

ATIK SERAMİK KAROLARININ
ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

MEVLÜT ÜNAL ✓

Yüksek Lisans Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT, 1998

Mevlüt ÜNAL'ın Yüksek Lisans Tezi olarak hazırladığı "Atık Seramik Karolarının Çimento Üretiminde Kullanılması" başlıklı tez 12/02/1998 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Lisansüstü Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye (Tez Danışmanı) : Doç. Dr. Nuran AY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bekir KARASU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat KARA

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19.2.1998 tarih ve 3/7... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Anadolu Üniversitesi
Merkez Kütüphane

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**ATIK SERAMİK KAROLARININ ÇİMENTO
ÜRETİMİNDE KULLANILMASI**

MEVLÜT ÜNAL

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr.Nuran AY
1998, Sayfa 82

Portland çimentosunun puzolanik özellik gösteren malzemelerle birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentolara puzolanlı çimento denir. Puzolanlar, doğal ve suni olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

Seramik karo atıkları, seramik endüstrinde, hatalı üretim sonucunda meydana gelen ve tekrar kullanılamayan malzemelerdir. Bunlar, suni puzolanlar grubunda yer alırlar. Eskişehir bölgesindeki seramik üreticilerinde çok miktarda atık seramik bulunmaktadır. Bu atıkların, çimento üretiminde değerlendirilmesi ülke ekonomisi açısından yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, seramik karo atığının %25, %30, %35, %40 oranlarında portland çimentosuna ilave edilmesiyle hazırlanan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan numunelerin puzolanik aktivitesi, priz başlama ve sona erme süreleri, hacim genleşmesi, tane boyut dağılımı, yoğunluğu, özgül yüzeyi ve mukavemet deneyleri tesbit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, seramik karo atıklarından %35 oranına kadar çimentoya ilave edilebileceği tespit edilmiştir. Bu ise, çimento katkı maddesinin maliyetini düşüreceğinden çimento maliyeti azaltacaktır.

Anahtar Kelimeler : Atık Seramik Karo, Puzolan, Çimento

ABSTRACT
Master of Science Thesis

**THE USE OF CERAMIC TILE SCRAPS
FOR THE CEMENT PRODUCTION**

MEVLÜT ÜNAL

Anadolu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ceramic Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Nuran AY
1998, Page 82

The cement prepared by grinding Portland cement and materials showing puzzolano's properties are called puzzolano cements. They are divided into two groups as natural and artificial.

Tile scraps in ceramic industry are the materials received as a result of faulty production and not reused. They are categorised in puzzolano group. The ceramic industry situated in Eskişehir region causes noticable amount of such scraps. It is thought that to value them in the cement factory of the region may result in some profits as far as the country's economy is concerned.

In this study the prepared cements by introducing ceramic scraps in the proportions of 25%, 30%, 35% and 40% are investigated for their chemical and physical properties including strength investigations. The puzzolanic activities, priz starting and ending periods, volume expansion, partical size distribution, density, spesific area and strength experiments of the prepared samples have been conducted.

At the end of the current study it has been seen that ceramic tile straps can be introduced into cement up to 35%. By doing so, the cost of cement preparation can be dropped down the overall cost.

Key Words : Ceramic tile scrap, Puzzolano, Cement.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca değerli zamanlarını ayıran sayın hocam Doç. Dr. Nuran AY,

Yüksek Lisans eğitimimde beni destekleyen Yrd. Doç. Dr. Engin ERKMEN, Yrd. Doç. Dr. Bekir KARASU ve Yrd. Doç. Dr. Ferhat KARA,

Çalışmalarımda beni destekleyen Eskişehir Çimento Fabrikası Pl. ve Kl. Md. Tomris ERTÜN, Nilgün DİNÇBAŞ, Nurhan KIYIK ve emeği geçen tüm fabrika çalışanlarına,

Beni her konuda destekleyen Nişanlım Öznur'a,

Beni bu günlere getiren Aileme,

Hepinize tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
 1. GİRİŞ.....	 1
 2. ÇİMENTONUN TARİHÇESİ.....	 2
 3. PORTLAND ÇİMENTOSUNUN YAPISI VE KİMYASI.....	 3
3.1. Portland Çimentosu Klinkerinin Temel Yapısı	3
3.2. Portland Çimentonun Kimyasal Bileşimi.....	4
3.3. Silikat Modülü	4
3.4. Alümina-Demir Oksit Oranı (Alümina Modülü).....	5
3.5. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF).....	5
3.6. İkincil Elementler	5
3.6.1. Çözünmez kalıntı.....	5
3.6.2. Manganez.....	6
3.6.3. Titanyum.....	6
3.6.4. Fosfor	6
3.6.5. Magnezyum oksit.....	6
3.6.6. Kükürt trioksit.....	7
3.6.7. Kızdırma kaybı	7
3.6.8. Alkaliler.....	7
 4. PUZOLANLAR	 9
4.1. Doğal ve Suni Puzolanların Sınıflandırılması.....	9
4.2. Doğal Puzolanlar.....	11
4.2.1. Volkanik Çöküntüler	11
4.2.2. Gevşek Çöküntüler	11
4.2.3. Sıkı Kayalar	12
4.2.4. Volkanik Olmayan Çöküntüler.....	13
4.3. Suni Puzolanlar	14
4.3.1. Pişmiş Killer ve Şistler	14
4.3.2. Yüksek Fırın Cürufu.....	14

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.3.3. Uçucu Küller	15
4.3.4. Silika Dumanları.....	15
4.3.5. Pirinç Kabuğu Külleri.....	16
4.4. Puzolanik Aktivite.....	16
4.4.1. Kireç Puzolan Reaksiyonu.....	16
4.4.2. Kireç Puzolan Reaksiyonunun Mekanığı	19
4.4.3. Puzolanik Aktivitenin Değerlendirilmesi.....	20
5. PUZOLAN İÇEREN ÇİMENTOLAR	22
5.1. Puzolan İçeren Çimentoların Orjini.....	22
5.2. Puzolan İçeren Çimentoların Bileşimi ve Tanımlanmaları	23
5.3. Puzolan İçeren Çimentoların Pastalarındaki Reaksiyonlar.....	23
5.3.1. Tepkime Mekanizması	24
5.3.2. Tepkime Ürünleri	26
5.4. Puzolan İçeren Çimentoların Özellikleri	27
5.4.1. Prizlenme Zamanı.....	27
5.4.2. Dayanım.....	27
5.4.3. Akış.....	28
5.4.4. Çekilme	28
5.4.5. Büzülme.....	28
5.4.6. Hidratasyon Isısı	29
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
6.1. Kullanılan Malzemeler	30
6.2. Kullanılan Cihazlar.....	30
6.2.1. Normal Kıvam Tayini Cihazı.....	30
6.2.2. Hacim Genleşme Tayini Cihazı.....	30
6.2.3. Tane Büyüklüğü Tayini Cihazı.....	34
6.2.4. Yoğunluk Tayini Cihazı	34
6.2.5. Özgül Yüzey Tayini Cihazı	34
6.2.5.1. Blaine Aleti.....	34
6.2.5.1.1. Blaine Aletinin Kalibrasyonu	37
6.2.5.2. Süzgeç Kağıdı.....	40
6.2.5.3. Manometre Sıvısı	40
6.2.5.4. Kronometre	40
6.2.6. Mukavemet Tayin Cihazları.....	43
6.2.6.1. Karıştırıcı	43
6.2.6.2. Kalıplar.....	43

İÇİNDEKİLER (Devam)

6.2.6.3. Sarsma aleti	43
6.3. Numune Hazırlama	46
6.3.1. Puzolanik Aktivite Deney Numunesinin Hazırlanması	47
6.3.2. Mukavemet Deney Numunelerinin Hazırlanması	47
6.3.2.1. Harcın Bileşimi	47
6.3.2.2. Harcın Hazırlanması	47
6.3.2.3. Harcın Karıştırılması	48
6.3.2.4. Kalıpların Doldurulması	48
6.3.2.5. Numunelerin Bekletilmesi ve Bakımı	49
6.4. Yapılan Deneyler	49
6.4.1. Puzolanik Aktivite Deneyi	49
6.4.2. Normal Kıvamın Tayini Deneyi	50
6.4.3. Prizin Başlama ve Sona Erme Sürelerinin Tayini	50
6.4.4. Hacim Genleşme Tayini	51
6.4.5. Tane Büyüklüğü Tayini	52
6.4.6. Yoğunluk Tayini	53
6.4.7. Özgül Yüzey Tayini	54
6.4.8. Mukavemet Deneyleri (Rilem Cembureau Metodu ile)	55
6.4.8.1. Üç Noktalı Eğme Mukavemet Deneyi	55
6.4.8.2. Basınç Mukavemeti Deneyi	56
6.5. Deney Sonuçları	58
6.5.1. Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları	58
6.5.2. Prizin Başlama ve Sona Erme Sürelerinin Tayini Sonuçları	58
6.5.3. Hacim Genleşme Tayini Sonuçları	58
6.5.4. Tane Büyüklüğü Tayini Sonuçları	60
6.5.5. Yoğunluk Tayini Sonuçları	60
6.5.6. Özgül Yüzey Tayini Sonuçları	61
6.5.7. Mukavemet Deney Sonuçları	61
7. DENEY SONUÇLARININ YORUMU VE ÖNERİLER	64
8. KAYNAKLAR	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.1. Puzolanların Sınıflandırılması.....	10
4.2. 6 Değişik puzolanın sabit zamanda eriştiği kalsiyum hidroksit miktarı ...	17
5.1. Puzolanik tepkimelerin şematik gösterimi.....	25
6.1. Vicat aleti.....	32
6.2. Silindirik Sonda.....	32
6.3. Vicat halkası.....	33
6.4. İğne	33
6.5. Le Chatelier hacim sabitliği tayin aleti	33
6.6. Le Chatelier balonu.....	35
6.7. Blaine aleti.....	36
6.8. Rilem-Cembureau karıştırıcısı	44
6.9. Rilem-Cembureau harç kalıpları.....	45
6.10. Sarsma aleti.....	45
6.11. Üç noktalı eğme mukavemeti aletinin yükleme düzeni.....	57
6.12. Üç noktalı eğme mukavemeti ve basınç mukavemeti aletleri	57
6.13. Üç noktalı eğme mukavemeti grafiği	66
6.14. Basınç mukavemeti grafiği	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

6.1. Seramik karo atığının kimyasal analizi	31
6.2. Portland çimentosunun kimyasal analizi.....	31
6.3. Sıcaklığa bağlı olarak civa yoğunluğu ve hava viskozitesinin değişimi ...	40
6.4. Gözeneklilik e ile $\sqrt{e^3}$ arasındaki bağıntı.....	41
6.5. Ölçülen t ile $\sqrt{t}$ arasındaki bağıntı	42
6.6. Atık seramik karolu çimentoların kimyasal analizleri	46
6.7. Pozolanik aktivite deneyi için karışım miktarı	47
6.8. Karıştırma hızları	48
6.9. Atık seramik karonun pozolanik aktivite deney sonuçları.....	58
6.10. Normal kıvam tayini sonuçları	59
6.11. Priz başlama ve sona erme süreleri sonuçları	59
6.12. Hacim genleşme tayini sonuçları	59
6.13. Tane büyüklüğü tayini sonuçları	60
6.14. Yoğunluk tayini sonuçları	60
6.15. Özgül yüzey tayini sonuçları.....	61
6.16. Atık seramik karolu çimentoların eğilmede çekme mukavemet deney sonuçları	62
6.17. Atık seramik karolu çimentoların basınç mukavemeti deney sonuçları.....	63
6.18. Atık seramik karoların pozolanik özelliğinin TSE (42) şartnamesine uygunluğu	64
6.19. Atık seramik karolu çimentoların TSE şartnamesine uygunluğu.....	65

1. GİRİŞ

İnşaat malzemelerinin en önemlilerinden biri olarak sayabileceğimiz çimento, günlük hayatımızın ihtiyacı olan birçok hizmetin gerçekleşmesinde önemli bir yer almaktadır. İçerisinde kalsiyum, silisyum ve demir oksitlerin bulunduğu hammaddelerin teknolojik metodlarla "Sinterleşme" sıcaklığına kadar pişirilmesi sonucu elde edilen klinkeri, bir veya birkaç katkı maddesi ile beraber öğütülerek çimento eldesi sağlanmaktadır.

Kireç-puzolan harçları kullanılarak yapılan inşaat malzemeleri, Neolitik devir öncesine rastlamaktadır. 19. yüzyıl başlarında, Joseph Aspdin tarafından killi bir kireç taşının kalsinasyonu ile yapay çimento elde edilmiştir.

Yapay çimentonun elde edilmesiyle, çimento teknolojisinde hızlı bir gelişme yaşanmıştır. Çimentoya puzolanların ilavesiyle, beton dayanımlarının artması ve maliyetlerin azalması gibi özelliklerinden dolayı, oldukça geniş kullanım alanı mevcuttur.

Bu çalışmada, atık seramik karoların çimento endüstrisinde, ülkemizde oldukça yaygın olarak kullanılan tras yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. ÇİMENTONUN TARİHÇESİ

Kireç-Puzolan harçları en eski inşaat malzemelerinden bazılarıdır. İtalya'nın güneydoğusunda Galilee'de örtüsüz bir beton plaka üzerine yapılan deneyler, kireç ve kireç-puzolan betonu keşfinin Neolitik devirden (M.Ö. 7000) daha önceki tarihlere rastladığını göstermiştir (1).

Çimento, eski Mısırlılar tarafından Piramitlerin yapımında kullanılmıştır. Eski Yunanlılar ve Romalılar ise volkanik tuf (sünger taşı) ile kireci karıştırarak harç yapıp kullanmıştır ve bununla yapılan yapıların çoğu bugünde ayaktaadır. Bütün betonlar genellikle su kemeri inşaatlarının duvarlarında, köprü kemerlerinde, set duvarlarında ve Romalılar devri boyunca inşaatlarda kullanılmışlardır (2).

Romalılar zamanında bir çok su kemeri ve deniz yapısı inşa edilmiştir. Bunların bir kısmı bugün bile hala kullanılmakta olup kireç-puzolan harçların dayanıklılığının birer göstergesidirler (3,4).

Kireç-Surkhi karışımında (Surkhi, toz şamot toprağı veya tuğla toprağı) Yunanlılar ve Romalılar zamanında kullanılmıştır ve Hindistan'da hala yaygın olarak kullanılmaktadır (5).

1796 yılında İngiliz James Parker, Roma çimentosu adını verdiği ve yakılarak toz haline getirilmiş killi kireç taşı yumrularından hidrolik çimento elde etmiştir. Kireç taşı ve kilin yapay karışımını yakarak çimento elde etme girişimi ilk olarak 19. yüzyıl başlarında Fransa'da Vicat tarafından denenip başarılı olunmasına rağmen, çimento üretimindeki daha sonraki gelişmeler Fransa'da olmamıştır. İngiliz duvar ustası olan Joseph Aspdin, 1824 yılında killi bir kireç taşının kalsinasyonu ile, yapay çimento üretimi patentini almıştır ve bu portland çimentosunun başlangıcı olmuştur. Bu ürüne portland ismini vermesine sebep ise İngiltere yakınlarındaki Portland adasında çıkartılan ünlü yapı taşlarına benzemesinden kaynaklanmaktadır (6).

3. ÇİMENTONUN YAPISI VE KİMYASI

3.1. Portland Çimentosu Klinkerinin Temel Yapısı

İsteğe uygun ham karışımın kısmi ergime derecesine kadar (%20-30 sıvı faz) pişirilmesiyle elde edilen klinker başlıca 4 ana kristal yapıya sahip kalsiyum bileşiği karışımından oluşur. Bunların ikisi silika, birisi alümina öteki de demir oksitlerinin birlikte bulunduğu kalsiyum bileşikleridir. Klinkerde başlıca kalsiyum oksit (CaO), silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) ana yapı elemanından başka, alkali metal oksitler (Na_2O , K_2O), magnezyum (MgO) ve kükürtlü bileşikler (başlıca alkali metal ve kalsiyum sülfatları olarak) içeren ve klinkerin % 2-6'sı oranında bir miktarını oluşturan bir çok ikincil bileşiklerde bulunmaktadır.

Klinkerin 4 ana elemanı şunlardır;

1) Trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), C3S olarak belirtilip, genellikle 'Alite' şeklinde adlandırılır. C3S saf olmayıp katı halde, özellikle MgO ve Al_2O_3 gibi bazı ikincil bileşiklerle modifiye edildiği belirtilmektedir.

2) Dikalsiyum silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), C2S, 'Belit' adı verilir. C2S'nin değişik kristal yapıları bulunmaktadır. En çok mevcut olanı β -C2S'dir. Safsızlıklar nedeniyle kararlı hale getirilmiş bir yapıdır. Bir başka şekli de γ -C2S olup hiçbir hidrolik özellik taşımadığından varlığı istenmez.

3) Trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$), C3A şeklinde gösterilir. Bu bileşik, genellikle %9-12 nadiren de %15'i aşan miktarlarda bulunmaktaysa da çimento karakteristiği üstünde önemli rolü oynar.

4) Kalsiyum alümino ferrit. Bu bileşik genel olarak tetra kalsiyum alümino ferrit $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ veya C4AF olarak ifade edilir. Ancak dikalsiyum ferrit C2F ve dikalsiyum alüminat C2A kombinasyonları ile temsil edilen geniş bir aralığa yayılmıştır. C4AF veya C2A.C2F bu kombinasyon aralığının sadece belli bir bileşimini oluşturmaktadır (7).

3.2. Portland Çimentosunun Kimyasal Bileşimi

Çimento klinkerinin kimyasal yapısı alit ve belitin boyutuyla ve CaO içeren reaksiyonun hızıyla tayin edilmektedir. Hammaddenin tane boyutu dağılımı kuvars, CaCO_3 , kil, cüruf vs. (100 μm üstü)'un çeşitli boyutlardaki taneciklerinin mevcudiyeti klinker minerallerinin morfolojisini önemli derecede etkiler (8). Alit ve belitin morfolojisi büyük bir ölçüde sıvı fazın miktarına ve kimyasal kompozisyonuna bağlı olmaktadır (9).

Portland çimentosunun kimyasal bileşimi, içinde bulunan elemanların miktarına göre değişir. Çimentonun kimyasal yapısı, çimento özelliklerini belirleyen değişik faktörler cinsinden ifade edilmektedir. Bu faktörler; silikat modülü, alümina modülü ve kireç doygunluk faktörüdür.

Standart şartnamelerde (10), miktarlarının kısıtlandığı bir dizi eleman daha bulunmaktadır;

1) Çözünmez kalıntı (Ç.K) : Bu, asitle çözünmeyen maddeleri ifade etmekte olup genellikle ilave edilen alçı taşından gelen topraklardan oluşmaktadır. Şartnamede belirtilen metoda göre tayin edildiklerinde % 1.5'u geçmemeleri gerekmektedir

2) Magnezyum oksit : Çimentodaki oranı % 4.0'ü geçmemelidir.

3) Kükürt trioksit (SO_3) : Çimentoda izin verilen kükürt miktarı SO_3 cinsinden, C3A % 7'den yüksekse % 3.0'ü, C3A % 7 ya da daha düşükse % 2.5'ü geçmemelidir.

4) Kızdırma kaybı (KK) : Vasat iklim koşullarında toplam kızdırma kaybı % 3'ü, tropikal iklimlerde ise % 4'ü geçmemelidir.

3.3. Silikat Modülü

Silikat modülü, çimentodaki SiO_2 miktarının, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamına oranı olup, (3-1) eşitliği ile ifade edilir (7);

$$\text{SİM} = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad \text{veya kısaca S/R} \quad (3-1)$$

Bu modüle göre, silis oranı ne kadar yüksekse, diğer faktörler değişmediği takdirde kalsiyum silikat oranı da o kadar yüksek demektir.

3.4. Alümina - Demir Oksit Oranı (Alümina Modülü)

Alümina-demir oksit oranı çimentodaki alüminyum oksitin demir okside oranı olup, (3-2) eşitliği ile ifade edilir (7);

$$ALM = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad \text{veya kısaca } A/F \quad (3-2)$$

Yüksek alümina modülü mineral yüzeyi üzerinde çatlamaya ve klinker mineral kristallerinin kısmen ve hatta tamamen çözünme ihtimaline sebep olur (11,12).

3.5. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF)

Genelde amaç, mümkün olduğu kadar yüksek C3S içerikli bir klinker üretmektir. Tabii ki bu, mevcut malzemenin toplam bileşimine ve işletme koşullarına bağlı bir konudur (7).

$$LSF = \frac{\%CaO}{2.80 * \%SiO_2 + 1.18 * \%Al_2O_3 + 0.65 * \%Fe_2O_3} * 100 \quad (3-3)$$

(3-3)'deki her sembol (toplam çimento ağırlığı itibariyle) oksit yüzdesine karşılık gelmektedir.

LSF=1.0 (veya % 100) olduğu zaman mevcut silikanın maksimum miktarı C3S formunda olup SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO sisteminde pişme sıcaklığında serbest kireç bulunmamaktadır. LSF'nin 1.0'den daha düşük değerlerinde SiO_2 'nin C3S şeklindeki oranıda giderek azalır ve C2S miktarı yükselir.

3.8. İkincil Elementler

3.8.1. Çözünmez Kalıntı

Bu eleman klinkere ilave edilen alçı taşından kaynaklanır. Genellikle silisli kil türünde bir malzemedir. Az bir kısmı da klinkerdeki birleşenlerin silisli kalıntılardan veya klinkere geçen fırın astar malzemesinden oluşur (7).

3.8.2. Manganez

En çok Mn_2O_3 halinde bulunur ve C4AF oluşumunda demire benzer bir reaksiyon gösterir. Normalde etkisi önemsizmemekle beraber fazla miktarda mevcut olursa alümina ve silikat modüllerini düşürür (7).

3.8.3. Titanyum

Katı silikat çözeltisinde TiO_2 halinde ve diğer fazlarda muhtemelen kalsiyum titanat halinde bulunur (7).

3.8.4. Fosfor

Bu elementin en fazla, dikalsiyum silikat fazındaki katı çözeltide bulunduğu sanılmaktadır. Az miktarlarda mevcut olduğundan (% 0.2-0.3 P_2O_5 optimum aralıklarda) çimento üzerinde olumlu bir etkisi vardır (7).

3.8.5. Magnezyum Oksit

MgO belli bir oranda CaO gibi davranır. Böylece çimentonun LSF'ni etkin bir şekilde artırır ve kompozisyonu büyük ölçüde etkiler. Bu bileşiğin, alüminyum oksidin bir kısmı ile birlikte C3S'nin yapısına katı çözelti olarak girdiği bilinmektedir. Magnezyum ve alüminyum oksit birlikte, mevcut alite'in %5'ini oluşturabilir. Pişirme sıcaklığında sıvı faz C3A ve C4AF'den oluşur. Bu faza biraz silika ve kalsiyum oksit fazlası ile % 5'e kadar MgO (sıvı bileşen olarak) girebilmektedir. Klinker soğuduğu zaman MgO, C3A ve C4AF'nin yapısına girer ve belli bir seviyeye kadar da C2S'deki CaO'in yerini alabilir. MgO'nun klinkerde %2'ye kadar bu şekilde bünyede kalabildiğine ve çimento ana bileşikleri arasına girebildiğine inanılmaktadır. MgO fazlası veya düzensiz dağılımından dolayı bünyeye girmemiş olan MgO birleşmemiş MgO, olarak periklas şeklinde bulunur. Bu serbest MgO, hidratasyona uğramış çimento harçları ve betonun bozulmasına yol açar. Çünkü hidratasyonun yavaş olması nedeniyle zaten sertleşmiş olan malzemede tahrip edici genleşme kuvvetleri doğacaktır. İşte sırf bu

yüzden portland çimentosundaki MgO varlığı için % 4'e kadar bir sınırlama getirilmiştir (7).

3.8.6. Kükürt Trioksit

Çimentodaki SO_3 'ün iki kaynağı vardır. Bu oksit ya alçı taşı ya da birden fazla CaSO_4 türü olarak bünyeye girer veya kullanılan yakıttaki kükürdün yanması ile klinkere karışır. Klinker öğütüldüğü zamanda çimentoya geçer. Klinker sülfatını genellikle alkali sülfatlar oluşturur. Fakat %0.50 veya daha fazla SO_3 içeren klinkerlerde CaSO_4 oranı çimentonun SO_4 ve alkali konsantrasyonlarına göre giderek artar. Böyle durumlarda CaSO_4 , K_2SO_4 ile bir çift tuz teşkil eder. Bu şekliyle aktif bir çözünür formda bulunur. Klinker sülfatları çok nadiren susuz CaSO_4 şeklinde bulunur. Bu tip CaSO_4 çok yavaş çözündüğü için donmanın geciktirilmesi açısından oldukça düşük bir aktiviteye sahiptir (7).

3.8.7. Kızdırma Kaybı

Su ve CO_2 'den kaynaklanır. Su, ilave edilen alçı taşından gelen CaSO_4 'e bağlı olarak bulunur ve serbest kalsiyum oksitin bir kısmına $\text{Ca}(\text{OH})_2$ olarak bağlanmasıyla sisteme girer. CO_2 miktarı az olabilir. Bu da serbest veya bağlı kirecin öğütme sırasındaki kısmi kombinasyonundan ya da %1'lik bir seviyeye kadar, genelde ilave edilen alçı taşında mevcut olabilecek CaCO_3 'ten ileri gelebilir. Bu ikinci durumda, bilinegelen LSF hesaplamaları gerçek rakamdan %2 daha yüksek çıkabilir. Bunun sebebi de CaCO_3 'ten oluşan CaO 'in bağlı kireç gibi ifade edilmesidir.

Havalandırılmış çimentoda (aerated cement) genellikle suyun içinde eser miktarda kalsiyum alüminat ve silikat hidratlara bağlı hidratasyon suyu bulunur ve çimento elemanlarının CO_2 'i bağlaması nedeniyle de CO_2 oranı yükselir (7).

3.8.8. Alkaliler

Alkaliler, özellikle K_2O , sülfat şeklinde mevcuttur. Ama her zaman klinkerde bunları tamamen bağlayacak miktarda sülfat bulunmamaktadır. Sülfat şekline

giremeyen alkaliler çimento klinkerinin ana elemanlarına CaO 'ü ikame etmek üzere girerler ve böylece tıpkı MgO 'da olduğu gibi kireç doygunluk faktörünün etkili bir biçimde yükselmesine ve bileşimin C3S miktarı artacak yönde değişmesine yol açarlar. Aslında alkalilerin büyük bir kısmı eğer sülfat şeklinde bağlanamamış ise kalsiyum alüminat ve silikat fazlarında yer almayı tercih etmektedirler (7).

4. PUZOLANLAR

4.1. Doğal ve Suni Puzolanların Sınıflandırılması

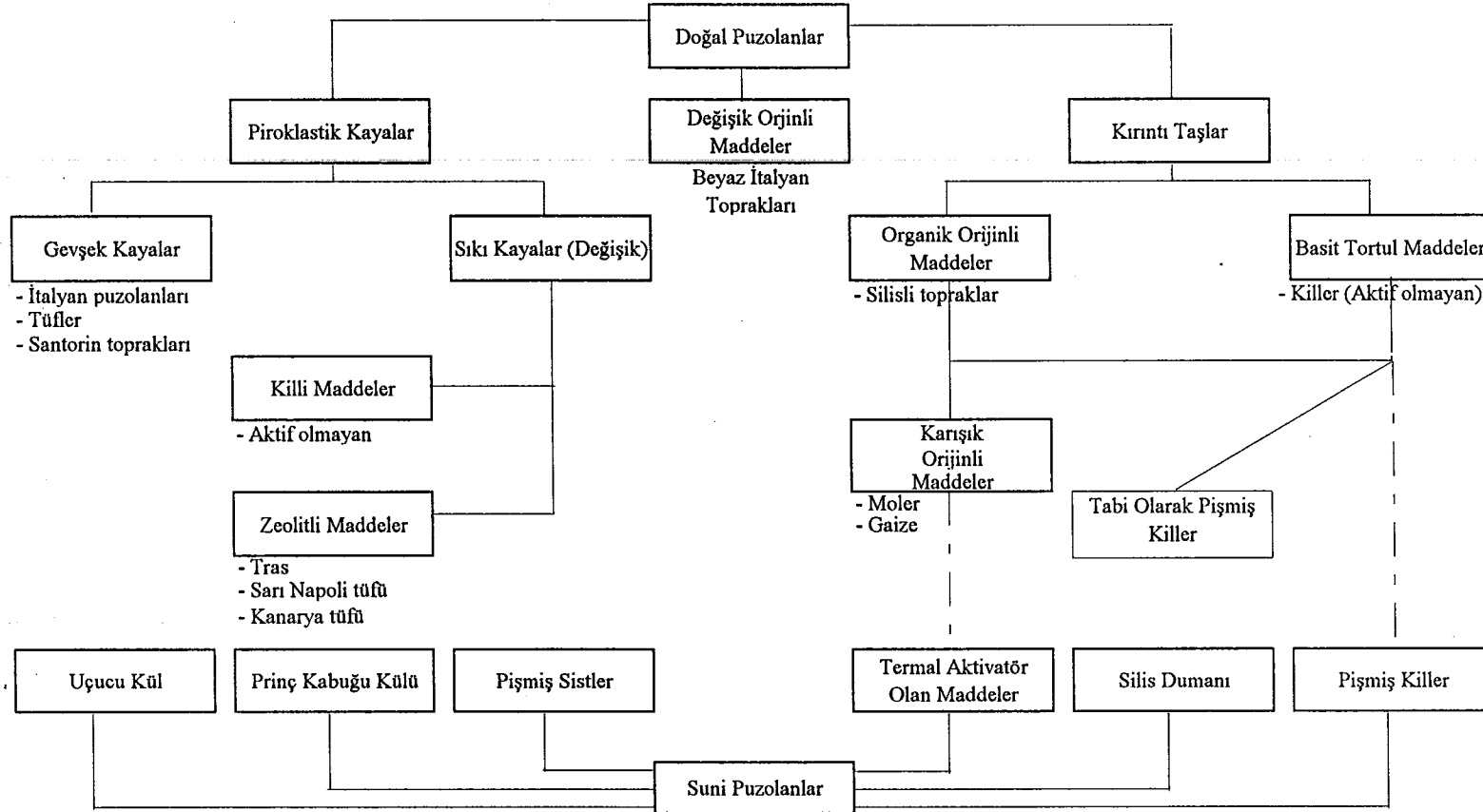
Puzolan esas olarak, alkaliler gibi kalsiyum okside de büyük yakınlık gösteren ve onlara asit karakteri veren silika ve alüminadan meydana gelir (13).

Puzolanlar tek başına bağlayıcı özellik göstermezler. Ancak normal koşullarda kireç veya çimento ile karıştırıldığında, su ile yaptığı reaksiyon sonucu çözünmeyen, kararlı, bağlayıcı bir madde özelliği kazanırlar (14,15). Bu davranış puzolanların karakteristik özelliğidir.

Puzolan ismi, Napoli yakınlarında bir yer olan Pozzuoli'den gelmektedir. Burada eski Roma devirlerinden beri kireçle uygun oranlarda karıştırıldığında mükemmel hidrolik çimento üretilen bir madde elde edilirdi.

Puzolanlar oluşum şekillerine göre, doğal ve suni olmak üzere ikiye ayrılabilirler (16,17,18,19). Doğal puzolanlar az ya da çok geniş değişikliklere uğramış, volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşmakla birlikte, başka kaynaklı maddelerde içerirler. Suni puzolanlar bu gibi doğal maddelerin kil ya da şist olarak ısıtılmasıyla elde edilirler. Ayrıca diğer ürünlerin atıklarıdır. Örneğin "silis dumanları" metal silis veya silis esaslı alaşımların üretiminden elde edilirken, uçucu kül termik elektrik güç santrallerindeki öğütülmüş ocak kömürünün yanmasıyla ortaya çıkar. Şekil 4.1'de bu maddelerin bir sınıflandırması verilmiştir.

Kaynakları ne olursa olsun puzolanların esas elemanları silikadır. Doyurucu özelliklere sahip puzolanlar % 40'dan % 90'a kadar SiO_2 içerebilirler. Segni'den (Roma) elde edilen yaklaşık % 12 oranında kalsiyum oksit içerikli puzolan veya ziftli kömürün uçucu külleri gibi istisnalarda bulunmasına karşın, kalsiyum oksit içeriği genelde çok düşüktür. Silis dumanının aksine doğal puzolanlarda veya uçucu küllerde dikkate değer miktarlarda alkaliler (K_2O , Na_2O) bulunurlar. Alüminyum oksit içeriği, suni puzolanlarda % 30'u aşarken, doğal puzolanlarda % 20'e kadar çıkabilir (16).



Şekil 4.1. Puzolanların Sınıflandırılması (16)

4.2. Doğal Puzolanlar

Kimyasal bileşimde belli bir dereceye kadar değişkenlik gösteren doğal puzolanlar, minerolojik yapı açısından tipten tipe dikkate değer ölçüde farklılık arzederler (16).

4.2.1. Volkanik Çöküntüler

Üzerinde çok geniş şekilde çalışılan ve iyi bilinen doğal puzolanlar, İtalyan puzolanları, santorin toprağı (Yunanistan'dan), Alman trasları ve Amerikan puzolanlarıdır. Bunlar diğer pek çok ülkede de bulunur ve kullanılırlar. Minerolojik ve kimyasal olarak önemli ölçüde farklılık gösteren bu kayaların sadece kireç bağlama kapasiteleri ortaktır.

Doğal puzolanlar temelde volkanik püskürmeler nedeniyle parçalanmış gevşek kayalardır. Gaz bakımından zengin magmanın etkisiyle püsküren parçacıklar, ani soğumayla büyük ölçüde bol kabarcıklı cama dönüşürler.

Volkanik camların termodinamik kararsızlığı, puzolanların hem kalsiyum oksite karşı reaksiyon kapasitelerini, zeolitizasyona ve bunların sementasyonuna yol açan, içten gelen hareketlerden zarar görme derecelerini, hem de zamanla kile dönüşmelerini açıklar. Bu iki dönüşüm farklı etkilere yol açarlar; çünkü, camın zeolitizasyonuna yol açan kimyasal değişiklik bunu iyileştirirken, değişik araştırmacılara göre, killi minerallerin oluşumuna yol açan puzolanik aktiviteyi azaltır.

Doğal puzolanların mikroskobik yapılarının incelenmesi sonucunda, her puzolanın diğerlerinden farklı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Fakat hepsi de yüksek bir porozite gösterirler (16).

4.2.2. Gevşek Çöküntüler

İtalyan Puzolanları : En iyi bilinen İtalyan puzolanları Napoli ve Roma yakınlarında bulunmaktadır. Ancak İtalya'nın başka bölgelerinde de bunlara rastlanır.

Neapoliten veya Flegrean puzolanları alkali içerikli tras tipine aittir ve esas

olarak cam yapısındadırlar. Bu cam, çeşitli kristalimsi sanidin içeriğine (bir potasyum feldispat) ve az miktarda diğer minerallere sahiptir.

Camın bileşimi, oligoklas'inkine ve hatta orthoklas ve anortit'inkine yakındır. Flegrean puzolanları, bileşim olarak Roma puzolanlarından daha asidiktir (SiO_2 ve R_2O_3 bakımından daha zengindir).

Lüsitik tipten olan Roma puzolanları Neopoliten puzolanlarından daha kristal yapıdadırlar. Değişimin açık bir işareti olarak lüsit hem berrak hem de bulanık kristallerde bulunur. Mevcut diğer maddeler piroksenlerdir. Roma puzolanlarının camı önemli ölçüde değişmiştir ve plajioklas labradorit mineralininkine yaklaşan bir bileşim gösterirler.

Santorin toprağı, pomza taşı, volkanik cam ve feldispat kırıntıları, piroksenler, kuvars ve benzerleriyle karışmış izotropik granüle bir maddeden oluşur. Üç esas maddesi

Pomza taşı, kum ve tozdan yalnızca sonuncusu önemli özelliğı sahiptir. Santorin toprağı, İtalyan puzolanlarından ve Alman traslarından daha az su ile birleşir. Ayrıca, diğer puzolanlarınkinin altında bir başlangıç dayanıklılığı (fakat bitiş dayanıklılığı değil) gösterir.

Kristalimsi parçacıklar, az miktarda montmorillonit killерinin yanı sıra kalsiyum karbonat, sanidon, hipersten, boynuz taşı, biotit, feldispat ve kuvarstan oluşur (16).

4.2.3. Sıkı Kayalar

İnce öğütüldükten sonra puzolan olarak kullanılan sıkı volkanik tüfler, minerolojik bileşim bakımından yukarıda anlatılan gerçek puzolanlardan farklıdırlar. Aynı piroklastik maddelerden kaynaklanmalarına karşın, muhtemelen yeraltında çevrime uğrayan aşırı ısınmış buhar ve karbondioksitten gelen bir diagenesis işleminin son aşamasını gösterirler.

Ren trası bu sınıfa ait puzolan maddelerinin tipik bir örneğidir. Bu feldispat lüsit, kuvars, boynuz taşı, augite, mika vb. gibi değişik kristalimsi minerallerle karışmış izotropik bir kütle içinde yer alan az ya da çok değiştirilmiş bir trakit tüftür. Trasan hemen hemen % 50'sini oluşturan bu matriks kütle, orjinal volkanik tortunun maruz

kaldığı hidrotermal aksiyon süresini gösteren oranlarda değişen cam ve zeolitik bileşiklerden oluşur.

Neopolitan trakit ve sarı tuf öğütüldüğünde önemli ölçüde puzolanik aktivite gösteren Ren trasıyla aynı şekilde davranır. İyi bir puzolanik aktiviteye de sahip olan Gran Kanarya (İspanya) sarı lav taşı, alkali-trakit, tüflerle aynı ailedendir. ABD'de % 80'e kadar zeolitik mineraller içeren sıkı, değişmiş riyolitik tüfler bulunabilir. Gevşek ve genellikle camsı olan normal puzolanlar ile kaynağını bir zeolitizasyon veya killenme ve bağlama olayıyla bu maddelerden alan sıkı tüfler arasında değişimin tip ve derinliğine bağlı ara özelliklere sahip bütün bir seri madde olduğu açıktır. Bu maddelerin değişik derecelerde puzolanik aktivite gösterdikleri kendiliğinden açığa çıkmaktadır (16).

4.2.4. Volkanik Olmayan Çöküntüler

Hem silikalı topraklar hem de orijinal kayada bulunan temel oksitlerin büyük bir kısmını kaybetmiş olan bazı silikalı kayalar, puzolanik davranış gösteren bu sınıf maddeler arasında yer alır.

Silikalı topraklar, dikkate değer şekilde deniz ya da göl kaynaklı silisli diyatome iskeletlerinin tortularını oluştururlar. Kirece karşı reaksiyon kapasiteleri çok yüksektir. Ne yazık ki, mikrohücreli yapıları nedeniyle, önemli miktarda su emerler. Bu onları hidrolik bağlayıcılar hazırlamak için kullanışsız kılmaktadır. Silikalı toprağın esas bileşeni, % 10'a kadar su içeren ve hidrate olmuş silikanın şekilsiz bir türünü oluşturan opaldir. Silikalı topraklar, kalsine edilince bazen maddeyi büyük ölçüde iyileştiren önemli oranlarda kil içerirler.

İtalya'da (üst Lazio ve alt Taskai'de) yüksek puzolan aktivitesine sahip, dolayısıyla da yüksek kimyasal dirençli özel puzolan çimentoları hazırlamakta kullanılan silikalı maddeler olmalıdır. Bu maddeler, orijinal kayalarda var olan katyonların büyük bölümünü çözen asidik sulara maruz kalmış minerallerin artıklarıdır (16).

4.3. Suni Puzolanlar

4.3.1. Pişmiş Killer ve Şistler

Kalsine edilmiş killerin puzolanik özellikleri, doğal puzolanların yokluğunda sistematik şekilde toprak tuğla ya da kiremitler kullanan Romalı'lar tarafından iyi bilinirdi. Ne var ki, Romalı'lar eski zamanlardan beri aşına oldukları, fakat en yaygın kullanıcısı olmadıkları bu tekniği bulanlar olarak düşünülemezler.

500 °C'den 1300°C'ye kadar değişen sıcaklıklarda yandıktan sonra bu tip bir puzolanik aktiviteye sahip olmayan killer, aktif hale gelirler. Bileşimlerindeki suyu kaybetmenin etkisiyle, kristal yapı bozulur, silika ve alüminyum oksidinin, şekilsiz bir halde veya, en azından, önemli bir yapısal düzensizlikle karakterize edildiği durumu alırlar. Bu durumda, madde çok daha reaktif olup silika ve alüminyum oksidi HCl içinde çözünebilir hale gelirler.

Yanma ısısı, orijinal kristal yapının tamamen bozulmasını sağlaması gerektiğinden, kullanılan maddeye göre dikkatle seçilmelidir. Fakat, aynı zamanda, silikanın ve alüminyum oksitlerinin (az miktarda var olan diğer bazı elemanlara ek olarak) birbirleriyle reaksiyona girip termodinamik olarak daha kararlı bileşikler (tridimit + mullit) oluşturmaları, dolayısıyla kalsiyum oksite karşı çok az, ya da hiç reaksiyon göstermez hale gelmeleri engellenmelidir.

Bu tip suni puzolanlar, nadiren İtalya'da bazende İtalya dışında, doğal puzolanlar bulmanın zor ya da olanaksız olduğu zamanlarda kullanılmıştır (16).

4.3.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırında, demir cevheri, ergitici (CaCO_3) ve kok ile yüksek sıcaklıkta bir dizi reaksiyon sonunda ham demir üretilir. Demir-çelik endüstrisi'nde ham demir üretimi sırasında cüruf atık olarak ortaya çıkar. Fırının altından alınan cüruf ani olarak su ile soğutularak granüle hale getirilir. Elde edilen cüruf çimento fabrikalarında değirmende klinker ve alçı taşı ile birlikte öğütülerek cürufllu çimento halinde kullanılır. Cürufun puzolanik özellikleri soğutma şekline (yavaş veya ani soğutmaya) ve demir cevherine göre değişir (20).

4.3.3. Uçucu Küller

Toz haline getirilmiş fosil yakıtların (ziftli kömürler, linyit kömürleri veya ikincil bitümlü kömürler) termik santrallerde yakılmasıyla, ulaşılan yüksek ısılar nedeniyle eriyen çok ince kiler elde edilir. Kimyasal bileşimleri elverirse yakılmayı izleyen soğutma işlemi, bu erimiş maddenin ince parçacıklarını, hemen hemen küresel şekilde camsı parçacıklara dönüştürür.

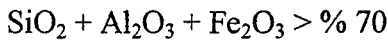
Yanma gazlarıyla kolayca çekildiklerinden uçucu kül de denilen bu küllerin yüzey alanları, 2000'den 5000 cm²/g'a (Blaine'in permeabilimeter metodu) kadar değişir. Fakat daha büyük değerlerde istisna sayılmazlar.

Kömür ya da linyitin artıklarının doğasıyla sıkı sıkıya ilişkili olduğundan, uçucu küllerin bileşimi önemli ölçüde değişir. Özellikleri ise yanma işlemine de bağlıdır.

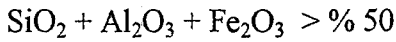
Değişik miktarlardaki yanmamış maddelere ek olarak, uçucu küllerin en önemli kristalimsi bileşenleri kuvars, mullit, hematit ve magnetit iken esas bileşeni, % 60'tan % 90'a kadar değişen oranlarda camdır. Linyit ve ikincil bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşan küller nispeten yüksek yüzdelerde kalsiyum oksit içerirler. Bu kalsiyum oksit miktarı serbest kalsiyum oksidin söndürülmesinden sonra doğrudan, yani hidrolik bağlayıcılar (genelde hidrolik kireç) gibi ek maddeler eklemekten kullanmayı mümkün kılar. Bol miktarda kalsiyum sülfat içerdikleri zaman, jips esaslı bağlayıcılar olarakta kullanılabilir (16).

Uçucu küller kaynaklandıkları kömürün tipine ve kimyasal bileşimine bağlı olmak üzere iki gruba ayrılır (ASTM C 618):

a) F sınıfı : antrasit veya bitümlü kömür külleri:



b) C sınıfı : linyit veya ikincil bitümlü kömür külleri:



4.3.4. Silika Dumanları

Silika dumanları, metal silis veya değişik demir-silis alaşımlarının elektrik ark fırınlarında üretimi sırasında ortaya çıkarlar. Elektrik ark ısısında, havada oksitlenen ve SiO₂ mikroküreleri şeklinde çökelen SiO₂ dumanları oluşur. Bunların silika içeriği çok

yüksektir (% 90'ı aşabilir). Aşırı incelikleri ($13-23 \text{ m}^2/\text{g}$) ve şekilsiz doğaları nedeniyle, silis dumanları dikkat çeken yüksek bir puzolanik aktiviteye sahiptirler (16).

4.3.5. Pirinç Kabuğu Külleri

Bazı bitkilerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıklar (pirinç kabuğu gibi), yüksek bir silika içeriğine sahiptirler. Bu atıklar, verilen bir ısı aracılığıyla fırınlandıklarında şekilsiz silis oluşur. Bu şekilsiz silika, yeterince ince öğütülürse kalsiyum oksite karşı oldukça reaktif duruma gelir, ve buna bağlı olarak bir puzolan gibi davranır (16).

4.4. Puzolanik Aktivite

Puzolanik aktivite, daha önce belirtildiği gibi, hem kimyasal ve minerolojik yapıları hem de kaynaklarına göre önemli ölçüde değişiklikler gösteren çeşitli maddelerde görülür.

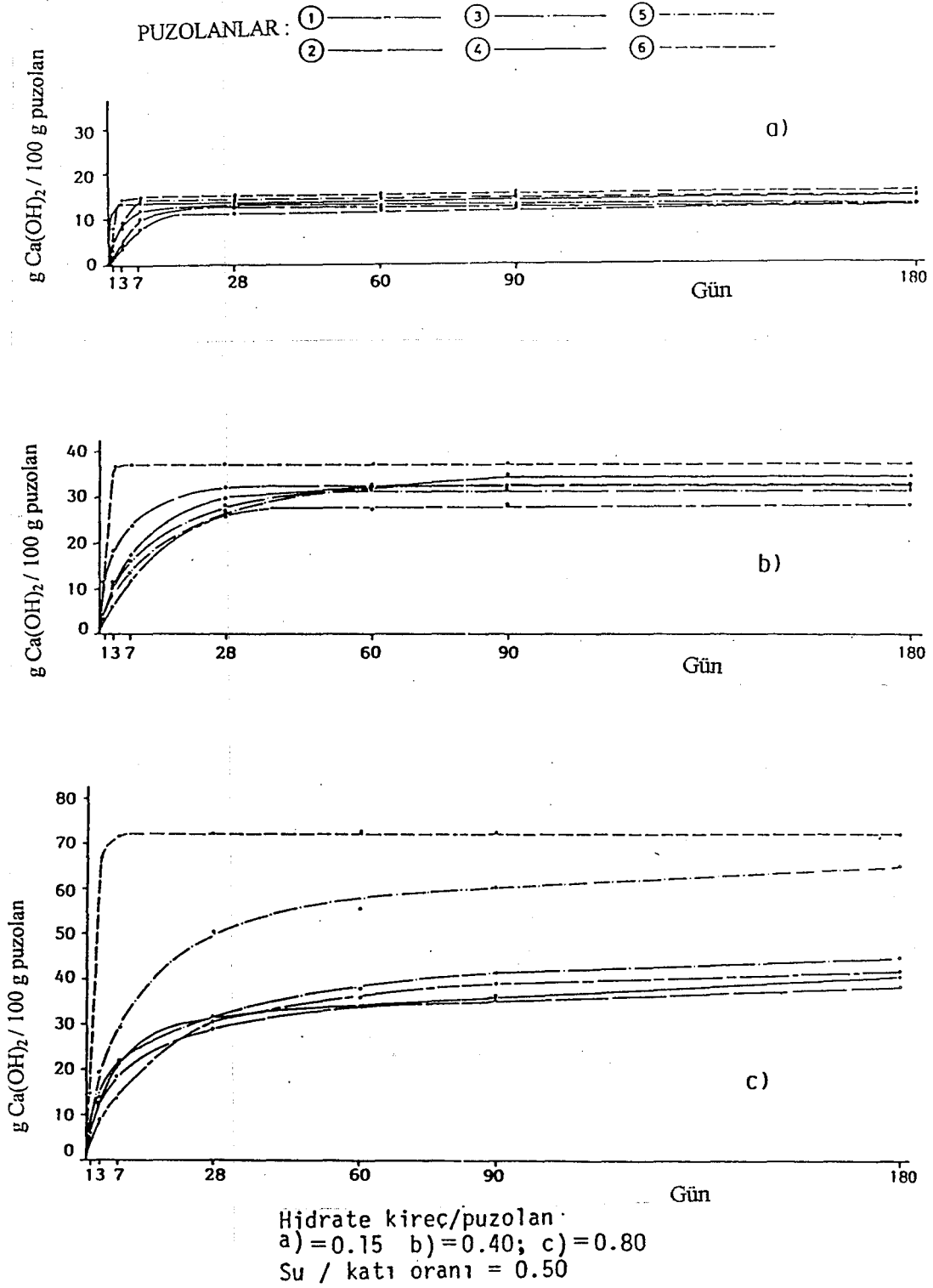
Bu gerçek, puzolanların, yalnızca tersimi (descriptive) olmayan ve her çeşit maddeye uygulanabilecek değerlendirme metodları veren, gerçekçi bir biçimde sınıflandırılmasını aşırı derecede güçleştirir.

Basit ve olabildiğince standart bir şema oluşturmak için, bütün puzolanlar ortak temel özellik ve karakteristikleri tanımlanarak anlatılabilirler.

Puzolanik aktiviteyle bir takım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle sulu ortamda reaksiyona girme ve sertleşme kapasitesi kastedildiği bilinmektedir. Gerçek puzolanik aktiviteden sözdebilmek için bu iki ögenin aynı anda oluşmalarının gerekliliği vurgulanmalıdır (16).

4.4.1. Kireç Puzolan Reaksiyonu

Puzolanların tipik özelliği, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmeleridir. Şekil 4.2'de, giderek artan miktarlarda kalsiyum hidroksitle yumuşatılmış 6 değişik puzolan örneğinde sabit bir zamanda erişilen kalsiyum oksit miktarının görüldüğü üç eğri grubu verilmiştir.



Şekil 4.2. 6 Değişik puzolanın sabit zamanda eriştiği kalsiyum hidroksit miktarı (16)

Şekil, sabit bir puzolan için kalsiyum hidroksit miktarının zamana, Ca(OH)_2 /puzolan'ın başlangıç oranına ve puzolanın yapısına bağlı olduğunu gösterir. Zaman içinde birleşmiş ve birleşmemiş kireç arasında bir denge olduğundan puzolanlar, herhangi bir durumda, bütün kireci emmezler.

Eldeki kalsiyum hidroksit miktarı arttıkça, emme eğrileri ayrılır ve puzolanların yapısının kireçle birleşme hızı ve kapasitesi üzerindeki etkisi daha açık bir biçimde görülür. Şekil 4.2-c, 6 nolu puzolanın diğerlerinden çok daha fazla reaktiviteye sahip olduğunu gösterir. Diğerleri 180 gün sonra bile hala artan emme eğrileri verdikleri halde bu puzolan yedi gün sonunda kireç miktarını pratikte sabitleştirdiği için çok yüksek bir reaksiyon hızına sahiptir.

Puzolanik aktiviteyi belirleyen ya da buna önemli ölçüde katkıda bulunan faktörlerin arasında önemli olanları şunlardır ;

Kimyasal bileşim : Bütün suni ve doğal puzolanlar, hem alüminyum oksit hem de demir oksit üzerinde net bir silika varlığı ile asidik bir bileşime sahiptirler.

Termodinamik kararsızlık : Kimyasal sistemlerin kararsızlığı, bu sistemlerde gerçekleşen reaksiyonların bir sonucudur.

Puzolanların camı yapısının kristalleşmiş fazlara göre çok daha reaktif olduğu bulunmuştur. Bu iddianın, kristalimsi zeolitik minerallerin gösterdiği dikkate değer puzolanik aktivite ile geliştiği görülebilir, fakat bu halde, özel koşullar altında oluşmuş bileşimler içerdiğinden bunlarında kararsız olduğu varsayılmalıdır. Puzolanın değişim işlemi normal sıcaklıklarda meydana gelen bir olay olan killenmeye dönüştüğünde puzolan kireç emme kapasitesinin hayli azaldığı hatırlanabilir. Killi ortamda, kalsiyum hidroksit maddenin orijinal yapısındaki bu puzolanik aktiviteyi karakterize eden derin değişime neden olmaz.

Özgül yüzey alanı : Puzolanik aktivite, bu maddelerin yüksek özgül yüzeyleriyle ilişkilidir. Bu değerleri tam olarak hesaplamak için, endüstriyel çimentoların $0,5 \text{ m}^2/\text{g}'ı$ nadiren aştıkları hatırlanmalıdır.

Puzolanların ısısal işlenmesi, başlıca kaolinit ve montmorillonit gruplarından kil mineralleri içeren puzolanlar için bir yarar sağlamaz. Eğer ısı belli değerleri aşarsa, muhtemelen camı fazların kristalleşmelerinden dolayı, puzolan kalitesinde düşmeye yol açar. Isıtma sırasında birleşme suyunun kaybı ise genellikle herhangi bir etkide bulunmaz (16).

4.4.2. Kireç-Puzolan Reaksiyonunun Mekanizması

Kireç-puzolan reaksiyonunun mekanizmasını açıklamak için, iki varsayımda bulunulur. İlki, doğal puzolanlarda alkali bakımından zengin zeolit bileşimleri bulunduğu gerçeğinden hareketle, yumuşatma suyundaki Ca^{++} iyonları ile zeolitlerdeki alkali iyonlarının değişimini puzolansız bir aktivite kabul etmektedir.

Ne var ki, bu varsayımın açıklayamadığı bir takım gerçekler vardır. İlk olarak, puzolanda kireç miktarında artış, alkalilerde ise kayıp görülmesine karşın, sabitleşen kireç miktarı kaybolan alkalilerin miktarından çok daha fazladır. Buna ek olarak, yer değiştirme sadece belli miktarlarda olduğundan zeolitlerin tipik özelliği olan değişimde kristal kafesi aynı kalırken, puzolanlarda başlangıçta var olan fazların derin bir dönüşüme uğradığı görülür.

Son olarak zeolitik aktivite alkali içeriğinin çok düşük olduğu silika zengin kayalar, yanmış killer ve özellikle silis dumanlarının gösterdiği puzolanik aktiviteyi açıklamaz.

İkinci varsayımda, ilkinin tersine, puzolan, kireç ve su arasında orijinal bileşimlerin yok olması ve yenilerinin oluşmasıyla, gerçek bir kimyasal reaksiyon olduğu kabul edilir. Bu varsayım, çok sayıda deney ve herşeyden önce, puzolan - kireç reaksiyonunda ortaya çıkan ürünlerin portland çimentosunun hidratasyonunda ortaya çıkanlarla aynı olmaları gerçeği tarafından desteklenir. $4\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-13\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-6\text{H}_2\text{O}$ alüminatları ve jips varlığında işlerken, yavaşça monosülfata dönüşen $3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{CaSO}_4-32\text{H}_2\text{O}$ etrengit, bu ürünler arasındadır. Son olarak, silika açısından jel C-S-H ve hidratlı gehlenit (kalsine edilmiş kaolinden) bulunmuştur.

Yapılan son deneyler, puzolanlardaki zeolitik bileşimlerin rolünü ve önemini ortaya çıkarmıştır. Zeolitler ve zeolitik tüf, sulandırılmış kalsiyum hidroksit çözeltileri ile temas ettirildiğinde hemen hemen kaybolan alkali iyonlarına eşit olan kalsiyum iyonlarını emme ve değiştirme miktarlarında normal bir kapasite gösterirler. Bunun yerine temas ettikleri çözelti CaO 'e doymuş olursa, zeoliti yapı bozulup, silika ve alüminyum oksidi, hidratlı çimento pastalarında bulunan hidratlı bileşimlerin aynılarını vermek üzere, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerler. Bazı araştırmacılara göre, zeolitize maddeler, kalsiyum hidroksite karşı camsı puzolanlardan daha reaktiftir (16).

4.4.3. Puzolanik Aktivitenin Değerlendirilmesi

Bir puzolanı değerlendirmek ve kullanmak için, onun puzolanik aktivitesini belirlemek esastır. Bu problem, önerilen bir çok metoda karşın, pek çözülmüş sayılmaz; çünkü, bütün puzolan tiplerine uygulanabilir olmasının yanısıra, maddenin kullanım karakteristikleriyle, hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir olan genel bir test metodu, hala yoktur.

Fakat bu durum, şaşırtıcı değildir; çünkü, puzolanik aktivite bir çok faktöre bağlıdır. Prensip olarak, bir maddenin puzolanik aktivitesini değerlendirmek için verilen metodlar kimyasal, fiziksel ve mekanik olmak üzere üçe ayrılabilir.

En yaygın olarak kullanılan kimyasal metodlar, Vicat'a kadar eskiye dayanan bir prosedüre, hidratlı kireç veya portland çimentosuyla karıştırılan puzolanın sabitleştirdiği kireç miktarını belirlemeye dayanırlar.

Test sonuçları, maddenin yapı ve inceliğine, kireç-puzolan oranına ve sıcaklığa bağlıdır.

Diğer metodlarda, reaksiyonu hızlandırmak için, çimento-puzolan veya kireç hidroksit-puzolan süspansiyonları kaynama noktasına getirilmelerine karşın, kireç-puzolan reaksiyonuna dayanırlar.

Metodun birinde, 24 saat süren bir işlemle, portland çimentosunun hidralizinin, kirecinin etkisiyle eriyen silika ve alüminyum oksit belirlenir. Bir başka metodda, bir puzolan - kalsiyum hidroksit süspansiyonu bir saat kaynatılarak ve bu işlem başında ve sonunda görülen serbest kireç miktarlarını karşılaştırılıp, maddenin puzolanik aktivitesi hızlı bir biçimde değerlendirilir.

Puzolanik aktivitenin bir diğer ölçümü, son olarak, puzolanların kireçle reaksiyonunda eriyen silis ve alüminyum oksit metodlarından elde edilmektedir. Florentin metodu, analitik belirleme için kullanılır.

Uçucu küllerin puzolanik kalitesi, puzolan-kalsiyum karbonat karışımından ve aynı karışımın 1000 °C'de bir saat kalsine edilmiş halinden HCl'de çözünmeyen miktarlarını karşılaştırarak değerlendirilebilir.

Puzolanların aktiviteleri, fiziksel metodlarla da değerlendirilebilir. Bunlardan kalorimetrik ve kimyasal bir metodda, puzolanın nitrik-floridrik karışım içinde erimesi

sırasında ve bir saatlik aşındırma sonunda çözünmeyen kalıntının erimesiyle açığa çıkan ısıya bakılarak puzolanı değerlendirir.

Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri, puzolan içeren çimento pastalarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit-emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir.

Puzolanik aktiviteyi değerlendirme metodlarının üçüncü grubu, puzolan-kireç ve puzolan-çimento harçlarının mekanik sağlamlığını ölçmeye dayanır. Kireç daha sabit bir karakteristiğe sahip olduğundan, puzolan-kireç harcı, çok daha iyi değerlendirilip testin standartlaşmasını sağlar. Öte yandan, puzolan-çimento harcı, klinker-puzolan birleşiminin doğrudan değerlendirilmesini olası kılar.

Birleşen kalsiyum hidroksit ve mekanik sağlamlık arasında bir ilişki olmaması, puzolanları değerlendirmek için bizi daha uzun süren mekanik metodları kullanmaya zorluyormuş gibi görünebilir. Aslında bu metodlar, belli puzolan maddelerinin incelenmesinin yalnızca son aşamasında gerekmektedir. Zira, araştırma, ilk aşamalarda gayet iyi bir şekilde daha hızlı olan kimyasal metodlarla götürülüp, uygulama ve standartlar açısından sağlamlık düzeylerini belirlemek gerektiğinde mekanik etodlarla sonuçlandırılabilir (16).

5. PUZOLAN İÇEREN ÇİMENTOLAR

5.1. Puzolan İçeren Çimentoların Orjini

Harçlar, doğal puzolan betonları ve kireç, son yüzyılın sonlarına kadar kullanılmış, kimyasal tesirlere, özellikle deniz suyu tesirlerine karşı koyabilen malzemelere başvurmak gerekli olmuştur. Puzolanik harçların ve betonların kullanımı ve önemi, başarılı bir uygulanabilirlik, hızlı sertleşme ve mekanik dayanım gelişimine sahip portland çimentosunun popülerliğinin artması sonucu düşme göstermiştir. Portland çimentosunun puzolanlı kireç karışımına ilave edilmesiyle dayanım önemli ölçüde geliştiği halde, bu düşme kısa sürmüştür.

Neticede, puzolanlar için gerekli olan kalsiyum oksit içeriğinin, kalsiyum silikatların hidratasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit ile fazlasıyla karşılandığı göz önüne alınarak, puzolanik çimentolar (puzolan ve portland çimento karışımı) hazırlanmıştır.

İyi puzolanlara sahip ülkelerde, çimentolar, portland çimentolarıyla mukayese edildiğinde kullanımlarının başta bunların artırılmış dayanıklılığı olmak üzere birçok nedenlerden dolayı hızlı bir şekilde yayıldığı görülür. Bu karakteristiklerin, çoğunlukla da, çimentolardan yapılmış, denizle ilgili yapılar, su kuvvetiyle işleyen ve yeraltı yapılarında 80 yılı aşkın bir süredir uygulanıyor olmalarıyla doğrulanmış ve geçerliliği teyit edilmiştir.

Isı gelişiminin düşüklüğüyle bağlantılı olarak, puzolanik çimentolar geniş kütleli beton kalıplarında büyük ölçüde kullanılmıştır. Son yıllarda, Birleşik Devletler'de, puzolanik çimentoların, alkali-agrega reaksiyonunun sebep olduğu genleşmeyi önlemek üzere kullanılabileceği bulunmuştur.

Eğer puzolanın miktarı kalsiyum silikatların hidratasyonu esnasında oluşmuş kirecin tümünü sabit tutmaya yeterli ise, puzolanik çimentolar elde edilir. Şayet yeterli değil ise, puzolanlı çimentolar elde edilir. Puzolanik çimentolar alışlagelmiş karakteristiklerinden dolayı puzolanlı çimentolara nazaran daha çok üretilir.

Günümüzde, İtalya'da, hala puzolanik çimentolar kullanılıp uygulanmaktadır. Ayrıca, portland çimentoları ile karşılaştırıldıklarında ilk sertleşme hızının düşük

olmasından doğan durumların dışında herhangi bir sınırlama olmaksızın inşaatlarda kullanılmaktadırlar.

Doğal puzolanın bulunmadığı bölgelerde çimento çalışmalarında İtalya'daki gibi uçucu kül kullanılmaktadır (16).

5.2. Puzolan İçeren Çimentoların Bileşimi ve Tanımlanmaları

Puzolanlı çimentoların ;

- 1) puzolanlık testi,
- 2) dayanım gereksinimleri

ni karşılamaları şarttır.

Standartlaşmaya gidilirken, çimentoların kalsiyum silikatlar tarafından serbest bırakılan kalsiyum oksidin tümünü tutmak için yeterli miktarda puzolan içermesi iken, sonraları kullanılan puzolanın iyi kalitede (aktif) olmasının garanti edilmesini gerektirir. Aksi halde mekanik dayanım düşecektir. Puzolanlı çimentolar genel olarak mekanik gereksinimleri karşılamalıdır. Zira ihtiva ettikleri puzolanın reaktivitesini ölçmek ve doğruluğunu ispat etmek için bir test yoktur.

Karakteristik özellikleri bilhassa dayanıklılığı garanti ettiği için, puzolanik çimentoların incelenmesiyle ortaya çıkan yüksek sertlik değerinin pek de fazla bir dezavantajı yoktur.

Puzolanlı çimentoların uygunluğunun 15 ülkede doğruluğu kabul edilmiştir. Puzolan veya uçucu külün kabul edilebilir en yüksek miktarı % 20'den % 40'a kadardır. Standardların çoğu doğal ve suni puzolanlar arasında bir farklılık göstermez iken, diğerleri muhtemelen hazırda başka standart malzeme olmadığından sadece tek bir tip malzemeyi dikkate alır (16).

5.3. Puzolan İçeren Çimento Pastalarındaki Reaksiyonlar

Puzolanik tepkimeler, nemli ortamlarda puzolanik malzemeler ile Ca(OH)_2 arasında, oluşan ve tepkime sonucunda portland çimentosu hidrasyon ürünlerine benzeyen, hidrolik bağlayıcı nitelikte ürünler verebilen tepkimelerdir.

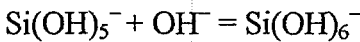
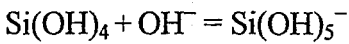
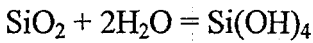
Puzolanik malzemelerle tepkimeye girecek kireç, ya doğrudan sönmüş kireç (kireç + puzolan karışımı) ya da portland çimentosu hidratasyonu süresince ortaya çıkan Ca(OH)_2 (portlandit) olabilir.

Puzolanik malzemeler ise SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği yüksek, kristalin yapıları genellikle bozuk olan silikatlardır (21).

5.3.1. Tepkime Mekanizması

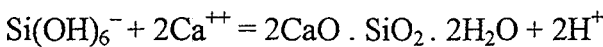
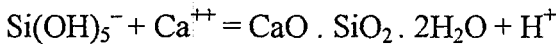
Kristal yapısı bozuk silikatlar pH'ı yüksek alkalın ortamlarda OH^- iyonlarının etkisi ile çözünebilirler (22). Kristal yapısının bozukluk derecesinin artması ile doğru orantılı olarak çözünürlük de artar. Doygun Ca(OH)_2 çözeltisinin pH'ı da 13.5-13.9 civarında olup (23) bu tür silikatların çözünmesine olanak sağlayabilecek bir alkali ortamıdır.

Portland çimentosu veya kirecin su ile tepkimesi sonucu ortaya çıkan OH^- iyonlarının ortamdaki puzolanik malzemenin yüzeyinde soğrulması ile çözünme işlemi başlar. Bunun sonucu olarak silikatın yüzeyindeki silisyum-hidroksil bileşiğinin koordinasyon sayısı yükselir, alttaki oksijen atomu ile olan bağı zayıflar ve yüzeyde silisik asit oluşur :

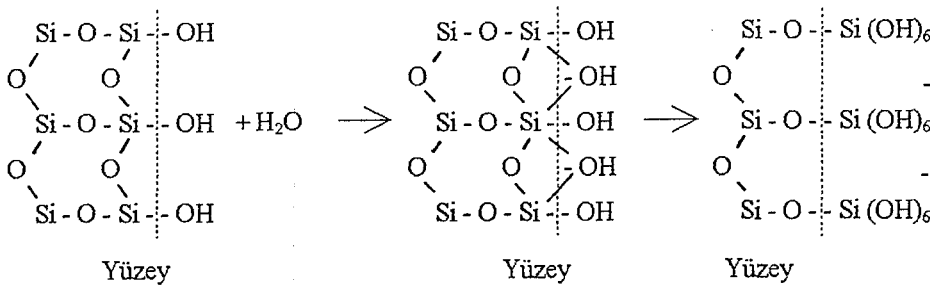


pH'ı 11'den yüksek olan çözeltelerde ortamda daha çok Si(OH)_6^- bulunur (24).

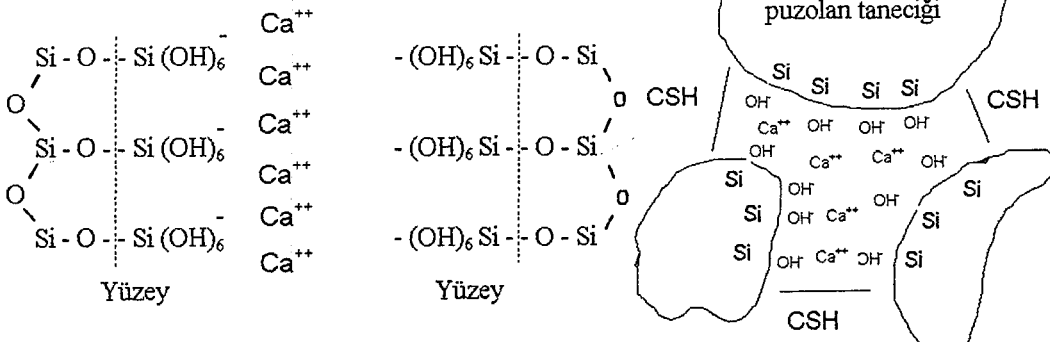
Yüzeydeki silis atomunun bağlarının zayıflaması ile oluşan Si(OH)_5^- ve Si(OH)_6^- 'ların negatif yükleri Ca^{++} , K^+ ve Na^+ iyonları ile nötrale edilebilir. Ca^{++} iyonu diğerlerinden daha büyük bir kuvvetle yüzeyde soğrulduğu için (25) önce Ca^{++} oluşan negatif yükleri nötralleştirir. Negatif yüklerin bir kısmı da diğer alkali iyonlar (K^+ , Na^+) tarafından nötralleştirilir. Ca^{++} 'un bir H^+ ile yer değiştirmesi sonucu kalsiyum silikatlar oluşur:



Şekil 5.1'de bu tepkimeler şematik olarak gösterilmiştir :



Yüzeysel çözünme



Taneciklerin yüzeylerinde CSH oluşturarak Ca^{++} iyonları ile birbirlerine bağlanmaları.

Şekil 5.1. Puzolanik tepkimelerin şematik gösterimi (21)

Bu tepkimeler sürerken, silikat, çözeltideki silis konsantrasyonu doygunluğa erişinceye kadar, çözünmeye devam etmek isteyecektir. Ancak puzolanın yüzeyinde oluşan CSH, OH^- iyonlarının geçişini engelleyerek çözünmeyi yavaşlatacak ve durduracaktır. Bu nedenle, bir kireç çözeltisindeki, Ca^{++} konsantrasyonu yükseldikçe, çözeltinin çözünmüş silika konsantrasyonunda azalma görülür (26,27). Eğer silikatın çözünme sürecinde ortamda yeterli miktarda Ca^{++} bulunmaz ise veya silikatın çözünme hızı CSH kristallenme hızından yüksek olur ise, ki bu da ortamda alkali iyon konsantrasyonunun yüksek olmasını gerektirir, o zaman silikat, çözeltide doygunluğa ulaşınca kadar çözünecek ve negatif yüklerin büyük kısmının alkali iyonlarca nötrleştirilmesi sonucunda tepkime ürününün bir alkali silikat jel olduğu alkali silika tepkimesi gerçekleşecektir. Bu tepkimenin çimento ve betondaki etkileri puzolanik tepkimelerden farklıdır (28).

Puzolanik tepkimeler, sanıldığı gibi (29), silikatlı malzemenin tamamen çözünüp $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu sonucu yeni ürünlerin oluşmasından ziyade, puzolanik

malzeme taneciklerinin, yüzeysel çözünmeleri ile çözünen kısım $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girmekle yüzeylerinde oluşan CSH ile birbirlerine bağlanmaktadır.

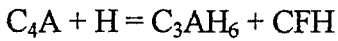
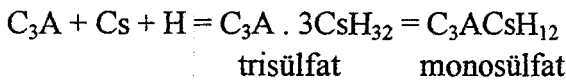
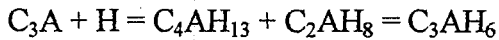
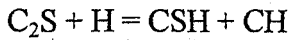
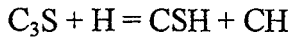
Sonrada puzolanik tepkimelerin uçucu kül-portland çimentosu (30,31), cam taneleri-portland çimentosu (32) karışımlarında puzolanik malzeme yüzeylerinde geliştiği ve bu malzemelerin tamamen çözünmediği gözlenmiştir.

Kristalin silikatların öğütölmeleri esnasında yüzeylerindeki molekül yapılarının bozunması ile puzolanik özellik kazanmaları (33,34) da bu tepkimelerin malzemelerin yüzeylerinde geliştiğinin bir işaretidir.

Tepkime sürecinde puzolanik malzemeler tamamen çözünmedikleri için bünyelerinde taşıdıkları alkalilerin çimentonun gözenek çözeltisine geçmeleri de olanaksızdır (35,36), dolayısıyla çimento gözenek çözeltisinin alkali içeriğinde bir değişikliğe yol açmazlar.

5.3.2. Tepkime Ürünleri

Yapılan bir çok araştırma (37,38,39) puzolanik tepkime sonucu oluşan silikat hidratların portland çimentosu hidratasyon ürünlerine benzer olduğunu göstermektedir. Bilindiği gibi portland çimentosu hidratasyon tepkimeleri aşağıdaki gibidir :



Portland çimentosu-puzolan ve kireç-puzolan karışımlarının, oda sıcaklığında saklanmış örneklerinde yapılan incelemelerde :

- CSH (I) olarak nitelenen jel yapıdaki tobermoritik kalsiyum silikat
- CSH (II) olarak nitelenen kristalin yapıdaki kalsiyum silikat
- C_4AH_{13} ve C_3AH_6 olarak nitelenen kalsiyum-alüminyum hidratlar saptanmıştır.

Özel koşullarda gehlenit (C_2ASH_8), etrengit veya monosülfo alüminatlar da gözlenebilir. Sıcak ortam daha fazla alüminatlı hidrat oluşumuna olanak sağlamaktadır.

Puzolanik tepkime ürünlerini inceleyen çok sayıda araştırmaların hiç birinde kalsiyum ferrit, kalsiyum alümino ferrit türü, yani demir içerikli bir hidratasyon ürünü saptanamamıştır. Belki de, çimento hidratasyon ürünleri ile puzolanik tepkime hidratasyon ürünleri arasındaki en önemli fark budur (41).

5.4. Puzolan İçeren Çimentoların özellikleri

5.4.1. Prizlenme Zamanı

Puzolanların varlığı, klinkerin (çok çabuk tepkiyen bileşen) uğradığı sulanma ve standard tutarlılığın meydana gelmesi için gerekli su miktarının fazlalılığına bağlı olarak çimentonun prizlenmesinde bir gecikmeye sebep olur.

Puzolan ihtiva eden çimentoların prizlenme zamanları ile portland çimentolarının prizlenme zamanları pek farklı değildir. Daha özel olarak, doğal puzolanlar ihtiva eden sınıf 42,5 puzolanik çimentoları, diğerleri ile karşılaştırıldığında, ilk ve son prizlenme zamanlarının az oranda geciktiği, buna karşın uçucu kül ihtiva eden sınıf 32,5 çimentoları daha önemli gecikmeler gösterdiği gözlenmiştir.

Bu veriler uçucu kül içeren çimentolar hakkında sıkça belirtilen önemli gecikmeler ile literatürde uyum göstermez. Fakat, çimento endüstrisinde kullanılan uçucu küllerin, bu tip kusurların önlenmesi amacıyla doğru bir şekilde kontrol edildiği de hatırlanmalıdır. Betona direkt olarak yerinde ilave edilen zayıf küllerin kullanımının kontrolsüzlüğü tehlikelidir. Son olarak, ilk ve son prizlenme zamanlarının çimento tipi ve sınıfı ile değiştiğine dikkat edilmelidir (16).

5.4.2. Dayanım

Puzolanların portland çimentolarına ilave edilmesi erken dönemlerde beton dayanımını düşürür. İlave edilen puzolanın tipi ve miktarı ile ilgili olarak, son dayanım saf portland çimentosununkini aşabilir. Puzolanlar belli yüzdeleri aştığında, dayanım değerlerinin hızla düştüğünü görülür. Çünkü, reaksiyonun tam anlamıyla gerçekleşmesi için kalsiyum hidroksit miktarının yetersiz olması sebebiyle, puzolanların fazlası sertleşmeye katkıda bulunamaz.

Yine portland çimentoları ile karşılaştırılırsa, sıkıştırma oranı (R_c) eşit olan puzolanik çimentoların yüksek bir eğilme dayanımı (R_f) vardır veya diğer bir deyişle, sonraki durumda R_c / R_f oranı bir öncekine göre düşüktür.

Daha ince öğütülmüş ürün dayanımı artırır, fakat etkileri 7 günde pek kayda değer olmayıp, sadece 28 gün'den sonra farkedilebilir duruma gelmeye başlar.

Eğer puzolanın spesifik yüzeyi sabit tutulup, klinkerin spesifik yüzeyi artırılırsa, dayanımda çok fazla artışlar elde edilir. Bu gerçekde, puzolanın, sertleşme prosesinde yer almasıyla relatif yavaşlığa bağlanır.

Puzolan ihtiva eden çimentoların, kireç-puzolan harçlarının benzer davranmasına karşılık gelen diğer bir özelliği, sıcaklığın dayanımların gelişimi üzerine etkisi ile ilgilidir. Bunlar, sıcaklıktaki yükselme ile portland çimentolarına nazaran, daha büyük değerlere ulaşır (16).

5.4.3. Akış

Hem doğal hemde suni puzolanlar içeren puzolanlı çimentoların akışı, portland çimentosuna benzer özellik gösterir (16).

5.4.4. Çekilme

Bilingi gibi, çimentoların içindeki puzolanlar veya uçucu küllerin yüksek miktarda CSH jel'i oluşturduğu için çekilmenin sebebidir. Puzolanlı çimentoların büzülmesi portland çimentolarıninkine nazaran daha düşüktür. Bununla beraber, farklı tipteki çimentolar arasındaki farklılıklar gözönüne alınmaz. Ayrıca, puzolanların doğasının, çelime şekilleri üzerindeki etkisi azdır (16).

5.4.5. Büzülme

Sertleşmenin hızlı olması büzülmenin çok olması demektir. Bundan dolayı, portland çimentolarına göre daha yavaş sertleşen puzolanik çimentolar genellikle (eğer vaktinden önce kuvvet tatbik edilirse) daha büyük deformasyonlar gösterir (16).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda, tek pişirim uygulanmış sırlı atık seramik karo ve portland çimentosu kullanılmıştır. Atık seramik karonun kimyasal analizi Çizelge 6.1'de, portland çimentosunun kimyasal analizi ise Çizelge 6.2'de görülmektedir.

6.2. Kullanılan Cihazlar

Atık seramik karolarının öğütülmesinde ve çimento numunelerinin hazırlanmasında bilyalı kare prizma değirmen kullanılmıştır. Son öğütmeler HERZOG manuel değirmende gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin kimyasal analizleri ARL 8680⁺ X-ışınları spektrofotometresinde yapılmıştır.

6.2.1. Normal Kıvam Tayin Cihazı

Normal kıvamın tayini için Şekil 6.1'de verilen vicat aleti, Şekil 6.2'de verilen silindir şeklindeki sonda ve Şekil 6.3'de verilen vicat halkası kullanılır.

6.2.2. Hacim Genleşme Tayin Cihazı

Çimento hacminin değişimi Şekil 6.5'de verilen prinçten yapılmış Le Chatelier aleti ile tayin edilir. Aletin silindirik halkasının et kalınlığı 0.5 mm, iç çapı 30 mm ve yüksekliği 30 mm'dir. Silindirik halka eksenine doğrultusunda yarıktır. Yarığın her iki tarafına ve silindirin tam ortasına gelmek üzere 150 mm uzunluğunda iki çubuk lehimlenmiştir.

5.4.6. Hidratasyon Isısı

Puzolan ihtiva eden çimentoların hidratasyon ısısı klinker/puzolan oranını devamlı olarak düşürür. Kürlemenin artmasıyla, bazı değerler uyumlu olduğu halde, ısıdaki azalmanın kesinlikle uygulamanın puzolanın yüzdesi ile orantılı olmadığı söylenebilir.

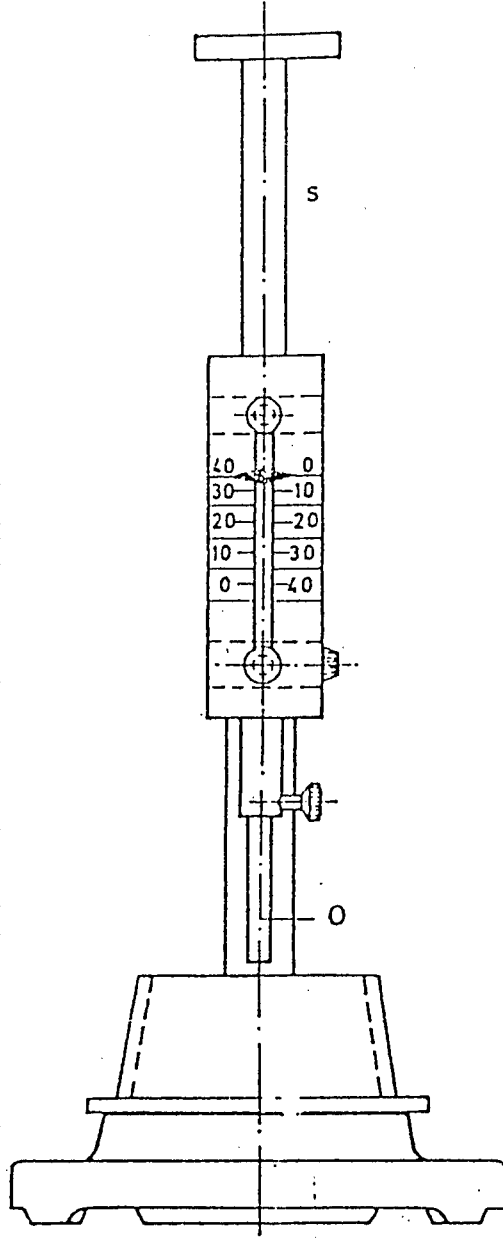
Hidratasyon ısısındaki azalma, %30-%40 puzolan içeren puzolanik çimentolarda, katkısız çimentolara göre % 20'yi aşabilir (16).

Çizelge 6.1. Seramik karo atığının kimyasal analizi

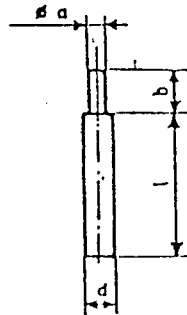
SiO ₂	63,40
Al ₂ O ₃	18,29
Fe ₂ O ₃	4,32
CaO	4,46
MgO	0,72
P ₂ O ₅	0,16
K ₂ O	2,18
Na ₂ O	0,75
SO ₃	0,10
Cl ⁻	0,005
TiO ₂	0,61
SrO ₂	0,02
Mn ₂ O ₃	0,05
KK	1,61

Çizelge 6.2. Portland çimentosunun kimyasal analizi

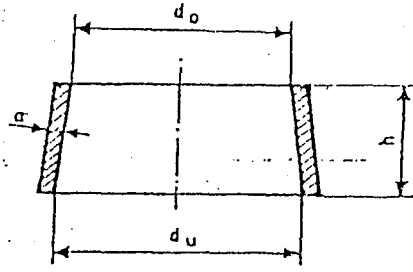
SiO ₂	20,52
Al ₂ O ₃	5,46
Fe ₂ O ₃	3,64
CaO	65,04
MgO	1,35
P ₂ O ₅	0,04
K ₂ O	0,68
Na ₂ O	0,17
SO ₃	2,18
Cl ⁻	0,002
TiO ₂	0,27
SrO ₂	0,03
Mn ₂ O ₃	0,07
KK	1,16



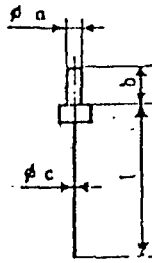
Şekil 6.1. Vicat aleti



Şekil 6.2. Silindirik Sonda

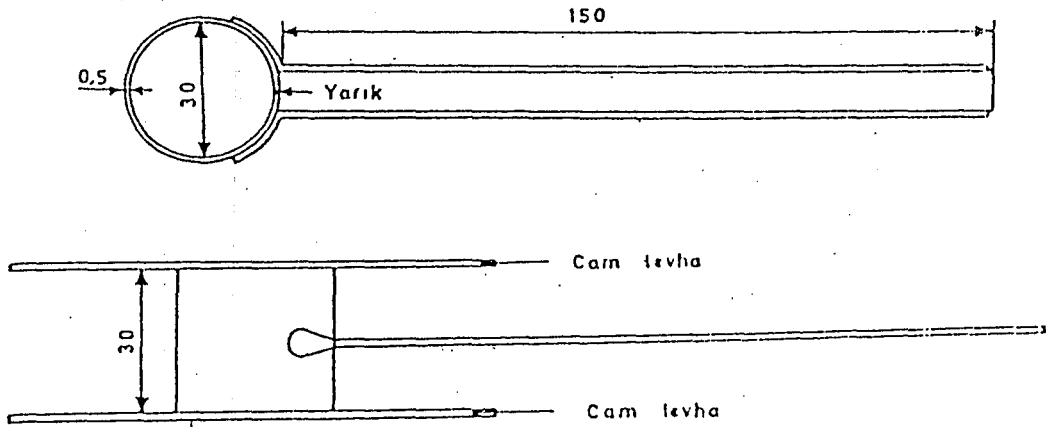


Şekil 6.3. Vicat halkası



Şekil 6.4. İğne

Ölçüler mm dir.



Şekil 6.5. Le Chatelier hacim sabitliği tayin aleti

Silindir halkanın açılabilme özelliği şöyle ayarlanır, Le Chatelier aletinin çubuklarından bir tanesi lehim yanından bir mengeneye sıkıştırılır. Diğer çubuk yatay vaziyette alta gelmelidir. Bu sırada çubuklar arasındaki uzaklık uçlarından ölçülür. Alttaki çubuğa lehim yanından 300 g'lık bir ağırlık asılır. Çubuk uçları arasındaki uzaklık yeniden ölçülür. Bu yük altında çubuklar 15-20 mm açılmış olmalıdır (43).

6.2.3. Tane Büyüklüğü Tayin Cihazı

Elek sarsma makinası ve Laser difraksiyon cihazı.

6.2.4. Yoğunluk Tayin Cihazı

Çimentoların yoğunluğu, biçimi ve boyutları Şekil 6.6'da verilen Le Chatelier balonu ile tayin edilmiştir. Sonuçları kontrol etmek amacıyla, QUANTO CHROME multi piknometre cihazı kullanılmıştır.

6.2.5. Özgül Yüzey Tayini Cihazı

Özgül yüzey alanı ölçümünde TONI TECHNIK blaine cihazı kullanılmıştır.

6.2.5.1. Blaine Aleti

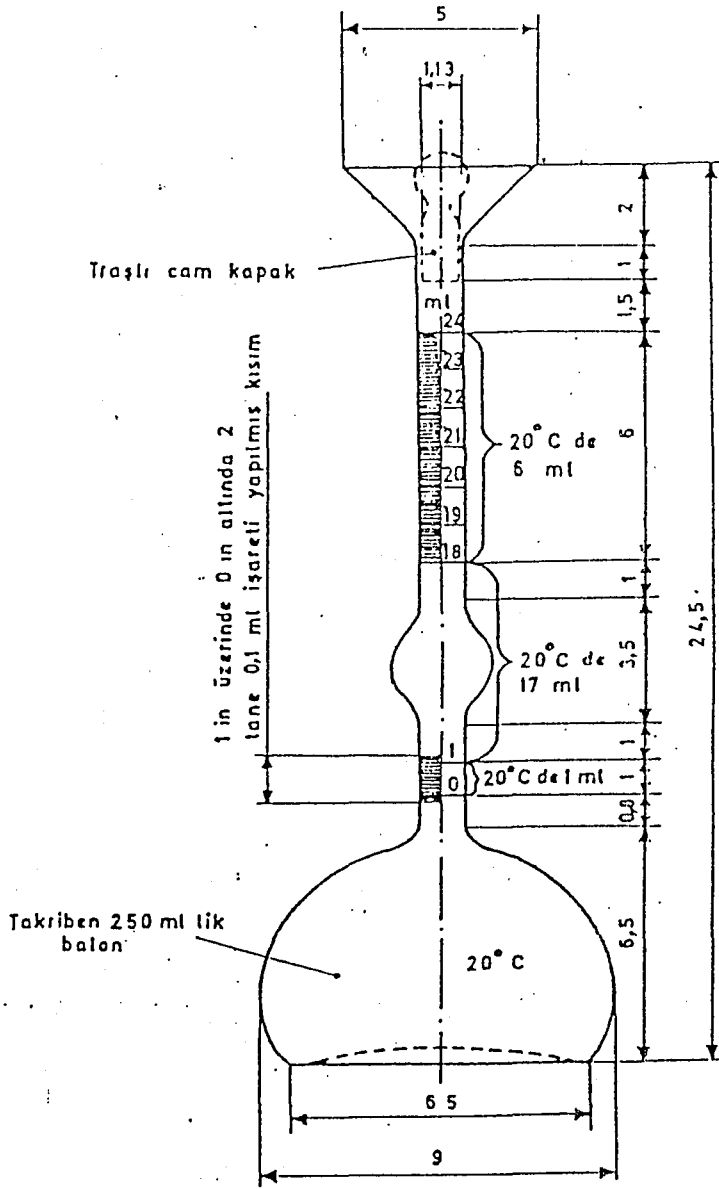
Blaine aleti, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgül yüzeyini tayin etmeye yarayan alettir. Alet numune hücresi, delikli disk, piston ve manometreden meydana gelir (Şekil 6.7) (43).

Numune hücresi : Numune hücresi, korozyona dayanıklı sert bir metalden veya camdan yapılmış olmalıdır. Hücrenin iç çapı $1.27 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$, boyu $5.0 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$ olmalı ve üst kenar halkası hücrenin eksenine dik bulunmalıdır.

Hücre, alt tarafında bulunan bir yuva vasıtasıyla manometreye hava almayacak şekilde bağlanmalıdır.

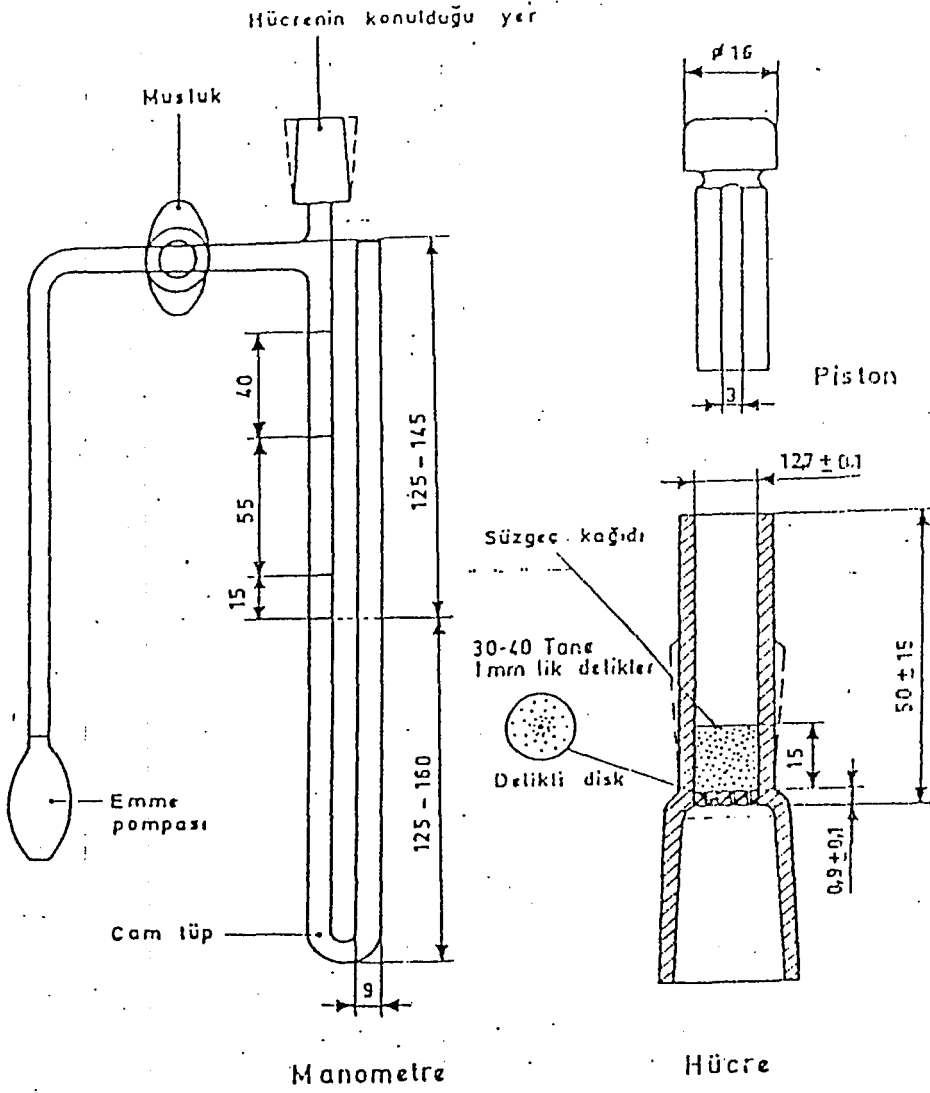
Delikli Disk : Numune hücresinin tabanına yerleştirilen delikli disk hücre içine rahatça sığabilmeli, fakat etrafında boşluk kalmamalıdır.

Ölçüler cm dir.



Şekil 6.6. Le Chatelier balonu

Ölçüler mm'dir.



Şekil 6.7. Blaine aleti

Delikli disk korozyona dayanıklı bir metal veya alaşımdan yapılmış olmalı ve üzerinde düzgün dağılmış 1 mm çapında 30-40 delik bulunmalıdır.

Delikli diskin kalınlığı $0.9 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ olmalıdır.

Piston : Piston hücre içine serbestçe girecek çapta olmamalıdır. Piston, hücre içine girdiğinde, piston alt yüzeyi ile diskin üst yüzeyi arasında $1.5 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ uzaklık kalmalıdır.

Pistonun alt tarafında, hücrenin üzerine oturacak düzgün kenarlı bir başlık bulunmalıdır.

Piston hücre içine girerken, içerde bulunan havayı boşaltmak için, piston kenarında bir yarık bulunmalıdır.

Manometre : Manometre, 9 mm iç çapında camdan yapılmış bir U borusundan meydana gelir. Kollardan biri üzerinde numune hücresinin oturacağı başlık vardır. Başlığın altında bir emme borusu ve emme borusu üzerinde U borusundan 5 cm uzaklıkta bir musluk bulunmalıdır. Emme borusu ile U borusunun tabanı arasındaki uzaklık $27.5 \text{ cm} \pm 2.5 \text{ cm}$ olmalıdır.

Numune hücresinin bulunduğu manometre borusu 125 mm-145 mm ve 125 mm -160 mm olmak üzere bir çizgiyle iki parçaya ayrılmıştır. Numune hücresinin altında bulunan birinci parça bu çizgiden itibaren yukarıya doğru 15 mm, 70 mm ve 110 mm uzaklıklarda cam üzerine işaretlenmiştir.

Manometre, kolları düşey olacak şekilde bir taşıyıcıyı destek üzerine sıkıca tutturulmuş olmalıdır.

6.2.5.1.1. Blaine Aletinin Kalibrasyonu

Alet, kullanılmadan önce, inceliği bilinen bir ayar numunesi ile kalibre edilmelidir. Kalibrasyon sonunda her alet için bir K sabiti tayin edilir.

Hücre içine konulan numunenin hacmini tayin etmek için civa kullanılır. Civanın hücre metali ile malgama yapmasını önlemek için hücre içine ince bir yağ sürülür. Delikli disk hücre dibine yerleştirilir, sonra disk üzerine iki filtre kağıdı düzgünce konulur. Hücre hiçbir hava kabarcığı kalmayacak şekilde civa ile doldurulur. Bir cam lamel ile civanın fazlası alınır. Hücre içindeki civa, darası alınmış bir kaba boşaltılır ve 0.0001 g hassasiyetle bir terazide tartılır (m_1).

2.80 g çimento ayar numunesi, madde 6.4.6.2.4'deki gibi hücre içine iki filtre kağıdı arasına yerleştirilir. Hücrenin boş kalan üst kısmı civa ile doldurulur. Yüzeydeki fazla civa bir cam lamel ile atılır. Hücre içindeki civa, darası belli bir kap içine alınarak tartılır (m_2).

Çimento numunesinin hacmi (6-2) bağıntısı ile hesaplanır.

$$V = \frac{m_1 - m_2}{D} \quad (6-2)$$

Burada;

V = Numune hacmi, (cm^3)

m_1 = Çimento yokken tartılan civa kütlesi, (g)

m_2 = Çimento varken tartılan civa kütlesi, (g)

D = Civanın deney sıcaklığındaki yoğunluğu, (g/cm^3) (Çizelge 6.5)

dir.

Çimentonun hacmi 2.80 g yeni çimento ayar numunesi ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir. İki deney arasındaki fark 0.01 cm^3 'den büyük olmamalıdır. Fark bu değerden büyük ise deney, bu şart sağlanıncaya kadar yeni numunelere uygulanmalıdır. Bu deneyler sonunda birbirinden 0.01 cm^3 'den daha fazla fark etmeyen en yakın iki değer ortalaması deney sonucu olarak alınır.

Blaine aletinin K sabiti, özgül yüzeyi ve yoğunluğu bilinen bir ayar numunesi kullanılarak tayin edilir.

Cam ampul içinde bulunan ve oda sıcaklığında olan ayar numunesi iki dakika aşağı yukarı sallanarak homojen hale getirilir. Bu süre sonunda ampul kesilir ve aşağıda açıklandığı şekilde hesaplanacak miktarda numune tartılır.

Aleti kalibre etmek için gerekli ayar numunesi kütlesi (6-3) bağıntısı ile hesap edilir.

$$m = d \cdot V \cdot (1 - e) \quad (6-3)$$

Burada;

m = Alınacak numune kütlesi, (g)

d = Numunenin yoğunluğu, (g/cm^3)

V = (6.2) bağıntısıyla bulunan numune hacmi, (cm^3)

$e = 0.5$ (Hücre içine yerleştirilmiş olan numunenin gözenekliliği)
dir.

Hücrenin dibine disk konur ve üzerine süzgeç kağıdı düzgün bir şekilde yerleştirilir. (6.3) bağıntısına göre hesap edilen ayar numunesi 0.001 gram hassasiyetli bir terazide tartılır. Bir huni vasıtası ile hücreye boşaltılır. Hücre hafif hafif masaya vurularak tabakanın düzgün bir şekilde hücre içine yerleşmesi sağlanır. Pistonla yavaşça sıkıştırılır. Üst tarafa piston yardımıyla yeni bir süzgeç kağıdı yerleştirilir. Numunenin süzgeç kağıdının üstüne çıkmaması için dikkatli olarak piston başı hücrenin üst kenarına değinceye kadar sıkıştırılır. Piston yavaşça çekilir.

Numune tabakası hazırlandıktan sonra manometredeki sıvı seviyesinin U borusunun en alt çizgide olup olmadığı kontrol edilir. Hücre dışına vazalin sürüldükten sonra manometrenin üstündeki yerine yerleştirilir. Deney sırasında numune tabakasının durumu hiçbir şekilde bozulmamalıdır.

Hücrenin ağzı sol elin baş parmağı ile hava geçirmeyecek şekilde kapatılır. Manometre borusundaki sıvı seviyesi en üst çizgiye gelinceye kadar lastik bir pompa vasıtası ile manometre içindeki hava emilir. Musluk kapatılarak sıvı bu seviyede tutulur. Sol elin baş parmağı hücrenin ağzından çekilir. Sıvı seviyesi ikinci çizgiye geldiği anda kronometre çalıştırılır. Sıvı seviyesi üçüncü çizgiye gelince kronometre durdurulur. Akış süresi (t) saniye olarak tesbit edilir. Oda sıcaklığı kaydedilir.

Akış süreleri, iki yeni ayar numunesi ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir. Üç deneyin aritmetik ortalaması akış süresi (t) olarak alınır.

K sabiti (6-4) bağıntısı ile hesaplanır;

$$K = \frac{S.d.(1-e).\sqrt{h}}{\sqrt{e^3}.\sqrt{t}} \quad (6-4)$$

Burada;

K = Alet sabiti,

S = Ayar numunesi özgül yüzeyi, (cm^2/g)

d = Ayar numunesi yoğunluğu, (g/cm^3)

e = Gözeneklilik (Çizelge 6.6), (0,5)

η = Deney sıcaklığında hava viskozitesi, (poise), (Çizelge 6.5)

t = Ölçülen akış süresi, (sn), (Çizelge 6.7)

dir.

Çizelge 6.3. Sıcaklığa bağlı olarak civa yoğunluğu ve hava viskozitesinin değişimi (43)

Sıcaklık ° C	Cıvanın Yoğunluğu D, g/cm ³	Havanın Viskozitesi η, poise	Havanın Viskozitesinin Kare Kökü, $\sqrt{\eta}$
16	13.56	0.0001788	0.01337
18	13.55	0.0001798	0.01341
20	13.55	0.0001808	0.01344
22	13.54	0.0001818	0.01348
24	13.54	0.0001828	0.01352
26	13.53	0.0001837	0.01355
28	13.53	0.0001847	0.01359
30	13.52	0.0001857	0.01362
32	13.52	0.0001867	0.01366
34	13.51	0.0001876	0.01369

6.2.5.2. Süzgeç Kağıdı

Süzgeç Kağıdı orta gözenekli (beyaz bant) olmalı ve özel bir keski aleti kullanılarak hücre çapı ile aynı çapta kesilmelidir.

6.2.5.3. Manometre Sıvısı

U borusu en alt işaret çizgisine kadar manometre sıvısı ile doldurulur. Monometre sıvısı, uçucu olmayan, su çekmeyen ve zamanla bozulmayan, düşük viskoziteli ve özgül ağırlığı küçük bir sıvı olmalıdır. Bu sıvı dibütil ftalat veya başka bir ince madeni yağ olabilir.

6.2.5.4. Kronometre

İstenildiği zaman durdurabilen bir kronometre kullanılmalıdır. Kronometre ile 0.5 saniye zaman aralığı okunabilmelidir.

Çizelge 6.4. Gözeneklilik (e) ile ($\sqrt{e^3}$) arasındaki bağıntı (43)

Gözeneklilik e	$\sqrt{e^3}$	Gözeneklilik e	$\sqrt{e^3}$
0,495	0,348	0,516	0,371
0,496	0,349	0,517	0,372
0,497	0,35	0,518	0,373
0,498	0,351	0,519	0,374
0,499	0,352	0,520	0,375
0,500	0,354	0,521	0,376
0,501	0,355	0,522	0,377
0,502	0,356	0,523	0,378
0,503	0,357	0,524	0,379
0,504	0,358	0,525	0,38
0,505	0,359	0,526	0,381
0,506	0,36	0,527	0,383
0,507	0,361	0,528	0,384
0,508	0,362	0,529	0,385
0,509	0,363	0,530	0,386
0,510	0,364	0,531	0,387
0,511	0,365	0,532	0,388
0,512	0,366	0,533	0,389
0,513	0,367	0,534	0,39
0,514	0,369	0,535	0,391
0,515	0,37		

Çizelge 6.5. Ölçülen t ile $\sqrt{t}$ arasındaki bağıntı (43)

t	$\sqrt{t}$	t	$\sqrt{t}$	t	$\sqrt{t}$	t	$\sqrt{t}$	t	$\sqrt{t}$	t	$\sqrt{t}$
26	5,10	51	7,14	76	8,72	101	10,05	151	12,29	201	14,18
26	5,15	51	7,18	76	8,75	102	10,10	152	12,33	202	14,21
27	5,20	52	7,21	77	8,77	103	10,15	153	12,37	203	14,25
27	5,24	52	7,25	77	8,80	104	10,20	154	12,41	204	14,28
28	5,29	53	7,28	78	8,83	105	10,25	155	12,45	205	14,32
28	5,34	53	7,31	78	8,86	106	10,30	156	12,49	206	14,35
29	5,39	54	7,35	79	8,89	107	10,34	157	12,53	207	14,39
29	5,43	54	7,38	79	8,92	108	10,39	158	12,57	208	14,42
30	5,48	55	7,42	80	8,94	109	10,44	159	12,61	209	14,46
30	5,52	55	7,45	80	8,97	110	10,49	160	12,65	210	14,49
31	5,57	56	7,48	81	9,00	111	10,54	161	12,69	211	14,53
31	5,61	56	7,52	81	9,03	112	10,58	162	12,73	212	14,56
32	5,66	57	7,55	82	9,06	113	10,63	163	12,77	213	14,59
32	5,70	57	7,58	82	9,08	114	10,68	164	12,81	214	14,63
33	5,74	58	7,62	83	9,11	115	10,72	165	12,85	215	14,66
33	5,79	58	7,65	83	9,14	116	10,77	166	12,88	216	14,70
34	5,83	59	7,68	84	9,17	117	10,82	167	12,92	217	14,73
34	5,87	59	7,71	84	9,19	118	10,86	168	12,96	218	14,76
35	5,92	60	7,75	85	9,22	119	10,91	169	13,00	219	14,80
35	5,96	60	7,78	85	9,25	120	10,95	170	13,04	220	14,83
36	6,00	61	7,81	86	9,27	121	11,00	171	13,08	222	14,90
36	6,04	61	7,84	86	9,30	122	11,05	172	13,11	224	14,97
37	6,08	62	7,87	87	9,33	123	11,09	173	13,15	226	15,03
37	6,12	62	7,91	87	9,35	124	11,14	174	13,19	228	15,10
38	6,16	63	7,94	88	9,38	125	11,18	175	13,23	230	15,17
38	6,20	63	7,97	88	9,41	126	11,22	176	13,27	232	15,23
39	6,24	64	8,00	89	9,43	127	11,27	177	13,30	234	15,30
39	6,28	64	8,03	89	9,46	128	11,31	178	13,34	236	15,36
40	6,32	65	8,06	90	9,49	129	11,36	179	13,38	238	15,43
40	6,36	65	8,09	90	9,51	130	11,40	180	13,42	240	15,49
41	6,40	66	8,12	91	9,54	131	11,45	181	13,45	242	15,56
41	6,44	66	8,15	91	9,57	132	11,49	182	13,49	244	15,62
42	6,48	67	8,19	92	9,59	133	11,53	183	13,53	246	15,68
42	6,52	67	8,22	92	9,62	134	11,58	184	13,56	248	15,75
43	6,56	68	8,25	93	9,64	135	11,62	185	13,60	250	15,81
43	6,60	68	8,28	93	9,67	136	11,66	186	13,64	252	15,87
44	6,63	69	8,31	94	9,70	137	11,70	187	13,67	254	15,94
44	6,67	69	8,34	94	9,72	138	11,75	188	13,71	256	16,00
45	6,71	70	8,37	95	9,75	139	11,79	189	13,75	258	16,06
45	6,75	70	8,40	95	9,77	140	11,83	190	13,78	260	16,12
46	6,78	71	8,43	96	9,80	141	11,87	191	13,82	262	16,19
46	6,82	71	8,46	96	9,82	142	11,92	192	13,86	264	16,25
47	6,86	72	8,49	97	9,85	143	11,96	193	13,89	266	16,31
47	6,89	72	8,51	97	9,87	144	12,00	194	13,93	268	16,37
48	6,93	73	8,54	98	9,90	145	12,04	195	13,96	270	16,43
48	6,96	73	8,57	98	9,92	146	12,08	196	14,00	272	16,49
49	7,00	74	8,60	99	9,95	147	12,12	197	14,04	274	16,55
49	7,04	74	8,63	99	9,97	148	12,17	198	14,07	276	16,61
50	7,07	75	8,66	100	10,00	149	12,21	199	14,11	278	16,67
50	7,11	75	8,69	100	10,02	150	12,25	200	14,14	280	16,73

6.2.6. Mukavemet Tayin Cihazları

6.2.6.1. Karıştırıcı

Boyutları Şekil 6.8'de verilen karıştırıcı başlıca şu kısımlardan meydana gelir.

Karıştırıcı Kabı : Paslanmaz çelikten yapılmıştır. Kapasitesi 4.7 litredir. Biçim ve boyutları Şekil 6.8'de verildiği gibidir.

Karıştırıcı Kanadı (Palet) : Karıştırıcı Kanadı, hem kendi eksenini etrafında hem de karıştırma kabının eksenini etrafında döner. Dönme yönleri birbirine zıt olup hızlar bir elektrik motoru ile kontrol edilir.

6.2.6.2. Kalıplar

Kalıplar en az 400 vickers sertliğinde çelikten imal edilmiş olmalıdır. Kalıplarda üç numune prizmasını aynı anda hazırlıyabilmek için üç ayrı bölme bulunmalıdır.

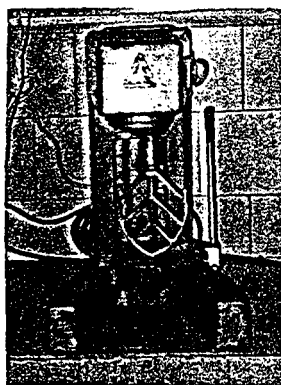
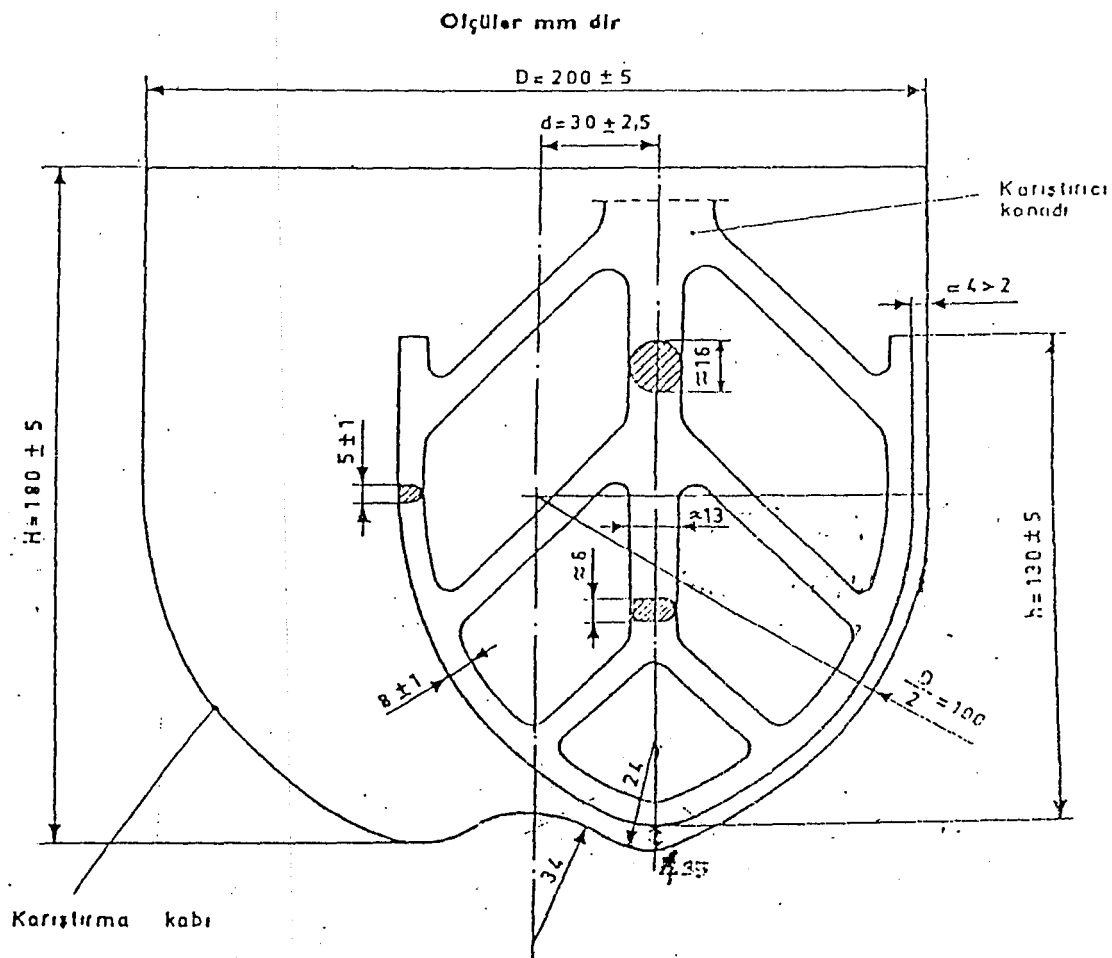
Şekil 6.9'da görülen kalıp biçim ve boyutları aşağıda verilen değerlere uygun olmalıdır (43).

Kalıp Başlığı : Kalıpların üzerine, harcın kalıplar içine doldurulmasını sağlamak üzere bir başlık takılır. Başlığın dik kenarlarının yüksekliği 20 mm - 40 mm olmalıdır.

6.2.6.3. Sarsma Aleti

Sarsma aleti (Şekil 6.10), esas itibarıyla dikdörtgen şeklinde bir sarsma tablasından ibarettir. Tabla, altında bulunan eksantrik bir disk vasıtasıyla 15 mm yüksekliğe kaldırılır ve serbest olarak düşürülür. Elektrik motoruyla hareket ettirilen disk saniyede bir devir yapar ve 60 düşme yaptıktan sonra otomatik olarak durur.

Kalıp tabla üzerine yerleştirilir ve her iki tarafta bulunan vidalarla sağlamca tesbit edilir. Tabla, kalıp, kalıp başlığı ve tutturma vidalarının toplam ağırlığı $20 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ olmalıdır.



Şekil 6.8. Rilem-Cembureau harç karıştırıcısı

6.3. Numune Hazırlama

Atık seramik karolar, fabrika sahasından rastgele alınıp, kimyasal ve fiziksel analizlerinin yapılabilmesi amacıyla, çeneli kırıcıdan geçirilerek tane boyutları yaklaşık 1 cm civarına getirilmiştir.

Kırıcıdan geçirilen numuneler, bilyalı kare prizma değirmende 55 dakika öğütülmüştür. Bu işlem sonunda elde edilen atık seramik karo numunesine aktivite testi, kimyasal ve fiziksel analizler yapılmıştır.

Seramik karo atıkları, portland çimentosuna %25, %30, %35 ve %40 ilave edilerek kare prizma değirmende 30'ar dakika öğütüldü. Bunlar sırasıyla S1, S2, S3, S4 olarak kodlanmıştır. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Elde edilen numunelerden kimyasal, fiziksel ve mekanik dayanım testleri yapıldı.

Çizelge 6.6. Atık seramik karolu çimentoların kimyasal analizleri

Bileşen	S1	S2	S3	S4
SiO ₂	32.22	33.75	35.52	37.83
Al ₂ O ₃	8.54	9.15	9.84	10.57
Fe ₂ O ₃	3.47	3.39	3.27	3.47
CaO	47.81	45.53	42.70	38.30
MgO	1.44	1.40	1.36	1.32
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.11	0.11
K ₂ O	1.05	1.07	1.16	1.25
Na ₂ O	0.19	0.22	0.25	0.32
SO ₃	1.59	1.72	1.65	1.62
Cl ⁻	0.01	0.01	0.01	0.01
TiO ₂	0.34	0.35	0.36	0.39
SrO ₂	0.02	0.03	0.02	0.03
Mn ₂ O ₃	0.07	0.07	0.07	0.07
KK	1.93	1.39	1.39	1.35

6.3.1. Puzolanik Aktivite Deney Numunesinin Hazırlanması

Trasın (puzolanın) aktivite deneyi tras ve sönmüş kireç (Ca(OH)_2) karışımı ile standart kum (TS 819) kullanılarak Çizelge 6.4'e göre hazırlanan numuneler kullanılarak yapılır (42).

Çizelge 6.7. Puzolanik aktivite deneyi için karışım miktarı (42)

Malzeme Cinsi	Alınacak Miktar (g)
Sönmüş Kireç, (Ca(OH)_2)	150
Tras	$2 \times 150 \times \frac{\text{Tras özgül ağırlığı}}{\text{Sönmüş kireç özgül ağırlığı}} = T$
Standart Kum (TS 819)	1350
Su	$0.5 (150 + T)$

6.3.2. Mukavemet Deney Numunelerinin Hazırlanması

6.3.2.1. Harcın Bileşimi

Harç, ağırlıkça 1 kısım çimento, 3 kısım TS 819'da verilen kum ve 1/2 kısım suyun karıştırılması ile hazırlanır. Su olarak içilebilen bir su kullanılır.

6.3.2.2. Harcın Hazırlanması

Üç numune için 450 g çimento, 1350 g kum ve 225 g su tartılır. Tartımlar 1 g hassasiyetli terazide yapılır. Harç, sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan bir odada hazırlanır. Çimento, kum, su, kalıplar ve karıştırıcının da aynı sıcaklıkta olması için bu oda içinde en az 12 saat bekletilmelidir. Deney yapılan odanın nispi nemi %50-%60 arasında olmalıdır.

6.3.2.3. Harcın Karıştırılması

Karıştırma kabına 225 g su konur. Üzerine 450 g çimento ilave edilir. Karıştırıcı düşük hızda 30 saniye çalıştırılır. 30 saniye sonunda 1350 g kum, karıştırma devam ederken, yavaş yavaş katılır. Kumun katılması 1 dakika sonunda bitmiş olmalıdır. 1 dakika sonunda karıştırıcı yüksek hıza ayar edilerek 30 saniye daha karıştırılır. TS 24'de belirtilen karıştırma hızları Çizelge 6.8'de görülmektedir.

Bu 90 saniyelik karıştırmadan sonra karıştırıcı durdurulur. Karıştırıcı durduktan sonra 15 saniye içinde, karıştırma kabının cidarlarına ve karıştırıcıya bulaşmış olan harç kauçuk başlı bir çubuk ile kabın içine kazınır. Kabın üzeri örtülerek 75 saniye beklenir. Bu süre sonunda karıştırıcı yüksek hızda yeniden bir dakika daha çalıştırılır. Böylece toplam olarak 4 dakika sonra harç kalıplara konulmak üzere hazır hale getirilir.

Çizelge 6.8. Karıştırma hızları (43)

Hızlar	Karıştırıcı Kanadının	
	Kendi Eksen Etrafında Dönme Hızı, devir / dak.	Kabın Eksen Etrafında Dönme Hızı, devir / dak.
Düşük Hız	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek Hız	285 ± 10	125 ± 10

6.3.2.4. Kalıpların Doldurulması

Kalıpların içi ince bir yağ ile hafifçe yağlanır. Kalıplar sarsma aletine yerleştirilir, bağlama vidaları sıkıştırılır ve kalıp başlığı takılır. Kalıpların ek yerleri dış taraftan 3 kısım parafin ve bir kısım reçine karışımı veya benzeri bir malzeme ile geçirimsiz hale getirilir.

Kalıp bölmelerinden her biri içine yaklaşık olarak 320 g harç (kalıp hacimlerinin yarısı) doldurulur. Bu işlem ölçüsü belli bir kaşık ile yapılır. Kalıplara konan harç, kaşık ile ileri geri yayılarak, harcın kalıp içinde aynı kalınlıkta dağılması sağlanır. Sarsma aleti çalıştırılır ve 60 saniye içinde 60 sarsma yapılır. Alet durduktan sonra harcın ikinci tabakası da aynı şekilde yerleştirilerek yeniden 60 sarsma yapılır.

Kalip sarsma tablasından alındıktan sonra üzerindeki kalıp başlığı çıkarılır. Harcın fazlası metal bir master ile sıyrılır. Kalıp üst yüzü aynı master ile düzlenir.

Kalıplar numaralandıktan sonra nem odasına kaldırılır.

6.3.2.5. Numunelerin Bekletilmesi Ve Bakımı

Suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek için kalıp üzerleri çelik veya lastik bir plaka ile örtülür.

Kalıplar $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve en az %90 nisbi nemli bir oda içinde bekletilir. Dökümden itibaren 20-24 saat sonra kalıplar sökülür. Kalıptan çıkan her harç prizması kontrol için tartılır ve alt yüzleri numaralanır.

Harç prizmaları daha sonra $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik içilebilir musluk suyu içinde kırılacakları güne kadar bekletilir, kırılmalar dökümden itibaren 2, 7, 28 gün sonra yapılır. Döküm esnasında üste gelen yüzeyler, bekletilme sırasında da aynı durumda kalmalıdır. Prizmalar su içinde bütün yüzeylerine su değecek şekilde ve birbirinden ayrı olarak durmalıdır. Bekletilme suyu her 14 günde bir değiştirilmelidir. Prizmalar deneyden 15 dakika kadar önce sudan çıkarılıp bir bezle kurulandıktan sonra, üç noktalı eğme mukavemetleri ölçülmek üzere kırma aletine yerleştirilir.

6.4. Yapılan Deneyler

6.4.1. Puzolanik Aktivite Deneyi

Puzolanik aktivite deneyi TS 24'de verilen Rilem Cembureau metoduna göre hazırlanmıştır. Üç adet deney numunesi hazırlamak için gerekli malzeme miktarları Çizelge 6.4'de verilmektedir. Her deney için en az üç numune hazırlanır. Kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde kapatılır ve kenarları sıkıca yapıştırılır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) bekletilir. Bu süre sonunda kalıplar sökülmeden $55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir etüv içinde 6 gün bekletilir. Numuneler kırılma işleminden 4 saat önce etüvden çıkarılır ve oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılır. Numunelerin çekme ve basınç dayanımları tayini TS 24'e göre yapılır.

saat oda sıcaklığında ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) bekletilir. Bu süre sonunda kalıplar sökülmeden $55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir etüv içinde 6 gün bekletilir. Numuneler kırılma işleminden 4 saat önce etüvden çıkarılır ve oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılır. Numunelerin çekme ve basınç dayanımları tayini TS 24'e göre yapılır.

6.4.2. Normal Kıvamın Tayini

Normal kıvam tayini deneyi, $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve nispi nemi % 50-% 60 olan bir oda içinde yapılmalıdır (43). 0.1 g hassasiyetli terazide tartılan 300 g çimento, küre kesmesi şeklindeki (25-30 cm çapında, 8-10 cm derinliğinde) bir metal kaba konur. Kabin içindeki çimentonun ortasına açılan çukura çimento kütlesinin % 25 - % 30'u kadar içilebilir musluk suyu katılır ve bir kaşıkla kabin iç yüzeyi uygun profile dikkatle karıştırılır. Çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren hamurun yoğurulmasına, 3 dakika devam edilir. Hamur bundan sonra en çok 1 dakika içinde hamur vicat halkası içine yerleştirilmelidir. Sert lastik (ebonit) veya metalden yapılmış vicat halkası yaklaşık olarak 12 cm x 12 cm'lik cam, pleksiglas veya metal bir levha üzerine konulmuştur. Çimento hamuru doldurulmadan evvel vicat halkası içi ve cam levha üstü ince bir yağ ile yağlanmıştır.

Vicat halkası içine konulan hamurun yüzeyi bir spatula ile düzeltilir ve hamur halkanın üst kenarı seviyesinde bırakılır. Vicat aletinin silindir şeklindeki sondası temizlenip kurulandıktan sonra, camın üzerine kadar indirilerek aletin göstergesi sıfıra getirilir. Sondanın ucu hazırlanmış olan vicat halkasının ortasında hamur üst yüzeyine dokunacak kadar indirilir ve serbestçe bırakılır. Sonda kendi ağırlığı ile hamurun içine girer. Deney sırasında alet her türlü sarsıntıya karşı korunmalıdır. Normal kıvamlı hamur için kullanılan su yeterli ise, sonda yarım dakika içinde cam levhaya, 5-7 mm kalıcaya kadar iner. Bu işlem muhtelif miktarlarda su ile tekrar edilerek çimento için gereken su miktarı tayin edilir.

6.4.3. Priz Başlama Ve Sona Erme Süreleri

Priz başlama süresi tayini deneyi $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve nispi nemi % 50-60 olan bir oda içinde yapılmalıdır. Deney esnasında vicat halkası her türlü sarsıntıya karşı korunmalıdır.

Şekil 6.1'de gösterilen gibi Vicat aletine Şekil 6.4'de verilen iğne takılır ve aletin üst tabakasına 27.5 g'lık bir ağırlık konur. Aletin göstergesi, iğne cam levhaya değdiği zaman sıfırı gösterecek şekilde ayarlanır.

Normal kıvamda hazırlanan çimento hamuru vicat halkasının içine yerleştirilir. Vicat iğnesi halka içindeki hamurun üst yüzeyine dokunacak kadar indirilir ve yan taraftaki vida ile sıkıştırılır. Sonra vida gevşetilerek iğnenin hamur içine serbest olarak girmesi sağlanır. Başlangıçta hamur yumuşak olduğundan vida hafifçe gevşetilmeli ve iğnenin birden düşmesi önlenmelidir.

Priz başlangıç süresinin tesbiti için iğne her 5 dakikada bir hamura batırılmalıdır. İğnenin bir defa girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için vicat halkasının konumu her batırılıştan sonra değiştirilmelidir. İğne her batırılıştan sonra bir bez veya süzgeç kağıdı ile iyice silinmelidir.

Çimento hamuruna batan iğne, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı an, priz başlamış sayılır. Çimento ile suyun karıştırıldığı andan prizin başlangıç anına kadar geçen zaman, priz başlama süresini verir.

Prizin sona erme süresinin tesbiti için, prizin başlamasından sonra iğne her 15 dakikada bir batırılmalıdır. İğnenin bir kez girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için vicat halkasının durumu her batırılıştan değiştirilmelidir. İğne her batırılıştan sonra bir bez veya süzgeç kağıdı ile iyice silinmelidir.

İğnenin, hamura en çok 1 mm girebildiği kıvam oluşuncaya kadar batırılışlara devam edilerek priz bitme süresi tayin edilir (43).

6.4.4. Hacim Genleşme Tayini

Normal kıvamda bir çimento hamur hazırlanır. Deney başlamadan önce, silindir halkanın yarık kenarları birbirine değmiş olmalıdır. Çimento hamru doldurulurken çubukların arasının açılmaması için çubuklar lehim yanından iple veya iki yuvarlak deliği bulunan bir pul ile bağlanmalıdır.

Halka, yağlanmış bir cam levha üzerine konur ve içi normal kıvamda çimento hamuru ile doldurulur. Halka üst yüzeyi, bir spatula ile kenar seviyesinde düzeltilerek üst yüzey bir cam levha ile kapatılır. Cam levha üstüne ağırlık konur ve çubuklara bağlanmış ipler veya pullar çözülür.

İpler veya pullar çözüldükten hemen sonra çubuk uçlarının açıklığı 0.1 mm hassasiyetle ölçülür (a) ve kalıplar, çubukların durumu bozulmaksızın, sıcaklığı $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan su içine dikkatle daldırılır.

Hamur kalıba konulduktan 24 saat sonra çubuk uçlarının açıklığı yeniden ölçülür (b). Kalıpların üzerindeki cam levha itina ile kaldırılarak çubuklar yukarı gelecek şekilde tekrar bir beher içindeki suya daldırılır. Bundan sonra içinde kalıpların bulunduğu su dolu beher, 30-45 dakika içinde başlayacak şekilde yavaş yavaş ısıtılır. Kaynamaya 4 saat devam edilir. Suyun buharlaşarak kaybolmasını engellemek ve kabak soğuk su katmamak için kabın üstü kaynama süresince daima kapalı kalmalıdır. 4 saat kaynama sonunda numuneler laboratuvar sıcaklığına kadar soğutulur ve çubuk uçlarının açıklığı tekrar ölçülür (c).

(b-a), (c-b), (c-a) mm cinsinden ayrı ayrı hesab edilir. (c-a) mm cinsinden toplam hacim genleşmesini verir. Her çimento için bu deney 3 kez yapılarak aritmetik ortalaması alınmalı, sonuçlar tam sayıya yuvarlatılarak belirtilmelidir (43).

6.4.5. Tane Büyüklüğü Tayini

Çimentonun tane büyüklüğü tayini deneyi, elek sarsma makinası kullanılarak yapılır.

$105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulmuş çimentodan alınan malzeme 0.1 g hassasiyetli bir terazide 100 g miktarında tartılır. Tartılan numune 200 μm göz açıklığı olan elek üstte, 90 μm göz açıklığı olan elek onun altında ve toplama tavaşı en altta olmak üzere sıralanmış elek dizisinin üzerine konur ve elek dizisinin üstü kapakla kapatılır. Çimentonun içinde topaklar varsa, bunlar eleğe konulmadan önce el ile ufalanmalıdır. Taneler eleğin içinde parmak ile ezilmemelidir.

Elek dizisi içindeki çimento 15 dakika elek sarsma makinasında elenir. Bu süre sonunda 200 μm göz açıklığı olan elek-üstü kalıntısı tartılır ve gram olarak kaydedilir (m_2).

90 μm göz açıklığı olan elek-üstü darası belli bir kaba alınarak tartılır. Kalıntı tekrar 90 μm göz açıklığı olan eleğe konur, 5 dakika daha el ile elenerek yeniden tartılır. Her iki tartım arasındaki fark 0.1 g daha az oluncaya kadar el ile elemeye devam edilir. 90 μm göz açıklığı olan elek-üstü kalıntısı tartılır ve gram olarak kaydedilir (m).

Burada 90 µm göz açıklığı olan elek-üstü toplam kalıntısı (m_1), ($m=m_1+m_2$) şeklinde bulunur.

Kalıntılar (m_1 ve m_2) sırasıyla çimentonun 90 µm ve 200 µm göz açıklığındaki elekler üzerinde kalan yüzdelerini verir.

Elek analizi 100 g çimento numunesi ile yukarıda verilen şekilde yeniden yapılır. Bu ikinci deneyde 90 µm göz açıklığı olan elektteki kalıntı birinci deneyden en çok % 1 ve 200 µm göz açıklığı olan elektteki kalıntıdan da en çok % 0.3'den farklı olup olmadığına bakılır. Fark bu değerlerden çok ise deney yeniden yapılmalıdır. Bu deneylerin sonunda bu şartları sağlayan birbirine en yakın iki değer ortalaması alınır (43).

6.4.6. Yoğunluk Tayini

Le Chatelier şişesi, içinde su bulunmayan gazyağı veya petrol ile 0 ile 1 milimetre işaretleri arasında bir noktaya kadar doldurulur. Balon, oda sıcaklığında olan ve sıcaklığı deney süresince $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den fazla değişmeyen bir su banyosu içine daldırılır.

Balon ve içindekiler banyo sıcaklığına gelinceye kadar beklenir ve hacim okunur (V_1). Bundan sonra 0.1 mg hassasiyetle tartılan 64 g (m) çimento numunesi kuru bir cam huniden yavaş yavaş ve dikkatle balon içerisine aktarılır. Numune doldurulurken balon hafifçe çalkalanarak çimentonun balonun boynuna yapışması önlenir.

Bütün çimentonun balona aktarılmasından sonra huni alınır, şişenin kapağı kapatılır ve balon kendi ekseninde döndürülerek havanın sıvı yüzeyine çıkması sağlanır. Hava kabarcıkları tamamen uzaklaştıktan sonra balon tekrar sabit sıcaklıktaki su banyosuna konularak balon ve içindekilerin banyo ile aynı sıcaklığa gelmesi için beklenir (yaklaşık 1 saat). Bu süre sonunda sıvı hacmi tekrar okunur (V_2).

İlk ve son okumalar arasındaki hacim farkı, deneyde kullanılan çimento ile yer değiştiren sıvının hacmini gösterir. Çimentonun yoğunluğu (6-1) bağıntısı ile hesaplanır.

$$d = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (6-1)$$

Burada;

d = Çimentonun yoğunluğu, (g/cm^3)

m = Çimento kütlesi, (g)

V_1 = İlk okunan hacim, (cm^3)

V_2 = Son okunan hacim, (cm^3)

dir.

Çimentonun yoğunluğu 64 g çimento numunesi ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir. İki deney arasındaki fark % 12'den büyük olmamalıdır. Fark bu değere eşit veya büyük ise deney, bu sağlanıncaya kadar yeni numunelere uygulanmalıdır. Bu deneyler sonunda birbirinden % 1'den daha fazla fark etmeyen en yakın iki değer ortalaması deney sonucu olarak alınır.

6.4.7. Özgül Yüzey Tayini

Deneyde kullanılacak çimento miktarı, gözenekliliği ayar numunesi ile aynı olacak şekilde (0,5) (6-3) bağıntısı ile hesap edilir. Numunenin hücreye yerleştirilir ve akış süresi ölçümü oda sıcaklığında yapılır. Akış süresi ve oda sıcaklığı kaydedilir.

Çimento özgül yüzeyi (6-5) eşitliği ile tam sayıya yuvarlatılarak hesap edilir;

$$S = K \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{d \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{\eta}} \quad (6-5)$$

Burada,

S = Çimento numunesinin özgül yüzeyi, (cm^2/g)

K = Alet sabiti

e = Gözeneklilik (Çizelge 6.6), (0,5)

t = Ölçülen akış süresi, (sn), (Çizelge 6.7)

d = Çimento numunesinin yoğunluğu, (g/cm^3)

η = Deney sıcaklığında hava viskozitesi, (poise), (Çizelge 6.5)

dir.

Çimento özgül yüzeyi aynı çimentodan alınan yeni bir numune ile yukarıda verilen şekilde tekrar tayin edilir. İki deney arasındaki fark % 2'den büyük olmamalıdır. Fark bu değere eşit veya büyük ise deney, bu şart sağlanıncaya kadar yeni numunelere

uygulanmalıdır. Bu deneyler sonunda birbirinden % 2'den daha fazla fark etmeyen en yakın iki değerin ortalaması deney sonucu olarak alınır.

6.4.8. Mukavemet Deneyleri (Rilem Cembureau Metodu ile)

Üç noktalı eğme ve basınç mukavemeti değerleri kgf/cm^2 (N/mm^2) olarak verilmelidir. Her bir numune yaşı için en az 3 prizma kırılmalıdır. Her mukavemet deneyinde aynı harç harmanından hazırlanmış iki prizmadan fazla kullanılmamalıdır.

6.4.8.1. Üç Noktalı Eğme Mukavemeti

Üç noktalı eğme aletinin duyarlılığı, 1000 kgf (10000 N)'den daha az yüklerde % 1, daha büyük yüklerde ise % 0.8 olmalıdır.

Üç noktalı eğme aletinin yükleme düzeni birbirinden $100 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ uzaklıkta olan 10 mm çaplı iki destek silindirinden ibarettir (Şekil 6.11). Bu iki silindirin tam orta yerinde aynı çapta üçüncü bir yükleme silindiri vardır. Bu üç silindirin eksenlerinden geçen düşey düzlemler birbirine paralel olmalı ve deney süresince paralel kalmalıdır.

Destek silindirleri ve yükleme silindiri prizma üzerinde yükün üniform şeklinde dağılımını sağlayacak ve burulma gerilimi meydana getirmeyecek şekilde kendi merkezleri etrafında aşağı yukarı ayarlanabilmelidir.

Harç prizmaları, kalıptan çıkmış yan yüzeylerinden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine destek silindirler eksenine dik gelecek şekilde destek silindirler üzerine konur. P yükü yükleyici silindirler vasıtası ile karşı yüzden dik olarak uygulanır. Yükleme hızı saniyede $5 \text{ kgf} \pm 1 \text{ kgf}$ ($50 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$) olacak şekilde ayarlanmalıdır. Üç noktalı eğme mukavemeti σ_R (6-6) bağıntısı ile tam sayıya yuvarlatılarak hesaplanır;

$$\sigma_R = 1.5 \frac{P.L}{b^3} \quad (6-6)$$

Burada;

b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (cm), (4cm)

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

L = Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (cm), (10cm)

σ_R = Üç noktalı eğme mukavemeti, (kgf/cm²), (N/mm²)
dir.

Bazı aletlerde (Şekil 6.12) üç noktalı eğme mukavemeti σ_R , kgf/cm² (N/mm²) cinsinden direkt olarak okunur.

6.4.8.2. Basınç Mukavemeti

Üç noktalı eğme tayini deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar, basınç mukavemeti deneyine kadar rutubetli bir yerde saklanmalıdır. Her yarım prizma 40 mm x 40 mm'lik kırma başlığı ile yan yüzler üzerinden kırma presinde kırılır.

Kırma presinin duyarlılığı en küçük yüklerde bile en az % 1.5 olmalıdır. Presin yük göstergesi biri 4 ton veya 5 ton diğeri 15 ton veya 25 ton olmak üzere en az iki kademeli olmalıdır.

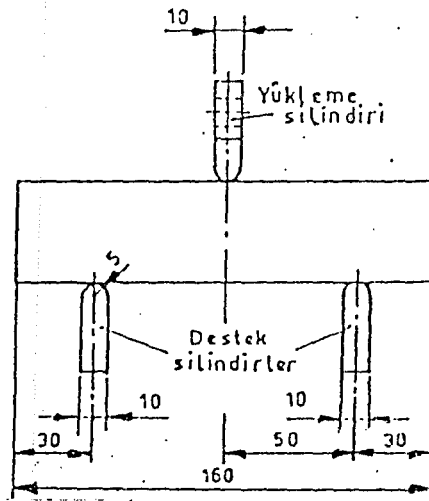
Prizmalar, presin alt ve üst tablaları arasına yerleştirilen kırma başlığı yardımı ile kırılır. Kırma başlığı, yükü herhangi bir sürtünmeye sebep olmadan prizmaya iletmelidir. Prizma kırıldıktan sonra kırma başlığı otomatik olarak eski halini almalıdır.

Yükleme, basınç saniyede 10-20 kgf/cm² (N/mm²) artacak şekilde yapılmalıdır. Hiçbir halde kırma süresi 10 saniyeden az olmamalıdır.

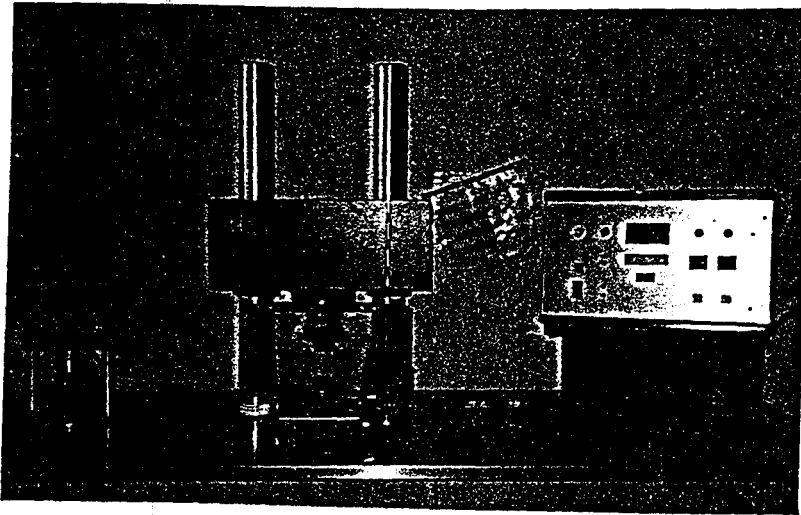
Çimentonun üç noktalı eğme ve basınç mukavemeti, 3 üç noktalı eğme ve 6 basınç deneyinde elde edilen değerlerin ayrı ayrı ortalaması alınıp tam sayıya yuvarlatılarak bulunur.

Ortalama değerden % 10'dan çok fark gösteren mukavemet değerleri hesaba katılmamalıdır. % 10'dan farklı değer sayısı üç noktalı eğme mukavemetinde birden ve basınç mukavemetinde ikiden çok olduğu takdirde deney bu şartlar sağlanıncaya kadar tekrarlanmalıdır.

Ölçüler mm'dir.



Şekil 6.11. Üç noktalı eğme mukavemeti aletinin yükleme düzeni



Şekil 6.12. Üç noktalı eğme mukavemeti ve basınç mukavemeti aletleri

6.5. Deney Sonuçları

6.5.1. Pozolanik Aktivite Deney Sonuçları

Atık seramik karonun çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin testi amacıyla yapılan deney sonuçları Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Atık seramik karonun pozolanik aktivite deney sonuçları

Kalıp No	1. Gün Mukavemet		7. Gün Mukavemet	
	Eğilme N/mm ²	Basma N/mm ²	Eğilme N/mm ²	Basma N/mm ²
1	2.8	10.4	13.0	55.4
2	3.1	10.2	12.5	54
3	2.8	10.1	--	56.2
4	--	10.1	--	53.5
5	--	10.2	--	--
6	--	10.1	--	--
Ortalama	2.9	10.2	12.8	54.8
Standart (42)	--	--	≥10	≥40

6.5.2. Priz Başlama Ve Sona Erme Sürelerinin Tayini Sonuçları

Atık seramik karoyla yapılacak olan çimento harcına katılacak uygun miktardaki suyun tesbiti amacıyla yapılan normal kıvam tayini deney sonuçları Çizelge 6.10'da, priz başlama ve sona erme süreleri tayini sonuçları Çizelge 6.11'de verilmiştir.

6.5.3. Hacim Genleşme Tayini Sonuçları

Hacim genleşme tayini sonuçları Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.10. Normal kıvamın tayini sonuçları

Numune		Normal Kıvam
Kodu	%	Su miktarı (ml)
S1	25	90+28
S2	30	90+27
S3	35	90+24
S4	40	90+22

Çizelge 6.11. Priz başlama ve sona erme süreleri tayini sonuçları

Numune		Priz	
Kodu	%	Başlama (Saat)	Sona Erme (Saat)
S0(42)	--	≥ 1.00	≥ 10.00
S1	25	2.50	3.40
S2	30	2.50	3.35
S3	35	3.00	4.00
S4	40	3.00	4.05

Çizelge 6.12. Hacim genleşme tayini sonuçları

Numune		İlk Açıklık (a), (mm)	Soğukta Açıklık (b), (mm)	Sıcakta Açıklık (c), (mm)	Toplam Açıklık (c-a), (mm)
Kodu	%				
S0 (44). (45)	--	--	--	--	≤ 10
S1	25	16	18	19	3
S2	30	14	15	15	1
S3	35	15	16	16	1
S4	40	15	15	15	0

6.5.4. Tane Büyüklüğü Tayini Deney Sonuçları

Atık seramik karonun ve çimentoların tane büyüklüğü deney sonuçları Çizelge 6.13'de verilmiştir.

Çizelge 6.13. Atık seramik karolu çimentoların tane büyüklüğü tayini sonuçları

Boyut (μm)	S1 % Elek Üstü	S2 % Elek Üstü	S3 % Elek Üstü	S4 % Elek Üstü
3	89.79	89.96	89.49	89.95
32	36.26	37.03	36.57	36.35
45	23.56	24.80	24.62	24.40
90	4.01	5.19	5.31	5.21
200	--	--	0.09	0.05

6.5.5. Yoğunluk Tayini Sonuçları

Atık seramik karonun ve çimentoların yoğunluk tayini deney sonuçları Çizelge 6.14'de verilmiştir.

Çizelge 6.14. Atık seramik karolu çimentoların yoğunluk tayini sonuçları

Numune		Yoğunluk (g/cm^3)
Kodu	%	
S1	25	3.00
S2	30	2.99
S3	35	2.98
S4	40	2.92

6.5.6. Özgöl Yüzey Tayini Sonuçları

Atık seramik karonun ve çimentoların özgöl yüzey tayini sonuçları Çizelge 6.15'de verilmiştir.

Çizelge 6.15. Atık seramik karolu çimentoların özgöl yüzey tayini sonuçları

Numune		Özgöl Yüzey (cm ² /g)
Kodu	%	
S0 (44)	--	≥ 2800
S1	25	3732
S2	30	3513
S3	35	3685
S4	40	3814

6.5.7. Mukavemet Deneyleri Sonuçları

Çimentoların üç noktalı eğme mukavemeti deney sonuçları Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çimentoların basınç mukavemeti deney sonuçları Çizelge 6.17'de verilmiştir.

Çizelge 6.16. Atık seramik karolu çimentoların üç noktalı eğme mukavemeti deney sonuçları

Numune	1.Gün (N/mm ²)	2.Gün (N/mm ²)	7.Gün (N/mm ²)	28.Gün (N/mm ²)
S1	2.6	3.4	4.8	7.6
	2.4	3.3	5.2	6.9
	--	--	4.9	6.8
Ortalama	2.5	3.4	5.0	7.1
S2	2.5	3.8	5.3	6.6
	2.7	3.7	5.3	7.1
	--	--	5.3	6.8
Ortalama	2.6	3.8	5.3	6.8
S3	1.9	2.8	4.7	6.5
	2.2	2.9	4.9	5.6
	--	--	4.7	6.2
Ortalama	2.1	2.9	4.8	6.1
S4	1.9	2.9	4.6	6.1
	2.0	2.9	4.7	6.3
	--	--	4.6	6.2
Ortalama	2.0	2.9	4.6	6.2

Çizelge 6.17. Atık seramik karolu çimentoların basınç mukavemeti deney sonuçları

Numune	1.Gün (N/mm ²)	2.Gün (N/mm ²)	7.Gün (N/mm ²)	28.Gün (N/mm ²)
S0 (45)	--	--	≥21	≥32.5
	(44) --	≥10	≥16	≥32.5
S1	9.1	15.0	27.0	36.8
	8.5	14.6	28.0	39.2
	8.5	14.2	28.5	37.5
	8.2	15.0	27.5	39.3
	--	--	28.3	38.2
	--	--	27.6	39.1
Ortalama	8.6	14.7	27.8	38.4
S2	10.4	16.0	28.4	38.2
	10.0	15.9	27.6	38.6
	10.2	15.1	27.6	37.0
	10.2	15.8	27.2	38.2
	--	--	28.0	37.8
	--	--	28.2	38.2
Ortalama	10.2	15.7	27.8	38.0
S3	7.5	12.3	28.3	32.4
	7.5	12.0	27.6	35.0
	7.0	12.0	24.8	33.0
	6.9	11.7	26.6	34.7
	--	--	27.3	33.2
	--	--	25.9	34.1
Ortalama	7.2	12.0	26.8	33.7
S4	6.8	11.5	23.0	30.2
	7.1	11.8	22.2	32.1
	6.9	11.8	21.8	32.7
	6.9	11.4	22.0	33.2
	--	--	22.2	31.8
	--	--	21.7	33.4
Ortalama	6.9	11.6	22.2	32.2

7. DENEY SONUÇLARININ YORUMU VE ÖNERİLER

Atık seramik karolar, portland çimentosuna %25, %30, %35 ve %40 oranlarında ilave edilerek çimentolar hazırlanmıştır. Hazırlanan çimento numunelerinin Türk Standartları Enstitüsü şartnamelerine uygunluğu araştırılmıştır.

Atık seramik karoların puzolanik özelliği, Türk Standartları Enstitüsü şartnamesine (42) göre araştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.18. Atık seramik karoların puzolanik özelliğinin TSE (42) şartnamesine uygunluğu

Bileşenler		TSE (42) %	Atık seramik karo %
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$		≥ 70.00	86.01
MgO		≤ 5.00	0.72
SO ₃		≤ 3.00	0.1
Kızdırma Kaybı		≤ 10.00	1.61
7 Günlük Mukavemet (N/mm ²)	Eğilme	≥ 10.00	12.8
	Basma	≥ 40.00	54.8

Atık seramik karonun SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamı standartların üzerinde çıkmıştır. Çizelge 6.18'de görüldüğü üzere atık seramik karoların puzolanik özelliğe sahip olduğu bulunmuştur.

Atık seramik karolarla yapılan S1, S2, S3 ve S4 çimentolarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü şartnamesine (42) göre uygunluğu araştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.19'da verilmiştir.

Çizelge 6.19. Atık seramik karolu çimentoların TSE şartnamesine uygunluğu

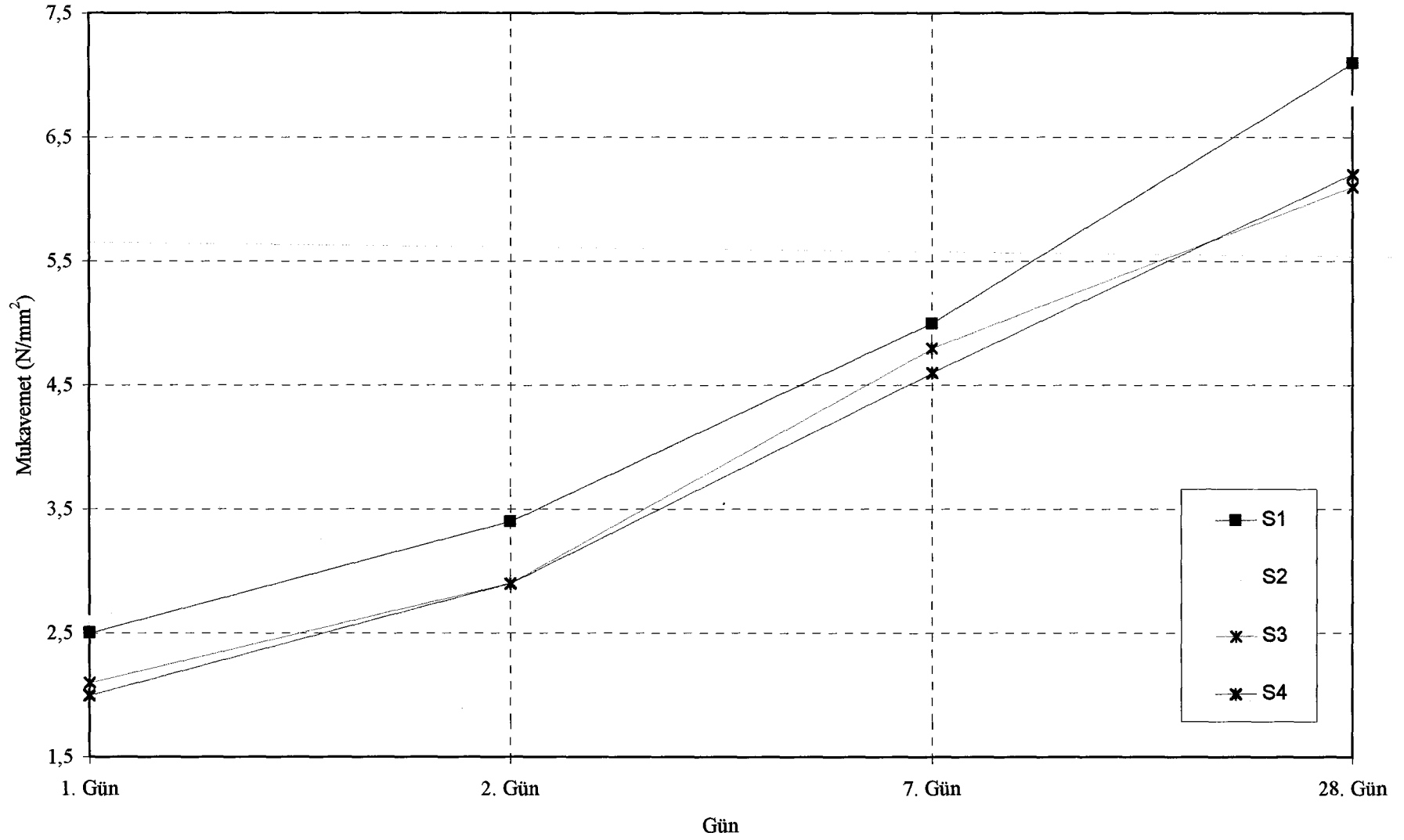
Bileşenler		S0 (44) %	S1 %	S2 %	S3 %	S4 %
MgO		≤ 3.50	1.44	1.40	1.36	1.32
SO ₃		≤ 5.00	1.59	1.72	1.65	1.62
Kızdırma Kaybı		≤ 5.00	1.93	1.39	1.39	1.35
Priz (Saat)	Başlama	≥ 1.00	2.50	2.50	3.0	3.00
	Sona Erme	≤ 10.00	3.40	3.35	4.0	4.05
Hacim Genleşmesi (mm)		≤ 10	3	1	1	0
Özgül Yüzey (cm ² /g)		≥ 2800	3732	3513	3685	3814
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	7. Gün	≥ 21.0	27.8	27.8	26.8	22.2
	28. Gün	≥ 32.5	38.4	38.0	33.7	32.2

Çizelge 6.19'da görüldüğü üzere S1, S2 ve S3 TSE şartnamesine uygun olduğu bulunmuştur. S4 nolu numune yani %40 atık seramik içeren çimento numunesi bu şartnameyi sağlamamaktadır. Bu sonuçlar Çizelge 6.13 ve Çizelge 6.14'de görülmektedir.

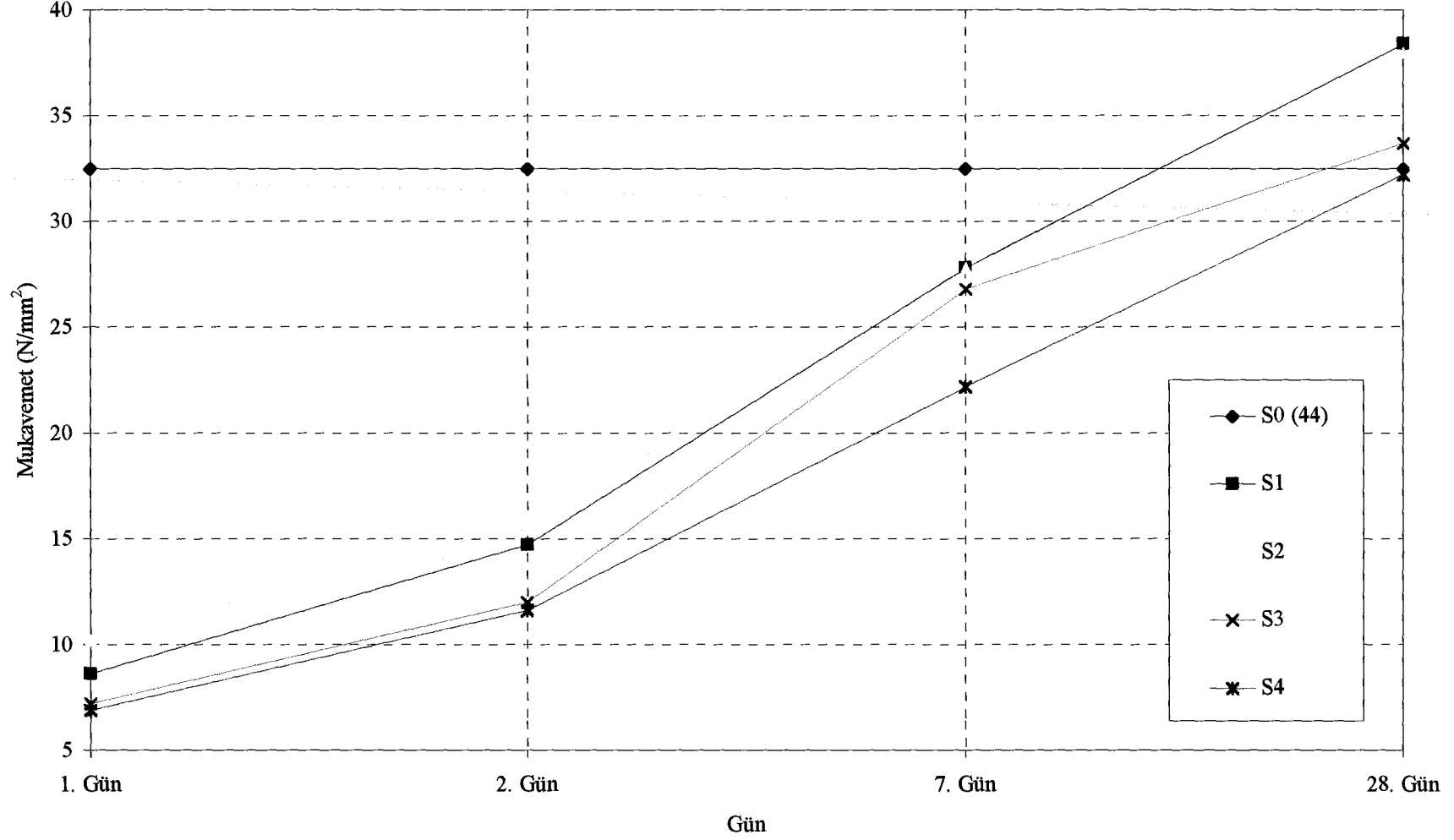
Laboratuvar ölçeğinde yapılan bu çalışmanın, bir çimento fabrikasında deneme üretimi yapılarak gerçek sonuçların bulunması gereklidir.

Bu çalışmadan çıkan önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Atık seramik karolar, çimento katkı maddesi olarak %35 oranına kadar kullanılabilir.
- Atık seramik karoların çimento endüstrisinde kullanılması halinde çimento katkı maliyetini önemli ölçüde düşürecektir.
- Seramik endüstrisinde bulunan diğer atıklarında (toprak kaynaklı), çimento endüstrisinde kullanılabilirliği araştırılmalıdır.



Şekil 6.13. Üç noktalı eğme mukavemeti grafiği



Şekil 6.14. Basınç mukavemeti grafiği

KAYNAKLAR

1. Malinowski, R. And Garfinkel, Y., "Prehistory of Concrete", Concrete International, Vol.13, No.3, pp62-68, 1991
2. Hazra, P.C and Krishnaswamy, V.S., "Natural Pozzolans in India, their Utility, Distribution and Petrography", Records of the Geological Survey of Indian, Vol.87, Part4, pp675-706, 1987.
3. Lca, F. M.,The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd Edition, Edward Arnold, 1974.
4. Bogue, R. H., The Chemistry of Portland Cement, Reinhold Publication Corp., New York, 1955
5. Spence, R. J. S., "Lime and Surkhi Manufacture in Indian", Spence, R. J. S., ed., Lime & Alternative Cements, Proceedings of One day Seminar on Small-scale Manufacturing of Cementitious Materials, Intermediate Techonology Development Group, London, pp18-21, 1974
6. Bogue, The Chemistry of Portland cement, 2d ed., chap. 1, Reinhold, 1955; Bogue and Gilkey, Cement, ECT, vol. 4, pp. 684-710, 1964; Skalny and Daugherty, Everthing You Always Wanted to Know About Portland Cement, Chemtech, 2(1), 38 (1972).
7. Çimento Teknolojisi, Çimhol A.Ş. Yayınları, Cilt 1, 1989
8. Timashev, V.V., Butt, Yu. M. Crystal formation processes in portland cement raw mixes during sintering. Proc: All Union Conf. On Chemistry and Technology of cement. Moscow, pp. 52-87 (1967).

9. Nikolaev, M.M., Butt, Yu. M., Timashev, V.V., Sintering of alite-aluminoferrite clinker. Investigation into chemistry and Technology of silicate. Moscow Chemico-Tech. Inst. Publishing, Moscow, pp 25-29 (1964)
10. Çimento-Portland Çimentoları, TS 19, 1992
11. Voloskii, S.S. Course in colloidal chemistry. Moscow, (1975).
12. Butt, Yu. M., Cichev, M.I., Timashev, V.V., Chemical Technology of Binding Material. Stroizdat Publishing, Moscow, (1980).
13. Ghosh S.N.: Advances in Cement Technology. Pergamon Press., First edition (1983).
14. POSTACIOĞLU, B., "Bağlayıcı maddeler, Agregalar, Beton" Cilt 1, 1986
15. LEA, F.M., "The Chemistry of Cement and Concrete" Newyork, 1965
16. MASSAZZA, F., "Puzolanik Çimento Semineri" Ankara, 1989
17. BLANKS, R.F., KENNEDY, H.L., "The technology of cement and concrete" Vol , USA, 1955
18. MEHTA, P.K., "Puzzolanic and cementitious by products as mineral admixtures for concrete" Fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete Vol 1 ACI SP 79, 1983 pp 1-46
19. MEHTA, P.K., "Concrete Structure, properties and materials" Prentice-Hall Inc., 1986
20. MAZLUM, F., "Prinç kabuğu külünün puzolanik özellikleri ve çimento harcının dayanıklılığına etkisi" Doktora tezi, İT.Ü., 1989

21. URHAN, S., T.Ç.M.B.,c:31, no:326, s:10, 1994
22. Urhan S.(1991) "Silisin alkali ortamda çözünmesine etki eden faktörler".Çimento Bülteni, V.28, no:286, s:15-21
23. Longuet P., Burglen L., Zelwer A.(1973) "La phase liquide de ciment hydraté". Revue des Matériaux. No:676, s:35-41
24. Deliac E. (1979) " Quelques aspects de la mise en solution de la silice en milieu alcalin à travers l'attaque d'un sable de Fontainbleau". DEA Raporu, ENSMP, Paris, s : 88
25. Carroll B., Freeman E. (1954) "The behaviour of colloidal silicate solutions as revealed by adsorption indicators". Journal of Physical Chemistry, V.58, no:4, s : 335-339
26. Haldstead P.E., Lawrence C.D. (1962) "Kinetics of reaction in the system $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ". 4.Uluslararası Çimento Kimyası Sempozyumu bildirileri, V.2, s:321-325, Washington D.C., 1960
27. Barret P., Menetrier D., Cottin B. (1977) "Study of silica-lime solution reaction". Cement and Concrete Research, V.7, no.1, s : 61-67
28. Urhan S.(1991) "Betonlarda alkali tepkimeler ve önleyici tedbirler". Çimento Bülteni, V.28, no.294, s:10-17
29. Dron R. (1978) " L'activité pouzzolanique". Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées, no.93, s : 66-69
30. Fraay A.L., Bijen J.M., de Haan Y.M., (1989) "The reaction of fly ash in concrete. A critical examination". Cement and Concrete Research, V.19, s : 235-246

31. Diamond S., Ravina D., Lovell J. (1980) "The occurrence of duplex films on fly ash surfaces". *Cement and Concrete Research*, V.10, no.2, s : 297-300
32. Barnes B.D., Diamond S., Dolch W.L. (1978) "The contact zone between portland cement paste and glass aggregate surfaces". *Cement and Concrete Research*, V.8, no.2, s : 233-244
33. Alexander K.M. (1960) "Reactivity of ultra fine powders produced from silicious rocks". *Journal of American Concrete Institute*, V.57, nno.5, s : 557-569
34. Henderson J.H., Syers J.R., Jackson M.L. (1970) "Quartz dissolution as influenced by pH and the presence of disturbed layer". *Israel Journal of Chemistry*, V.8, s : 357-372
35. Fraay A.L., Bijen J.M., de Haan Y.M., (1989) "The reaction of fly ash in concrete. A critical examination". *Cement and Concrete Research*, V.19, s : 235-246
36. Diamond S. (1975) "Calcium hydroxide, pore solutions, hardened cements". *Cement and Concrete Research*, V.5, nnnnnno.6, s : 607-616
37. Noble D.F. (1967) "Reactions and strength development in portland cement-clay mixtures". *Highway Research Records*, SP no.198, s : 39-56
38. Jambor J.J. (1963) "Relation between phase composition, overall porosity and strength of hardened lime-puzzolana pastes". *Magazine of Concrete Research*, V.5, no.45, s : 131-142
39. Sarsale R. (1981) "Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes". 7.Çimento Kimyası Sempozyumu bildirileri, 16 s., Paris, 1980
40. Malquori G. (1960) "Portland pouzzolan cement". 4. Çimento Kimyası Sempozyumu, 123 s., Washington D.C., 1960

41. ABDUL, S., MAULA and ODLER, I., "Hydration reaction in fly ash portland cements" Ibid.(ref. 20), pp- 92-101
42. Tras, TS 25, 1975
43. Çimentoların Fiziki Ve Mekanik Deney Metodları, TS 24, 1985
44. Çimento-Trash Çimento, TS 26, 1992
45. Çimento- Puzolanik, TS 12144, 1997