

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORİK ASİT ATIĞI ve ÇELİK TEL KATKILI
HAFİF BETON ÜRETİMİ**

Kimya Müh. Emek MÖRÖYDOR

**F.B.E. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

93748

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN

SPiny

Üye : Prof. Dr. Neşet KADIRGAN:

Neşet Kadırgan

Üye : Doç. Dr. Ahmet EKERİM:

A. Ekerim

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL, 2000

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. BETON ve BETON BİLEŞENLERİ	2
2.1 Beton	2
2.1.1 Betonun özellikleri	2
2.1.1 Betonun avantajları	2
2.1.1 Betonun dezavantajları	3
2.1.1 Beton çeşitleri	3
2.1 Beton Bileşenleri	5
2.1.1 Bağlayıcı maddeler	5
2.2.2 Çimento ve çeşitleri.....	7
2.2.2.1 Türkiye'de üretilen çimentolar	11
2.2.2.2 Çimentoların inceliği	15
2.2.2.3 Çimentoların prizi	16
2.2.2.4 Çimentoların hidrasyon ısısı	16
2.2.2.5 Çimentoların rötresi	16
2.2.2.6 Çimentoların fırındaki reaksiyonları	17
2.2.3 Agregalar	17
3. HAFİF BETON	19
3.1 Hafif Betonun Tanımı.....	19
3.2 Hafif Betonun Tarihçesi	19
3.3 Hafif Betonların Sınıflandırılması	20
3.4 Hafif Betonun Özellikleri	21
3.5 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları.....	24
3.6 Hafif Agregalar	26
4. HAFİF BETON BİLEŞENLERİ ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Aletlerin Tanıtılması	29
4.2 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	36
4.2.1 Çimento.....	36
4.2.2 Kum.....	36
4.2.3 Agregalar.....	38
4.2.3.1 Perlit.....	38

4.2.3.2	Andezit.....	41
4.2.3.3	Pomza.....	42
4.2.3.4	Keramzit.....	44
4.2.4	Borik asit atığı.....	46
4.2.4.1	Bor mineralleri ve bileşiklerine genel bakış.....	46
4.2.4.2	Bor kirliliği ve atıkların değerlendirilmesi.....	47
4.2.4.3	Borun giderilmesi ve giderilme yöntemleri.....	48
4.2.4.4	Bandırma Etibank Borik Asit Tesislerinden alınan atığın incelenmesi.....	51
4.2.4.5	Alçıtaşının minerolijisi.....	58
4.2.4.6	Borik asit atığından alçıtaşı eldesi.....	58
4.2.4.7	Borik asit atığının DTA-TG analizi.....	59
4.2.5	Çelik teller (Dramix) ve özellikleri.....	65
4.2.6	Kimyasal katkı maddeleri.....	68
4.2.6.1	Grace WRDA 90.....	68
4.2.6.2	Sika lightcrete I500.....	69
4.3	Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları.....	70
4.3.1	Agrega birim ağırlık tayini.....	70
4.3.1.1	Ham perlit agregası birim ağırlık tayini.....	71
4.3.1.2	Genleştirilmiş perlit agregası birim ağırlık tayini.....	71
4.3.1.3	Andezit agregası birim ağırlık tayini.....	72
4.3.1.4	Pomza agregası birim ağırlık tayini.....	72
4.3.1.5	Keramzit agregası birim ağırlık tayini.....	72
4.3.2	Agrega özgül ağırlık tayini.....	72
4.3.2.1	Ham perlit agregası özgül ağırlık tayini.....	74
4.3.2.2	Genleştirilmiş perlit agregası özgül ağırlık tayini.....	75
4.3.2.3	Andezit agregası özgül ağırlık tayini.....	75
4.3.2.4	Pomza agregası özgül ağırlık tayini.....	75
4.3.2.5	Keramzit agregası özgül ağırlık tayini.....	76
4.3.3	Agrega su emme oranı tayini.....	76
4.3.3.1	Ham perlit agregası su emme oranı tayini.....	77
4.3.3.2	Genleştirilmiş perlit agregası su emme oranı tayini.....	78
4.3.3.3	Andezit agregası su emme oranı tayini.....	78
4.3.3.4	Pomza agregası su emme oranı tayini.....	78
4.3.3.5	Keramzit agregası su emme oranı tayini.....	79
4.3.4	Agrega granülasyon tayinleri.....	79
4.3.4.1	Ham perlit agregası granülasyon tayini.....	80
4.3.4.2	Andezit agregası granülasyon tayini.....	81
4.3.4.3	Pomza agregası granülasyon tayini.....	82
4.3.4.4	Keramzit agregası granülasyon tayini.....	83
4.3.5	Agregaların kimyasal analizi.....	84
4.3.5.1	Ham perlit agregası kimyasal analizi.....	84
4.3.5.2	Genleştirilmiş perlit agregası kimyasal analizi.....	85
4.3.5.3	Andezit agregası kimyasal analizi.....	85
4.3.5.4	Pomza agregası kimyasal analizi.....	86
4.3.5.5	Keramzit agregası kimyasal analizi.....	86
4.4	Beton Karışımları.....	87
4.4.1	Kabul edilen ilkeler ve bileşim hesapları.....	87
4.4.2	Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve saklama koşulları.....	88
4.5	Taze ve Sertleşmiş Betonlar Üzerinde Yapılan Deneyler.....	89
4.5.1	Taze betonun işlenebilme özelliğinin belirlenmesi.....	89
4.5.2	Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi.....	89
4.5.3	Taze betonda priz süresinin tayini.....	89

4.5.4	Sertleşmiş betonda su emme oranı tayini.....	90
4.5.5	Sertleşmiş betonun basınç mukavemeti tayini.....	91
5.	SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER.....	92
5.1	Deney Sonuçları.....	92
5.1.1	Hafif beton dizaynları.....	92
5.1.2	Taze beton birim ağırlıkları.....	94
5.1.3	Taze beton priz deney sonuçları.....	96
5.1.4	Beton numunelerinin taramalı elektron mikroskopunda incelenmesi.....	102
5.1.5	Hafif beton basınç mukavemeti sonuçları.....	113
5.1.6	Sertleşmiş betonda su emme oranları	115
5.2	Değerlendirmeler ve Öneriler.....	116
	KAYNAKLAR	119
	ÖZGEÇMİŞ	122



SİMGE LİSTESİ

λ	Termik iletkenlik katsayısı
W	Numune ağırlığı
B	Numune birim ağırlığı
V	Ölçü kabı hacmi
γ	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	Titreşimli elek 29
Şekil 4.2	Mikser..... 30
Şekil 4.3	Çökme hunusu 31
Şekil 4.4	Numune kalıpları 32
Şekil 4.5	Priz aleti 32
Şekil 4.6	Kür tankı 33
Şekil 4.7	Pres 34
Şekil 4.8	Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM)..... 35
Şekil 4.9	İri ham perlit agregası 39
Şekil 4.10	İnce ham perlit agregası 40
Şekil 4.11	Genleştirilmiş perlit agregası 40
Şekil 4.12	Andezit agregası..... 41
Şekil 4.13	Pomza agregası 43
Şekil 4.14	Keramzit agregası 44
Şekil 4.15	Borik asit atığı..... 52
Şekil 4.16	Standart alçının X-Ray sonucu 54
Şekil 4.17	170 °C’de döner fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu 55
Şekil 4.18	170 °C’de tav fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu 56
Şekil 4.19	Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’ün bir arada karşılaştırıldığı rapor 57
Şekil 4.20	25°C-450°C arasında çekilmiş CaSO ₄ .2H ₂ O DTA-TG eğrileri..... 62
Şekil 4.21	25°C-450°C arasında çekilmiş Borik asit (H ₃ BO ₃) DTA-TG eğrileri..... 63
Şekil 4.22	25°C-450°C arasında çekilmiş Borik asit atığı DTA-TG eğrileri..... 64
Şekil 4.23	Çelik teller (Dramix)..... 66
Şekil 4.24	Çelik lifin görünümü..... 66
Şekil 4.25	Ham perlit agregası I granülasyon eğrisi 80
Şekil 4.26	Ham perlit agregası II granülasyon eğrisi 81
Şekil 4.27	Andezit’in granülasyon eğrisi 82
Şekil 4.28	Pomza agregası granülasyon eğrisi 83
Şekil 4.29	Keramzit agregası granülasyon eğrisi..... 84
Şekil 5.1	Ham perlit betonu priz deneyi 96
Şekil 5.2	Ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi 96
Şekil 5.3	Andezit + ham perlit betonu priz deneyi 97
Şekil 5.4	Andezit + ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi 97
Şekil 5.5	Ham perlit (ince) betonu priz deneyi 98
Şekil 5.6	Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu priz deneyi 98
Şekil 5.7	Genleştirilmiş perlit betonu priz deneyi 99
Şekil 5.8	Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi 99
Şekil 5.9	Pomza betonu priz deneyi 100
Şekil 5.10	Pomza + alçıtaşı betonu priz deneyi 100
Şekil 5.11	Keramzit betonu priz deneyi..... 101
Şekil 5.12	Keramzit + alçıtaşı betonu priz deneyi 101
Şekil 5.13	x 200 Ham perlit betonu 103
Şekil 5.14	x 500 Ham perlit betonu 103
Şekil 5.15	x 200 Ham perlit + alçıtaşı betonu 104
Şekil 5.16	x 500 Ham perlit + alçıtaşı betonu 104
Şekil 5.17	x 200 Andezit + ham perlit betonu..... 105
Şekil 5.18	x 500 Andezit + ham perlit betonu 105
Şekil 5.19	x 200 Andezit + ham perlit + alçıtaşı betonu 106
Şekil 5.20	x 500 Andezit +ham perlit +alçıtaşı betonu 106

Şekil 5.21	x 200 Ham perlit (ince) betonu.....	107
Şekil 5.22	x 500 Ham perlit (ince) betonu	107
Şekil 5.23	x 200 Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu	108
Şekil 5.24	x 500 Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu	108
Şekil 5.25	x 200 Genleştirilmiş perlit betonu	109
Şekil 5.26	x 500 Genleştirilmiş perlit betonu	109
Şekil 5.27	x 200 Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu	110
Şekil 5.28	x 500 Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu	110
Şekil 5.29	x 200 Pomza betonu	111
Şekil 5.30	x 500 Pomza betonu	111
Şekil 5.31	x 200 Pomza + alçıtaşı betonu	112
Şekil 5.32	x 500 Pomza + alçıtaşı betonu	112



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Basınç mukavemetlerine göre hazır betonlar 5
Çizelge 2.2	Portland çimentosunun kimyasal analizi 9
Çizelge 2.3	Çimentonun ana bileşenleri 9
Çizelge 2.4	Çimentoların bileşimi 12
Çizelge 2.5	Gerekli kimyasal özellikler 13
Çizelge 2.6	Gerekli fiziksel özellikler 14
Çizelge 2.7	Gerekli mekanik özellikler 15
Çizelge 3.1	Hafif betonların sınıflandırılması 20
Çizelge 3.2	Hafif beton özellikleri 22
Çizelge 3.3	Hafif beton ve normal betonun çimento içerikleri 23
Çizelge 3.4	Hafif agrega birim ağırlıkları 26
Çizelge 3.5	Hafif agregaların tipik özellikleri 28
Çizelge 4.1	Çimentonun kimyasal analizi 36
Çizelge 4.2	Akpınar kumu elek analizi 36
Çizelge 4.3	Akpınar kumu kimyasal analizi 37
Çizelge 4.4	Dünya perlit rezervleri 38
Çizelge 4.5	Keramzit üretim teknolojisi..... 44
Çizelge 4.6	Önemli bor mineralleri ve bileşikleri 46
Çizelge 4.7	Sanayide kullanılan önemli bor bileşikleri 47
Çizelge 4.8	Etibank Bandırma Fabrikası borik asit çamuru analiz sonuçları 48
Çizelge 4.9	Borik asit atığının kimyasal bileşimi 52
Çizelge 4.10	Borik asit atığının fiziksel analizi..... 53
Çizelge 4.11	Çelik tellerin özellikleri..... 67
Çizelge 4.12	Çelik tellerin kimyasal yapısı..... 68
Çizelge 4.13	Ham perlit agregası birim ağırlığı..... 71
Çizelge 4.14	Ham perlit agregası özgül ağırlığı 75
Çizelge 4.15	Ham perlit agregası su emme oranı..... 77
Çizelge 4.16	Genleştirilmiş perlit agregası su emme oranı 78
Çizelge 4.17	Andezit agregası su emme oranı..... 78
Çizelge 4.18	Pomza agregası su emme oranı 78
Çizelge 4.19	Keramzit agregası su emme oranı..... 79
Çizelge 4.20	Ham perlit agregası elek analizi 80
Çizelge 4.21	Andezit agregası elek analizi 81
Çizelge 4.22	Pomza agregası elek analizi 82
Çizelge 4.23	Keramzit agregası elek analizi..... 83
Çizelge 4.24	Ham perlit agregası kimyasal analizi 84
Çizelge 4.25	Genleştirilmiş perlit agregası kimyasal analizi 85
Çizelge 4.26	Andezit kimyasal analizi 85
Çizelge 4.27	Pomza agregası kimyasal analizi 86
Çizelge 4.28	Keramzit agregası kimyasal analizi..... 86
Çizelge 5.1	Ham perlit betonu dizaynı..... 92
Çizelge 5.2	Ham perlit+ andezit betonu dizaynı..... 92
Çizelge 5.3	Ham perlit (ince) betonu dizaynı..... 93
Çizelge 5.4	Genleştirilmiş perlit betonu dizaynı..... 93
Çizelge 5.5	Pomza betonu dizaynı..... 93
Çizelge 5.6	Keramzit betonu dizaynı 94
Çizelge 5.7	Ham perlit betonu birim ağırlığı..... 94
Çizelge 5.8	Ham perlit+ andezit betonu birim ağırlığı..... 94
Çizelge 5.9	Ham perlit (ince) betonu birim ağırlığı..... 95

Çizelge 5.10	Genleştirilmiş perlit betonu birim ağırlığı.....	95
Çizelge 5.11	Pomza betonu birim ağırlığı.....	95
Çizelge 5.12	Keramzit betonu birim ağırlığı.....	95
Çizelge 5.13	Ham perlit betonu basınç mukavemeti	113
Çizelge 5.14	Ham perlit+ andezit betonu basınç mukavemeti.....	113
Çizelge 5.15	Ham perlit (ince) betonu basınç mukavemeti.....	114
Çizelge 5.16	Genleştirilmiş perlit betonu basınç mukavemeti.....	114
Çizelge 5.17	Pomza betonu basınç mukavemeti.....	114
Çizelge 5.18	Keramzit betonu basınç mukavemeti.....	115
Çizelge 5.19	Sertleşmiş betonda su emme oranları.....	115



ÖNSÖZ

Tez çalışmam ve yüksek lisans öğrenimim süresince desteğini, teorik ve pratik yardımlarını esirgemeyen, her türlü olanağı sağlayan, beni yönlendiren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e, bu tezin bana verilmesinde katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Salih DİNÇER'e, tez çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım Kimya Yük. Müh. Sumru YALÇINALP'e, tecrübeleriyle bana yol gösteren, malzeme ve doküman temininde bana imkan sağlayan Yük. Müh. Şenel ARTIRMA'ya, deneysel çalışmalarımın SET Beton Cendere Tesislerinde yapılmasına imkan sağlayan SET Beton Genel Müdürü Sayın Mehmet KOZİKOĞLU'na, deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarından dolayı SET Beton Cendere Tesisleri Laboratuar Teknisyeni Sayın İrfan AKKABA'ya, kalite kontrol müdürü Sayın Selahattin HASDEMİR ve SET Çimento Ambarlı Tesisi Laboratuar Şefi Sayın Levent ONAT'a, BEKSA (Dramix) Pazarlama ve Satış Şefi Sayın Mehmet YERLİKAYA'ya, Arş.Gör. İffet ELBEYLİ ve Arş.Gör. Tanla ABKAN'a ve hayatımın her döneminde ve tüm öğrenim yaşamımda olduğu gibi çalışmalarım sırasında da her türlü ilgi ve desteği gördüğüm, sevgilerini, güvenlerini hiç eksik etmeyen bu günlerime ulaşabilmemde en büyük pay sahibi olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

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

Özellikle de bor türevlerinin üretimi sırasında meydana gelen atıkların değerlendirilmemesi büyük bir ekonomik kayıptır. Aynı zamanda diğer bir tehdit edici faktörde depremdir. Borik asit atık göletleri Marmara bölgesinde deprem kuşağı üzerindedir. Bu atıkların % 2'lik kısmının gölette çözünerek yer altı sularına karışması önemli bir çevre sorunudur.

Bu çalışmada ilk etapta perlit, andezit, pomza ve keramzit agregalı hafif beton numunelerine 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 katılarak elde edilen betonun priz başlangıcı, priz sonu, su emme ve basınç dayanımı özellikleri tespit edilmiştir.

Son olarak ise atık katılmayan hafif beton numunelerine farklı oranlarda çelik tel katılarak beton mukavemetine etkisi gözlenmiştir.

ABSTRACT

Despite of possessing a large amount of boron ores over the world our country couldn't reach the place it had to be in production of boron and boron products at the world markets. Especially the waste that takes place at the production of boron products is a big economical loss. And the other threatening factor is earthquake. The boric acid plant is in Marmara region and on the belt of earthquake. The carrying of %2 of these wastes in waste dam through the under ground water by the solubility is an important environmental problem.

In this study firstly the aim is to improve the quality of concrete with perlite, andesite, pumice and keramzit aggregates by mixing it with boric acid waste and contribute to the exertions of expanding 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, water absorption, pressure resistance features of the lightweight concrete obtained by adding larox to the including % 3 of B_2O_3 , have been determined.

Finally, the effects on pressure strength with the addition of steel fibers with different ratios to the concrete without boron wastes have been observed.

1.GİRİŞ

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 B₂O₃ içeren 250 bin ton katı atık oluşmakta ve bunun yanında atık göleğinde 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 sorunun çözümü için başta Etibank olmak üzere birçok büyük kuruluşumuz önderliğinde atıkların değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada ise borik asit fabrikasyonu atığı kullanılarak alçı üretilmiş ve hafif beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu şekilde 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.

Aynı zamanda bor atığı katılmadan farklı oranlarda çelik tel takviyesi ile beton mukavemet özellikleri değişimi gözlenmiştir.

2. BETON ve BETON BİLEŞENLERİ

2.1. Beton

Beton, çimento, agrega ve gerektiğinde katkı maddesinin uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu nedeni ile katılaşp sertleşen bir yapı malzemesidir (TS 4834). Elde edilen plastik kıvamda ki bu malzeme kalıplara yerleştirilerek sertleşmeye bırakılır. Sertleşmeye çimento ile su arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sebep olmaktadır ve sertleşme olayı uzun zaman devam etmektedir. Sertleşme olayının devam edebilmesi için belirli bir sıcaklığa ve neme ihtiyaç vardır. Bunu sağlamak içinde betonlar belli yaşa kadar kür'e tabi tutulmalıdırlar (Neville, 1996). Betonların mukavemetleri, durabiliteleri ve diğer özellikleri karışım içerisinde bulunan malzemelerin özelliklerine, karışım içerisindeki malzemelerin oranına, karışım şekline, sıkıştırma metoduna ve kürüne bağlıdır(Postacıoğlu, 1986).

2.1.1. Betonun özellikleri

Önemli olan betonu oluşturan malzemeleri belirli oranlarda karıştırarak plastik kıvamda bir kütle elde etmek değil, elde edilen betonun plastik ve sertleşmiş durumunda istenilen özellikleri yerine getirebilmesidir. Plastik durumda beton gerekli çalışabilirliği sağlamalı, segregasyon ve kuma oluşturmamalıdır. Sertleşmiş beton ise yüksek mukavemet ve durabiliteye, minimum boyut değişimine ve geçirgenliğe sahip olmalıdır. Genelde betonların en önemli özelliği basınç mukavemetleri olarak kabul edilir. Betonun diğer özellikleri ise betonun basınç mukavemeti ile ilgili olduğu kabul edilmektedir (Gambhir, 1986). Betonların sınıflandırılması genelde basınç mukavemetlerine göre yapılır (Neville,1996; Gambhir,1986). Türk standartları enstitüsünde ise bu sınıflandırma BS160, BS225, BS300 gibi yapılmaktadır.

2.1.2. Betonun avantajları

Betonu diğer yapı malzemelerinden daha önemli kılan özellikleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Betonun uzun vadede diğer malzemeler kıyasla daha ekonomik olması
- Betonun yüksek basınç mukavemetine sahip olması ve korozyon ve dış etkilerden çok az etkilenmesi

- Plastik durumda iken istenilen şeklin rahatlıkla verilebilmesi
- Yüksek basınç mukavemetine ve çelik ile birlikte sınırsız kullanım alanına sahip olması
- Çelik ile beton yaklaşık aynı ısı genişmesine sahip olduklarından, bunların birlikte kullanımları ideal bir kompozit malzeme oluşturması
- Betondaki çatlakların çeşitli malzemeler ile tamir edilebilmesi
- Betonların kolayca pompalanabilirliğinden dolayı çok zor ve yüksek yerlere rahatlıkla yerleştirilebilmeleri
- Dış etkilere ve ateşe dayanıklı olmaları
- Diğer yapı malzemelerine göre daha ucuz olmaları
- Bazı endüstriyel atıklarının beton sanayiinde kullanılması

2.1.3. Betonun dezavantajları

Sertleşmiş ve taze betonun kullanılmasının sakıncalarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Çekme gerilmeleri çok düşük olmasından dolayı, çekme gerilmesinin oluşabileceği bölgelerde donatısız kullanılmaması
- Taze betonda kuruma anında büzülme (rötre) oluşması ve sertleşmiş betonlarda nem ile temaslarında genişleme oluşması, bu durumun montaj noktalarında özel tedbirlerin alınmasını gerektirmesi
- Isı değişimi ile betonlar büzülme genişleme gösterirler. Bu sebepten dolayı montaj noktalarında çatlaklar oluşur. Bu çatlakların oluşmasını önlemek için özel tedbirlerin alınmasının zorunluluğu
- Kalıcı yükler altında sünme göstererek ön gerilmeli betonlarda gerilme kaybına sebep olmaları
- Agregada alkali reaksiyonlarının oluşma ihtimalinin bulunması
- tamamen geçirimsiz bir malzeme olmaması ve içerisinde bulunan çözünebilir tuzların çiçeklenmeye sebep olması

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.

a. Ağır betonlar

Birim ağırlığı 2500 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 γ ışınları tehlikelidir. Ağır betonlar her iki ışına karşı iyi bir izolasyon fonksiyonu görürler.

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

b. 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 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).

c. Hafif betonlar

Birim ağırlığı normal betonlardan belirli şekilde düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Genel olarak birim ağırlığı 1800 kg/m^3 '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^3 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^3 arasında değişirken, taşıyıcı olarak kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 2000 kg/m^3 'e kadar yükselebilmektedir (Ulus, 1998).

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

Beton sınıfı	Karakteristik basınç mukavemeti (kgf/cm ²) (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

2.2. 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.

a. Kireç (CaO)

Kireç CaCO₃'ün 900°C'in üstünde pişirilmesiyle elde edilir. Kalkerden başka, CaCO₃ ile MgCO₃'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°C'de buharlaşmaya 2570°C'de

ergimeye, 2850°C'de kaynamaya başlar. Silis, alümina ve demir oksit ile birleşme özelliği vardır.

b. 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 (SiO₂): Doğada bol şekilde bulunan silisin 4 çeşidi vardır.

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

Alümin (Al₂O₃): 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 şeyleri 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).

c. 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.

2.2.2. Çimento ve çeşitleri

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 hidrasyon yaptığı konusu, sadece çimento hamurunun (betonun) dayanımını değil, dayanıklılığını da etkilemektedir.

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar sırasında, “hidrasyon ısı” denilen bir miktar ısı açığa çıkmaktadır. Hidrasyon ısısının açığa çıkma hızı ve miktarı üzerinde çimentonun hidrasyon hızının ve hidrasyon miktarının çok büyük payı bulunmaktadır. Betonun maruz kaldığı sıcak ve soğuk hava koşulları da, hidrasyon hızını etkilediği için, hidrasyon 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 genişletici etkisi olan, alkali – silis jellerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar yavaş olduğundan, o zamana kadar sertleşen betonda yaratacakları genişlemeler 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).

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

- a. Portland çimentoları
- b. Doğal çimentolar
- c. Puzolanlı çimentolar
- d. Yüksek fırın çimentoları
- e. Alüminli çimentolar
- f. Özel çimentolardır (Şanbaşıoğlu, 1997).

a. Portland çimentoları

Portland çimentosu, uygun oranlarda birleştirilen kalkerli ve killi hammadde karışımının, döner fırında yaklaşık $1450^{\circ}C$ '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 ₂	S	17 – 25
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3 – 8
Demir	Fe ₂ O ₃	F	0.5 – 6
Kükürt trioksit	SO ₃	S	1 – 3
Manyezit	MgO	M	0.1 – 4
Alkaliler	Na ₂ O + K ₂ O	N + K	0.1 – 1.3

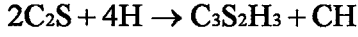
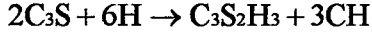
Hammadde karışımında bulunan oksitler, döner fırın içerisindeki sıcaklık etkisiyle, oldukça karmaşık bir takım reaksiyonlara girerek bileşenler oluşturmaktadır. Portland çimentosu klinkerinde (ve çimentoda) oluşan dört ana bileşenin isimleri Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

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

Ana bileşenler	Sembolleri
Di.kalsiyum.silikat (2CaO.SiO ₂)	C ₂ S
Tri.kalsiyum.silikat (3CaO.SiO ₂)	C ₃ S
Tri.kalsiyum.alüminat (3CaO.Al ₂ O ₃)	C ₃ A
Tetra.kalsiyum.alüminoferrit (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	C ₄ 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 C_3S ve C_2S 'dir. Bu bileşenlerin hidrasyon reaksiyonları, çimento kimyasındaki bileşenleri ile şu şekilde gösterilmektedirler;



Burada CH, kalsiyum hidroksittir; $C_3S_2H_3$ ise, tobermorit ismi verilen (kısaca C – S – H jeli) çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlayan hidrasyon ürünüdür (Erdoğan-I, 1995).

b. 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 tabiattan çıktığı şekilde kızdırılarak yapıldığı için diğer çimentolara nazaran kimyasal yapısı çok değişiktir (Kocaçitak, 1978).

c. 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 ısı düşük, donmaya dayanıklılığı az olan çimentolardır. Baraj, liman ve temel inşaatlarında çok kullanılan çimento türüdür.

d. Yüksek fırın cüruf çimentosu

Ani soğutulmuş 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 soğutulmuş 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.

e. 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.

f. Özel çimentolar

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.

Renkli çimentolar: Normal portland çimentosunun veya beyaz çimentonun çeşitli pigmentlerle renklendirilmesi sonucu elde edilen çimentodur.

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.

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.

Derin kuyu çimentoları: Normal portland çimentosu hammaddesine belirli ölçüde demir oksit ilave edilerek karışımdaki bütün alüminyum oksitlerin demir oksitle birleşip C₄AF 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).

2.2.2.1. 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 Standartlarıncı 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	BPC 70 BPC 85	TS 21	—	—	—
Beyaz portland çimentosu 42.5	BPC 70 BPC 85	TS 21	—	—	—
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	TS 10156	Maksimum 19		
Traslı çimento	TÇ 32.5	TS 26	20 – 40	—	—
Cürüflü çimento 32.5	CÇ 32.5	TS 20	—	20 – 80	—
Cürüflü 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	Sembölü	Kızdırma kaybı (%) maks	Çözünmeyen kalıntı (%) maks	SO ₃ (%) 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	BPC 70 BPC 85	5.0	5.0	4.0	5.0	0.1
Beyaz portland çim. 42.5	BPC 70 BPC 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
Trash 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	Sembölü	Priz Başlama Süresi (dakika) min	Priz Sona Erme Süresi (saat) maks	Hacim Genleşmesi (mm) min	Özgül yüzeyi (cm ² /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 BPÇ 85	45 45	10 10	10 10	2800 2800
Beyaz portland çim. 42.5	BPÇ 70 BPÇ 85	45 45	10 10	10 10	2800 2800
Katkılı çimento 32.5	KÇ 32.5	60	10	10	2800
Traslı çimento	TÇ 32.5	60	10	10	2800
Cüruflu çimento 32.5	CÇ 32.5	60	10	10	2800
Cüruflu 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 ²)		
		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

2.2.2.2. Çimentoların inceliği

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

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

2.2.2.3. 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.

2.2.2.4. Çimentoların 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.

2.2.2.5. 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/cm²'lik bir gerilmenin meydana getirdiği deformasyon mertebesindedir. Bu sebeple betonun rötresi bir çok bakımdan yapılarda göz önünde bulundurulmalıdır.

2.2.2.6. Çimentoların fırındaki reaksiyonları

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).

2.2.3. Agregalar

Bağlayıcı maddeler genel olarak mineral kökene sahip belirli boyutta sert tanelerden ibaret bulunan ve agrega ismi verilen malzeme ile birlikte kullanılır (Postacıoğlu, 1987). TS 706'ya göre agrega; 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 agrega diye sınıflandırılabilir. Doğal agrega; teraslardan, nehirlerden, denizlerden, göllerden ve taş ocaklarından elde edilen kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıllı agregadır. Yapay agrega; yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıllı agregadır. İri agrega; 4 mm göz açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregadır. İnce agrega ise; 4 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçen agregadır (TS 706, 1980).

Özgül ağırlıklarına göre agregaları şu şekilde sınıflandırabiliriz;

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

Barit	BaSO_4	özgül ağırlık = 4200 kg/m^3
Magnetit	Fe_3O_4	özgül ağırlık = 4600 kg/m^3
Limonit	$2\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	özgül ağırlık = 3700 kg/m^3

b. 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 kg/m^3 dolayındadır. Hafif doğal agrega olarak kullanılan diğer bir malzeme tüftür. Volkanik kökenli olan tüfün de birim ağırlığı 1400 kg/m^3 civarındadır.

- Yapay hafif agregalar: Yapay hafif agregalar, ısı 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 kg/m^3 'e kadar düşmektedir (Postacıoğlu, 1987).

3. HAFİF BETON

3.1. Hafif Betonun Tanımı

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 kgf/cm^2 'den 612 kgf/cm^2 'ye kadar çıkabilecek şekilde üretilen betonlardır (Clarke, 1993). Genel olarak birim ağırlığı 1800 kg/m^3 'den küçük bulunan betonlar hafif beton sınıfına girer (Postacıoğlu, 1987). ASTM C-330-69'a göre, birim ağırlıkları 1840 kg/m^3 'ü geçmeyen ve silindirik basınç dayanımı 173 kgf/cm^2 'yi aşan betonlar hafif beton sınıfına girer kabul edilmektedir (Karagüler, 1988). DIN 1045'e göre ise, birim ağırlığı 2000 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 kullanılacak 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 ²)	612 – 153	> 36	> 6
Isı aktarım katsayısı (W/mK)	—	< 0.75	< 0.30
Birim ağırlık (kg/m ³)	1600 – 2000	1450 – 1600	<<1450

a.Taşıyıcı hafif betonlar: Taşıyıcı hafif betonlar, birim ağırlıkları 1400 ile 1900 kg/m³ arasında olan betonlardır (Neville, 1996). Birim ağırlıkları 1600 ile 2000 kg/m³ arasında değişen betonlar olarak da tanımlanmaktadır (Clarke, 1993). TS 2511'e göre ise taşıyıcı hafif beton, kurumuş halde havadaki birim ağırlığı 1900 kg/m³'den az olan ve en az 160 kgf/cm² 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).

b. Taşıyıcı olmayan hafif betonlar: Bu betonlar genelde izolasyon amacı ile kullanılırlar. Birim ağırlıkları 300 ile 1200 kg/m³ arasında değişirken, basınç mukavemetleri de 50 ile 170 kgf/cm² arasında değişmektedir (Ulus, 1998).

Hafif betonlar, elde edilme yöntemlerine 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

a. 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/cm²'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 ³)	Basınç mukavemeti (kgf/cm ²) (28 günlük)	Beton birim ağırlığı (kg/m ³)
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 agrega 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

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

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

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

b. 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 genişmesi, 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 kütle ve kullanımdan önceki kurutma periyodu ile arttırılabilir (Mindess ve Young, 1981).

c. 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, slump (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 slamlar daha hafif kaba agregaların karışımdan segregasyonuna, altındaki değerler ise beton içerisindeki boşlukların artmasına neden olurlar. Hafif betonların düşük birim ağırlıklarından dolayı daha düşük slamlara sahip olma eğilimleri unutulmamalıdır. Yerleştirme sırasında, normal beton için tavsiye edilen yöntemler kullanılarak segregasyondan kaçınılmalıdır (Mindess ve Young, 1981).

3.5. Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif betonların normal betonlara kıyasla avantajları 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 (λ) 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 arttırması 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 dezavantajları 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 gereksinim 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 kg/m^3 'den az olan veya kuru özgül ağırlığı 1200 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 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, tüf, 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 (kg/m^3) (maks)
İnce agrega	1200
İri agrega	1000
Karışık agrega	1100

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

- Perlit ve vermikülit ile yalıtım hafif betonu,
- Pomza taşı ve volkanik cürufur 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 agrega 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 ³)
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

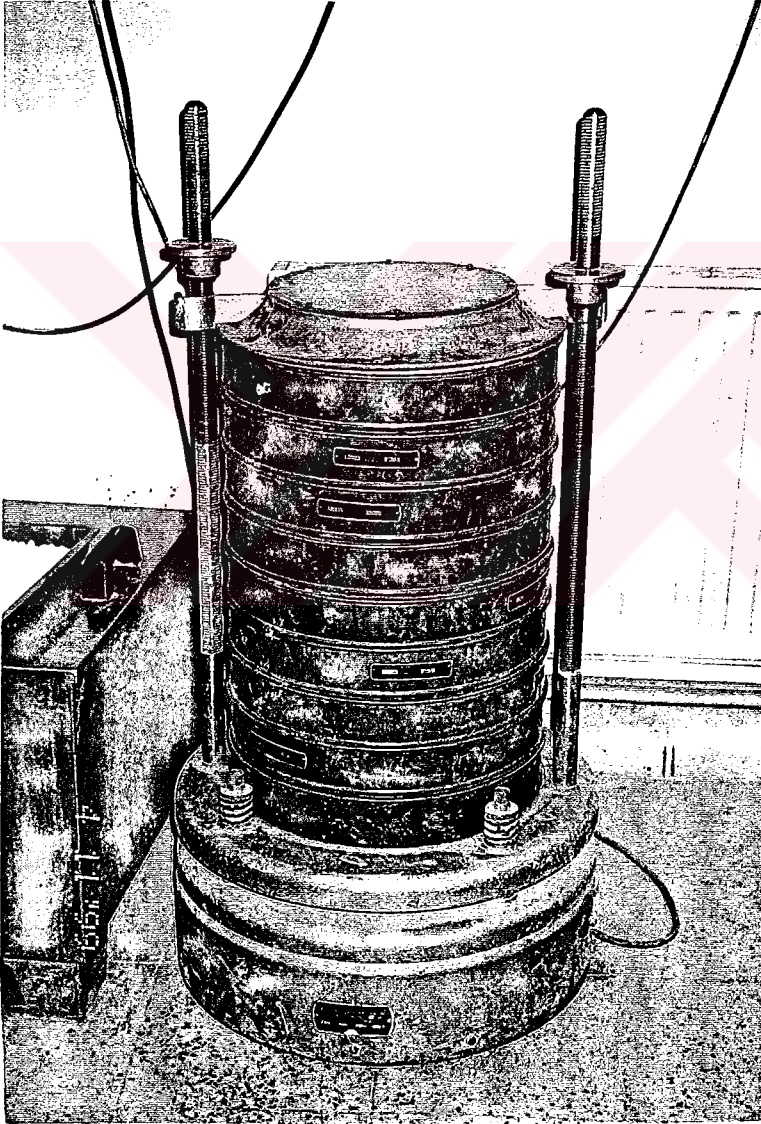
* Hafif agreganın iri kısmı (ince kısmı daha yoğundur)

4.HAFİF BETON BİLEŞENLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Aletler

- Titreşimli elek

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



Şekil 4.1. Titreşimli elek

- **Etüv**

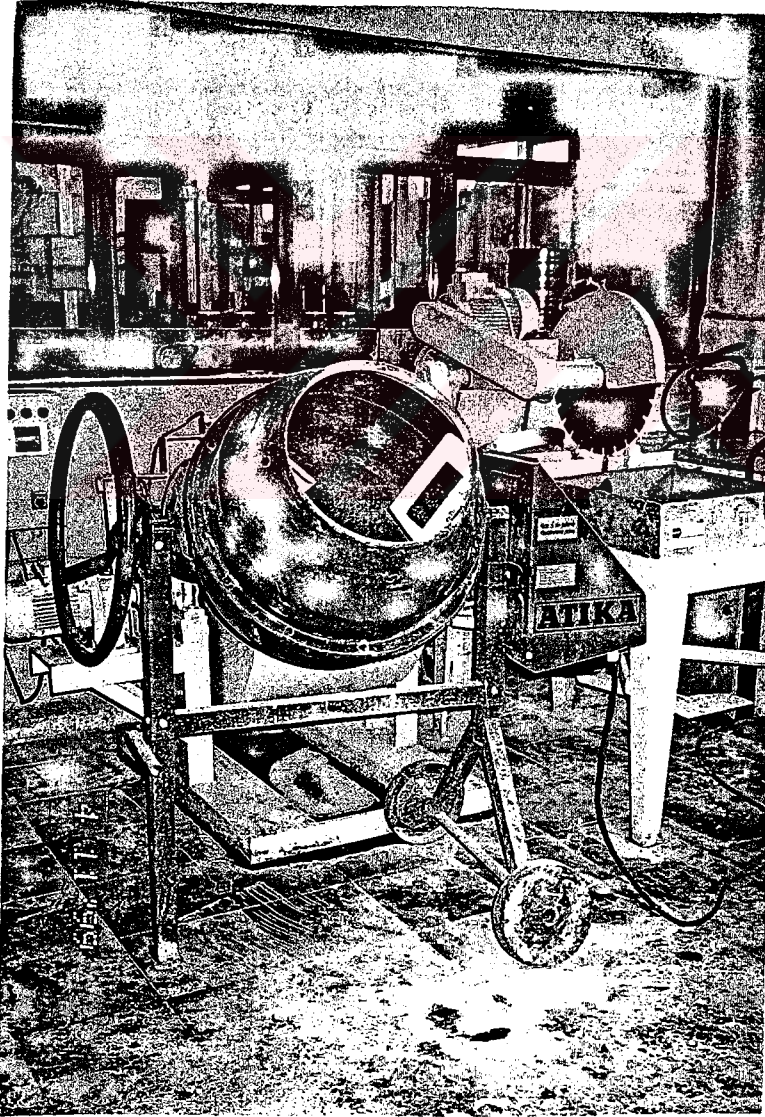
Malzemelerin kurutulması için, Memmert markalı, 200°C kapasiteli, hava çıkışının ayarlanabildiği bir etüv kullanılmıştır.

- **Birim ağırlık kapları**

Sıkışık ve gevşek birim ağırlık tayinlerini yapabilmek için 4.970, 7.980, 11.050, 14.340 dm³'lük hacmi belli, demir birim ağırlık kapları kullanılmıştır.

- **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 4.2. Mikser

- **Çökme hunisi**

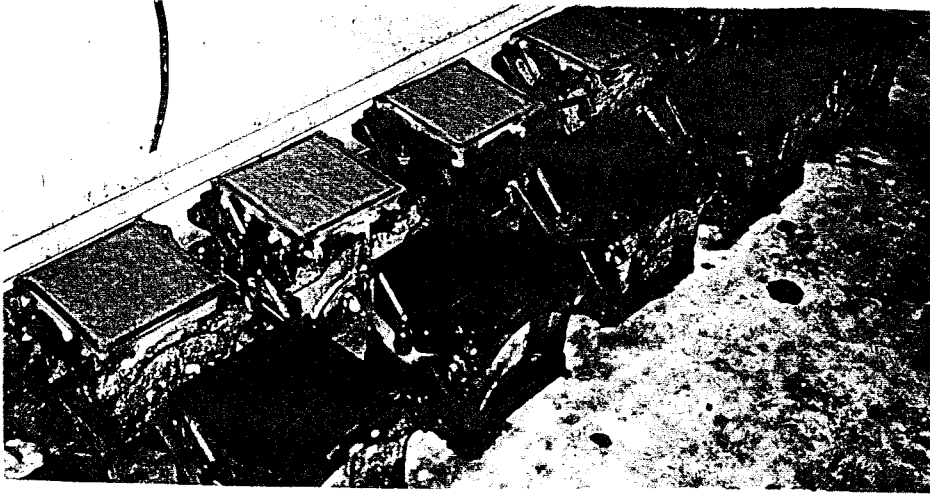
Taze betonun çökmesini bulmak için, taban çapı 203 mm ve üst yüzü 102 mm çapında, yüksekliği ise 305 mm olan, saçtan yapılmış kesik huni ve 60 cm boyunda ve 16 mm çapında ucu yuvarlatılmış çelik çubuk kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Çökme hunisi

- **Numune kalıpları**

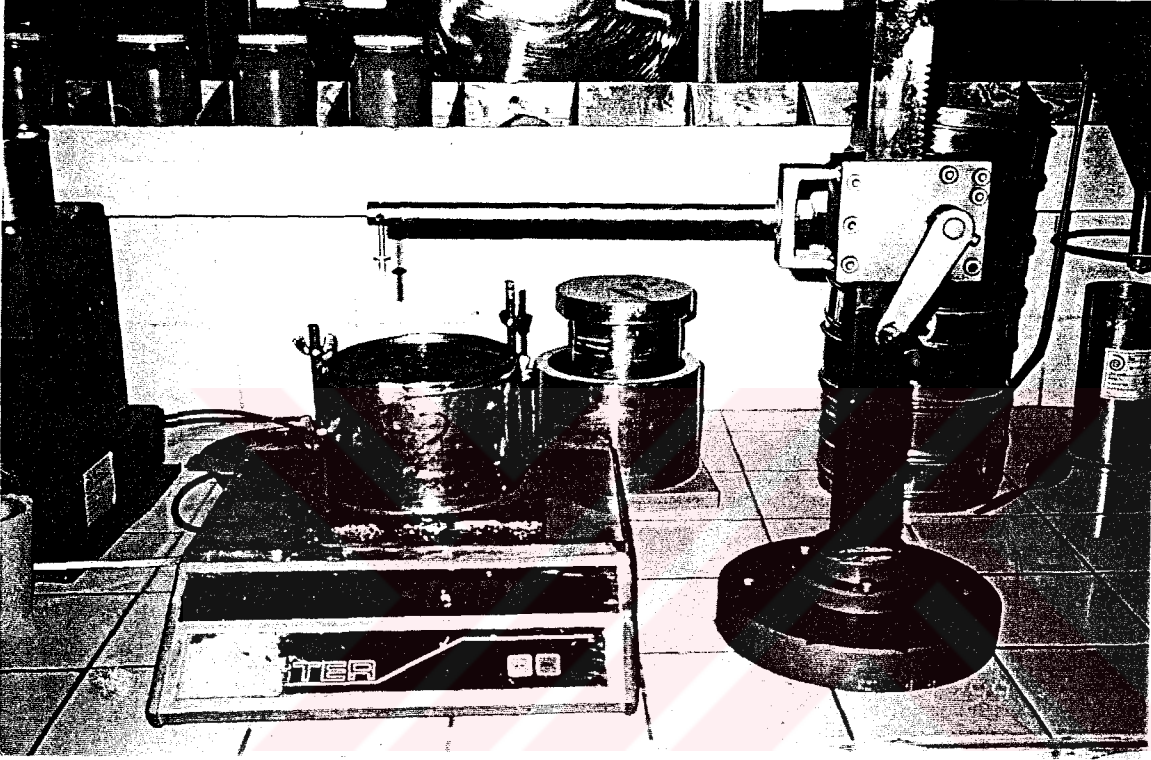
Beton numunelerini almak için, 15x15x15 cm'lik, demir döküm kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Numune kalıpları

- **Priz aleti**

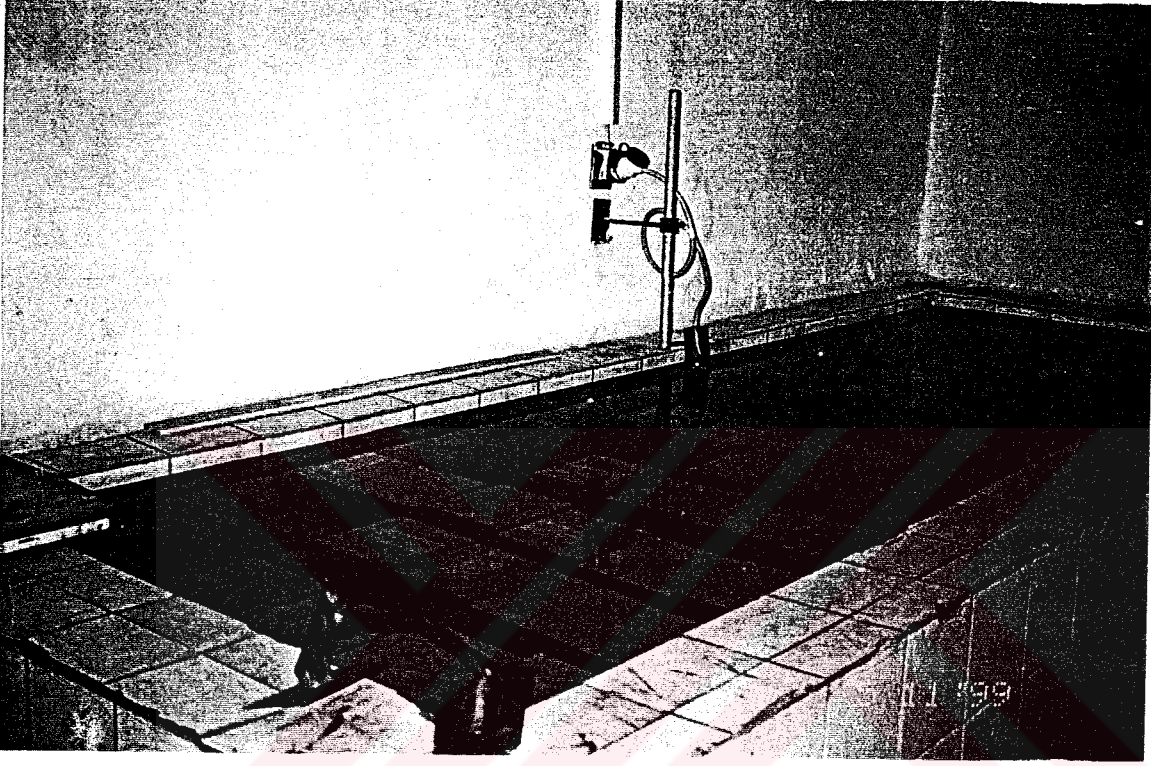
Priz deneyi için; sonda adı verilen, pirinçten yapılmış ve toplam boyu 65 mm olan dolu silindirik bir çubuk, sonda için askı sistemi, terazi ve numune kabından meydana gelen bir sistem kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Priz aleti

- **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 4.6. Kür tankı

- **Pres**

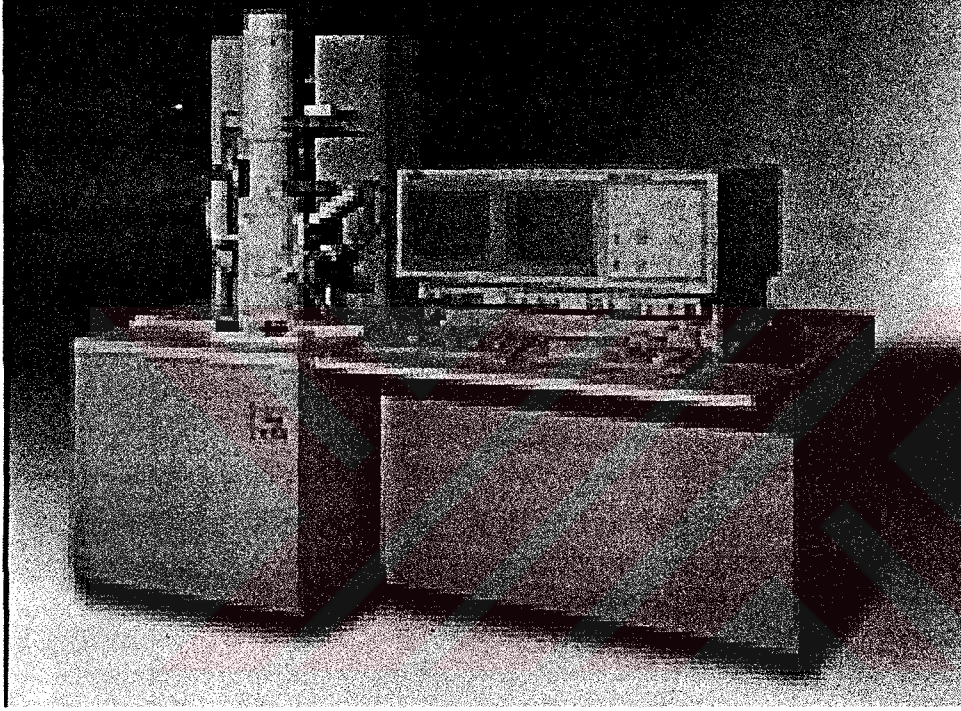
Beton denemelerinde, basınç dayanıklılık testi için Tonipact 5000 markalı, kırım hızı 11.3 kN/s'ye ayarlı, pres kapasitesi 3 ton olan, pres kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Pres

- **Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM)**

Beton numunelerinin görüntülerini alabilmek için 200.000 büyütme kapasiteli Jeol marka Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM)

4.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.2.1. Çimento

Beton denemelerinde Pınarhisar Set Çimento Fabrikasında üretilen PÇ 42.5 tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun birim ağırlığı 1150 kg/m³, özgül ağırlığı 3.1'dir.

Denemelerde kullanılan çimento numunelerinin kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Çimentonun kimyasal analizi

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

4.2.2. Kum

Denemelerde Akpınar yöresinden gelen dağ kumu kullanılmıştır.

- **Kumun granülasyonu**

Akpınar yöresi kumunun elek analizi sonuçları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Akpınar kumu elek analizi

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

- **Kumun özgül ağırlığı**

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

- **Kumun birim ağırlığı**

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

- **Kumun su emme oranı**

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

- **Kumun kimyasal özellikleri**

Akpınar yöresi kumunun Set Çimento laboratuvarında yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Kumun kimyasal analizi

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

4.2.3. Agregalar

4.2.3.1. Perlit agregaları

Perlit asidik bir volkanik camdır. Isıyla genleşme özelliği olan, geliştirildiğinde çok hafif ve gözenekli bir hale geçen kayadır. Çeşitli perlit kayalarının renkleri ve yapıları birbirinde çok farklı olabilir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişmekte olup, geliştiğinde renk tamamen beyazlaşır.

Çizelge 4.4. Dünya Perlit Rezervleri (Milyon Ton)(Yiğit, 1992)

Ülkeler	Rezervler	Rezerv toplamı
Kuzey Amerika		
ABD	45.4	182.0
Diğer	4.5	18.0
TOPLAM	49.9	200.0
Avrupa		
Yunanistan	45.5	273.0
Diğer	453.6	909.9
TOPLAM	500.0	1.182.0
Asya		
Japonya	9.1	45.5
Filipinler	9.1	36.4
Türkiye	27.3	273.0
TOPLAM	45.5	354.9
Afrika ve Okyanusya	22.7	90.1
DÜNYA TOPLAMI	635.9	1.820.0

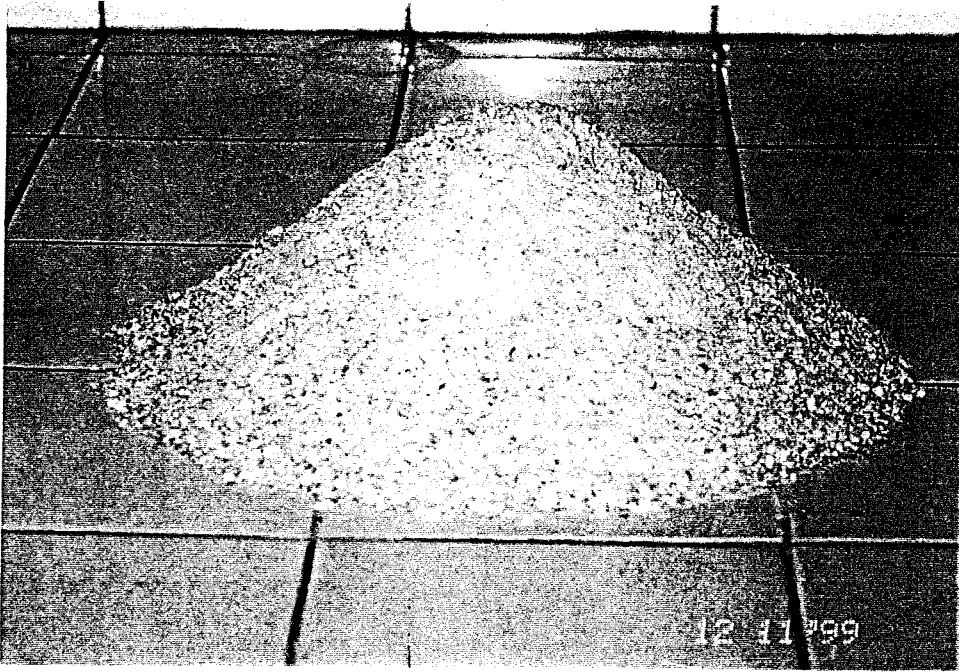
a. Ham perlit agregası

Perlit, 700°C – 1200°C arasındaki sıcaklıklarda, bünyesindeki suyun buhar basıncıyla 4 – 20 kez genleşme niteliğine sahip, genleştiğinde hafif ve gözenekli bir yapı oluşturan, genellikle %70 – 75 SiO₂, %12 – 20 Al₂O₃ ve az miktarda diğer mineral bileşenleri içeren asidik özellikli, camsı kayalara verilen genel addır (TS 3681, 1982). 700° 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 agrega numunesi; ham perlit agregası I ve ham perlit agregası II olarak tanımlanmıştır.



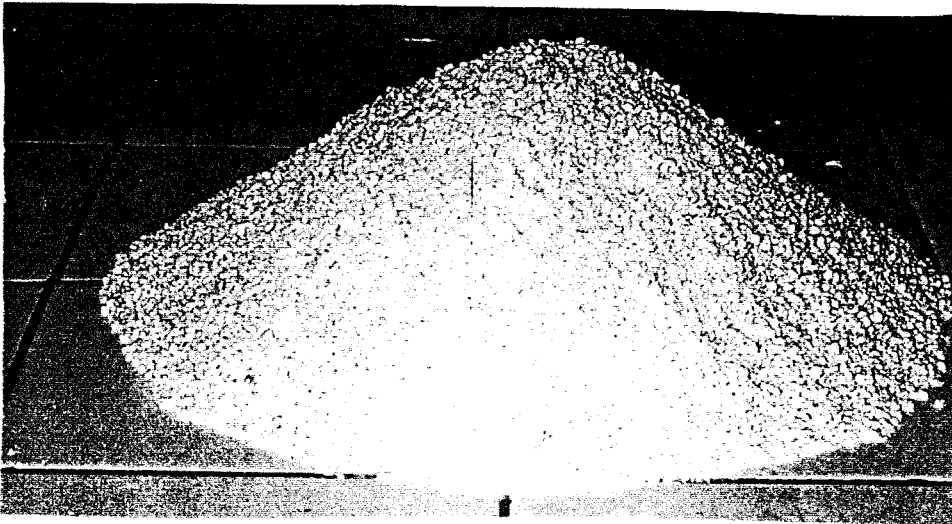
Şekil 4.9. İri ham perlit agregası



Şekil 4.10. İnce ham perlit agregası

b. 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/m³ 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 4.11. Genleştirilmiş perlit agregası

4.2.3.2. Andezit

Andezit, mineralojik 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 aliterasyona 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 4.12. Andezit Agregası

4.2.3.3. 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 kayaç, 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 $0.5 - 1 \text{ gr/cm}^3$ ’dür.
- Bazik pomza (scoria); kahverengi veya siyah olup daha ağırdır. Sertliği Mohs skalasına göre 5 – 6 , yoğunluğu ise $1 - 2 \text{ gr/cm}^3$ ’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 genişmiş tek doğal yapı elemanı olarak bilinmektedir. Bünyesinde kristal suyu yoktur. Kimyasal bileşiminde;

% 60–75 SiO₂, %13–17 Al₂O₃, %1–3 Fe₂O₃, %1–2 CaO, %7–8 Na₂O–K₂O ve ayrıca eser miktarda TiO₃ ve SO₃ bulunmaktadır (Köse, 1997).

Pomza başlıca 3 sektörde kullanılır.

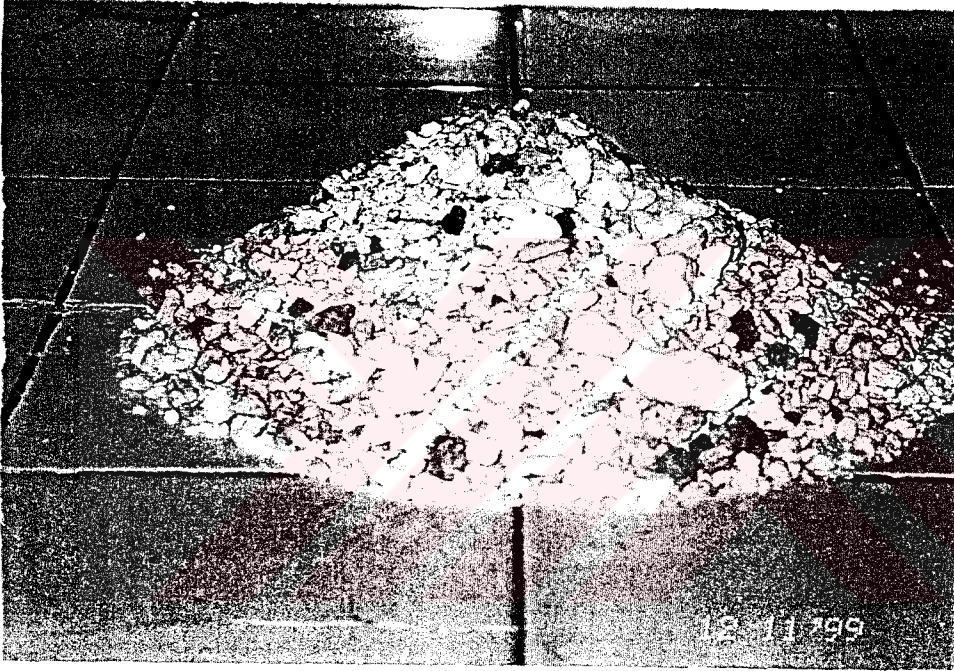
- İnşaat sektörü
- Çeşitli sanayi sektörlerinde aşındırıcı olarak
- Tarım sektörü

Pomza ülkemizde ve dünyada geniş anlamda inşaat sanayiinde kullanılmaktadır. Ülkemizde üretilen pomzanın % 90’ı yurt içinde inşaatlarda kullanılmaktadır. Pomza, perlitin kullanıldığı alanların genellikle tümünde kullanılır. Perlit gibi genişletmek için enerji ve yatırım gerekmediğinde, inşaat sektöründeki kullanımı son yıllarda hızla artış göstermektedir. Bu artışın elbette somut nedenleri vardır. Bu nedenlerin başlıcaları şöyle sıralanabilir.

Pomza, normal kumun ve çakılın 1/3 ile 2/3’ü kadar yoğunluğa sahiptir. Aynı durum pomza ile yapılan betonlarda da görülür.

Pomza betonun normal betondan hafif olması nedeni ile zaman ve işçilikten tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca zemin mekaniği açısından temele iletilen yük azalacağından yaklaşık % 17 civarında inşaat demirlerinden tasarruf sağlanması mümkündür.

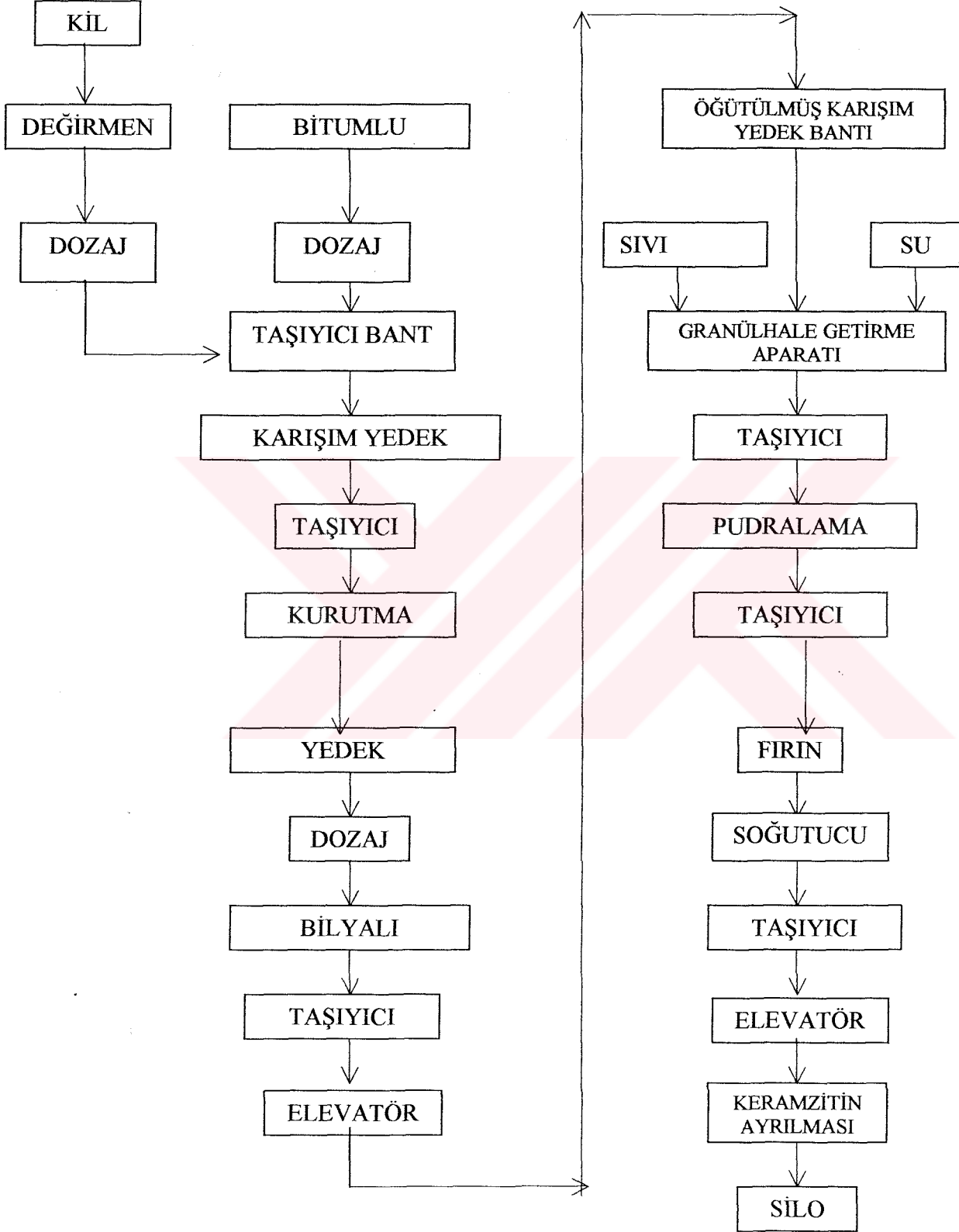
Pomzanın ısı geçirgenlik katsayısı normal betondan 6 kat daha fazla izolasyon sağlamaktadır. Pomza çok kırılmalıdır ve sertliği 5-6 civarındadır. Öğütme sırasında camsı, midye kabuğu şeklinde kırılır ki keskin kenarlı yapısı en ince boyutuna indirildiğinde bile kalmaktadır (Güngör, 1997).



Şekil 4.13. Pomza agregası

4.2.3.4. Keramzit

Çizelge 4.5.Keramzit üretim teknolojisi



Azerbeycandan gelen keramzit agregasının üretim teknolojisi akım şeması Çizelge 4.5' de verilmektedir.



Şekil 4.14. Keramzit agregası

4.2.4. Borik asit atığı

4.2.4.1. Bor mineralleri ve bileşiklerine genel bakış

Bor, Türkiye'nin önemli ihraç madenidir. Batı Anadolu bölgesinde bulunmaktadır. Eskişehir - Kırka, Kütahya - Emet, Balıkesir - Bigadiç, Bursa - Kestelek'te bu madenler mevcuttur. Dünya bor üretiminin %90'ı A.B.D. ve Türkiye'nin elindedir. A.B.D. ürettiğinin çoğunu iç piyasada tüketirken Türkiye'de üretim genellikle dışa dönük yapılmaktadır. Türkiye'nin bor ara ürünleri üretiminde ve bu ürünlerin dış satıştaki payı çok düşüktür.

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan bor elementinin simgesi B, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, ergime noktası $2190 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 'dir. Elmastan sonra en sert madde olan ametal bor gri-siyah veya yeşilimsi sarı renkli bir yapıdadır. 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 4.6'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Önemli bor mineralleri ve bileşikleri (DPT, 1996)

Mineral	Kimyasal Formülü	B ₂ O ₃ (%)	H ₂ O (%)	Bulunduğu Yerler
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36.5	47.2	Kırka, Eskişehir
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51.0	26.4	Kırka, Eskişehir
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50.8	21.9	Emet, Bigadiç, Kestelek
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43.0	35.6	Bigadiç, Kırka
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O	49.6	25.6	Emet
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ 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 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Sanayide kullanılan önemli bor bileşikleri

Bileşik	Kimyasal Formülü	B ₂ O ₃ (%)	H ₂ O (%)
Boraks dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36.5	47.2
Boraks pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47.8	30.9
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69.2	0.0
Borik asit	H ₃ BO ₃	56.3	43.7
Sodyum perborat tetrahidrat	NaBO ₃ .4H ₂ O	22.7	46.8
Sodyum perborat monohidrat	NaBO ₃ .H ₂ O	34.8	18.0
Susuz borik asit		100.00	0.0

4.2.4.2. Bor kirliliği ve atıklarının değerlendirilmesi

Etibank Bandırma Boraks ve Asit Borik Fabrikası 1987 yılında kolemanitten boraks ve borik asit üretimine geçmiştir. Etibank Bandırma Fabrikasından alınan borik asit çamurunun analiz sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Görüldüğü gibi borik asit üretiminde, atık çamur kavrulmuş kolemanit mineralinin sülfürik asit çözeltisinin pres filtrelerden geçirilmesi esnasında filtre keki olarak, boraks üretiminde de atık çamur tinkal mineralinin sulu çözeltisinin yoğunlaştırıcıdan geçirilmesi esnasında yoğunlaştırıcı atığı olarak elde edilmektedir. 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 30 mg 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 tesislerde gelecek kullanılmış su içindeki bor konsantrasyonunun 3 mg/l’den az olması gerektiği belirtilmektedir (Balkan ve Ayok, 1993).

Çizelge 4.8. 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

Sonuç olarak;

- 1) Atık çamur kaçaklarındaki B_2O_3 'ü geri kazanmak,
- 2) Çevre kirlenmesini önlemek,
- 3) Atık çamurun yapı malzemesi imalinde kullanılması halinde kırılabilirliği azaltmak için borun çamur içerisinde ayrılması gerekmektedir.

4.2.4.3. Borun giderilmesi ve giderilme yöntemleri

Atık sulardan bor giderilmesi çevre kirlenmesi, tarım sulama sularının kullanılabilmesi, kimyasal proseslerde bor varlığının olumsuz etkilerinin giderilmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu atıktaki kil içinde ve doymuş su içinde önemli miktarlarda boraks kaybedilmektedir. Bu nedenden dolayı, işletme tasarımıyla öngörülen kapasite değerlerinin %40'ında çalışmaktadır.

a. Beraber çöktürme ve adsorpsiyona dayanan yöntemler

Yapılan bir çalışmada atık içindeki kristallerin su fazında çözülüp uygun bir çöktürücü madde veya maddeler bileşimi kullanarak atık içindeki kilerin çöktürülerek sıvı kısmın kazanılması yoluna gidilmiştir. Sonuç olarak; Alüminyum sülfat, kalsiyum klorürü, Superfloc 214 gibi çöktürmeye yardımcı maddelerden meydana gelen bir karışım ile temiz bir sıvı fazı, hızlı çökme ve iri - dayanıklı kil kümeciklerinin elde edilebileceği kanıtlanmıştır. Bu işlemde atık çamurdaki B_2O_3 'ün %74'ü çöktürülmüştür.

Bu yöntemler ancak yüksek konsantrasyonlu sulara tatbik edilebilmektedir. Giderilen bor miktarı da fazla olmayıp, ekonomik de değildir.

b. Solvent ekstraksiyona dayanan yöntemler

Bu yöntemlerde, polialkoller kullanılarak solvent ekstraksiyonu yöntemiyle B_2O_3 'ün atık çamurdan ayrılabilceği kanıtlanmıştır. Temel prensip; diollerin 1,2 veya 1,3 mevkilerinde bor ile dayanıklı asidik kompleksler yapabilmesidir.

- Borik asit ekstraksiyonları yalnızca 1,3-dioller ile yapılabilir ve sıyırma için kalevi çözeltiler kullanılmalıdır.

- 1,3-diol-bor komplekslerinin sıyırma verimini, NaOH konsantrasyonunu arttırarak yükseltmek mümkündür.

- 1,2-diol-bor kompleksleri için asidik sıyırma çok iyi sonuçlar vermektedir. ND (2,3-naftalin diol), IPE (Isopropil ETER), KTMF (2-klor (1,1,3,3-tetrametil bütül)-6-metilol fenol), PE (petrol eteri) karışımı ile %97'yi aşan sıyırma verimleri elde edilmiştir.

- Boraks çözeltileri hemen hemen yarı yarıya nötralize edilmiş boraks asit çözeltilerine eşdeğer olduklarından bu çözeltilerden yapılan ekstraksiyonlar hem 1,3, hem de 1,2-dioller ile ancak %50 civarında gerçekleştirilebilir.

- Borik asit ve boraks şamları eşit miktarlarda karıştırıldıktan sonra kısa zamanda katı kısım çökmekte ve üstte berrak bir çözelti kalmaktadır. Bu çözelti, pH'ı 9.2'nin üzerinde tutulmak şartıyla 1,2-diol ile devamlı bir ekstraksiyona ve asidik sıyırmaya tabi tutulunca olumlu sonuçlar vermektedir.

c. Sentetik iyon değiştiricilerle bor giderme

Bor en iyi kuvvetli bazik anyon değiştiricilerle tutulmaktadır. İyon değiştirici reçineler, çoğunlukla iyonlaşabilen aktif grupları ihtiva eden ve karşı yük taşıyan hareketli iyonları suda çözünmeyen dev yapıdaki iyonlardan meydana gelmiş olup, jel şeklinde moleküllü bileşiklerdir. Reçine pozitif yüklü iyonları değiştirebiliyorsa katyon değiştirici, negatif yüklü iyonları değiştirebiliyorsa anyon değiştirici adını alır. İyon değiştiricilerle bor giderilmesinde öngörülen kimyasal reaksiyon mekanizması, aynı solvent ekstraksiyonunda olduğu gibi borun polihidroksi bileşiklerle yaptığı komplekslere dayanmaktadır.

d. Karıştırma yıkamayla giderme

Su kullanılarak yapılan deneyler sonucunda karıştırma süresi arttıkça B_2O_3 tenörünün arttığı ancak verimin düştüğü görülmüştür.

Doymun çözelti kullanılarak yapılan deneyler sonucunda ise daha iyi bir verim elde edildiği görülmüştür.

e. Flotasyonla giderme

Saf tinkal ile yapılan flotasyon deneylerinde, değişik tane iriliklerinde, çeşitli cins ve miktarlardaki reaktiflerle elde edilen flotasyon verimleri tespit edilmiştir. En iyi sonuç, toplayıcı reaktif olarak 1750 g/t R 801 ve 1750 g/t R 825'in birlikte kullanıldığı deneyde alınmıştır. Verim %84.6 olmuştur. Ancak flotasyon yoluyla zenginleştirmenin ekonomik açıdan uygun olduğu söylenemez.

f. Çözeltmeyle giderme

Belli tane iriliğinde öğütülen B_2O_3 atıkları belli miktardaki suya katılarak, oda sıcaklığından itibaren sıcaklıkla orantılı olarak B_2O_3 'ün çözeltiye geçmesi sağlanmaktadır. Yapılan deneylerden, çözeltme işlemi için gerekli olan sürenin, çözeltmeye oda sıcaklığında başladığında minimum 27 dakika, 98°C'deki suya numune atılmak suretiyle başladığında minimum 24 dakika olduğu sonucu alınmıştır.

g. Dekrepitasyonla giderme

Yaş yöntemleri su temini, artık barajlarının yapılması ve bunların korunması gibi problemlerle karşı karşıya bulunması nedeniyle kuru yöntemlerle tinkal cevherinin zenginleştirilebilirliğini araştırılması gereği ortaya çıkmıştır. Dekrepitasyon yoluyla cevherin killerden arındırılması kolay ve yüksek bir verimle olmaktadır. Ayrıca nakliye, artıkların depolanması ve su giderleri açısından büyük avantajları vardır.

h. Karıştırarak dağıtma ile giderme

Bu yöntemde tane boyutu çok önemlidir. Katı oranlarının %50, 55, 60, 65, karıştırma sürelerinin 5, 10, 15, 20 dakika ve tane boyutunun -4, -5, -6, -15 mm olarak değiştirilmesiyle yapılan karıştırarak dağıtma deneyleri sonucunda; %26.34 B₂O₃ içerikli karma cevheri ile optimum koşullarda dağıtma yapıldıktan sonra boyuta göre sınıflandırma ile 0.106 mm altının artık olarak ayrılması sonucunda %98.12 verimle %35.27 içerikli tinkal konsantresinin üretilebileceği anlaşılmaktadır.

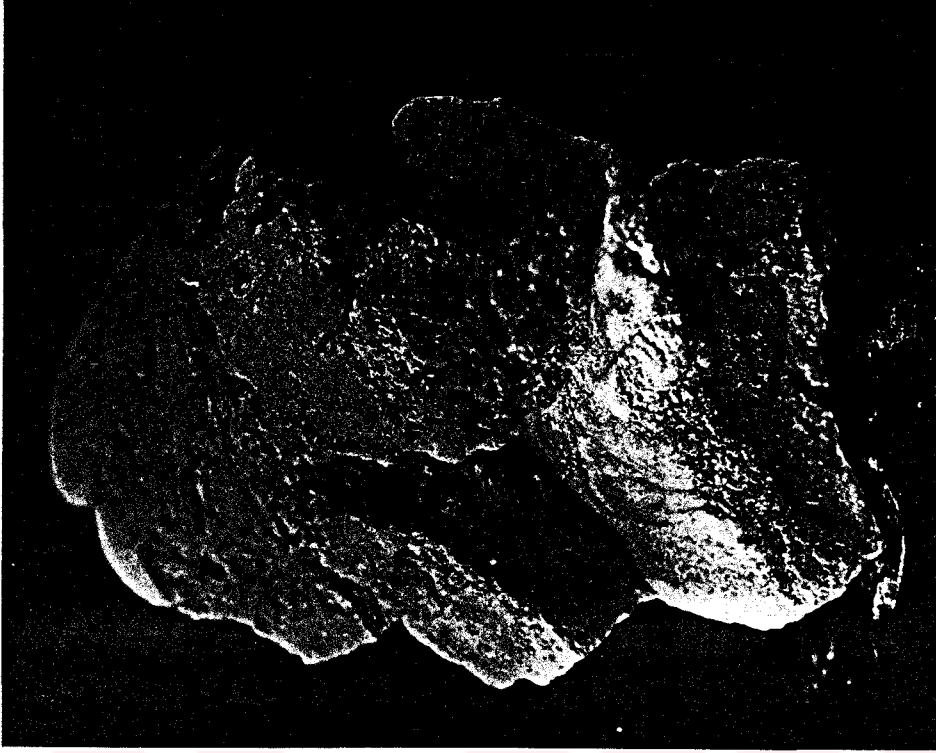
i. Soda liçi yöntemi ile giderme

Bu yöntemde, boraks atıklarının soda liçi ile değerlendirilmesinde etken olan parametreler araştırılmıştır. Bu amaçla, atıkların Na₂CO₃ ve NaHCO₃ liçi; değişik sıcaklık, çözücü miktarları, katı/sıvı oranları ve çözeltme sürelerinde denenmiş olup, düşük çözücü oranlarında optimal sıcaklık ve sürede başarılı sonuçlar alınmıştır. Sonuçta, seyreltik soda çözeltisiyle yapılan deneylerde, atıklardaki boraks yüksek verimle çözülmüştür. Ayrıca, soda liçi yönteminde, çözücü olarak tronanın kullanılması ile ülkemizde büyük bir potansiyele sahip olan tronan yatakları yeni bir kullanım alanı bulmuş olacaktır (Çelik, 1987).

4.2.4.4. Bandırma Etibank Borik Asit Tesislerinden alınan atığın incelenmesi

Bandırma Etibank Borik Asit Tesislerinden çıkan bor içerikli atıklar çok büyük bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Çevreye verilen yaklaşık olarak 120.000 ton katı ve sıvı atığın teknolojik koşullara uygun olarak değerlendirilmesi ve ekonomik kayıpların önüne geçilmesi gerekmektedir. Borik asit üretimi sırasında elde edilen atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri X-Ray ve DTA-TG ile incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda Borik asit atığının X-ışınları difraktometrisinde genel faz diyagramı çekilerek CaSO₄.2H₂O bileşiminde bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Standart alçının X-Ray sonucu Şekil 4.16'da, 170°C'de döner fırında kalsine edilmiş atığın X-ray sonucu Şekil 4.17'de, 170°C'de tav fırında kalsine edilmiş atığın X-Ray sonucu Şekil 4.18'de ve Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'in bir arada karşılaştırıldığı rapor Şekil 4.19'da verilmiştir. Bu atığın çimento sanayinde alçıtaşı yerine kullanılabileceğine dair deneysel çalışmalar daha önceden yapılmıştır. Borik asit atığının kimyasal bileşimi Çizelge 4.9'da verilmiştir (DPT, 1999).



Şekil 4.15. Borik asit atığı

Çizelge 4.9. Borik asit atığı kimyasal analizi (DPT ,1999)

BİLEŞİK	YÜZDE MİKTARI %
B ₂ O ₃	7.05
CaO	29.11
SiO ₂	6.91
Al ₂ O ₃	1.06
Fe ₂ O ₃	0.37
MgO	0.80
K ₂ O	0.74
Cl	0.006
SO ₃	33.78
Na ₂ O	0.11
TiO ₂	0.05
As	0.21

Çizelge 4.10. Borik asit atığı fiziksel analizi (DPT, 1999)

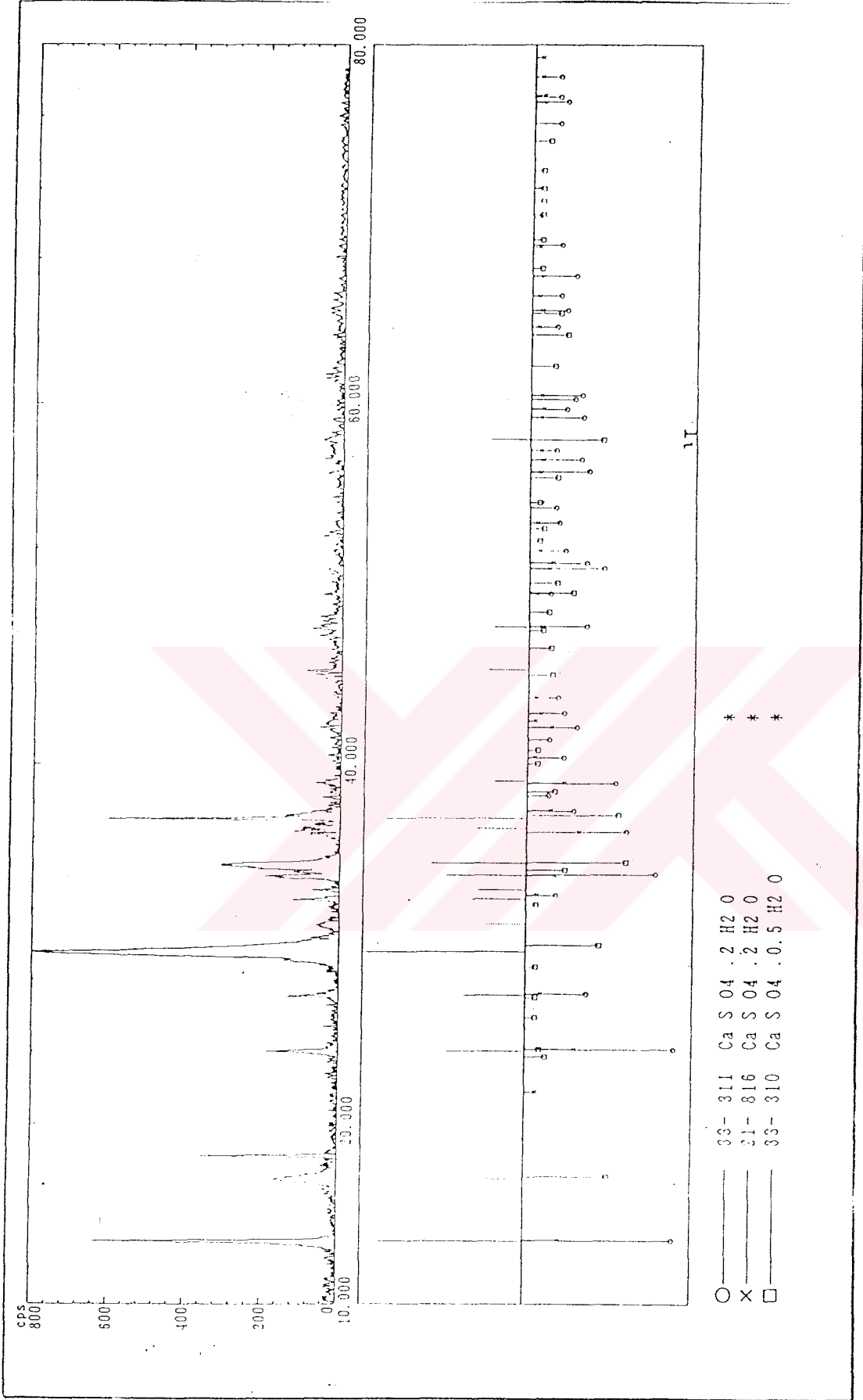
İNCELİK (% elek üstü)	45 μ m	28.00
	90 μ m	22.00
	200 μ m	15.00
Özgül ağırlık (g/cm²)	-	2.3
Blaine (mm)	-	6730

Yapısal incelemeler sonucu borik asit atığının alçıtaşı özelliklerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.





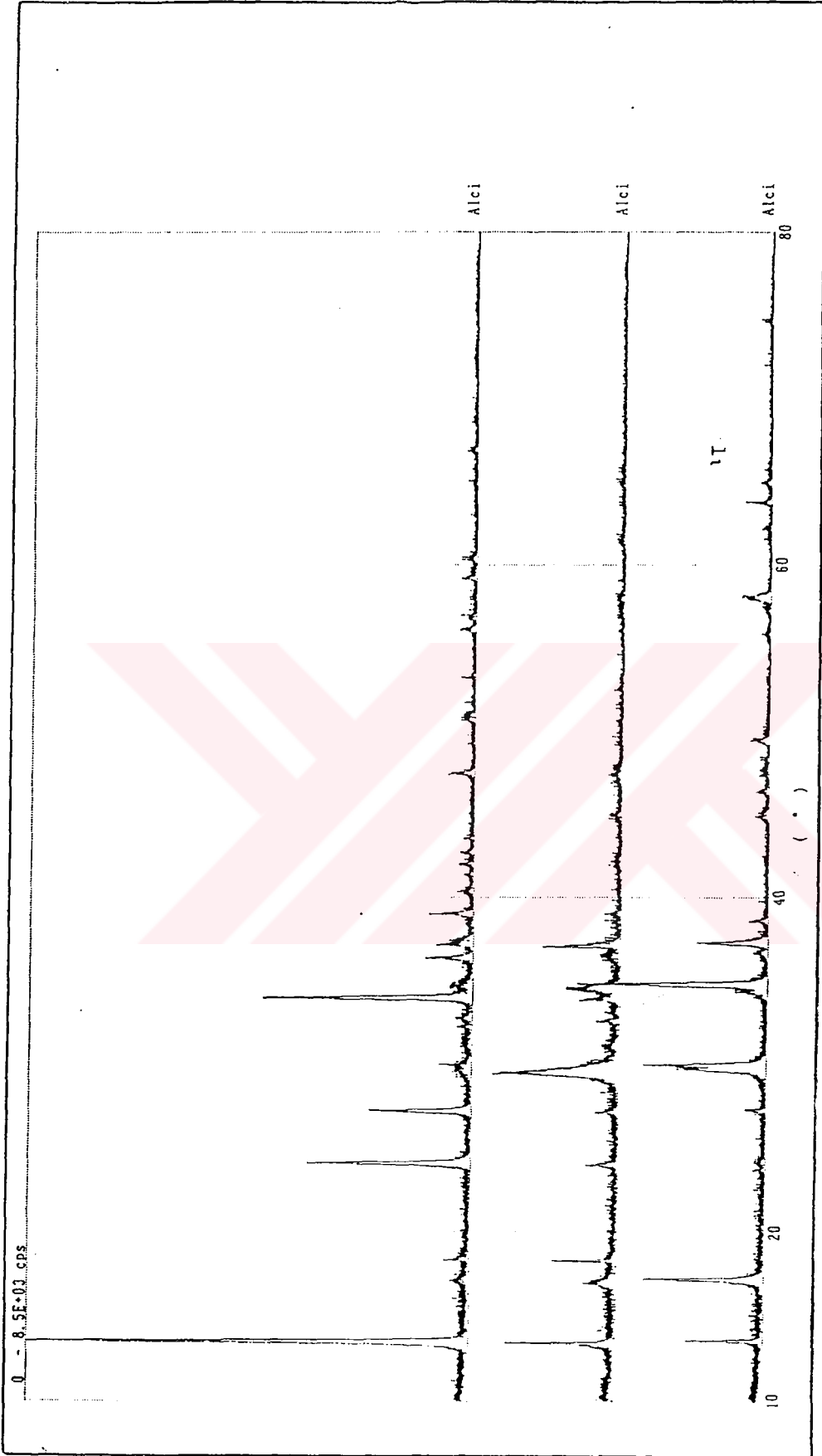
Şekil 4.16. Standart alçının X-Ray sonucu (DPT, 1999)



Şekil 4.17.170°C’de döner fırında kalsine edilmiş bor jips atığının X-Ray sonucu (DPT,1999)



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



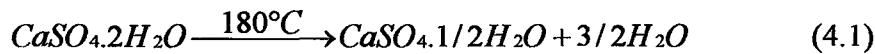
Şekil 4.19. Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'in bir arada karşılaştırıldığı rapor (DPT, 1999)

4.2.4.5. Alçıtaşının minerolojisi

- Anhidrit (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).

4.2.4.6. 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°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 kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Fırında 180°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 B_2O_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.

4.2.4.7. Borik asit atığının DTA-TG analizi

a. Termal Analizin tanımı

Termal analiz metodu, madde ve sıcaklık arasındaki ilişki üzerine kurulmuş bir yöntemdir. Diğer bir tanımlama ile maddelerin termal durumlarıyla ilgili bir çalışmadır. Maddenin sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişimleri inceler.

Madde sistemlerinin kinetiğini ve denge durumunu tanımlayan büyüklüklerden bir tanesi de ısıdır; ısı maddelerin sabit tüm fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir.

b. Termal analiz metotlarının sınıflandırılması

Termal analiz metotlarının sınıflandırılması için ilk olarak sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak kaydedilen ve bu şekilde oluşan termal proseslerden başlanmalıdır. Termal analiz metotları iki grupta sınıflandırılır:

- Sıcaklık değişimlerinin sınıflandırılmasında kullanılan metotlar
- Kütle değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan metotlar

Bu metotların pratik ve teorik gelişimleri ile beraber diğer sınıflandırma kriterleri de ortaya çıkmıştır. Bu kriterlerden birisi de ısı eğrisidir. Bu kritere göre termal metotlar iki ana gruba ayrılır.

İlk grup numunenin sıcaklık noktasını TG olarak alır ve sıcaklık eğrisi metodu olarak isimlendirilir. İlk grup iki metot içermektedir;

- Zaman- Sıcaklık eğrisi metodunda sıcaklık zamanla orantılıdır.

$$T_s = f(T)$$

- Bu metoda numunenin sıcaklık noktası ortam sıcaklığının bir fonksiyonu gibidir.

$T_s = f(T_m)$ İkinci grup numunenin sıcaklık noktasının fonksiyonu olmayan bütün metotları içerir. Bunlardan birisi de diferansiyel termal analizdir.

c. Diferansiyel termal analiz (DTA)

Bu analiz yönteminde örnekle reaktif olmayan referans madde arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) izlenmektedir. Sıcaklık farkının izlenmesinde, iki maddeden birinin kontrollü sıcaklığı ele alınır. Genellikle referans maddenin sıcaklığı baz alınmaktadır.

DTA metodu ilk kez termokupul ve fotografik kaydedici sistemlerinin kullanılması ile Le Chatelier tarafından 1887 yılında kullanılmıştır. Fakat 1903 yılında Saladen zamanın fonksiyonu olan bir DTA önermiştir. Daha sonra bu cihaz Le Chatelier tarafından geliştirilmiş, Saladen- Le Chatelier olarak isimlendirilmiştir. Zaman içinde günümüzde ki halini almıştır.

Bu metotta madde ile referans madde arasındaki sıcaklık farkı sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak ölçülür. Bu iki madde kontrollü bir sıcaklık programına tabii tutulur. Genellikle, bu kontrollü sıcaklık programında örnek ve referans maddenin sıcaklıkları artırılır. Analizi yapılacak örneğin sıcaklığı (T_s) zamanla doğru orantılı olarak artırılır. Analizi yapılacak örneğin sıcaklığı T_s ve referans madde sıcaklığı T_r arasındaki fark ($\Delta T = T_r - T_s$) kaydedilerek grafik haline dönüştürülür ki diferansiyel termogram verir.

Numune ile inert madde arasında sıcaklık farkı, bölmelerinin birinde numune diğesinde referans madde bulunduran bir diferansiyel termokupul tarafından kaydedilir. Bu termokupulun her iki bölgesi sabit hızda ve eş ısıtmalı olmalıdır.

Örnek ve referans madde aynı fırın içerisinde fakat ayrı bölmelerde tutulurlar. Diferansiyel termal analiz cihazının termal madde bölümünde madde kapları platinden yapılmış ve birbirlerine çok yakın bulundurulmuşlardır. Bu kadar yakın bulundurulmalarının sebebi sıcaklıklarının çok yakın olmasını sağlamaktır. Sıcaklıklar ise termokupul yardımı ile ölçülür ve kaydedilir. Bazı aletlerde termokupullar madde ile direk olarak temas ederken diğ

aletlerde termokupullar maddeden inert malzemelerle ayrılırlar. Bu ayırıcı malzemeler ise genel olarak platin veya seramikten yapılmışlardır.

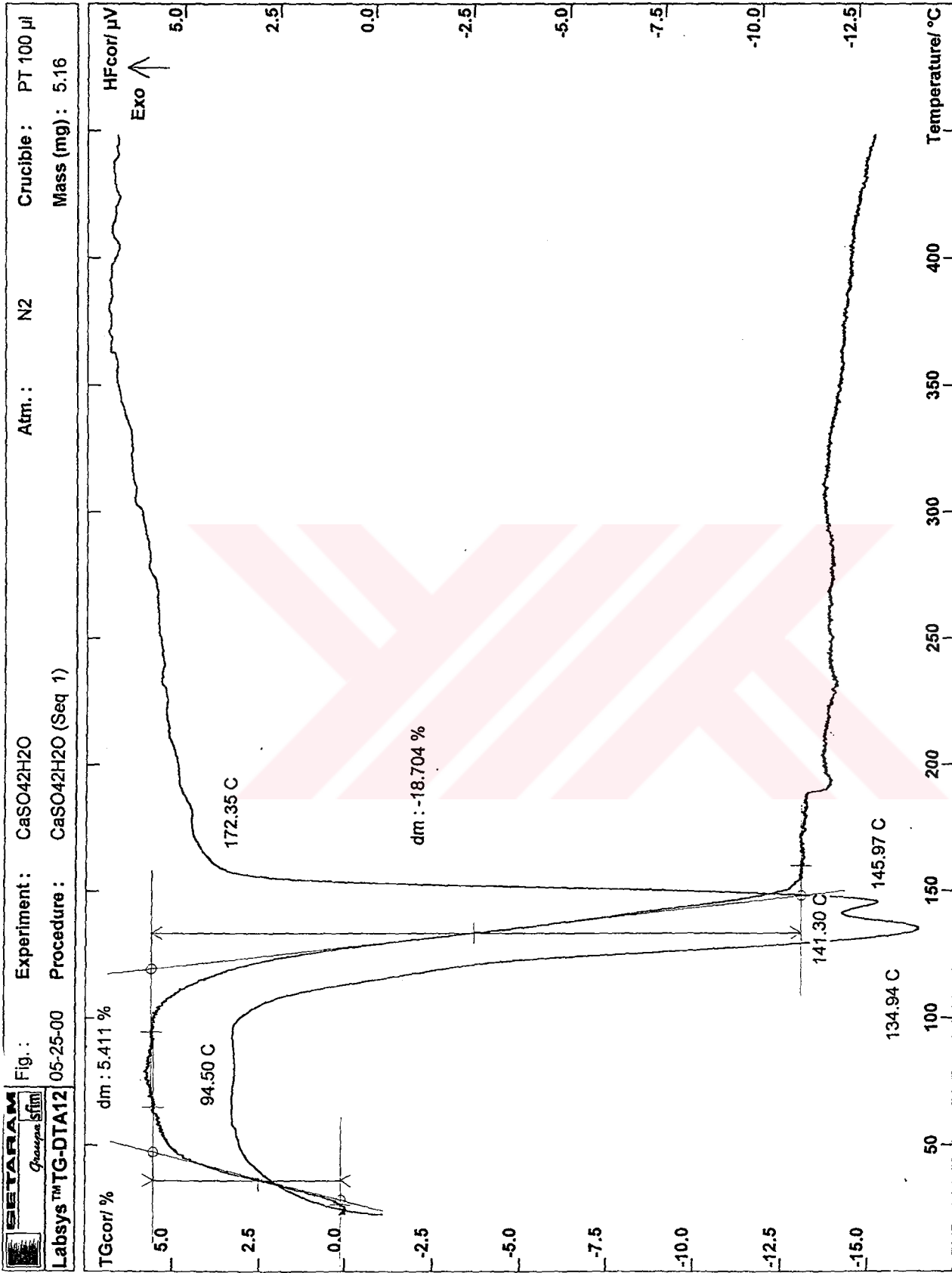
Referans maddeler genel olarak termal açıdan inerttir. Alümina sık sık kullanılanlar arasındadır , bazı analizlerde referans olarak silikon karbür veya cam boncuk kullanılır. Genellikle örnek ve referans odaları diferansiyel termal aparatındaki cam, inert veya reaktif gazların (oksijen ve havanın) sirkülasyonuna izin verir. Bazı sistemler yüksek veya alçak basınçta da çalışma kabiliyetine sahiptirler.

DTA 'da en çok kullanılan uygulamalar, alaşımlar seramikler, camlar ve minerallerdeki yüksek sıcaklık ölçümlerdir. Bu maddeler 1600°C'de ve daha yukarıda ki sıcaklıklarda deneye tabi tutulur. TG' de olduğu gibi temizleyici gaz kullanılır. TG'nin tersine DTA' da gerekli bilgileri elde etmek için örneğin kütlesinin değişimi gerekmektedir.

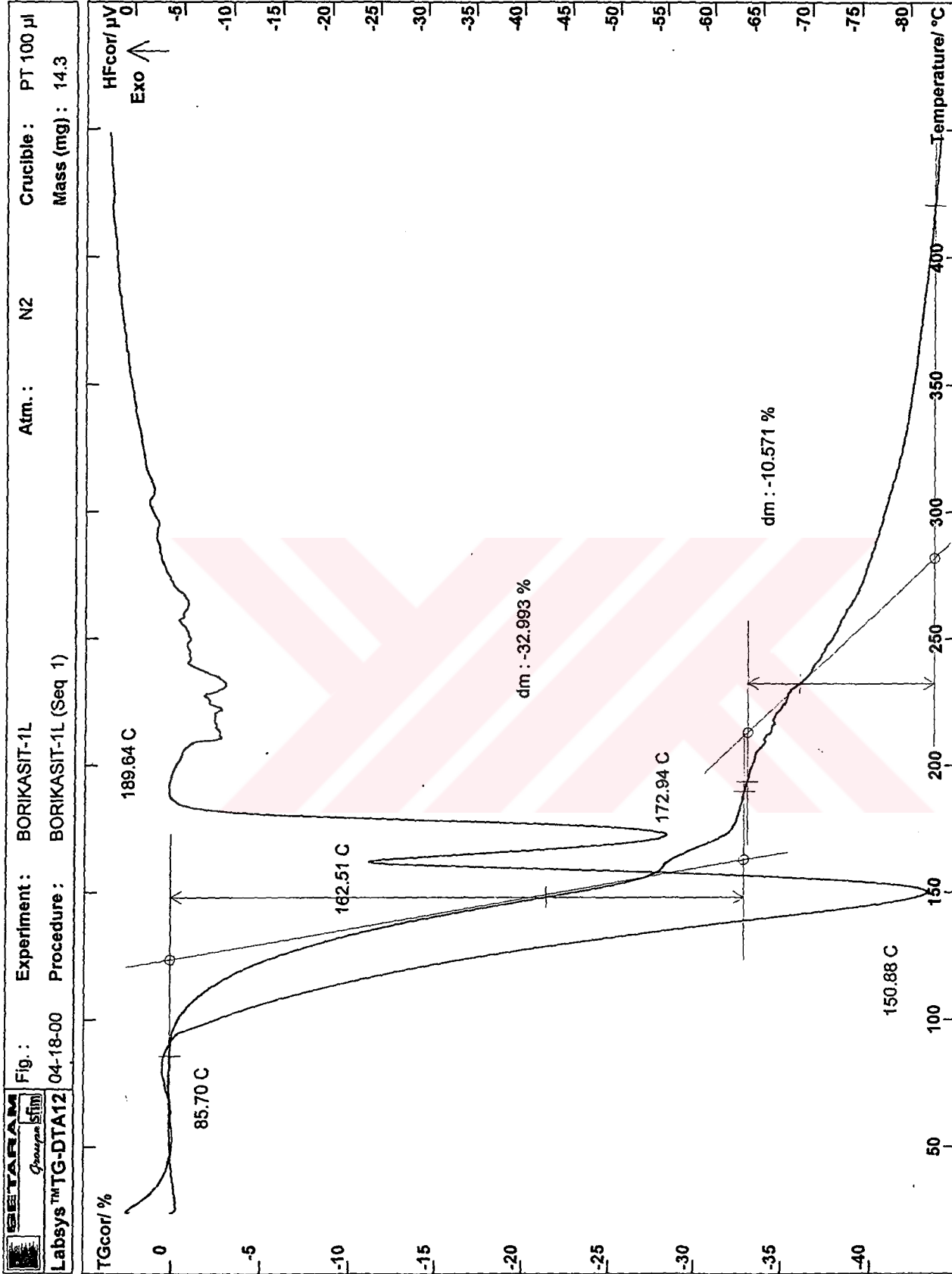
Sıcaklığın alındığı veya verildiği durumlarda DTA kullanılabilir. Erime kaynama , süblimleşme, absorpsiyon, desorpsiyon gibi endotermik süreçlerde adsorptiv olan ekzotermik süreçlerde DTA kullanılabilir.

DTA sonucunda elde edilen termal eğriler örnek sıcaklığının referans madde sıcaklığına göre artış veya azalışlarını, uç nokta (pikler halinde) olarak göstermektedir. Yukarı doğru sapmalar genellikle ekzotermik reaksiyonları, aşağı doğru sapmalar ise endotermik reaksiyonları göstermektedir. Termal eğride kaydedilen uç noktalar aynı analize tabi tutulan özellikleri bilinen eğrileri ile karşılaştırılarak bir sonuca varılabilir. Uç noktalar ve uç aralardan kantitatif analizler yapılabilir.

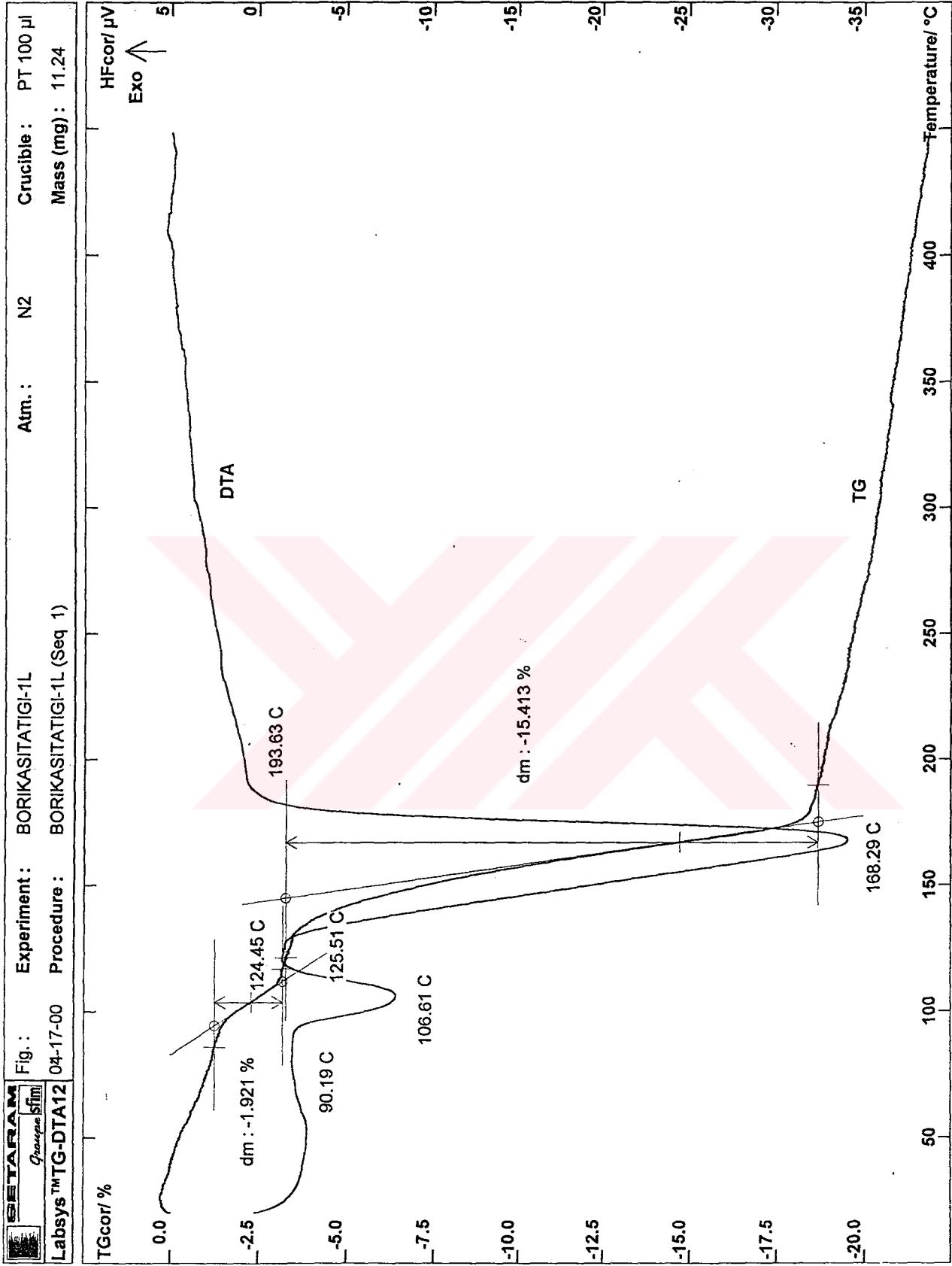
Saf $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 (Borik asit) ve borik asit atığının DTA-TG analizleri yapılmıştır. 25 °C'den 450 °C'ye kadar 10 °C/dak sıcaklık artış hızıyla azot ortamında analizler yapılmış, elde edilen pik sıcaklıkları ve ağırlık azalmaları eğriler üzerinde Şekil 4.20, 4.21, 4.22'de verilmiştir. Sonuç olarak elde edilen pik sıcaklıklarından borik asit atığının bünyesinde ki suyu vererek alçı karakteristiği gösteren bir yapıya dönüştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.20. 25°C- 450°C arasında çekilmiş CaSO₄·2H₂O DTA-TG eğrileri



Şekil 4.21. 25°C- 450°C arasında çekilmiş Borik asit (H_3BO_3) DTA-TG eğrileri



Şekil 4.22. 25⁰C- 450⁰C arasında çekilmiş Borik asit atığı DTA-TG eğrileri

4.2.5. Çelik teller (Dramix) ve özellikleri

Türkiye en zengin ve kaliteli hafif agrega yataklarına sahiptir ve yüzölçümünün yaklaşık 1/5' ini volkanik kayalar oluşturmaktadır. Diğer taraftan Türkiye'nin dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde olduğu bilinmektedir. Gerçekten deprem haritasına göre, Türkiye topraklarının % 92 ' si deprem kuşağı içerisinde bulunmakta, nüfusun % 96'sı bu kuşağa giren bölgelerde yaşamaktadır. Mevcut yapıların hemen % 90'ının deprem emniyetlerinin sağlanması gerekmektedir. Bu da söz konusu yapıların taşıyıcı olmayan bölme duvarlarını kaldırıp yerlerine daha hafif malzemeden yapılmış panoların kullanılmasıyla çözümlenebilir (Hüsem, 1995).

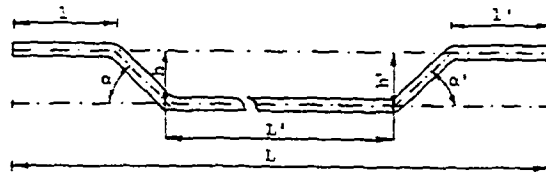
Betonun zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla betona bazı malzemeler ilave edilmektedir. Liflerde bu malzemelerden birisidir. Lifli betonların üretilmesindeki ana amaç malzemenin tokluluğunun, darbe yüklerine karşı direncinin, eğilme dayanımının arttırılmasına yöneliktir.

Günümüzde betonda en yaygın olarak kullanılan lifler çelik, alkali dirençli cam ve polipropilen liflerdir. 1960'lardan bu yana lifli betonlarla ilgili çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda çimentolu sistemlerin içine konulan liflerin başlıca rolünün betonda oluşan çatlakların matris içinde ilerlemelerinin yavaşlatılmasıdır. Bu nedenle malzemenin maksimum çatlama deformasyonu herhangi bir lif içermeyen betona oranla önemli bir artış gösterir. Maksimum yükten sonra, lifli betonlarda artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok daha yavaştır. Dolayısıyla, liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle emilen enerji lifli betonlarda oldukça fazladır. Tek eksenli basınç dayanımında da belirli bir artış görülür. Lifli betonların sünekliği ve tokluğunda lifsiz betonlara göre önemli artış sağlandığı da belirtilmektedir (Tokyay, 1995).



Şekil 4.23. Çelik teller (Dramix)

Beton karışımlarında kullanılmış olan Dramix çelik telleri beton için imal edilmiş özel çelik donatı lifidir. Tutkalla birleştirilmiş, iki ucu kıvrık ve sonu kancalı soğuk çekilmiş tellerdir (TS 10513 ,1992).



Şekil 4.24. Çelik lifin görünümü

Çizelge 4.11. Çelik tellerin özellikleri (Bekaert, 1997)

Lif tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik Oranı	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
RC 80/60 (Dramix)	60	0.75	80	1275

Çizelge 4.12. Çelik tellerin kimyasal yapısı (Bekaert, 1997)

ELEMENT	YÜZDE MİKTARI (%)
C	≤ 0.10
Si	≤ 0.30
Mn	≤ 0.60
P	≤ 0.035
S	≤ 0.035

Avantajları:

- Dramix püskürtülen betonun kırılma yapısını esnek hale dönüştürür.
- Kaplamanın dinamik enerji yutma kapasitesini (toklu indeksi) artırır.
- Düz ve hasırlı betona kıyasla büyük bir süneklik (ductilite) sağlar.
- Çelik lif takviyeli shotcrete (SFRS), açılan zemine daha sık ve uniform bir doku ile bağlanır, çelik hasırın aksine boşluk oluşma riski yoktur.
- Zamandan tasarruf sağlar.
- Donatı daima doğru yerdedir.
- Çelik tel donatılı beton, hasır donatıya oranla, inşaat süresini kısaltır.
- Çelik teller döşeme kalınlığını azaltabilir.
- Dramix çelik tellerinin çap ve uzunluk oranının yüksek olması, diğer çelik tellerle karşılaştırıldığında daha ekonomik çözümler sağlar.
- Yük taşıma kapasitesini artırır.
- Donatının bütün kesite dağılması ile çatlak kontrolünü mükemmel olarak sağlar.
- Dinamik yüklemeler ve ani darbelere karşı yüksek direnç gösterir.
- Derz açıklıkları artar (Bekaert, 1997).

4.2.6. Kimyasal katkı maddeleri

4.2.6.1. 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 ayrıştırmak 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.

Avantajları:

- Betonun segregasyon gerçekleşmeksizin serbestçe akacak şekilde yerleşmesine olanak sağlar.
- İster süper akışkanlaştırıcı ister yüksek sınıflı su azaltıcı olarak kullanılsın işlenebilirlik ömrü uzundur.
- Tüm ölçüm zamanlarında artmış dayanım sağlar.
- Orta sınıf çimento miktarlarında en düşük su / çimento oranlarının kullanılmasına olanak verir.
- Betondaki kusurlardan biri olan gözenekleri azaltarak geçirgenliği büyük ölçüde azaltır.

Tipik özellikleri:

Görünüm: koyu kahverengi

Hava sürüklenme : asgari artış

Klorür içeriği: sıfır

Donma noktası: -4°C

4.2.6.2. Sika Lightcrete I 500

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

Sika Lightcrete, genişletilmiş 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/m³ 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

Tipik özellikleri:

Görünüm: Sarımsı Şeffaf

Yoğunluk: yaklaşık 1.0 kg/ lt (Sika, 1999).

Yapılan denemelerde Sika Lightcrete I 500 sıvı katkı maddesi pomza ve genişletilmiş perlit agregası ile üretilen betonlarda kullanılmıştır. Genleştirilmiş 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.

4.3. Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

4.3.1. Agregada birim ağırlık 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 genişletilmiş perlit, pomza, doğal perlit, andezit ve keramzit agregalarının sıkışık ve gevşek birim ağırlıkları TS 3529'a göre tayin edilmiştir (TS 3529, 1980).

a. Agregada sıkışık birim ağırlık tayini

Bu deney için önceden darası alınmış ve hacmi bilinen, su geçirmez, kullanma sırasında biçimi bozulmayacak kadar dayanıklı metalden yapılmış, silindirik biçimli bir ölçü kabı kullanılmıştır. Ağırlığı (W_1) tartılarak saptanmış ölçü kabı, etüvde kurutulmuş 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, agregada sıkışık birim ağırlığı (4.2) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (TS 3529, 1980).

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

Burada;

B_s = Sıkışık birim ağırlık (kg/m³)

W_1 = Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

W_2 = Sıkışık agregada ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

V = Ölçü kabı iç hacmi (m³)

b. Agregada gevşek birim ağırlık tayini

Bu deney için önceden darası alınmış ve hacmi bilinen, su geçirmez, kullanma sırasında biçimi bozulmayacak kadar dayanıklı metalden yapılmış, silindirik 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 (4.3) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır (TS 3529, 1980).

$$B_g = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.3)$$

Burada;

B_g = Gevşek birim ağırlık (kg/m^3)

W_1 = Ölçü kabı boş ağırlığı (kg)

W_2 = Gevşek agregası ile dolu ölçü kabı ağırlığı (kg)

V = Ölçü kabı iç hacmi (m^3)

4.3.1.1. Ham perlit agregası birim ağırlık tayini

Birim ağırlık tayinleri de ham perlit I ve ham perlit II agregası için ayrı ayrı yapılmış ve Çizelge 4.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. Ham perlit agregası birim ağırlığı

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

4.3.1.2. Genleştirilmiş perlit agregası birim ağırlık tayini

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

4.3.1.3. Andezit agregası birim ağırlık tayini

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/m³, sıkışık birim ağırlık ise 1179 kg/m³ olarak bulunmuştur.

4.3.1.4. Pomza agregası birim ağırlık tayini

105°C' de etüv kurusu haline getirilen pomza agregası için, gevşek birim ağırlık 579 kg/m³, sıkışık birim ağırlık ise 637 kg/m³ olarak bulunmuştur.

4.3.1.5. Keramzit agregası birim ağırlık tayini

105°C' de etüv kurusu haline getirilen keramzit agregası için, gevşek birim ağırlık 726 kg/m³, sıkışık birim ağırlık ise 792 kg/m³ olarak bulunmuştur.

4.3.2. Agregası özgül ağırlık tayini

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

a. İnce agregası özgül ağırlık tayini

Bu deney için 500 ml'lik bir balonjoje, 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 doymun yüzey kuru duruma kadar kurutulmuştur. Bu değişim agreganın koyu renkten açık renge geçişinin başladığı anın hemen sonrasındır. Suya doymun 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. Suya doymun 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 balonjoje içine konulup ölçü çizgisine kadar suyla doldurulmuştur. Vakum pompası yardımıyla içerde kalan hava kabarcıkları çıkartılıp, çizgiye kadar bir miktar daha su ilave edilmiştir. Balonjojenin içindekilerle birlikte tartımı (W_3) olarak kaydedilmiştir. Daha önceden balonjoje ve çizgiye kadar doldurulmuş olan suyun birlikte tartımı (W_4) olarak alınmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak (4.4) eşitliği yardımıyla ince agrega kuru özgül ağırlığı, (4.5) eşitliği yardımıyla da ince agrega suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$\gamma_k = \frac{W_1}{W_2 + W_4 - W_3} \quad (4.4)$$

$$\gamma_d = \frac{W_2}{W_2 + W_4 - W_3} \quad (4.5)$$

Burada;

γ_k = İnce agrega kuru özgül ağırlığı

γ_d = İnce agrega suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı

W_1 = İnce agrega etüv kurusu ağırlığı (g)

W_2 = İnce agrega suya doymun yüzey kuru ağırlığı (g)

W_3 = Balonjoje, su ve suya doymun yüzey kuru numunenin toplam ağırlığı (g)

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

b. İri agregata özgül ağırlık 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 doymun yüzey kuru hale getirilmiştir. Bu agregata numunesinden eşit iki tartım alınmıştır. Birinci tartım $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ' de etüvde 24 saat bekletilip, numunenin havadaki kuru tartımı (W_1) olarak kaydedilmiştir. Suyu 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 (4.6) eşitliği yardımıyla iri agregata kuru özgül ağırlığı, (4.7) eşitliği yardımıyla da iri agregata suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$\gamma_k = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \quad (4.6)$$

$$\gamma_d = \frac{W_2}{W_2 - W_3} \quad (4.7)$$

Burada;

γ_k = İri agregata kuru özgül ağırlığı

γ_d = İri agregata suya doymun yüzey kuru özgül ağırlığı

W_1 = İri agregata etüv kurusu ağırlığı (g)

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

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

4.3.2.1. Ham perlit agregası özgül ağırlık tayini

Denemelerde 4.75 mm'lik elek altında kalan perlit agregaları ince agregata olarak, 4.75 mm'lik elek üstünde kalan agregalarda iri agregata olarak kullanılmış ve özgül ağırlıkları da ayrı ayrı hesaplanmıştır. Özgül ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Ham perlit agregası özgül ağırlığı

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

*Doymun yüzey kuru

4.3.2.2. Genleştirilmiş perlit agregası özgül ağırlık tayini

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

4.3.2.3. Andezit agregası özgül ağırlık tayini

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.

4.3.2.4. Pomza agregası özgül ağırlık tayini

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

4.3.2.5. Keramzit agregası özgül ağırlık tayini

Keramzit agregası için özgül ağırlık tayini yapılmış ve suya doymun yüzey kuru Keramzit agregası özgül ağırlığı 1.33, kuru keramzit agregası özgül ağırlığı ise 1.16 olarak bulunmuştur.

4.3.3. Agregası 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 absorplayabileceği maksimum su miktarını ifade eder. Bu miktar da, agreganın suya doymun yüzey kuru ağırlığı ile etüv kurusu 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 kurusu durumundaki agregayı, suya doymun yüzey kuru hale getirmek için gereken su miktarını ifade eder. Saklanma koşullarındaki agreganın hava kurusu 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, andezit ve keramzit agregaları için su emme oranları TS 3526'a göre tayin edilmiştir. $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ '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 havlusunu ya da kurutma kağıdı yardımı ile suya doymun yüzey kuru hale getirilen ince ve iri agregaların tartımı (W_1) olarak kaydedilmiştir. Numuneler etüv kurusu durumuna getirildikten sonra da tartımları (W_2) olarak alınmıştır. Elde edilen bu değerler kullanılarak (4.8) eşitliği yardımıyla ince ve iri agregaların su emme oranı hesaplanmıştır (TS 3526, 1980).

$$m = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \quad (4.8)$$

Burada;

m = Agreganın su emme oranı (%)

W_1 = Suya doygun yüzey kuru agregası ağırlığı (g)

W_2 = Kuru agregası ağırlığı (g)

4.3.3.1. Ham perlit agregası su emme tayini

Ham perlit agregasının su emme tayini ham perlit agregası I ve ham perlit agregası II için ayrı ayrı yapılmış ve Çizelge 4.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Ham perlit agregası su emme oranı

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

4.3.3.2. Genleştilmiş perlit agregası su emme tayini

Genleştirilmiş perlit 14 agregası su emme tayini izelge 4.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. 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

4.3.3.3. Andezit agregası su emme tayini

Denemelerde kullanılan iri andezit agregası için su emme oranı izelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Andezit agregası su emme oranı

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

4.3.3.4. Pomza agregası su emme tayini

Pomza agregası için su emme oranı tayin edilmiş ve izelge 4.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Pomza agregası su emme oranı

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

4.3.3.5. Keramzit agregası su emme tayini

Keramzit agregası için su emme oranı tayin edilmiş ve Çizelge 4.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. Keramzit agregası su emme oranı

t (dak)	15	30	45	60	24 saat
Abs (%)	5.7	6.9	9.3	13.6	15.37

4.3.4. Agregası granülasyon tayinleri

Agregayı oluşturan taneler belirli boyuttadır. Fakat aynı agregası numunesinde, belirli büyüklükteki taneler daima belirli miktarda bulunur. Granülometri bileşimi bize, boyutları belirli limitler arasında bulunan tanelerin ne miktarda agregası içinde bulunduğunu açıklar. Bu amaçla granülometri deneyleri yapılır. Bir agregasının 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.

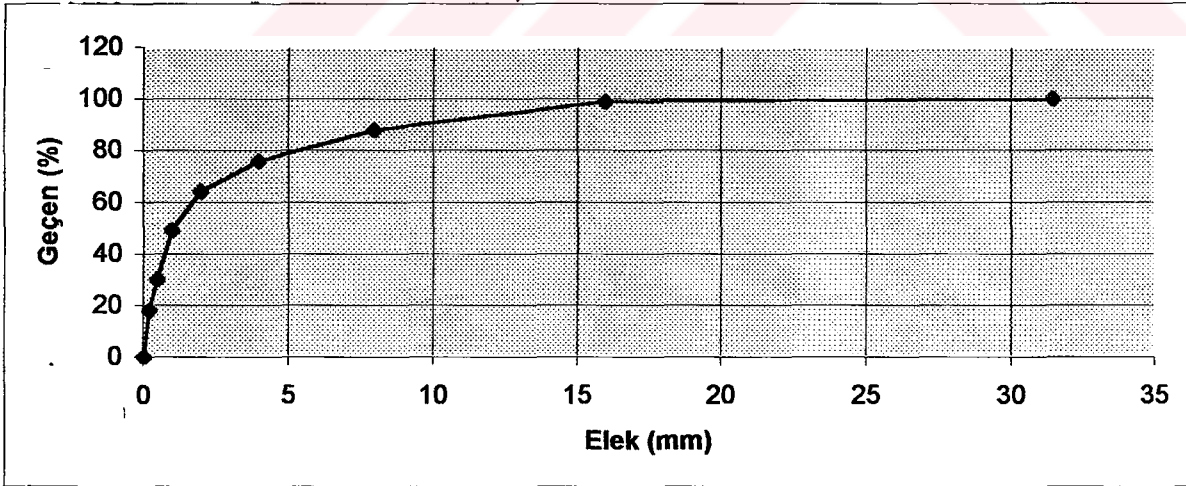
Granülometri deneyi tamamen kuru numuneler üzerinde yapılmıştır. Agregası rutubetli ise etüvde kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Kum ve çakıl yığınının etek ve tepe kısmından numune alınmamasına dikkat edilmiştir. Bir seri elek en küçük boyuttan başlayarak sıra ile üst üste geçirilmiştir ve 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 agregası 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).

4.3.4.1. Ham perlit granülasyonu

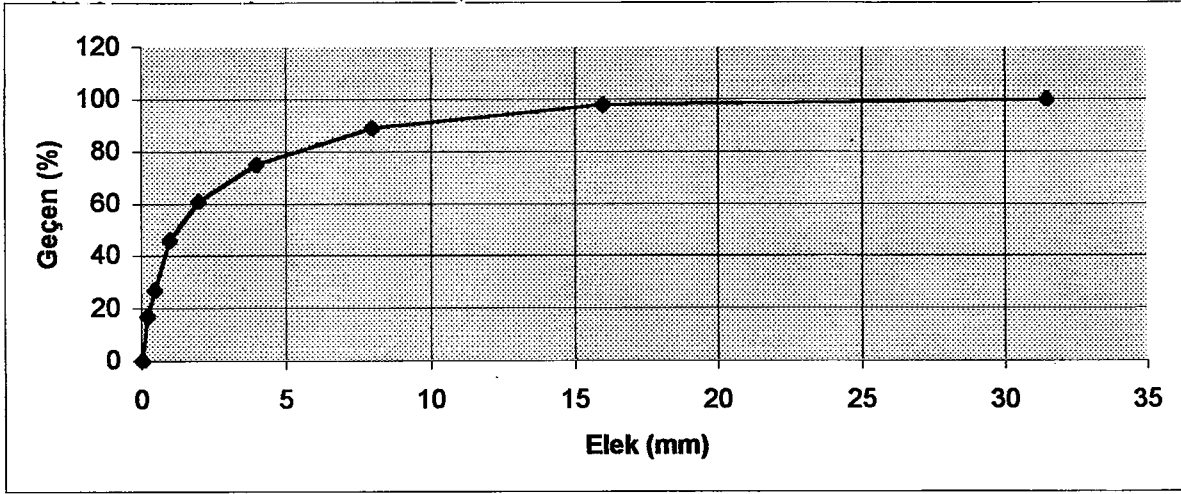
Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregasının elek analizi Çizelge 4.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. 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 4.25. Ham perlit agregası I granülasyon eğrisi



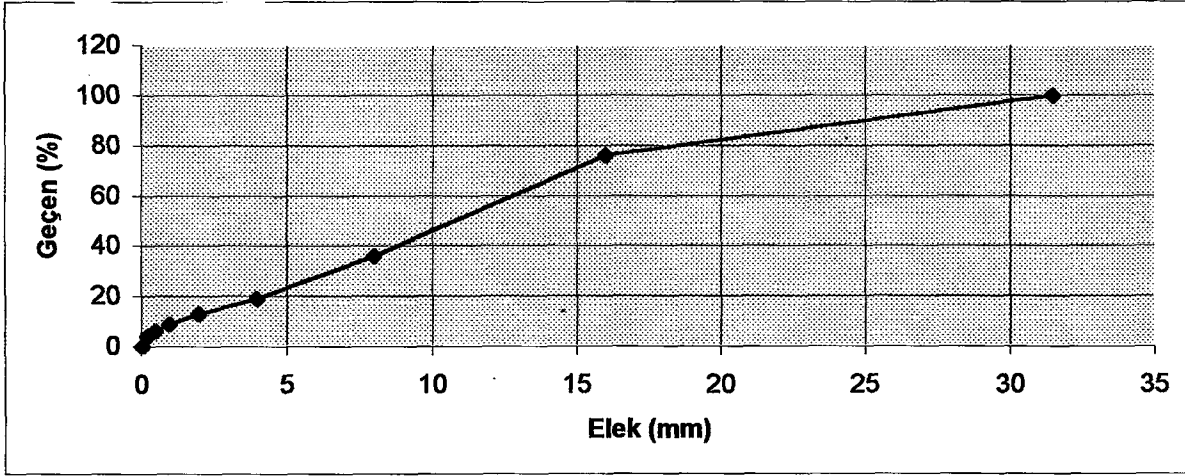
Şekil 4.26. Ham perlit agregası II granülasyon eğrisi

4.3.4.2. Andezit granülasyonu

Bilecik ilinden gelen andezitin elek analizi yapılmış ve Çizelge 4.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Andezit 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	23.7	63.6	81	87.3	91.2	94.1	96.3	100
Geçen (%)	100	76	36	19	13	9	6	4	0



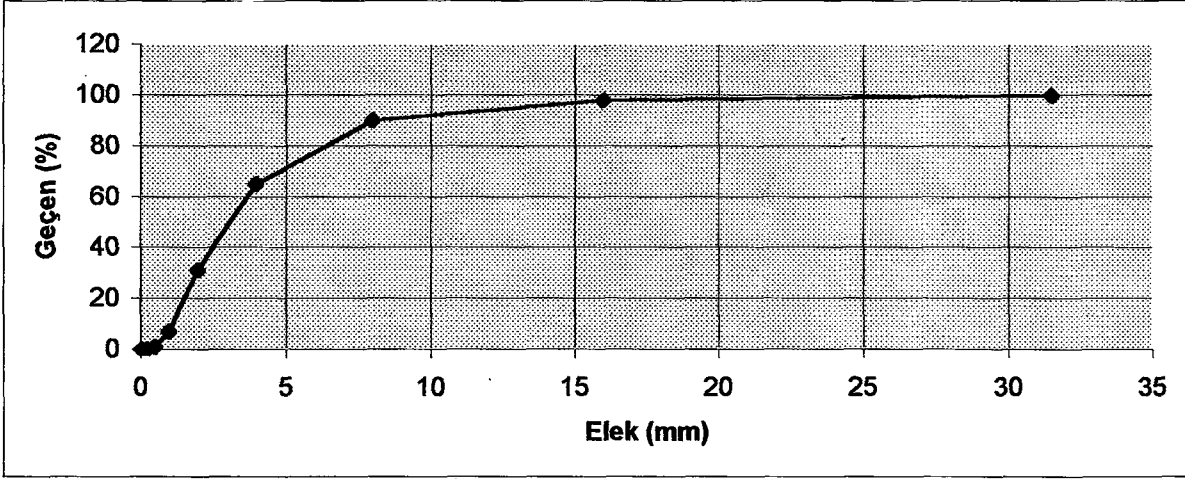
Şekil 4.27. Andezit agregasının granülasyon eğrisi

4.3.4.3. Pomza granülasyonu

Pomza agregası elek analizi yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. 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



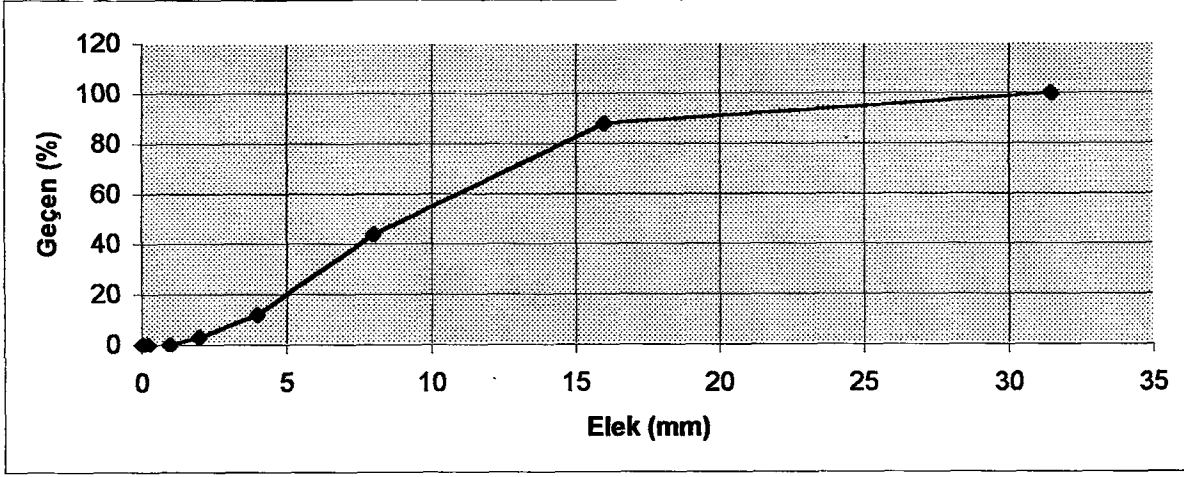
Şekil 4.28. Pomza agregası granülasyon eğrisi

4.3.4.4. Keramzit granülasyonu

Azerbeycandan gelen keramzitin elek analizi yapılmış ve Çizelge 4.23'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. Keramzit 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	12.3	56.0	88.1	97.1	99.4	99.7	99.9	100
Geçen (%)	100	88	44	12	3	1	0	0	0



Şekil 4.29. Keramzit agregası granülasyon eğrisi

4.3.5. Agregaların kimyasal analizleri

4.3.5.1. Ham Perlit Kimyasal Analizi

Erzincan Mollaköy, Er-Per ham perlit agregasının Set Çimento laboratuvarında yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.24’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24. Ham perlit agregası kimyasal analizi

	Kızdırma kaybı (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ 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

4.3.5.2. Genleştirilmiş perlit kimyasal analizi

Persa genleştirilmiş perlit 14 agregasının, Persa Perlit Türevleri San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından yaptırılmış kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.25'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Genleştirilmiş perlit agregası kimyasal analizi

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Kızdırma Kaybı (%)
74.40	15.35	0.43	0.44	1.53	1.58	2.68	2.11

4.3.5.3. Andezit agregası kimyasal analizi

Andezit ACME Analytical Laboratories LTD. tarafından tayin edilen kimyasal özellikleri Çizelge 4.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Andezit agregası kimyasal özellikleri

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	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

4.3.5.4. Pomza agregası kimyasal analizi

Set Çimento laboratuvarında yapılan pomza agregası kimyasal analizi Çizelge 4.27'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. Pomza agregası kimyasal analizi

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

4.3.5.5. Keramzit kimyasal analizi

Set Çimento laboratuvarında yapılan keramzit agregası kimyasal analizi Çizelge 4.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.28. Keramzit agregası kimyasal analizi

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Kızdırma kaybı (%)
63,66	17,21	7,42	2,90	2,28	1,03	3,96	1,60	0,19

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, karışımında kullanılan hafif agregaların çok ve hızlı bir şekilde su emmeleridir. Bazı araştırmacılar karışımında 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, hidratasyonu için gerekli suyu bulamadığı için beton mukavemeti beklenen değerin altında olacaktır (Ulus, 1998).

Hafif betonların bileşim hesabı, 1m^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 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. Karışımında kullanılan fazla su, elde edilecek betonda segregasyona, basınç mukavemeti ve durabilitede azalmaya, rötrede artmaya ve mastarlama zorluğuna 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°C 'de etüvde kurutulmuştur. Böylece bulundurduğu rutubetten kaynaklanan sorunlar da ortadan kaldırılmıştır. Beton dizaynlarında hidratasyon için gerekli olan su miktarına ek olarak denemelerin $\frac{1}{2}$ saatte (ilk 10 dakikası 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. 1m³'lük dizaynların temel alındığı, genişleştirilmiş perlit agregası ve pomza agregası kullanılarak yapılan beton denemelerinde çimento dozajı 250 kg/m³, ham perlit agregası ve andezit ile yapılan beton denemelerinde ise çimento dozajı 300 kg/m³ 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, genişleştirilmiş 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 karışımında 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 dm³'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 kademedede ve her kademedede 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 betonlarından 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 olacaktırlar. 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 (4.9) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır.

$$B_n = (W_n) / V \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.9)$$

Burada;

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

$$W_n = \text{Taze numune ağırlığı (kg)}$$

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

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 kgf/cm²'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 kgf/cm²'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 kgf/cm²'lik dayanım kazanmasına kadar geçen sürenin belirlenmesi gerekir. Bunun için de kg olarak kaydedilen değerler sonda kesit alanına (0.3 cm² 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 (4.10) eşitliği yardımıyla su emme oranı hesaplanmıştır (TS 3624, 1981).

$$m = \frac{B_{sb} - A_{sb}}{A_{sb}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.10)$$

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, aksenal 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^2 olarak kaydedilmiştir.

5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

5.1. Deney Sonuçları

5.1.1. Hafif beton dizaynları

Beton dizaynları yapılırken geliştirilmiş perlit, pomza ve keramzit 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, ham perlit (ince) betonunda ise agrega olarak sadece 4.75 mm'lik elek altında kalan ham perlit agregası kullanılmıştır. Çelik tel katkısı her beton dizaynında sırayla 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ oranlarında katılmıştır. Borik asit atığı çimento dozajının % 3'ü oranında beton karışımına ilave edilmiştir. 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, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 'da verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ham perlit betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
H.Perlit betonu	300.0	221	749	609	-
H.Perlit + alçıtaşı betonu	291.0	228	723	619	9.0

Çizelge 5.2. Ham perlit + andezit betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Andezit 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
H.Perlit + andezit betonu	300.0	223	750	470	139	-
H.Perlit + andezit + alçıtaşı betonu	291.0	237	785	482	139	9.0

Çizelge 5.3. Ham perlit (ince) betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
H.Perlit (ince) betonu	300	245	1286	-	-
H.Perlit (ince) + alçıtaşı betonu	291	247	1289	-	9,0

Çizelge 5.4. Genleştirilmiş perlit betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
G.Perlit betonu	250.0	206	518	91	-
G.Perlit + alçıtaşı betonu	242.5	190	583	101	7.5

Çizelge 5.5. Pomza betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
Pomza betonu	250.0	149	503	519	-
Pomza + alçıtaşı betonu	242.5	110	503	554	7.5

Çizelge 5.6. Keramzit betonu dizaynı

	Çimento 1m ³ 'de (kg)	Su 1m ³ 'de (kg)	İnce agrega 1 m ³ 'de (kg)	İri agrega 1m ³ 'de (kg)	Alçıtaşı 1m ³ 'de (kg)
Keramzit betonu	320	189	627	461	-
Keramzit + alçıtaşı betonu	310,4	191	626	460	9,6

5.1.2. Taze Beton Birim Ağırlıkları

Beton dizaynları sırasında hesaplanan teorik birim ağırlıkları ile elde edilen taze betonların birim ağırlıkları karşılaştırılmış ve bu sonuçlar Çizelge 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Ham perlit betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
H.Perlit betonu	1880.5	1875
H.Perlit + alçıtaşı betonu	1872.0	1888

Çizelge 5.8. Ham perlit+ andezit betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
H.Perlit + andezit betonu	1882.0	1900
H.Perlit + andezit + alçıtaşı betonu	1945.0	1930

Çizelge 5.9. Ham perlit (ince) betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
H.Perlit (ince) betonu	1876	1853
H.Perlit (ince) + alçıtaşı betonu	1878	1862

Çizelge 5.10. Genleştirilmiş perlit betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
G.Perlit betonu	1067.5	1068
G.Perlit + alçıtaşı betonu	1126.5	1097

Çizelge 5.11. Pomza betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
Pomza betonu	1423.0	1411
Pomza + alçıtaşı betonu	1416.0	1416

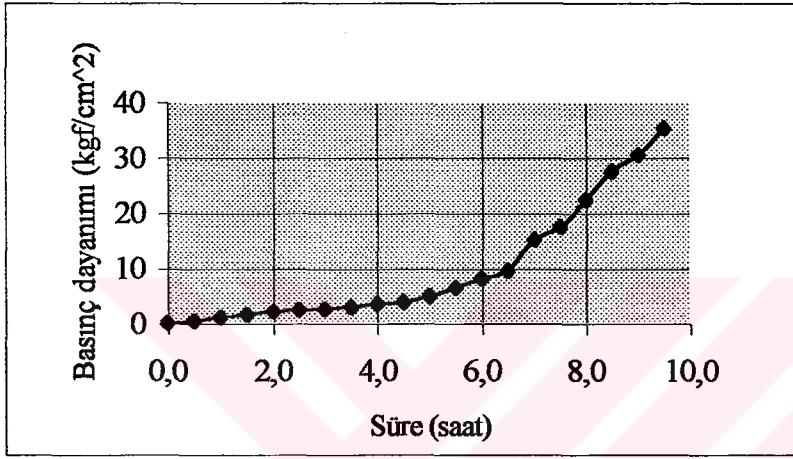
Çizelge 5.12. Keramzit betonu birim ağırlığı

	Teorik birim ağırlık (kg/m ³)	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
Keramzit betonu	1632	1617
Keramzit + alçıtaşı betonu	1635	1616

5.1.3. Taze beton priz deney sonuçları

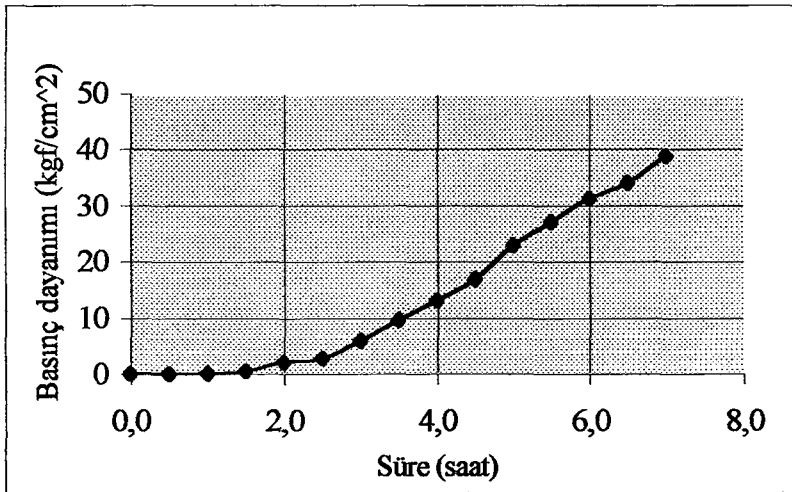
Taze betonlarda yapılmış olan priz deney sonuçları Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 'de gösterilmiştir.

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.5	7.5	8.5	9.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.25	0.62	1.32	1.80	2.33	2.65	2.88	3.17	3.77	4.14	5.13	9.77	17.6	27.3	35.5



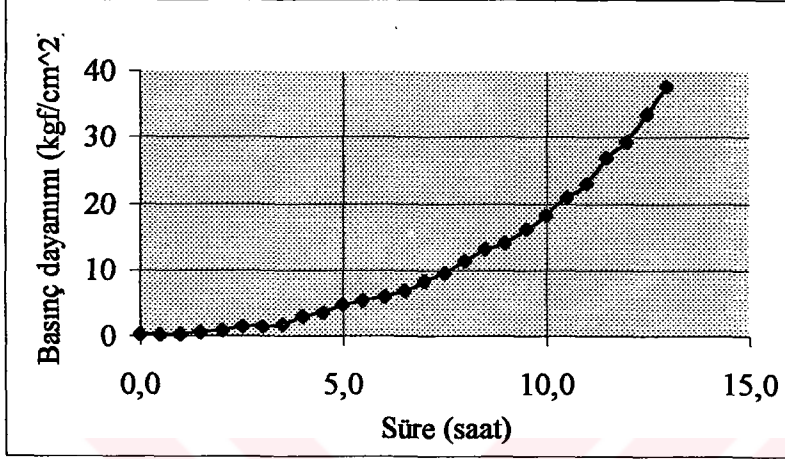
Şekil 5.1. Ham perlit betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.11	0.15	0.26	0.59	2.23	2.88	5.99	9.69	13.2	17.1	23.1	27.2	31.4	34.2	39.0



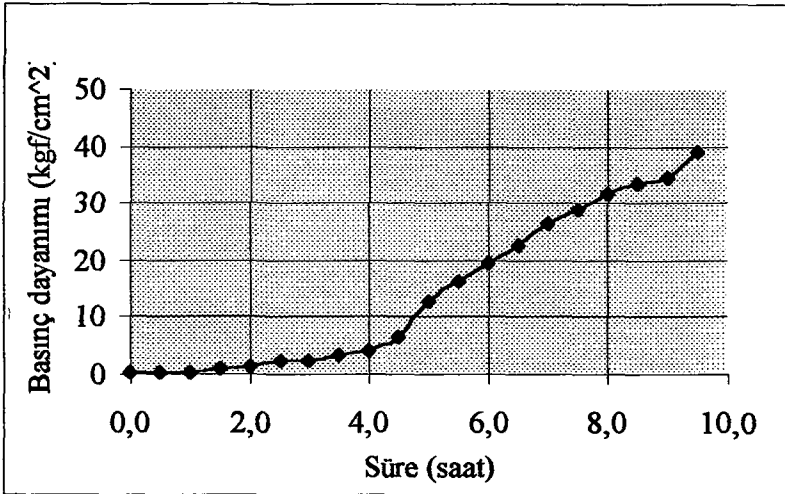
Şekil 5.2. Ham perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.17	0.41	1.01	1.62	2.92	4.90	6.01	8.56	11.3	14.2	18.2	23.2	29.5	38.0



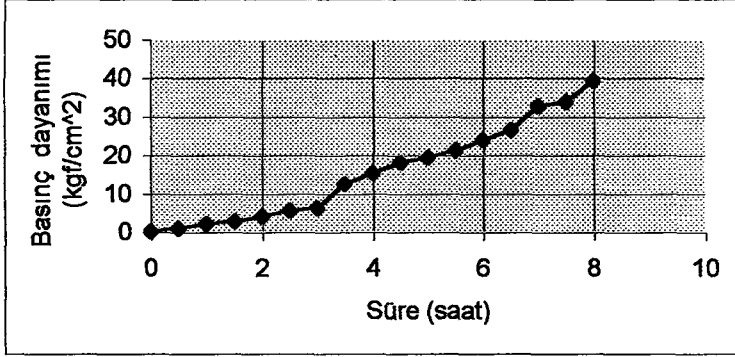
Şekil 5.3. Ham perlit + andezit betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	9.0	9.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.19	0.51	1.25	2.49	4.35	6.73	12.8	16.6	19.5	26.7	31.9	34.6	39.0



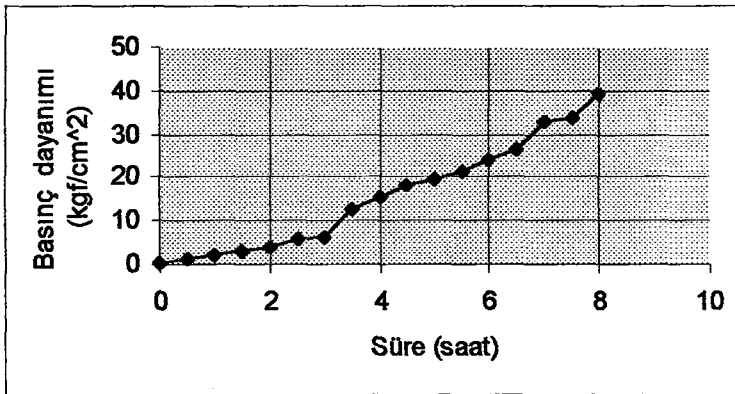
Şekil 5.4. Ham perlit + andezit + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	7.5	8.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.27	2.40	4.31	6.41	15.6	18.4	19.7	21.6	24.2	32.9	34.1	39.5



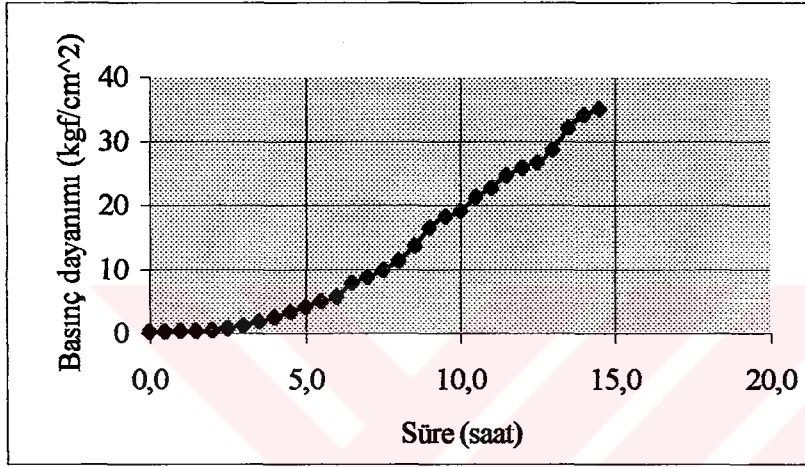
Şekil 5.5. Ham perlit (ince) betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.47	1.93	2.39	3.29	4.30	4.96	5.70	9.30	10.6	14.9	17.5	22.9	27.1	34.2	42.9



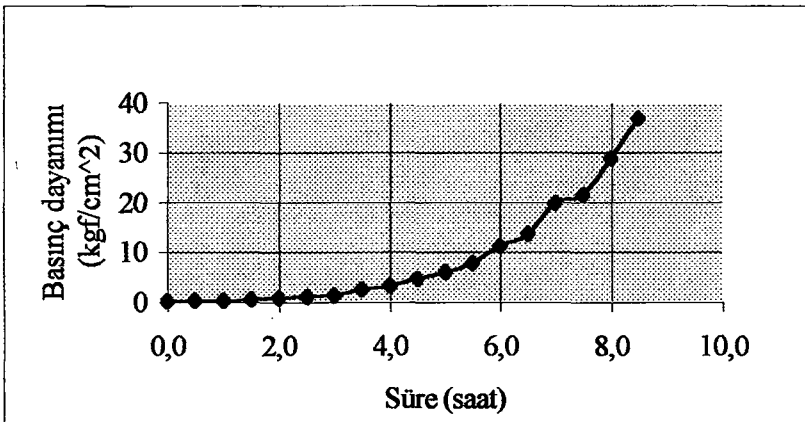
Şekil 5.6. Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.28	0.34	0.39	0.41	0.54	0.80	1.23	1.79	2.57	3.40	4.21	5.06	5.75	7.87	8.83
Süre (saat)	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	9.93	11.4	13.7	16.6	18.3	19.2	21.3	22.7	24.7	25.8	26.7	28.7	32.1	34.2	35.1



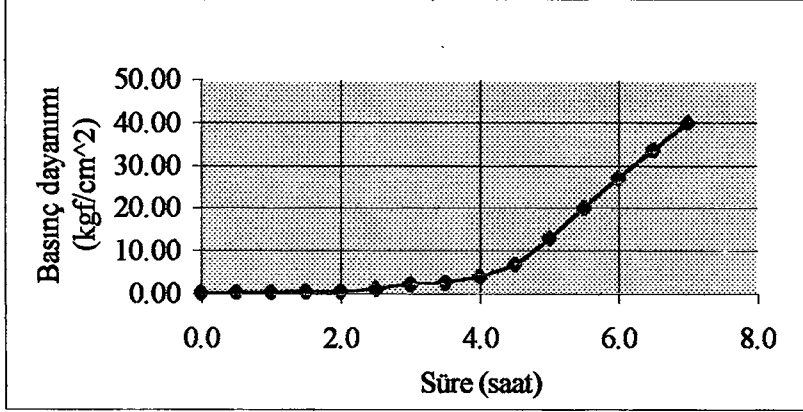
Şekil 5.7. Genleştirilmiş perlit betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.5	6.5	7.5	8.0	8.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.23	0.33	0.42	0.61	0.93	1.19	1.38	2.64	3.45	4.87	7.89	13.8	21.6	28.9	36.9



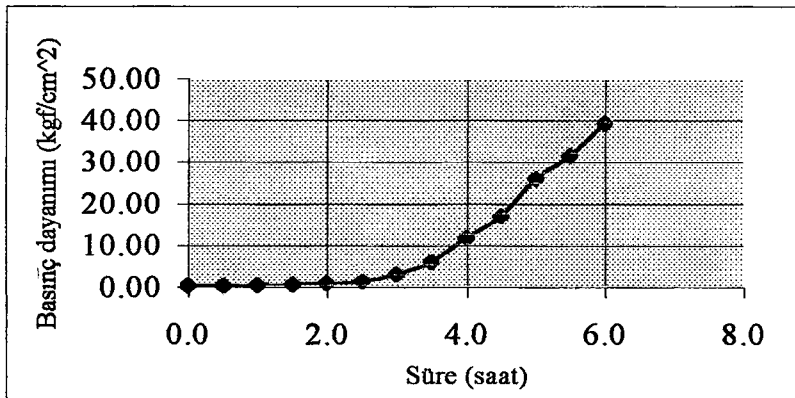
Şekil 5.8. Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.28	0.41	0.49	0.56	0.59	1.19	2.28	2.72	4.05	6.92	13.1	20.2	27.2	33.7	40.1



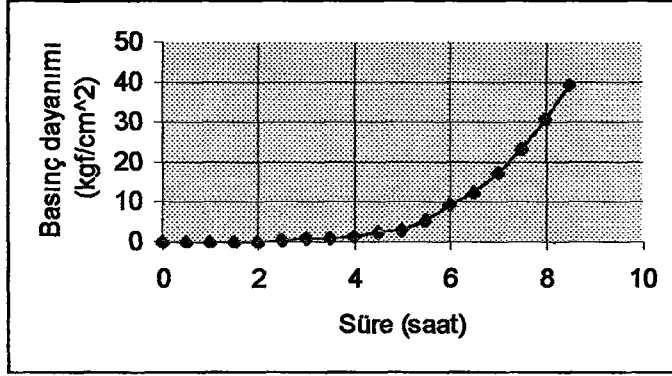
Şekil 5.9. Pomza betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.42	0.47	0.68	0.84	1.05	1.56	3.21	6.21	11.9	17.1	26.2	31.6	39.4



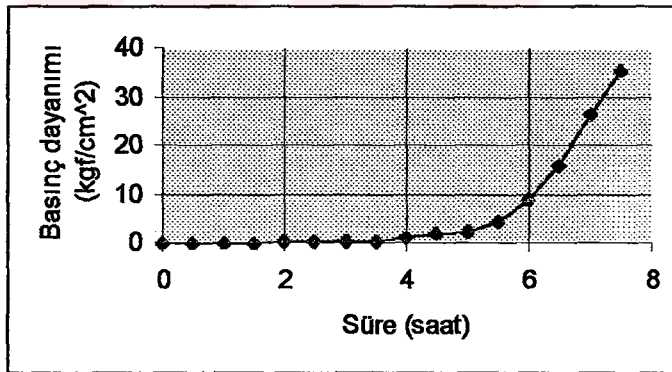
Şekil 5.10. Pomza + alçıtaşı betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.05	0.15	0.22	0.88	1.39	2.33	3.11	5.32	9.53	12.6	17.5	23.6	31.1	39.7



Şekil 5.11. Keramzit betonu priz deneyi

Süre (saat)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	0.09	0.12	0.15	0.19	0.21	0.31	0.43	0.57	1.06	2.05	2.61	4.63	8.91	15.9	26.5	35.4



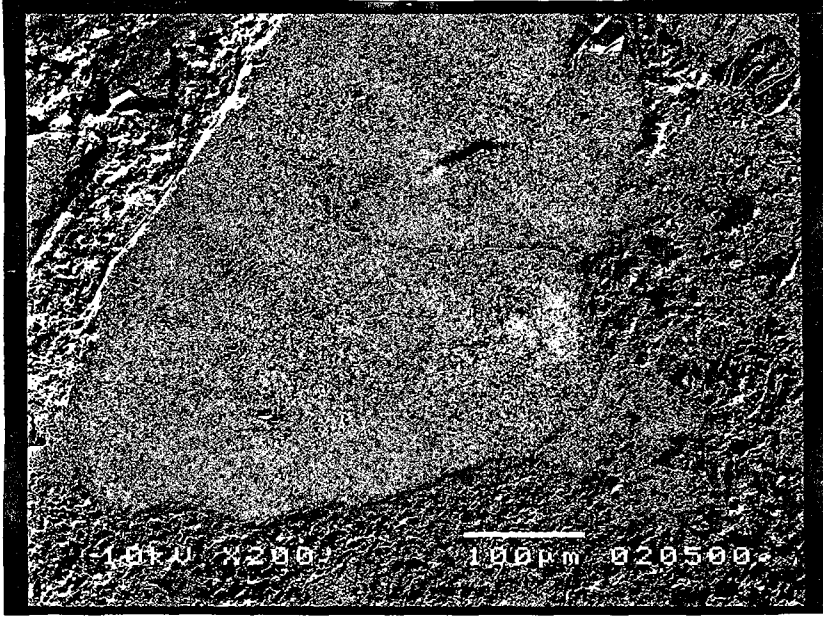
Şekil 5.12. Keramzit + alçıtaşı betonu priz deneyi

5.1.4. Beton numunelerinin taramalı elektron mikroskobunda incelenmesi

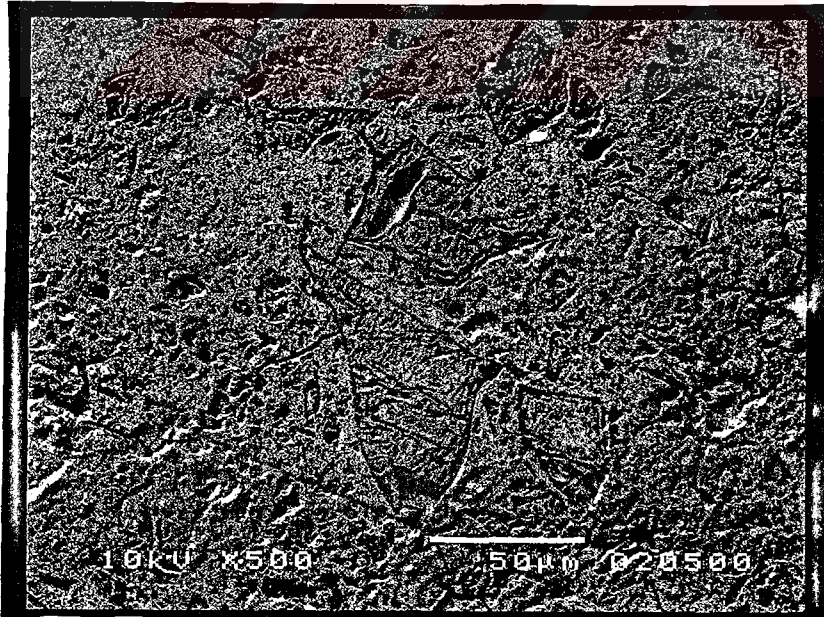
Ayrım gücü olarak tanımlanan, iki noktayı birbirinden ayırt edebilme yeteneği, çeşitli optik sistemler için farklıdır. İnsan gözünün ayırım gücü, aralarında 2,5 cm mesafe olan iki noktayı 100 metreden ayrı ayrı görmeye yetecek kadardır. Dolayısıyla insan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarını merceklerle değiştirerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmeye olanak sağlayan cihazlar geliştirilmiştir. Elektron-optik prensipler çerçevesinde tasarlanmış tarama elektron mikroskop, (Scanning Electron Microscope-SEM) bu amaca hizmet eden cihazlardan biridir.

Taramalı elektron mikroskobu4 bileşenden oluşur. Bunlar sırasıyla; kolon, numune odası, vakum pompa sistemi ve elektronik kontrol ve görüntü sistemidir.

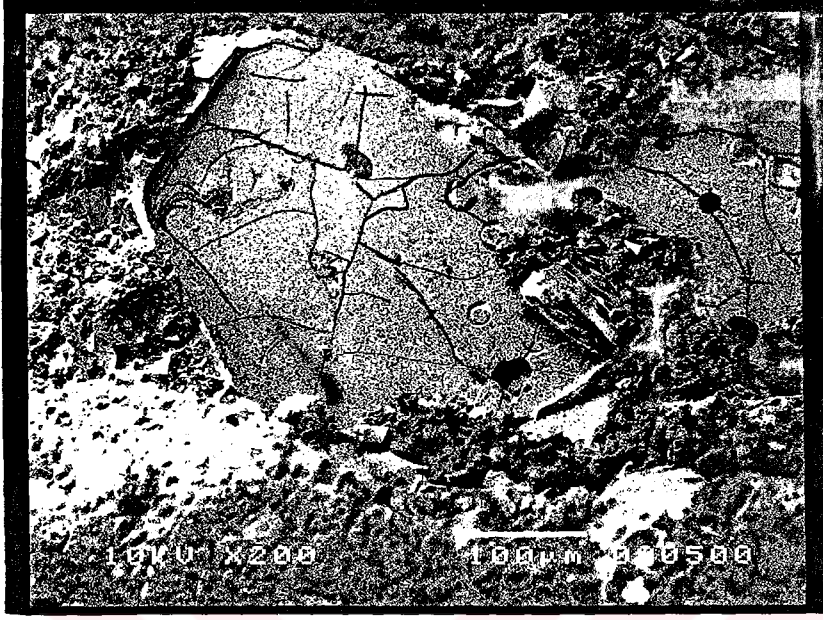
Numune odasına numune yerleştirildikten sonra vakuma alınır. Daha sonra kolonun üst kısmında bulunan tungsten flamanaya uygulanan voltaj farkının etkisi ile elektron üretimi başlar. Bu elektronlar kondansör objektif lenslerden geçerek bir demet halinde numune odasında bulunan numunenin yüzeyine çarparlar ve bu çarpma neticesinde numune ile etkileşime girerler. Bu elektronların şiddeti uygulanan voltaj farkının bir fonksiyonudur. demet elektronları eğer enerjileri yeterli ise numune atomlarının yörüngesinde yer alan elektronlara çarparak bunları yerinden çıkarabilir. Çekirdeklere olan mesafesi nedeni ile en dış yörünge elektronlarını yerlerinden çıkarmak iç yörünge elektronlarına oranla daha kolaydır. Bu tür etkileşimler sonucu ortaya çıkan elektronlar çarpışmanın elastik olup olmamasına göre sınıflandırılmakta olup elastik çarpışmalar sonucunda serbest hale geçen elektronlara “ birincil elektronlar “ denirken elastik olmayan çarpışmalar sonucunda ortaya çıkan elektronlara ise “ ikincil elektronlar” denir. Elektron mikroskobunun çalışma prensibi, beton numunelerini düşük vakum altında görüntülemek ve numunenin üzerine elektron püskürtme ile görüntü oluşturmasıyla açıklanabilir. Vakuma alınmasının nedeni havadaki atomlarla etkileşiminin ve saçılmasının önlenmesidir. Numuneler alt girişe yerleştirildikten sonra filament kafaya yerleştirilerek mikroskop çalıştırılır. Göstergeden vakumun oluşması takip edilir. Ardından elektronlar püskürtülerek birinci monitörde ayarlamalarla numunelerin görüntüleri yansıtılır. Gerekli ayarlamalar ile istenilen görüntüler elde edildikten sonra ikinci monitöre görüntü aktarılır ve büyütme işlemleri burada gerçekleştirilir. Beton numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.13. X200 – Ham perlit betonu



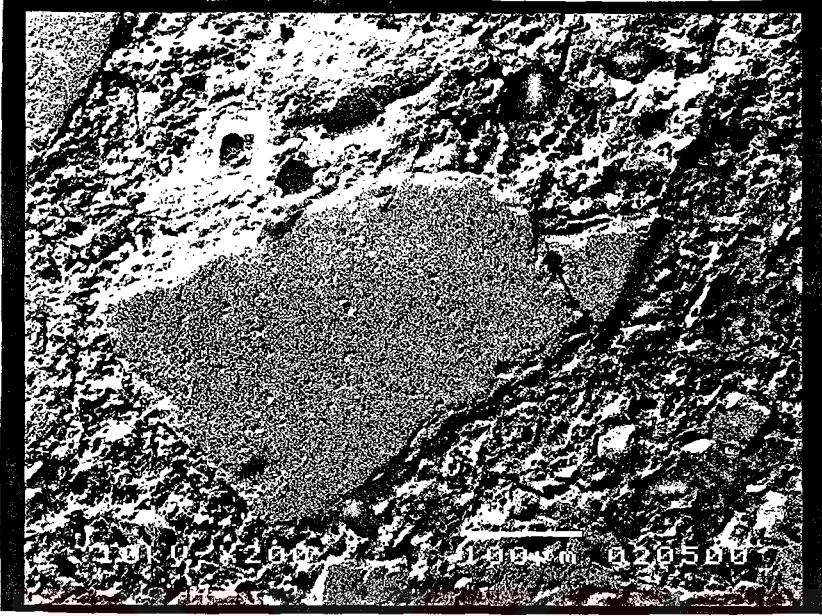
Şekil 5.14. X500 – Ham perlit betonu



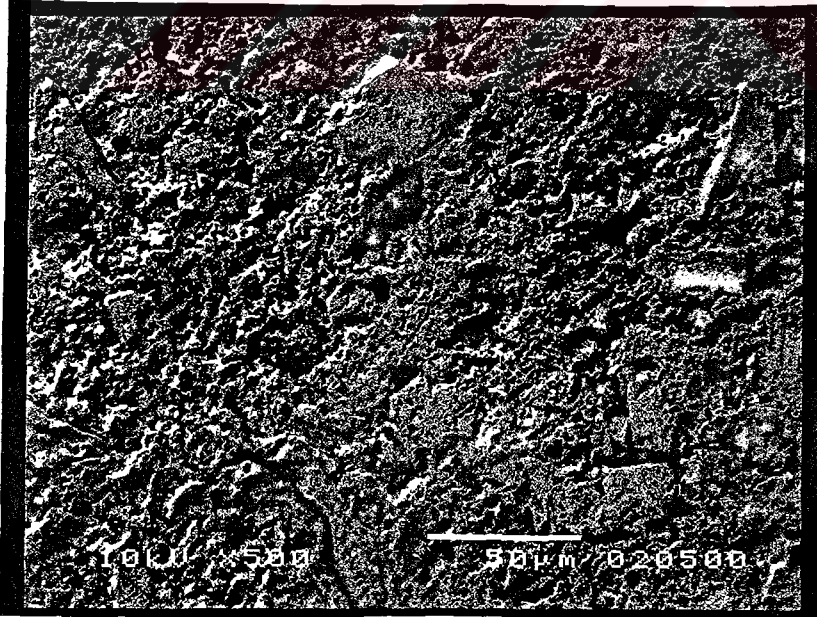
Şekil 5.15. X200 – Ham perlit + alçıtaşı betonu



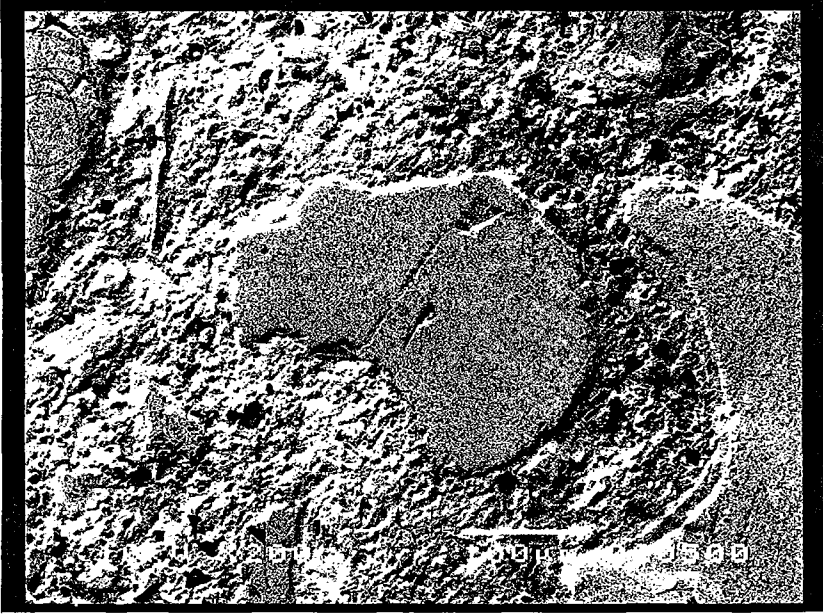
Şekil 5.16. X500 – Ham perlit + alçıtaşı betonu



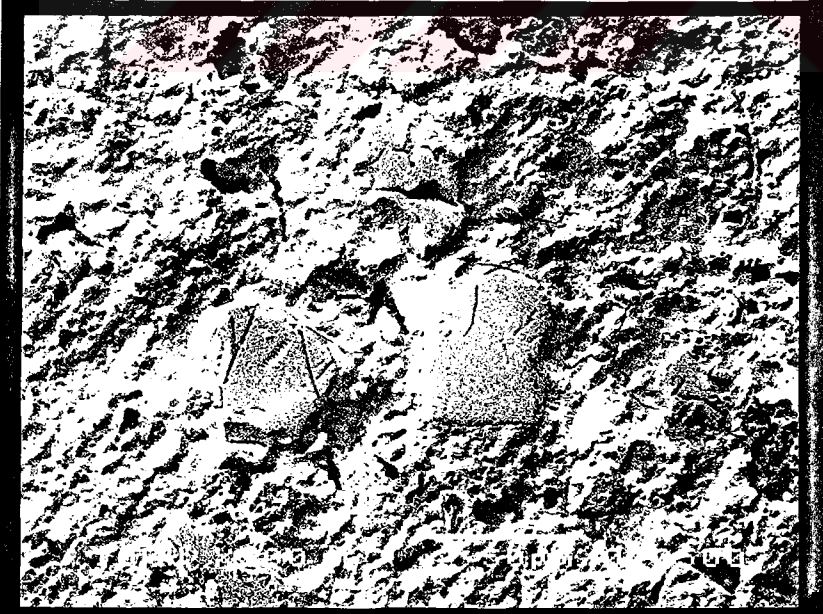
Şekil 5.17. X200 – Ham perlit + andezit betonu



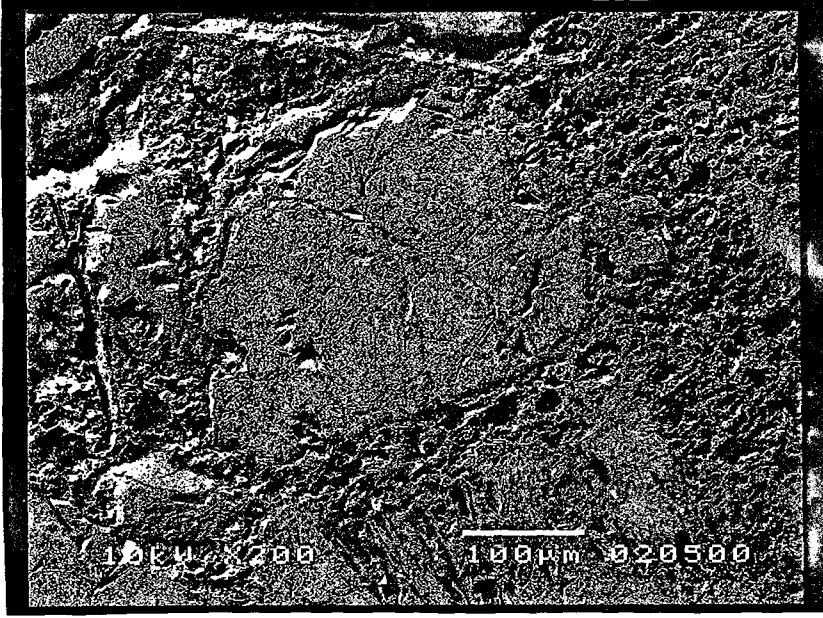
Şekil 5.18. X500 – Ham perlit + andezit betonu



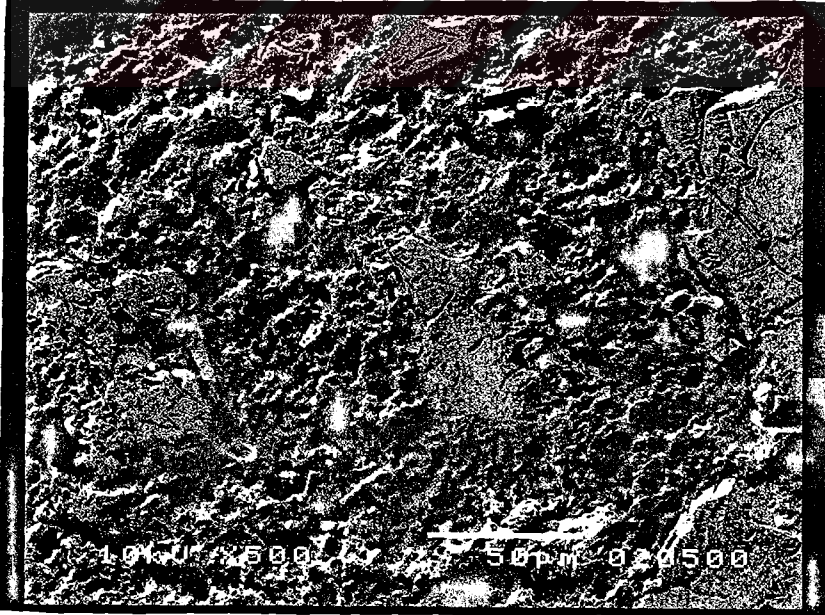
Şekil 5.19. X200 – Ham perlit + andezit + alçıtaşı betonu



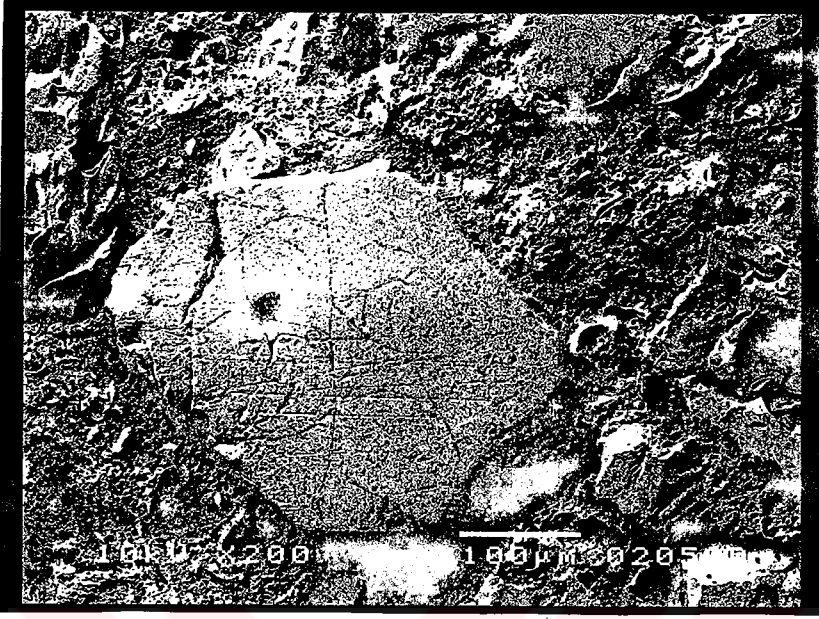
Şekil 5.20. X500 – Ham perlit + andezit + alçıtaşı betonu



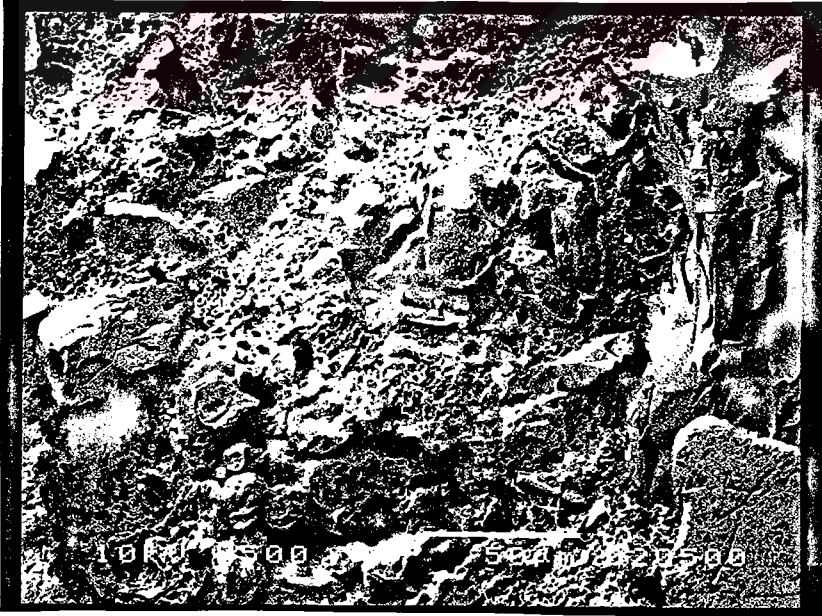
Şekil 5.21. X200 – Ham perlit (ince) betonu



Şekil 5.22. X500 – Ham perlit (ince) betonu



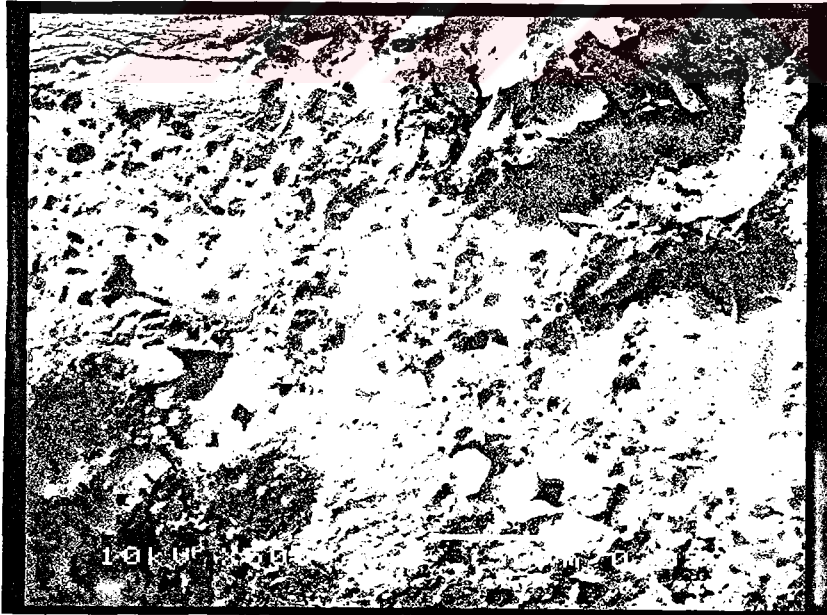
Şekil 5.23. X200 – Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu



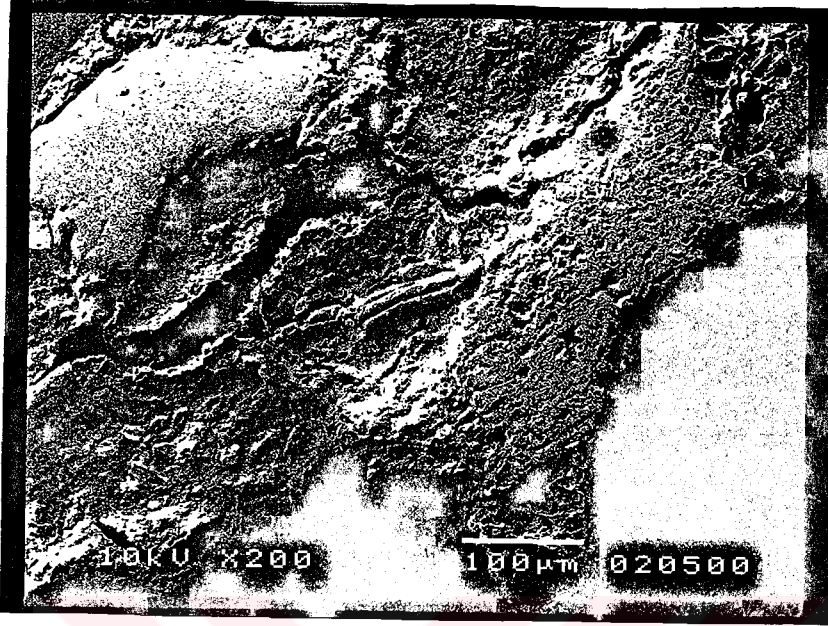
Şekil 5.24. X500 – Ham perlit (ince) + alçıtaşı betonu



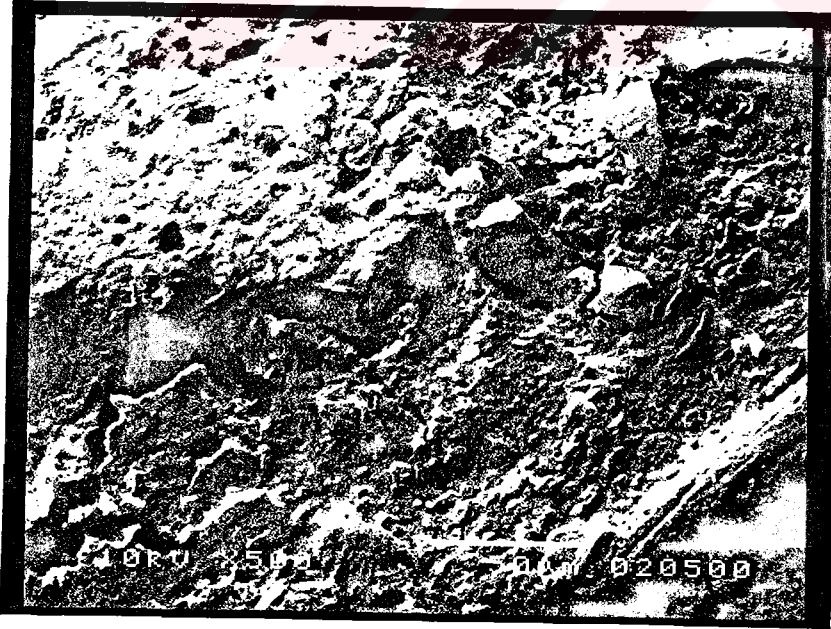
Şekil 5.25. X200 – Genleştirilmiş perlit betonu



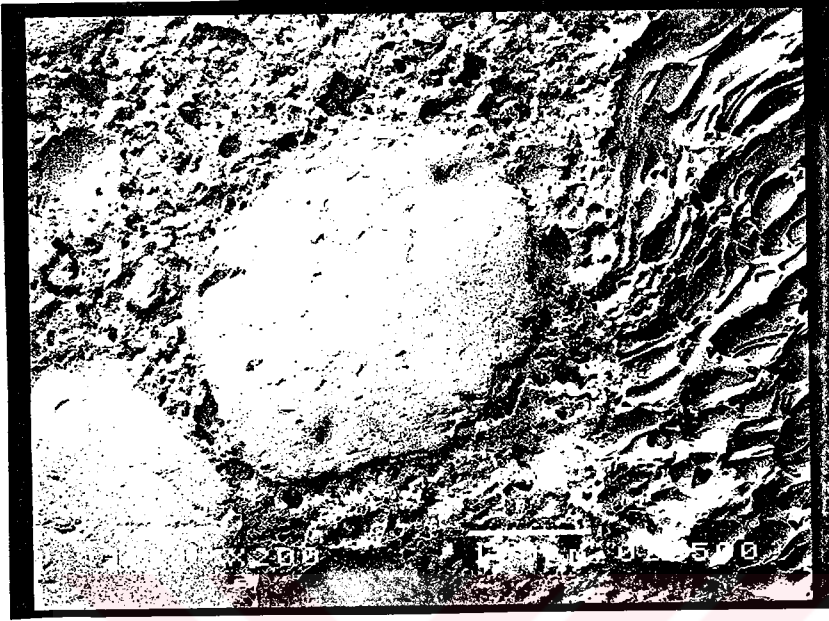
Şekil 5.26. X500 – Genleştirilmiş perlit betonu



Şekil 5.27. X200 – Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu



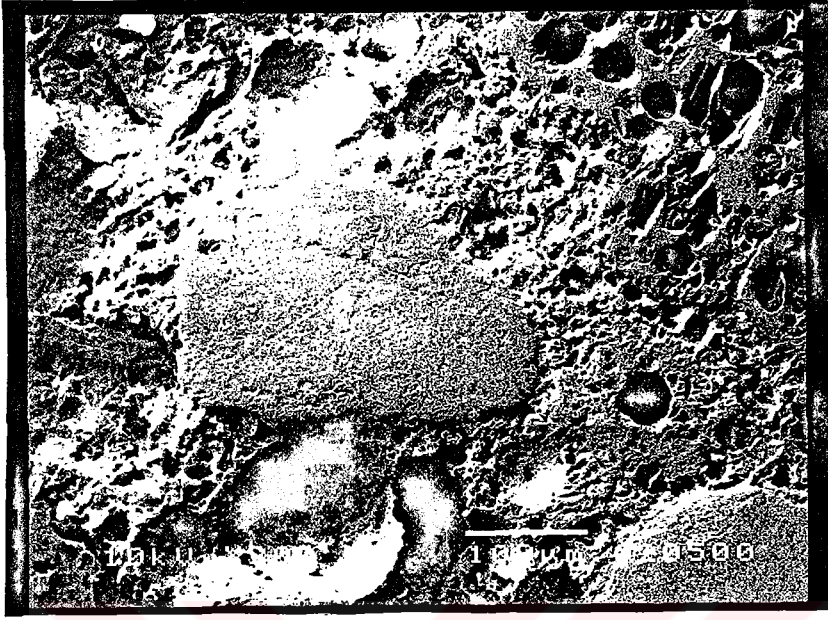
Şekil 5.28. X500 – Genleştirilmiş perlit + alçıtaşı betonu



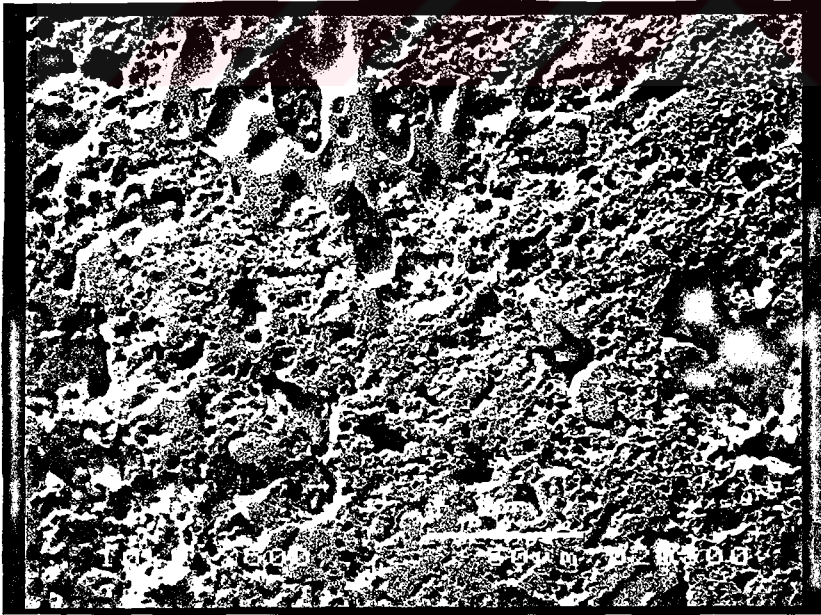
Şekil 5.29. X200 – Pomza betonu



Şekil 5.30. X500 – Pomza betonu



Şekil 5.31. X200 – Pomza + alçıtaşı betonu



Şekil 5.32. X500 – Pomza + alçıtaşı betonu

5.1.5.Hafif beton basınç mukavemeti sonuçları

Belirlenen beton dizaynları ile beton dökülmüş ve 3, 7, 28 günlük sürelerle kür odasında bekletilmişlerdir. Bu süre sonunda basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar Çizelge 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18'de verilmektedir.

Çizelge 5.13. Ham perlit betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
Ham Perlit betonu	243	303	424
H.Perlit + alçıtaşı betonu	221	299	411
H.Perlit+Çelik Tel(10 kg/m ³)	224	318	433
H.Perlit+Çelik Tel(20 kg/m ³)	212	270	379
H.Perlit+Çelik Tel(30 kg/m ³)	256	315	429

Çizelge 5.14. Ham perlit + andezit betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
Ham Perlit+Andezit betonu	227	266	357
H.Perlit +Andezit+ alçıtaşı betonu	232	323	394
H.Perlit+Andezit+ Çelik Tel(10 kg/m ³)	208	267	370
H.Perlit+Andezit+ Çelik Tel(20 kg/m ³)	230	291	396
H.Perlit+Andezit+ Çelik Tel(30 kg/m ³)	228	333	443

Çizelge 5.15. Ham perlit (ince) betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
Ham Perlit (ince)+ betonu	118	187	267
H.Perlit (ince)+alçıtaşı betonu	116	183	261
H.Perlit(ince)+ Çelik Tel(10 kg/m ³)	120	169	269
H.Perlit (ince)+ Çelik Tel(20 kg/m ³)	123	182	254
H.Perlit(ince)+ Çelik Tel(30 kg/m ³)	113	183	287

Çizelge 5.16. Genleştirilmiş perlit betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
G.Perlit betonu	13	14	22
G.Perlit + alçıtaşı betonu	15	19	28
G.Perlit+Çelik Tel(10 kg/m ³)	19	23	31
G.Perlit+Çelik Tel(20 kg/m ³)	18	25	34
G.Perlit+Çelik Tel(30 kg/m ³)	13	16	24

Çizelge 5.17. Pomza betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
Pomza betonu	55	72	91
Pomza + alçıtaşı betonu	38	53	91
Pomza+Çelik Tel (10 kg/m ³)	41	50	72
Pomza+Çelik Tel (20 kg/m ³)	64	89	118
Pomza+Çelik Tel (30 kg/m ³)	37	51	71

Çizelge 5.18. Keramzit betonu basınç mukavemeti sonuçları

	3 günlük (kgf/cm ²)	7 günlük (kgf/cm ²)	28 günlük (kgf/cm ²)
Keramzit + betonu	-	83	141
Keramzit +alçıtaşı betonu	-	81	133
Keramzit + Çelik Tel(10 kg/m ³)	-	95	139
Keramzit + Çelik Tel(20 kg/m ³)	-	114	142
Keramzit + Çelik Tel(30 kg/m ³)	-	116	145

5.1.6. Sertleşmiş betonda su emme oranları

Sertleşmiş betonun su emme oranları Çizelge 5.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.19. 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

5.2. Değerlendirmeler ve Öneriler

Ham perlit, ham perlit + andezit, ham perlit (ince), genişletilmiş perlit, pomza ve keramzit agregalı 6 farklı beton dizaynı yapılmıştır. Denemeler sonucunda teorik değerlere en yakın çökme değerine ve birim ağırlıklara ulaşılmıştır. DTA-TG analizleri ve X-Ray difraktometresinde ki analiz sonuçlarından yola çıkarak borik asit atığı 180°C'de 8 saat süre ile bekletildikten sonra çimentoda alçıtaşı yerine kullanılmıştır ve çimento dozajının % 3'ü oranında beton karışımına ilave edilmiştir. Aynı oranda çimento dozajı düşürülmüştür. 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, fakat beton numunelerinin basınç dayanımına negatif bir yönde etkisi olmamıştır.

İlk etapta taze beton numuneleri üzerinde priz deneyleri yapılmış ve şu sonuçlar elde edilmiştir;

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

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

Ham perlit betonu için; priz başlama süresi 2½ saatten 1½ saate, priz bitme süresi 7 ½ saatten 6½ saate,

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

Keramzit betonu için; priz başlama süresi 5²⁰ saatten 5¹⁰ saate, priz bitme süresi 8¹⁵ saatten 7 ½ saate düşürülmüştür.

Bor jips atığından elde edilen alçının hafif beton üretiminde priz hızlandırıcı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Bütün bunların yanı sıra bor, nötron zırhlamasında 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,

en etkili minerallerin kalsiyum içeren bor bileşikleri olduğu daha önceden yapılmış olan çalışmalarda kanıtlanmıştır (Yılmaz, 1996).

Daha sonra bor jips atığından elde edilen alçı ilave edilmeden beton karışımlarına 10 kg/m^3 , 20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 oranlarında Dramix çelik telleri katılmıştır.

Borik asit atığı ve çelik tel katkılı beton numuneleri 28 günlük kür sonrası basınç dayanımı testlerine tabii tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar şöyledir;

Ham perlit betonuna alçı ilavesi basınç dayanımını menfi yönde etkilememiş ve en iyi çelik tel katkılı beton sonucu 30 kg/m^3 oranında katılan numunede elde edilmiştir.

Ham perlit + andezit betonuna alçı ilavesi basınç dayanımının 357 kgf/cm^3 'den 394 kgf/cm^3 'e kadar arttırmıştır ve andezit agregasız ham perlit betonunda olduğu gibi en yüksek dayanım değeri 30 kg/m^3 çelik tel ilavesinde gözlenmiştir.

Ham perlit (ince) beton numunelerinde iri agrega kullanılmadığından dolayı daha düşük basınç dayanımı değerleri elde edilmiş, fakat alçı dayanımı azaltıcı yönde etki göstermemiştir. 10 kg/m^3 ve 20 kg/m^3 dozajlarında çelik tel ilavesine oranla en yüksek değerler 30 kg/m^3 'de elde edilmiştir.

Genleştirilmiş perlit betonunda alçı ilavesi dayanımı arttırmış ve çelik tel ilavesinde en yüksek değer 20 kg/m^3 'de alınmıştır.

Pomza betonunda 28 günlük kür sonucunda alçı ilavesi dayanımını etkilememiş, 20 kg/m^3 çelik tel ilavesi ile en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşmıştır.

Keramzit betonunda basınç dayanımı sonuçları pomza betonuna göre daha yüksek çıkmış, 3 farklı oranda katılan çelik tel ilavesinde basınç dayanımları yaklaşık sonuçlar vermiştir.

Denemelerde pomza, keramzit 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 kırılma dayanımının artmasına ve düşük basınç mukavemetlerine neden olmaktadır. Yalıtım betonlarının aksine bir betonun taşıyıcı hafif beton olabilmesi için birim ağırlığının $1600-2000 \text{ kg/m}^3$ değerleri arasında, basınç dayanımının ise 153 kgf/cm^2 '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, $2100-2500 \text{ kg/m}^3$ birim ağırlığında üretilen normal beton

standartlarıdır. Ham perlit ve andezit agregaları ile üretilen hafif betonların basınç mukavemetleri 424, 411, 394, 354 kgf/cm²'dir. Bu değerlere ulaşmak için normal betonlarda 300-450 kg/m³, hafif betonlarda ise 390-570 kg/m³ çimento dozajı istendiği (Çizelge3.3) görülmüştür. Kullandığımız agregaların kendilerine özgü özelliklerinden dolayı bu mukavemet değerlerine sadece 300 kg/m³ 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.

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 ışıklardan korunmada yeterli absorplama kapasitesine sahip olduğu ve çevreye verilen zararı önlemede ideal bir çözüm olduğu görülmüştür.

Beton numunelerinde kullanılan agregaların değişimiyle en yüksek basınç mukavemeti sonucu veren çelik tel oranının değiştiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

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

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

Postacıoğlu, B., (1986), Agregalar Beton, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul

Gambhir, M.L., (1986), Concrete Technology, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi

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

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

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

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

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

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.

Şanbaşoğlu, N., (1997), "Çimento Hakkında Genel Bilgi", Çimento Dergisi.

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

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

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.

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.

Yiğit, D., (1992), Hafif Beton Agregaları, 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.

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.

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.

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 B₂O₃ 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.

Çelik, T.A., (1987), " Atık Çamurdaki Boraksın Kurtarılması ", Tübitak VI. Bilim Kongresi, Kimya Sektörü Özetleri, 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.

T.S.K.B., (1980), Alçıtaşı ve Anhidrit , Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş. Kimya Sektör Araştırması, 23.

Bekaert, (1997), Dramix- Steel Wire Fibres, AS-10-05 , Beksa, İzmit

Hüsem, M., (1995), Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Tokyay, M., Ramyar, K., Turanlı, L., (1991), Polipropilen ve Çelik Lifli Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç ve Çekme Yükleri Altındaki Davranışları, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 303-320.

Grace, (1999), Ürün Kataloğu, Grace Cement and Concrete Chemicals.

Sika, (1999), Ürün Kataloğu, Sika.

T.S. 3529, (1980), "Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini", T.S.E., Ankara.

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 Zırlama Etkinliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.07.1976	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1987 -1994	Özel Kùltür Lisesi
Lisans	1994-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya- Metalurji Fakùltesi Kimya Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998- Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Çalıştığı kurum (lar)		
	1999 – Devam ediyor	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

