

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÜRETİM ALANLARINDAN ALINAN
AYNI TİP ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN
BETON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kazim AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİMDALI

ELAZIĞ, 2006

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÜRETİM ALANLARINDAN ALINAN
AYNI TİP ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN
BETON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kazim AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİMDALI

Bu tez,..... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: **Yrd. Doç. Dr. M.TUĞAL**

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak yapılan bu araştırmanın yürütülmesinde bana yol gösteren, görüş ve önerilerde bulunan sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL'a, sayın Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, sayın Seyfettin ÇİÇEK'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLOLAR LİSTESİ	VI
RESİMLER LİSTESİ	VII
SİMGELER	VIII
KISALTMALAR	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XI
ÖNSÖZ	XII
1. Giriş	1
1.1. Araştırma Materyali ve Metodu	2
1.2. İlgili Literatürün Işığında Tezin Yeri ve Önemi	2
2. Çimentonun Tarihçesi	3
3. Üretim Miktarları ve Değerleri	4
4. Üretim	6
5. Hammaddeler	7
5.1. Kalker	7
5.2. Tebeşir	10
5.3. Marn	11
5.4. Kil	11
5.5. Düzeltici Maddeler	12
5.6. Hammaddelerin İhtiva Ettiği İstenmeyen Bileşenler	13
5.6.1. Magnezyum Oksit	13
5.6.2. Kükürt	13
5.6.3. Klorür	14
5.7. Katkı Maddeleri	14
5.7.1. Kalsiyum Sülfat	14
5.8. Puzolanlar	15
5.8.1. Uçucu Küller	17
5.8.1.1. Silisli Uçucu Kül	18
5.8.1.2. Kalkersi Uçucu Kül	18
5.8.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu	18
5.8.3. Silis Dumanı	19
6. Çimento Hammadde Karışımı	19

7. Çimentonun Üretimi	23
7.1. Klinker Oluşumu ve Çimentonun Elde Edilmesi	24
8. Çimento Tipleri	31
8.1. Portland Çimentoları	31
8.1.1. Beyaz Portland Çimentosu	33
8.2. Katkılı Çimentolar	33
8.2.1. Puzolan Katkılı Çimentolar	33
8.2.2. Cüruf Katkılı Çimentolar	34
8.2.2.1. Yüksek Fırın Çimentosu	34
8.2.2.2. Traslı Çimento	35
8.2.2.3. Alüminli Çimento	35
8.3. Diğer Çimentolar	35
9. Geleceğin Çimentoları	37
9.1. Mineral Katkılı Çimentolar	37
9.2. Fillerli Çimentolar	37
9.3. Beyaz Renkli Çimentolar	38
9.4. Yüksek Dayanımlı Çimentolar	38
9.5. Kontrollü Tane Dağılımlı Çimentolar	38
9.6. Alkali-Silika Reaksiyonu Dirençli Çimentolar	38
9.7. Gecikmeli Etrenjit Oluşumuna Dayanımlı Çimentolar	38
10. Çimentoların Teknik Özellikleri	38
10.1.Özgöl Ağırlık	39
10.2. Yoğunluk	39
10.3. Donma Süresinin Bulunuşu	39
10.4. Hacim Değişmezliği	40
10.5. Tanelerin İnceliği	40
10.6. Mekanik Direnç	41
11. Türk Standartlarındaki Çimentolarla İlgili Muayene Metodları	41
11.1. Fiziksel Muayene Metodları	41
11.2. Mekanik Deneyler	42
11.3. Kimyasal Muayene Metotları	42
12. Deneysel Çalışma	43
12.1. Giriş	43
12.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları	44
12.2.1. Deney Yöntemi	48

12.2.2. Deney Sonuçları	53
12.3. Donma Çözülme Sonrası Dayanım	55
12.3.1. Giriş	55
12.3.2. Deney Yöntemleri	56
12.3.2.1. Suda Donma-Çözülme	56
12.3.2.2. Havada Donma-Çözülme	56
12.3.3. Deney Sonuçları	58
12.3.4. Sonuç ve Öneriler	73
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Çimento fabrikası üretim şeması	5
Şekil 2: Çimentonun bileşimlerinin zaman göre mukavemeti	26
Şekil 3: Silika modülüne bağlı mukavemet grafiği	30
Şekil 4: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük Eğilmede çekme dayanımının grafiksel gösterilimi.	50
Şekil 5: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük Eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması.	50
Şekil 6: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılmasının grafiksel gösterimi.	51
Şekil 7: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	52
Şekil 8: C1 çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.	58
Şekil 9: C1 çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı	59
Şekil 10 : C ₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.	60
Şekil 11: C ₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları	60
Şekil 12: C ₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.	61
Şekil 13: C ₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı	62
Şekil 14: C ₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi	63
Şekil 15: C ₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları	63
Şekil 16: C ₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.	64
Şekil 17: C ₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı	65
Şekil 18 : C ₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel karşılaştırılması.	66

Şekil 19: C ₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları	66
Şekil 20: 25 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımlarının grafiksel gösterimi.	67
Şekil 21: 25 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımı	68
Şekil 22: 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.	69
Şekil 23: 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları.	69
Şekil 24: 50 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımlarının grafiksel gösterimi.	70
Şekil 25: 50 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımı.	71
Şekil 26: 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.	72
Şekil 27: 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları	72
Şekil 28: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.	73
Şekil 29: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası basınç dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.	74
Şekil 30: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplamda donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.	74
Şekil 31: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplamda donma çözülme sonrası basınç dayanımı farkları.	75

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1: 1995-1999 Yılları İtibari İle Türkiye’de Çimento Üretimi	4
Tablo 2. Alümino modülü 2.0 kireç faktörü %95	30
Tablo 3. Kireç faktörü %95, silika modülü 2.0	30
Tablo 4. Türk Standartlarına Göre Bazı Çimento Dayanımları	36
Tablo 5. Bazı Ülkelerde Kullanılan Elekler	41
Tablo 6. Normal ve Çabuk Sertleşen Portland Çimentolarının Çekme ve Basınç Dayanımları	41
Tablo 7: Deneylerde Kullanılan PÇ 42,5 N ve PÇ 42,5 R Çimentolarının Özellikleri	44
Tablo 8 : Rilem Cembureau Kumunun Tanecik Büyüklüğü Dağılımı	48
Tablo 9 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı.	49
Tablo 10 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımı.	51
Tablo 11: C ₁ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımı	58
Tablo 12: C ₁ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı	59
Tablo 13: C ₂ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımları.	61
Tablo 14: C ₂ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı	62
Tablo 15: C ₃ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımı	64
Tablo 16: C ₃ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı	65
Tablo 17 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı.	67
Tablo 18: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımı.	68
Tablo 19: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun	70

50 periyotluk donma çözölme sonrası eğilmede çekme dayanımı.

Tablo 20 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun
50 periyotluk donma çözölme sonrası basınç dayanımı.

71

RESİMLER LİSTESİ

Resim 1: 4x4x16 cm Boyutlarına sahip standart prizma numuneler	46
Resim 2: Karışım makinesi	46
Resim 3: Eğilmede-çekme ve Basınç deney aleti	47

SİMGELER LİSTESİ

B	Numune Kesitinin Kenar Uzunluğu
D	Çimentonun Özgöl Ağırlığı , gr/cm ³
F _c	Uygulanan Kuvvet
Kcal	Kilokalori
KÇ	Katkılı Çimento
Kgf	Kilogram Kuvvet
KZÇ	Kompoze Çimento
L	Mesnetler Arası Mesafe
Mpa	Megapaskal
N	Newton
P	Basınç
PCC	Portland Curuflu Çimento
PÇ	Portland Çimentosu
PKÇ	Portland Kompoze Çimento
PLÇ	Portland Kalkerli Çimento
PSFÇ	Portland Silika Füme Çimento
PZÇ	Puzolanik Çimento
R _c	Basınç Dayanımı
R _f	Eğilmede Çekme Dayanımı
SM	Silikat Modülü
TÇ	Traslı Çimento
TS	Türk Standartları

KISALTMALAR

cm	Santimetre
gr	Gram
kg	Kilogram
KK	Kızdırma Kaybı
m	Metre
mm	Milimetre
max	Maksimum
vb	Ve Benzeri
%	Yüzde
μ	Mikron
°C	Sıcaklık

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Farklı Üretim Alanlarından Alınan Aynı Tip Çimentolarla Üretilen Beton Özelliklerinin Araştırılması

Kazim AYDIN

T.C

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı

2005

Bu çalışmada, farklı üç üretim bölgesinden alınan aynı tip çimentoların bazı fiziksel özellikleri ve donma çözülme yöntemi ile dayanım kayıpları ölçülmüştür. Çimento harç numuneleri kullanılarak farklı üretim bölgelerinden alınan aynı tip üç çimentonun fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Böylece üretilen çimentoların uygunluk karşılaştırmaları yapılmıştır.

Sonuçlarda üzerinde durulması gereken en önemli husus TS EN 196-1 de dayanım sınırları $42,5 \leq K(ort) \leq 62,5$ olarak belirtilmesine rağmen her üç çimentoda da üst sınır aşılmıştır. Bu olaya neden olarak gösterilecek etken çimento taneciklerinin tane boyutlarının farklılıkları olabilir. Ayrıca çimento tanelerinin kristalize yapısı ve su ile etkileşimleri de önemli bir faktördür. Bu nedenle kullanılan çimentoların mikrobiyolojik yapısındaki farklılıklarda çimentonun su ile etkileşimini değiştirecektir. Harç içerisinde çimento ile etkileşime girmeyen su donma sonucunda ve tekrarında kılcal boşluklar oluşturup sertleşmiş harcı tahrip etmektedir. Bu nedenlerden dolayı kullanılan çimentolarda değer düşüşleri sabit olmamıştır. Yukarıda bahsedilen hususlar hariç genel olarak çimento fabrikalarının son dönemde ürettikleri çimentoların, genellikle standartlara uygun ve kaliteli oldukları söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Çimento (portland), harç, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, donma-çözülme dayanımı.

ABSTRACT

Master Thesis

SEARCHING THE CONCRETE PARTICULARITIES TAKEN FROM THE DIFFERENT PRODUCTION FIELDS AND PRODUCED BY THE SAME TYPE OF CEMENTS

Kazim AYDIN

**Firat University
Graduate School of Science and Technology
Department of Construction Education**

2006

According to this study cement hard taken three different manufacturing area lost resistance of cement are measured by physical properties and freezing-resolution method this three same kind cement mortar sample are being used to compare their physical properties therefore produced cement are compared to release that which cement are suitable.

In this experiment most important part that, all of cement temple are exceed the top limit according to TS EN 196-1 resistance limit. This is caused because cement peaces dimensions could be different. The other too important factors are structure of crystallized cement pieces and interaction with water. Therefore Cement-water interaction will be changed by cement microbiological structure difference. Cement in the mortar and not interacted water create capillary space and destroy harden mortar by freezing. This event caused that decreasing cement value is not constant. Without above-mentioned event the cement is recently suitable and good quality with TSE.

Key words : Cement (portland), mortar, pressure resistance, bending-tensile resistance, freezing-resolution resistance.

ÖNSÖZ

Bu araştırmada, Ülkemizde  farklı blgede üretilen çimentoların bazı fiziksel özellikleri ve donma-zlme etkisi altında bu özelliklerde değişim miktarları araştırılmıştır. Araştırma yöntemi TS EN 196-1, TS EN 197-2 ve TS 3449'a bağlı kalarak yapılmıştır.

Araştırma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi yapılarak teknik analiz uygulanmıştır. Bu analizlerin sonucun da bazı özelliklerin farklı olmasına rağmen genel itibar ile araştırmada kullanılan çimentoların özelliklerinin uygunluk kriterlerine göre yeterli olduğu gözlemlenmiştir.

1.GİRİŞ

Ülkemiz, Avrupa' da çimento üretimi bakımından ön sıralarda yer almasına, yapı üretimi bakımından üst düzeyde teknolojiye ve bilgi birikimine sahip olmasına rağmen, uygulamada yapıların büyük çoğunluğunun denetimsiz, gelişigüzel inşa edildiği görülmektedir. Bu durum betonarme yapıların istenilen dayanım ve dayanıklılıkta olmamasının ana nedenidir. BS 7543' de yapılar sınıflandırılarak servis ömürleri verilmiştir. Bu standarda göre binalar ve kamu yapılarının servis ömrü 50 yıl, anıtsal binalar, köprüler ve önemli inşaat mühendisliği yapılarının servis ömürleri ise 100 yıldır.

Beton tasarımıandığı servis şartları altındaki işlevini uzun yıllar boyunca hasar görmeden ve yıpranmadan sürdürebilmelidir. Böyle bir betonun dayanıklı olduğu söylenir. Betonarme yapıların çeşitli bozulma süreçleri nedeniyle kısa sürede işlevselliklerini kaybetmeleri ekonomik ve teknik problem yaratmanın yanı sıra, kaynakların verimsiz kullanımına ve çevresel ve ekolojik problemlere yol açar. Uygulamada önemli olan yapının işlevini, yeterince uzun süreli olarak verimli bir şekilde yerine getirebilmesidir. Yapının uzun zaman yeterli performansta olması, başlangıçtaki kalitesine ve bakım işlemlerine bağlıdır. Tüm bu faktörler yapının ekonomik ömrünü ve işletme giderlerini etkiler. [14]

Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması durabilite bakımından önemlidir. Betonda durabilite ve geçirimlilik birbirleriyle yakından ilgili olan iki olaydır. Betonun akışkan geçirimliliği; basınçlı su geçirimliliği, kılcal yolla su emme ve buhar geçirimliliğinden oluşur. Geçirimsizlik bakımından gerekli önlemlerin alınmaması durumunda betonlarda bu üç geçirimlilik aynı yönde ve olumsuz biçimde yüksek değerlere ulaşır ve bu da durabilite bakımından sorunlara yol açar. Betonun geçirimsizliğindeki en büyük etkenler de dışa açık büyük boşluklar ve çatlaklardır. Geçirimsizlikte olumsuz etki yapan bu boşluklar ve çatlaklar betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyinde daha belirgindir [14]. Çimento hamuru ve betondaki çatlak ve boşluklar; çoğunlukla beton teknolojisi ve kurallarına uyulmaması sonucu, yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme, buharlaşma olayları veya katkı maddeleri eklenmesi gibi nedenlerle oluşur. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluklar, mikro, kapiler ve makro olarak gruplandırılabilir. Kalıcılığı büyük yönde etkileyen kılcal (kapiler) ve makro boşluklardır.

Çimento hamurunun ve betonun geçirimliliğini etkileyen en önemli parametre su/çimento oranıdır. Yapılan araştırmalar, % 93 oranında hidratasyonunu tamamlamış çimento hamurlarında su/çimento oranının 0.7' den 0.3 değerine düşmesi çimento hamurunun geçirimlilik katsayısının yaklaşık 100 kat azalmasına yol açtığını göstermiştir. Ayrıca su/çimento oranının 0.4 değerini aşmasıyla birlikte kapiler gözenekler arasındaki bağlantının kesilmemesi nedeniyle geçirimliliğin hızla arttığı görülmüştür. [10]

Çimento hidratasyonun tam olgunluğa ulaşabilmesi için gerekli süre, büyük ölçüde su/çimento oranına ve ıslak kür süresine bağlıdır. Aynı kür koşullarında saklanan çimento

hamurlarında kapiler boşlukların arasındaki bağların kesilmesi (bloke edilmesi) için gerekli süre su/çimento oranına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin su/çimento oranı 0.40 değerinde kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli olgunluk süresi 3 gün iken su/çimento oranı 0.70 değerine ulaştığında bu süre 1 yıldır.

Betonun doğal, kimyasal zararlara karşı dayanıklı olması, fizikokimyasal dış etkenler sonucu niteliklerini kaybetmemesi gerekir. Bunun için yeterli kimyasal dayanıma (dayanıklılığa) sahip olmalıdır.

Beton çeşitli zararlı etkiler altında bir takım kimyasal reaksiyonlar nedeniyle sahip olduğu mukavemeti zamanla kaybedebilir. Bu durumda yapı betonun maruz kaldığı kuvvetlere dayanamamanın bir sonucu olarak, kısmen veya tamamen yıkılır veya kullanılamaz hale gelir.

Bu hususlardan dolayı betonun ana bileşenlerinden olan çimentonun özellikleri çok önemlidir. Sağlamlık ilkesini ayakta tutabilmek açısından çimento özelliklerinin bilinmesi önem taşır, çünkü beton kalitesi çimento kalitesiyle ilişkilidir. Beton kalitesi çimento kalitesi yanında ortam şartlarına başka deyişle iklimsel yapı ve kullanımsal amaçlarına da bağlıdır. Bu da çimentonun beton yapısındaki önemi ve dolayısıyla yapının dayanıklılığı açısından önemini arttırmaktadır. Bu nedenle üretilen çimentoların gerek fiziksel gerekse kimyasal özelliklerinin yeterli olması çok önemli bir husustur. [14]

Yukarıda bahsettiğimiz hususlar ışığında bu çalışmada farklı üretim bölgelerinden alınan aynı tür çimentoların bazı fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır.

1.1. Araştırma Materyali ve Metodu

Bu tez çalışmasında öncelikle konu ile ilgili literatür taraması yapılarak gerekli bilgi, doküman ve kaynaklar sağlanmıştır. Bu amaçla tez konusu ile ilgili yerli ve yabancı kaynaklar araştırılmış ve daha sonra çalışmada kullanılacak malzemeler, çimento, 'RİLEM CEMBUREAU' kumu elde edilmiştir. Tüm bu ön çalışmalara yapıldıktan sonra laboratuvar şartlarında, Türk Standartlarına göre gerekli sistem ve düzenekler oluşturulmuş ve deneysel çalışmalara geçilmiştir. Bu tezdeki asıl amaç aynı tip çimentolarının özelliklerinin karşılaştırılması olduğundan Türk Standartlarında belirtilen özelliklere göre deney numuneleri hazırlanmış ve 28 günlük, 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası mekanik deneylere tabi tutulmuşlardır. Elde edilen deney sonuçları kontrol numuneleri ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

1.2. İlgili Literatürün Işığında Tezin Yeri ve Önemi

İlgili literatür araştırmasında çimento deneyleri, don deneyleri ve çimentoların mekanik özellikleri ile ilgili kaynaklar toplanmıştır. Bu kaynaklar çimento deney yöntemlerinden olan ve konuyu ilgilendiren fiziksel özellikler den olan mekanik direnç üzerinde yoğunlaşmıştır.

Ayrıca bu çalışma ya ışık tutması açısından beton ve beton bileşenleri açısından don deneyleri araştırılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde aşağıdaki kanılara varılmıştır:

Çimentolar, su ve standart kumla karıştırılarak harç yapılır. Kalıplara dökülür, 2-7-28 gün su havuzlarında bekletilir. Eğilme ve basınç aparatlarında numuneler kırılarak dayanımları saptanır. Her ülkenin değişik standardı vardır. Su /çimento oranı, standart kumu, harcın hazırlanma ve kalıplanma işlemleri, kalıp şekilleri farklı standartlara göre değişir. Ülkemizde yıllardan beri plastik harç metodu kullanılmaktadır. ½ Su/Çimento oranı ve 1350gr. TS EN 196-1 standart kumla harç hazırlanmakta, 40*40*160 mm ebadında prizma kalıplara dökülerek şoklama ile sıkıştırılmaktadır. Önce eğilme dayanımı saptanır, sonra kırılan parçalar üzerinde basınç dayanımı ölçülür. N/mm² olarak ifade edilir. Yeni standartlarda eğilme dayanımına yer verilmemiştir.

2.Çimentonun Tarihçesi

Çimento, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımı ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. [19]

Ülkemizin önemli sanayi ürünlerinden biri olan çimento bir hidrolik bağlayıcıdır. Üretim teknolojisi oldukça gelişmiş olmasına rağmen, çimentolarla ilgili araştırmalar detaylı bir şekilde sürdürülmektedir.

Çimentonun tarihi antik çağlara kadar uzanmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan en eski maddelerin normal ve hidrolik kireç olduğu tespit edilmiştir. Oldukça saf kireç taşı kalsine edilerek kireç elde edilmiş, sulandırılarak kumla karıştırılmış ve böylece kireç harcı elde edilmiştir. Elde edilen bu kireç harcı havadaki CO₂'i kirecin absorplaması ile sertleşmiş böylece kireç yine kireç taşı haline döndüğünden eski mekanik özelliğini kazanmıştır. Kireç taşının içinde silisyum, alüminyum ve demir oksitleri de bulunduğu kireç taşının kalsilasyonu sırasında, yeni bileşiklerin oluşumu ile elde edilen hidrolik kireç su ile karıştırıldığında sertleşebilmektedir. Böylece, hidrolik kireç, oluşan yeni bileşiklerle donma olayını gerçekleştirebilir.

Çimentonun gelişim süreci içinde en önemli aşama Portland çimentosunun üretimi olmuştur. Portland çimentosunun ilk olarak ne zaman keşfedildiğini belirlemek kolay değildir. İlk patentin 21 Ekim 1824 yılında J. ASPDIN tarafından alınmış olması nedeniyle portland çimentosunu ilk bulan kişi olarak bilinmektedir.

Portland çimentosuna verilen “Portland” adı, portland çimentosu ile aynı donmayı gösteren ve İngiltere’nin portland civarında bulunan bir çeşit yapı taşından gelmiştir. Aspidin’in patentindeki özelliklere göre ürettiği çimentonun doğal çimentodan daha üstün bir çimento

olmasına rağmen bugün ki portland çimentosu ile kıyaslamayacak kadar farklı olduğu anlaşılmaktadır.

Ülkemizde ilk çimento fabrikası İstanbul Darıca da 1911 yılında 20.000 ton/yıl kapasite ile kurulmuştur. Bu fabrika 1923 yılında daha da büyütülerek, Türkiye'nin toplam çimento üretim kapasitesi yılda 40.000 tona yükseltilmiştir.

1995 yılında ise çimento üretimi 33.143.390 tona ulaşmıştır. Ülkemizde 2000 yılı itibarı ile halen 39 adedi entegre tesis, 17 adedi öğütme-paketleme tesisi olmak üzere 56 tesis çimento üretmektedir. Sektörün toplam klinker üretim kapasitesi 33.195.898 ton 1999 yılı sonu itibaren fiili kapasite 28.021.192 ton olarak gerçekleşmiştir. 1999 yılı itibari ile çimento öğütme kapasitesi 63.217.957 ton, çimento üretimi 34.816.734 tondur. Yıllar itibari ile üretim ve tüketim trendi değerlendirildiğinde üretilen çimentonun iç talebi karşıladığı görülmekte ve 2000'li yıllarda yeni kapasiteye ihtiyaç bulunmaktadır. Deprem sonrası orta vadede beklenen çimento talebinin Marmara Bölgesinde faaliyette bulunan fabrikalarımızın kapasiteleri ile karşılanacağı gerektiği taktirde diğer bölgelerden çimento takviyesi ile dışardan çimento ithalatına gerek kalmadan ve ek kapasite artırımına ihtiyaç duyulmadan karşılanacağı beklenmektedir. [21]

3. Üretim Miktarları ve Değeri

Üretim açısından dikkate değer husus, yurdumuzda çimento üretiminin 1995-1999 döneminde % 12.14'lük bir artış göstermiş olmasıdır. Aşağıdaki tabloda bu artış gösterilmektedir [13].

Tablo 1: 1995-1999 Yılları İtibari İle Türkiye'de Çimento Üretimi [13]

Yıllar					Yıllık Artış			
1995	1996	1997	1998	1999	1996	1997	1998	1999
33.151.875	35.235.473	36.034.855	37.488.061	34.816.734	6.0	2.3	4.0	-7.2

4. Üretim

Çimento üretimi iki yöntemle yapılır.

4.1.Yaş yöntem

Su ile malzemenin öğütülmesi esasına dayanır. Fazla enerji gerektirir.

4.2.Kuru yöntem

Malzeme kuru kuru öğütülür. Enerji tasarrufu sağlar.

Çimento hammaddesi, üretim için uygun vasıflı kalker-marn ve kil-şist ocaklarında kitlelerin fiziki yapılarına bağlı olarak, araçlarla sökümden kitle atımlarına kadar değişik metotlarla istihraç edilmektedir. İstihraç edilen hammadde muhtelif kademelerden geçerek uygun parça iriliğine indirilir. Hammadde, genellikle yaş sisteminde bilyalı, kuru sistemde bilyalı ve valsli hammadde değirmenlerinde öngörülen inceliğe kadar öğütülür. Çimento üretim metot ve teknolojisinde en önemli farklılıklar fırın ünitelerinde kendini göstermektedir. elektrik enerjisi tüketiminde yaş metodun 20 kws/ton çimento mertebelerinde bir avantaj göstermesine karşın, kuru metot ısı enerjisi tüketiminde yaş metodun 1450-1650 kcal/kg klinker tüketimine 700-900 kcal/kg klinker ısı enerjisi tüketimi ile üstünlük göstermektedir. Yaş sistemde, gerekli tashihler yapıldıktan ve homojenik hale getirildikten sonra zincirli uzun fırınlara sevk edilen çamur giriş tarafındaki zincir bölgesinde rutubetini kaybeder, orta bölgede kalsine olur çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkerize olur ve soğutucuya dökülür. Bu sistem ancak hammaddenin çok rutubetli ve sedimanter marın ve kilden oluşması halinde ekonomik olabilir. Ülkemizde yaş fırınların çoğunluğu 1965-1973 yılları arasında üretim kapasitelerinin artırılması amacı ile, 1974 yılından itibaren yakıt tasarrufu sağlamak amacı ile kuru sisteme çevrilmişlerdir. Halen ülkemizde yaş sistemde küçük kapasiteli iki fırın faaliyetini sürdürmektedir. [8], [6]

Şekil 1’de tipik bir çimento fabrikasının malzeme akış diyagramı görünmektedir. Yarı kuru metot, Lepol sisteminde farin eğik bir döner tabak üzerine % 14-16 rutubetli granül hale getirilmekte, sevk edildiği hareketli ızgarada rutubetini kaybederek kısmen kalsine olmakta ve takiben kısa döner fırında önce kalsinasyon tamamlanmakta, sonrada klinkerizarizasyon gerçekleşmektedir. Bu sistemde 3000 ton/gün kapasiteye kadar ulaşılabilir. [8]

Kuru sistem sistemli çimento üretiminde ise konkasörde kırılmış hammadde, farin değirmeninde öğütülerek homojene edilir. Öğütme işlemi sırasında farin, fırından alına yanma gazları ile kurutulur. Kurutma ve ısıtma işlemleri yaş ve yarı yaş sistemden farklı olarak döner fırında yapılmamaktadır. Bu nedenle fırın boyu diğerlerine göre kısadır. Kuru sistem fırınlarda yalnızca kalsinasyon ve sinterleme işlemleri yapılmaktadır. Ön ısıtıcı ünitesinde döner fırın çıkışındaki gaz siklon kademelerinden geçerken enerjisini vererek soğur, homojene edilmiş farin ise ters istikametten geçerken enerji ile ısınır ve kısmen kalsine olur. Kademe sayısı 4 veya daha fazla olabilmektedir. Kademe sayısı arttıkça ısı tasarrufu da artar. Kuru sistem fırınların ön kalsinasyon sistemini de içermesi halinde yakıt döner fırından başka kalsinatörde de

yakılmaktadır. Kalsinatöre sekonder hava olarak soğutmadan sıcak gaz alınmaktadır.ön ısıtıcılı kuru sistem döner fırında fırına girişteki kalsinasyon derecesi en fazla % 40 iken, ön kalsinasyonlu sistemlerde bu değer % 80-90 oranına kadar ulaşmaktadır. Ön kalsinasyonlu döner fırınlarda kalsinatörde düşük kalorili kömür kullanımı sağlanabildiği gibi, ısı tüketimi düşer (% 5-10) ve fırın kapasitesi artar.

Yaş sistem fırınları, kuru sisteme tahvillerinde çok defa 1 veya 2 siklon kademeli ön ısıtıcılar tercih edilmektedir. [13], [6]

5. Hammaddeler

Ana hammaddeler Kalker, Kil, Marn olmakla beraber, ana hammaddelerdeki bazı eksikliklerin giderilmesi için demir cevheri, kuvars kumu gibi düzeltici maddelerde kullanılabilir.

5.1. Kalker

Kalker; kimyasal bileşiminde %90'a kadar kalsiyum karbonat bulunan kayalara denir. Türk Dil Kurumu kalker terimi yerine "kireç taşı" teriminin kullanılmasını kabul etmiş olup, kireç taşı terimi yalnız kireç yapmaya uygun kayaç anamı taşımaya rağmen kimyasal bileşiminde %90'a kadar kalsiyum karbonat, minerolojik bileşiminde de %90'a kadar kalsit içeren kayalar için de kireç taşı kelimesi kullanılmaktadır. [7]

Kalkerin minerolojik incelenmesinde saf halde kalsit ve çok az da aragonit kristallerinden oluştuğu görülür. Kalsit ve aragonit, kalsiyum karbonatın iki değişik kristal şekli olup, kimyasal bileşimleri teorik olarak %56 CaO ve %44 CO₂'dir. Fakat hiçbir zaman doğada teorik bileşiminde hesaplandığı gibi bulunmaz. Bugüne kadar kalsit olarak bulunan kalkerin (kalsiyum karbonat) saf hali İzlanda spatı olup, kimyasal bileşimi %55.28 CaO ve %43.73 CO₂ olarak analizlerle saptanmıştır. Kalker asitle muamele edildiğinde köpürerek erir ve CO₂ açığa çıkarır. Bu yol en kolay ve basit olarak diğer kayalardan ayırt edilmesi ve tanınmasına yarar. Kalker tamamı ile (çoğu kez) kalsit kristal ve kristalciklerinin ardarda ve yan yana dizilip sıralanmasından oluşmuştur. Bu açıdan kalsit kristallerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini aynen korumaktadır. Kalsit kristalleri hegzagonal sistemin romboedri sınıfında olup, daima bir zondaki yüzey üzerine dayanak yaparak büyümesi ile yüzey sayıları çoğalarak değişik geometrik şekil alırlar. Kalker, gevrek yapılı ve kırılgan, sertliği Mohr ölçeğine göre 3, özgül ağırlığı 2.5-2.7 gr/cm³ olup genellikle ve çok defa saf olduğu zaman beyaz renktedir. İçerisindeki ikincil derecede değişik madde ve bileşiklerin bulunması ve kirlenmesi ile değişik renk veren pigmentlerin etkisinde çeşitli renklerde olabilir. Örneğin; demir bileşikleriyle sarı-kahverengi, siyah ve yeşil, bitüm ve siyah v.s. renkler alabilir. Kalker, kalsiyum karbonat kimyasal bileşiminde ikinci bir kristal şekline sahip olan aragonit kristallerinin yan yana ve üst üste dizilmesi suretiyle de meydana gelebilir. Bu durumda; romboedrik kristal şeklinde olup,

kristaller dik eksen doğrultusunda uzayarak prizmatik şekil alırlar. Gevrek yapılı, sertliği 3.5-4 ve özgül ağırlığı da 2.85-2.95 gr/cm³ civarındadır. Aragonit halinde kalsite göre çok daha az bulunur. Değişik renklerde (beyaz, kırmızı, sarı, mavi ve kahverengi) olabildiği gibi 400⁰ C'ye kadar ısıtıldığı zaman aragonit kristal ve kristalcikleri kalsite dönüşür. Aragonit kristallerinden oluşan kalkerler, genellikle 40-60⁰ C arasındaki sıcaklıklarda bulunan kalsiyum bikarbonatlı suların yeryüzüne çıktığı yerlerde traverten ile çökerek birbirine paralel veya paralele yakın bantlar veya dolgu şeklindeki durumlarda görülür. [7]

Çimentonun ana hammaddesi olan kalker doğada, CaCO₃ ihtiva eden jeolojik formlarda bulunur. En saf yapıda olanları kalsit ve aragonit şeklinde bulunur. Kalsitin özgül ağırlığı 2.7'dir ve hegzagonal kristal yapıda, aragonitin özgül ağırlığı 2.95'tir ve rombik kristal yapıdadır. Kalsit en stabil CaCO₃ minerali olarak bilinir. Kalkerin saf olanı mermerdir. Kalkerin jeolojik yaşı fazlaştıkça sertliği artar, 1.8-3.0 Mohs sertliği arasındadır. Kalker ana minerali olan (CaCO₃) kalsiyum karbonatla beraber, sıklıkla karbonatlar ve silikatlar halinde magnezyum, alüminyum ve demir; ve kuvars formunda silis (SiO₂) ihtiva eder.

Kalkerler hangi yolla oluşurlarsa oluşsunlar, doğada bulundukları durumları ile bileşimlerinde kalsiyum karbonatın yanı sıra; magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve sülfürleri, silikat asidi (SiO₂) gibi bileşikler içerirler. Bütün bu safsızlıklar ile gerek minerolojik gerekse kimyasal bileşim açısından görülen değişiklikler yanında yapı ve dokularına ilişkin kalkerlerin gösterdikleri ayrıcalıklar niteliklerini oluşturur.

Çimento sanayim alanında hammadde veya düzenleyici (korrektör) olarak kullanılacak kalkerlerin kalitesine, içerdikleri yabancı unsurlardan oluşan safsızlıkların durumu doğrudan etkili olmaktadır. Aşağıda kalker bünyesinde bulunan bazı maddeler ve etkileri verilmiştir. [13]

5.1.1. Alümina

Kimyasal bileşimi Al₂O₃ olan unsurları oluşturur. Bunlar kalkerlerde SiO₂ (silis asidi) ile bileşik olarak kil mineralleri halinde bulunabileceği gibi feldspat, mika v.s. gibi kayaç ve minerallerin kimyasal bileşimindeki alüminyum silikat olarak bulunur. Kil minerallerinden ileri gelen alümina yüksek olduğu zaman (kil minerallerine göre) kayaç adı değişerek killi kalker, kalkerli kil ve marn adını alır. Kil minerallerinden gelen alüminanın çimentoda kullanılan kalkerler için belirli bir miktarda (%25'e kadar) yararı vardır. Fakat diğer bileşikler halinde bulunması zararlı olmaktadır. [13], [7]

5.1.2. Silis

Kimyasal bileşimi SiO₂ olup kilden başka kum, çakmak taşı (sileks), boynuz taşı (çört), opal, kalsedon, kuvars parça ve kırıntıları halinde serbest, amorf olarak bulunabileceği gibi feldspat, mika, talk, serpantin ve volkanik kayaçların bileşimine bağlı olarak da bulunabilir. Kalker oluşumu esnasında karbonat üreten organizmaların bulunduğu ortamda silis yapan

organizmaların bulunması sonucu silis miktarı yüksek kalkerler oluşur. Bunlarda serbest silis yüksek olduğundan çimento sanayisinde istenmeyen hammaddelerdir. Ayrıca kalkerlerin metazomatik olaylar sonucu siliko-kalker durumuna geçtikleri hallerde gerek eklem zonlarında gerekse stratifikasyon yüzeylerinde kuvars gibi istenmeyen silisli (SiO_2) kayaçların yer aldığı görülür. Bazı durumlarda ise (bilhassa killi kalkerlerde) diyajenez esnasında gerek kendi içinden gerekse ortamlardan gelen jel halindeki silis band halinde tabakalanmaya paralel olarak veya tespih dizilişi ve yumrular halinde çörtleri oluştururlar. Çörtler silisin amorf olduğu bir şekli olup, çimento sanayiinde kullanılan hammaddelerde kesinlikle istenmez. Kalkerlerde serbest silis asidinin bulunması gerek öğütme ve gerekse pişme esnasında sorun yaratmaktadır. [13], [5]

5.1.3. Demirli Bileşikler

Kalkerlerin; bünyelerine, oluşumuna (fasiyeslere göre) ve diyajenez esnasında veya sonradan atmosferik koşullar, metamorfizma, metazomatoz ve infiltrasyona bağlı olarak demirli bileşikler girebilir. Demir bileşikleri sülfür halinde; pirit ve markasit olarak, sülfat halinde; limonit, hematit spekülait, manyetit olarak, karbonat halinde ise siderit olarak bulunabildiği gibi bilhassa lateritik oluşum koşullarında boksitli demir olarak alüminyum oksitle birlikte olmak üzere değişik mineraller halinde bulunabilir. Demiroksitlerin bulunması belirli sınıra kadar yararlı olup bu sınır karışım yapılacak kilin içindeki demir miktarına bağlıdır. Demir sülfür, sülfat bileşikleri halinde ise yine belirli bir sınıra kadar-bu sınır klinker standartları hesabında belirlenmiştir- istenmez. [13], [7]

5.1.4. Alkaliler

Bunlar sodyum ve potasyum elementinin bileşikleri olup kalkerlerde genellikle sonradan kirlenme veya oluşum esnasında kile bağlı olarak az miktarda da olsa bulunabilir.

5.1.5. Karbonlu Maddeler

Kalker içerisinde genellikle bitüm, kömür ve diğer karbonlu bileşikler halindedir. Oluşum esnasında organizma kalıntıları olarak veya petrol oluşumunda ana kayaç niteliğindeki kalkerlerde petrol göçünden arta kalan artıklar olarak bulunabilir.

Kalkerlerin poroziteli yapısı petrol için çok iyi bir hazne kaya olduğundan bazen bitümlü ölü petrol kalıntısı olarak bulunabilir. Bu durumda çimento için zararlı sayılmaz ancak organik sülfür bileşiklerin bulunması zararlıdır. [13], [7]

5.1.6. Kükürt ve Fosfor

Kalkerlerde sülfat halinde kükürt ve fosfor (fosforit, apatit, v.s.) bulunabilir. Organizma bakiyesi olarak bulunan fosforlu bileşikler kalkerlerin oluşum fasiyeslerine bağlıdır. Daha çok stabil şelf koşullarında oluşmuş kalkerlerde fosfor bileşikleri beklenmelidir. Ayrıca oluşum

esnasında gerek temel kayaçlar ve gerekse havza çevresinde bulunan kayaçlardan dentritik malzeme beslenmesi olduğu durumlarda da fosforlu kayaçlardan parçalar içerebilir. Litoral ortamlara da oluşan bazı kalkerlerde de fosforlu bileşiklerin varlığı bilinmektedir. Kükürt ve fosfor bileşikleri çimento hammaddesi olarak kullanılacak kalkerlerde istenmeyen unsurları oluşturmaktadır. [13], [7]

5.1.7. Tuzlar

Kalkerlerin oluşumuna ilişkin olarak (Litoral ortamda veya kalker oluşumunda evaporasyon) olduğunda mutlak surette tuz bulunur.) veya sonradan suların etkisi ve infiltrasyon ile bünyesine girmiş halde klorür, florür ve bromürler bulunabilir. Sodyum klorür tuz minerali, potasyum klorür, silvin ve kalsiyum florür ise flüorit minerali halindedir. Flüor daha çok kalker çevresindeki volkanizma faaliyetlerine bağlı olarak yer alır. Çimento sanayiinde klorür ve bromürler korozif etkileri sebebi ile istenmezler. [13]

5.1.8. Magnezyum Bileşikleri

Kalkerin oluşumu ve oluşmadan sonraki başkalaşmanın etkisi ile dolomit (CaMgCO_3) ve manyezit (MgCO_3) in bulunmasından ileri gelir. Çimento yapısında istenmeyen bir unsuru teşkil eder.

5.2. Alçıtaşı

Alçı taşı, çimento sanayi alanında üretilen portland çimentolarında öğütülmeden önce klinkere %3-5 oranında ham hali ile karıştırılarak kullanılır. Burada alçı taşının rolü çimento harcında piriz süresini geciktirmektir. Alçı taşının jips olması ve mümkün olduğu kadar saf, minerolojik ve kimyasal açıdan homojen ve ucuz olması istenir. Çimento sanayi dalında kullanılacak alçı taşıdaki safsızlıkların çimentoya zararlı olmaması istenir. Alçı taşlarında genellikle görülen ve istenmeyen safsızlıklar şunlardır: [13]

1. Alçı taşının bünyesinde serbest silis asidi ve bilhassa kalsedon, opal, çört, sileks gibi maddelerin bulunmaması gerekir. Zira bunlar öğütme sırasında sorun yarattığı gibi çimento içerisinde kalıntı miktarının da artmasına neden olurlar.

2. Alçı taşının oluşumu esnasında evaporit çökel ortamında bulunan MgCl , NaCl , KCl gibi tuzların bulunmaması gerekir. Bu gibi tuzlar suda kolayca eriyerek harcın yapısının bozulmasına sebep olmaktadır.

3. Alçı taşında, alkali bakımdan yüksek ve hidratlaşma özelliğine sahip serpantin, talk gibi kayalar ile su aldığı anda hacim değişmesi gösteren bentonitik kil minerallerinin olmaması gerekir.

4. Serbest kükürt ve sülfürlü bileşikler ile organik asitlerin bulunması çimento harcında zararlı olduğu için istenmez. [13], [7]

5.3. Marn

Marnlar kil ile kalker arasında geçiş elementleridir. Marnlar çimento üretimi için çok iyi hammaddeler olup kalsiyum karbonatlarla killerin aynı anda sedimentasyonu ile oluşan sedimentler kayalardır. Bundan dolayı sertlikleri kalkere göre daha düşüktür. Kil ve kalkerin doğal olarak homojene edilmiş bir karışımını oluşturduklarından, genellikle iyi pişme özelliğine sahiptirler.

İçinde silis, killi maddeler ve demir oksit bulunan kalkerlere marn denilir. Yeryüzünde geniş ölçüde yaygın olduğu için çimento yapımında hammadde olarak en fazla kullanılır.

Jeolojik bakımdan marn, CaCO_3 'ün ve killi maddelerin aynı zamandaki çökelti teşekkülü sonucunda oluşmuş bir tortul kayadır. Oluşum bakımından tamamı ile sedimanter olup, diyajenez geçirmiş genellikle muntazam tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu sakin ortam koşullarında meydana gelir. Marnın rengi killi maddelere bağlı olarak sarıdan gri siyaha kadar değişir.

Marn kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay istihraç edilebilmekte, kırma ve öğütme enerji tüketimi düşük olmaktadır.

Çimento yapımında genellikle %70 kalker ve %30 kil içeren “Marnlı Kalker” kullanılması klinkerin kimyasal bileşimine en yakın doğal kayaç olduğu için tercih edilmektedir. Hatta marnlı kalkere “Amerikan Rock” ve “Doğal Çimento Kayası” denilmesi de bu yüzdendir. Uygun kimyasal ve litolojik bileşimdeki kalkerli marnın hammadde olarak kullanılma avantajları, kolay sökülebilir niteliklerde yumuşak olması işletme ve öğütmede ekonomi sağladığı gibi karışım ve yakmada da yakıttan tasarruf sağlamaktadır. Marn oluşumlarında sürekli bir devamlılık vardır. Yanal ve dikey durumda homojen litolojik yapı ve kimyasal bileşiminin bulunması en önemli çimento hammadde avantajını oluşturur. [13], [7]

5.4. Kil

Killer klastik sedimentler olup, önceleri kayaç halinde iken havalandırma ve/veya erozyon sonrası parçalanma sonucu oluşmuşlardır. Kil mineralleri çok küçük partiküller halinde (<0.002 mm) olup, genellikle su içinde depozitleri vardır. Killer çoğunlukla, değişik kil minerallerini (illit, montmorillonit, kaolinit, hallosit gibi) bir arada ihtiva edebilirler. Killer aşağıdaki mineral gruplarına ayrılır :

Kaolen Grubu :

KAOLİNİT	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
NAKRİT	"
DİKİT	"
HALLOSİT	"

Montmorillonit Grubu :

MONTMORİLLONİT	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$
SAPONİT	$2 \text{MgO} \cdot 3 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Alkali İhtiva eden Kil Grubu :

Mika Kil ihtiva eden İllit	$\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$
----------------------------	---

Kil mineralleri yanında, ince yapıda kuvars (SiO_2 "Kum") kalsit (CaCO_3), alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), limonit (FeOOH), pirit (FeS_2) feldspat (alüminyum silikatlar) ve karbon menşeli partiküller killerin yapısına girmiş olarak bulunabilirler.

Demirhidroksit killere renk veren esas bileşen olup, organik malzemeler de renklendiricidir. Safsızlık ihtiva etmeyen killeri beyazdır. [8]

Kil minerallerinin spesifik yüzeyleri :

Kaolen	yaklaşık	15 m ² /g
Hallosit	"	43 "
İllit	"	100 "
Montmorillonit	"	800 "

Çimento hammaddesi olarak kullanılarak killerde çeşitli minerolojik ve kimyasal özellikler aranmasına rağmen homojenite çok önemlidir. Kil çeşidi ve kalitesinin saptanması ancak X-ışınları difraksiyonu ve diferansiyel termik analizi ile yapılabilir. Killerin kimyasal analizinde; Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı % miktarının tespit edilmesi gerekir. Minerolojik analizlerde ise kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve bunların % miktarları saptanır. Çimento yapımında kullanılacak kilin kimyasal bileşiminde $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı 2/1 civarında olmalıdır. SiO_2 miktarı yüksek olan killerde mutlak surette kuvars veya kalsedon halinde serbest silis vardır. Bu da üretim esnasında güçlükler çıkarır. Toprak alkali oksitlerin miktarı %1'in altında olması istenir. Bu miktardan fazlası kil içerisinde; anorit, montmorillonit, a mika, feldspat, alkali tuzu olduğunu gösterir. Kil minerallerinin çeşitleri saptandıktan ve kimyasal-minerolojik bileşimi bilindikten sonra kil içerisindeki safsızlıklar rasyonel analizleri ile kesinlikle bulunabilir. [13], [7], [8]

5.5. Düzeltici Maddeler

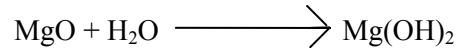
Eğer çimento hammaddesinde olması gereken kimyasal bir bileşen yeterince ihtiva edilmiyor ise, düzeltici maddeler katılır. Silis muhtevasını artırmak için kum, yüksek silisli kil, diatomit, demir eksikliğini gidermek için pirit külü, demiroksit gibi düzelticiler ilave edilir.

5.6. Hammaddelerin İhtiva Ettği İstenmeyen Bileşenler

Çimento hammaddelerinde bulunan ve Standardlar da verilen spesifikasyonlar da veya proses tecrübesi ile limitlenmesi gereken bileşenler tespit edilmiştir.

5.6.1. Magnezyum Oksit

MgO genellikle dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) olarak kalkerde görülür. Bu bileşen %2 oranına kadar klinker fazları ile bağlanabilir. Bu miktarından fazlası ise PERİKLAS halinde serbest MgO olarak kalır. Periklas, çimentonun hidratasyonu esnasında su ile birleşir.



Oluşan Mg(OH)_2 hacimce daha fazla yer işgal eder ve magnezyum genleşmesi olarak bilinen ve betonda çatlamlara neden olan hacimsel genleşmeyi meydana getirir. Bu reaksiyonun hızı çok yavaştır. Betonun diğer sertleşme reaksiyonları bittikten sonra devam ederek, bazen yıllar sonra ortaya çıkan sinsi bir gelişme gösterir. MgO kalkerden başka, yüksek fırın cürufunda da bazen görülebilir. Bu tehlikesinden dolayı, MgO standartlarda limitlenmiştir. (Klinkerde max. %5) Buna rağmen, unutulmaması gereken önemli bir nokta da MgO'nun klinker yapısındaki her artışı CaO oranını azaltarak hedeflenen kalitenin (LSF, C3S gibi) düşmesine neden olmasıdır.

Magnezyumlu çimentolar gri-yeşilimsi bir renk gösterirler. Magnezyum ihtiva etmeyenler genellikle kahverengimsidir. [13], [8]

5.6.2. Kükürt

Hammaddede kükürt, sülfid halinde (pirit, markazit FeS_2) bulunabilir. Kükürt daha ziyade yakıtta bulunur. Yanma sonucunda hammadde veya yakıttan gelen kükürt, SO_2 meydana getirerek, fırın atmosferindeki alkali ve oksijenle, alkali sülfat buharları oluştururlar. Bunlar ise fırının daha soğuk bölgelerinde ve ön ısıtıcıda farin partikülleri üzerinde yoğunlaşırlar. Fırın tozu ile taşınan küçük bir kısım ise (uçuculuğunun düşük olması dolayısıyla) tekrar fırına beslenen farin ile tekrar pişme bölgesine gelerek, klinkerle beraber fırını terk eder. Eğer SO_2 oranı tüm alkalilerle birleşmeye yeterli değilse, fazla uçucu olmayan alkali karbonatlar veya çok uçucu olan alkali klorürler fırında sirküle eder. Alkali karbonatlar klinker fazları ile birleşmezler, yanma bölgesinde tekrar buharlaşırlar.

Ön ısıtıcı da ise, SO_2 'nin fazlası CaCO_3 ile reaksiyona girer ve fırına CaSO_4 olarak intikal eder. Pişme bölgesinde tekrar bozularak fırında SO_2 sirkülasyonunu artırır. Bir kısım SO_2 ise klinkerde CaSO_4 olarak görünür.

Alkalilerin hammaddedeki mevcudiyeti, yüksek kükürtlü yakıt kullanımına imkan verebilir. Fakat, fırın gazında fazla SO_2 emisyonuna neden olmaması gerekir. Klinkerle birleşen

alkali sülfatlar çimentonun erken dayanımına katkıda bulunurlar. Diğer taraftan, yüksek kükürt çıkan gazda fazla SO_2 oluşturduğu takdirde, baca gazında yüksek SO_2 emisyonuna ve ön ısıtıcıda tıkanmalara, fırında ring oluşumuna sebebiyet verirler. [13], [8]

5.6.3. Klorür

Klorürler fırında alkalilerle reaksiyona girerek uçucu alkali klorürleri meydana getirerek döner fırından gazlarla çıkarlar ve ön ısıtıcıda yoğunlaşırlar. Tekrar farin ile fırına girerler. Böylece fırın ile ön ısıtıcı arasında giderek konsantrasyonu artan bir sirkülasyon meydana getirirler. Sonuçta oluşan kemeri yıkmak için fırın duruşunu gerektirirler. Bu olayı önlemek için, eğer hammadde karışımında %0,015 'ten fazla Cl bulunuyorsa, fırın gazlarının %10 - 25'lik bir kısmının by-pass edilerek ön ısıtıcıya girmemesi sağlanır.

Klorürlerin çimento erken mukavemetini artırıcı etkileri bulunması nedeniyle önceleri CaCl_2 ilavesi düşünülmüş ise de, günümüzde betondaki çelik donatıyı ve ön gerilmeli betondaki gergi tellerini korozyona uğratması nedeniyle zararlı etkilerinden dolayı standartlarda limitlenmiştir. [13], [8]

5.7. Katkı Maddeleri

Çimento üretiminde kullanılan yardımcı maddeler kalsiyum sülfat, puzzolanlar, uçucu küller, granüle yüksek fırın cürufu ve silika füme'dir.

5.7.1. Kalsiyum Sülfat

Kalsiyum Sülfat, çimento üretimi esnasında priz süresinin düzenlenmesi için katılır. Kalsiyum Sülfat; Jips (alçı taşı) $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$; hemihidrat $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ veya anhidrit (susuz kalsiyum sülfat) CaSO_4 yapısında veya bunların karışımları halinde olabilir.

Doğal halde alçı taşı ve anhidrit olarak bulunur. Kalsiyum Sülfat aynı zamanda bazı endüstriyel proseslerin yan ürünü olarak da mevcuttur. Kalsiyum sülfat en yaygın olarak jips (alçı taşı) $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ şekli ile kullanılırlar. Eğer alçı taşı ilavesi belli bir limit değerin üzerine çıkarsa, sülfat genleşmesine neden olur ki, serbest kireç ve MgO genleşmelerinden sonra çimentoda oluşan üçüncü bir genleşme şeklidir.

Klinker ana bileşenleri olan C_3S ve C_2S 'ün su ile reaksiyon hızları yavaş olmalarına rağmen C_3A ile reaksiyonu çok hızlıdır. C_3A su ile tipik bir "ani priz" meydana getirir ve beraberinde yüksek bir ısı açığa çıkar. C_3A çimentoda oldukça az miktarda bulunmasına rağmen, tüm çimento kütlelerinin ani prizine neden olabilir. Alçı taşı hızlı bir reaksiyon ile C_3A ile birleşerek iğne-şekilli bir bileşen oluşturur. Bu bileşen, kalsiyum sülfat alüminat olup, $(3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O})$ yapısındadır. Bu bileşen özgül yoğunluğu(1,7) düşük olması nedeniyle, büyük bir hacmi işgal eder. Bu hacimsel genleşmeyi önlemek için ilave edilecek alçı taşı

miktarına çok dikkat edilmesi gerekir. Bundan dolayı çimentodaki SO_3 miktarı standartlarda %3-4 civarında limitlenmiştir. [13], [8]

5.8. Puzolanlar

Puzolanik maddeler, silisli veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddeler veya endüstriyel puzolanlardır. Puzolanlar su ile karıştırıldıklarında kendi kendilerine sertleşmezler, fakat ince öğütüldüklerinde ve suyun mevcudiyetinde, normal çevre sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikler oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Bu bileşikler hidrolik maddelerin sertleşmesinde oluşan bileşiklerle benzerdir. Puzolanlar esasen reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşmuştur. Geri kalan kısım Fe_2O_3 ve diğer oksitleri ihtiva eder. Sertleşme için reaktif CaO miktarı ihmal edilebilir. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25.0'den az olmamalıdır. [19], [8]

Başka bir tanımla tek başlarına bağlayıcı olmayan fakat kireç, çimento ile karıştırıldığında su ile reaksiyona girerek bağlayıcı madde özelliği taşıyan maddelere puzolanlar denir.

Puzolanlar da dikkat edilmesi gereken en önemli özellikler; puzolanlar mümkün olduğu kadar ince öğütülmelidir, böylelikle özgül yüzey alanı yeterince büyük olabilir, puzolanlar da Al_2O_3 ve SiO_2 miktarı fazla olmalıdır. (ASTM C 618-72)'ye göre bir puzolanda

$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0,70 \text{ olmalıdır.}$$

Puzolanlar doğal ve endüstriyel puzolanlar olmak üzere iki grupta toplanırlar :

a) Doğal Puzolanlar

Genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşimli volkanik orijinli maddeler veya tortul kayalardır.

Bizde en yaygın örneği TRAS olarak bilinir. Türkiye TRAS depozitleri açısından çok zengindir.

b) Endüstriyel Puzolanlar

Endüstriyel puzolanlar, ısı muameleye tabi tutulmuş ve aktifleştirilmiş killer ve şistlerdir.

Puzolanların sertleşmiş betonda ki etkileri;

- Betonda sürekli puzolan reaksiyonu yaratır ve bu sayede betonun uzun süreli dayanımını artırır.
- Çimento hamurundaki gözenekleri büyüklüğünü azaltır.
- Betonun geçirgenliği azalır.

Puzolanik maddeler, silisli ve alümino-silisli minerallerin karışımından meydana gelen bir bileşimde olup, kendi başlarına bulunduğu zaman hidrolik özelliğe sahip olmadıkları halde çok ince öğütüldükleri zaman normal sıcaklıkta sulu ortamda ve kalsiyum hidroksit ile muamele edildiğinde kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren maddeler olarak tanımlanır.

Puzolanik maddeleri, doğada elverişli bileşimdeki mineralleri içeren kayalar oluşturur. Bu kayalar doğrudan doğruya yalnız öğütülerek kullanıldığı gibi zenginleştirme proseslerinin uygulanması ile elde edilen ürünlerin ince öğütülmesi ile de puzolan olarak kullanılırlar. Puzolanik maddelerde bağlayıcı özellik, sönmüş kireç ve su ile muamele yapıldığı zaman meydana gelmektedir. İnşaat yapımında kullanılan malzemeleri çimentolamadaki puzolanların yararı eski tarihlerde yapılan belki de şans eseri olarak ortaya çıkarılan eski eserlerde görülmektedir. Bu eserler kalsine edilmiş kalker ile doğal volkanik materyallerin bir kombinasyonundan ibaret olduğu ve büyük çapta bina inşaatlarında kullanılan kireçli harcın niteliğini arttırdığı saptanmıştır.

Bunun dışında hava ile temasta olduğu kadar su altında da giderek sertleşmektedir. Bu tip kombinasyonlar oldukça eski tarihlerden bu yana su altında sertleşen bağlayıcı olarak bilinir. [13], [8]

Puzolanların kullanılması ile portland çimentoları betonunda sağlanacak yararların bazıları şunlardır:

1. Piriz süresi azaltılarak sertlik ve elastikiyetin ayarlanması sağlanır.
2. Rötire sonucu artan koruma, dökülme ve hacim küçülmesinin düzenlenmesi temin edilir.
3. Artan su talebinin giderilmesi sağlanır.
4. Donmaya ve erimeye karşı mukavemet temin edilmiş olur. [8]

Bugün portland çimentosu ve puzolanların yüksek miktarlarda karıştırılması ile yapılan katkılı portland çimentosunun betonlarda kalite ve kıymeti artırdığı ispatlanmıştır. Bu durumun sağladığı başlıca avantajlar ise şunlardır:

1. Beton ve harcın işlenebilme kabiliyetini düzenler.
2. Daha düşük hidrasyon ve termal fire ısısı verir.
3. Su geçirmezliğini artırır.
4. Özellikle I. tip çimentolarda, deniz suyu ve sülfat reaksiyonlarına karşı direnç sağlar.
5. Hacim büyümesini düzenler ve çatlama ile kırılmalara karşı direnç temin eder.
6. Plastiklik ve basın-darbe-iç mukavemet özelliklerinin ayarlanmasını sağlar.
7. Alkali agrega arasındaki reaksiyonların tepkisini azaltır.
8. Yıkanma ve ayrılma ile erimeye karşı daha fazla mukavemet temin eder.
9. Daha düşük fiyat ve üretimde enerji ile yakıt tasarrufu sağlar. [8]

Doğal olarak teşekkül eden puzolanik maddeler aşağıda belirtilen tipleri ihtiva ederler:

1. Killer ve şeller
 - a) Montmorillonit tipleri
 - b) Kaolenit tipleri
 - c) İllit tipleri
2. Opal ve benzeri malzemeler
 - a) Opal ve benzeri şeller
 - b) Diyatome toprağı
 - c) Çörtler
3. Volkanik tüfler ve sünger taşları
 - a) riyolit tiri
 - b) Andezit tipi
 - c) Fonolit tipi
 - d) Bazalt tipi

Killer ve şellerin aktif puzolanlar haline getirilebilmesi için genellikle 430 ile 1100⁰ C arasında kalsinasyon işlemine tabi tutulması gerekir.

Opal ve benzeri malzemeler, kalsinasyon sonucu hasıl olan puzolanik aktiviteye nazaran daha elverişli olabilir veya içerdikleri minerallere göre bu durumun aksi de mümkündür. Durum puzolanik aktivite testi ile saptanır.

Volkanik tüfler ve sünger taşları kalsinasyon ile nadiren istifadeli hale gelirler. Normal olarak doğrudan kullanılırlar.

Doğal puzolanların pek çoğunun beton imalinde elverişli olarak kullanılabilmesi için çok ince öğütmeye tabi tutulması gerekir. Doğal puzolanlara kalsinasyon prosesleri esnasında kimyasal maddeler (örneğin alkaliler gibi) ilavesi ile daha elverişli duruma getirilebilir.

Yapay puzolanlar, endüstride tali ürünler veya artıklar olarak elde edilirler ve uçucu kül içerirler. Örneğin, toz haline getirilmiş kömür yakan enerji üretim tesislerinde SiO₂ dumanla yükselerek bacalarda tutulup uçucu külleri meydana getirirler. Yüksek SiO₂ içeren killi toprak ve şellerin pişirilmesi (kalsinasyonu) ile oluşan tuğlalar da uçucu kül özelliklerinde olmaktadır. Ayrıca yanmış petrol tabakaları ve bazı cürufklar da yapay puzolan olarak kullanılabilirler.[6]

5.8.1. Uçucu Küller

Uçucu Küller kimyasal yapı olarak ihtiva ettikleri kalsiyum oksit ve silisyum dioksit miktarına göre Silisli ve Kalkersi yapıda olmak üzere iki grupta mütalaa edilebilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu kül ise hidrolik özellik gösterir. Buna ilave

olarak puzolanik özellikte gösterebilir. Uçucu kül, pülverize kömür yakılan fırınlardan atılan baca gazından, toz partiküllerinin elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülmesi ile elde edilir. Standartlara uygun çimentoda, diğer metotlarla elde edilen kül kullanılmaz. [19]

5.8.1.1. Silissi Uçucu Kül

Silissi uçucu kül, puzolanik özelliklere sahip, esas olarak küresel partiküllerden ibaret ince bir tozdur.

Esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşur. Geri kalan kısmı Fe_2O_3 ve diğer bileşikler ihtiva eder. Reaktif

CaO oranı kütlece %5'den fazla olmamalı, reaktif SiO_2 oranı ise kütlece %25'den az olmamalıdır. [8]

5.8.1.2. Kalkersi Uçucu Kül

Kalkersi uçucu kül, hidrolik ve/veya pozulanik özellikleri olan ince bir toz olup esas olarak reaktif

CaO , reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşur. Geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşikler ihtiva eder. Reaktif CaO

oranı %5-15 arasında olan kalkersi uçucu kül aynı zamanda %25'ten fazla reaktif SiO_2 ihtiva etmelidir.

Eğer uçucu küllerde SO_3 miktarı, çimento için müsaade edilebilen üst limiti aşarsa bu kalsiyum sülfat ihtiva eden bileşenleri uygun şekilde azaltmak suretiyle karşılanmalıdır.

Uçucu külün yeni dökülmüş betonda etkileri;

- Betonda hem ilk hem de son priz süresini arttırır.
- Beton karışımında karışım suyunu azaltır.
- Ayırışma ve su katma oranı genel olarak düşer.
- Betonun pompalana bilirlilik niteliğini arttırır.

Bunların dışında uçucu kül çimento içeriğini azalttığı için çimentodan tasarruf sağlar. Sertleşme sırasında betonun ulaştığı maksimum ısıyı düşürür. [8]

5.8.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Granüle Yüksek Fırın Cürufu uygun şekilde aktifleştirildiğinde gizli hidrolik özellik gösteren bir maddedir. Kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva etmelidir. Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az 2/3'ü CaO , MgO ve SiO_2 'den ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşiklerle birlikte Al_2O_3 ihtiva etmelidir. $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2)$ oranı kütlece 1.0'den fazla olmalıdır.

Granüle yüksek fırın cürufu, demir cevheri yüksek fırınlarda eritilip arıtılırken elde edilen uygun bileşimdeki cürufun hızla soğuması ile de elde edilir. [8]

5.8.3. Silis Dumanı

Silika Füme, silisyum ve ferrosilikon alaşımları üretimi sırasında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle birlikte elektrik ark fırınlarında, indirgenmesinden oluşur. Silika füme yüksek miktarda amorf silisyum dioksit (SiO_2) ihtiva eden çok ince küresel partiküllerden ibarettir. Silika fümenin amorf SiO_2 miktarı kütlece en az %85 olmalıdır.

Klinker ve Alçı taşı ile birlikte öğütülmesi için silika füme, kendi orijinal halinde veya sıkıştırılmış veya suyla peletlenmiş halde bulunabilir. [19]

6. Çimento Hammadde Karışımı

Fırına verilmek üzere hazırlanmış olan çimento hammadde karışımına "Fahrin" denilmektedir. Bilindiği gibi çimentoyu oluşturan ana bileşenler kütle yüzdelere göre CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 şeklinde sıralanır. Dolayısıyla, hammadde karışımı hazırlanırken karışımın kütlece bu bileşenleri ihtiva etmesine dikkat etmek gerekmektedir. Bu nedenle, çimento için hammadde hazırlanırken yaklaşık %75 kalker ve %25 kil karıştırılarak Fahrin oluşturulur. Bu oranlar kullanılacak olan kalker ve kilin kimyasal bileşimine göre değişmektedir. Bu nedenle, çimento üretimine uygun bir hammadde karışımını hazırlamak için, kullanılan kil ve kalkerin karışım oranları bir takım kimyasal modüllere bağlı olarak belirlenmektedir.

Bunlar, kireç doygunluk faktörü, silikat modülü ve alüminyum modülüdür. Bu modüller aşağıdaki formüllerle tanımlanır.

Kireç doygunluk faktörü: $\text{CaO} \times 100$

Silikat modülü(SiO_2): $2,8 \times \text{SiO}_2 + 1,18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$

Alüminyum modülü: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

Portland çimentosu için kireç doygunluk faktörü 90 -95, silikat modülü 2,2 -2,6 değerleri arasında, alüminyum modülü ise 1,63 değeri civarında olmalıdır. Kireç doygunluk faktörü arttığında pişme için daha çok yakıt sarfiyatına gerek göstermektedir. Artan silikat modülü; pişme zorluğuna, yavaş priz almaya ve geç donmaya neden olmaktadır. Silikat modülünün yüksekliği ortamdaki sıvı fazın yetersiz olduğunu gösterir. Klinkerleşmede çok önemli rol oynayan sıvı fazın eksikliği ile pişme ve trikalsiyum silikat oluşumu güçleşir. Alüminyum modülü ise klinkerde granül oluşumu üzerinde etkilidir, yukarıda belirtilen 1,63 değerinden uzaklaştıkça granülleşme zorlaşır. Bu modüllere ait değerlerin ayarlanması ile hammadde karışımının pişebilirliği etkilenmektedir. Hammadde karışımının pişebilirliği kullanılan kilin ihtiva ettiği kil mineralinin pişme özelliklerine göre de değişmektedir. [8]

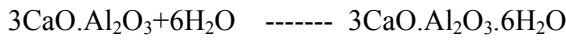
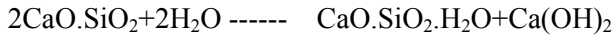
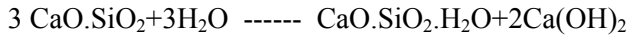
6.1. Hammadde Karışım Oranlarının Hesabı

Hammadde karışım oranlarını hesaplamamanın amacı hammadde komponentlerinin ağırlıkça oranlarını tespit ederek pişmiş klinkerin istenilen kimyasal ve mineralojik

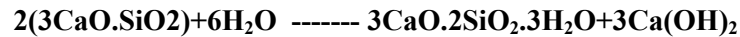
kompozisyona sahip olmasını sağlamaktır. En basitinden en karmaşığına kadar bir çok hesaplama metodu bulunmaktadır. Metodlarda temel olarak hammadde birleşim analizleri kullanılır. Analizin sonucu %1’lik toleranslı olabilir. %100’ü geçen sonuçlar %100’e aritmetik olarak indirilmelidir. Bu her bir komponentin orantılı olarak azaltılması ile sağlanır. Şayet komponentlerin toplamı %100’den az ise, o zaman komponentler orantılı olarak yükseltilmez. Bu durumda 100’den kalan kısım “artan” olarak kabul edilir. Böylece bileşimin toplamı %100 olacaktır. [8]

6.2. Çimentonun Sertleşmesi

Çimentonun su ile muamelesinde, bu bileşikler hidroliz ve hidrate olmak suretiyle kütleyi dondururlar. Bu hale çimentonun DONMASI denir. Genellikle 2 ile 3 saat arasında sürer. Katılaşılan çimento zamanla katılaşıp ve taşlaşır. Yukarıda bahsedilen bu hidroliz ve hidradlaşma olayının kimyasal reaksiyon denklemleri aşağıdaki şekilde ifade olur.



Betonun donması çimento ile ilgilidir. Çimentonun sertleşmesi, su harcının sertleşmesi olarak değerlendirilmiş olan yeni bir reaksiyon cinsi olup ‘Hidrolik Yer Değiştirme’ olarak kabul edilebilir. Bu yer değiştirme, çimento klikerinde yüksek sıcaklıkta teşekkül etmiş olan kaolin asitlerinin kireççe zengin tuzlarının, harç hazırlama suyunun etkisi ile daha ziyade kireççe fakir ve normal sıcaklıkta stabil tuz hidratlarına dönmesi demektir. Buna bir örnek olarak trikalsiyum silikatın hidrolizini verebiliriz.



Bu suretle husule gelen kalsiyum hidroksit, kaolin asitleri ile kireç-puzzolan harcının donma reaksiyonlarında olduğu gibi kaolin asitlerinin kalsiyum tuzu hidratlarını teşkil eder.

Çimentonun kireççe zengin silikatları normal sıcaklıkta dayanıklı değildir. Bunlar enerjileri daha fakir olan kireççe zayıf tuz hidratlarına dönmek isterler, ancak çimento klinkeri süratle soğutulduğundan, bu sırada böyle bir dönüşme mümkün olmaz. Normal sıcaklıkta ise klinker içindeki moleküller reaksiyon verecek kadar hareketli değildirler. Su ile temasa gelmeleri halinde (Harç hazırlama suyu veya havanın rutubeti) hidrolik yer değiştirme mümkün olur. Aynı sebepten alüminat ve ferritler de su etkisi ile hidratlarına dönerler. Bu hidrolik yer değiştirmeyi basit ve genel bir şema haline aşağıdaki gibi getirebiliriz:

A-Kireçce Zengin Silikat + Harç Hazırlama Suyu

1- Kireçce fakir silikat hidratı + Ca(OH)_2

2- Ca(OH)_2 +Serbest kaolin asidi = Kireçce fakir tuz hidratı

B-Kireçce zengin alüminat ve ferrit + Harç Hazırlama suyu = Kireçce zengin alüminat hidratı veya ferrit hidratı

Böylece meydana gelen çimento kitlesi fazla miktarda kristallenmiş fakir trikalsiyum-disilikat-hidrat ($3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$)gibi tuz hidratlarından ve trikalsiyum alüminat hidrat ($3\text{CaO}. \text{Al}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$)ve ferritler ve karışık kristaller ihtiva eder. Aynı zamanda içinde, silikat asidi ve alüminyum oksit jeli gibi amorf kısımlar da bulunur.

İnşaat pratiğinde çimentonun bağlaması ile bunu takip eden sertleşme birbirinden ayrılır. Sertleşme ısı meydana getiren bir olaydır. Böyle reaksiyonlara Ekzotermik reaksiyonlar denir. Çimentonun reaksiyon ısısı ortalama 100 kcal/kg.'dır. Çimento harcının donması aşağıdaki olaylardan meydana gelir:

a)Çekme: Örneğin bir duvar sıvası zemininin su çekmesi.

b)Hidratasyon: Kimyasal hidrat bileşiklerinin teşekkülü için çimento taneciklerinin su çekmesi.

c)Hidratasyon ile husule gelen jel halindeki yeni bileşiklerin teşekkülü ki böyle bir olay çimento taneciğinin kenarından içine doğru devam eder. Böylece yavaş yavaş bütün harcın jel halinde katılaşması başlamış olur.

d)Jel halindeki kitleden tuz hidratlarının kristallenmesinin ilerlemesi ve sertleşmenin tamamlanması. [15], [21]

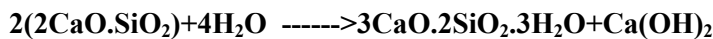
3-Hidrolik kirecin donması: Kaolin ihtiva eden kireç taşı yakılacak olursa, yanmış kireç(**CaO**)

İle birlikte kaolin asitlerinin kalsiyum tuzları da teşekkül eder. Hidrolik kirecin sertleşmesi birbirini takip eden aşağıdaki reaksiyonlara göre meydana gelir:

a)Kirecin havanın etkisi ile karbonatlaşması

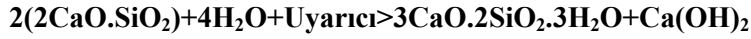
b)Kaolin asitlerinin kireçce zengin tuzlarının hidrolik yer değiştirme ile kireçce fakir tuz hidratlarına dönmesi. Hidrolik kirecin yanma sıcaklığı çimentonunkinden düşük olduğundan, kaolin asitlerinin kalsiyum tuzlarının büyük bir kısmı çok az kireç fazlası ihtiva ederler. Bu sebeple de çimento da olduğu gibi bir dirence erişilmez.

c)Anhidrit puzzolanlarda olduğu gibi donma reaksiyonu: Hidrolik sertleşmenin önemli bir kısmı aşağıdaki reaksiyona göre cereyan eder:



Bu değişme aylarca süren bir olaydır.

4-Gizli Hidrolik Karakterli Maddelerin Donması: Hidrolik kireçler içinde bağlayıcı karakteri(çimento gibi), yalnız yüksek hidrolik kireç gösterir. Diğerleri hava kireci gibidirler. Bu çeşit hidrolik maddeler, örneğin bazık, granule yüksek fırın cürufu, kendilerinde saklı bulunan donma kabiliyetinin ortaya çıkabilmesi için etkiye ihtiyaç gösterirler. Tras gibi hidrolik katkı maddelerine karşılık, bunlar kendilerinden donan maddelerdir. Ancak yanma esnasında teşekkül eden kalsiyum tuzları çok az kalsiyum ihtiva ettiğinden, hidrolik yerdeğiştirmeye meyilleri azdır. Bu sebeple, bir uyarıcı maddenin karıştırılması lüzumludur. Bazık granüle yüksek fırın cürufu gibi gizli hidrolik karakterli maddeler, normal sıcaklıkta stabil kalsiyum tuzlarından çok az farklı kireç fazlası ihtiva eden kalsiyum silikat ve alüminantdan müteşekkildirler. Donma reaksiyonlarını, kalsiyum silikat üzerinden basit olarak aşağıdaki şekilde gösterebiliriz.



Serbest hale geçen kalsiyum hidroksit, kaolin asitleri ile bunların kalsiyum tuzlarının hidratlarını meydana getirir. Aynı şekilde alüminant ve ferritler de portland çimentosunda olduğu gibi, hidrolik değişmeye uğrarlar. Gizli hidrolik karakterli maddelerin uyarılması aşağıdaki şekilde mümkün olur:

a)Portland Çimentosu veya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi alkali ile uyarma: Demirli portland ve yüksek fırın çimentosu, portland çimentosu ile uyarılır.

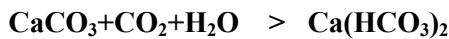
b)Jips gibi sülfat ile uyarma: Bazık kaolini yüksek fırın cürufu,jips ile aynı zamanda portland çimentosu ile uyarılır.

5-Çok alüminli çimentonun donması: Bu çimento da hidrolik yer değiştirme ile sertleşir. Temel bileşimi mono-kalsiyum alüminant'tır. " $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ " Hidrolik yer değiştirme portland çimentosunda verildiği gibi olur. Yalnız çok daha şiddetli ve oldukça fazla reaksiyon ısı vererek cereyan eder.(**En fazla $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$ husule gelir.**)

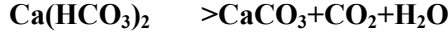
6-Barit Çimentosunun Donması: Barit çimentosu, içindeki kalsiyum katyonunun baryum ile yer değiştirmesinden meydana gelmiş bir portland çimentosu olarak kabul edilir.Yüksek özgül ağırlığından dolayı nükleer reaktör betonunda önem kazanmıştır. Bu tip çimentonun donması da portland çimentosunda olduğu gibidir. [15], [21]

6.2.1. Betonun donmasını geciktiren tepkimeler

a)Karbonik Asidin Zararlı Etkisi: Serbest karbonik aside, tatlı sularda,yağmur suyunda , baraj ve kaynak sularında rastlanır. Zararlı etkisi, bağlayıcı maddenin kitleden eritilip uzaklaştırılmasına dayanır ve sadece Ca ve Mg karbonatı değil, aynı zamanda diğer kireç tuzlarını da etkiler. Bilhassa Ca-silikatı çok etkiler.

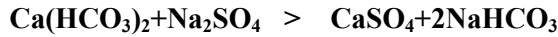
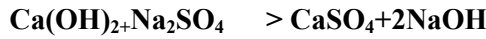
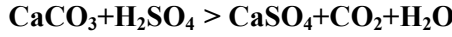


Pratik olarak suda erimeyen CaCO_3 karbonik asidin etkisi ile suda fazla miktarda eriyen kalsiyum bikarbonata döner ve suyun etkisi ile kütleden uzaklaşır. Bu kalsiyum bikarbonat eriyiği yapı kütlesinin dış yüzeyine çıkınca evvelki eritme olayı tersine döner, yani suyun uçması ile kalsiyum bikarbonat, karbonik asit vererek ($\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$) pratik olarak suda erimeyen kalsiyum karbonatı oluşturur.

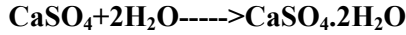


Bu da yapı kitlesi yüzeyinde ‘beyaz sakal’ adı verilen amorf kireç tabakasını teşkil eder.

b) Serbest Sülfirik Asit ve Sülfatlar: Burada zararlı etkiyi yapan sülfat iyonudur. Zarar verme ya bağlayıcı maddenin suda eriyen reaksiyon ürünleri ile sürüklenip uzaklaşması veya reaksiyon ürünlerinin kristallenmesi sonucu çatlama şeklinde olur. Sonucu duruma Sülfat Şişmesi adı verilir. Sülfat iyonu tarafından meydana getirilen bazı zararlı reaksiyonlar şu şekilde olur:



Şayet teşekkül eden CaSO_4 , iki molekül su bağlayarak kristallenecek olursa, alçı teşekkülü ile hacim büyümesi meydana gelir:



Harç veya beton içinde trikalsiyum alüminant da bulunacak olursa, kalsiyum sülfat bununla reaksiyona girerek Çimento Basılı teşekkül eder.



Görüldüğü gibi bu bileşiğin kimyasal olarak sağladığı büyük su miktarı hacim büyümesini çok fazlalaştırır ve bu sebeple de çatlama büyük olur. Yukardaki reaksiyonlar betonun içerdiği maddelerin bir araya gelmesine ters etki eder. Bu tepkimeler ile betonun donma süresi artar ve betonun sağlamlığı azalmış olur. [15], [21]

7. Çimentonun Üretimi

Ülkemizde çimento üretim sistemi genel olarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Çimento hammaddesi olan kalker, kil(veya mam) hammadde ocağından alınarak kırıcıya gönderilir.
- Kırıcıdan geçen hammadde stoklanır.
- Sokaktan alınan hammadde değirmene gönderilerek öğütülür. Belli oranlarda kil ve kalker karışımından ibaret öğütülmüş hammadde karışımına “Fahrin” adı verilir.
- Fahrin silolarda depolanır.
- Sonra ısı değiştiricilerinden geçirilir.

- f) Döner fırına verilen farin 1400⁰ C- 1450⁰ C sıcaklıkta pişirilir. Fırının pişmesi sonucunda elde edilen ürüne “Klinker” adı verilir.
- g) Fırından çıkan klinker soğutuculardan geçirilir.
- h) Soğutulan klinker depolanır.
- i) Klinkere alçı taşı eklenerek çimento değirmeninde öğütülür. Öğütülmüş klinker ve alçı taşı karışımına “çimento” adı verilir.
- j) Çimento pompalanarak silolara doldurulur.
- k) Torbalanarak pazarlanır. [15], [21]

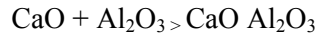
7.1. Klinker Oluşumu ve Çimentonun Elde Edilmesi

Hammadde karışımının fırında pişmesi sırasında, çimentonun % 95’ini teşkil eden klinkerin oluşum tepkimeleri ve sıcaklık dereceleri özet olarak aşağıda verilmiştir.

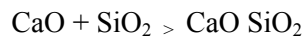
Sıcaklık Proses Termik Değişim:

- 100° C’de hammaddenin serbest suyunun buharlaşması. Endotermik
- 500° C ve üstü kil minarelerinin bağlı suyunun buharlaşması. Endotermik
- 800° - 900° C Kalınasyon yani CaCO₃’ün bozunması başlar. Endotermik $CaCO_3 > CaO + CO_2$
- 900° C ve üstü kil minarelerine ait ürünlerin kristalleşmesi. Ekzotermik
- 900-1200° C kalsiyum oksit ile alüminasilikatlar arasında oluşan tepkimeler.

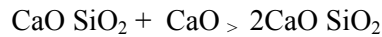
Alüminyum oksit’in hepsi aşağıda görüldüğü gibi CaO ile tepkimeye girerek mono kalsiyum silikat oluşturur.



Bu basamakta silisyum dioksitte bir miktar kalsiyum oksitle tepkimeye girerek mono kalsiyum silikatı oluşturur.



Oluşan bu mono kalsiyum silikat hemen daha fazla kalsiyum oksitle tepkimeye girerek, aşağıda görüldüğü gibi dikalsiyum silikatı oluşturur. Fakat bu basamakta oluşan dikalsiyum silikatın derişimi düşüktür.



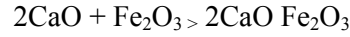
- 1185- 1285° C trikalsiyum alüminat (3CaO Al₂O₃) ve tetra kalsiyum alümine ferrit (4CaO Al₂O₃ Fe₂O₃) oluşumu.

Dikalsiyum silikat oluşumunun tamamlanması.

Bu sıcaklık aralığında mono kalsiyum alüminat daha fazla kalsiyum oksitle tepkimeye girerek, trikalsiyum alüminat oluşturur.



Aynı safhada bir miktar kalsiyum oksit, demir oksitle tepkimeye girerek dikalsiyum ferrit oluşturur.



Bu olaydan sonra daha kompleks bir tepkime ile tetra kalsiyum alümine ferrit oluşur.



- 1250- 1280 ° C Sıvı faz oluşumu başlar. Endotermik
- 1280 ° C'nin üstü daha fazla sıvı faz oluşur.

Bunu takiben trikalsiyum silikat'ın aşağıda görüldüğü gibi oluşumu ile klinker veya çimento bileşiklerinin oluşumları tamamlanır.



Yukarıda belirtilen tepkimeler sonucunda oluşan klinkere yaklaşık % 4-5 oranında alçı taşı katılıp öğütülerek çimento elde edilir. [8]

7.2 Çimentonun Ana Karma Bileşenleri

Çimentolarda dört ana bileşen vardır. Bunlar karma oksitlerdir.

- 1- C₂S olarak kısaltılan (CaO)₂SiO₂(bikalsiyum silikat)
- 2- C₃S olarak kısaltılan (CaO)₃SiO₂(trikalsiyum silikat)
- 3- C₃A olarak kısaltılan (CaO)₃Al₂O₃(trikalsiyum alüminat)
- 4- C₄AF olarak kısaltılan (CaO)₄Al₂O₃Fe₂O₃(tetra kalsiyum alümino ferrit)

Bunların dışında alçıtaşı (CaSO₄2H₂O) ve minör oksitler dediğimiz birleşmemiş CaO, MgO, bazı durumlarda Na₂O, K₂O ve erimeyen maddeler (çoğunlukla SiO₂) de bulunur. [1], [8]

7.3 Çimentonun Özelliklerine Ana Karma Bileşenlerin Etkileri

Doğal olarak bu maddelerin taze ve sertleşmiş betonun özelliklerinde, davranışlarında farklı etkileri mevcuttur. Bunları kısaca aşağıdaki gibidir:

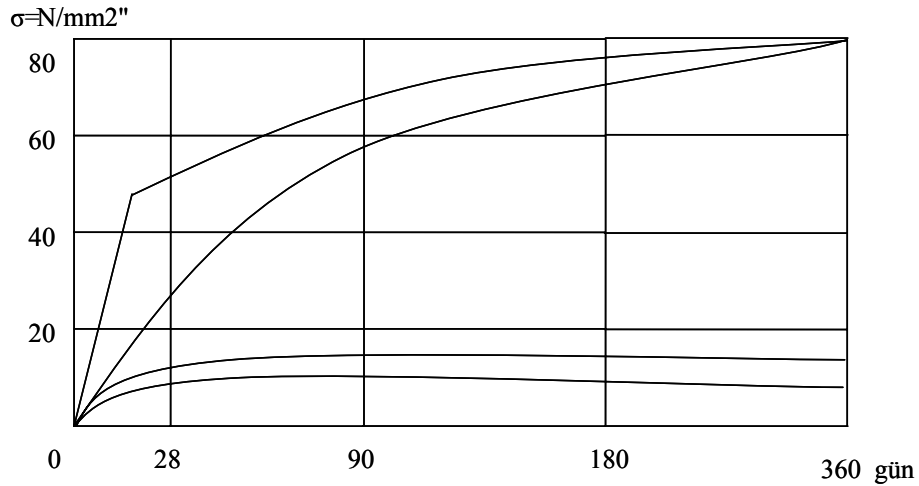
C₂S ve C₃S, yani kısaca silikatlar sertleşmiş çimentonun taşıyıcı iskeletini meydana getirirler. C₃S daha hızlı sertleşir ve dayanım kazanır, yüksek dayanımlı çimentolarda özellikle ilk dayanımı yüksek çimentolarda miktarı fazladır. Sertleşme sırasında daha çok ısı çıkarır, bu ise kusurdur. C₂S ve C₃S'in hidratasyonu sırasında kireç (Ca(OH)₂) açığa çıkar. Bu sönmüş kireç miktarı C₃S'de daha fazla olur. Bu kireç, çelik donatının paslanmasını geciktirir, yararlıdır, ancak zamanla yıkanır, yeri boş kalır ve beton geçirimli olur.

C₃A, yani kalsiyum alüminat (trikalsiyum alüminat) çimentonun kimyasal dayanıklılığında en önemli rolü oynar. Sertleştikten sonra bu bileşen en düşük dayanıma sahiptir, hidratasyon sırasında büyük ısı çıkarır ve asıl önemlisi kalsiyum sülfatla, yani alçı veya alçıtaşı ile birleşerek çok büyük hacimli bir tuz (Etrenjit veya Candlot tuzu) oluşturur. Bu tuz kristalleşmiş, yani hidrate olmuş C₃A durumunda da oluşur ve asıl kötüsü de budur. Zira bu

yüksek dereceli genleşme betonu patlatır, tahrip eder. Sülfatlı ortamlarda kalacak çimentolarda, C_3A miktarı düşük çimento seçmek zorunludur. [1], [8]

C_4AF 'in etkisi C_3A 'nınkilere benzer, fakat etki daha düşük düzeydedir.

Portland çimentosu ana çimentodur. Başka bir deyişle diğer tüm çimentoların ana köken malzemedir. Portland çimentosunun ana bileşenleri 4 tanedir.



Şekil 2: Çimentonun bileşimlerinin zaman göre mukavemeti [9]

C_4AF : teknik özellikleri C_3A ile aynıdır. Fırına verilen farinde önce nispeten düşük ısılarda bileşimindeki tüm Fe_2O_3 bir miktar Al_2O_3 alarak, $C_4AF [(CaO)_4 Al_2O_3 Fe_2O_3]$ **Tetra kalsiyum aluminoferriti**.

C_3A : İlk mukavemeti yüksek, son mukavemeti düşüktür. Hidratasyon ısısı yüksektir. Kalan Al_2O_3 ve $C_3A [(CaO)_3 Al_2O_3]$ ile birleşerek **Tri kalsiyum aluminatı**.

C_2S : İlk mukavemeti düşük, son mukavemeti yüksek, hidratasyon ısısı düşüktür. Kütle betonlarında kullanılırlar. Isı arttıkça : $C_2S [(CaO)_2 SiO_2]$ **Dikalsiyum silikati**

C_3S : İlk mukavemeti yüksek, son mukavemeti düşük, hidratasyon ısısı yüksektir. Erken mukavemet alır. Yeterli CaO ve ısıda ($\sim 1400^\circ C$) $C_3S [(CaO)_3 SiO_2]$ **Trikalsiyum Slikatı** oluşur.

Çimentoyu oluşturan 4 adet bileşen, değişik oranlarda katılarak çeşitli türlerde çimento üretimine olanak sağlanır. [8],[3]

Karma oksitlerin çimentoya kazandırdıkları önemli özellikleri şunlardır.

1. Çimentonun en önemli bileşiği C_3S 'dir. Çimentoyu ilk dayanımını veren ve basınç dayanımı yüksek bir çimento sağlayan C_3S dir.

2. C_2S in dayanıma katkısı ileriki zamanda kendini gösterse de ilk günlerde pek yoktur, ancak ötektik oluşturucu bir özelliği vardır.

3. C_3A ve C_4AF 'in de çimentoya olumlu ve olumsuz katkıları vardır. Bu bileşik maddelerin oranlarına, kristal şekillerine ve bu kristaller içerisinde kalan minör elemanlara bağlı olarak çimentonun özellikleri değişir.

7.4. Çimentolarda Minör Bileşenler ve Bunların Etkileri

Minör bileşenlerden CaO ve MgO , zamanla su alıp hidroksit haline gelirler, bu dönüşüm hacim artması ile olur ve zararlıdır. Na_2O ve K_2O ise, beton agregalarının opal, kalseduvan, tiyplit gibi aktif silis içermeleri durumunda hacim artışına yol açabilirler. Beton teknolojisinde çok önemli sayılan bu olaya alkali - agrega reaktivitesi adı verilir. Uzun yıllar sonra dahi ortaya çıkan bu genişleme, önemli hasarların sebebidir.[1], [8]

KÇ 32.5 ve TÇ 32.5 çimentolarında, portland çimento klinkeri ve alçıtaşı puzolan veya tras adını verdiğimiz doğal aktif silis içeren maddeler vardır. Bunlar çimento fırınında pişirilmeden katıldığından çimento üretiminde büyük ekonomi sağlarlar. Ülkemiz doğal puzolan yönünden zengindir. Çimento sanayinde bu maddelerden yararlanılması kaçınılmaz ve akılcı bir yaklaşımdır. Bu maddeler, silikatların hidrasyon ürünü olan kireçle birleşerek sertleşir ve dayanım kazanır. Bu özellikleri betonun geçirimsizliği üzerinde yararlıdır, öte yandan kirecin donatıyı pastan koruma niteliğini azalttıklarından zararlıdır. Etrenjit oluşumunda da sülfat iyonu dışında gerekli olan kireç bileşimini azalttıklarından yararlı bir etki meydana getirirler. Doğal Puzolanlar çok farklı kökenli olabilirler: Bazaltik, riyolitim vb.. gibi. Bu farklılık, tüm KÇ ve TÇ çimentolarının aynı dayanıklılığa sahip olmayacaklarını, en azından farklı zararlı ortamlarda farklı davranış gösterebileceklerini açıklar. [1], [11]

7.5. Priz Süresi

Beton teknolojisinde çimentonun iki özelliği fazla zamana gerek kalmadan etkilerini gösterirler. Bunlar priz ve incelik özellikleridir. Priz, çimento hamurunun veya betonun sıvı kıvamdan katı hale gelmesini tanımlar. Bu geçimin başlaması 2 ile 4 saat zarfında , sona ermesi 2.5 ile 6 saat zarfında olur. Burada standartta verilen değerler yerine, uygulamada rastlanan değerler verilmiştir. Uygulamada rastlanan en sakıncalı durumlar, prizın beklenenin dışında çok ani olarak meydana gelmesidir. Ani priz iki şekilde oluşur. Bunlar şimşek priz ve yalancı prizdir. [1]

7.6. Şimşek priz

Şimşek priz, C_3A bileşeninin alçıtaşı ile denetime alınmamasından kaynaklanır. C_3A priz olayını başlatan öğedir, ancak başlamadan sonra işlevi durdurulmazsa ortamdaki bütün suyu çekerek silikatların hidrasyonlarını tamamen önler, sertleşen çimento düşük dayanımlı , kırılğan, işe yaramayan bir madde olur. Şimşek prizi önlemeye ve meydana gelen kötü durumu gidermeye imkan yoktur. Buna karşılık, yalancı priz bazı önlemlerle geçiştirilir.[1]

7.7. Yalancı priz

Yalancı priz, sıcak klinkere katılan alçıtaşının istenmeyerek alçıya dönüşmesi sonucu oluşur. Islatılan çimentoda miktarı çok düşük olan bu alçı, tekrar alçıtaşına dönüşür; sertleşen alçıdır, çimento değildir. Betonyerde karıştırma işlemi uzatılarak bu geçici etkiden kurtulunur.

7.8. İncelik ve Etkileri

İncelik çimentonun önemli bir özelliğidir. Çimentoya aktivite kazandıran husus onun ince olarak öğütülmesidir. Çimento ne kadar ince ise dayanımı o kadar yüksek olur. PÇ 42.5, PÇ 52.5 gibi çimentolar ince öğütülmüş çimentolardır. Bunlarda ince olan, klinker bileşiminde olan bölümdür. Bu incelik hidrasyon ısını yükselten bir diğer faktör olmaktadır. TÇ ve KÇ çimentolarında da kolay öğütülebilen bazı doğal puzolanlar kullanıldığında incelik fazlalaşır. Ancak bu ince bölüm, öğütülmüş klinker gibi aktivitesi belirgin olan bir bölüm değildir, yani hidrasyon ısını yükseltmesinde fazla etkinliği yoktur. Bunlar çimentonun su tutma, su kuma ve erken rötre kapasitesi üzerinde negatif etki meydana getirir. İncelik 'Blaine özgül yüzeyi' büyüklüğü ile nicelendirilir. Hava geçirgenliği ölçülerek saptanan bu büyüklük, bir gram çimentodaki tanelerin yüzeylerinin toplamı olarak tanımlanır (cm^2/g ve m^2/kg). Çimentolarda bu değer 3000-4000 cm^2/g arasında değerler alır. [1], [8]

7.9. Hidratasyon Isısı ve Termik Rötre

Çimentolardaki diğer önemli bir sorun hidrasyon ısıdır. Çimentonun katılaşması, sertleşmesi fiziksel bir olaydır, ancak bu olayın kökeni kimyasal bir olaya, hidrasyona dayanır. Hidratasyon, toz çimentoyu oluşturan karma oksitlerin moleküllerine su alarak kristalleşmeleri şeklinde, basitleştirilerek açıklanabilir. Bu kimyasal reaksiyon ekzotermiktir, yani ısı çıkararak meydana gelir. Çıkan ısı fazla olursa betonun iç sıcaklığı çok yükselir; dökümü izleyen daha sonraki saatlerde ise soğuma başlar ve betonun hacmi küçülmeye başlar. Bu sırada beton katılaşmış ancak, yeterince dayanım kazanmamıştır (yeşil beton aşaması); büzülme betonun çatlamasına yol açar. Bu olaya termik rötre adı verilir. Özellikle kütlesi fazla betonlarda (baraj betonları) olay çok zararlıdır, oldukça derin olan bu çatlaklar su geçirimsizliğine neden olur. Hidratasyon ısıyla sıcaklığı yükselen betonda plastik rötre (erken rötre) ihtimalide yüksektir. C_3A ve C_3S yönünden zengin ve ince öğütülmüş Portland çimentolarında (PÇ 42.5 ve PÇ 52.5) hidrasyon ısı genellikle fazla olur. Buna

karşılık TÇ 32.5 ve KÇ 32.5 çimentolarında bu değer yavaş gelişir ve bu yüzden dayanım kazanma da yavaştır.[6]

7.10. Ana Klinker Minerallerinin Mukavemete Etkisi

Çimento klinkerinin içindeki ana minerallerinin mukavemete etkilerini laboratuvar şartlarında bulabilmek için her bir mineralin miktarını tek tek değiştirerek ve bu değişen mineralin miktarı dışındaki diğer mineralleri sabit tutarak bulabiliriz. Çimentonun mukavemeti agrega ile çimento çamurunun arasındaki bağın kuvveti kadardır. Ve bu bağ çimentonun kimyası ve mekanik kilidine göre değişir. Bu bölümde klinker minerallerinin laboratuvar şartlarında incelenmesiyle etkilerini bahsedilecektir. [6]

7.11. Ana Klinker Minerallerinin Mukavemete Etkileri

Laboratuvar şartlarındaki çimento, klinkerin 1450° de 2 saat pişirilmesiyle ve buradan mukavemete etkisi 3 parametrenin değişimiyle bulunur.

- Alümino Modülü
- Silikat Modülü
- Kireç Doygunluk Faktörü.

Laboratuvar şartlarında incelenen çimento 3200 g/cm² blaine sahip, ve içine % 6 oranında kireç taşı eklenerek oluşturulmuştur. [6]

7.12. İncelemenin Sonuçları

a- Kireç Doygunluk faktörü=%93, ve Alümino modülü=2.0, silika modülü değiştirilse;

- silika oranını yükseltirsek mukavemet genellikle yükselir, SO₃ yükselmesiyle mukavemet düşer.
- K₂O ve Na₂O %1,5 arttırılırsa ve kireç faktörü %100 ise 2 günlük mukavemet artar.
- K₂O ve Na₂O eşit miktarlarda katılırsa 28 ve 90 günlük mukavemet azalır.

b- Kireç faktörü=%93 ve silika modülü = 2.4

- Alümino modülünü düşürülürse mukavemet her zaman artar.
- K₂O ve Na₂O arttırılırsa 28 ve 90 günlük mukavemet hızlı bir biçimde düşer.

c- Silika modülü 2.4 ve alümino modülü 2.0 ise

- Mukavemet kireç faktörünü yükselttiğimiz zaman artar.
- K₂O ve Na₂O miktarını arttırılınca zaman mukavemet hızla düşer. [12]

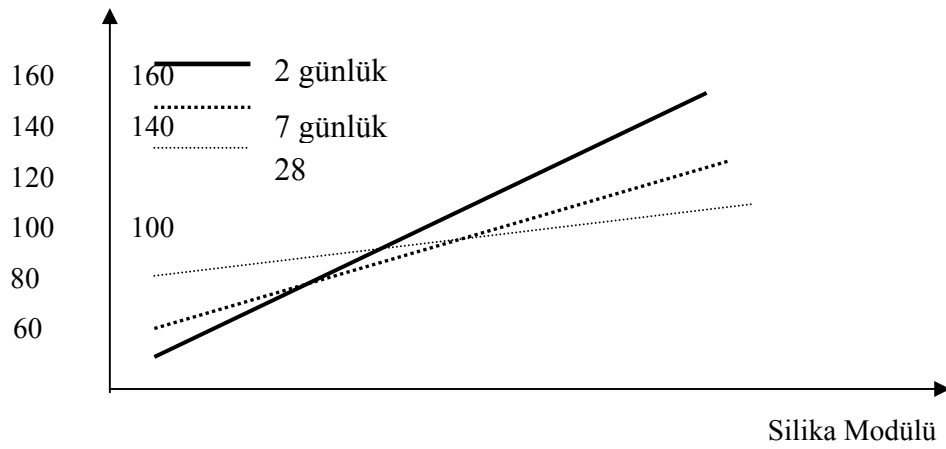
Tablo 2. Alümino modülü 2.0 kireç faktörü %95[12]

SİLİKA MODÜLÜ	ALİTE	BALİTE	C ₃ A	C ₄ AF
1.5	50	19	21	10
1.7	54	17	20	9
2.0	58	16	17	9
2.3	61	15	16	8
2.5	63	14	16	7
2.8	65	14	15	6

Tablo 3. Kireç faktörü %95, silika modülü 2.0 [12]

KİREÇÇ FAKTÖRÜ	ALİTE	BALİTE	C ₃ A	C ₄ AF
85	39	37	15	9
90	50	26	15	9
95	58	16	17	9
100	69	4	17	10
105	71	6	17	CaO

Mukavemet

**Şekil 3.** Silika modülüne bağlı mukavemet grafiği [12]

Görüldüğü üzere alümino modülü yükseldikçe mukavemet düşer, silika modülü yükselirse ise artar, C_4AF ve C_3A 'nın bu modüllerde düştüğünü görürüz. Demektir ki C_4AF ve C_3A 'nın mukavemetle ters bir orana sahiptir. Kireç faktörü, incelik ve C_3S 'le ise tam bir doğru orantı içindedir. [12]

7.13. Mukavemetin formüle edilmesi.

Yapılan incelemeler göstermiştir ki mukavemetin formülü:

$$\text{Mukavemet} = 1,66 \times \%C_3S - 1,52 \times \%C_4AF - 0,72 \times \%C_3A + 0,12 \text{ incelik} - 3,2$$

8.Çimento Tipleri

Çimentolar üç temel guruba ayrılır.

8.1Portland Çimentoları

- Sertleşme hızı normal PÇ
- Çabuk sertleşen PÇ
- Beyaz PÇ

8.2. Katkılı Çimentolar

- Pozolan (tras) katkıli çimentolar
- cüruf çimentoları
- Uçucu küllü çimentolar

8.3 Diğer Çimentolar

- Oksiklorit veya serel çimentosu
- Ferrari çimentosu
- Süper sülfat çimentosu
- Alüminli çimento
- Genleşen çimento
- Jet-Set çimentosu
- Hidrofobik çimento
- Harç çimentosu [19]

8.1. Portland Çimentosu

Yapılarda en yaygın olarak kullanılan tür, portland çimentosudur. Ülkemizde üretilen çimentonun, Türk Standartları Enstitüsünce hazırlanmış olan standartlara uygun olması gerekir. Portland çimentosu için ise TS EN 197-1'e uygunluk şartı vardır. Bu standartta yukarıda da bahsettiğimiz gibi üç tür portland çimentosu öngörülmektedir. [19]

- Normal portland çimentosu (NPÇ 350)
- Yüksek dayanımlı portland çimentosu (YPÇ 500)
- İlk dayanımı yüksek portland çimentosu (İPÇ 600)

Portland Çimentosu PÇ32.5-PÇ42.5 ve PÇ52.5 simgeleriyle anılırlar. Bu üç Portland Çimentosunda PÇ32.5 normal dayanımlı Portland Çimentosu, diğer ikisi yüksek dayanımlı çimentolardır. Bunların erken yaşlardaki dayanımları daha yüksektir. Kimyasal dayanıklılık açısından ve yüksek hidrasyon ısıları nedeniyle kullanımları belli yerlerle sınırlandırılmıştır. Portland Çimentosunun hammaddesi kil ve kalker taşıdır.

- Tabiatın çıkarılan bu iki malzeme birbirleri ile iyi bir karışım sağlayabilmeleri için ince öğütülür.

- İçerisinde belli miktarlarda CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 ve diğer maddeler bulunacak şekilde öğütülen hammaddeler uygun oranlarda karıştırılır.

- Karışım halindeki hammadde içindeki su buharlaşacak biçimde ısıtılır.

- Kurumuş karışım döner fırına verilerek karışım içindeki CaCO_3 'ün CaO ve CO_2 olarak ayrışacağı 800°C 'ye kadar ısıtılır. CO baca gazı olarak uzaklaşır.

- Karışım döner fırında daha yüksek sıcaklıklara doğru ısıtıldıkça CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 birbirleriyle birleşerek (sinterleşme) çimentonun ana bileşenlerini oluştururlar. Bu işlemler yaklaşık 1400°C 'ye ulaşıncaya kadar tamamlanmış olur. Elde edilen ürün Portland Çimentosu Klinkeri denir. [19],[2]

- Soğutularak $60\sim 150^\circ\text{C}$ 'ye indirilen Klinker hemen çimento üretiminde kullanılır, veya daha sonra kullanılmak üzere uygun kapalı bir mekanda depolanır. Klinker sudan etkilenmediğinden uzun süre saklanabilir. Eğer çok uzak yere gönderilmek isteniyorsa çimento yerine klinker gönderilir.

- Klinker çimentoya dönüştürülmesi için %1-5 oranında bileşime alçı taşı katılarak birlikte çok ince öğütülür. Çimentoya alçı taşı dışında başka katkılar puzolan gibi (Tras, Curuf vb.) katılacaksa bunlar da öğütmenin bu aşamasında katılırlar.

- Üretilen çimentoya 50 kg'lık kraft kağıtlarında torbalar halinde paketlenir veya açık halde satılmak üzere silolarda depolanır. Açık çimento diğer adıyla dökme çimento kullanılacağı yere özel araçlarla (silobas) taşınır. [19], [2]

- PÇ32.5 türü Portland Çimentosu her türlü beton işinde kullanılan genel amaçlı çimentodur. Sülfat etkisine pek dayanıklı değildir. Ana bileşenleri oran olarak % 50 C_3S ,%25 C_2S ,%10 C_3A ,%9 C_4AF 'dir. [19]

- PÇ42.5 ve PÇ52.5 türü Portland Çimentoları normal Portland Çimentosuna oranla daha erken dayanım kazanan çimentolardır. Bunlar PÇ32.5'un 28 günde ulaştığı mukavemete 7 günde ulaşırlar. 1-2 gün içerisinde PÇ 32.5 çimentosunun 7 günlük mukavemetine eşdeğer mukavemet kazanırlar. Mukavemet kazanmadaki bu artış bileşimindeki C_3S miktarı arttırılarak

ve çimento daha ince öğütülerek sağlanır. Hidratasyon ısısı yüksek olduğu için kütle betonları, sıcak havada yapılan beton işleri için uygun değildir. Bu çimentolar erken kalıp alınması gereken yapı işlerinde prefabrik sektöründe ve tamir işlerinde kullanılır. Tipik ana bileşimleri % 55 C₃S ,%15 C₂S ,%10 C₃A ,%9 C₄AF'dir. [19], [2]

8.1.1. Beyaz Portland Çimentosu (BPC32.5)

Portland Çimentosuna gri rengi veren içindeki demir oksittir. Beyaz Portland Çimentosunun bileşiminde demir oksit çok az bulunmaktadır. Bunu sağlamak için beyaz rengi veren kil, beyaz kalker, yakıt olarak da fueloil kullanılır. Demir oksit ergitici özelliğinden dolayısıyla sinterleşmenin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlar. Bileşiminde demir oksit bulunmayan beyaz çimentonun bu yüzden daha yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi gerekir. Bu nedenle beyaz çimento daha pahalıdır. Mimari uygulamalarda ve daha çok kaplama işlerinde kullanılır. [19], [2]

8.2. Katkılı Çimentolar

8.2.1. Puzolan Katkılı Çimentolar

Puzolanlar yalnız başına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği göstermeyip çok ince öğütülerek Portland Çimentosuna karıştırıldıklarında bu çimentoya daha üstün nitelik kazandıran maddelerdir. Portland Çimentosunda serbest kireçte sulu ortamda reaksiyona girerek kalsiyum silikat bileşikleri oluştururlar. Puzolanlar, çimento klinkerine oranla daha ucuz olduğundan çimento bileşiminde klinkerin bir kısmının yerine puzolan kullanılması çimento maliyetinde önemli bir düşüş sağlar. Bütün puzolanların bağlayıcılık yeteneği (puzolanik aktivite) aynı olmadığından çimento bileşiminde puzolan miktarı amaca ve puzolanın özelliklerine göre değişir. Doğal puzolanlara Tras adı verilmektedir. Bunlar volkanik amaçlı esaslı kayaçlar olup Türkiye'nin geniş bölgesine dağılmış rezerv alanına sahiptir. Yapay olanları termik santrallerden elde edilen uçucu kül , Ferrokrom tesislerin bacalarından tutulan, yoğunlaştırılan mikrosilis, yüksek fırında demir cevheri üretilirken yine bir yan ürün olan cüruftur. Bunların içinde en kaliteli ancak az bulunan mikro silistir. [19], [2]

Puzolan katkılı çimentoların Portland Çimentosuna üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

1. Katkılı olarak kullanılan puzolan, hidratasyon sonucu ortaya çıkan serbest kireci bağladığından dolayı asitli ve CO₂'li suların etkisiyle çimentonun kimyasal dayanımını artırarak erimesini önler. Bu bakımdan su içerisindeki yapılar için Portland Çimentosuna oranla daha uygundur.

2. Bu çimentolarda hidratasyon ısısı ve bunun çıkış hızı düşüktür. Bu bakımdan kütle beton üretimi ve sıcak havada beton dökümü daha uygundur.

3. Geçirimsizlikleri daha azdır.
4. Dona dayanımlıkları daha fazladır.
5. Satış fiyatları Portland Çimentosuyla aynı olsalar bile üretimleri daha ucuzdur. [8]

Puzolan katkılı çimentoların Portland Çimentosuna göre sakıncaları şöyle sıralanabilir:

1. Portland Çimentosuna göre daha yavaş mukavemet kazanırlar.
2. Hidratasyon ısısı yavaş seyir ettiğinden soğuk iklimlerde iyi değildir.
3. Mukavemeti yavaş kazandığından bunla yapılan betonun daha uzun süre kalıpta ve hidratasyona uygun nem koşullarında saklanması lazımdır.
4. Puzolanların reaksiyon göstermesi için bunların Portland Çimentosunda n daha ince öğütülmesi gerekir.
5. Bu ince öğütme nedeniyle havanın nemiyle bozulması ihtimali daha yüksektir. [8]

Puzolan katkılı Portland Çimentolar katkı türüne göre şöyle sınıflandırır.

- Doğal puzolan (Tras) katkılı
- Cüruf katkılı
- Uçucu kül katkılı
- Doğal puzolan katkılı (Tras) çimentolar : TÇ 32.5

Bunlar ağırlıkça % 40 'a varan doğal puzolanlarıyla Portland Çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile üretilir. Tras'a örnek olarak Volkanik Küller, Opalli Şeyl ve Çert, Kalsine olmuş diyoton gösterilebilir. [8], [2]

8.2.2. Cüruf Katkılı Çimentolar

8.2.2.1. Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu

Yüksek fırın cüruf çimentolarının bileşimi normal portland çimentolarına benzer. Aradaki en önemli fark, bu tür çimentoya öğütme aşamasında granüle duruma getirilmiş bazik yüksek fırın cürufunun eklenmesidir. Bu tür çimentolarla ilgili olan Türk Standardı olan TS EN 197-1'de iki ayrı çimentodan söz edilmektedir, "Demir Portland Çimentosu, DNPÇ 350" ve "Yüksek Fırın Portland Çimentosu, NYPÇ 350". [2]

TS EN 197-1'e göre NDPÇ 350, en az %70 portland çimento klinkerine, en çok %30 bazik yüksek fırın cürufunun karıştırılmasıyla elde edilir. NPYÇ ise, %16-69 portland çimento klinkerine, %85-35 bazik yüksek fırın cürufunun karıştırılması ile elde edilir. Yüksek fırın cüruf çimentolarının normal portland çimentolarına oranla geçirimsizlikleri daha az olup, tuzlu suya ve endüstri dumanındaki gazların etkisine daha dayanıklıdır. Bütün bu nedenlerle bu tür çimentolar

su yapılarında, temellerde ve duman etkisine maruz elamanlarda, hidrasyon ısısının düşük olması nedeniyle masif yapılarda uygun olarak kullanılmaktadır. [8],[19]

8.2.2.2. Traslı Çimentolar

Traslar, silisli ve alüminli maddelerdir. Kendi başlarına bağlayıcı olmamalarına rağmen, betonda mevcut kireçle bu özelliği kazanırlar. Traslı çimentolar, imalat sırasında portland çimentosu klinkerine aktif volkanik tüfler veya bezeri traslar katılarak, bunların öğütülmesi ile elde edilir. Bu tür çimentolardan beklene özellikler, TS EN 197-1 de belirlenmiştir. Karışımdaki tras oranı %30-40 dolaylarında tutulur. [2]

Bu tür çimentoların da geçirimsizliği az hidrasyon ısısı düşük olduğundan, kütle betonları ve su yapılarında kullanılması tercih edilir. Traslı çimentoların simgesi TÇ'dur. [8],[19]

8.2.2.3. Alüminli Çimento

Alüminli çimentoların imalatı normal portland çimentolarından çok farklıdır. İmalatta ham madde olarak kullanılan kalker ve boksit karışımı, özel fırınlarda yüksek ısıda üretildikten sonra, büyük kütükler halinde dondurulur. Alüminli çimento bu kütüklerin öğütülmesi ile elde edilir. [2]

Alüminli çimentoların katılaşmaları yavaş olmasına karşın sertleşme, yani dayanım kazanma hızları çok fazladır. Bu tür çimento bir gün içinde portland çimentosunun 28 günlük dayanımına erişebilir. Çabuk dayanım kazanmalarının yanı sıra, alüminli çimento ile yapılmış betonların sülfatlara, yağ ve şekere dayanımı da diğer çimentolara oranla daha yüksektir. Ancak, bu tip çimentoların hidrasyon ısısı çok yüksek olduğundan, kütle betonlarda kullanılması sakıncalıdır. Dökülecek betonun kalınlığının 40-50 cm den fazla olduğu durumlarda özel önlem alınmalıdır. Ayrıca bu tür çimentolar sıcak iklimlerde kullanılmamalıdır. [8],[19]

8.3. Diğer Çimentolar

Yukarıda sıralanan çimento türlerine ek olarak, “Havalı Çimento”, “Geçirimsiz Çimento” ve “Genleşen Çimento” gibi türlere kullanılmaktadır. Havalı çimentonun içinde hava taşıyan katkı maddeleri bulunduğundan, bu çimento ile yapılan betonun donma-çözölmeye karşı direnci artar.

Geçirimsiz çimento, kalsiyum stearat, amonyum stearat gibi katkı maddeleri ile geçirimsizliği artırılmış bir çimento türüdür. Genleşen çimento, içine karıştırılan katkı maddeleri nedeni ile priz sırasında büzölme yerine genleşir. Rötire istenmeyen veya genleşmenin yeğlendiği durumlarda, özellikle onarım işlerinde kullanılır.

Tablo 4. Türk Standartlarına Göre Bazı Çimento Dayanımları [9]

Çimento Türü		Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)			Çekme Dayanımı (kgf/cm ²)		
		3 gün	7 gün	28 gün	3 gün	7 gün	28 gün
Portland Çimentosu	NPÇ350	-	300	350	-	22	28
	YPÇ 500	300	400	500	23	27	30
	IPÇ 600	400	500	600	25	30	35
Yüksek Fırın cüruf Çimentosu	NDPÇ 350	-	300	350	-	22	28
	NYPÇ 350	-	300	350	-	22	28
Traslı Çimento	TÇ	-	300	350	-	22	28

CEM I – Portland Çimentoları : Portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcılardır.

CEM II : Kütlece, A tipleri için en çok 20 kısım, B tipleri için 35 kısım puzolanik madde ve portland çimento klinkerinin, bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. Buradaki "puzolanik maddeler" deyimi, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmadıkları halde, ince olarak öğütüldüklerinde rutubetli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan maddeleri ifade etmektedir. Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretiminde yüksek fırınlarda oluşan ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösteren ve kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eden suni bir puzolandır. Uçucu kül ise, pulverize kömür yakılan fırınlardan atılan baca gazından, toz partiküllerinin elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülmesiyle elde edilen suni bir puzolanik maddedir. Silika fume (silis dumanı) katkısı, yüksek miktarda amorf silisyum dioksit ihtiva eden çok ince küresel partiküllerden oluşan suni bir puzolanik maddedir.

Portland Kompoze Çimento : Portland kompoze çimento, çeşitli oranlarda portland çimentosu klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

CEM III – Yüksek Fırın Cürufu Çimento : Yüksek fırın cürufu çimento, % 36 ile %95 arasında belirtilen oranlarda cürufun ve portland çimentosu klinkerinin , priz düzenleyici olarak kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır.

CEM V – Kompoze Çimento : Kompoze çimento, çeşitli oranlarda portland çimentosu klinkeri

ve katkı maddelerin priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. TS EN 197 standardı çıktıktan sonra özel amaçlı üç çimento standardı dışındaki bütün eski Standardlar yürürlükten kaldırılmıştır. Bu üç standard TS EN 197 -1'de Beyaz Portland Çimentosu , TS EN 197'de Harç Çimentosu ve TS EN 197'de Sülfatlara Dayanıklı Çimento standartlarıdır. Yürürlükten kaldırılan genel amaçlı çimentoların eşdeğerleri yeni standartta kapsamaktadır.

Sülfatlara Dayanıklı Çimento : C_3A miktarı en çok %5 olan portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı ilavesi ile öğütülerek elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

Beyaz Portland Çimentosu : Bu çimento gerçekte bir portland çimentosudur, gri renkli çimentodan yalnızca renginin beyaz olmasıyla fark eder. Bu tür çimento esas olarak mimari amaçlarla kullanılır. En çok kullanılan çimento tipleri Portland Kompoze Çimento, Katkılı Çimento, Cürufu Çimento ve Sülfata Dayanıklı Çimento'dur, bunun dışında özel amaçlar için Beyaz Portland Çimentosu, ve diğer bazı tip çimentolar kullanılmaktadır. Normal betonda agrega taneleri en sağlam unsur olduğundan diğer iki unsur (çimento hamuru ve aderans) mukavemeti belirlemektedir. Çimento hamurunun mukavemeti önemli ölçüde su/çimento oranına da bağlıdır. [2],[9],[8],[19]

9. Geleceğin Çimentoları

Gelecekte normal çimentosuna ilaveten çimento türlerinde beklene gelişme ve yeniliklerden bazılarını şöyle sıralayabiliriz.

9.1. Mineral Katkılı Çimentolar

Mineral katkılı çimentolar betonda düşük hidratasyon ısısı, geçirimsizlik ve dayanıklılık gibi özellikleri kontrollü bir şekilde sağlarlar. Ayrıca, maliyete ilaveten hammadde ve enerji tasarrufu, azalan gaz emisyonları, endüstriyel atıkların kullanımı gibi çevresel avantajları vardır. Yeni çimento standardı TS EN 197-1 iki ve daha fazla sayıda katkılı olanlar dahil bu tür çimentoları geniş bir şekilde kapsamaktadır. [2]

9.2. Fillerli Çimentolar

Silisli veya kalkersi bileşimde katkılar klinkerle birlikte öğütülerek elde edilebilirler. Harç ve betonda işlenebilme, rötre, dayanım gibi özellikleri olumlu etkiler.

9.3. Beyaz ve Renkli Çimentolar

Ham maddeleri özel olarak seçerek prosesi değiştirmeden beyaz klinker ve renklendirici katkılarla renkli çimentolar elde edilebilir. Bu tür çimentolar çeşitli mimari uygulamalarda kullanım bulmaktadır. Beyaz çimento taşıyıcı betonda da kullanılmaya başlamıştır.

9.4. Yüksek Dayanımlı (Performanslı) Çimentolar

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları klinkerle birlikte öğütülürler. Bu çimentolar doğrudan yüksek dayanımlı (performanslı) beton yapımında kullanılabilirler.

9.5. Kontrollü Tane Boyu Dağılımlı (KTBD) Çimentolar

Çimentoda tane boyu dağılımı ayarlanarak tanelerin çoğunluğunun 5-30 mikron bölgesinde kalması sağlanır. Erken dayanımı hızla kazanır, mineral katkı kullanımına daha fazla olanak sağlar.

9.6. Alkali- Silika Reaksiyonu (ASR) Dirençli Çimentolar

Agrega kaynakları azaldıkça reaktif agreganın kullanımı zorunlu hale gelmektedir. ASR ileri yaşlarda betonda çatlamlara yol açar. Bu nedenle klinkeri lityum bileşikleri ile öğütülerek elde edilen ASR dirençli çimentolar üzerinde çalışılmalıdır.

9.7. Gecikmeli Etrenjit Oluşumuna (GEO) Dirençli Çimentolar

GEO ısı kaynaklı iç sülfat etkisidir. Betonda hacim genleşmesi ve çatlama yapar. Buna karşı alkali, sülfat ve magnezyum içerikleri sınırlandırılmış, özgül yüzeyi azaltılmış, mineral katkıları çimentolarda direnç sağlanabilecektir.

Geleceğin çimento standartları da şimdiden şekillenmeye başlanmıştır. TS EN 197-1 ve Amerika'da ASTM C 1157 gibi standartlar ayrıntılı olarak çimento özelliklerini sınırlamaktan ziyade beklenen performans üzerinde durmakta, çimento bileşiminde üreticiyi oldukça serbest bırakmaktadırlar. [2], [4], [10]

10. Çimentoların Teknik Özellikleri

Teknik ve sanayide çimentoların özellikleri aşağıdaki denemeler yardımı ile bulunur ve saptanır. Bu özelliklerin bir kısmı, sayı değerleri halinde, standartlarda saptanmış olup resmi norm olarak kabul edilmiştir. Ülkemizde kabul edilen normlar şunlardır: Hidrolitik modül (Türkiye'de bu değer $\text{CaO/SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 1.7$ olarak kabul edilmiştir.), Özgül ağırlık, Donma süresi, Çekme ve basınç karşı direnç. Bunların bulunuşuna ait denemelerin de ne şekilde yapılacağı en ufak detaylarına kadar ayrıca açıklanmış ve saptanmıştır. Başka bir deyimle, bu metotlar tamamen standarttır. [2], [3]

Bunlardan başka, permaabilite (geçirgenlik), absortion, adhesion v.s. gibi bir takım özelliklerde vardır ki, şimdilik bir çok standartta bulunmamaktadır. Ama bu hususların bilinmesi pratik ve teknik bakımından çok faydalıdır. [8]

10.1. Özgül Ağırlık

Özgür ağırlığın saptanmasında amaç çimentoya yabancı madde katılıp katılmadığının anlaşılmak istenmesidir. Bir cismin özgül ağırlığı, o cismin belirli bir hacmi ağırlığının eşit hacimde saf suyun ağırlığına olan oranıdır.

Çimento gibi toz halindeki cisimlerin özgül ağırlıklarının saptanmasında volumenometre denilen özel kaplar kullanılır. Yukarıdaki tariftten de anlaşıldığı gibi, yapılacak işin prensibi, belirli ağırlıkta (63 gr veya 100 gr) çimentonun hacmini saptamaktan ibarettir. [17],[19],

10.2. Yoğunluk

Yoğunluğun buradaki anlamı belirli bir hacim kaplayan belirli incelikteki çimento tozunun ağırlığıdır. Bunu gösteren, çimentonun özelliğini belirten bir değer olmaktan çoktan çıkmıştır. Ancak, beton ve harç karışımlarının hacim oranları hesabına girdiğinden inşaat işi için yararlıdır.

Çimento gibi toz halinde bir cismin belirli bir hacminin, örneğin ünite hacminin ağırlığı, tanelerin iriliğinde, yerleşirken sıkışıp sıkışmamış olduğuna göre çok değişir. Bu bakımdan tanelerin inceliği ve hacmi, belirli bir kaba ne şekilde doldurulacağı standartlarda belirtilmiştir. [20],[19]

10.3. Donma Süresinin Bulunuşu

Çimento ve tüm hidrolik bağlayıcıların donma süresi(başlangıç ve sonu) Vicat cihazı veya Vicat iğnesi denilen alet yardımıyla bulunur. Saf çimentonun Tük normlarına göre 300 gr çimentoya %25-30 oranında su katılarak deney numunesi hazırlanır. Harcın yapılması ile başka bir değişle çimentonun su ile karıştırıldığı andan itibaren iğnenin cam levhaya (numunenin altında kalan, tabandaki levha) 5-7 mm kalıncaya kadar inmesi arasında geçen zaman donma başlangıcını gösteren süredir. Donma sonu süresi ise, harcın yapıldığı andan iğnenin harcın içine 1mm den fazla giremeyeceği ana kadar geçen süredir. [3]

Bu deneme yapılırken ısıнын saptanması ve yazılması şarttır. Çünkü, ısıнын donma üzerindeki etkisi önemlidir. Denemenin yapıldığı yerin ısıısı 18-20 ºC arasında olmalıdır. Türk normlarına göre, yukarıdaki protokol uyarınca yapılacak deneme sonucunda, normal bir portland çimentosu 1 saat tan evvel donmaya başlamamalı ve 12 saatte de donma sona ermelidir. Son yıllarda bir çok ülkede donma sürelerinin bulunması için çok daha duyarlı

metotların uygulanmasına başlanmıştır(Örneğin iletkenliğin değişmesine dayanan elektro metrik metot gibi). Fakat bu metotlar ülkemizde henüz kabul edilmemiştir. [8],[19]

10.4.Hacim Değişmezliği

Donma ve sertleşme teorilerinde hidratlaşma süresinde bazı hacim genişlemeleri olduğunu, buna karşılık koloidal kısımların kuruma devresinde büzüldüğü kabul edilmiştir. Aslında çok belli olmayan bu genişleme veya şişme ve büzülme olayları birbirini yok eder: Ve sonuç olarak, iyi bir çimentonun hacmi donduktan sonra, değişmemeli veya pek az değişiklik göstermelidir. Bu durumun yapının sağlamlığı açısından ne kadar önemli bir etken olduğu ortadadır. Kötü çimentolarda hidratlaşma devresi çok uzun sürer bazen haftalarca veya aylarca sürebilir. Bunun nedenleri çeşitlidir: Tanelerin inceliği, kimyasal bileşimin uygun olmayışı ve özellikle serbest kireç, magnezyum oksit ve sülfat oranlarının aşırı yüksekliği büyük hacim değişiklikleri meydana getirir. [3]

Şişme veya kabarma ve büzülme olaylarının, donmuş çimentonun su ile karşılaşması ile yakından ilgilidir. İşte hacim değişmezliğinin saptanmasına yarayan denemeler, suyun donmuş çimento üzerindeki etkisini zorlama ve hızlaştırma aslına dayanmaktadır. [8],[19]

10.5. Tanelerin inceliği

Klinkerin ince öğütülmesi çimentoluk veya bağlayıcılık özelliğinin artmasını iki şekilde etkiler: İnce bir tozun harcı kum vs. tanelerini daha iyi örter ve kaplar, ve dolayısıyla harcı meydana getiren komponentlerin daha sıkı bir karışım halinde olmalarını sağlar. Bundan başka,su ile çimento arasındaki reaksiyonlar taneciklerin yüzeyinde olduğundan bu yüzeyler reaksiyon ürünleri ile örtülerek suyun içeri girmesine engel olur,veya hiç değilse reaksiyonu ağırlaştırır ve zorlaştırır.

Bu bakımdan,çimento normlarında, tanelerin inceliğinin saptanması zorunlu görülmüştür. Bu konuda izlenecek metodun prensibi, çimentoyu standart elekten geçirmek ve kalanı tespit etmekten ibarettir. Elekler bir çok standart ta farklı değerler almışlardır.

Türk standartlarına göre, bu protokol gereğince yapılacak denemeler sonucunda, çimento cm^2 de 900 göz bulunan elekte % 1 den keza cm^2 de 4900 göz bulunan elekte %14 den fazla artık bırakmayacak derecede ince öğütülmüş olacaktır. [8],[19]

Tablo 5. Bazı Ülkelerde Kullanılan Elekler [8]

Ülkeler	Teller arasındaki Açıklık (μ)	Göz Veya Delik Adedi	Elek No.
Avrupa (Türkiye dahil)	200	900/ cm^2	20
	88	4900/ cm^2	70
İngiltere	211	5184/ cm^2	72
	89	28900/in ²	170
U.S.A	74	200 lin/in	200

10.6. Mekanik Direnç

Pratik bakımından çimentonun en önemli özelliklerinden biri olan direncin tayini için yapılan denemelerin doğru ve manalı sonuçlar verebilmesi, ancak standart deney şartlarına azami derece de riayet etmekle mümkündür. Direnç denemeleri, çimentoların çekmeye ve basınca karşı gösterdikleri dirençlerin tayini için yapıldığına göre iki kısma ayrılır. Bu denemeler saf çimento üzerinde değil, belirli şekilde hazırlanmış standart harç üzerinde yapılır. Bu deneylerin yapılışı Türk Standartları Enstitüsünde verilmiştir. [8]

Tablo 6. Normal ve Çabuk Sertleşen Portland Çimentolarının Çekme ve Basınç Dayanımları [8]

Çimentonun Cinsi	Çekme Direnci (kg/cm^2)				Sıkışmaya Karşı Direnç (kg/cm^2)			
	3 gün	7 gün	28 gün	28 gün	3 gün	7 gün	28 gün	28 gün
Normal Portland	-	22	27	32	-	300	350	400
Ç.Sertleşen Portland	28	-	34	42	350	-	425	525

11. Türk Standartlarında Çimentolarla İlgili Muayene Metotları

Türk standartlarında çimentolarla ilgili muayene metotları iki şekilde yapılmaktadır.

11.1. Fiziksel muayene metotları

- Çimento hamuruna gerekli olan su miktarı tespiti. TS EN 197-1'e göre tayin edilir. Vicad aleti yardımıyla deney yapılır.
- Priz'in başlama ve sona erme sürelerinin tespiti. TS EN 197-2'ye göre tayin edilir. Vicad aleti yardımıyla yapılır.
- Çimento inceliğinin saptanması. TS EN 197-2'ye göre tayin edilir. Blaine metodu ile yapılır.

- Hacim sabitliğinin muayenesi. TS EN 197-2'ye göre tayin edilir.
Le Chatelier (Lö Şatöliye) metodu yardımıyla bulunur.
- Özgül yoğunluk deneyi. TS EN 197-2'ye göre tayin edilir.
Çimentonun özgül ağırlığı volumetre denilen basit bir aletle kolaylıkla bulunur.
- Birim ağırlık deneyi
Çimentonun birim ağırlığı, 1 litrelik kabı belirli koşullar altında duran çimentonun ağırlığıdır. Bu karakteristik 0,9-1,2 kg/dm³ arasında değişir. [8],[19]

11.2. Mekanik Deneyler

Çimentonun basınç ve eğilme mukavemetlerinin saptanması için bu malzeme üzerinde mekanik deneyler yapılır. yalnız hemen belirtelim ki bu deneyler saf çimento hamuru üzerinde gerçekleştirilemez. Bu maksatla belirli koşullarda çimentoya kum karıştırılarak elde edilen harç, basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulur.

11.3. Kimyasal muayene metotları

- Magnezyum oksit miktarının tayini. TS EN 196-2'ye göre tayin edilir.
- Sülfat asidi anhidridi (SO₃) tayini. TS EN 196-2'ye göre tayin edilir.
- Çözünmeyen kalıntı miktarı tayini.

105° C kurutulmuş 2 gram numune üzerine 250 cm³'lük bir beherde 100 cm³ soğuk su ve daha sonra 25 cm³ (d=1.19) 1/1'lik HCl katılır. Çözelti rengi sarı oluncaya kadar kısa bir süre kaynatılır. Sıcak çözelti hemen süzülür. Sıcak suyla klorür reaksiyonu vermeyinceye kadar yıkanır. Süzgeç kağıdı ile birlikte çökelti 250 cm³'lük bir kapsüle alınır, üzerine 100 cm³ (50 g/l) Na₂CO₃ çözeltisi katılır. 15 dakika kaynatılır. Kaynar durumda süzülür, 1/1'lik sıcak HCl ile ve sonunda damıtık su ile yıkanır, 900-1000° C de kızdırılır ve tartılır.

Çözünmeyen madde miktarı = $P \times 100 / 2$ 'dir.

P= Deney sonunda tartılan madde miktarı.

- Kızdırma kaybı

TS EN 196-2'ye göre tayin edilir. [18]

12. DENEYSEL ÇALIŞMA

12.1. Giriş

Fırından çıkan klinkerin öğütülmesi sonucu çimentoyu oluşturan ve boyutları genel olarak 90 μ 'dan küçük olan taneler elde edilir. Genel olarak çimentolarda 90 μ 'dan büyük tanelerin miktarının % 14'den fazla olmaması istenir. Tane boyutları ise bazı durumlarda 1 μ 'a kadar inebiliyorsa da genellikle tanelerin 2,5 μ 'dan büyük olduğunu belirtmek mümkündür.

Çimentoların bağlayıcılık özelliğini arttırmada incelik iki açıdan önemlidir. Birincisi; inceliği fazla olan çimento, agrega tanelerini, inceliği az olandan daha iyi ve devamlı bir şekilde kaplar. Çimentonun agrega tanelerini devamlı bir şekilde kaplaması ile bağlayıcı madde ile agrega arasında iyi bir aderans sağlar ve betonun dayanımını artırır. İkincisi; inceliğin artması ile su ile reaksiyona giren çimento tanelerinin toplam yüzeyinde önemli bir artış meydana gelir. Bundan dolayı hidratasyon olayının hızı veya belirli bir süre içinde meydana gelen hidrate elaman miktarı artar.

Pratik bakımdan, boyutları 100 μ 'dan büyük olan çimento taneleri hidratasyon olayına katılmaz. Genel olarak tane boyutları 10-24 μ arasında bulunan çimentoda hidratasyon hızlı bir şekilde gelişebilir ve bağlayıcı madde dayanımı büyük değerler alabilir. 10 μ 'dan küçük tanelerin çimento içinde bekli oranlarda bulunması bağlayıcı maddenin dayanımını arttırdığı gibi taze betonun plastik olmasını ve yeterli derecede geçirimsizlik elde edilmesini sağlar. Boyutu 1 μ 'dan küçük olan taneler su ile temasa geçer geçmez (karıştırma işlemi sürdürülürken) hidrate oldukları için betonda bağlayıcılık görevini yerine getirememektedirler. Bu nedenle, çimento içinde çok ince tanelerin bulunması zararlı olabilmektedir.

Genel olarak özetlenecek olursa;

- Çimento taneleri 2,5 -90 μ arasında olmalıdır,
- Boyutu 20 μ 'dan küçük olan taneler dayanım kazanmada başlıca etkindir,
- Boyutları 5 μ 'dan küçük olan taneler prizın çabuk olmasına neden olurlar,
- Boyutları 50 μ 'dan büyük olan taneler ise tamamen hidrate olmamaktadırlar.

Çimento inceliği hakkında bilgi veren diğer bir karakteristik de özgül yüzey miktarıdır. Bu karakteristik ile 1 gram çimento içinde bulunan tanelerin cm^2 cinsinden toplam yüzey alanı anlaşılmaktadır. Bir çimentonun özgül alanının büyük olması çok ince öğütülmüş olduğunu ifade eder. Özgül alanının fazla olması ile su ile temasa geçen çimento tanelerinin yüzeyi fazla olmakta ve bu da bağlayıcı maddenin priz ve sertleşme olaylarını olumlu yönde etkilemektedir.

Çimentonun içinde bulunan zararlı maddeler doğrudan doğruya hacim sabitliğini bozan maddelerdir. CaO, MgO ve SO_3 bunlara örnek olarak gösterilebilir. CaO ve MgO'nun ısı ile yaptıkları reaksiyon sonunda önemli bir hacim artışı meydana getirir. MgO'nun fazla miktarda bulunması, bir bakıma CaO'ya göre daha tehlikelidir. Zira, sönmemiş kirecin reaksiyonu kısa zamanda sona ererken MgO'nun reaksiyonu ise yavaş bir seyir izleyerek yıllarca sürebilir.

Hacim sabitliği özelliği üzerinde zararlı etki yapan üçüncü madde de SO_3 'tür. SO_3 , sülfoalüminat tuzunu meydana getirerek önemli ölçüde hacim artışına neden olur.[7]

Bu çalışmada farklı üç üretim bölgelerinden alınan PÇ 42,5 R ve PÇ 42,5 N çimentoları kullanılmıştır.

C_1 = CEM I PÇ 42,5 N

C_2 = CEM I PÇ 42,5 N

C_3 = CEM I PÇ 42,5 R

Tablo 7: Deneylerde Kullanılan PÇ 42,5 N ve PÇ 42,5 R Çimentolarının Özellikleri [20], [21]

Çimento Tipi	CEM I PÇ 42,5 N	CEM I PÇ 42,5 R
Çözünmeyen Kalıntı (%)	$\leq \%5.0$	$\leq \%5.0$
Kızdırma Kaybı (%)	$\leq \%5.0$	$\leq \%5.0$
MgO (%)	$\leq \%5.0$	$\leq \%5.0$
SO_3 (%)	$\leq \%3,5$	$\leq \%4$
K_2O (%)	$\leq \%3,5$	$\leq \%4$
Cl (%)	$\leq \% 0,10$	$\leq \% 0,10$
Kütlece CO/SiO ₂	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$
Priz Başlama(Dakika)	≥ 60	≥ 60
Genleşme (mm)	≤ 10	≤ 10
2 Günlük Dayanım	≥ 10	≥ 20
28 Günlük Dayanım	42,5 $\leq$ ---- $\leq$ 62,5	42,5 $\leq$ ---- $\leq$ 62,5

12.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları

Çimentoların eğilmede çekme ve basınç dayanımları mekanik deney yöntemleriyle saptanmaktadır. Bu yöntemlerde, üretimi izleyen 28. günde bulunan eğilmede çekme ve basınç dayanımı çimento kalitesini belirlemede en önemli gösterge olarak kabul edilmektedir.

Çimento hammaddelerinin kompozisyonu ve miktarları, çimento kompozisyonunu etkileyen önemli faktörler olmaktadır. Ana bileşenlerin oranları, çimento ve betonların hidratasyon hızını, hidratasyon ısısını, dayanım kazanma hızını ve dayanım miktarını etkilemektedir.

Çimento kompozisyonu dışında, çimentoların çok önemli fiziksel özelliği olan tane boyutu ve tane dağılım oranları da harç ve betonların mekanik dayanımlarının miktar ve hızını etkileyen önemli faktörlerdir. Çimento inceliği, hidratasyon hızını ve miktarını etkilediğinden hidratasyon ısısının açığa çıkma hızı ve hidratasyon ürünlerinin meydana gelmesi de çimento inceliği tarafından önemli derecede etkilenmektedir. Bu nedenle çimento tipleri arasında önemli mekanik dayanım farkları olabilmektedir.

Toz çimento tanelerinin çapı 1-200 μm arasında değişiklik göstermektedir. Büyük çoğunluk 20-30 μm arasındadır. Taneler ne kadar ince olursa tanenin hidrate olacak bölümü o kadar fazla olur. İri bir tane içinde suyun difüzyonu yeterli düzeye varmaz , tanenin orta kısmı hidrate olmamış kalır. Çimento tanesinin hidratasyonu dıştan merkeze doğru gelişir ve 90 günde %95 oranında tamamlanır. Bu süre içerisinde 5,2 μm 'lık kısmın hidrate olduğu gözlemlenmektedir. Yani çapı 10 μm olan tane tümü ile hidrate olurken, çap daha büyükse orta kısım hidrate olmadan kalmakta ve istenilen dayanım sağlanamamaktadır. [5]

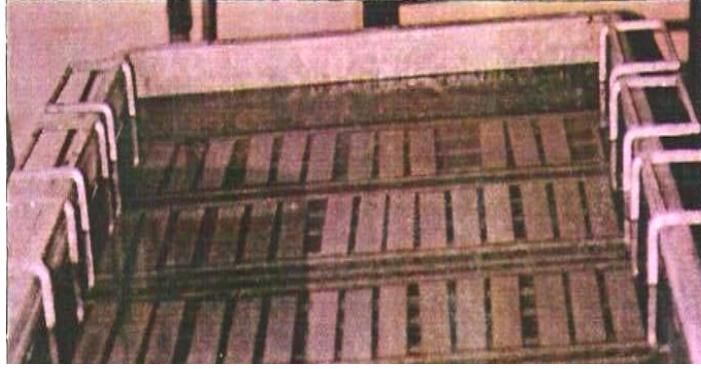
Çimentoların kimyasal özelliklerinin mekanik dayanımlara etkisi, çimento ve su birleştirildiği takdirde her bileşenin ayrı ayrı hidratasyon yapması ve reaksiyonların birbirinden farklı olmasından dolayı değişik olmaktadır. Trikalsiyum alüminatın su ile birleşmesi sonucu çok hızlı ve şiddetli bir reaksiyon meydana gelmektedir. Bu şiddetli reaksiyona bağlı olarak, çimentoda çok çabuk katılaşma olmakta, taze betonun kullanılması ve betonun bağlayıcılık kazanması engellenmektedir. Bu durumu önlemek için üretim esnasında çimentoya bir miktar alçı taşı katılmaktadır. Trikalsiyum silikat pratikte harç ve betonların erken yüksek dayanım kazanmasında önemli rol oynayan bileşendir (özellikle 28 güne kadar). Çünkü, C_3S yüksek hidratasyon ve ısı kazanımına sahiptir. Çimentonun dayanım kazanmasında önemli bir bileşende C_2S 'dir. Dikalsiyum silikat hızı ve ısısının düşük olması nedeniyle dayanım kazanımın ağır olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, dikalsiyum silikat uzun dönem dayanım kazanılmasında en önemli rolü oynayan bileşendir (betonun dayanımı içindeki katkısı 28 gün ve ileri yaşlardadır).

Çimentoların kimyasal bileşiminin mekanik dayanım kazanma üzerine başka bir etkiye şekli de ana bileşenlerin hidratasyon olayı sonunda oluşturdukları cisimlerin farklı iç yapıya sahip olması ve miktarının değişik olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu, C_3A 'nın hidratasyonu sonunda meydana gelen hidrate elamanın, C_3S 'nin oluşturduğu hidrate elamandan daha fazla boşluk ihtiva etmesi ve dayanımının daha düşük olması şeklinde açıklamak mümkündür. Trikalsiyum alüminatın hidratasyon hızı ve ısısının yüksek olması ile ilk yaş dayanım kazanılmasında (ilk saatlerde ve ilk gün içerisinde) küçük bir miktar katkıda bulunmakla birlikte çimento için en tehlikeli bileşen olmaktadır. tetra kalsiyum alüminoferritin su ve alçı ile birleşmesi sonucunda elde edilen özellikler, C_3A 'nın sonuçlarına benzer fakat daha az etkilidir. Ancak C_4AF 'nin çimento içindeki oranı çok küçük olduğundan sonuç üzerindeki rolü pek fazla değildir. [5]

Toplam kalsiyum silikat miktarı yaklaşık olarak aynı kalarak fakat C_3S ve C_2S bileşenlerini değiştirerek farklı özelliklerde çimento tipleri üretmek mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak C_2S ve C_3S arasında şöyle bir ilişki kurulabilir:

Dikalsiyum silikat bileşeninin çimentonun bağlayıcılık özelliğine katkısı ilk günlerde az fakat ileri yaşlarda çok yüksektir. Trikalsiyum silikat bileşeni ise , ilk yaşlarda yüksek olmak üzere ileri yaşlarda da çimentonun bağlayıcılık özelliğini arttırmaktadır. [18]



Resim 1: 4x4x16 cm Boyutlarına sahip standart prizma numuneler



Resim 2: Karışım makinesi



Resim 3: Eğilmede-çekme ve Basınç deney aleti

12.2.1. Deney Yöntemi

Sertleşmiş harç numunelerinde eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri, Türkiye ve birçok Avrupa ülkesinde ‘RİLEM CEMBUREAU’ metodu denilen ve TS EN 196-1 ‘Çimento Deney Metotları Dayanım ‘ isimli standart da tarif edilen yöntemle göre yapılmış olup, her karışımdan alınan üç adet numunenin matematiksel ortalaması alınmıştır. Bu yöntemle göre malzemeler 3 kısım standart kum (1350 gr), 1 kısım çimento (450 gr) ve ½ kısım su dan (225 gr) meydana gelmektedir. Rilem Cembureau kumunun tanecik büyüklüğü dağılımı aşağıdaki gibidir. [19]

Tablo 8 : Rilem Cembureau Kumunun Tanecik Büyüklüğü Dağılımı [19]

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan %
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±5

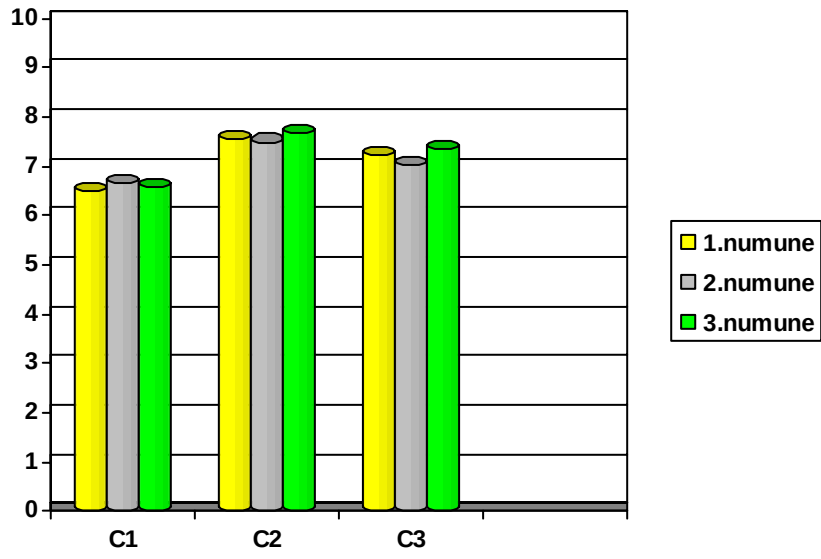
Malzemeler TS EN 196-1 de belirtilen özelliklere uygun bir karışım makinesi kullanılarak karıştırılır. Karıştırılan numuneler 4x4x16 cm boyutlarına sahip standart prizma kalıplarına sarsma tablası ile sıkıştırılarak yerleştirilir. Numunelerin yüzeyi çelik masterla düzeltilerek %90 nisbi nem ve 20±1 C⁰ sıcaklığa sahip bir ortamda 20-24 saat süre ile bekletilir. Bu sürenin sonunda kalıplar sökülür, çıkarılan harç prizmaları, 20±1 C⁰ sıcaklıkta bir kür havuzunda deney yaşına kadar bekletilir. 28 gün sonra kür havuzundan çıkarılan numunelere önce eğilme testi uygulanır ve bu yolla numuneleri hem eğilmede çekme dayanımları bulunur hem de numuneler ikiye bölünmeleri de sağlanır. Numuneler 100 milimetrelik desteğe oturtulur. Sonra üstten numunenin üst tarafına gelecek şekilde ayarlanan basınç parçacığı vasıtasıyla numune kırılincaya kadar basınç uygulanır. Burada yükleme hızı (50±10 N/s) olacak şekilde ayarlanır. Eğilmede çekme dayanımı $R_f = 1,5 F_f L / b^3$ ilişkisinden hesaplanmaktadır. Formülde (P) uygulanan kuvvet, (L) mesnetler arası mesafe (L=10 cm), (b) numune kesitinin kenar uzunluğu (b= 4 cm)'dir. Üç numune için ayrı ayrı bulun değerlerin ortalaması alınır. [19]

Her karışımdan üçer adet alınan standart harç prizmaları eğilme testine tabi tutulup yaklaşık ortalarından kırılmaları sonucu altı adet 4x4x8 cm boyutunda prizma numuneler meydana gelmektedir. Her yarım prizmatik numune özel olarak kırma başlığına yerleştirilir ve yükleme hızı 2400±200 N/s olacak şekilde yük uygulanır ve numune kırılincaya kadar devam

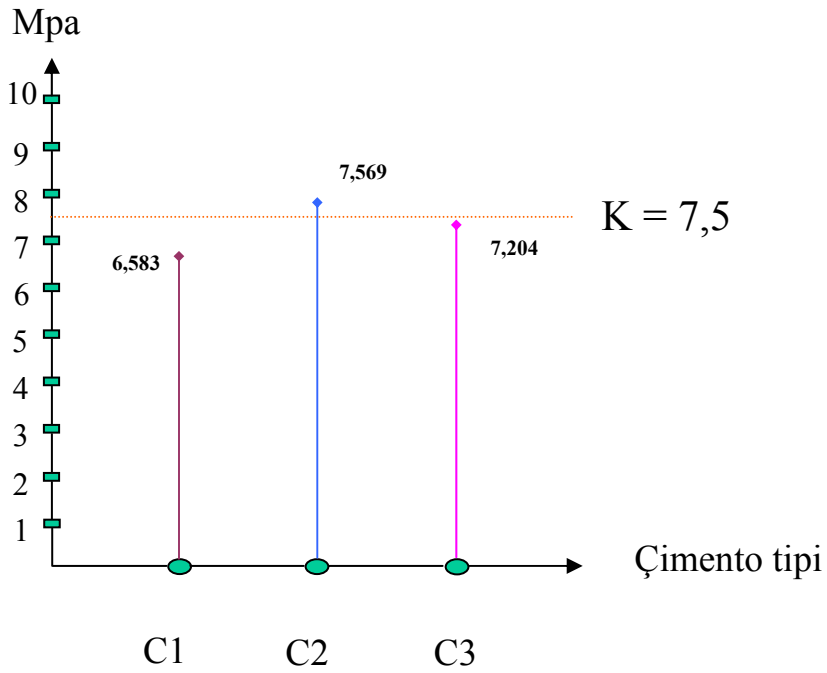
edilir. Kırma başlıkları arasındaki yarım prizma 4x4x4 cm'lik bir küp etkisi göreceğinden, basınç dayanımı $R_c = F_c / 1600$ bağlantısından bulunmaktadır. Bağlantıda F_c uygulanan kuvvet, 1600 ise 40x40 mm demektir. Bu deney sonucunda farklı çimento fabrikalarında alınan numunelerin 28 günlük eğilmede çekme ve basınç değerleri sonuçları tablo9 ve tablo 10'da verilmiştir. [19]

Tablo 9 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı.

Çimento Tipi	Eğilmede Çekme Dayanımı (28 Günlük) Mpa				K(ort) = 7,5 Mpa
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama	
C ₁	6,501	6,661	6,586	6,583	
C ₂	7,554	7,490	7,664	7,569	
C ₃	7,243	7,017	7,351	7,204	
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı çimento fabrikalarından alınan ürünleri belirtmektedir.					



Şekil 4: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük Eğilmede çekme dayanımının grafiksel gösterilimi.

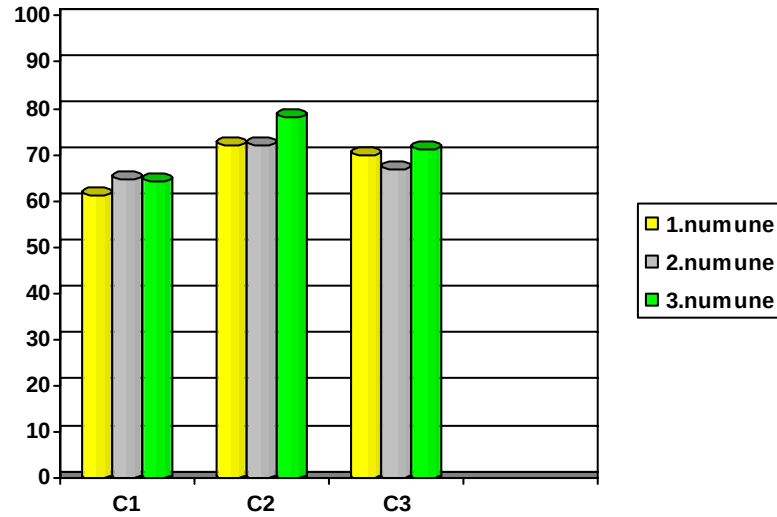


Şekil 5: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük Eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması.

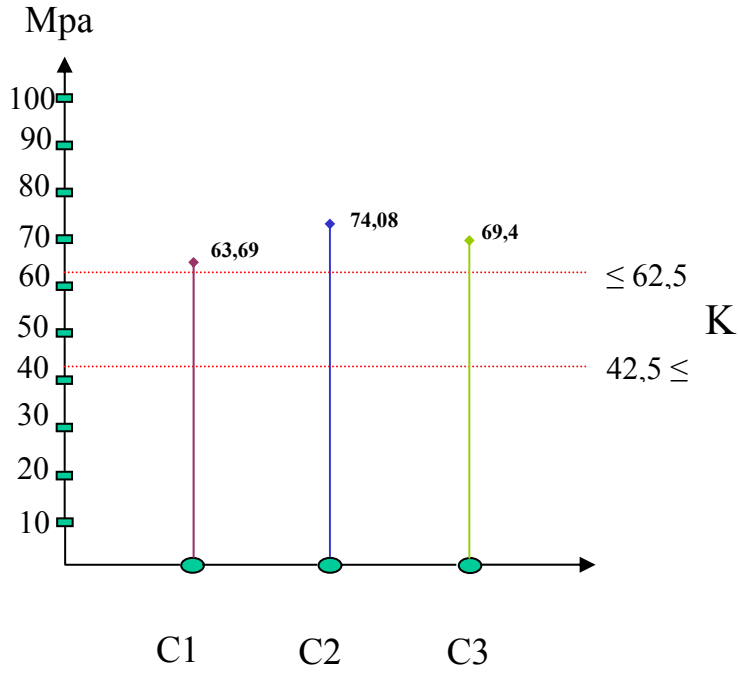
Tablo 10 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımı.

Çimento Tipi	Basınç Dayanımı (28 Günlük) Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
C ₁	61,36	64,85	64,25	63,69
C ₂	72,23	71,88	78,13	74,08
C ₃	69,87	66,97	71,36	69,4
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı çimento fabrikalarından alınan ürünleri belirtmektedir.				

42,5 ≤ K(ort) ≤ 62,5



Şekil 6: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılmasının grafiksel gösterimi.



Şekil 7: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

12.2.2. Deney Sonuçları

28 günlük numunelerde en düşük eğilmede çekme ve basınç dayanımları C_1 çimentosunda, en yüksek eğilmede çekme ve basınç dayanımları ise C_2 çimentosunda görülmüştür. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

Trikalsiyum silikat pratikte harç ve betonların erken yüksek dayanım kazanmasında önemli rol oynayan bileşendir (özellikle 28 güne kadar). Çünkü, C_3S yüksek hidrasyon ve ısı kazanımına sahiptir. C_2 ve C_3 çimentolarında trikalsiyum silikat(C_3S) miktarı fazladır, C_2S miktarı düşüktür. Ayrıca C_2 ve C_3 çimentolarında alçı taşı miktarı da azdır, denilebilir. Çünkü çimentoya alçıtaşı katılmadığı zaman C_3A çok hızlı bir hidrasyona girer ve priz çok hızlı bir şekilde gelişir. Çimentonun dayanım kazanmasında önemli bir bileşende C_2S 'dir. Dikalsiyum silikat hızı ve ısısının düşük olması nedeniyle dayanım kazanımının ağır olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, dikalsiyum silikat uzun dönem dayanım kazanılmasında en önemli rolü oynayan bileşendir (betonun dayanımı içindeki katkısı 28 gün ve ileri yaşlardadır). C_1 çimentosunda ise C_2S miktarı fazladır, C_3S miktarı ise azdır. Bunun sonucunda 28 günlük dayanımı düşük çıkmıştır.

Çimento iç yapısı dışında, çimentoların çok önemli fiziksel özelliği olan tane boyutu ve tane dağılım oranları da harç ve betonların mekanik dayanımlarının miktar ve hızını etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenlerden dolayı her üç çimentoda da farklı dayanım değerleri ortaya çıkmıştır.

Boyutu 20 μ 'dan küçük olan taneler dayanım kazanmada başlıca etkindir. Bundan dolayı C_1 çimentosunun içindeki tane dağılımında 20 μ 'dan küçük tane miktarı az olabilir.

Dayanımlarda çimentonun kompleks bileşenlerinin oranı kadar, kristal şekilleri ve yapıları da önem taşır. Üst üste plakalar halinde kristallenmiş C_3S içeren çimentoların basınç dayanımları yüksek olur. Prizmatik iğneler halindeki C_3S kristallerini içeren çimentoların ise çekme dayanımları daha yüksektir. Hammaddeden gelen Cr_2O_3 , P_2O_5 gibi eser maddelerin C_3S yada C_2S kristallerinin bünyesine girmeleri dayanımları değişik şekillerde etkiler. Hammadde dizaynı kadar pishirim ve soğutma işlemleri de dayanım üzerinde rol oynamaktadır. Ayrıca soğutmanın hızlı olması da başka bir etkindir. Bu nedenlerden dolayı, 28 günlük numunelerde en düşük eğilmede çekme ve basınç dayanımları C_1 çimentosunda, en yüksek eğilmede çekme ve basınç dayanımları ise C_2 çimentosunda görülmüştür.

Burada üzerinde durulması gereken en önemli husus TS EN 196-1 de dayanım sınırları $42,5 \leq K(ort) \leq 62,5$ olarak belirtilmesine rağmen her üç çimentoda da üst sınır aşılmıştır. Bu olaya neden olarak gösterilecek etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Blaine (incelik) g/cm^2 : İncelik arttırılırsa mukavemet doğru yönde artar. Yani mukavemete doğru yönde etki eder.
- C_3S (Silikat) : C_3S 'i arttırılırsa mukavemette doğru yönde artar. Mukavemete doğru yönde etki eder.
- C_4AF (Alüminat) : Mukavemete ters oranda etki eder. Artması çimento için tehlikelidir.
- SM(Silikat Modülü) : Katı fazların Sıvı fazlara oranıdır. Çimentonun mukavemetine artı yönde etki eder.
- AM (Alümin Modülü) : Sıvı fazların oranıdır. Yükselmesi silikat modülünü düşüreceğinden mukavemete ters yönde etki eder.
- LSF (Kireç Doygunluk Faktörü) : Toplam CaO ' nun tamamlanmış reaksiyona giren CaO ' ya oranıdır. Buradan da görüleceği üzere reaksiyona giren CaO ne kadar yüksekse çimento o kadar sertleşir ve mukavemeti artar.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı çimentoların mukavemet değerlerinde farklılıklar oluşmuştur denilebilir.

12.3. Donma Çözölme Sonrası Dayanım

12.3.1. Giriş

Boşluklu bir cismin boşluklarda bulunan suyun, sıcaklık derecesinin sıfırın altına düşmesi sonunda, donması cisimlerin dayanımın azalması hatta parçalanmasına yol açabilir. Böyle bir sonuç suyun donması sonucunda hacminin artmasından ileri gelmektedir. Suyun donması sonunda hacminde %8,7 değerinde bir artış meydana gelir. Cisim içinde su birdenbire değil yavaş yavaş donabilir. Suyun bir kısmının donması sonunda meydana gelen hacim artışı donmamış suları harekete geçirir, onları boşluklara iterek iç basıncı artırır. Suyun donmasının tamamlanmasında hacim artışı maksimum değeri almıştır. Bu durumda uzamanın, cismin boyuna karşı koyması sonucunda gerçekleşmemesi ve ayrıca donmanın tamamlanmaması halinde doğan iç basınç cisim içinde çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmelerin cismin çekme dayanımına ulaştığı bölgelerde çatlaklar meydana gelir. Suyun bu şekilde zararlı bir etki meydana getirebilmesi için, miktarının belirli bir değerden büyük olması gerekir. Eğer cisimde suyun işgal ettiği hacim, suyun donması sonucunda meydana gelecek hacim artışından daha büyük ise donma olayı herhangi bir iç gerilme meydana getirmeyecek, aksi halde ise çekme gerilmelerinin oluşması ile zararlı etkiler kendini göstermeye başlayacaktır.

Sıcaklığın sıfırın altına düşmesiyle başlayan olay, kendini önce iri boşluklarda gösterir. Zira suyun donma derecesi boşluk boyutları küçüldükçe azalmaktadır. Bu nedenle iri boşluklarda başlayan donma olayı küçük boşluklara doğru gelişir ve bunun sonunda da kılcal boşluklardaki su donmaya başlar. Jel boşluk boyutları çok küçük olduğundan buralarda buz kristalleri oluşmaz. Ortamda sıcaklık derecesinin sıfırın üstüne çıkmasıyla boşluklarda meydana gelmiş buz su ahaline dönüşür. Fakat bu donma ve çözölme olaylarının tekrarlanması halinde çatlaklar gelişerek birbirleriyle birleşir, çatlaklar şebekesi meydana getirir. Olayın devam etmesi önce küçük parçaların betondan ayrılmasına veya dökülmesine neden olur. Bunu betonun tamamen parçalanması izler. Bu açıklamalardan betonun donmadan zarar görmesine yol açan malzeme dışındaki iki faktörün bulunduğu anlaşılmaktadır. Bunlar ortamdaki sıfırın altındaki sıcaklık derecesi, diğeri ise donma ve çözölme olaylarının sayısıdır.

Sıcaklık derecesinin etkisi, buzun basınç mukavemetinin sıcaklık düştükçe artmasından kaynaklanmaktadır. Donma olayı sonunda buzda meydana gelen basınç gerilmesi buzun basınç dayanımına erişiyor veya bundan büyük bir değer alıyorsa

buzun parçalanarak su haline dönüşmesi ile donma olayının zararlı etkisi ortadan kalkacaktır. [5]

Donma olayı etkisini çimento hamuru ve agrega üzerinde gösterir. Çimento hamurunda bulunan kılcal borulardaki suyun donması hamurun çatlamasına ve iç yapısının değişmesine neden olur. Bu zararlı etkilerin meydana gelmemesi veya azaltılması için su hacminin az olması gerekmektedir. Bu ise çimento hamurunun kılcal boşluklarının az olması ile yani çimento hamurunun kapasitesinin büyük olması ile gerçekleşir. Hamur kapasitesini etkileyen en önemli faktör ise s/c (su/çimento) oranıdır. Bu oran ne kadar küçük ise kompasite o kadar büyük olacaktır. Bu durumda bir betonun donmaya dayanıklı olması isteniyorsa s/c oranı mümkün olduğu kadar (işlenebilme özelliğinin sağlanması ile) küçük değerlerde olmalıdır. [5]

12.3.2. Deney Yöntemleri

Betonlar üzerinde çabuk donma ve çözülme deneyleri vardır, bu deneyler TS 3449'a göre belirlenmiş esaslara göre yapılmaktadır. Fakat sertleşmiş çimento hamuru üzerinde böyle bir uygulama yapılmamıştır. Bu çalışmada donma çözülme olayı TS 3449'a atıfta bulunarak yapılmıştır.

TS 3449'da beton üzerinde donma çözülme uygulaması iki şekilde belirtilmiştir:

12.3.2.1. Suda Donma-Çözülme

Suda donma-çözülme, beton deney numunelerinin donma çözülmesinin suda yapıldığı bir donma-çözülme devresidir.

Buna göre suda donma çözülme aşamaları aşağıdaki gibi olmalıdır:

- Çözülme sıcaklığındaki numuneler donma sıcaklığına en az 90, en çok 180 dakikada ulaşabilmelidir.
- Donma sıcaklığındaki numuneler çözülme sıcaklığına en az 30, en çok 60 dakikada erişebilmelidir.
- Çözünme süresi donma süresinin en az % 25'i kadar olmalıdır.

12.3.2.2. Havada Donma-Çözülme

Beton numunelerinin donma aşamasının havada, çözülme aşamasının su içerisinde yapıldığı donma-çözülme devresidir.

Buna göre havada donma çözülme aşağıdaki gibi olmalıdır:

- Çözülme sıcaklığındaki numuneler donma sıcaklığına en az 95, en çok 180 dakikada ulaşabilmelidir.

- Donma sıcaklığındaki numuneler çözölme sıcaklığına en az 25, en çok 50 dakikada erişebilmelidir.

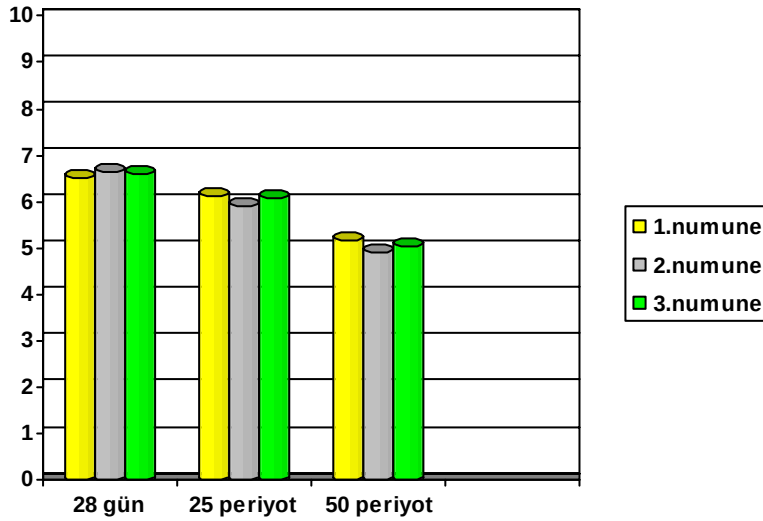
Yukarıda belirtildiğı gibi çimento harç numuneleri üzerinde donma-çözölme deneyi TS 3449'un havada donma çözölme süreleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu esasa göre numuneler 3 saat -17 C^0 sıcaklıkta bekletildikten sonra 50 dakika $+5\text{ C}^0$ lik suda bekletilmiştir. Bu işlem toplam 50 defa yapılmıştır. 25. periyotta ve 50. periyotta numunelerin eğilmede-çekme ve basınç değerleri ölçölmüştür. Ölçüm sonrası elde edilen değerler hem aynı çimentoda ki dayanım azalışı hem de farklı çimentoların dayanım azalışlarının bir karşılaştırılması yapılmıştır.

12.3.3. Deney Sonuçları

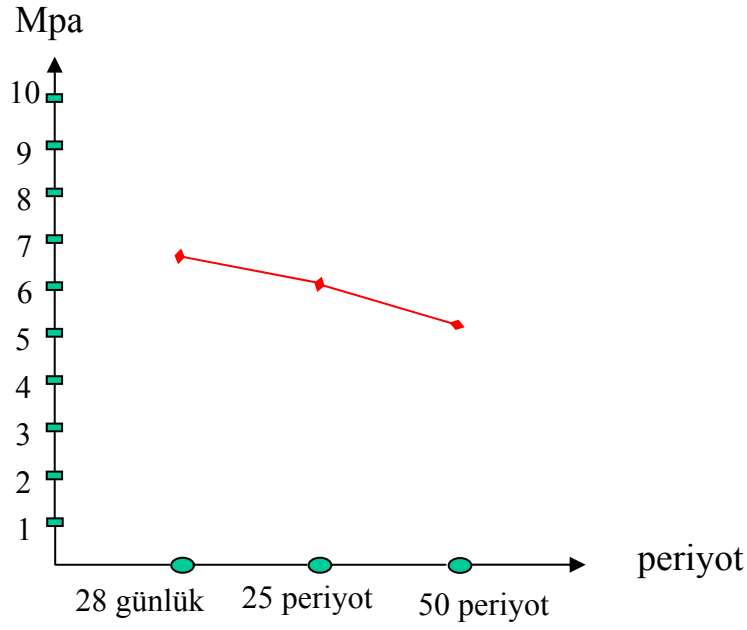
12.3.3.1. C₁ Çimentosunun 28 Günlük Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı, 25 Periyotluk ve 50 Periyotluk Donma Çözülme Sonrasındaki Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

Tablo 11: C₁ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımı

Çimento Tipi	C ₁ Çimentosunun Eğilmede Çekme Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	6,501	6,661	6,586	6,583
25 Periyotluk	6,117	5,901	6,090	6,036
50 Periyotluk	5,179	4,922	5,053	5,051



Şekil 8: C₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.



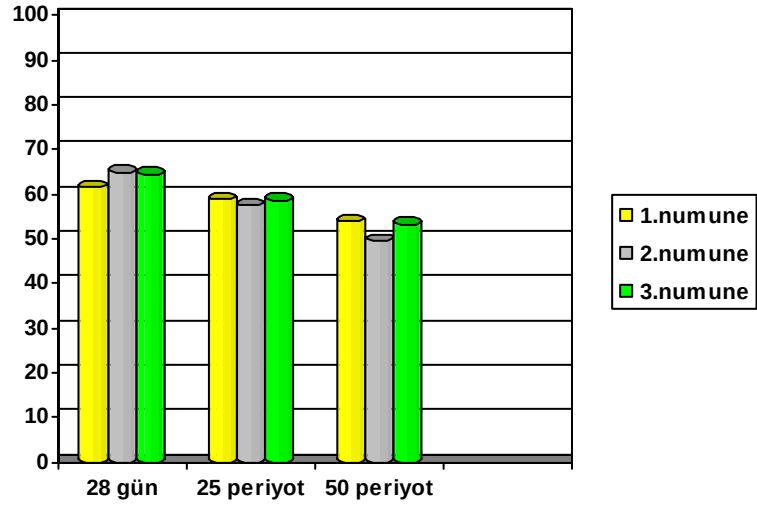
Şekil 9: C₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı

C₁ çimentosunun 28 günlük, 25 periyot ve 50 periyotluk donma çözünme sonrası eğilmede çekme oranları aşağıdaki gibidir:

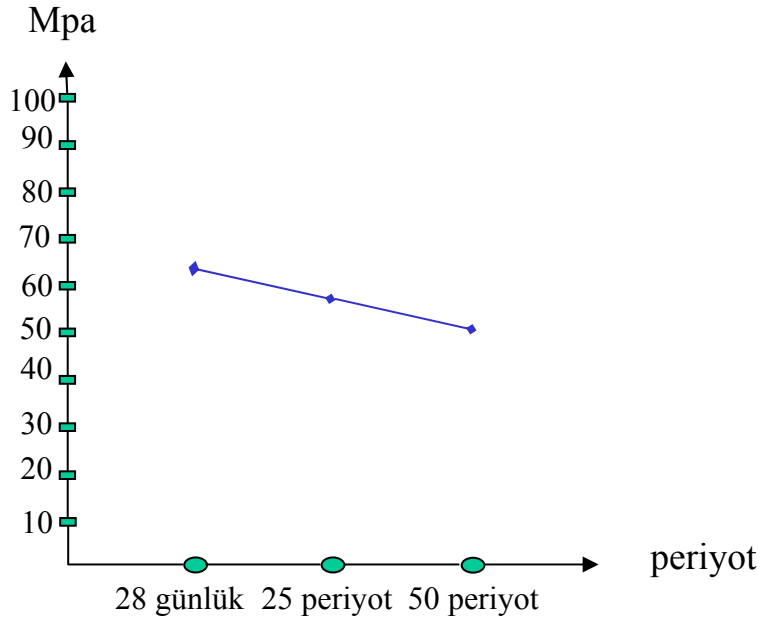
- 25 periyot sonrası eğilmede çekme oranı yaklaşık % 8,3
- 25-50 periyot arası eğilmede çekme oranı yaklaşık %16,3
- Toplamda eğilmede çekme oranı yaklaşık % 24,6'lık bir değer kaybına uğramıştır.

Tablo 12: C₁ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı

Çimento Tipi	C ₁ Çimentosunun Basınç Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	61,36	64,85	64,25	63,49
25 Periyotluk	58,7	57,33	58,38	58,14
50 Periyotluk	53,75	49,37	53,01	52,04



Şekil 10 : C₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.



Şekil 11: C₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları

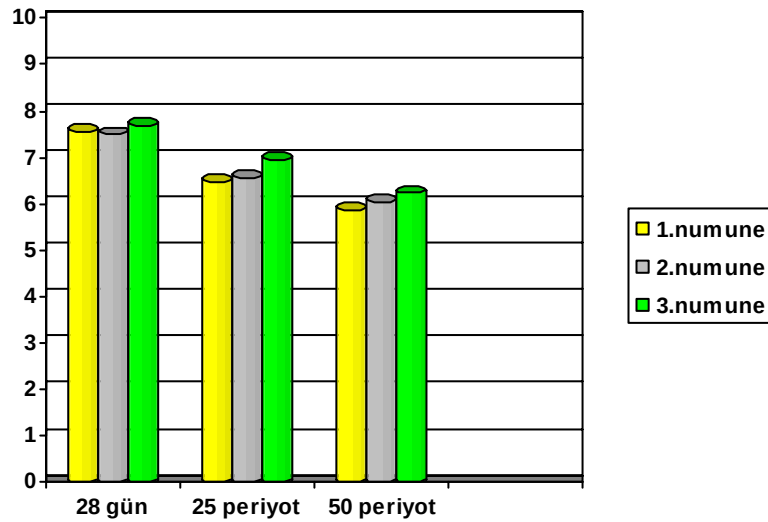
C₁ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları oranları aşağıdaki gibidir:

- 25 periyotluk donma çözülme sonrası yaklaşık % 8,4
- 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası yaklaşık % 10,5
- Toplamda basınç dayanımları oranları %18,9'lık bir değer kaybına uğramıştır.

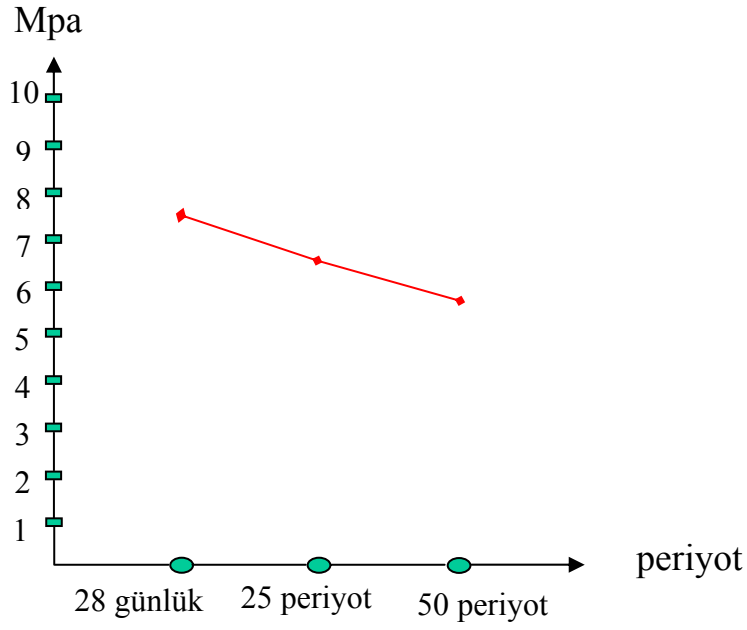
12.3.3.2. C₂ Çimentosunun 28 Günlük Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı, 25 Periyotluk ve 50 Periyotluk Donma Çözülme Sonrasındaki Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

Tablo 13: C₂ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımları.

Çimento Tipi	C ₂ Çimentosunun Eğilmede Çekme Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	7,554	7,490	7,664	7,569
25 Periyotluk	6,476	6,567	6,933	6,659
50 Periyotluk	5,859	6,030	6,231	6,04



Şekil 12: C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.



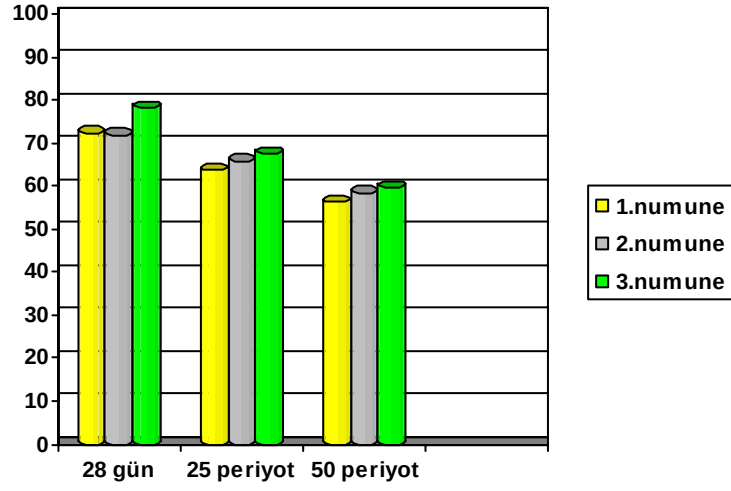
Şekil 13: C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı

C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı aşağıdaki gibidir:

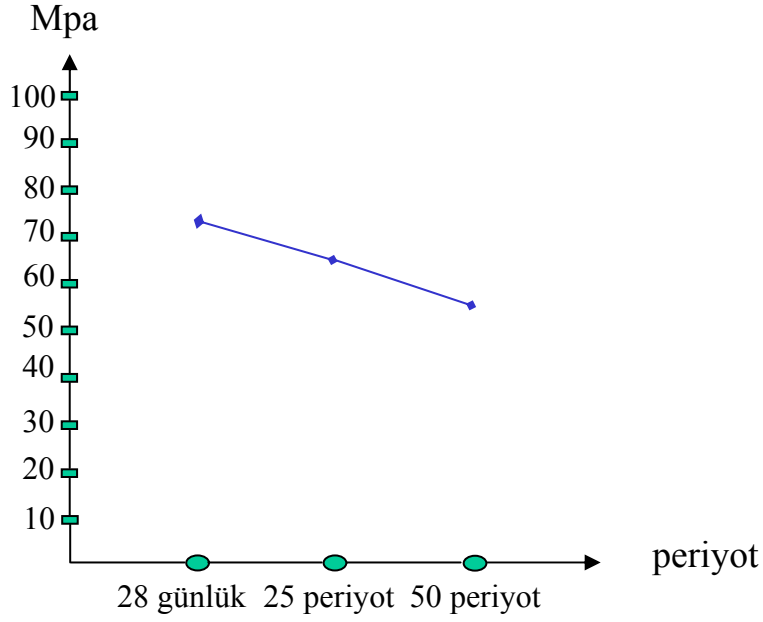
- 25 periyot sonrası eğilmede çekme oranı yaklaşık %12
- 25-50 periyot arası eğilmede çekme oranı yaklaşık %9,2
- Toplamda basınç dayanımları oranları %21,2'lik bir değer kaybına uğramıştır.

Tablo 14: C₂ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı

Çimento Tipi	C ₂ Çimentosunun Basınç Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	72,23	71,88	78,13	74,08
25 Periyotluk	63,68	65,81	67,44	65,64
50 Periyotluk	56,23	58,27	59,6	58,03



Şekil 14: C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi



Şekil 15: C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları

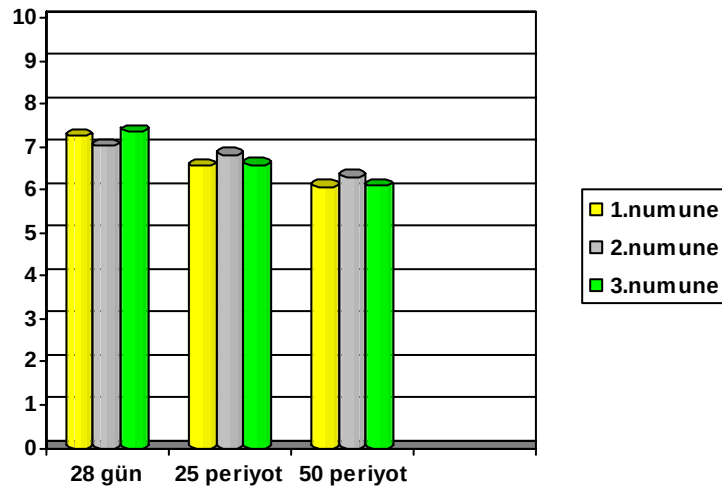
C₂ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları oranları aşağıdaki gibidir:

- 25 periyotluk donma çözülme sonrası yaklaşık % 11,3
- 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası yaklaşık % 11,4
- Toplamda basınç dayanımları oranları %22'lik bir değer kaybına uğramıştır.

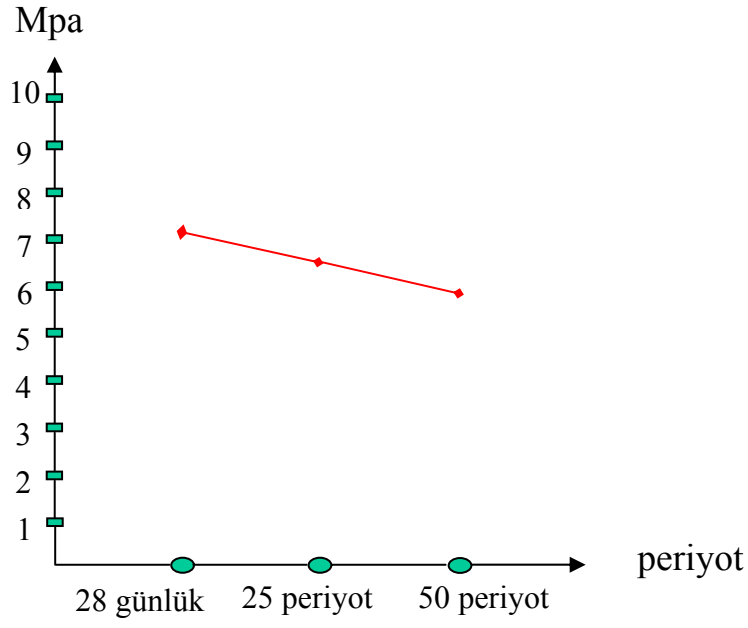
12.3.3.3. C₃ Çimentosunun 28 Günlük Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı, 25 Periyotluk ve 50 Periyotluk Donma Çözülme Sonrasındaki Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

Tablo 15: C₃ Çimentosunun 28 günlük eğilmede çekme dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki eğilmede çekme dayanımı

Çimento Tipi	C ₃ Çimentosunun Eğilmede Çekme Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	7,243	7,017	7,351	7,204
25 Periyotluk	6,548	6,813	6,585	6,649
50 Periyotluk	6,079	6,298	6,084	6,154



Şekil 16: C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkının grafiksel gösterimi.



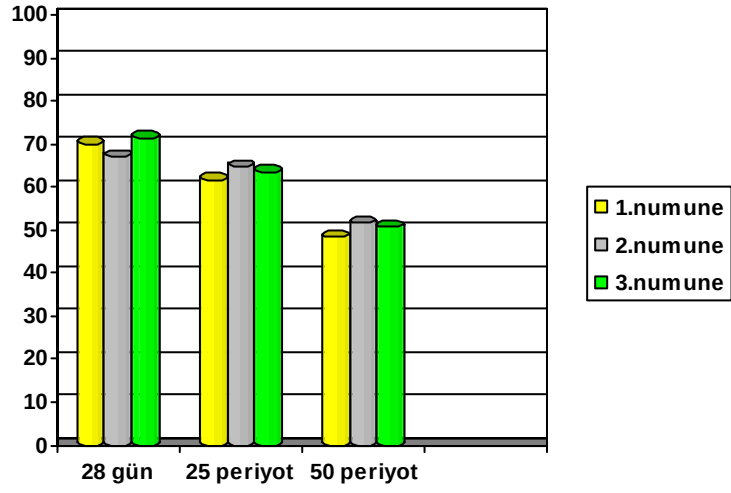
Şekil 17: C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı

C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımları farkı aşağıdaki gibidir:

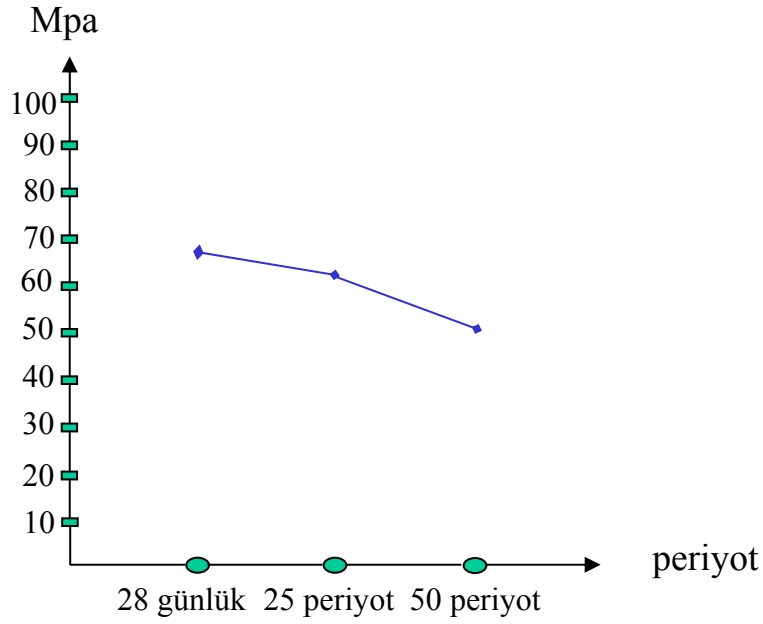
- 25 periyot sonrası eğilmede çekme oranı yaklaşık %7,7
- 25-50 periyot arası eğilmede çekme oranı yaklaşık % 7,4
- Toplamda basınç dayanımları oranları % 15,1'lik bir değer kaybına uğramıştır.

Tablo 16: C₃ Çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı, 25 periyotluk ve 50 periyotluk donma çözülme sonrasındaki basınç dayanımı

Çimento Tipi	C ₃ Çimentosunun Basınç Dayanımı Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
28 Günlük	69,87	66,97	71,36	69,4
25 Periyotluk	61,71	64,62	63,44	63,26
50 Periyotluk	48,27	51,58	50,61	50,15



Şekil 18 : C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 19: C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları

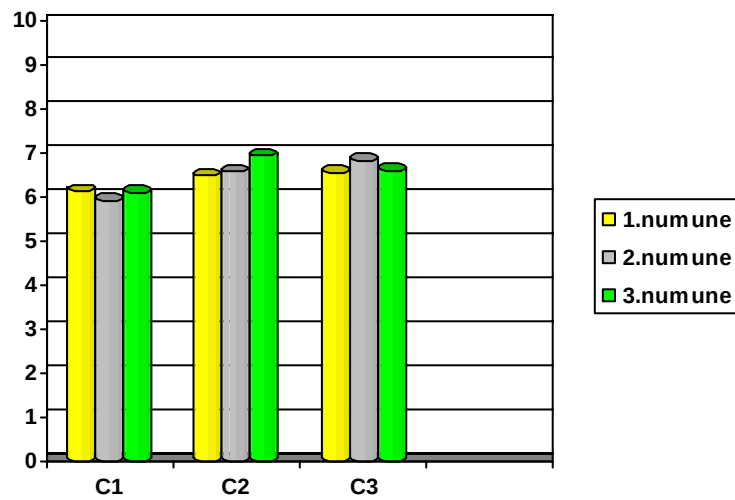
C₃ çimentosunun 28 günlük ile 25 ve 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları oranları aşağıdaki gibidir:

- 25 periyotluk donma çözülme sonrası yaklaşık % 8,8
- 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası yaklaşık % 20,7
- Toplamda basınç dayanımları oranları %29,5'lik bir değer kaybına uğramıştır.

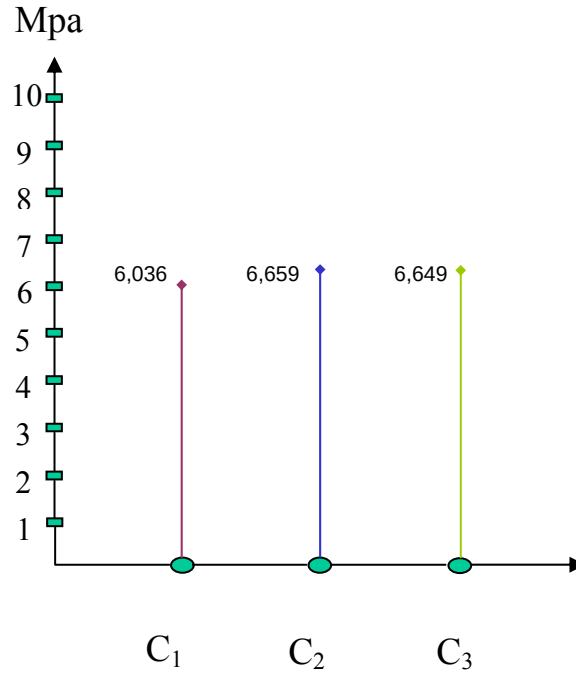
12.3.3.4. Yirmi Beş (25) Periyotluk Donma Çözülme Sonrasındaki Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları

Tablo 17 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı.

Çimento Tipi	Eğilmede Çekme Dayanımı (25 periyotluk donma çözülme sonrası) Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
C ₁	6,117	5,901	6,09	6,036
C ₂	6,476	6,567	6,933	6,659
C ₃	6,548	6,813	6,585	6,649
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı çimento fabrikalarından alınan ürünleri belirtmektedir.				



Şekil 20: 25 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımlarının grafiksel gösterimi.



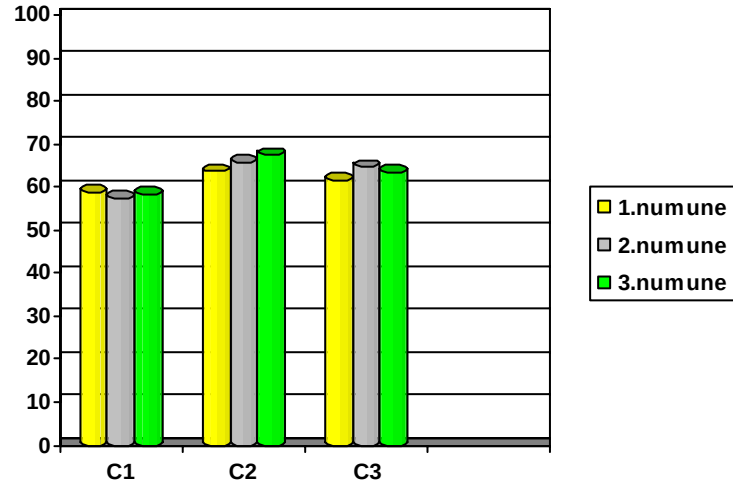
Şekil 21: 25 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımı

Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farkları:

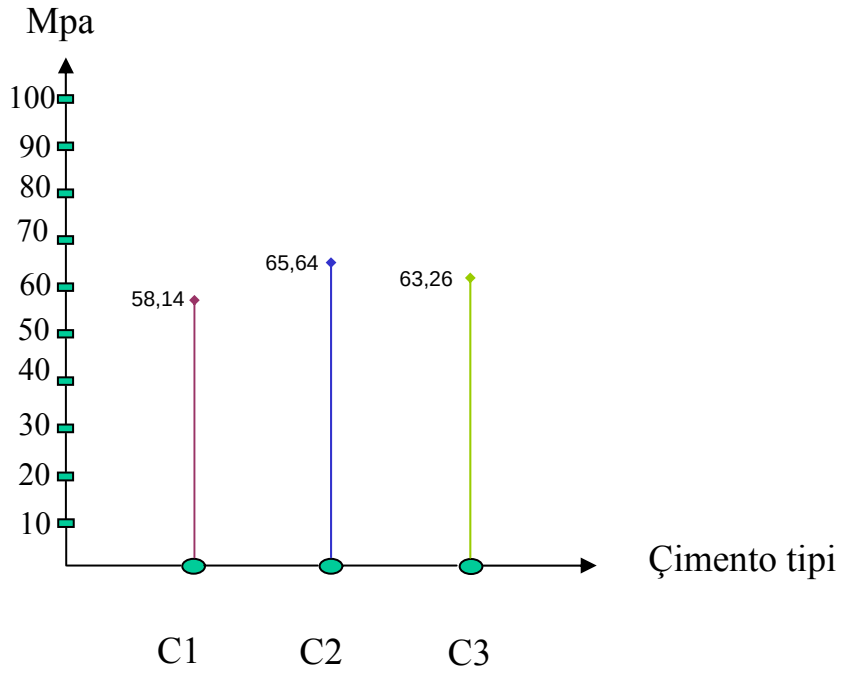
- C₁ çimentosunda %8,3
- C₂ çimentosunda % 12
- C₃ çimentosunda % 7,7

Tablo 18: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımı.

Çimento Tipi	Basınç Dayanımı (25 periyotluk donma çözülme sonrası) Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
C ₁	58,7	57,33	58,38	58,14
C ₂	63,68	65,81	67,44	65,64
C ₃	61,71	64,62	63,44	63,26
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı Çimento Tipi				



Şekil 22: 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.



Şekil 23: 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları.

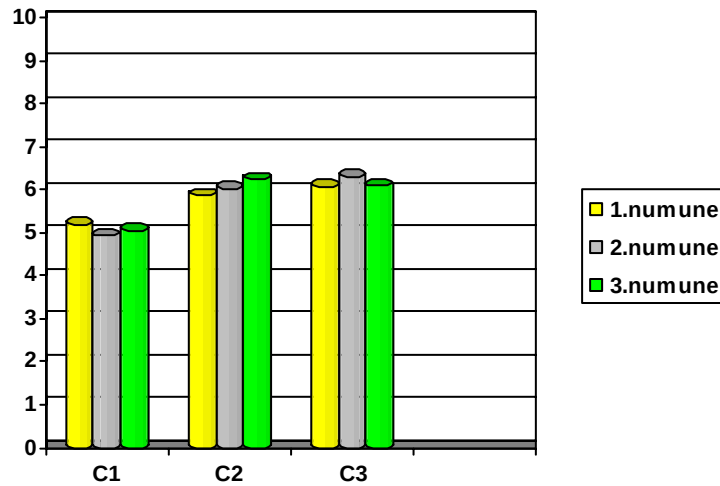
Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımı farkları:

- C₁ çimentosunda %8,4
- C₂ çimentosunda %11,4
- C₃ çimentosunda %8,8

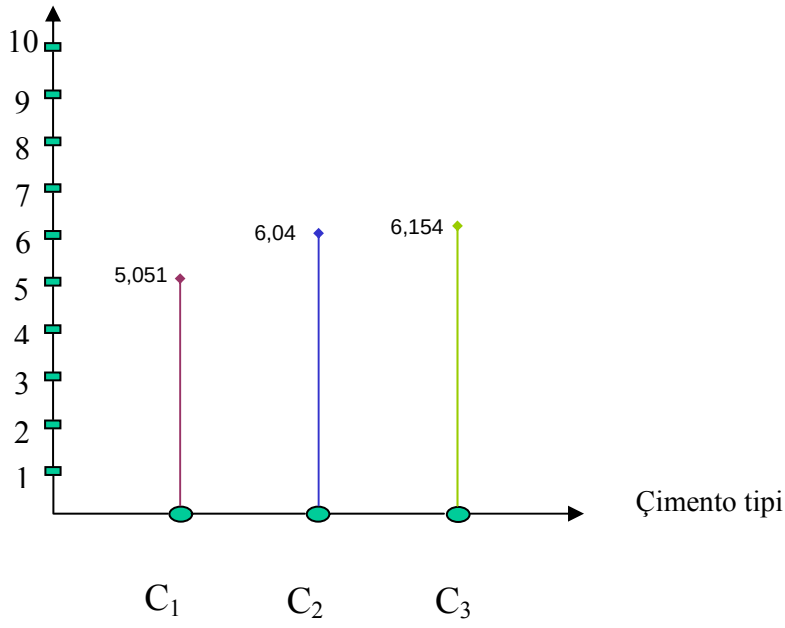
12.3.3.5. Elli (50) Periyotluk Donma Çözülme Sonrasındaki Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları

Tablo 19: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 50 periyotluk donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı.

Çimento Tipi	Eğilmede Çekme Dayanımı (50 periyotluk donma çözülme sonrası) Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
C ₁	5,179	4,922	5,053	5,051
C ₂	5,859	6,030	6,231	6,04
C ₃	6,079	6,298	6,084	6,154
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı çimento fabrikalarından alınan ürünleri belirtmektedir.				



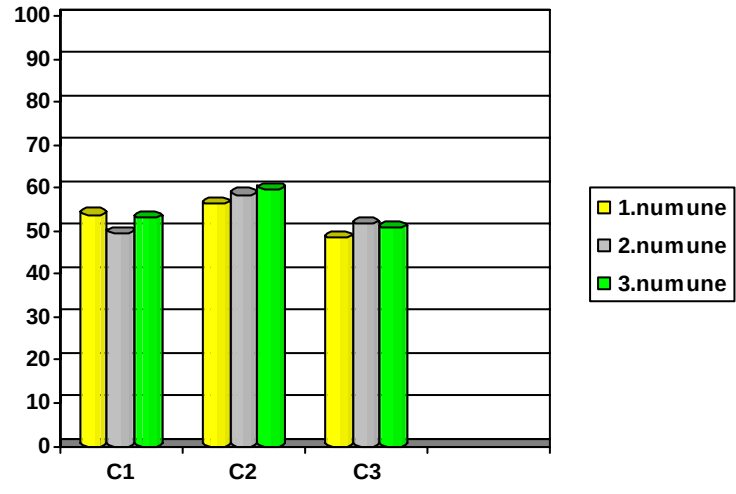
Şekil 24: 50 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımlarının grafiksel gösterimi.



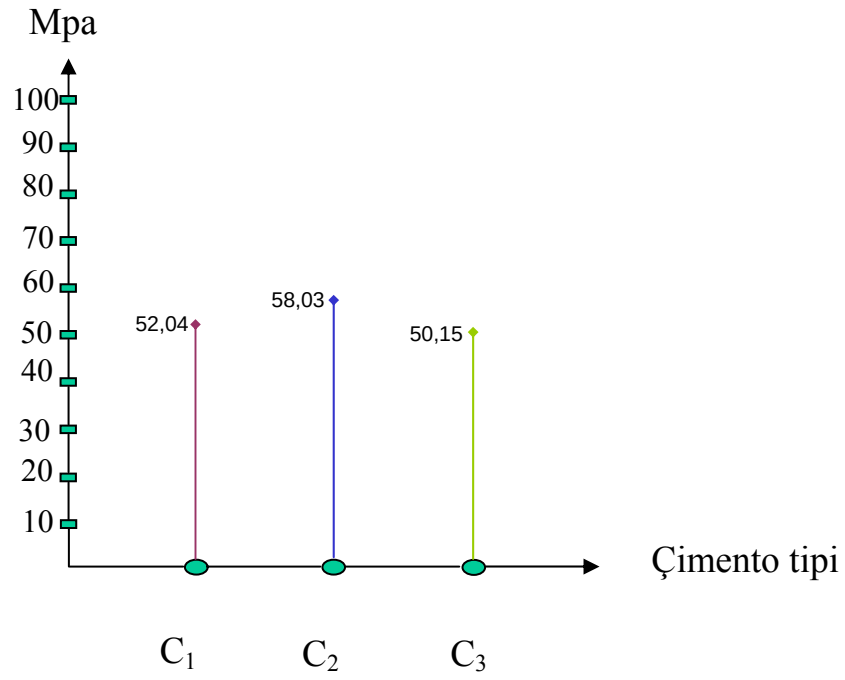
Şekil 25: 50 periyotluk donma çözülme sonucu Eğilmede çekme dayanımı.

Tablo 20 : Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımı.

Çimento Tipi	Basınç Dayanımı (50 periyotluk donma çözülme sonrası) Mpa			
	1 Nolu Numune	2 Nolu Numune	3 Nolu Numune	Ortalama
C ₁	53,75	49,37	53,01	52,04
C ₂	56,23	58,27	59,6	58,03
C ₃	48,27	51,58	50,61	50,15
C ₁ , C ₂ , C ₃ Farklı çimento fabrikalarından alınan ürünleri belirtmektedir.				



Şekil 26: 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının grafiksel gösterimi.

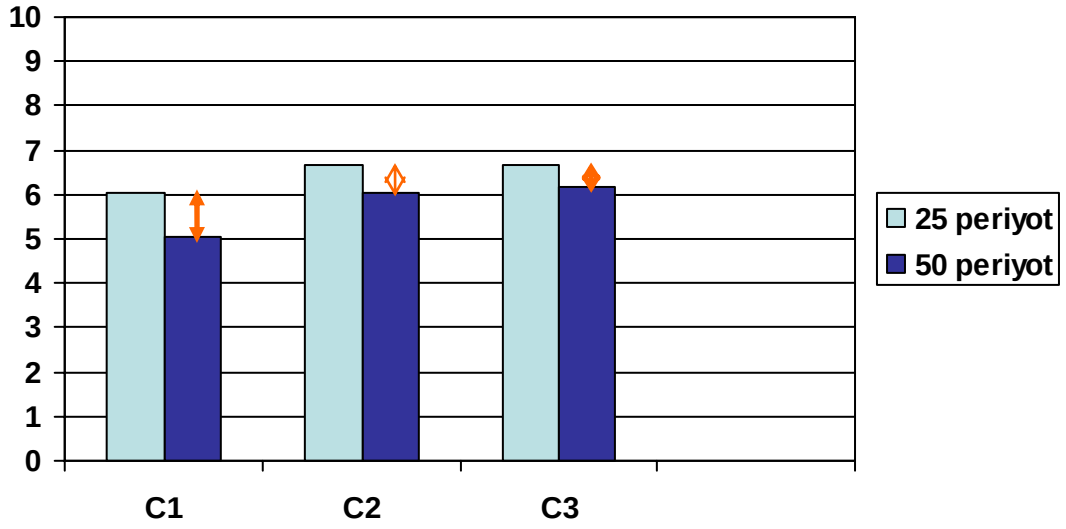


Şekil 27: 50 periyotluk donma çözülme sonrası basınç dayanımları

12.3.4. Sonuç ve Öneriler

Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farkları:

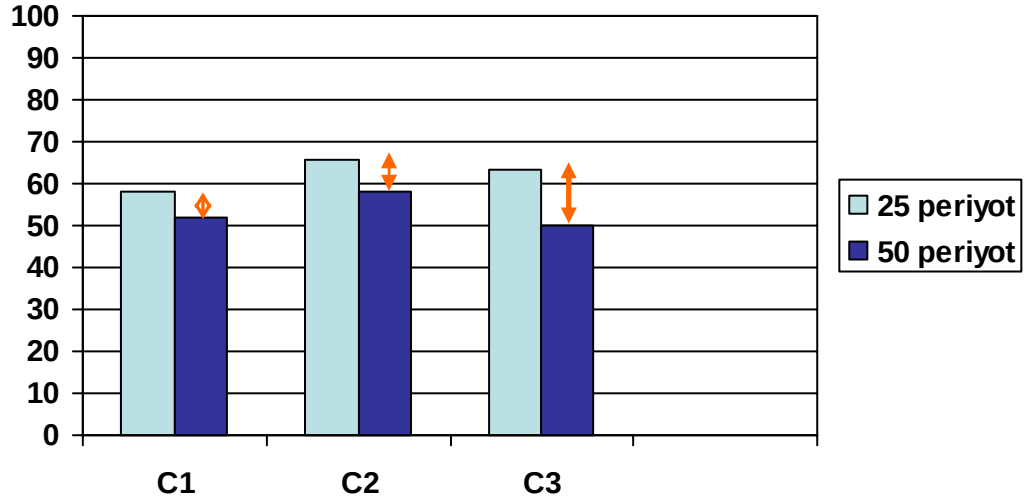
- C₁ çimentosu için % 16,3
- C₂ çimentosu için % 9,3
- C₃ çimentosu için % 7,4



Şekil 28:Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.

Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası basınç dayanımı farkları:

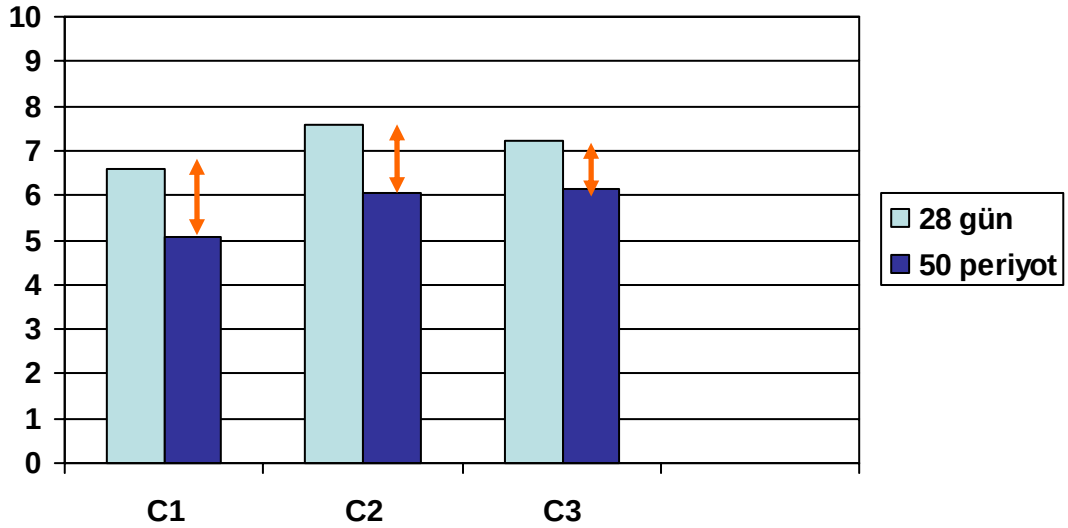
- C₁ çimentosunda %10,5
- C₂ çimentosunda %11,6
- C₃ çimentosunda %20,7



Şekil 29:Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun 25-50 periyot arası donma çözülme sonrası basınç dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.

Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplam da donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımlarının yüzdelik düşüş miktarları:

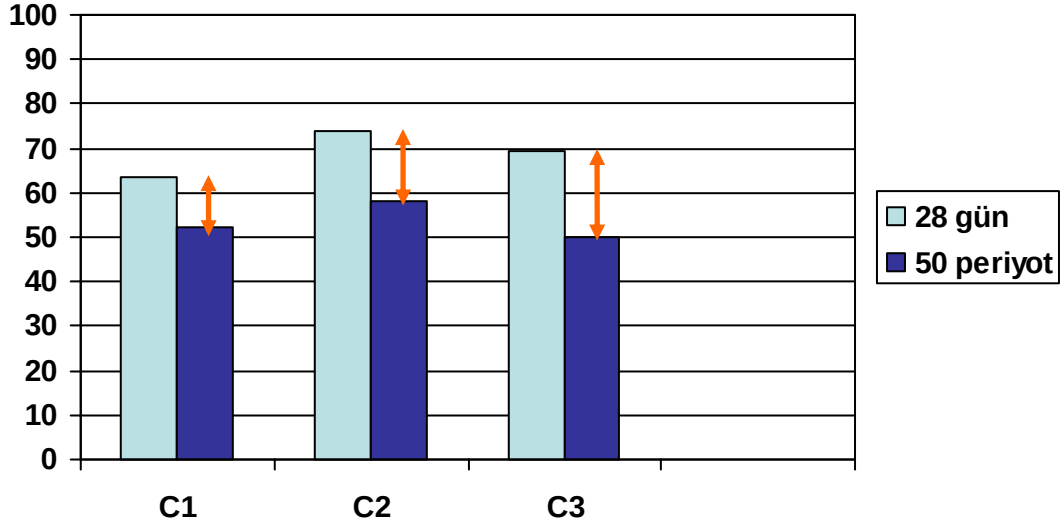
- C₁ çimentosu için % 24,6
- C₂ çimentosu için % 21,2
- C₃ çimentosu için % 15,1



Şekil 30: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplam da donma çözülme sonrası eğilmede çekme dayanımı farklarının grafiksel gösterimi.

Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplam da donma çözülme sonrası basınç dayanımlarının yüzdelik düşüş miktarı:

- C₁ çimentosu için % 18,9
- C₂ çimentosu için % 22
- C₃ çimentosu için % 29,5



Şekil 31: Farklı çimento fabrikalarından alınmış aynı tip çimentonun toplam da donma çözülme sonrası basınç dayanımı farkları.

Yukarıda verilen sonuçlar incelendiğinde 25 periyotluk ilk donma çözülme aralığında eğilmede çekme değerlerinde düşüş miktarı en çok C₂ çimentosunda en az C₃ çimentosunda meydana gelmiştir.

Yukarıda verilen sonuçlar incelendiğinde 25 periyotluk ilk donma çözülme aralığında basınç değerlerinde düşüş miktarı en çok C₂ çimentosunda en az C₁ çimentosunda meydana gelmiştir.

25-50 periyotluk donma çözülme aralığında eğilmede çekme değerlerinde düşüş miktarı en çok C₁ çimentosunda en az ise C₃ çimentosunda görülmüştür.

25-50 periyotluk donma çözülme aralığında basınç değerlerinde düşüş miktarı en çok C₃ çimentosunda en az ise C₁ çimentosunda görülmüştür.

Toplamda eğilmede çekme değerlerinde düşüş miktarı en çok C₁ en az C₃ çimentosunda meydana gelmiştir.

Toplamda basınç değerlerinde düşüş miktarı en çok C₃ en az C₁ çimentosunda meydana gelmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde 50 periyotluk donma çözülme sonunda eğilmede-çekme ve basınç değerlerinin en çok azaldığı çimento tipi C₂ çimentosudur. En az olan çimento ise C₁ çimentosudur. Bununla en önemli nedeni ana bileşen olan trikalsiyum

silikat(C_3S) miktarının C_2 ve C_3 çimentolarında fazla olmasıdır denilebilir. Zira bu bileşen erken dayanım kazandırma özelliğine sahiptir. C_3S daha hızlı sertleşir ve dayanım kazanır, yüksek dayanımlı çimentolarda özellikle ilk dayanımı yüksek çimentolarda miktarı fazladır. Sertleşme sırasında daha çok ısı çıkarır, bu ise kusurdur. C_2S ve C_3S 'in hidratasyonu sırasında kireç ($CaOH_2$) açığa çıkar. Bu sönmüş kireç miktarı C_3S 'de daha fazla olur. Bu kireç, çelik donatının paslanmasını geciktirir, yararlıdır, ancak zamanla yıkanır, yeri boş kalır ve beton geçirimli olur. Alümino modülü yükseldikçe mukavemet düşer, silika modülü yükselirse ise artar, C_4AF ve C_3A 'nın C_2 ve C_3 çimentolarında düştüğünü görürüz. Bu özelliğinden dolayı C_2 ve C_3 donma çözülme sonunda eğilmede-çekme ve basınç değerlerindeki azalma daha fazla olmuştur.

Ayrıca çimento tanelerinin kristalize yapısı ve su ile etkileşimleri de önemli bir faktördür. Bu nedenle kullanılan çimentoların mikrobiyolojik yapısındaki farklılıklarda çimentonun su ile etkileşimini değiştirecektir. Harç içerisinde çimento ile etkileşime girmeyen su donma sonucunda ve tekrarında kılcal boşluklar oluşturup sertleşmiş harcı tahrip etmektedir. Bu nedenlerden dolayı kullanılan çimentolarda değer düşüşleri sabit olmamıştır.

Çimento su ile karıştırıldığında “hidratasyon” sonucu meydana gelen hamur reolojik olarak rijit silika jelidir. Başlangıçta plastik halde iken kolayca şekillendirilebilir, zamanla ”priz” alıp katılaştıktan sonra bir süre dayanım kazanmaya devam eder. Çimento hamurunun boşluklu bir yapısı vardır. Boşluk miktarı karışım suyu orantısı ile birlikte artar. Optimum su / çimento (s/ç) orantısı 0.35 -0.40 arasında olup daha fazla su kullanıldığında boşluklar artacak dolayısı ile dayanım ve dayanıklılık azalacaktır. Bu değerlerin altındaki su miktarlarında ise uygun kıvam sağlanması halinde dayanım ve dayanıklılık artacak, ancak çimento tamamen hidrate olamayacaktır. Su miktarı hamur, harç ve betonun kıvamını, işlenebilmesini de etkiler. Su miktarı fazla azaltıldığında çok kuru kıvamdaki malzemeyi kalıba sıkıştırıp yerleştirmek zorlaşacak bu kez iç yapıda gene boşluk kalacaktır. Deney yapılışı itibarıyla su miktarı sabit olsa bile suyla hidratasyona giren çimentonun karakteristik özellikleri; tane dağılımı, ana bileşenlerin miktarları gibi özelliklerin farklılığı deney sonuçlarını etkilemiştir.

Donma olayı etkisini çimento hamuru ve agrega üzerinde gösterir. Çimento hamurunda bulunan kılcal borulardaki suyun donması hamurun çatlamasına ve iç yapısının değişmesine neden olur. Bu zararlı etkilerin meydana gelmemesi veya azaltılması için su hacminin az olması gerekmektedir. Bu ise çimento hamurunun kılcal boşluklarının az olması ile yani çimento hamurunun kapasitesinin büyük olması ile gerçekleşir. Hamur kapasitesini etkileyen en önemli faktör ise s/c (su/çimento) oranıdır. Bu oran ne kadar küçük ise kompasite o kadar büyük olacaktır. Bu durumda bir betonun donmaya dayanıklı olması isteniyorsa s/c oranı mümkün olduğu kadar (işlenebilme özelliğinin sağlanması ile) küçük değerlerde olmalıdır denilebilir.

Kaynaklar

1. AKMAN , M. ‘Beton Teknolojisine Giriş’, İTÜ, İstanbul, Ağustos 1994
2. AYKUTLU A., “Problemlı Yapı Malzemesi”, Arı Kitap Evi, İstanbul, 1965, s.44-60
3. CAN H., GÜNTEKİN A., ASLAN M., DEMİRAN D., “Alt Yapı Laboratuarı”, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 1992, s. 49-62
4. CARINO, N. J., “The Maturity Method: Theory and Application”, Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, V.6, No 2, Winter 1984, pp. 61-73
5. Ekinci C. E., Antalya Etibank Elektrometoroloji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi,Fırat Üniversitesi Doktora Tezi, Elazığ, 1995, s.71-73
6. ERGİN , H. , ‘Çimento Öğütme Devrelerinin Optimizasyonu’, İTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, Temmuz 1998
7. ERİÇ M. , Yapı Fiziği ve Yapı Malzemesi, Litaretur Yayıncılık, İstanbul, 2002, s 206-223
8. ERTEL T., Yapı Malzemesi, Osmanlı Yalçın Matbaası, İstanbul, 1969, s 175-239
9. ERSOY, U. ,1960 , Betonarme, Evrim Yayın Evi, İstanbul
10. GRATTAN-BELLEW, P.E., Microstructural Investigation of Deteriorated Portland cement Concretes, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 1-22.
11. Kendall, K. , Howard,J. and Birchall.D. , 1983, “The Relation Between Porosity, Microstructure and Strength “, Trans.R.Society, A310,Londra
12. NUH ÇİMENTO SANAYİİ A.Ş. , ‘İş Akım Şeması Açıklama Raporu’, Hereke, 1998.
13. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, 2000, Ankara.
14. TAŞDEMİR, C., Mikrofiller Malzemelerin ve Kür Koşullarının Betonun Kılcal Geçirirnililiğine Etkisi, DSİ Çimento-Beton ve Boya Semineri, 24-26 Haziran 1998, p. 47-56, Ankara.
15. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı Yayını, 1973, Ankara.
16. TEMİZ H., “Uçucu Kül ve Silis Dumanının Birlikte Katıldığı Harcın Özellikleri”, Fırat Üniversitesi Doktora Tezi, Elazığ, 1997, s. 80-82
17. TS EN 196-1, “Çimento Deney Metodları: Fiziksel Analiz”, TSE, Ankara, 2002,s.1-19
18. TS EN 196-2, “Çimento Deney Metodları: Kimyasal Analiz”, TSE, Ankara, 2002, s.1-26
19. TS EN 197-1, 2002, “ Genel Çimentolar-Bileşim,Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”,Türk Standardları Enstitüsü ,Ankara, 2002, s.1-17
20. TS EN 197-2, “Çimento Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi”, TSE, Ankara, 2002, s.1-17
21. Türkiye Çimento Sanayi T.A.Ş. Yayını, 1973, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Kazim AYDIN 1978 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta öğrenimini Elazığ'da yapmıştır. Lise öğrenimini Elazığ Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamlamıştır. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı öğretmenliği bölümünü kazanmış ve 2003 yılında başarı ile mezun olmuştur. Aynı yıl, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2004 yılında Leonardo Da Vinci Programı kapsamında üç aylık bir mesleki eğitim programını başarı ile bitirmiştir. Halen Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaktadır.