farktır. Normal agregaların çoğunda absorpsiyon kapasitesi %2'i geçmez. Bu duruma göre normal olmayan absorpsiyon kapasiteleri yüksek poroziteyi ifade eder. Bu nedenle hafif agregalar yüksek absorpsiyon kapasitesine sahip olmaya eğilimlidirler. Bunun yanı sıra etkin absorpsiyon ifadesi de, hava kuru durumda agregayı, suya doymun yüzey kuru hale getirmek için gereken su miktarını ifade eder. Saklanma koşullarındaki agreganın hava kuru durumuna yakın olduğu kabul edilirse, bu agreganın suya doymun yüzey kuru duruma ulaşması için kısa bir süre

gerekmektedir. Birçok durumda etkin absorpsiyon değeri, agreganın 30 dakika içerisinde absorplayabileceği suyu ifade eder. Bu durumdan sonraki absorpsiyon çok daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu nedenle, hafif agregaların su emme oranı kadar su emme hızları da büyük önem arz etmektedir. Bu da hafif agregaların kullanılmadan önce belirli bir miktarda suyla doyurulmasını gerektirmektedir (Mindess ve Young, 1981).

Genleştirilmiş perlit, pomza, doğal perlit ve andezit agregaları için su emme oranları TS 3526'a göre tayin edilmiştir. 105°C ± 5C°'de etüvde 24 saat bekletilen numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Oda sıcaklığına kadar soğutulmuş olan numuneler sırasıyla 15, 30, 45, 60 dakika ve 24 saat suda bekletilmiştir. Bu süreler sonunda bir ısıtıcı ve kurutma havlusu ya da kurutma kağıdı yardımı ile suya doymuş yüzey kuru hale getirilen ince ve iri agregaların tartımı (W<sub>1</sub>) olarak kaydedilmiştir. Numuneler etüv kurusu durumuna getirildikten sonra da tartımları (W<sub>2</sub>) olarak alınmıştır. Elde edilen bu değerler kullanılarak (4.7) eşitliği yardımıyla ince ve iri agregaların su emme oranı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$m = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad (4.7)$$

Burada;

m = Agreganın su emme oranı (%)

W<sub>1</sub> = Suya doymuş yüzey kuru agreganın ağırlığı (g)

W<sub>2</sub> = Kuru agreganın ağırlığı (g)

#### 4.2.4 Granülasyon

Agregayı oluşturan taneler belirli boyuttadır. Fakat aynı agreganın numunesinde, belirli büyüklükteki taneler daima belirli miktarda bulunur. Granülometri bileşimi bize, boyutları belirli limitler arasında bulunan tanelerin ne miktarda agreganın içinde bulunduğunu açıklar. Bu amaçla granülometri deneyleri yapılır. Bir agreganın granülometri bileşimi numuneyi muhtelif eleklerden elemek suretiyle saptanır. Agregaların granülometri bileşiminin veya tane büyüklüğü dağılımının saptanması için her ülkede bir elek serisi kabul edilmiştir. Ülkemizde, tellerin örülmesinden meydana gelen kare örgülü elekler kullanılmaktadır. TS 707'e göre, bu eleklerde boyutun aldığı en küçük değer 0.25 mm olup, bunun iki misli alınarak geometrik seri esasına göre diğer elek boyutları saptanmıştır. Buna göre elek boyutları; 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 ve 31.5 mm'dir.

Granülometri deneyi tamamen kuru numuneler üzerinde yapılmıştır. Agregada rutubetli ise etüvde kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Kum ve çakıl yığınının etek ve tepe kısmından numune alınmamasına dikkat edilmiştir. Bir seri elek en küçük boyuttan başlayarak sıra ile üst üste geçirilmiştir ve eleme makinesine yerleştirilmiştir. Gerekli koşulları yerine getiren numune, boyutu en büyük olan elek üzerine konulmuştur. Sarsma hareketleri ile çalışan makine 10 – 15 dakika kadar çalıştırılmıştır. Eleme işlemi sonunda her elek üstünde bir miktar malzeme kalmıştır. İlk olarak en büyük boyutlu elek üstünde kalan agregada tartılmıştır. Bu elekten hemen sonra gelen daha küçük boyuttaki elek üstünde kalan, bir üst elek üstünde kalana eklenerek tartılmış ve bu işleme sonuna kadar aynı şekilde devam edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, elek üstünde kalan malzeme miktarı, elek üstünde kalan malzeme yüzdesi ve elekten geçen malzeme yüzdesi olarak kaydedilmiştir (Postacıoğlu, 1987).

### 4.3 Kullanılan Malzeme Tanımlaması

#### 4.3.1 Agregalar

##### 4.3.1.1 Kum

Denemelerde Akpınar yöresinden gelen dağ kumu kullanılmıştır.

##### 4.3.1.1.1 Granülasyon

Akpınar yöresi kumunun elek analizi sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Akpınar kumu elek analizi

Elek	2 mm	1 mm	0.50 mm	0.25 mm
Geçen (%)	100	99	93	5

##### 4.3.1.1.2 Özgül ağırlık

Akpınar yöresi kumunun suya doygun yüzey kuru özgül ağırlığı 2.63 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.1.1.3 Birim ağırlık

Akpınar yöresi kumuna birim ağırlık tayini yapılmış ve sıkışık birim ağırlığı  $1672 \text{ kg/m}^3$ , gevşek birim ağırlığı ise  $1536 \text{ kg/m}^3$  olarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.1.4 Su emme

Akpınar yöresi kumunun su emme değerleri  $\frac{1}{2}$  saat için %1.1 ve 24 saat için %1.2 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.1.1.5 Kimyasal özellikler

Akpınar yöresi kumunun Set Çimento laboratuvarında yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

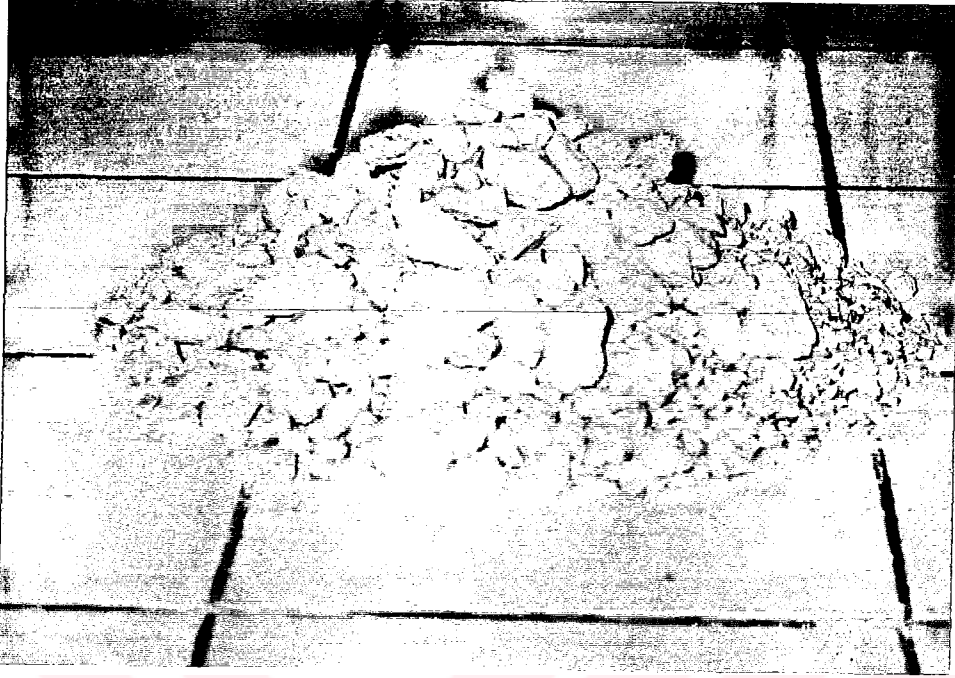
Çizelge 4.2 Kumun kimyasal analizi

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Kızdırma kaybı (%)
6.24	80.49	3.53	0.60	6.89	0.18	0.25	1.48	0.56

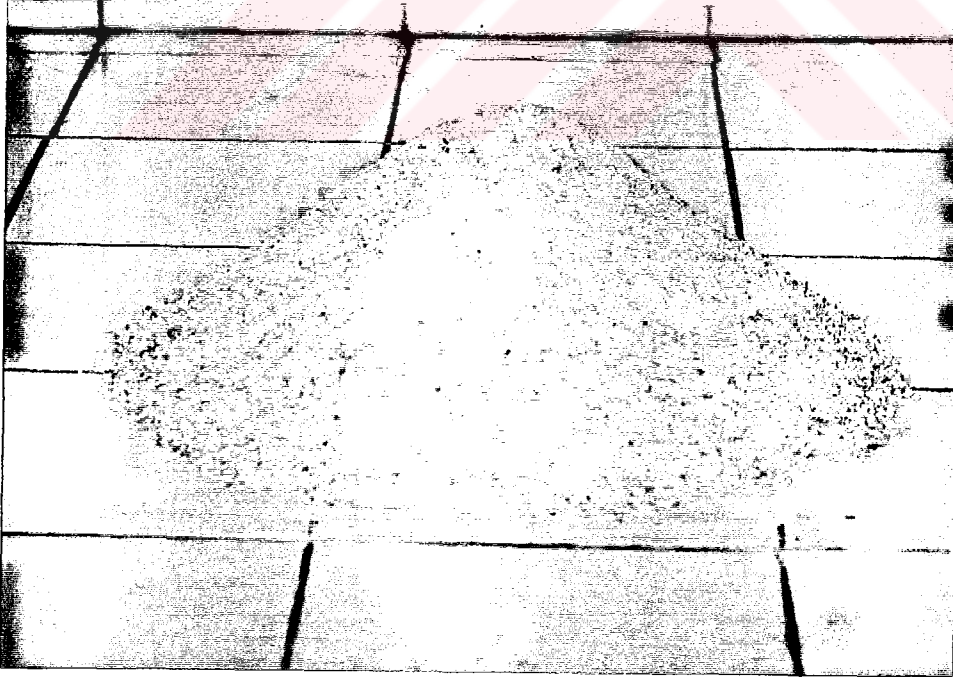
#### 4.3.1.2 Ham perlit agregası

Perlit,  $700^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda, bünyesindeki suyun buhar basıncıyla 4 – 20 kez genleşme niteliğine sahip, genleştiğinde hafif ve gözenekli bir yapı oluşturan, genellikle %70 – 75 SiO<sub>2</sub>, %12 – 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve az miktarda diğer mineral bileşenleri içeren asidik özellikli, camsı kayalara verilen genel addır (TS 3681, 1982).  $700^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde hızlı bir şekilde ısıtıldıklarında patlamış mısırı andıran bir şekilde patlayarak sayısız küçük kabarcıklar oluştururlar.

Ham perlit agregası ile yapılan beton denemelerinde, Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregası kullanılmıştır. Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregasından iki ayrı parti numune kullanılmıştır. Denemeler ve hesaplamalarda bu iki parti agregası; ham perlit agregası I ve ham perlit agregası II olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.8 İri ham perlit agregası



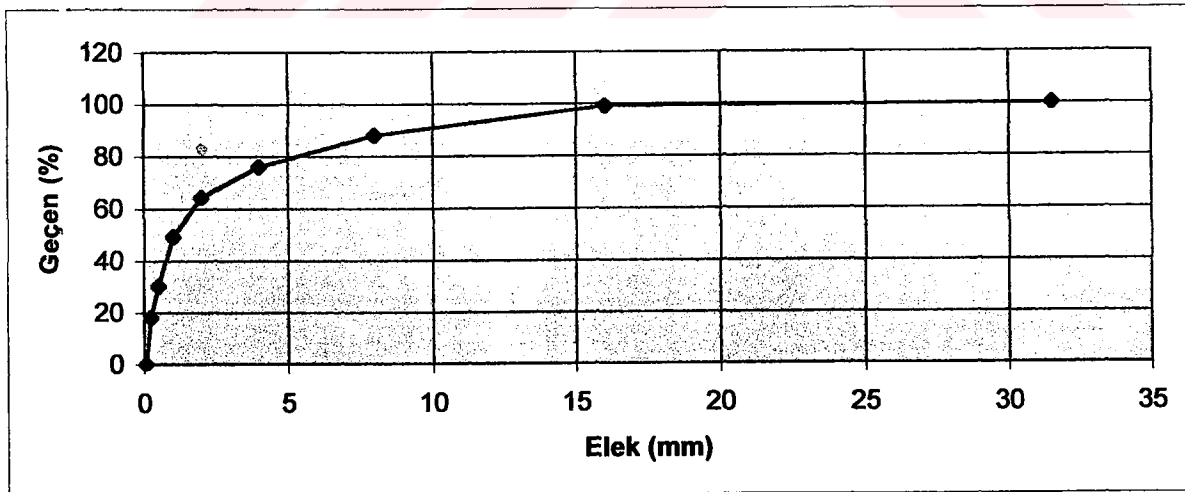
Şekil 4.9 İnce ham perlit agregası

### 4.3.1.2.1 Granülasyon

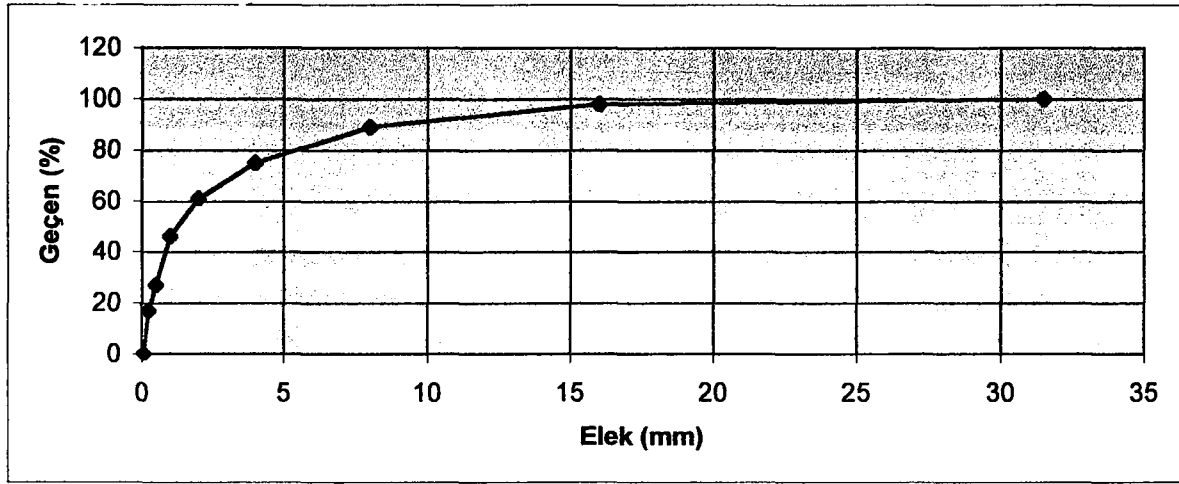
Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregasının elek analizi Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Ham perlit agregası elek analizi

Ham Perlit agregası I			Ham perlit agregası II		
Elek (mm)	Kalan (%)	Geçen (%)	Elek (mm)	Kalan (%)	Geçen (%)
31.5	0	100	31.5	0	100
16.0	1.4	99	16.0	1.2	98
8.0	12.1	88	8.0	11.25	89
4.0	23.6	76	4.0	24.6	75
2.0	35.8	64	2.0	38.6	61
1.0	51.5	49	1.0	54.05	46
0.50	70.2	30	0.50	72.85	27
0.25	81.2	18	0.25	83.15	17
0.075	100	0	0.075	100	0



Şekil 4.10 Ham perlit agregası I granülasyon eğrisi



Şekil 4.11 Ham perlit agregası II granülasyon eğrisi

#### 4.3.1.2.2 Özgül ağırlık

Denemelerde 4.75 mm'lik elek altında kalan perlit agregaları ince agrega olarak, 4.75 mm'lik elek üstünde kalan agregalarda iri agrega olarak kullanılmış ve özgül ağırlıkları da ayrı ayrı hesaplanmıştır. Özgül ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Ham perlit agregası özgül ağırlığı

Ham Perlit agregası I				Ham perlit agregası II			
İnce agrega		İri agrega		İnce agrega		İri agrega	
Dyk*	Kuru	Dyk	Kuru	Dyk	Kuru	Dyk	Kuru
2.346	2.231	1.908	1.807	2.215	2.100	1.908	1.793

\*Doygun yüzey kuru

#### 4.3.1.2.3 Birim ağırlık

Birim ağırlık tayinleri de ham perlit I ve ham perlit II agregası için ayrı ayrı yapılmış ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Ham perlit agregası birim ağırlığı

Ham Perlit agregası I				Ham perlit agregası II			
İri		İnce		İri		İnce	
Gevşek (kg/m <sup>3</sup> )	Sıkışık (kg/m <sup>3</sup> )	Gevşek (kg/m <sup>3</sup> )	Sıkışık (kg/m <sup>3</sup> )	Gevşek (kg/m <sup>3</sup> )	Sıkışık (kg/m <sup>3</sup> )	Gevşek (kg/m <sup>3</sup> )	Sıkışık (kg/m <sup>3</sup> )
796	844	950	1064	698	812	902	988

#### 4.3.1.2.4 Su emme

Ham perlit agregasının su emme tayini ham perlit agregası I ve ham perlit agregası II için ayrı ayrı yapılmış ve Çizelge 4.6'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Ham perlit agregası su emme yüzdesi

Ham Perlit agregası I				Ham perlit agregası II			
İnce agregası		İri agregası		İnce agregası		İri agregası	
t (dak)	Abs (%)	t (dak)	Abs (%)	t (dak)	Abs (%)	t (dak)	Abs (%)
15	3.4	15	4.1	15	3.7	15	3.6
30	3.7	30	4.7	30	4.4	30	4.3
45	4.1	45	4.9	45	4.9	45	4.8
60	4.2	60	5.1	60	5.4	60	5.3
24 saat	5.1	24 saat	5.5	24 saat	5.9	24 saat	5.8

#### 4.3.1.2.5 Kimyasal özellikler

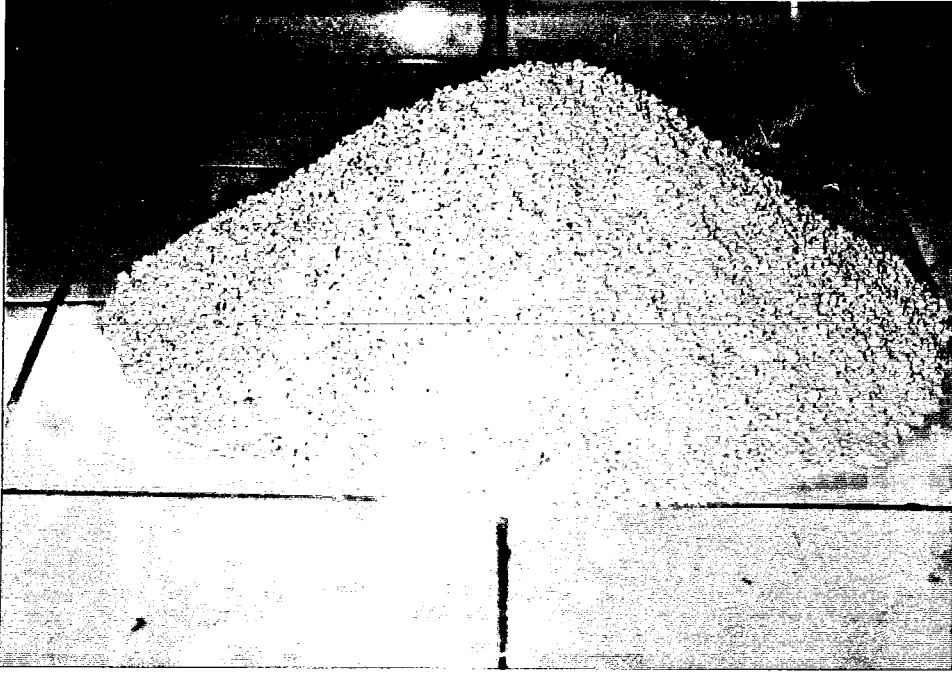
Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregasının Set Çimento laboratuvarında yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Ham perlit agregası kimyasal analizi

	Kızdırma kaybı (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
Ham perlit agregası I	4.53	67.11	14.16	3.77	2.34	1.72	0.22	3.03	3.09
Ham perlit agregası II	3.23	55.87	9.61	1.13	0.81	0.61	0.39	4.68	3.23

#### 4.3.1.3 Genleştirilmiş perlit agregası

Genleştirilmiş perlit, doğadan çıkarıldıktan sonra, kırılıp öğütülerek belirli tane büyüklüğü sınıfına getirilen perlitin, türüne göre 700°C – 1200°C sıcaklıktaki bir ortamda, kontrollü koşullarda genleştirilmesiyle elde edilen beyaz renkli, gözenekli, hafif (30 – 250 kg/m<sup>3</sup> gevşek kuru birim ağırlığında) tanelerden oluşmuş malzemedir. Genleştirilmiş perlit agregası, dış çevre etkilerinden korunmuş yapı bölümlerine uygulanan ısı yalıtımı betonu ve ısı yalıtıcı sıvalar ile alçı bağlayıcılı elemanların yapımında kullanılır (TS 3681, 1982).



Şekil 4.12 Genleştirilmiş perlit agregası

#### 4.3.1.3.1 Özgöl ağırlık

Persa genleştirilmiş perlit 14 agregası için özgöl ağırlık tayini yapılmış ve suya doymun yüzey kuru genleştirilmiş perlit agregası için 0.699; kuru perlit agregası için de 0.259 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.1.3.2 Birim ağırlık

105°C'de etüv kurusu haline getirilen Persa perlit 14 agregası için gevşek birim ağırlık 127 kg/m<sup>3</sup>, sıkışık birim ağırlık değeri ise 142 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.3.3 Su emme

Genleştirilmiş perlit 14 agregası su emme tayini Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Genleştirilmiş perlit agregası su emme oranı

t (dak)	15	30	45	60	24 saat
Abs (%)	68.91	75.75	82.65	88.50	162.92

#### 4.3.1.3.4 Kimyasal özellikler

Persa genleştirilmiş perlit 14 agregasının, Persa Perlit Türevleri San. ve Tic. Ltd. Şti tarafından yaptırılmış kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.9’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Genleştirilmiş perlit agregası kimyasal analizi

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Kızdırma kayı (%)
74.40	15.35	0.43	0.44	1.53	1.58	2.68	2.11

#### 4.3.1.4 Andezit

Andezit, minerolojik olarak plajyoklas ve mafik minerallerden ibaret, az ya da çok belirgin bir porfirik yapıya sahip olan volkanik bir kaya çeşididir. Andezitin farklı bölgeleri için farklı ifadeler kullanılır. Çürük damar; andezitin alterasyona maruz kalmış bölümü ve / veya kısmen ya da tamamen kil, kalsit ve limonit gibi yabancı maddeler tarafından sonradan tabii bir şekilde doldurulmuş çatlak, kırık ya da ezilme zonlarıdır. Dolgu ise; andezitin, damar, çatlak, kırık, delik ve boşluklarını dolduran kil, kalsit ve limonit gibi yabancı fakat tabii maddelerdir. Andezit içerisinde tabii olarak bulunan magmatik kökenli damar, yumru ve akıntı yapıları andezitin bir parçası olarak kabul edilirler (TS 10835, 1993).

Plakalar halindeki andezit, maksimum boyutu 31.5 mm'lik elekten geçebilecek şekilde öğütülmüştür. Denemelerde, 4.75 mm'lik elek üstünde kalan andezit, iri agrega olarak kullanılmıştır.



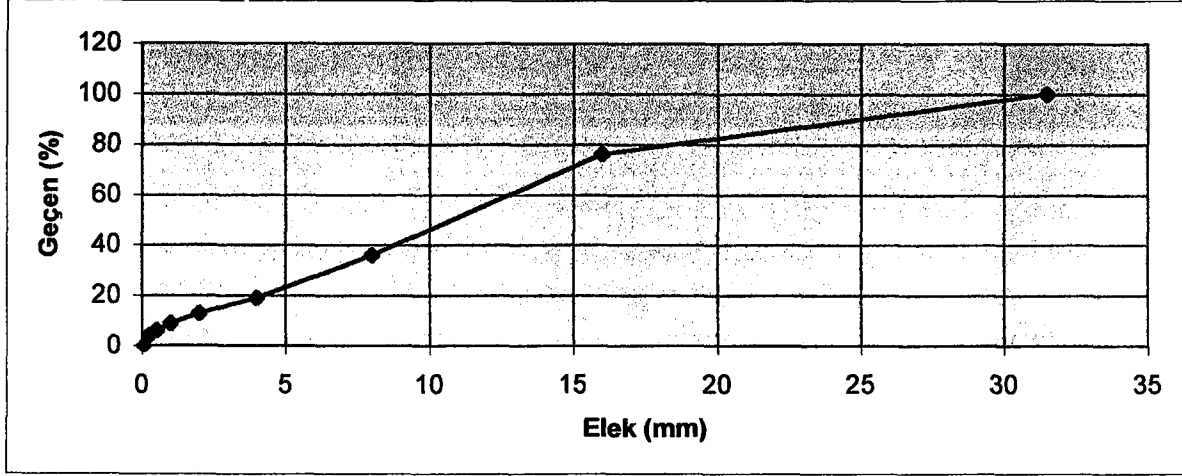
Şekil 4.13 Andezit

#### 4.3.1.4.1 Granülasyon

Bilecik ilinden gelen andezit'in elek analizi yapılmış ve Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Andezit'in elek analizi

Elek (mm)	31.5	16.0	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075
Kalan (%)	0.0	23.7	63.6	81	87.3	91.2	94.1	96.3	100
Geçen (%)	100	76	36	19	13	9	6	4	0



Şekil 4.14 Andezit'in granülasyon eğrisi

#### 4.3.1.4.2 Özgül ağırlık

Özgül ağırlık tayini, denemelerde kullanılan iri andezit agregası için yapılmıştır. Özgül ağırlık, suya doymun yüzey kuru andezit agregası için 2.212; kuru andezit agregası için de 2.075 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.1.4.3 Birim ağırlık

Birim ağırlık tayini de, denemelerde kullanılan iri andezit agregası için yapılmıştır. 105°C'de etüv kurusu haline getirilen andezit agregası için, gevşek birim ağırlık 1040 kg/m<sup>3</sup>, sıkışık birim ağırlık ise 1179 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.4.4 Su emme

Denemelerde kullanılan iri andezit agregası için su emme oranı Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Andezit agregası su emme oranı

t (dak)	15	30	45	60	24 saat
Abs (%)	5.3	5.5	5.6	6.2	6.6

#### 4.3.1.4.5 Kimyasal özellikler

Andezit ACME Analytical Laboratories LTD. tarafından tayin edilen kimyasal özellikleri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 Andezit kimyasal özellikleri

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	MnO (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Kızdırma kaybı (%)
65.95	12.82	2.65	0.94	3.57	1.70	2.78	0.25	0.04	0.05	0.006	8.8

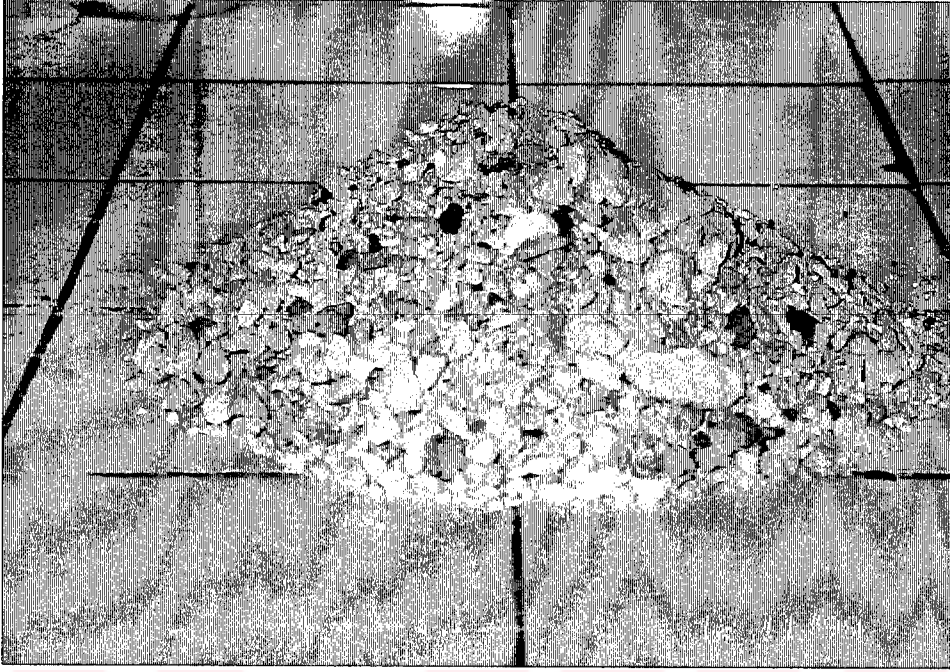
#### 4.3.1.5 Pomza

Pomza, volkanik aktiviteler sonucu meydana gelmiş silikat esaslı, gözeneklerinin birbiriyle bağlantılı olmadığı amorf, camsı ve en önemlisi doğal bir kayadır. Sünger taşı ya da topuk taşı gibi adlar alan bu kayadır, İngilizce’de pumice, Almanca’da bims olarak kullanılmaktadır. Pomza asidik ve bazik olarak ikiye ayrılmakla beraber en yaygın olanı, yeryüzünde en yaygın olarak bulunan asidik pomzadır.

- Asidik pomza; beyaz ve kirli renktedir. Mohs skalasına göre sertliği 5 – 6 olup, yoğunluğu 0.5 – 1 gr/cm<sup>3</sup>’dür.
- Bazik pomza (scoria); kahverengi veya siyah olup daha ağırdır. Sertliği Mohs skalasına göre 5 – 6 , yoğunluğu ise 1 – 2 gr/cm<sup>3</sup>’dür.

Yapısının fazla gözenekli olması nedeniyle ısı ve ses geçirgenliği oldukça düşüktür. Hafif yapı elemanı olarak ses ve ısı yalıtımı açısından önde gelen hammaddelerdendir (Güngör ve Tombul, 1997). Perlitte olduğu gibi genişletmek için ek bir yatırım ve enerji gerektirmeyen pomza, volkanik kökeninden ötürü ısı işlemlerden geçmiş ve genişlemiş tek doğal yapı elemanı olarak bilinmektedir. Bünyesinde kristal suyu yoktur. Kimyasal bileşiminde;

% 60–75 SiO<sub>2</sub>, %13–17 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1–3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1–2 CaO, %7–8 Na<sub>2</sub>O–K<sub>2</sub>O ve ayrıca eser miktarda TiO<sub>3</sub> ve SO<sub>3</sub> bulunmaktadır (Köse, 1997).



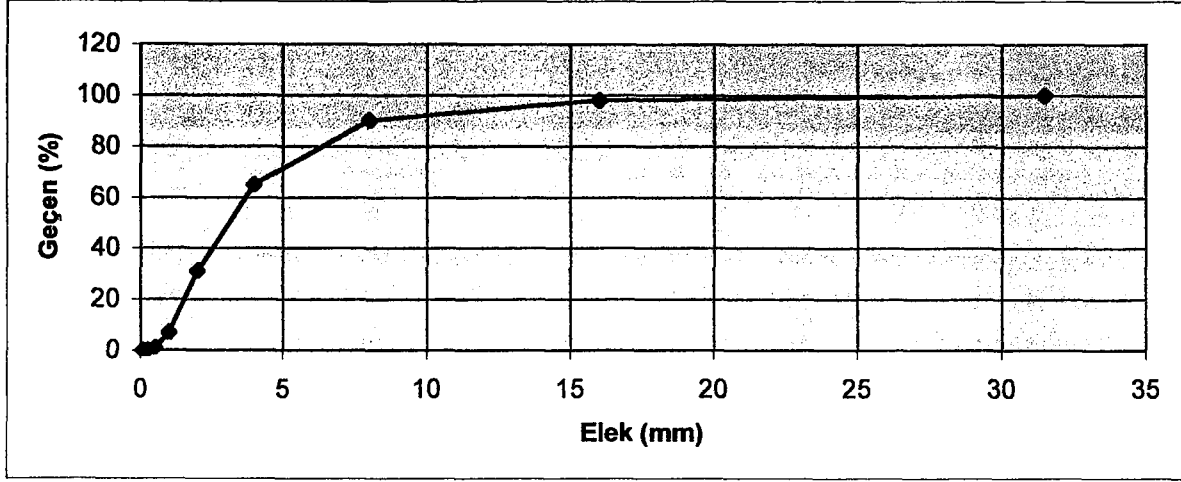
Şekil 4.15 Pomza agregası

#### 4.3.1.5.1 Granülasyon

Pomza agregası elek analizi yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Pomza agregası elek analizi

Elek (mm)	31.5	16.0	8.0	4.0	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075
Kalan (%)	0.0	2.0	10.0	34.6	69.4	93.1	99	99.7	100
Geçen (%)	100	98	90	65	31	7	1	0	0



Şekil 4.16 Pomza agregası granülasyon eğrisi

#### 4.3.1.5.2 Özgül ağırlık

Pomza agregası için özgül ağırlık tayini yapılmış ve suya doygun yüzey kuru pomza agregası özgül ağırlığı 1.6, kuru pomza agregası özgül ağırlığı ise 1.32 olarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.5.3 Birim ağırlık

105°C'de etüv kurusu haline getirilen pomza agregası için, gevşek birim ağırlık 579 kg/m<sup>3</sup>, sıkışık birim ağırlık ise 637 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.5.4 Su emme

Pomza agregası için su emme oranı tayin edilmiş ve Çizelge 4.14'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.14 Pomza agregası su emme oranı

t (dak)	15	30	45	60	24 saat
Abs (%)	13.3	15.71	15.9	16.5	19.5

#### 4.3.1.5.5 Kimyasal özellikler

Set Çimento laboratuvarında yapılan pomza agregası kimyasal analizi Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15 Pomza agregası kimyasal analizi

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Kızdırma kaybı (%)
71.87	8.02	2.22	5.32	0.91	0.48	2.47	1.76	6.14

#### 4.3.2 Çimento

Beton denemelerinde Pınarhisar Set Çimento Fabrikasında üretilen PÇ 42.5 tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun birim ağırlığı 1150 kg/m<sup>3</sup>, özgül ağırlığı 3.1’dir.

##### 4.3.2.1 Kimyasal özellikleri

Denemelerde kullanılan çimento numunelerinin kimyasal özellikleri Çizelge 4.16’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 Çimento kimyasal özellikleri

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Kızdırma kaybı (%)
20.67	4.55	3.16	62.35	1.49	2.97	0.55	2.97	3.24

### 4.3.3 Alçıtaşı

#### 4.3.3.1 Bor mineralleri ve bileşiklerine genel bakış

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan bor elementinin simgesi B, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, ergime noktası  $2190^{\circ} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 'dir. Elmastan sonra en sert madde olan borun sertliği Mohs skalasına göre 9.3'dür. Ametal bor gri-siyah veya yeşilimsi sarı renkli bir yapıdadır. Kristal yapısı Tetragonal – Hekzagonal'dir. Yoğunluğu kristal ise  $2.33 \text{ g/cm}^3$ , amorf ise  $2.34 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Yerkabuğunun %0.001 ile %0.0003'ünü oluşturmaktadır. Yer kabuğunda ortalama 10 ppm olan bor konsantrasyonu denizlerde 3–5 ppm arasında değişmektedir. 150'den fazla mineralin bileşiminde yer almasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz. Ekonomik konsantrasyonlarda en fazla bulunan bor mineralleri; kalsiyum, sodyum ve magnezyumun hidrate olmuş boratlarıdır. Ticari önem taşıyan bor mineralleri ve bileşikleri Çizelge 4.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17 Önemli bor mineralleri ve bileşikleri (DPT, 1996)

Mineral	Kimyasal formülü	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	H <sub>2</sub> O (%)	Bulunduğu yerler
Tinkal	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36.5	47.2	Kırka, Eskişehir
Kernit	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O	51.0	26.4	Kırka, Eskişehir
Kolemanit	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	50.8	21.9	Emet, Bigadiç, Kestelek
Üleksit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O	43.0	35.6	Bigadiç, Kırka
Probertit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O	49.6	25.6	Emet
Pandermit	Ca <sub>4</sub> B <sub>10</sub> O <sub>19</sub> .7H <sub>2</sub> O	49.8	18.1	Sultançayır

Bor minerallerinin çoğu bazı uygulamalarda direkt olarak kullanılabilmesine rağmen üretilen miktarın çok büyük bir kısmı tesislerde işlenerek daha yüksek katma değerli rafine bor bileşiklerine (türevlerine) dönüştürülür (Benker, 1992).

Sanayide yaygın olarak kullanılan bor bileşiklerinden başlıcaları Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18 Sanayide kullanılan önemli bor bileşikleri (DPT, 1996)

Bileşik	Kimyasal formülü	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	H <sub>2</sub> O (%)
Boraks dekahidrat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36.5	47.2
Boraks pentahidrat	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .5H <sub>2</sub> O	47.8	30.9
Susuz borax	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	69.2	0.0
Borik asit	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	56.3	43.7
Sodyum Perborat tetrahidrat	NaBO <sub>3</sub> .4H <sub>2</sub> O	22.7	46.8
Sodyum Perborat monohidrat	NaBO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	34.8	18.0
Susuz borik asit		100.0	0.0

#### 4.3.3.2 Bor kirliliği ve atıklarının değerlendirilmesi

Etibank Bandırma Borik Asit Fabrikası 1987 yılında kolemanitten borik asit üretimine geçmiştir. Borik asit üretiminde, atık çamur kavrulmuş kolemanit mineralinin sülfürik asit çözeltisinin pres filtrelerden geçirilmesi esnasında filtre keki olarak elde edilmektedir. Yine bu tesisten alınan çamurun analiz sonuçları Çizelge 4.19'da gösterilmiştir. Bu atık çamurlar halen sulandırılarak Bandırma Körfezi'nden denize dökülmektedir. Yapılan çalışmalarda atıkların tam denize döküldüğü yerde deniz suyunun 1 litresinde 1200 mg, 50 metre açığında ise 30mg bor bulunmaktadır. Oysa 1380 sayılı su ürünleri kanununa ait tüzüğün beşinci ekinde ise sulara ve denizlerdeki istihsal yerlerinde dökülmesi yasak olan zararlı maddeler listesinde, endüstriyel tesislerden gelecek kullanılmış su içindeki bor konsantrasyonunun 3 mg/l'den az olması gerektiği belirtilmektedir (Balkan ve Ayok, 1993).

Çizelge 4.19 Etibank Bandırma Fabrikası borik asit çamuru analiz sonuçları (mg/l)  
(Peker, 1973)

Numune adı	Sıcaklık (°C)	Bor iyonu	Al İyonu	Fe iyonu	Si İyonu	As iyonu	Ca iyonu	Mg iyonu
Borik asit çamuru	40	1060	2	20	58	240	468	418

Borik asit fabrikası yetkililerinin, atık çamurların yapı malzemesi imalinde kullanılmak suretiyle değerlendirilmesini çevre kirliliği açısından bir çare olarak düşündükleri bilinmektedir. Ancak atık çamur içinde bulunan  $B_2O_3$ 'ün yapı malzemesi olarak değerlendirilmesinde  $B_2O_3$  miktarının belirli bir asgari düzeyde tutulması gerekmektedir. Sonuç olarak;

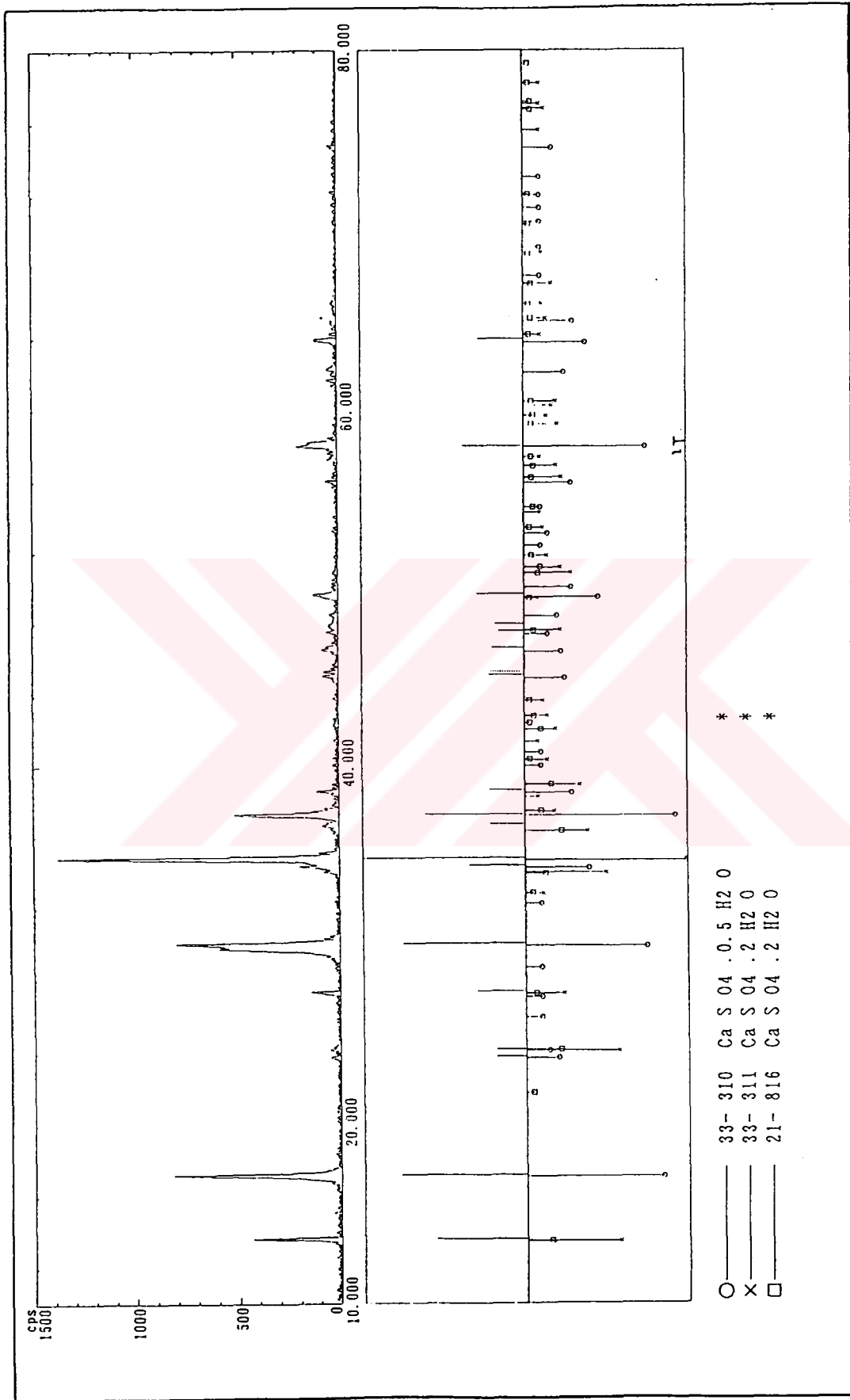
- Atık çamur kaçaklarındaki  $B_2O_3$ 'ü geri kazanmak,
- Çevre kirlenmesini önlemek,
- Atık çamurun yapı malzemesi imalinde kullanılması halinde kırılgenliğini azaltmak için borun çamur içinden ayrılmasını sağlamak gerekmektedir (Kor, 1992).

Bor atıklarının değerlendirilmesi amacıyla çimento, beton, tuğla ve seramik sanayinde kullanılabilmesi için deneysel birtakım çalışmalar yapılmıştır.

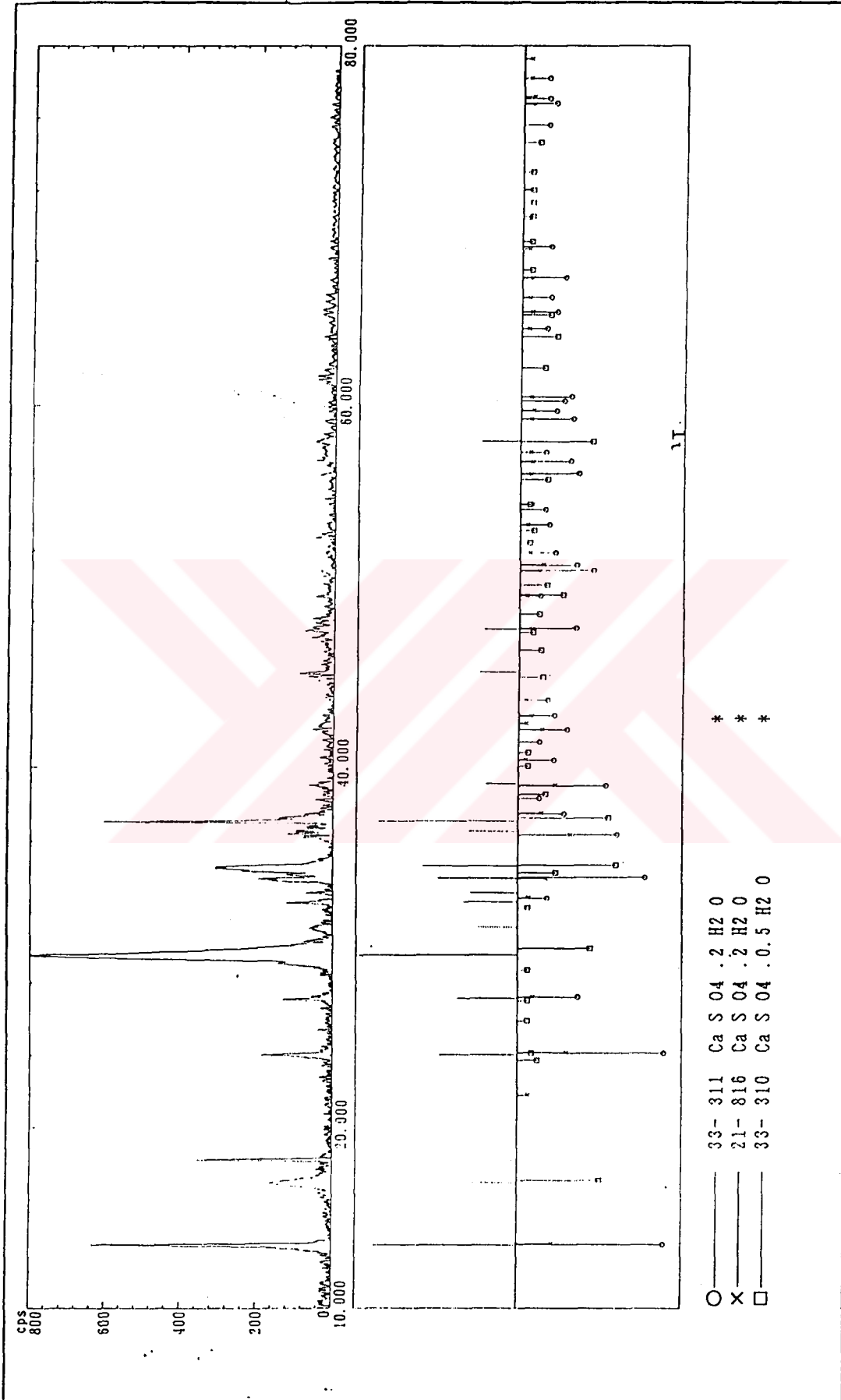
Yapılan çalışmalarda Borik asit atığının X-ışınları difraktometrisinde genel faz diyagramı çekilerek  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  bileşiminde bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Standart alçının X-Ray sonucu Şekil 4.17'de,  $170^\circ C$ 'de döner fırında kalsine edilmiş atığın X-ray sonucu Şekil 4.18'de,  $170^\circ C$ 'de tav fırında kalsine edilmiş atığın X-Ray sonucu Şekil 4.19'da ve Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'un bir arada karşılaştırıldığı rapor Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu atığın çimento sanayinde alçıtaşı yerine kullanılabileceğine dair deneysel çalışmalar daha önceden yapılmıştır. Borik asit atığının kimyasal bileşimi Çizelge 4.20'da verilmiştir (DPT, 1999).

Çizelge 4.20 Borik asit atığının kimyasal bileşimi (DPT, 1999)

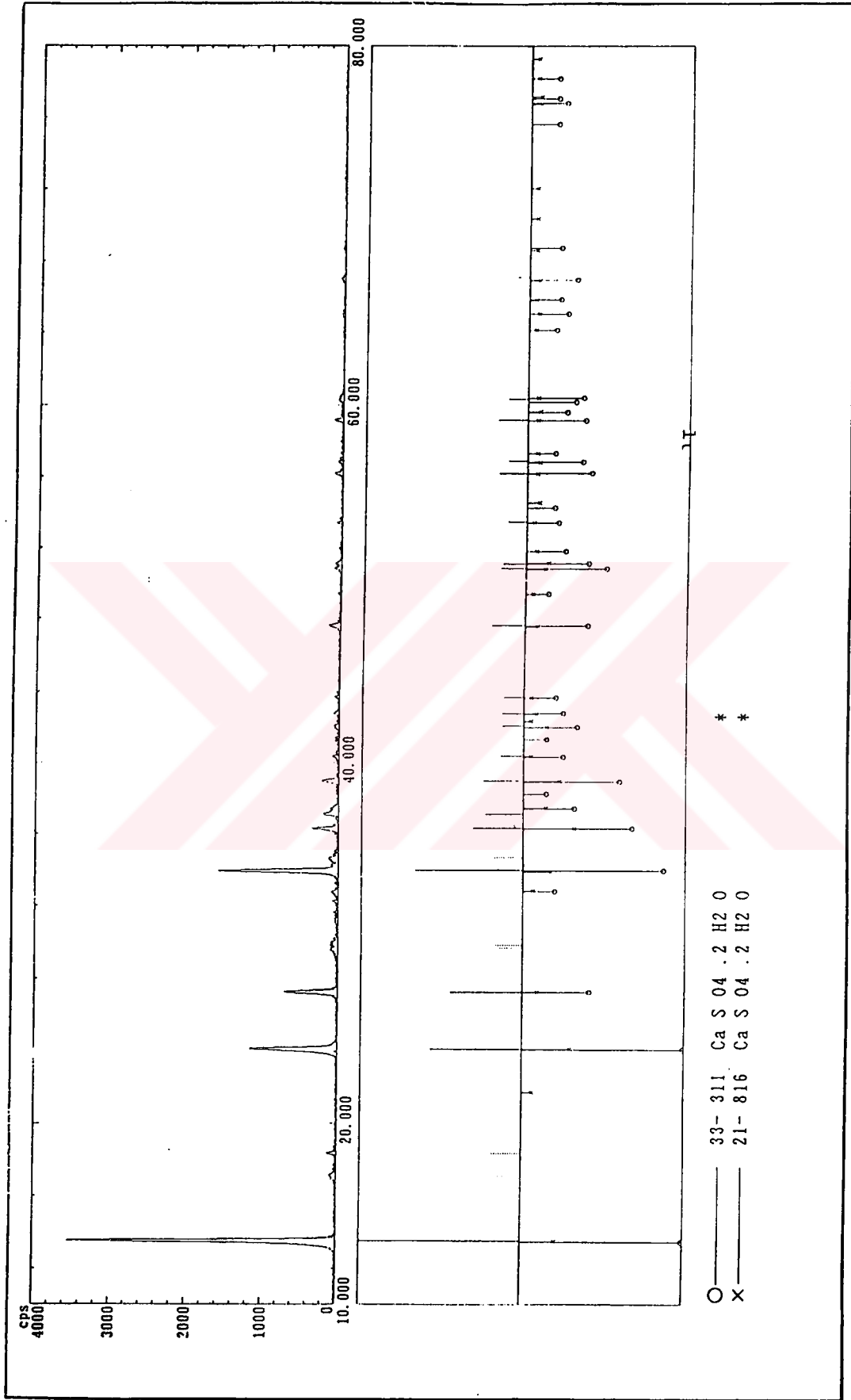
Bileşen	Miktar (%)
$B_2O_3$	7.5
$SiO_2$	9.0
$Fe_2O_3$	0.6
$Al_2O_3$	1.4
CaO	28.0
MgO	1.6
As	0.3
$SO_3$	42.0



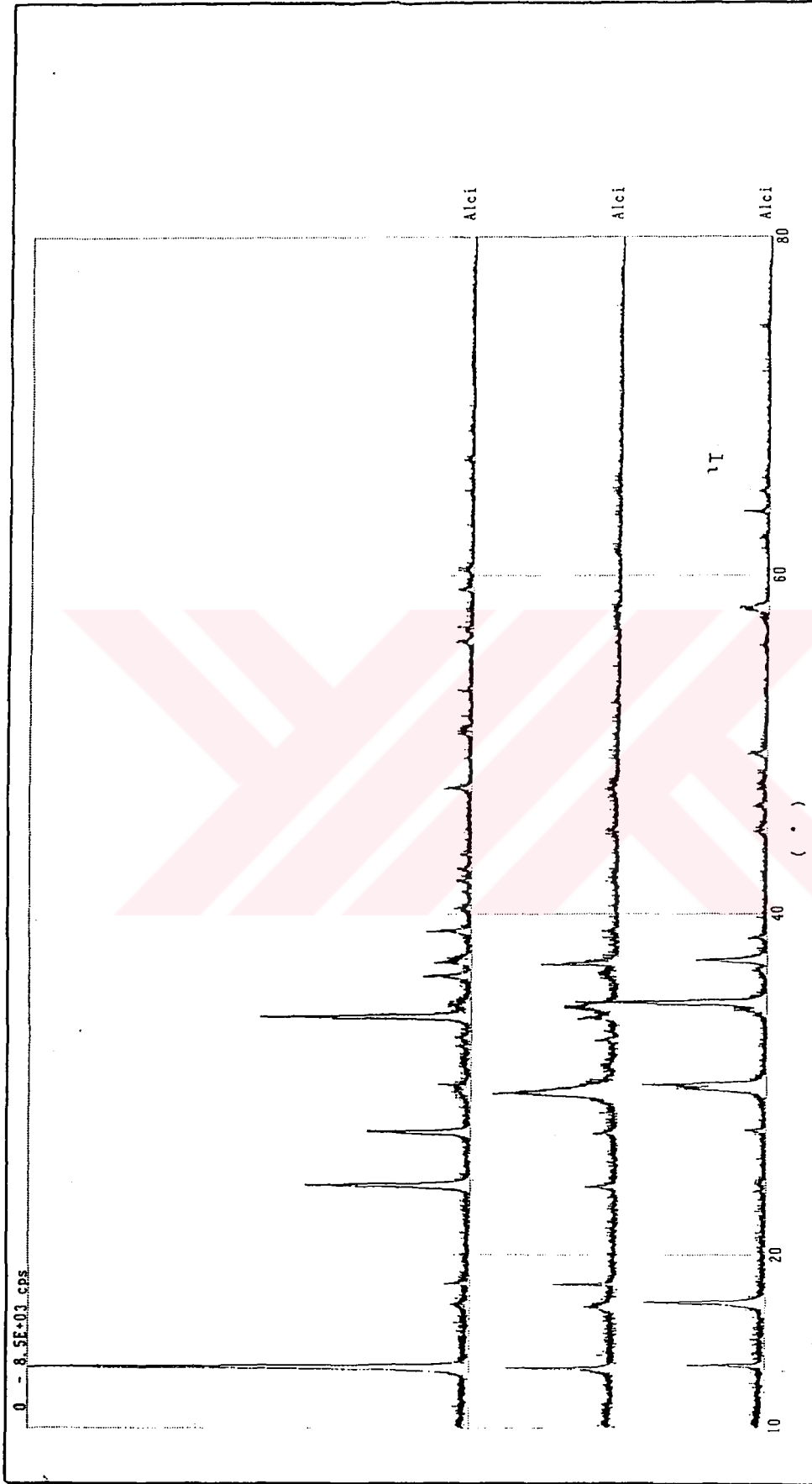
Şekil 4.17 Standart alçının X-Ray sonucu (DPT, 1999)



Şekil 4.18 170°C'de döner fırında kalsine edilmiş bor gips atığının X-Ray sonucu (DPT, 1999)



Şekil 4.19 170°C'de tav fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu (DPT, 1999)



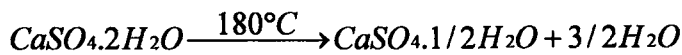
Şekil 4.20 Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'un bir arada karşılaştırıldığı rapor (DPT, 1999)

#### 4.3.3.3 Alçıtaşının minerolojisi

- Anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ): Susuz kalsiyum sülfattır. Yapısına kristalizasyon suyu olarak kolayca jipse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dönüşür. 100 gram suda 0.2 gram anhidrit erimektedir. Anhidrit kayacı, çoğunlukla açık gri veya mavimsi gri renktedir. Mikroskop altında taneli veya kristal kümesi, ya da keçemsi bir doku gösterir.
- Jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): Değişik kökenli bileşimi olup, genellikle kayaç halinde masif bir şekilde bulunur. Anhidritten kolayca ayırt edilebilir, çünkü sertliği daha azdır. Jipsin Mohs cetveline göre sertliği 2'dir. Halbuki anhidritin sertliği 3 – 3.5 arasında değişir. Yine jipsin özgül ağırlığı 2.7 – 3.0 arasında değişmektedir. Jipsin rengi genellikle beyaz ve beyazımsı kül rengindedir. Jipsin içindeki yabancı maddeler jipse ve ondan elde edilecek ürünlere renk verirler. Petrografik bakımdan jips kayaçlarının çoğu tanelidir. Ticari bakımdan tane çapları ile kalsiyum sülfat içeriği arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Yabancı madde etrafında oluşan kristaller iri taneli olurlar. Halbuki saf olarak oluşan kristal taneleri daha ufaktır. Jips yataklarının çoğunda ayrı iki yaşa ait iki tür jips kristali görülmektedir. Bazı yataklarda da lifli kristaller keçe gibi birbirlerine geçmiş kütleler halinde bulunurlar (T.S.K.B., 1980).

#### 4.3.3.4 Borik asit atığından alçıtaşı eldesi

Borik asit atığının  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  bileşiminde bir yapıya sahip olduğu daha önceden yapılmış analizler ve X-ışınları difraktometrisinde çekilen genel faz diyagramları sonucunda görülmüştür. Etibank Bandırma Borik Asit Fabrikasından gelen borik asit atığı  $105^\circ\text{C}$ 'de etüvde 24 saat bekletilmiştir. Elde edilen kuru borik asit atığı deneysel çalışmalar sonunda bor jips atığı olarak kabul edilmiş ve beton üretiminde alçıtaşı yerine kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Fırında  $180^\circ\text{C}$ 'de 8 saat kalsine edilen bor jips atığından kalsinasyon sonucunda hemi-hidrat alçıtaşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) elde edilmiştir.



Bor jips atığı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) için özgül ağırlık tayini yapılmış ve suya doygun yüzey kuru jips için özgül ağırlık 1.921, kuru jips için özgül ağırlığı ise 1.322 olarak hesaplanmıştır. Su emme oranları ise ½ saat için %12.6 ve 24 saat için de %45.3 olarak bulunmuştur. Denklemden hesaplamalar yapılarak ½ saat için su emme %18.6 olarak bulunmuştur.

Daha önceden yapılmış çalışmalarda klinkere alçıtaşı yerine, %3, %4, %5 oranlarında borik asit atığı katılarak  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  bileşiminde  $\text{B}_2\text{O}_3$  varlığının priz süresini uzattığı sonucuna varılmıştır. Bu denemelerde %95 klinker, %5 alçıtaşı bileşiminde hazırlanan çimento ile karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmalarda borik asit atığının normalde klinkere katılan alçıtaşından çok daha düşük yüzdelerde kullanılarak priz süresini geciktirme işlevini yerine getirebildiği sonucuna varılmıştır (DPT, 1999). Bu sonuçtan yola çıkılarak, yapılan tüm hafif beton çalışmalarında, elde edilen  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 'dan çimentonun %3'ü oranında kullanılması uygun görülmüştür.

#### 4.3.4 Kimyasal katkı maddeleri

##### 4.3.4.1 Grace WRDA 90

WRDA 90, beton ve çimento bazlı karışımlar için orta sınıf bir beton akışkanlaştırıcı veya su azaltıcı katkıdır. Özellikle beton karışımlarının işlenebilirliğini arttırmada faydalıdır ki, büyük miktarda veya dökülmesi güç olan betonlar çok az veya hiç vibratör kullanılmadan dökülebilir. Ayrıca, normal işlenebilirlikteki betonda daha yüksek ilk ve nihai dayanım sağlamak ve oranda su azaltımı gerçekleştirmek için kullanılabilir.

WRDA 90, çimento topaklanmasını önleyici çok güçlü bir katkıdır ve bunu çimento hamurunun akış karakteristiklerini önemli ölçüde arttıran, çimentoyu temel partiküllerine ayırıştırmak suretiyle gerçekleştirir.

WRDA 90, düşük dozajlarda yavaşlatmaya neden olmayan bir akışkanlaştırıcı ve orta seviyedeki dozajlarda gereksiz yavaşlatmaya neden olmayan bir süper akışkanlaştırıcı görevi yapan çok dozajlı bir akışkanlaştırıcıdır (Grace, 1999).

Ham perlit agregası ile yapılan tüm beton denemelerinde çimento ağırlığının % 0.5'i oranında WRDA 90 akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

##### 4.3.4.2 Sika Lightcrete I 500

Sika Lightcrete, etkin ses ve ısı izolasyonu gerektiren yapılarda kullanılan hafif beton üretimine yarayan köpük katkıdır.

Sika Lightcrete, geliştirilmiş kil, perlit, pomza taşı, polistiren gibi hafif beton agregaları ile yapılan, ve/veya içinde çok yüksek miktarda hava içermesi istenen betonlarda kullanılan, yüksek konsantrasyonlu sıvı hava sürükleyici katkı malzemesidir.

Kullanılan kumun cinsine, çimento ve su miktarlarına bağlı olarak, Sika Lightcrete ile 800 – 1000 kg/m<sup>3</sup> birim ağırlıklı beton üretmek olanaklıdır. Katkıda bulunan stabilizatör, betondaki yüksek orandaki hava miktarını (%15 – 40) işleme ve pompalama sırasında da korunduğundan betonun hacmi bu işlemler sonunda hep aynı kalır. Sürüklenen hava betonun yerleştirilmesini ve işlenmesini kolaylaştırır. Betonda segregasyon yaratmaz. Kullanım amacına bağlı olarak; çimento ağırlığının %1'i kadar ya da %1.0 – 0.7'si oranında kullanılır (Sika, 1999).

Yapılan denemelerde Sika Lightcrete I 500 sıvı katkı maddesi pomza ve geliştirilmiş perlit agregası ile üretilen betonlarda kullanılmıştır. Geliştirilmiş perlit agregasının pomza agregasına göre boşluk oranı ve dolayısıyla su emme oranının daha fazla olduğu göz önünde bulundurularak, perlit agregası kullanılarak yapılan denemelerde çimento ağırlığının %1'i, pomza agregası kullanılarak yapılan denemelerde ise çimento ağırlığının %0.5'i oranında katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı maddesi, karışım suyuna eklenerek uygulanmıştır.

#### 4.4 Beton Karışımları

##### 4.4.1 Kabul edilen ilkeler ve bileşim hesapları

Hafif betonların karışım hesapları (üretimleri) normal betonlarınkinden oldukça zordur, çünkü hafif beton üretiminde kullanılan agregaların su emmeleri, özgül ağırlıkları, nem ve karışım içerisindeki ince malzeme miktarı oldukça değişkendir. Bu sebepten dolayı bu betonların dizaynında normal betonlardaki gibi minimum su-çimento oranıyla başlamak mümkün değildir. Hafif betonların dizaynındaki en önemli zorluk, karışımda kullanılan hafif agregaların çok ve hızlı bir şekilde su emmeleridir. Bazı araştırmacılar karışımda nemli agregaların veya karıştırma işleminden önce bir miktar su emdirilmiş agregaların kullanılmasını önermektedirler. Bu yapılmazsa hafif agrega verilen suyun bir kısmını emecek, bunun sonucunda da çimento, hidrasyonu için gerekli suyu bulamadığı için beton mukavemeti beklenen değerinin altında olacaktır (Ulus, 1998).

Hafif betonların bileşim hesabı,  $1\text{m}^3$  betonu meydana getirmek için gerekli çimento, kum, iri agrega ve su miktarını hesaplamak suretiyle yapılmıştır. Her bir hacim değerinden özgül ağırlıklar yardımıyla gerekli olan toplam agrega miktarına geçilmiştir. Kullanılan özgül ağırlıklar kuru bazda alındığı için elde edilen ağırlıklar da kuru birim ağırlık değeri olarak bulunmuştur. Denemeler için ise  $25\text{ dm}^3$ 'lük hacimlere geçilmiş, bu hacimlerdeki madde miktarları hesaplanmış ve kuru-gevşek tartımlar alınmıştır.

Hafif beton karışımlarına eklenecek minimum su miktarı elde edilecek taze betonun taşınmasını, yerleştirilmesini, sıkıştırılmasını ve mastarlanmasını sağlayacak miktarda olmalıdır. Karışımda kullanılan fazla su, elde edilecek betonda segregasyona, basınç mukavemeti ve durabilitede azalmaya, rötrede artmaya ve mastarlamada zorluğa sebep olabilmektedir. Hafif betonların üretiminde kullanılan agregalar çok hızlı ve çok uzun süre su emdikleri için bu tür betonların karışımında sabit su miktarı belirlemek oldukça zordur. Bu sebepten dolayı denemelerde bütün agregalar  $105^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulmuştur. Böylece bulundurduğu rutubetten kaynaklanan sorunlar da ortadan kaldırılmıştır. Beton dizaynlarında hidrasyon için gerekli olan su miktarına ek olarak denemelerin  $\frac{1}{2}$  saatte (ilk 10 dakikasını ön emdirme süresidir) tamamlandığı kabul edilerek, agregaların  $\frac{1}{2}$  saatlik su emme değerleri hesaplanmış ve su düzeltmeleri yapılarak dizaynlar tamamlanmıştır.

Bütün beton denemelerinde su, agrega ve kum miktarları sabit alınmayıp, ayrı ayrı hesaplanmıştır.  $1\text{m}^3$ 'lük dizaynların temel alındığı, genişletilmiş perlit agregası ve pomza agregası kullanılarak yapılan beton denemelerinde çimento dozajı  $250\text{ kg/m}^3$ , ham perlit agregası ve andezit ile yapılan beton denemelerinde ise çimento dozajı  $300\text{ kg/m}^3$  olarak sabit alınmıştır. Su/çimento oranlarının sabit tutulmadığı denemelerde, ince/iri agrega oranları da değişmektedir. İstenilen sonuçlara ulaşılan beton denemeleri, alçıtaşı katkısıyla tekrar dizayn edilmiştir. Amaç, bu betonlarda borik asit atığının priz süresi, basınç mukavemeti ve sertleşmiş betonun su emme oranına etkisini gözlemlemektir. Bu nedenle çimento dozajları sabit alınmış, alçıtaşı katılarak hazırlanan betonlarda ise çimentonun ağırlıkça %3'lük kısmı yerine kalsine edilmiş borik asit atığı kullanılmıştır. Ham perlit agregası ile yapılan tüm beton denemelerinde çimento ağırlığının % 0.5'i oranında WRDA 90 akışkanlaştırıcı katkı maddesi, genişletilmiş perlit agregası kullanılarak yapılan denemelerde çimento ağırlığının %1'i, pomza agregası kullanılarak yapılan denemelerde ise %0.5'i oranında Sika Lightcrete I 500 katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı maddeleri, karışım suyuna eklenerek uygulanmıştır.

#### 4.4.2 Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve saklama koşulları

Betonların karıştırılmasında 125 lt kapasiteli, davul mikser kullanılmıştır. Denemelere başlamadan önce agregalara beton suyu verilerek 10 - 15 dakikalık bir ön emdirme işlemi uygulanmıştır. Betoniyere bütün malzemeler konulduktan sonra karışımda homojenlik sağlanana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu süre yaklaşık olarak 5 dakika kadardır. Karıştırma işlemi sonunda çökme değeri ölçülmüştür. Çalışmalarda sabit su miktarının belirlenmesi güçlüğünden dolayı, çökme değerinin 5 – 10 cm ile sınırlı kalmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca dizaynda hesaplanan birim ağırlık ve 25 dm<sup>3</sup>'lük hacim değeri ile, karıştırma sonunda elde edilen taze betonun birim ağırlığı ve hacmi arasındaki farkın %1'den fazla olmamasına özen gösterilmiştir. İstenilen çökme, birim ağırlık ve hacim değerlerine ulaşılan kadar dizaynlar tekrarlanmıştır. İstenilen dizaynlar elde edildiğinde taze beton numuneleri 15x15x15 cm'lik 6'şar adet küp kalıba üç kademede ve her kademede 25'er defa şişlenerek yerleştirilmiştir. Numune yüzeyleri malayla düzeltilmiştir. Kalıplar içinde 1 gün bekletilen numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra, su sıcaklığı 23°C ± 2°C'de ayarlı kür havuzuna konulmuş ve 28 gün süresince bekletilmiştir.

#### 4.5 Taze ve Sertleşmiş Betonlar Üzerinde Yapılan Deneyler

##### 4.5.1 Taze betonun işlenebilme özelliğinin belirlenmesi

Hafif betonlarda aranılan özelliklerden biri de taze iken sahip oldukları işlenebilme özelliğidir. Hafif betonların işlenebilme karakteristikleri normal agregalı betonlarınkinden oldukça farklılık göstermektedir. Bu betonların işlenebilmeleri çok düşük ise bunun neticesinde beton iyi bir şekilde yerleştirilemeyecek ve vibratör kullanımı sonucunda hafif ince malzemeler yüzeyde toplanarak segregasyonun oluşmasına sebep olacaklardır. İşlenebilmeleri çok yüksek ise taneler arasında yeterli kohezyonun olmayışından dolayı segregasyon riski artacak ve sıkıştırmadan sonra beton tabana çökerek yüzeyde suyun toplanmasına (betonun kusmasına) sebep olacaktır. Yapılan birçok çalışma bu betonların ideal bir şekilde yerlerine yerleştirilebilmeleri için çökme değerlerinin 2.5 ile 10 cm arasında olmasının yeterli olacağını göstermiştir (Ulus, 1998)

#### 4.5.2 Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi

Taze beton darası alınmış hacmi belli kap içine üç eşit kademede, 25'er defa şişlenerek yerleştirilmiştir. Numune tartımı  $W_n$  olarak alınmıştır. Kabin hacmi ise  $V$  olarak kaydedilmiştir. Tayin edilen değerler (4.8) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$B_n = (W_n) / V \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.8)$$

Burada;

$B_n$  = Taze numune birim ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_n$  = Taze numune ağırlığı (kg)

$V$  = Ölçü kabı hacmi ( $\text{m}^3$ )

#### 4.5.3 Taze betonda priz süresinin tayini

Betonda priz başlama süresi, beton karılırken suyun çimentoya temas ettiği andan, betondan elenerek ayrılmış olan harcın, çapı 6.175 mm olan bir sondanın daldırılmasına karşı 5  $\text{kgf/cm}^2$ 'lik bir dayanım kazanmasına kadar geçen süredir.

Betonda priz bitme süresi, beton karılırken suyun çimentoya temas ettiği andan itibaren betondan elenerek ayrılmış olan harcın, çapı 6.175 mm olan bir sondanın daldırılmasına karşı 35  $\text{kgf/cm}^2$ 'lik bir dayanım kazanmasına kadar geçen süredir (TS 2987, 1978).

Taze beton göz açıklığı 5mm olan elekten su emmeyen bir yüzey üzerine elenerek harç kısmı ayrılmıştır. Harç, numune kabı ağzından yaklaşık 5 mm aşağıda bir seviyeye kadar doldurulmuştur. Deney düzeneği kurulduktan sonra sondanın alt ucu, baskül kefesine konulacak olan numune kabı ağzından yaklaşık 6 mm yukarıya ayarlanmıştır. Numune kabı için dara düzeltmesi yapılmıştır. Sonda yavaşça alçaltılarak rondolası kap içerisindeki harcın yüzeyine temas edinceye kadar harca batırılmıştır. Harcın sondanın daldırılmasına karşı dayanımı kg olarak kaydedilmiştir. Betonda priz başlama ve priz bitme süresini tayin etmek için 5 ve 35  $\text{kgf/cm}^2$ 'lik dayanım kazanmasına kadar geçen sürenin belirlenmesi gerekir. Bunun için de kg olarak kaydedilen değerler sonda kesit alanına ( $0.3 \text{ cm}^2$  olarak kabul edilir) bölünmüştür.

#### 4.5.4 Sertleşmiş betonda su emme oranı tayini

TS 3624'e göre deney numuneleri 100°C - 110°C arasındaki sıcaklıkta bir etüvde, 24 saat kurutulmuş ve kuru ağırlık (A) saptanmıştır. Etüv kurusu ağırlığı saptanmış numuneler soğutulduktan sonra 23°C ± 2°C sıcaklıkta ki su içine batırılmıştır. 24 saat suda bekletilen numunelerin yüzeyi bir havluyla kurulandıktan sonra suya doymuş yüzey kuru tartımları (B) alınmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak (4.9) eşitliği yardımıyla su emme oranı hesaplanmıştır (TS 3624, 1981).

$$m = \frac{B_{sb} - A_{sb}}{A_{sb}} \times 100 \quad (\%)$$

(4.9)

Burada;

$m$  = Sertleşmiş betonda ağırlıkça su emme oranı (%)

$A_{sb}$  = Sertleşmiş beton kuru ağırlığı (kg)

$B_{sb}$  = Sertleşmiş beton suya doymuş yüzey kuru ağırlığı (kg)

#### 4.5.5 Sertleşmiş betonun basınç mukavemeti tayini

Beton diğer bir çok yapı malzemesi gibi basınç mukavemeti yüksek, çekme mukavemeti düşük bir malzemedir. Betonun çok düşük olan çekme basıncı hesaplarda genellikle dikkate alınmadığından, üzerinde durulan en önemli özelliği basınç mukavemetidir. Betonun standart basınç mukavemeti; suda kür edilmiş 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin, aksel basınç altındaki dayanımı olarak tanımlanır. Ülkemizde ve bazı Avrupa ülkelerinde genelde 20x20x20 cm boyutlarında standart küp numuneleri kullanılmaktadır. Silindir ile küp numuneleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan çalışmalarda silindir basınç mukavemetinin küp basınç mukavemetine oranının 0.80 ile 0.85 arasında olduğu bulunmuştur (Ulus, 1988).

Hazırlanan numuneler 3, 7 ve 28 gün sonra basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuşlardır. Numuneler basınç testine tabi tutulmadan en az iki saat önce kür tankından çıkarılarak kurumaya bırakılmışlardır. Kurumaya bırakılan numuneler prese yerleştirilmiş, numune boyutları ve yükleme hızı prese girildikten sonra pres çalıştırılarak numuneler kırılmıştır. Numunenin basınç dayanımı değerleri kgf/cm<sup>2</sup> olarak kaydedilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

### 5.1 Beton Dizaynları

Beton dizaynları yapılırken pomza ve genişletilmiş perlit betonlarında ince agrega olarak kum kullanılmıştır. Ham perlit ve ham perlit + andezit betonlarında, ince agrega olarak 4.75 mm'lik elek altında kalan ham perlit agregası, iri agrega olarak ise 4.75 mm'lik elek üstünde kalan ham perlit agregası ve andezit kullanılmıştır. Denemelerden önce tüm agregalar kurutulmuştur. ½ saatlik absorpsiyon değerleri kullanılarak her biri için absorpsiyon suyu miktarı hesaplanmıştır. Tüm dizaynlar bu düzeltmeler göz önünde bulundurularak tekrar yapılmıştır. Beton dizaynları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Beton dizaynları

	Çimento 1m <sup>3</sup> 'de (kg)	Su 1m <sup>3</sup> 'de (kg)	İnce agrega 1 m <sup>3</sup> 'de (kg)	İri agrega 1m <sup>3</sup> 'de (kg)	Andezit 1m <sup>3</sup> 'de (kg)	Alçıtaşı 1m <sup>3</sup> 'de (kg)
Pomza betonu	250.0	149	503	519	-	-
Pomza + alçıtaşı betonu	242.5	110	503	554	-	7.5
G.Perlit betonu	250.0	206	518	91	-	-
G.Perlit + alçıtaşı betonu	242.5	190	583	101	-	7.5
H.Perlit betonu	300.0	221	749	609	-	-
H.Perlit + alçıtaşı betonu	291.0	228	723	619	-	9.0
H.Perlit + andezit betonu	300.0	223	750	470	139	-
H.Perlit + andezit + alçıtaşı betonu	291.0	237	785	482	139	9.0

## 5.2 Taze Beton Birim Ağırlıkları

Beton dizaynları sırasında hesaplanan teorik birim ağırlıkları ile elde edilen taze betonların birim ağırlıkları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

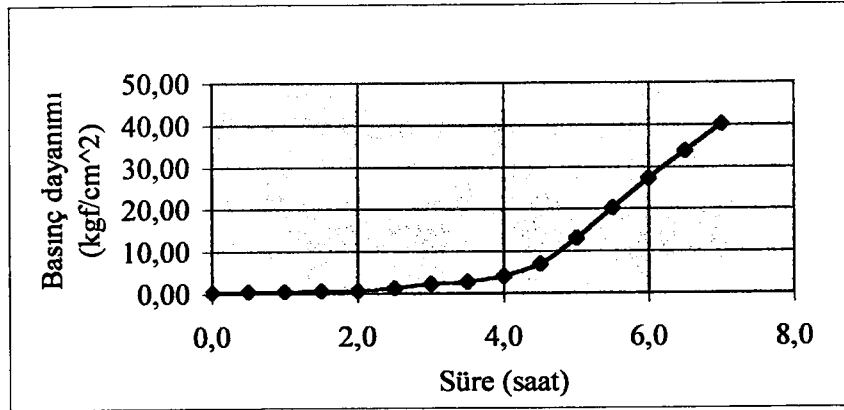
Çizelge 5.2 Taze beton birim ağırlıkları

	Teorik birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Taze beton birim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )
Pomza betonu	1423.0	1411
Pomza + alçıtaşı betonu	1416.0	1416
G.Perlit betonu	1067.5	1068
G.Perlit + alçıtaşı betonu	1126.5	1097
H.Perlit betonu	1880.5	1875
H.Perlit + alçıtaşı betonu	1872.0	1888
H.Perlit + andezit betonu	1882.0	1900
H.Perlit + andezit + alçıtaşı betonu	1945.0	1930

### 5.3 Taze Beton Priz Deneyi Sonuçları

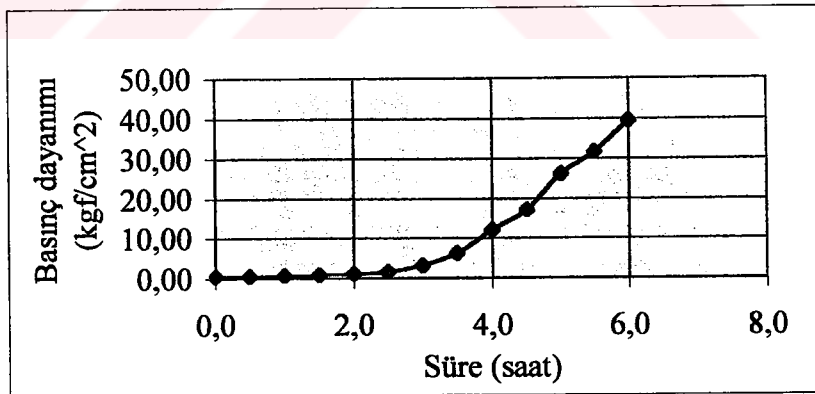
Betonda yapılmış olan priz deneyi sonuçları Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8'de gösterilmiştir.

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,28
0,5	0,41
1,0	0,49
1,5	0,56
2,0	0,59
2,5	1,19
3,0	2,28
3,5	2,72
4,0	4,05
4,5	6,92
5,0	13,080
5,5	20,250
6,0	27,220
6,5	33,750
7,0	40,120



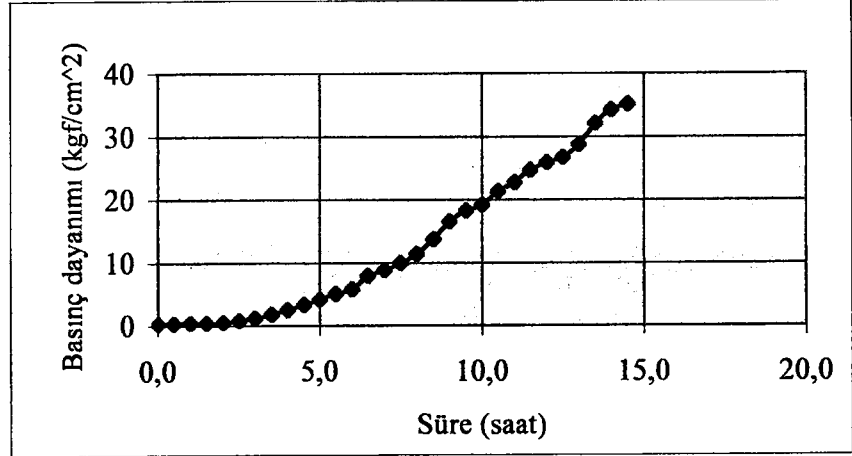
Şekil 5.1 Pomza betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,42
0,5	0,47
1,0	0,68
1,5	0,84
2,0	1,05
2,5	1,56
3,0	3,21
3,5	6,21
4,0	11,950
4,5	17,150
5,0	26,210
5,5	31,610
6,0	39,490



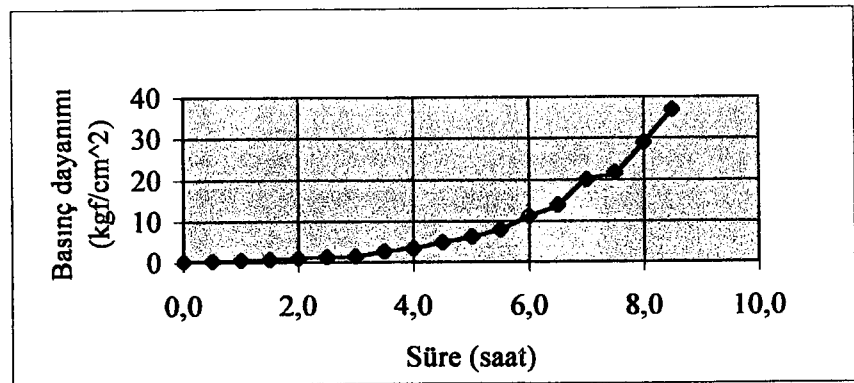
Şekil 5.2 Pomza + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,28
0,5	0,34
1,0	0,39
1,5	0,41
2,0	0,54
2,5	0,80
3,0	1,23
3,5	1,79
4,0	2,57
4,5	3,40
5,0	4,21
5,5	5,06
6,0	5,75
6,5	7,87
7,0	8,83
7,5	9,93
8,0	11,390
8,5	13,730
9,0	16,560
9,5	18,250
10,0	19,170
10,5	21,270
11,0	22,700
11,5	24,670
12,0	25,850
12,5	26,670
13,0	28,750
13,5	32,100
14,0	34,230
14,5	35,120



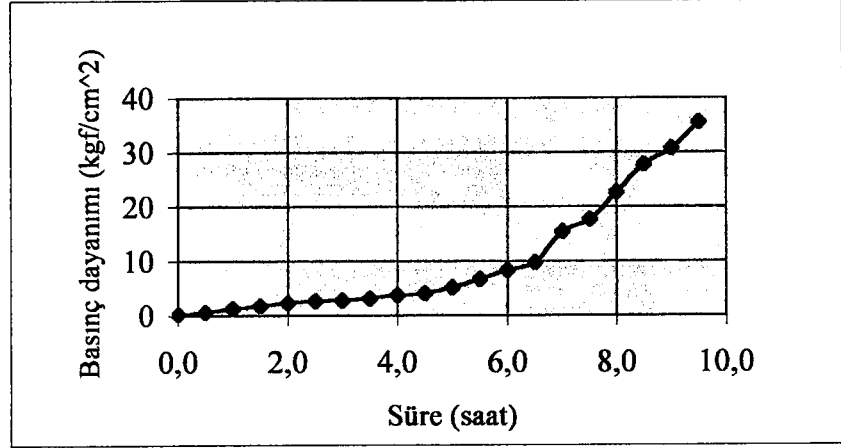
Şekil 5.3 Genleştirilmiş perlit betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,23
0,5	0,33
1,0	0,42
1,5	0,61
2,0	0,93
2,5	1,19
3,0	1,38
3,5	2,64
4,0	3,45
4,5	4,87
5,0	6,15
5,5	7,89
6,0	11,280
6,5	13,820
7,0	19,880
7,5	21,630
8,0	28,980
8,5	36,940



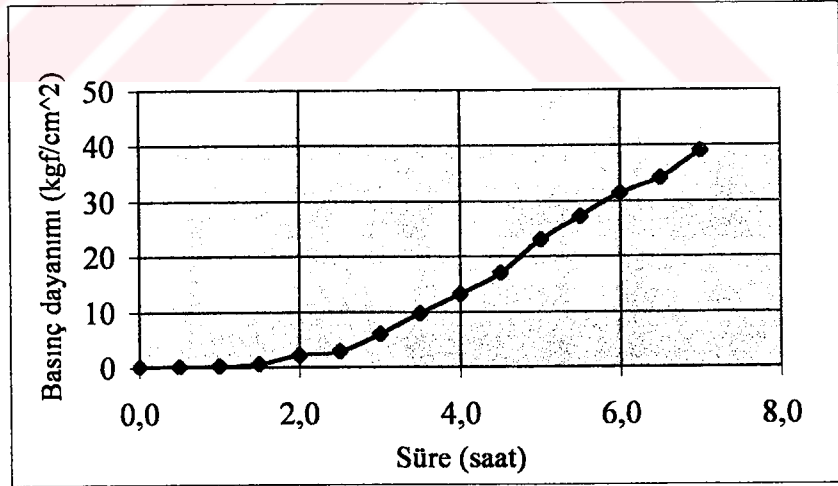
Şekil 5.4 Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,25
0,5	0,62
1,0	1,32
1,5	1,80
2,0	2,33
2,5	2,65
3,0	2,88
3,5	3,17
4,0	3,77
4,5	4,14
5,0	5,13
5,5	6,75
6,0	8,39
6,5	9,77
7,0	15,360
7,5	17,590
8,0	22,580
8,5	27,730
9,0	30,730
9,5	35,580



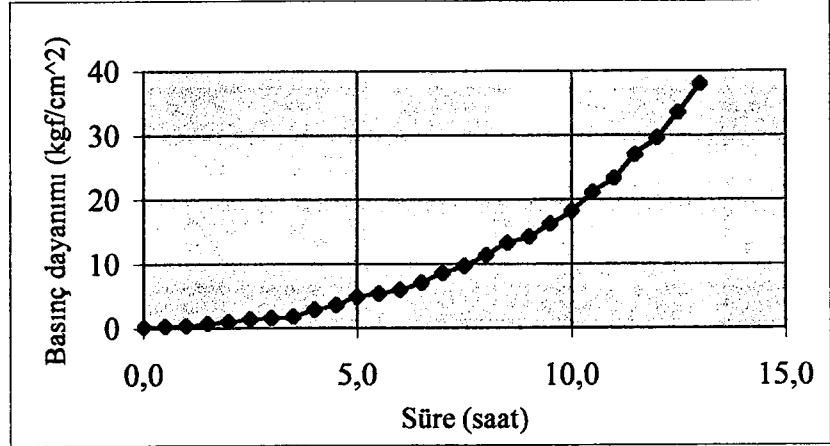
Şekil 5.5 Ham perlit betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,11
0,5	0,15
1,0	0,26
1,5	0,59
2,0	2,23
2,5	2,88
3,0	5,99
3,5	9,69
4,0	13,250
4,5	17,070
5,0	23,060
5,5	27,170
6,0	31,370
6,5	34,200
7,0	39,050



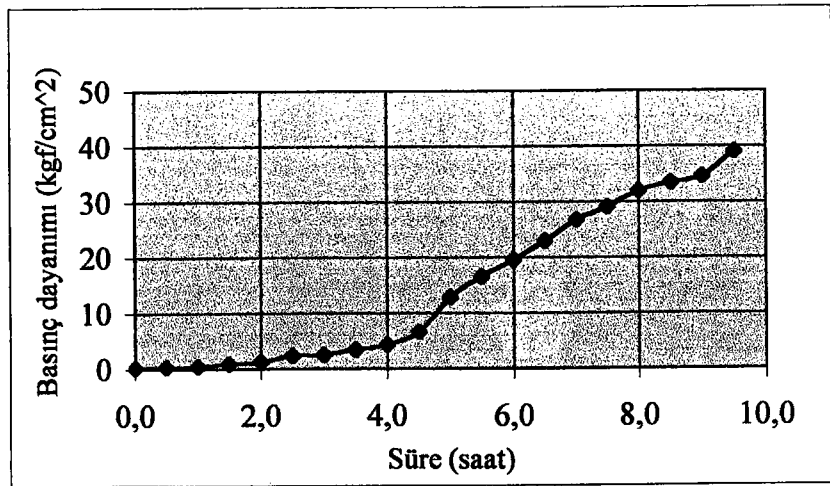
Şekil 5.6 Ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,17
0,5	0,31
1,0	0,41
1,5	0,67
2,0	1,01
2,5	1,37
3,0	1,62
3,5	1,76
4,0	2,92
4,5	3,59
5,0	4,90
5,5	5,39
6,0	6,01
6,5	7,02
7,0	8,56
7,5	9,70
8,0	11,330
8,5	13,210
9,0	14,190
9,5	16,200
10,00	18,250
10,50	21,060
11,00	23,280
11,50	26,920
12,00	29,510
12,50	33,580
13,00	38,030



Şekil 5.7 Andezit + ham perlit betonu priz deneyi

Süre (saat)	Basınç dayanımı (kgf/cm <sup>2</sup> )
0,0	0,19
0,5	0,33
1,0	0,51
1,5	0,91
2,0	1,25
2,5	2,41
3,0	2,49
3,5	3,47
4,0	4,35
4,5	6,73
5,0	12,850
5,5	16,570
6,0	19,530
6,5	22,880
7,0	26,730
7,5	29,050
8,0	31,880
8,5	33,450
9,0	34,590
9,5	39,020



Şekil 5.8 Andezit + ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi

#### 5.4 Sertleşmiş Betonda Basınç Mukavemeti Sonuçları

İstenilen sonuçların elde edildiği beton dizaynlarında, numunelerin sahip oldukları basınç mukavemeti değerleri Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 Sertleşmiş beton basınç mukavemetleri

	3 günlük (kgf/cm <sup>2</sup> )	7 günlük (kgf/cm <sup>2</sup> )	28 günlük (kgf/cm <sup>2</sup> )
Pomza betonu	55	72	91
Pomza + alçıtaşı betonu	38	53	91
G.Perlit betonu	13	14	22
G.Perlit + alçıtaşı betonu	15	19	28
H.Perlit betonu	243	303	424
H.Perlit + alçıtaşı betonu	221	299	411
H.Perlit + andezit betonu	227	266	357
H.Perlit + andezit + alçıtaşı betonu	232	323	394

#### 5.5 Sertleşmiş Betonda Su Emme Oranları

Sertleşmiş betonun su emme oranları Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Sertleşmiş betonda su emme oranı (%)

	Pomza betonu	Pomza + alçıtaşı betonu	G.Perlit betonu	G.Perlit + alçıtaşı betonu	H.Perlit betonu	H.Perlit + alçıtaşı betonu	H.Perlit + andezit betonu	H.Perlit+ andezit+ alçıtaşı Betonu
Su emme oranı (%)	13.53	14.21	22.08	24.01	2.63	2.93	3.97	4.55

## 5.6 Değerlendirmeler

Dört farklı agrega ile yapılan beton dizaynlarında istenilen değerler elde edildikten sonra aynı betonlara çimentonun ağırlıkça %3'ü kadar olan alçı ilave edilmiş, çimento miktarı da aynı oranda azaltılmıştır. Bor jips atığından kalsinasyon yoluyla elde edilen alçı özgül ağırlığının çimento özgül ağırlığından düşük olması nedeniyle, bir bakıma çimento özgül ağırlığı düşürülmüştür. Bu da dolaylı olarak beton birim ağırlığını düşürücü yönde etkili olmuştur. Ancak bor jips atığından elde edilen alçının hafif beton basınç dayanımını negatif yönde etkilediği gözlenmemiştir.

Denemelerde pomza ve genleştirilmiş perlit agregaları ile üretilen betonlar yalıtım hafif betonu, ham perlit ve andezit agregaları ile üretilen betonlar ise taşıyıcı hafif beton özellikleri göstermiştir. Yalıtım betonlarında mukavemet özelliği aranmamaktadır. Zaten yalıtım amaçlı olarak kullanılabilmesi için boşluk oranı fazla agrega kullanılması gerekmektedir. Bu durum da kırılabilirliğin artmasına ve düşük basınç mukavemetlerine neden olmaktadır. Yalıtım betonlarının aksine bir betonun taşıyıcı hafif beton olabilmesi için birim ağırlığının 1600-2000 kg/m<sup>3</sup> değerleri arasında, basınç dayanımının ise 153 kgf/cm<sup>2</sup>'den büyük olması (Çizelge 3.1) gerekmektedir. Ham perlit ve andezit agregaları ile hazırlanan 300 dozajlı hafif betonlar BS 30, BS 35 basınç mukavemeti değerlerini (Çizelge 2.1) vermektedir. Bu basınç mukavemeti değerleri, 2100-2500 kg/m<sup>3</sup> birim ağırlığında üretilen normal beton standartlarıdır. Ham perlit ve andezit agregaları ile üretilen hafif betonların basınç mukavemetleri 424, 411, 394, 354 kgf/cm<sup>2</sup>'dir. Bu değerlere ulaşmak için normal betonlarda 300-450 kg/m<sup>3</sup>, hafif betonlarda ise 390-570 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı istendiği (Çizelge 3.3) görülmüştür. Kullandığımız agregaların kendilerine özgü özelliklerinden dolayı bu mukavemet değerlerine sadece 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ile ulaşmak mümkün olmuştur. Bu özellik ham perlit agregası ile üretilen hafif betonun mukavemet sonuçlarında daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Andezit agregası ile üretilen hafif betonların birim ağırlığının daha fazla olmasına rağmen, ham perlit agregası ile üretilen hafif betonlarda daha yüksek basınç mukavemetlerine ulaşılmıştır.

Denemeler sırasında 5-10 cm çökme değerinin betonun karıştırılması, kalıplara boşluksuz yerleştirilebilmesi ve birim ağırlık ile bire bir hacim deneyleri sırasında hataların %1'den fazla çıkmaması için uygun olduğu görülmüştür.

Ayrıca bor jips atığından elde edilen alçının hafif beton üretiminde priz hızlandırıcı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Priz başlama ve priz bitme süreleri alçı ilavesi ile şu şekilde değişmektedir;

Pomza betonu için; priz başlama süresi 4 ½ saatten 3 ½ saate, priz bitme süresi 7 saatten 6 saate,

Genleştirilmiş perlit betonu için; priz başlama süresi 5 ½ saatten 5 saate, priz bitme süresi 14 ½ saatten 8 ½ saate,

Ham perlit betonu için; priz başlama süresi 5 saatten 3 saate, priz bitme süresi 9 ½ saatten 7 saate,

Andezit + ham perlit betonu için; priz başlama süresi 5 ½ saatten 4 ½ saate, priz bitme süresi ise 13 saatten 9 ½ saate düşürülmüştür.

Bütün bunların yanı sıra bor, nötron zırlamasında istenilen özelliklere sahip olan elementlerden biridir. Bu amaçla kalsiyum içeren bor bileşikleri beton üretiminde katkı olarak uygulanmıştır. Radyoaktif ışınları, özellikle de nötronları yutma kapasiteleri test edildiğinde, etkili minerallerin kalsiyum içeren bor bileşikleri olduğu daha önceden yapılmış olan bu çalışmalarda kanıtlanmıştır (Yılmaz, 1996).

Sonuç olarak ise, bor jips atığından elde edilen alçının hafif beton üretiminde katkı olarak kullanılmasının priz süresini ayarlama hem etkili hem de ekonomik olduğu, beton mukavemetini düşürücü yönde etkili olmadığı, radyoaktif ışınlardan korunmada yeterli absorplama kapasitesine sahip olduğu ve çevreye verilen zararı önlemede ideal bir çözüm olduğu görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

Ulus, İ., (1998), “Erzincan Mollaköy Ham Perlit Agregasının Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

T.S. 11222, (1994), “Beton-Hazır Beton”, T.S.E., Ankara.

Clarke, J.L., (1993), Structural Lightweight Aggregate Concrete, Blackie Academic & Professional, U.K.

Postacıoğlu, B., (1975), Yapı Malzemesi Dersleri, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

Erdoğan-I, T.Y., (1995), “Türkiye’de Üretilen Çimentolar, Özellikleri ve Kullanımları”, Çimento Sempozyumu, 16-17 Kasım 1995, Ankara.

Erdoğan-II, T.Y., (1995), Betonun Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Şanbaşıoğlu, N., (1997), “Çimento Hakkında Genel Bilgi”, Çimento Dergisi.

Kocaçitak, S., (1978), Çimento ve Deneyleri, D.S.İ. Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü Matbaası, Ankara.

Tonak, T., (1995), “Çimento Standartları”, Çimento Sempozyumu, 16-17 Kasım, Ankara.

Postacıoğlu, B., (1987), Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, TKY Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

T.S. 706, (1980), “Beton Agregaları”, T.S.E., Ankara.

Karagüler, M.E., (1988), Isıl İşlem Parametrelerinin Hafif Beton Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

D.I.N. 1045., (1988), D.I.N.-Tashenbuch 78, Beton und Stahlbetonarbeiten, V.O.B/St. L.B., Beuthverlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.

T.S. 2511, (1977), “Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları”, T.S.E., Ankara.

Mindess, S. Ve Young, J. F., (1981), Concrete, Prentice – Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Neville, A.M., (1996), Properties of Concrete, John Wiley & Sons, New York.

T.S. 1114, (1986), “Hafif Agregalar – Beton İçin”, T.S.E., Ankara.

A.C.I. Education Bulletin No.E1-78, (1978), “Aggregates for Concrete”, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

T.S. 4834, (1986), “Beton ile İlgili Terimler”, T.S.E., Ankara.

- T.S. 3529, (1980), "Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini", T.S.E., Ankara.
- T.S. 3526, (1980), "Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini", T.S.E., Ankara.
- T.S. 3681, (1982), "Genleştirilmiş Perlit Agregası", T.S.E., Ankara.
- T.S. 10835, (1993), "Andezit - Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan", T.S.E., Ankara.
- Köse, H., Pamukçu, Ç., Yalçın, N. ve Seçer, T., (1997), "Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları", Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim 1997, Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Müh., Bölümü, İzmir.
- Güngör, N. ve Tombul, M., (1997), "Pomzanın Kullanım Alanı İle İlgili Özellikleri ve Mevzuatın Pomza Madenciliğine Etkisi", I. Isparta Pomza Sempozyumu, 26-28 Haziran 1997, Kültür Sarayı, Isparta.
- D.P.T., (1996), Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Bor Bileşikleri Alt Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı.
- Benker, G., (1992), Bor Bileşikleri, Maden Etüt Arşivi, No:443, Maden Tetkik Araştırma.
- Balkan, A. ve Ayok, T., (1993), Minimization of  $B_2O_3$  Losses With Waste Gypsum, Kimya Mühendisliği Araştırma Bölümü Yayını, 128, İstanbul
- Peker, Ö., (1973), "Borun Kullanımı, Tüketimi ve Ulusal Gelire Katkı Olanığı", Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik III Kongresi, 1973, Ankara.
- Kor, N., (1992), "Etibank Bandırma Tesislerinden Çıkan Atıkların Denizi Kirletmesinin Önlenmesi", Tübitak VI.Bilim Kongresi, 1992, Ankara.
- D.P.T., (1999), Etibank Bor İşletmelerinden Atılan Katı ve Sıvı Bor İçeren Atıklardan Bor'un Geri Kazanımı Sonrası Tuğla ve Diğer Sanayilerde Kullanımı Ara Raporu, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Grace, (1999), Ürün Kataloğu, Grace Cement and Concrete Chemicals.
- Sika, (1999), Ürün Kataloğu, Sika.
- T.S.K.B., (1980), Alçıtaşı ve Anhidrit , Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş. Kimya Sektör Araştırması, 23.
- T.S. 2987, (1978), " Betonda Priz Süresinin Tayini", T.S.E., Ankara.
- T.S. 3624, (1981), " Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Metodu", T.S.E., Ankara.
- Yılmaz, F., (1996), Türkiye'de Bulunan Hidrate Bor Minerallerinin Nötron Zırhlama Etkinliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü.