

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ÇİMENTO YERİNE İKAME
EDİLMESİ İLE OLUŞTURULAN BETON NUMUNELERİNİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlker TULGA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Kadir KILINÇ

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ÇİMENTO YERİNE İKAME
EDİLMESİ İLE OLUŞTURULAN BETON NUMUNELERİNİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlker TULGA
(1148202108)**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Kadir KILINÇ

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1148202108 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İLKER TULGA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ÇİMENTO YERİNE İKAME EDİLMESİ İLE OLUŞTURULAN BETON NUMUNELERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Kadir KILINÇ**
Kırklareli Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Erdiñ KESKİN**
Kırklareli Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özgür EKİNCİOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi: 20.07.2017
Savunma Tarihi: 08.09.2017

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanması esnasında deneyimleri ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Kadir KILINÇ'a, çalışmalarım esnasında bana ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR'e, Kırklareli Üniversitesi Genel Sekreteri Ergün ERBAY'a, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyeleri ve öğretim elemanlarına, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde katkılarından dolayı Bağdan Beton Genel Müdürü Mehmet Akif YÜCEL'e ve Laboratuvar Şefi Oğuz TOSUN'a yüksek lisansımın her safhasında bana desteğini hiç esirgemeyen değerli eşim Diş Hekimi Dilek TULGA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2017

İlker TULGA
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BETON TANIMLANMASI VE BETONUN TARİHSEL GELİŞİMİ	3
3. BETON BİLEŞENLERİ VE KONTROLÜ	7
3.1 Portland Çimentosu.....	7
3.1.1 Üretim süreci.....	8
3.1.1.1 Hammaddeler.....	8
3.1.1.2 Üretim için gerekli hammadde karışımının hazırlanması süreci.....	10
3.1.1.3 Üretim.....	12
3.1.2 Kimyasal kompozisyonu.....	19
3.1.3 Anabileşenler ve özellikleri.....	22
3.1.4 Hidratasyon.....	23
3.1.5 Portland çimentosu tipleri.....	25
3.2 Agregalar.....	26
3.2.1 Tanımlar, sınıflandırmalar, özellikler.....	27
3.2.2 Doğal agregalar.....	28
3.2.3 Yapay agregalar.....	28
3.2.4 Ağır agregalar.....	29
3.2.5 Agregaların özellikleri.....	30
3.2.5.1 Tane boyut dağılımı.....	30
3.2.5.2 Birim ağırlık.....	31
3.2.5.3 Özgül ağırlık.....	32
3.2.5.4 Su emme.....	32
3.2.5.5 Yassılık.....	33
3.2.5.6 Alkali-agrega reaksiyonu.....	34
3.3 Su.....	34
3.3.1 Karışım suyu.....	34
3.3.1.1 Karışım suyu uygunluğu.....	35
3.3.1.2 Karışım suyundaki yabancı maddeler.....	37
3.3.1.3 Karışım suyundaki yabancı maddelerin ölçü birimleri.....	37
3.3.1.4 Karışım suyundaki yabancı maddelerin Türk ve Yabancı standartlardaki bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri... 37	
3.3.1.5 Karışım suyundaki yabancı maddelerin taze beton özelliklerine etkisi.....	40
3.3.1.6 Karışım suyundaki yabancı maddelerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi.....	40
3.4 Kimyasal ve Mineral Katkılar.....	42
4. TAZE BETON ÖZELİKLERİ VE KONTROLÜ	46
4.1 İşlenebilirlik.....	46

4.1.1 İşlenebilirlik öğeleri.....	47
4.1.2 İşlenebilirliği ve kontrolünü etkileyen faktörler.....	47
4.1.2.1 Çimento özellikleri.....	47
4.1.2.2 Karışım suyu miktarı.....	48
4.1.2.3 Agregada oranları etkisi.....	48
4.1.2.4 Agregada özellikleri.....	49
4.1.2.5 Zaman ve sıcaklık.....	49
4.1.2.6 Katkılar.....	49
4.1.3 İşlenebilirlik ölçüm yöntemleri.....	50
4.1.4 İşlenebilirlik problemleri ve çözüm yöntemleri.....	51
4.1.4.1 Çökme (slump) kaybı.....	51
4.1.4.2 Taze beton sıcaklığı ve önemi.....	52
4.1.4.3 Segregasyon (ayrışma) ve terleme.....	53
4.1.4.3.1 Ölçüm.....	54
4.1.4.3.2 Sebepleri ve kontrolü.....	54
5. BETON BASINÇ DAYANIMININ ÖNEMİ.....	55
5.1 Basınç Dayanımı ve Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	55
5.1.1 Karakteristik basınç dayanımı (f_{ck}).....	56
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	59
6.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	59
6.2 Üretilen Betonların Özellikleri.....	59
6.3 Kullanılan Malzemenin Özellikleri.....	60
6.3.1 Çimento.....	60
6.3.2 Agregada.....	61
6.3.3 Uçucu külün özellikleri.....	61
6.4 Beton karışımları.....	62
6.5 Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme, saklama ve numune boyutları.....	62
6.6 Taze beton deneyleri.....	63
6.7 Sertleşmiş beton deneyleri.....	63
7. DENEY SONUÇLARI.....	65
7.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	65
7.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	66
7.2.1 Basınç dayanımı tayini.....	66
7.2.2 Yarmada çekme dayanımı tayini.....	66
7.2.3 Donma-çözünme direnci tayini.....	75
8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	79
8.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	79
8.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	79
9. GENEL SONUÇLAR.....	85
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	90

KISALTMALAR

C	: CaO
S	: SiO ₂
A	: Al ₂ O ₃
F	: Fe ₂ O ₃
M	: MgO
\bar{S}	: SO ₃
H	: H ₂ O
CH	: Ca(OH) ₂
$\bar{C}\bar{C}$: CaCO ₃
C₃S	: 3CaO.SiO ₂
C₂S	: 2CaO.SiO ₂
C₃A	: 3CaO.Al ₂ O ₃
C₄AF	: 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
C₄A₃\bar{S}	: 4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃
C₃S₂H₃	: 3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O
C\bar{S}H₂	: CaSO ₄ .2H ₂ O
K	: K ₂ O
N	: Na ₂ O
\bar{C}	: CO ₂
U	: Agrega birim ağırlığı
V	: Agreganın doldurulduğu kabın hacmi
W_a	: Kap içerisine konulan agrega ağırlığı
W_s	: Agreganın tamamen kuru (fırında kurutulmuş) ağırlığı
V_p	: Su geçirgen boşlukların hacmi
V_s	: Agregadaki katı cisimlerin hacmi
V_i	: Su geçirmeyen boşlukların hacmi
W_{dyk}	: Agreganın doymuş yüzey kuru ağırlığı
W_k	: Agreganın tamamen kuru ağırlığı
ppm	: Bir milyonda kaç kısım
f_c	: Basınç dayanımı
w/c	: su-çimento oranı
k₁	: ampirik sabit
k₂	: ampirik sabit
K	: Komposite
f_{ck, sil}	: En düşük karakteristik silindir dayanımı
f_{c, küp}	: En düşük karakteristik küp dayanımı

Çizelge 3.1 : Portland çimentosu ana oksitlerinin yüzdelik dağılımı.....	8
Çizelge 3.2 : Portland çimentosu diğer bileşenlerinin yüzdelik dağılımı.....	9
Çizelge 3.3 : Döner fırındaki reaksiyonlar.....	18
Çizelge 3.4 : Oksitler, klinker bileşenleri ve diğer bileşenlerin notasyonları.....	19
Çizelge 3.5 : Portland çimentosunun tipik oksit bileşimi.....	20
Çizelge 3.6 : Tipik bir Portland çimentosunun oksit ve bileşen kompozisyonu.....	20
Çizelge 3.7 : Normal Portland çimentosunun tipik kompozisyonu.....	21
Çizelge 3.8 : Normal Portland çimentosunun anabileşenleri.....	22
Çizelge 3.9 : Portland çimentosu anabileşenlerinin özellikleri.....	22
Çizelge 3.10 : Portland çimentosu bileşenlerinin hidrasyon ısıları.....	24
Çizelge 3.11 : Beton agregası olarak kullanılan kayaç tipi agregalar.....	27
Çizelge 3.12 : Ağır agregaların bileşimi ve yoğunluğu.....	30
Çizelge 3.13 : Bazı doğal agregaların ortalama birim ağırlıkları.....	32
Çizelge 3.14 : Reaktif agregalar, fiziksel şekilleri ve kayaç tipleri.....	34
Çizelge 3.15 : Karışım suyu içerisindeki yabancı maddelerin bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri.....	38
Çizelge 3.16 : Karışım suyu içerisindeki yabancı maddelerin bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri.....	38
Çizelge 3.17 : Beton karma suyu için kimyasal sınırlar.....	39
Çizelge 3.18 : Şüpheli sularda kabul kriterleri.....	39
Çizelge 3.19 : Kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde yararlı etkileri, kimyasal katkı tipleri ve kategorileri.....	43
Çizelge 4.1 : Kıvam sınıfları (BS EN 206-1:2000).....	51
Çizelge 5.1 : Normal ve ağır beton için basınç dayanımı sınıfları.....	57
Çizelge 5.2 : Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları.....	58
Çizelge 6.1 : C20/25 beton karışım dizaynı.....	59
Çizelge 6.2 : C25/30 beton karışım dizaynı.....	59
Çizelge 6.3 : C30/37 beton karışım dizaynı.....	59
Çizelge 6.4 : C35/45 beton karışım dizaynı.....	60
Çizelge 6.5 : Kendiliğinden yerleşen beton karışım dizaynı.....	60
Çizelge 6.6 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	60
Çizelge 6.7 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri.....	60
Çizelge 6.8 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun mekanik özellikleri.....	60
Çizelge 6.9 : Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı.....	61
Çizelge 6.10 : Agregaların elek analiz sonuçları.....	61
Çizelge 6.11 : Çanakkale Biga Bekirli Termik Santrali uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	62
Çizelge 6.12 : C20/25 taze beton özellikleri.....	65
Çizelge 6.13 : C25/30 taze beton özellikleri.....	65
Çizelge 6.14 : C30/37 taze beton özellikleri.....	65
Çizelge 6.15 : C35/45 taze beton özellikleri.....	65
Çizelge 6.16 : Kendiliğinden yerleşen beton özellikleri.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Çimento üretiminin şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.2 : Yaş sistemde Portland çimentosu fırınında yer alan süreçler.....	17
Şekil 7.1 : Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	67
Şekil 7.2 : Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımı sonuçları.....	68
Şekil 7.3 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların 3,7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları.....	69
Şekil 7.4 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları.....	70
Şekil 7.5 : Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımları.....	71
Şekil 7.6 : Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük rölatif yarmada çekme dayanımları.....	72
Şekil 7.7 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların yarmada çekme dayanımları.....	73
Şekil 7.8 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların rölatif yarmada çekme dayanımları.....	74
Şekil 7.9 : Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri.....	75
Şekil 7.10 : Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri.....	76
Şekil 7.11 : Kendiliğinden yerleşen betonda donma-çözünme deneyi sonrası ağırlık kayı değişimleri.....	76
Şekil 7.12 : Kendiliğinden yerleşen betonda donma-çözünme deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri.....	77

ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN ÇİMENTO YERİNE İKAME EDİLMESİ İLE OLUŞTURULAN BETON NUMUNELERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ

ÖZET

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Tehlikeli boyutlarda çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan atık araç lastiği, uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve mermer toz atığı gibi endüstriyel atık malzemelerin, geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanımda beton karışımı ve kendiliğinden yerleşen beton karışımı üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton haricinde her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si olarak alınmıştır. Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olmak üzere kimyasal katkı kullanılmıştır. Üretimlerde 10 cm ebatlı küp kalıplar kullanılmıştır. Üretilen küp numuneler kür havuzunda 23 ± 2 °C suda bekletilmiştir. Numunelerde 3, 7, 28 ve 56 gün sonunda basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. C20/25 beton karışımında orta akışkanlaştırıcı, C25/30 ve C30/37 beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı, C35/45 beton karışımında modifiye polikarboksilat kimyasal katkısı, kendiliğinden yerleşen beton karışımında ise polikarboksilat kimyasal katkısı kullanılmıştır. Sonuç olarak kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı yaş birim ağırlık ve yayılma değerini artırmıştır. C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. Uçucu külün ileri ki basınç dayanımlarını artırdığı gerçeği de burada doğrulanmıştır. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür. Kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarını artırmıştır. Tüm beton sınıfları için ve kendiliğinden yerleşen betonlar için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır. Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda ve kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, beton, kendiliğinden yerleşen beton, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES FOR CONCRETE SPECIMENS PRODUCED WITH INDUSTRIAL WASTES USED IN STEAD OF SOME CEMENT

SUMMARY

The world has entered a rapid industrial development with the twentieth century. This development provides great returns in terms of civilization, but when considering the negative effects of industrial wastes on the environment, big problems arise. The reuse of these waste materials with useful recycling systems is important both in terms of economic and environmental impacts. It is thought that industrial wastes such as waste truck tire, fly ash, silica fume, granulated blast furnace slag and marble dust waste generally preferred in the construction industry which become dangerous to the environment are considered as recycling and will contribute to humanity in terms of improving both environmentally and concrete properties. In order to reuse waste materials in concrete and decrease production cost of conventional concrete, industrial wastes such as fly ash and blast furnace slag are replaced 20-30 percent of cement in concrete. Improving technologies should make cement production more energy efficient and environment friendly. Fly ash is a spherical granular waste material obtained from thermal power plants. Fly ash grains contain amorphous glassy crystals such as mullite, hematite, magnetite and quartz. The types of crystals that will be formed are dependent to the coal region and kiln heat. For the kilns heated with ground coal technology, 1200-1500 °C kiln heat is generated and 1800 °C heat is generated by the gasified coal process. With this technology, the fly ash is completely converted into fine-particle crystals and contains much higher levels of silica, alumina and iron oxide. There are two types of fly ash such as F and C types according to ASTM C 618-08 standard. The proportions for CaO, SiO and Al₂O₃ in the heterogeneous fly ash mixture determine the ash content. According to the American standard, 75% of the fly ash must have a particle size below 45 µm. Burning loss in fly ash should be kept at around 4%. The particle size should be well graded by applying sieve analysis. In other words, fineness is low and should be between 10-45 µm. The oxides present in the fly ash in high amounts are SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃. In addition, some CaO, MgO and Na₂O may be present. Fly ash is a waste material from artificial pozzolan class. There are two different groups according to the amount of CaO they contain. The first is a fly ash with a low calcareous/calcium content of less than 10% CaO, and a volatile ash with a CaO content of more than 10%. Fly ash use in concrete production was discovered in 1914 but its use began to be implemented in 1937. The pozzolanic features of volcanic tuffs similar to fly ash were first known to the Romans in the making of water canals. The burned ash from crop plants Egyptian pyramids again for the same purpose (silica pozzolan source) was used as raw material. High hydration heat emission offset is the lime component of the cement wherein the silicone by forming binder of calcium silicate hydrate and react with the fly ash particles are cemented concrete using the cement-concrete wherein a pozzolanic fly ash reduces the volume of cement needed in the concrete inside. F-type fly ash is used instead of 30-40% of the cement volume used today increases the compressive strength of the concrete structure consisting fed through pozzolan material, physical (freeze-thaw) and chemical (including the impact sulphate) improves the resistance to impact. As hydration develops, water amount is also reduced. About 60-70% of the concrete volume in cylinder-dam concretes is volatile. Pozzocrete application

called preferred for this application workability of the concrete structure of the global particulate fly ash and is also facilitating the compressibility. Fly ash is also used in cement plants in the production of clinker. The silica fly core, which contains the clinker obtained as a result of combustion of clay and limestone, is also present. The use of fly ash as recycling material is an important parameter for the sustainability and raw material reserves. In USA, 22 million tons of fly ash is used in various engineering applications. This amount is up to 32% of the fly ash in thermal power plants in USA. In Europe, especially for Germany, Belgium, Netherlands and France, about 90-95% of the fly ash produced is preferred for recycling. For United Kingdom, 50% of the fly ash is used for recycling. The world's fly ash production is about 450 million tons per year. However, only 6% of this is used for cement and concrete production. Fly ash production in Turkey is about 15 million tons for one year, but fly ash use in the industry is low. According to the 1990 data, only 1% of the fly ash is used in the industry. Two reasons for low fly ash use in Turkey are considered. The first is inadequate information on fly ash properties, and the second is that there is not a uniform behaviour for fly ash. In Turkey, it is known that 15 thermic power plants produce energy with coal mines. Some of these thermic power plants are Yatağan, Kemerköy and Yeniköy in Muğla, Çayırhan in Ankara, Çan in Çanakkale, Çatalağzı in Zonguldak, Çolakoğlu in Kocaeli, Kangal in Sivas, Soma in Manisa, Orhaneli in Bursa and Sugözü thermal power plants in Adana. While stonecoal is used in Çolakoğlu and Çatalağzı power plants, imported coal is used in Sugözü and lignite coal is used in others. In Afşin-Elbistan and Manisa-Soma, C type ash with high level of lime is found according to TS 639 Turkish standard while other fly ashes are accepted as F type ash. The workability and compressive strength of concrete mixtures can be reduced when manufactured sands are substituted for naturally sourced fine aggregate. Substantial experimental studies have been investigated for concrete technology especially for high performed concrete (properties such as compressive strength and serviceability), self-consolidating concrete, etc. Admixtures which have organic properties affected concrete properties. Superplasticisers generally improves workability and compressive strength. The chemical admixtures history began by sulphonated melamine formaldehydes in Germany and naphthalene derivatives in Japan. Then, polycarboxylate ethers were discovered. These ethers improved fluidity and resistance to segregation. For that reason, polycarboxylate admixtures are called as new generation chemical admixtures nowadays. Some advantages of polycarboxylate chemical admixtures are reducing water-cement ratio, increasing workability retention, increasing its compressive strength and serviceability. Polycarboxylate based superplasticizers especially are preferred for self-consolidating concrete. At this experimental study, effect of fly ash on concrete properties was investigated. Four concrete mixture which have different strength level and self-compacting concrete mixture were produced. Except for self-compacting concrete, control concrete, concrete with fly ash and concrete without fly ash were produced for each concrete class. The percentage of fly ash was 20 percent of the cement amount. In concrete containing fly ash and no fly ash, chemical admixtures was used as 1 percent of total binder amount. Cube molds of 10 cm size were preferred for placing. Cube samples were stored in water at 23 °C. Compressive strength results were found for 3, 7, 28 and 56 day specimens. In addition, split tension strength result was determined. Freezing and thawing resistance was also investigated. For C20/25 concrete mixture, mid-range plasticizer; for C25/30 and C30/37 concrete mixtures, superplasticizer; for C35/45 concrete mixture, modified polycarboxylate chemical admixture; for self-

compacting concrete, polycarboxylate chemical admixture was used. Consequently, fresh unit weight and flow value of self consolidating concrete with fly ash increased. For C20/25 concrete, it was found to be significant that fly ash use increased 3, 7 and 56 day compressive strength results. However, fly ash use reduced 28 day compressive strength result. 3 day compressive strength of concrete without fly ash is less than 3 day compressive strength of control concrete. The greatest compressive strength result of concrete using fly ash in C25/30 concretes was obtained for 56 day specimens. It was significant that fly ash use increased the later compressive strength. For C30/37 and C35/45 concretes, fly ash does not increase the earlier compressive strength. However, fly ash increases the later compressive strength results. For self consolidating concrete, fly ash use increased 28 and 56 day compressive strength results. Fly ash use for all concrete classes and for self-consolidating concrete has increased split tension strength results. Fly ash use for both all concrete classes and self-consolidating concrete has increased the freezing and thawing resistance.

Keywords: Fly ash, concrete, self-consolidating concrete, compressive strength, split tension strength

1. GİRİŞ

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Tehlikeli boyutlarda çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan atık araç lastiği, uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve mermer toz atığı gibi endüstriyel atık malzemelerin, geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

2. BETONUN TANIMLANMASI VE BETONUN TARİHSEL GELİŞİMİ

Çimento, agrega, su ve ihtiyaç duyulduğunda kimyasal katkıdan meydana gelen, taze halde şekil verilebilme özelliğine sahip sertleşerek dayanım kazanma süreci devam eden yapı malzemesi beton olarak tanımlanmaktadır (Usta, 2005; Yan ve Lai, 2007; Yalçın ve Gürü, 2006; Erdoğan, 2003; Neville ve Brooks, 2001; Mehta, Monteiro, 2006). Yapılarda kullanılan beton türü günümüzde artık hazır betondur ve “hazır beton”, ana dilleri İngilizce olan ABD, İngiltere, Avustralya, Güney Afrika gibi ülkelerde, “hazır-karılmış beton” anlamına gelen “ready-mixed concrete” olarak anılmaktadır. ABD’de, Kanada’da ve birçok Avrupa ülkesinde üretilmekte olan toplam çimentonun yaklaşık % 90’ı hazır beton üretiminde kullanılmaktadır. 1 ton hazır beton üretimi için yaklaşık olarak 0.1 GJ/t enerji harcanmaktadır (Gielen, 1997).

Betonun tarihsel gelişimine bakıldığında ise betonun insanlık tarihinde önemli bir yere sahip olduğu açıkça belirtilmiştir. Eski zamanlardan itibaren kalsiyum (Ca) esaslı bağlayıcı maddeleri yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Portland çimentosu ilk olarak 1824 yılında keşfedilmiş ve betonarme yapı ilk olarak 1857 yılında yapılmıştır (Usta, 2005). 1848 yılında ilk çimento fabrikası İngiltere’de kurulmuştur. 1857 yılında ilk betonarme sistemi Fransa’da bulunmuş, 1865 yılında yüksek fırın cürufu Portland çimentosu ile birlikte ilk olarak Almanya’da kullanılmıştır. 1903 yılında hazır beton sektörü ilk olarak Almanya’da başlamış, 1936 yılında kimyasal katkıları ilk olarak Almanya’da kullanılmıştır. 1965 yılında Amerika’da süper akışkanlaştırıcılar betonda kullanılmaya başlanmıştır (Usta, 2005).

Hazır beton ilk olarak 1903 yılında Almanya’da kullanılmış, birkaç yıl sonra da ABD’de üretimine başlanılmıştır (Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004; Usta, 2005). ABD’de üretimine başlandıktan sonra beton transmikser aracının imalatı ilk olarak 1914 yılında ABD’de gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1927 yılında beton harç iletme pompasının patenti alınarak yeni bir süreç başlamıştır. Hazır betonun birçok ülkede üretimi gerçekleştirilip kullanılabilir hale gelmesi sonucunda hazır beton yapılarda temel bir yapı malzemesi haline gelmiştir ve kullanımı gittikçe yaygınlaşmıştır (Usta, 2005). Nisan 1964’de Scientific American dergisinde basılan Brunauer ve Copeland’ın bir makalesinde en yaygın kullanılan yapı malzemesinin beton olduğu belirtilmiştir (Mehta, Monteiro, 2006).

Günümüzde beton kullanımı önceki yıllara göre büyük bir artış göstermiştir. Her yıl dünyada 11 milyar ton beton kullanımı gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Son 60 yıldır hazır beton sektörü dünyada büyük bir büyüme gerçekleştirmiştir. Örneğin; Amerika'da 10000 hazır beton tesisini yöneten 3700 firma vardır. Bu da ülkedeki toplam beton tüketiminin üçte ikisini kapsar. Firmaların % 6-% 7'si hazır betonun % 50'sini üretir. Her biri de 100'den fazla mikserine sahiptir (Mehta, Monteiro, 2006). Hazır betonun Avrupa ülkelerinde üretimi ise 20. yüzyılın ilk zamanlarında başlamıştır (Arıöz, Arslan, Tuncan, Kıvrak, 2007). 20. yüzyılın ilk zamanlarından sonra kentleşmede meydana gelen ivme artışıyla ve altyapı çalışmalarının artmasıyla hazır beton ve beton ürünleri daha çok üretilmeye başlanmıştır, hazır beton kullanımı yaygınlaşmıştır (Usta, 2005). Japonya, Amerika ve Güney Kore gibi gelişmiş ülkeler hazır beton sektörünün dünyada en büyük üreticileridir (Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004). Avrupa Hazır Beton Birliği, 1967'de kurulmuştur. 18 adet Avrupa Birliği'nden üyesi vardır. Ayrıca İsrail ve Türkiye'de Avrupa Hazır Beton Birliği'ne üyedir. Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Macaristan, İzlanda ve Rusya da üyedir (ERMCO). Avrupa'da toplam yıllık hazır beton üretimi 300 milyon m³'tür.

Avrupa hazır beton sektörü, toplam çimento satışının % 40'ını tüketir (ERMCO). Avrupa Hazır Beton Birliği üyelerine bakıldığında İspanya 46.28 milyon m³ ile 2000 yılında en büyük üretici olmuştur. İspanya'yı Almanya 36.5 milyon m³, İtalya 30 milyon m³ ve Türkiye 21 milyon m³ ile takip etmiştir (Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004). Avrupa Hazır Beton Birliği'nin kayıtlarına bakıldığında 2001 yılında hazır beton sektöründe 12000 hazır beton tesisinde 350 milyon m³ hazır beton üretildiği görülmektedir (Arıöz, Arslan, Tuncan, Kıvrak, 2007). Avrupa Hazır Beton sektöründe 12000'den fazla tesiste 300 milyon m³'ten fazla hazır beton üretilmektedir. 1 yılda kişi başına düşen hazır beton miktarı 0.3-1.40 m³'tür. 1875 yılından beri, kum ve hidrate olmuş kireç atlarla Berlin'deki inşaat alanlarına taşınmıştır. Bu da Hamburg'da yaşayan mimar Jürgen Magens'in eseridir. 10 Ocak 1903 yılında ilk patentini almıştır ve 1903 yılı hazır betonun ortaya çıktığı tarihtir. Daha sonra Hamburg ve Berlin'de hazır beton tesisleri kurulmuştur. Almanya dışında ise I. Dünya savaşından önce Amerika'da hazır beton dağıtımı gerçekleştirilmiştir. Avrupa'da, Danimarka'da 1926 tarihinden itibaren hazır beton üretilmiştir. Aynı zamanda 1926 yılında Amerika'da ilk beton mikseri üretilmiştir. II.

Dünya savaşından sonra hazır beton kullanımı tüm Avrupa'da yaygın hale gelmiştir (Ready-mixed-concrete, a natural choice, ERMCO).

Türkiye'de ise beton en önemli yapı malzemesi olarak yıllarca kullanılmıştır. Tipik bir büyük yapı projesinde toplam maliyetin yaklaşık % 10'u beton maliyeti olmasına rağmen, lokal hazır beton sektörünün olmamasından dolayı Türkiye'de kaliteli bir ürün üretilmemiştir (Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004). Ülkemizde hazır beton üretimi 1980'li yıllarda başlamıştır. Bu tarihten çok önce 1911 yılında ilk çimento fabrikası kurulumu gerçekleştirilmiştir. Türkiye'de hazır beton üretimi gittikçe yaygınlaşmaya başlamış, özellikle seksenli yılların ikinci yarısından sonra bu yaygınlaşma meydana gelmiştir. Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) 1988 yılında kurularak önemli bir adım gerçekleştirilmiştir. THBB, yıllık hazır beton üretiminin % 70'ini sağlayan bir kuruluştur ve hazır beton sektöründe önem arzeden bir kuruluş olarak tanımlanabilir (Öztürk, Akakın, Uçar, 2003). 1987'den sonra İstanbul, Ankara, İzmir ve Adana gibi nüfusu yüksek olan illerde hazır beton kullanımı artmıştır (Coşgun, Esin, 2006; Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004; Arıöz, Arslan, Tuncan, Kıvrak, 2007). Ülkemizde 1970'lerde bazı inşaat firmaları hazır betonu şantiyelerinde üreterek kullanmışlardır. 1980'den sonra ise hazır beton üretimi ciddi anlamda ilerleme kaydetmiştir. Zamanla hazır beton üretimi büyük bir gelişme göstermiş ve gelişen hazır beton ekipmanları sayesinde hazır beton üretimindeki zorluklar da kolayca aşılmıştır (Usta, 2005). Türkiye Hazır Beton Birliği 1988 yılında kurulmuştur. 2002 yılında Türkiye Hazır Beton Birliği'nin 71 üyesi olmuştur. Bu üyeler Türkiye'de üretilen betonun % 68.5'ini sağlamaktadır (Kazaz, Ulubeyli, Türker, 2004). 2003 yılında Türkiye'de 28.2 milyon m³ hazır beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Avrupa Hazır Beton Birliği'ndeki tüm üye ülkelere bakıldığında Türkiye beton üretimi bakımından 7. sırada yer almıştır. 1999 depreminden sonra hazır beton tesislerinin sayısında bir artış meydana gelmiştir. Türkiye Hazır Beton Birliği 2004 yılındaki verileri kaydetmiş ve bu verilere göre Türkiye'de 31590886 m³ hazır betonun 245 firma ve 473 tesis tarafından üretildiğini açıkça belirtmiştir. Tesislerin % 40'ı Marmara bölgesindedir ve bunun da % 50'si İstanbul'da yer almaktadır (Coşgun, Esin, 2006). Türkiye'de bugüne kadar üretilen betonun % 70'i hazır beton, % 30'u ise elle dökümdür. Son 15 yılda hazır beton sektörü Türkiye'de hızlı bir gelişim göstermiştir. 401 firmadan elde edilen verilere göre, 2002 yılında Türkiye'de 22.6 milyon m³ hazır beton üretilmiştir. Bu betonun 17.5 milyon m³'ü

Türkiye Hazır Beton Birliği'ne üye firmalar tarafından dökülmüştür. 2003 yılında üretim 2002'ye göre % 3.6 artmıştır. (Karaman, Esmeray, Öztoprak, 2006).

3. BETON BİLEŞENLERİ VE KONTROLÜ

Çimento, agrega, su ve ihtiyaç duyulduğunda mineral veya kimyasal katkı maddelerinin homojen bir şekilde karıştırılması sonucu taze halde şekil verilebilen zamanla hidrasyon reaksiyonlarının devam etmesiyle sertleşme süreci oluşup dayanım kazanabilen yapı malzemesi beton olarak tanımlanmaktadır (TS 802, 1985). Hazır beton tipik bileşenleri Portland çimentosu, kum, iri agrega ve sudur. Ayrıca doğal kum, kırmataş agrega, hafif agrega veya ağır agrega ile hazır beton üretilebilir. Katkı kullanımını da hazır beton üretiminde mevcuttur (Dewar ve Anderson, 1992).

Beton bileşenleri durabiliteyi negatif olarak etkilememeli ve korozyon oluşumuna sebep olmamalıdır. Bileşenlerin uygunluğu belirlenmiş olsa da her beton bileşiminde uygunluk faktörünün değiştiği de dikkate alınması gereken önemli bir husustur (TS EN 206-1, 2002).

3.1 Portland Çimentosu

Yunanlılar ve Romanlar volkanik külü bulmuşlar, volkanik külü ince hale getirmişler ve kireç ve su ile karıştırıp sertleşmiş harcı üretmişlerdir. 18. yüzyılın ortalarında John Smeaton silika ve alümina içeren ve bağlayıcı özelliği olan kireci bulmuştur. Smeaton bu malzemeyi 1759'da Eddystone Lighthouse inşasında kullanılan harçta kullanmışlardır (Newman ve Choo, 2003). Portland çimentosu Joseph Aspdin tarafından 1824 yılında keşfedilmiş ve 5022 nolu patent alınmıştır (Newman ve Choo, 2003). Çimento yapı sektöründe geniş kullanımı olan bir yapı malzemesidir. Portland çimentosu günümüzde beton üretiminde en yaygın kullanılan bileşendir (Mindess, Young, 1981). ASTM C 150 Amerikan Standardı'nda Portland çimentosu, kalsiyum silikat ile kalsiyum sülfat içeren öğütülmüş klinkerden üretilen bir bağlayıcı olarak tanımlanmaktadır. Klinkerin çapı 5–25 mm boyutları arasındadır (Mehta, Monteiro, 2006). Portland çimentosu ile su arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda sertleşme ve priz alma başlar. Portland çimentosu kalsiyum ve alüminyum silikatlardan meydana gelen ince toz kristal minerallerden oluşan yapı malzemesi olarak da tanımlanabilir. Minerallerin su ile birleşmesi sonucunda çimento hamuru oluşur. Sertleşme devam ettiğinde dayanımı taşın dayanımı gibi yüksek olan bir dayanım meydana gelir. Portland çimentosu özgül ağırlığı 3,12 ve 3,16 değerleri arasında değişim göstermektedir. Portland çimentosu inceliği ise 10–

50 µm arasında farklılık göstermektedir. ASTM C 150 Amerikan Standardı'nda çimento tipleri olarak Tip I, II, III, IV ve V çimentolarının yer aldığı belirtilmiştir. Ortalama Portland çimentosu tane boyutu 15 µm'dir (Nawy, 2001).

TS EN 206-1 Türk Standardına bakıldığında çimento, su ile birleştiğinde kimyasal reaksiyonlar sonucunda hidrasyon süreci devam eden, priz alma sonucunda sertleşme oluşabilen, dayanım kazanma süreci devam eden inorganik bir yapı malzemesi olarak tanımlanmıştır (TS EN 206-1, 2002). Portland çimentosu içeren beton, kullanım bakımından dünyada en çok kullanımı olan bir yapı malzemesidir. Portland çimentosunu 1824 yılında bir taşbilimci olan Joseph Aspdin keşfetmiştir (Mamlouk ve Zaniewski, 1999). Portland çimentosunun uygunluğu EN 197-1 standardına göre değerlendirilir (TS EN 206-1, 2002).

3.1.1 Üretim süreci

3.1.1.1 Hammaddeler

Üretim açısından bakıldığında Portland çimentosunun üretiminde doğallık olduğu ve bol hammadde kullanımı olduğu görülmektedir (Mindess, Young, 1981). Portland çimentosu hammaddeleri ise kalker esaslı malzemeler (kireçtaşı) ve silika ile alümina içeren killerdir (Neville ve Brooks, 1987). Kireçtaşından CaO gelmekte, kilden ise silika (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) gelmektedir (Nawy, 2001). Portland çimentosu temel olarak 4 ana oksit içerir. Bunlar; kalsiyum oksit, silika, alümina ve demir oksittir. Bunlar çimento kimyasında (3.1) ve (3.2)'de görüldüğü gibi simgelenmiştir (Newman ve Choo, 2003).



Bu oksitlerin yüzdeleri dağılımı Çizelge 3.1'de görülmektedir. Portland çimentosu içeriğindeki diğer bileşenlerin yüzdeleri ise Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Portland çimentosu ana oksitlerinin yüzdeleri dağılımı

Ana oksitler	Kısaltma	%
SiO ₂	S	21.1
Al ₂ O ₃	A	5.6
Fe ₂ O ₃	F	3.0
CaO	C	65.5
Toplam		95.2

Çizelge 3.2 : Portland çimentosu diğer bileşenlerinin yüzdelik dağılımı

	%
Mn ₂ O ₃	0.05
P ₂ O ₅	0.15
TiO ₂	0.30
MgO	1.50
SO ₃	1.20
Kızdırma kaybı	0.50
K ₂ O	0.72
Na ₂ O	0.18
Flor	0.04
Klor	0.02
Diğer elementler	0.01
Toplam	4.67

Yüksek kalitede çimentolar, yeterli saflığı ve üniform bileşimi olan hammaddeler gerektirir. Kireçtaşı (kalsiyum karbonat), kalsiyum oksidin en yaygın kaynağıdır. Çimento fabrikalarının konumu uygun kalker ocaklarının ve silika kaynaklarının yakınlığına bakılarak belirlenir. Kalsiyum silikatlar, Portland çimentosunun ana bileşenleri olduğundan, çimento üretimi için gerekli hammadde uygun şekillerde ve oranlarda kalsiyum ve silika içermelidir (Mehta, Monteiro, 2006). Demir içeren alüminosilikatlar, ana (temel) silika kaynağı olarak kullanılır. Kil veya siltler, ince olduğundan tercih edilir fakat yumuşak kayalar, şistler ve diğer killi kayalar da hammadde olarak kullanılır. Silisli hammaddelerin demir ve alümin miktarından elde edilen bileşenlerin Portland çimentosu dayanımına küçük katkısı olur. Dayanıklılık problemlerine ve anormal priz davranışına neden olabilir. Saf silika kullanımı, daha iyi bir çimentoya neden olur. Kuvars, doğada saf silikanın en yaygın formudur ve reaksiyona girmeyen bir malzemedir. Ayrıca, saf kireç-silika karışımlarının çok yüksek ergime sıcaklıkları vardır (2000 °C veya 3600 °F üstünde). Kireç ve silika arasında reaksiyonlar, yavaş bir sinterleşme süreciyle görünür. Bu düzeyde işlemler fabrikadan fabrikaya değişir. Çünkü hammadde, ekipman ve dizayna da bağlıdır (Mindess, Young, 1981). Doğal olarak var olan kireçtaşı, talk, marn gibi kalsiyum karbonatlar, yaygın endüstriyel kalsiyum kaynaklarıdır. Fakat kil veya dolomit (CaCO₃.MgCO₃) genellikle yabancı madde olarak mevcuttur. Kalsiyum silikat yapmak için ham karışımda killer ve şeyler, ilave silika kaynağı olarak tercih edilir. Çünkü kuvarsik silika kireç ile kolayca reaksiyona girmez (Mehta, Monteiro, 2006). Kil mineralleri, alümin (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) ve alkaliler içerir. Hammaddede alüminyum, demir ve magnezyum iyonlarının, alkalilerin varlığının kalsiyum

silikatların oluşumu üzerinde mineralleştirici bir etkisi vardır. Böylece, daha düşük sıcaklıklarda kalsiyum silikatlar oluşur. Bundan dolayı, ilk hammaddede yeterli miktarda demir ve alümin mineralleri mevcut değilse, hammaddeye sonradan boksit (alüminyum maden cevheri) ve demir cevheri eklenir. Sonuç olarak, kalsiyum silikat bileşenlerinin yanı sıra, Portland çimentosu klinkeri aynı zamanda kalsiyum alüminat ve kalsiyum alüminoferrit içerir. Saf kalkerin yapısının tümünde CaCO₃ (kalsiyum karbonat) bulunmaktadır. Ancak, çoğu zaman, kalkerli malzemeleri saf haliyle bulabilmek mümkün olamamaktadır. Büyük miktarda CaCO₃ içeren kalkerlerin içeriğinde biraz MgCO₃ ve çok küçük miktarlarda SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ ve alkali oksitler mevcuttur (Erdoğan, 2003). Killerde ise temel olarak SiO₂ ve Al₂O₃ mevcuttur. Farklı tipte killer mevcuttur ve bunlar oldukça kompleks yapıya sahiptir (Erdoğan, 2003). Çimento üretim sürecinde ihtiyaç duyulan oksitlerin bileşimi kalker ve killerden sağlanamadığı durumlarda, bazen, üretimde kum ve demir oksit içeren malzemeler de hammadde olarak kullanılabilir (Erdoğan, 2003). Pratikte, yüksek sıcaklıklar ve sürece tabi olacak malzemelerin yüksek miktarlarından dolayı, sürecin farklı düzeylerinde yeterli kalite kontrolün sağlanabilmesi için çok dikkat edilmelidir. Eğer hammaddenin bileşimi aşırı farklılık gösterirse, çimentodaki farklı kimyasal bileşenlerin yüzdeleri de oldukça farklılık gösterecektir. Karışımın optimum yanma sıcaklığı bileşimle farklılık gösterecektir. Ayrıca eğer tane boyutu oldukça büyük olursa bütün bir kimyasal kombinasyon malzeme fırında olduğu zaman görülmeyecektir ve düşük performans gösteren bir çimento oluşacaktır (Mindess, Young, 1981).

3.1.1.2 Üretim için gerekli hammadde karışımının hazırlanması süreci

Döner fırında ısıl işlem sürecine maruz kalacak hammadde karışımında CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ gibi temel oksitlerin uygun oranda olması istenir. Hammadde karışımlarının hazırlanması sürecinde (3.3), (3.4) ve (3.5)'deki oranlardan yararlanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

$$\text{Kireç doygunluğu faktörü} = \frac{CaO}{2.80SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3} \quad (3.3)$$

$$\text{Silika modülü} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.4)$$

$$\text{Demir modülü} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3.5)$$

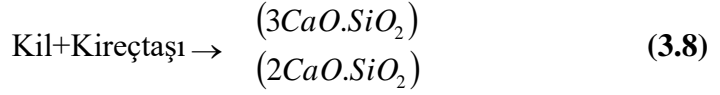
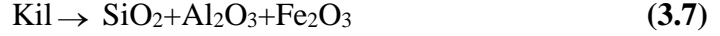
Kireç doygunluğu faktörünün değer aralığı 0,85–0,90 olmalıdır. Silika modülü için değer aralığı ise genellikle 2,0–2,5 olmalıdır. Demir modülü için bu aralığın 1–3 olması tercih edilir. Ancak beyaz çimento üretimi için gerekli hammaddede demir oksitin çok az olması zorunluluğundan dolayı demir modülünün çok yüksek olması gerektiği belirtilebilir (Erdoğan, 2003). Üretim için gerekli olan hammadde karışımı çok ince tane boyutuna sahip kalker ve killerin kuru bir şekilde veya su yardımıyla çamur haline getirilmesiyle hazırlanır. Özetle yöntem olarak iki farklı yöntemin kullanılabilmesi, bu yöntemlerin "kuru yöntem" veya "yaş yöntem" olarak tanımlanacağı belirtilebilir. Ayrıca karışım eğer çok az miktarda su ile karıştırılırsa bu yöntem de "yarı-kuru yöntem" olarak adlandırılır. Yaş yöntemde karışım içinde bulunan su miktarı % 35 civarında olduğundan dolayı ısı işlem esnasında daha çok enerjiye ihtiyaç duyulur ve maliyet artar ancak yaş yöntem üretimde rahat toz kontrolü sağladığından çevresel açıdan tercih edilen bir yöntemdir (Erdoğan, 2003). Çimento üretiminde yaş sistemde, hammaddenin öğütülmesi ve homojen bir hale getirilmesi % 30–40 su içeren çamur formunda yürütülür. Yaş sistemde her hammadde parçalanır ve ayrıca stoklanır. Malzemeleri karıştırma ince öğütme esnasında gerçekleştirilir. Örneğin, kil ince sulu çamura çevrilebilir. Kireçtaşının ıslak öğütülmesi ikinci bir sulu çamur oluşturmak için ayrıca yürütülür. Sulu çamurlar kullanıldığı zaman, karıştırma ve son oranlama uygun olarak yapılabilir. Ancak yüksek oranda suyun buharlaşması fırında yüksek miktarda ısı tüketir ve bu da daha yüksek maliyetlere sebep olur. Böylece ıslak sürecin son düzeylerinde su miktarı azalabilir. Eğer silika kaynağı bir killi kayaç ise mekanik öğütme gerekir ve ıslak sürecin avantajları kaybolur. Öğütmedeki iyileştirme, ıslak süreci ekonomik olmayan bir süreç yapar. Modern çimento fabrikaları kuru öğütme süreçlerini kullanır (Mindess, Young, 1981). Modern çimento fabrikaları kuru süreci uygun bulurlar. Çünkü kuru süreçte ıslak sürece göre enerji bakımından önemli ölçüde tasarruf sağlanmış olur. Çünkü çamurdaki su, klinkerleşmeden önce buharlaşmalıdır. Klinkerleşme için, çok aşamalı süspansiyon ön ısıtıcı kuru-süreç fırınları, ıslak süreçli fırınlar için 1400 kcal/kg enerjiye kıyasla 800 kcal/kg enerji gerektirir (Mehta, Monteiro, 2006). Yarı-kuru sistemde, malzeme karışımında % 12-% 14 aralığında su mevcuttur. Kuru sistem çimento üretiminde daha çok tercih

edilmektedir çünkü kuru öğütme için gerekli ilave enerji, fırındaki enerji tasarrufundan daha uygundur (Erdoğan, 2003). Eğer kuru yöntemde su ilave edilirse hammadde fırınla daha iyi temas eder ve granülometri iyileşir (Mindess, Young, 1981).

3.1.1.3 Üretim

Klinkerdeki bileşen oluşumunu kolaylaştırmak için, ısıl işlem sürecinden önce hammadde homojen bir hale getirilmelidir. Bu sebepten dolayı hammaddeler, kırım, öğütme ve harmanlama işlemlerine tabi tutulurlar. Stoklanmış malzemelerin kimyasal analizlerinden, oranları klinkerdeki bileşen kompozisyonuyla tayin edilir. Hammadde, genellikle toprak şekle sahiptir veya 75 µm tane boyutunun altındadır (Mehta, Monteiro, 2006). Üretim esnasında hammaddeler çok ince bir şekilde toz haline gelinceye kadar öğütülür, belirlenen oranlarda karıştırılır ve 1400 °C (2550 °F) sıcaklığında döner fırında ısıl işleme tabi tutulur (Neville ve Brooks, 1987). Karışım döner fırına konulur. Fırın eğimlidir. Karışım, üst uçtan yerleştirilir. Kömür veya farklı bir ısı kaynağı fırının alt ucundan yerleştirilir. Sıcaklık 1500 °C (2750 °F)'lere ulaşabilir. 1 ton çimento üretiminde kullanılması gereken kömür miktarı, 100 kg ve 350 kg arasında olmalıdır. Bu miktarlar kullanılan sürece bağlıdır (Neville ve Brooks, 1987). Hammadde eğimli döner fırında aşağı doğru ilerledikçe, karşılaştığı sıcaklık daha yüksektir. Döner fırında kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmeye başlar. İlk olarak su açığa çıkar ve CO₂, kalsiyum karbonattan açığa çıkar. Daha sonra döner fırında sıcaklığın en yüksek olduğu kısımda kireç, silika ve alümina arasında etkileşimler meydana gelir. Kütle daha sonra ergiyerek topraklanarak klinker halini alır. Klinker boyut olarak 3–25 mm çapındadır. Bu aşamadan sonra klinker soğutuculara gelir. Soğumuş klinker çok serttir. Alçıtaşı katılarak çimentonun hızlı priz yapması önlenir. Çimentonun 1 kilogramında 1.1×10^{12} tane vardır (Neville ve Brooks, 1987). Kuru sistemle çalışan bir döner fırında günde 6200 ton klinker üretimi gerçekleştirilebilir (Neville ve Brooks, 1987). Portland çimentosu üretiminde kuru sistemde en önemli adım, refrakter tuğlalarla sıralanmış eğimli çelik silindir içeren döner fırında yürütülen klinkerleşme aşamasıdır. Ön ısıtıcıdan geçmiş ve kısmen yakılmış ham karışım, sürekli döner fırının en yüksek ucuna gelir ve döner fırının alt ucuna doğru hareket eder. Öğütülmüş kömür, yağ veya fuel oil yakma bölgesinde alt uça içeri konulur. Sıcaklıklar 1450 ve 1550 °C'lere çıkabilir ve Portland çimentosu bileşenlerini içeren

kimyasal reaksiyonlar tamamlanır. Döner fırında yer alan kimyasal reaksiyonlar (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilmiştir (Mehta, Monteiro, 2006).

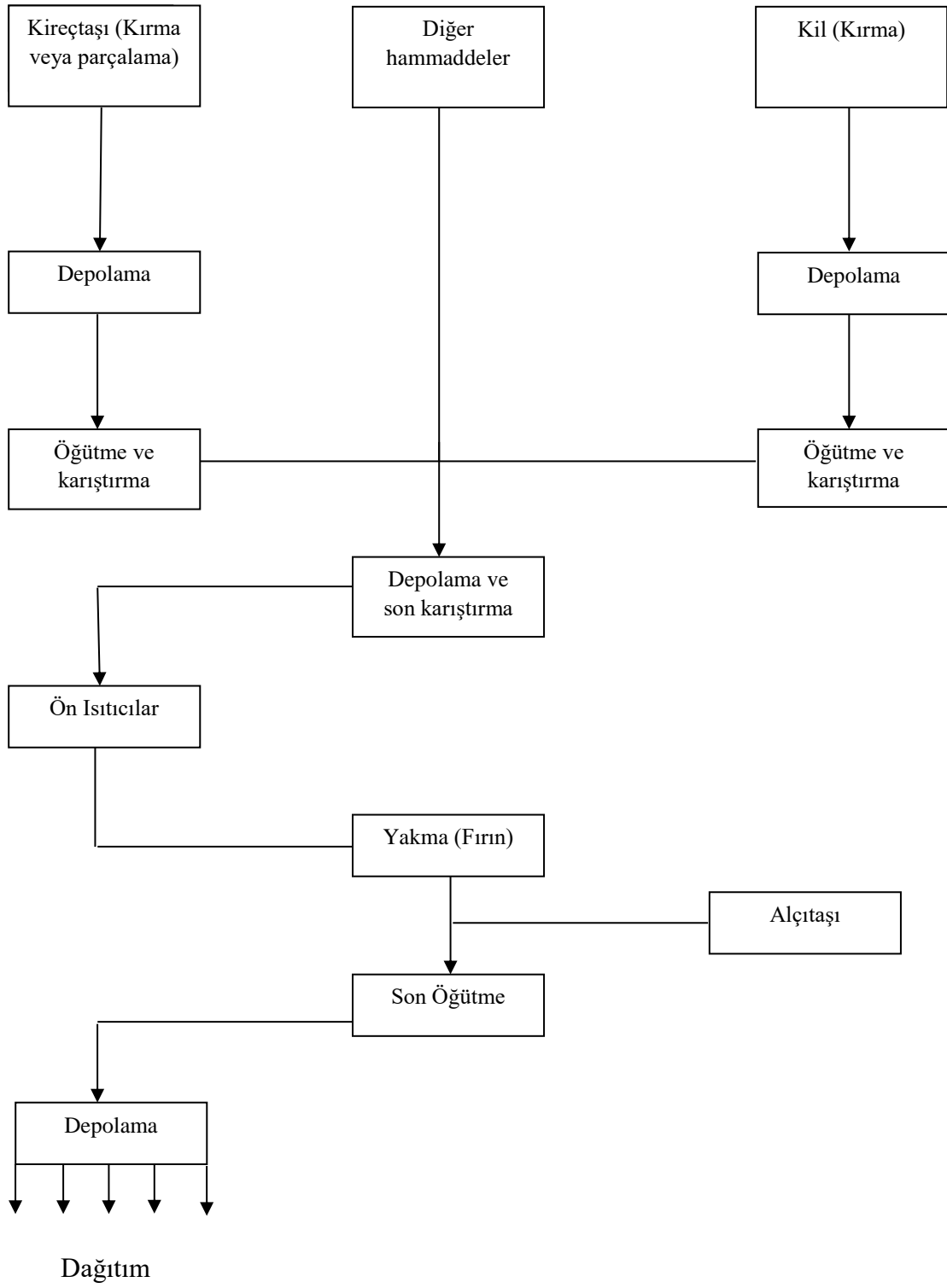


Üretimde son olarak klinker 10–15 µm tane boyutlarına sahip olacak şekilde bilyalı tamburlarda öğütülür. Klinkere % 5 alçıtaşı ilave edilerek çimentonun prizi erken alması kontrol edilir (Mehta, Monteiro, 2006). Genellikle kireçtaşı ve kil karışımı bir fırında 1400–1600 °C (2550–2900 °F)'de pişirilir (Mindess, Young, 1981). İki malzeme kimyasal olarak etkileşim gösterir ve kalsiyum silikatlar oluşur (Mindess, Young, 1981). Malzeme kısmen ergiyerek klinker halini alır. Klinker soğutulur ve alçıtaşı katılarak ince toz haline öğütülür. Sonuç olarak tüm dünyada kullanılan Portland çimentosu oluşur (Neville ve Brooks, 1987). Hammadde yeterli derecede karıştırıldığında, fırına girmeye hazırdır. Bu ısıl işleme klinkerleme adı verilir. Islak süreçte, malzeme fırında 2 saat ila 2,5 saat arasında kalabilir. Kuru süreçte ise bu süre 1 saat ila 1,5 saat arasındadır. Modern ısı değiştiricili bazı fırınlarda bu süre 20 dakika gibi oldukça az bir süredir. Fırını yakmak için kullanılan yakıt, toz kömürdür. Geçtiğimiz 15–20 yılda, Amerika'da birçok çimento fabrikası fuel oil ve doğal gazı yakıt olarak kullanmışlardır. Fakat bu yakıtların maliyetleri yüksek olduğundan tekrar kömür kullanımına geçmişlerdir. Fırında dört süreç gerçekleşir: buharlaşma, dağılma, klinkerleşme ve soğuma. Hammaddeyi tamamen pişirmede her düzey önemlidir. Fırının üst sonundaki dışarıya çıkan gazların sıcaklığı 240–450 °C (480–840 °F)'dir. Serbest suyun buharlaşmayla kaybolduğu noktaya kadar sıcaklık hızlıca artar. Fırının ilk kısmında metal zincirler, ısı transfer prosesi için kullanılmıştır fakat daha sofistike olan ısı değiştiricileri (süspansiyon ön ısıtıcıları gibi), karışımı ısıtmak için kullanılmıştır (Hammadde fırına girmeden önce). Serbest nem kaybolduğu zaman, sıcaklık 600 °C (1100 °F)'nin üstüne çıkar ve hammaddeler ayrışmaya (dağılma) başlar (çünkü bağ suyu ve karbondioksiti kaybeder). Dağılma süreci, fırının yarı uzunluğundan fazla devam eder. Karışım, reaktif bir karışım haline dönüşür ve yeni kimyasal kombinasyonlar başlar. Başlangıç kimyasal kombinasyonları bu sürecin sonraki kısmında meydana gelir (1200 °C (2200 °F)) ve

reaksiyonlar sonucunda kalsiyum alüminatlar ile ferritler oluşur. Bu bileşenler, 1350 °C (2450 °F)'de eritici madde gibi hareket eder. Burada klinkerleşme başlar. Klinkerleşme süreci toplam fırın uzunluğunun dörtte birinde gerçekleşir. Ancak bu süreç fırının en sıcak kısmında gerçekleşir. Burada kalsiyum silikatlar sıvı fazda oluşur. 15–45 dakika arasında sıcaklık, 1400–1600 °C (2550–2900 °F)' lere çıkar. Malzeme, fırının son kısmına ilerledikçe, sıcaklık düşmeye başlar. Klinkerin soğuma oranı, çimento bileşenlerinin oranını ve çimentonun reaktifliğini değiştirebilir (Mindess, Young, 1981). Portland çimentosu üretimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Mindess, Young, 1981).

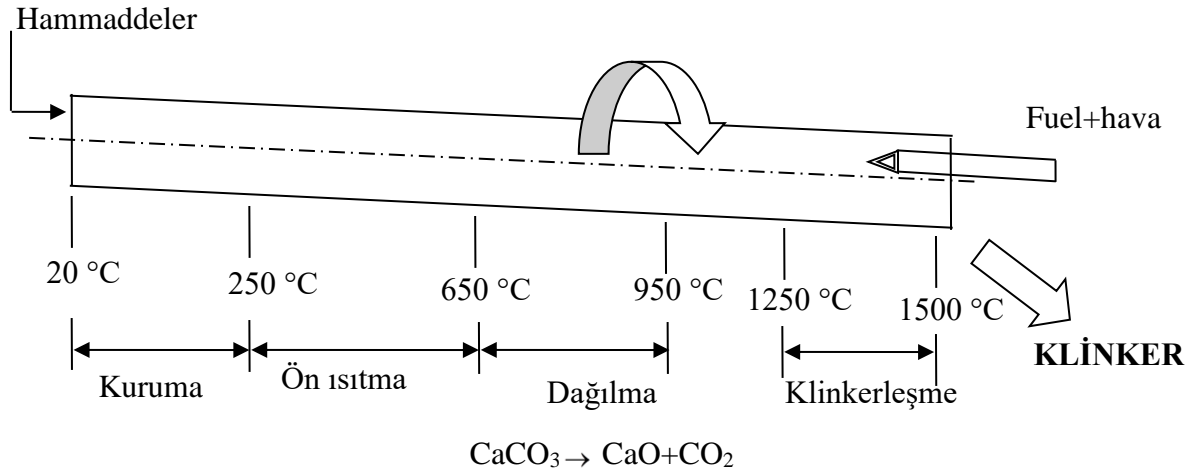
Fırından çıkan malzeme “klinker” olarak adlandırılır. İlave işlemlere ihtiyaç vardır. Koyu gri boşluklu topaklar (çapı 6 mm–50 mm arasında) şeklinde olan klinker hala sıcaktır ve ya hava ya da su spreyi ile soğutulur. Klinker, daha sonra ince tanelere öğütülür. Küçük bir miktar alçıtaşı, klinkere katılır. Çünkü bu işlem, C₃A'nın erken reaksiyonlarını kontrol etmek için gerçekleştirilir. Alçıtaşı ilave edilmezse, C₃A klinkerin ani prizine sebep olabilir. Çimento büyük silolarda dağıtıma kadar depolanır. Bu düzeyde çimentonun son karıştırması ürünün üniformluğunu sağlayacaktır (Mindess, Young, 1981). Portland çimentosu üretimi, enerjiye bağlı bir süreç içerir. Çünkü üretim için döner fırında yüksek sıcaklıklar gereklidir. Islak süreç, fazla enerji gerektirir çünkü sulu çamurun suyunu buharlaştırmak için yüksek ısının verilmesi gerekir. Çok etkili bir ısı değiştiricisi olan süspansiyon ön ısıtıcı kullanımı sadece hammaddeyi döner fırına girmeden önce kurutmakla kalmaz aynı zamanda kısmen hammaddenin dağılmasını sağlar. Daha çok enerjiye ihtiyaç vardır. Modern fabrikalarda bu ekipman kurulur. Süspansiyon ön ısıtıcılarının kullanımı fırının üretim kapasitesini % 50 veya daha fazla artırabilir. Yakıt maliyetlerinden kaçınmak için çimento şirketleri kömür kullanımını artırmışlardır. Fakat kömürde sülfür gibi yabancı maddelerin yüksek seviyelerde bulunması üretimde problemlere sebep olabilir (Mindess, Young, 1981). Üretim süreci CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ içeren hammaddelerin diğer kuru ya da ıslak şekilde eklenen bileşenlerle karıştırılması, karışımın eğimli döner fırının üst ucuna getirilmesi, döner fırında malzemenin zamanla daha aşağı kısımlara gelmesi, klinkerleşmenin oluşması, klinkerin soğutulması ve toz şekline getirilmesi, çimentonun priz süresini kontrol etmek veya geciktirmek için öğütülme esnasında düşük yüzdelerde alçıtaşı (CaSO₄.2H₂O) ilave edilmesi aşamalarından oluşmaktadır (Nawy, 2001). Üretilmiş Portland

imentosunun çoğunluğu dökme imento olarak silolara gider. Diğer kısmı da paketlenir.



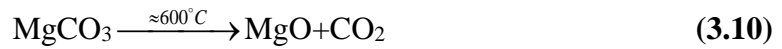
Şekil 3.1 : Çimento üretiminin şematik gösterimi

Yaş sistemde döner fırında yer alan süreçler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Yaş sistemde Portland çimentosu fırınında yer alan süreçler

Ön ısıtmada kil minerallerinin ayrışma süreci gerçekleşmektedir. CaCO_3 , 900 °C’de ayrışır ve bunun sonucunda kalsiyum oksit ve karbondioksit açığa çıkar. Eğer, kalker içeriğinde MgCO_3 var ise, döner fırında ısıl işlem sürecinde ayrışma sonucunda magnezyum oksit ve karbondioksit açığa çıkar. Bu olaylar (3.9) ve (3.10)’da gösterilmiştir (Erdoğan, 2003).



Döner fırında 500-600 °C sıcaklıkta kil ayrışarak SiO_2 ve Al_2O_3 oluşur. Killerde bunun dışında demir oksit ve diğer yabancı maddeler de bulunabilir (Erdoğan, 2003). Hammadde karışımı “döner fırın” olarak adlandırılan fırınlarda pişirilmektedir. Döner fırın, içi boş bir silindirin şekline sahip uzun bir fırındır. Fırın, bir ucu diğer ucundan daha yüksekte kalacak tarzda yaklaşık olarak % 3-% 4 eğimle yerleştirilmiştir. Çelikten yapılmış olan bu fırının iç yüzünde yüksek sıcaklığa dayanıklı tuğla kullanılmıştır. Döner fırının çapı 2 m ile 6 m arasında değişmektedir; boy/çap oranı ise 15 ile 30 arasında değişim göstermektedir. Yaş sistemli döner fırınlarda olması gereken boy/çap oranı 30’dur. Kuru sistemli döner fırınlarda ise

boy/çap oranı 15'dir. Döner fırınlar çalışır durumda iken, 60–180 devir/saat yapabilir. Klinker üretimi için hammaddelerin pişirilmesi işleminde kullanılan bu fırına, kendi eksenini etrafında döndüğü için, “döner fırın” denilmiştir (Erdoğan, 2003). Döner fırındaki reaksiyonlar Çizelge 3.3’de gösterilmiştir (Popovics, 1992).

Çizelge 3.3 : Döner fırındaki reaksiyonlar

Sıcaklık (°C)	Süreç	Isıl Değişim
100 °C ve altı	Serbest suyun buharlaşması	Endotermik
500 °C ve üstü	Kil minerallerinin dehidroksilasyonu	Endotermik
900 °C ve üstü	Kil minerallerinin dehidroksilasyon ürünlerinin kristalizasyonu	Ekzotermik
	CaCO ₃ ayrışması	Endotermik
900 °C–1200 °C	CaCO ₃ , CaO ve alüminosilikatlar arasındaki reaksiyon	Ekzotermik
1250 °C–1280 °C	Sıvı oluşumunun başlaması	Endotermik
1280 °C üstü	İleri sıvı oluşumu ve çimento bileşenlerinin oluşumunun tamamlanması	Endotermik

Hammaddeler döner fırının üst kısmından beslenir. Döner fırındaki sıcaklık alt kısımdan verilen yakıtla sağlanır. Fuel oil, doğal gaz ve toz kömür yakıt seçenekleridir. Döner fırının alt kısmında sıcaklık maksimumdur ve 1500 °C civarındadır. Yaş sistemli döner fırınlarda üst kısım sıcaklığı 100 °C'dir. Hammaddelerin ön ısıtıcılarda ısı işlem gördükten sonra beslendiği döner fırınlarda ise üst kısım sıcaklığı 900 °C'dir (Erdoğan, 2003).

Döner fırının üst kısmından beslenen hammadde karışımı, dönme işleminin ve fırının eğiminin etkisiyle, yavaş bir şekilde aşağıya doğru hareket ederek yüksek sıcaklıklarla karşılaşır. Kilde ısı işlemi etkisiyle 500–600 °C sıcaklıkta ayrışma süreci yaşanarak SiO₂ ve Al₂O₃ oksitleri oluşur. Sıcaklık 900 °C'ye ulaştığında kalkerde ayrışma meydana gelir ve CaO ve karbondioksit oluşur (Karbondioksit, diğer gazlarla birlikte bacadan dışarıya çıkmaktadır) (Erdoğan, 2003). Sıcaklık etkisiyle hammadde karışımından açığa çıkan CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ oksitleri, sıcaklığın artmasıyla birlikte özellikle 1200 °C'de birbirleriyle kimyasal tepkimeler geçirmeye başlar. Sıcaklık 1250–1300 °C'ye ulaştığında hammadde karışımının % 20-% 30'unda sıvılaşma meydana gelir ve bunun sonucunda klinker taneleri oluşur. Çimento anabileşenleri oksitlerin 1200–1400 °C'de kimyasal tepkimeleri sonucu ortaya çıkar. Anabileşenler klinkerin yapısını oluşturur (Erdoğan, 2003). Döner fırında en alt kısımdan önce malzemede soğuma meydana gelir ve döner fırının en alt kısmından çıkan son malzeme klinker olarak adlandırılır. Klinker siyahımsı

renktedir. Serttir ve tane boyutu 1 mm ile 25 mm arasında değişmektedir (Erdoğan, 2003).

3.1.2 Kimyasal kompozisyonu

Portland çimentosunun kimyasal bileşiminin belirlenmesi için standart kimyasal analiz yöntemleri kullanılabilir (Mindess, Young, 1981). Farklı kalsiyum bileşenleri Portland çimentosunda yer almasına rağmen kimyasal bileşimin esası oksitlerdir (Mehta, Monteiro, 2006). Her element oksit olarak belirlenir (Mindess, Young, 1981). Bileşimdeki oksitler, klinker bileşenleri ve diğer bileşenlerin kısaltmaları Çizelge 3.4’de verilmiştir (Mehta, Monteiro, 2006; Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.4 : Oksitler, klinker bileşenleri ve diğer bileşenlerin notasyonları

Oksit	Notasyon	Bileşen	Notasyon
CaO	C	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ S̄
SO ₃	S̄	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ .2H ₂ O	C̄S̄H ₂
Ca(OH) ₂	CH		
CaCO ₃	C̄C̄		

SO₃ haricindeki diğer oksitler çimento klinkerindeki oksitlerdir. Klinker SO₃ içermemektedir. SO₃ kaynağı alçıdır (CaSO₄=CaO.SO₃). Oksitlerden CaO'in kaynağı kalker, SiO₂ ve Al₂O₃ kaynağı ise kildir. Hammaddelerde az da olsa Fe₂O₃ de yer almaktadır ve tüm bu oksitler çimentonun anabileşenlerini meydana getiren oksitler olarak bilinmektedir (Erdoğan, 2003). Portland çimentosu bileşiminde yer alan tüm oksitler Çizelge 3.5’de sunulmuştur (Mindess, Young, 1981). Çizelge 3.5’de yer alan oksitlere bakıldığında MgO, Na₂O ve K₂O'nun çimentonun performansını etkileyen oksitler olduğu belirtilebilir. Mn₂O₃, P₂O₅ ve TiO₂ oksitlerinin miktarı ise çimento bileşiminde oldukça düşüktür ve bu oksitler çimentonun davranışını yüksek oranda etkilemez. Çimentonun renginin gri olması bileşiminde MgO varlığından kaynaklanır. MgO bulunması hacimsel genleşme durumu açısından önem taşımaktadır (Mindess, Young, 1981). Çimento bileşiminde var olan MgO ve alkalilerin çimento özellikleri açısından faydalı bir işlevi yoktur. Bu oksitler belirli

bir limit değerden daha yüksek olursa hamurda ve betonda genleşme meydana gelebilir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.5 : Portland çimentosunun tipik oksit bileşimi (Mindess, Young, 1981)

Oksit	Notasyon	Genel ismi	Ağırlık (%)
CaO	C	Kireç	63
SiO ₂	S	Silika	22
Al ₂ O ₃	A	Alümina	6
Fe ₂ O ₃	F	Demir oksit	2.5
MgO	M	Magnezyum oksit	2.6
K ₂ O	K	Alkaliler	0.6
Na ₂ O	N		0.3
SO ₃	\bar{S}	Kükürt anhidriti	2.0
CO ₂	\bar{C}	Karbondioksit	-
H ₂ O	H	Su	-

Çizelge 3.6'da ise yine bir Portland çimentosundaki oksit bileşimi verilmiştir (Neville ve Brooks, 1987).

Çizelge 3.6 : Portland çimentosundaki oksit bileşimi

Oksit Kompozisyonu (%)		Bileşen (%)	
CaO	63	C ₃ A	10.8
SiO ₂	20	C ₃ S	54.1
Al ₂ O ₃	6	C ₂ S	16.6
Fe ₂ O ₃	3	C ₄ AF	9.1
MgO	$1\frac{1}{2}$	Diğer bileşenler	-
SO ₃	2		
K ₂ O	1		
Na ₂ O			
Diğerleri	1		
Kızdırma kaybı	2		
Çözünmeyen kalıntı	$\frac{1}{2}$		

Çizelge 3.6 kapsamlı bir şekilde incelendiğinde kızdırma kaybı ve çözünmeyen kalıntı önem taşımaktadır. BS 12: 1991'de çözünmeyen kalıntının sınır değerinin çimento ağırlığının maksimum % 1,5'u olması gerektiği yer almıştır. ASTM C 150-92'de ise çözünmeyen kalıntının maksimum çimento ağırlığının % 0,75'i olması gerektiği belirtilmiştir. Kızdırma kaybı ile ilgili sınır değer her iki standartta da çimento ağırlığının maksimum % 3'ü olarak verilmiştir (Neville ve Brooks, 1987).

Eğer iki farklı çimento oksit bileşiminde bir farklılık gözlenirse bu durum anabileşen özelliklerinde bir farklılık meydana getirebilir. Bogue denklemlerine göre MgO gibi yabancı oksit varlığı ihmal edilmiştir. Çimentoda MgO'nun kaynağı dolomittir. Portland çimentosunda serbest kalsiyum oksit bulunması önem taşıyan bir husustur. Klinkerde serbest kalsiyum oksit oluşması hammadde oranlarının yanlış hesaplanması, öğütmenin yetersiz olması, döner fırında sıcaklık yetersizliği ve döner fırında zamanın kısa tutulması gibi nedenlerden kaynaklanabilir (Mehta, Monteiro, 2006). Portland çimentosu kimyasal analizi gerçekleştirildiğinde oksit bileşimi ortaya çıkar ancak çimento özelliklerinin değişimine oksit bileşimine bakarak karar verilemez. Anabileşenler belirleyici etkindir. Anabileşen hesaplamaları Bogue denklemleri kullanılarak gerçekleştirilir (Mehta, Monteiro, 2006). Bogue denklemleri ASTM C 150 Amerikan Standardı'nda yer almaktadır. Bogue denklemleri (3.11)-(3.18)'de verilmiştir (Mindess, Young, 1981).

A durumu: $A/F \geq 0.64$

$$C_3S = 4,071C - 7,600S - 6,718A - 1,430F - 2,852\bar{S} \quad (3.11)$$

$$C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S \quad (3.12)$$

$$C_3A = 2,650A - 1,692F \quad (3.13)$$

$$C_4AF = 3.043F \quad (3.14)$$

B durumu: $A/F < 0.64$

$$C_3S = 4,071C - 7,600S - 4,479A - 2,859F - 2,852\bar{S} \quad (3.15)$$

$$C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S \quad (3.16)$$

$$C_3A = 0 \quad (3.17)$$

$$C_4AF = 2,100A + 1,702F \quad (3.18)$$

Normal Portland çimentosundaki anabileşenler ve ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 3.7'de sunulmuştur (Mindess, Young, 1981).

Çizelge 3.7 : Normal Portland çimentosunun tipik kompozisyonu

Kimyasal adı	Kimyasal formülü	Notasyon	Ağırlık (%)
Trikalsiyum silikat	$3CaO.SiO_2$	C_3S	50
Dikalsiyum silikat	$2CaO.SiO_2$	C_2S	25
Trikalsiyum alüminat	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	12
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	8
Kalsiyum sülfat dihidrat (alçıtaşı)	$CaSO_4.2H_2O$	$C\bar{S}H_2$	3.5

3.1.3 Anabileşenler ve özellikleri

Normal Portland çimentosundaki anabileşenler ve ağırlıkça yüzdeleri Çizelge 3.8'de yer almaktadır (Mindess, Young, 1981; Neville ve Brooks, 1987; Erdoğan, 2003).

Çizelge 3.8 : Normal Portland çimentosunun anabileşenleri

Anabileşen adı	Kimyasal formülü	Notasyon	Ağırlık (%)
Trikalsiyum silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	50
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	25
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	12
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8

Çizelge 3.8'de görüldüğü üzere C_3A ve C_3S reaktivitesi en yüksek anabileşenlerdir. C_2S reaksiyon hızı ise oldukça düşüktür. Alçıtaşı ilave edilmesinden dolayı C_3A 'nın hızlı reaksiyona girmesi engellenmiş olur (Mindess, Young, 1981; Neville ve Brooks, 1987; Erdoğan, 2003). C_3S , Portland çimentosu klinkerinde bulunan bir anabileşendir. C_3S alite olarak adlandırılır. C_3S hidratasyonu kalsiyum silikat hidrat oluşumuna yol açar. C_3S yüzdesi daha yüksek olan çimentolarda erken dayanım daha yüksektir. C_2S anabileşenin erken dayanım üzerindeki etkisi önemli derecede olmamakla birlikte nihai dayanımlara etkisi çok daha belirgindir (Nawy, 2001). Yapısı özelliklerini belirlediğinden dolayı kalsiyum silikat hidratlardaki bileşim farklılıklarının fiziksel özellikleri üzerinde düşük bir etkisi vardır (Mehta, Monteiro, 2006). Her anabileşenin çimento özelliklerine sağladığı katkı farklıdır ve bu durum Çizelge 3.9'da özetlenmiştir (Erdoğan, 2003; Nawy, 2001).

Çizelge 3.9 : Portland çimentosu anabileşenlerinin özellikleri

Bileşen	Reaksiyon hızı	Hidratasyon ısısı	İlk dayanıma katkısı	Son dayanıma katkısı
Trikalsiyum silikat, (C_3S)	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
Dikalsiyum silikat, (C_2S)	Yavaş	Düşük	Düşük	Yüksek
Trikalsiyum alüminat, (C_3A)	Hızlı	Çok yüksek	Düşük	Düşük
Tetrakalsiyum alüminoferrit, (C_4AF)	Yavaş	Düşük	Düşük	Düşük

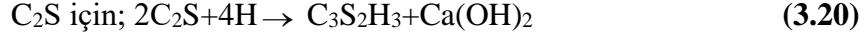
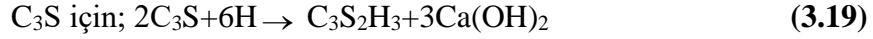
C_3S ve C_2S etkisi hamurun dayanımı açısından oldukça önemlidir. Çimentodaki silikatlar saf bileşenler değildir. Katı çözültide yabancı oksitler içerirler. Bu oksitlerin

silikatların atomsal dizilimi, kristal formu ve hidrolik özellikleri üzerinde ciddi etkileri vardır (Neville ve Brooks, 1987). Çimentoda C_3A varlığı istenmeyen bir durumdur. Çimento dayanımına katkısı hemen hemen çok azdır veya yoktur. Sertleşmiş çimento hamuru eğer sülfat etkisine maruz kalırsa kalsiyum sülföalüminat ve etrenjit oluşur. Kalsiyum sülföalüminat ve etrenjit oluşması zararlı bir durum meydana getirir (Neville ve Brooks, 1987). C_4AF anabileşen yüzdesi düşüktür ve bu anabileşen çimento özelliklerini önemli derecede etkilemez. C_4AF alçıtaşı ile tepkimeye girer, bunun sonucunda kalsiyum sülföferrit oluşur ve kalsiyum sülföferrit oluşumu silikat hidrasyonunda bir hızlanma meydana getirebilir (Neville ve Brooks, 1987).

3.1.4 Hidratasyon

Anhidrat Portland çimentosu kum ve çakıl ile bağlanamaz (Mehta, Monteiro, 2006). Su ile karıştırıldığında adeziv özellik kazanır. Çünkü çimento ile su arasında kimyasal reaksiyonlar olmaktadır (Mehta, Monteiro, 2006; Mindess, Young, 1981). Çimento ve su arasındaki bu kimyasal reaksiyonlara hidrasyon adı verilir (Mehta, Monteiro, 2006). Hidrasyon süreci bittiğinde oluşan ürünler hidrasyon ürünleri olarak belirtilebilir (Mindess, Young, 1981). Anabileşenlerin hidrasyon süreçleri farklıdır (Mehta, Monteiro, 2006). Hidrasyon hızı açısından bir karşılaştırma yapıldığında alüminatlarda silikatlara göre çok daha hızlı hidrasyon gerçekleştiği söylenebilir. Alüminatların hidrasyonu çimento hamurunun kıvam kaybı ve priz alma özelliklerini belirler. Silikatlar normal Portland çimentosunun % 75'ini oluştururlar ve dayanım kazanmada etkin bir rol oynarlar (Mehta, Monteiro, 2006). C_3A ve C_3S en reaktif bileşenlerdir. C_2S çok daha az reaktiftir. Alçıtaşı varlığı C_3A 'nın erken hidrasyonu azaltır. C_4AF -alçıtaşı-su reaksiyonu C_3S reaksiyonundan daha yavaştır. Eğer alçıtaşı olmazsa C_4AF hidrasyonu çok hızlı gerçekleşir, bu da istenmeyen bir durumdur (Mindess, Young, 1981). C_3A 'nın suyla reaksiyonu anidir. C_3AH_6 , C_4AH_{19} ve C_2AH_8 gibi kristal hidratlar hızlıca oluşur. Yüksek oranda hidrasyon ısıyı açığa çıkar. C_3A 'nın hızlı hidrasyonu bazı yöntemlerle yavaşlatılmazsa Portland çimentosu yapısal uygulamalarda kullanılamaz. Bu sorun alçıtaşı kullanımı ile çözülür (Mehta, Monteiro, 2006). C_3S hidrasyonu sonucuna ürün olarak mikrokristal hidrat olan $C_3S_2H_3$ ve kristal $Ca(OH)_2$ ortaya çıkar. C_2S hidrasyonu bittiğinde daha az $Ca(OH)_2$ oluştuğu görülmektedir. Çimento kimyasında kalsiyum

silikat hidratlar C-S-H jeli olarak tanımlanmaktadır. Yaklaşık hidratasyon reaksiyonları (3.19) ve (3.20)'deki gibidir (Neville ve Brooks, 1987).



Tüm silikatlar hidratasyon için aynı miktarda suya ihtiyaç duyar. Ancak C_3S 'in hidratasyonunda C_2S 'in hidratasyonuna göre iki kat daha fazla $Ca(OH)_2$ oluşur (Neville ve Brooks, 1987). Çoğu çimentoda C_3A miktarı oldukça düşüktür. Hidrate olmuş yapısı kalsiyum silikat hidratlar etrafındaki kübik kristal yapıdır. Saf C_3A 'nın su ile tepkimesi hızlı gerçekleşir ve ani priz meydana gelebilir. Bu problem klinkere alçıtaşı eklenmesi ile çözülür. C_3A 'nın reaksiyonu kalsiyum silikatların reaksiyonundan daha hızlıdır. Reaksiyon (3.21)'deki gibidir (Neville ve Brooks, 1987).



C_3A hidratasyonunda ihtiyaç duyulan su miktarı C_3S hidratasyonunda ihtiyaç duyulan su miktarından daha yüksek olacaktır (Neville ve Brooks, 1987). Portland çimentosu hidratasyon reaksiyonları ekzotermik reaksiyonlardır. Reaksiyonlarda ısı açığa çıkmaktadır. Hidratasyon ısısı dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bir Portland çimentosunun hidratasyon ısısı hesaplamaları J/g cinsinden (3.22) ve (3.23)'de verilmiştir (Mindess, Young, 1981).

$$H_{3\text{günlük}}=240(C_3S)+50(C_2S)+880(C_3A)+290(C_4AF) \quad (3.22)$$

$$H_{1\text{yıllık}}=490(C_3S)+225(C_2S)+1160(C_3A)+375(C_4AF) \quad (3.23)$$

Burada C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF anabileşenleri çimento ağırlığının %'si olarak belirtilmiştir (Mindess, Young, 1981). Portland çimentosu anabileşenlerinin zamanla hidratasyon ısıları Çizelge 3.10'da kal/g cinsinden verilmiştir (Mehta, Monteiro, 2006).

Çizelge 3.10 : Portland çimentosu anabileşenlerinin zamanla hidratasyon ısıları (kal/g)

Bileşen	Hidratasyon ısısı (kal/g)		
	3 gün	90 gün	13 yıl
C_3S	58	104	122
C_2S	12	42	59
C_3A	212	311	324
C_4AF	69	98	102

Anabileşenlerin zamanla açığa çıkan hidrasyon ısısını belirleme metodları BS 4550: 1978 ve ASTM C 186-92 standartlarında anlatılmıştır. Hidrasyon süresinde sıcaklık ısı miktarını etkiler. Portland çimentosunda açığa çıkan hidrasyon ısısının yarısı ilk günlerde (1. gün ile 3. gün arasında) açığa çıkar. 7 gün sonunda hidrasyon ısısının dörtte üçü ve 6 ay sonunda da % 90'ı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan hidrasyon ısı çimentonun kimyasal bileşimine bağlıdır ve toplam hidrasyon ısı anabileşenlerin hidrasyon ısılarının toplamına eşit olduğu bilinen bir gerçektir. Eğer çimentonun hidrasyon ısı düşürülmek isteniyorsa C₃A ve C₃S oranlarının azaltılması gerekmektedir. Isı miktarını etkileyen diğer bir faktör çimentonun inceliğidir. Hidrate olmuş çimentonun dayanımından C₃S ve C₂S sorumludur. İlk 4 haftada C₃S'in dayanıma katkısı daha fazladır. C₂S ise daha sonraki dayanım kazanmayı etkiler. Yaklaşık 1 yıl sonra iki bileşenin dayanıma etkisi hemen hemen eşittir (Neville ve Brooks, 1987).

3.1.5 Portland çimentosu tipleri

Amerika'da ASTM standartlarında Portland çimentosu tipleri 5 farklı şekilde tanımlanmıştır. Çimentolardaki farklılığın sebebi anabileşenlerdeki farklılıktır. Tip I çimentosu özel olmayan geleneksel yapılarda kullanımı mevcut olan çimentodur. Eğer hava sıcaklığının düşük olduğu durumda beton dökülmek isteniyorsa ve dayanım kazanma hızı artırılmak isteniyorsa Tip III çimentosu tercih edilmelidir. Çimentodaki C₃S anabileşen miktarı artırılırsa istenilen bu özellik elde edilebilir ancak bundan ziyade çimentoyu daha ince öğütme yöntemi dayanım kazanma hızı açısından daha etkilidir. Süreç açıklanacak olursa çimento inceliği arttıkça özgül yüzey alanı artar ve tane daha çok su ile temas halinde olur. Bunun sonucunda hidrasyon hızı artar ve dayanım kazanma hızı yükselir. Tip I çimentosu ile Tip III çimentosu karşılaştırılacak olursa Tip III çimentosu tercih edildiğinde ilk 24 saat sonunda dayanım kazanma miktarı Tip I çimentosu tercih edildiğindeki dayanım kazanma miktarının iki katıdır (Mindess ve Young, 1981). Eğer çimentodaki C₃S anabileşen yüzdesi yüksekse ve hidrasyon hızı yüksekse buna bağlı olarak ortaya çıkan hidrasyon ısı da yüksek olur. Eğer bu ısı dışarıya çıkmazsa sıcaklık artışı oldukça yüksek olacaktır. Kütle betonlarında hidrasyon ısısının önemi oldukça belirgindir. Kütle betonlarında beton taze halde iken ilk günlerde içsel sıcaklıklar yüksektir ancak bu yüksek içsel sıcaklıkların betona herhangi bir zararı yoktur. Zamanla dayanım kazanma devam ettikçe bazı problemler meydana gelebilir. Bu

problemler kütle betonda oluşabilecek ısı gerilmelerden kaynaklanan çekme çatlaklarıdır. Bu nedenden dolayı kalınlığı 0,5 m'den yüksek olan kütle betonlarında Tip III çimentosu kullanılmamalıdır. Özellikle baraj betonlarında ısı rötre çatlakları önemli bir problem teşkil etmektedir. Bu sorun Tip IV düşük hidratasyon ısı çimento kullanılarak çözülebilir (Mindess ve Young, 1981). Tip V çimentosu ise sülfat etkisine karşı direnci yüksek olan betonlarda tercih edilmesi gerekli olan bir çimento tipidir. Özellikle yapılarda beton dökümünden sonra erken yaşlarda beton sudan veya zeminden kaynaklanan sülfat etkisine maruz kalabilir. Sülfat etkisi mevcut olduğunda C_3A 'dan oluşan hidratasyon ürünleri arasındaki etkileşimler sözkonusudur. Eğer sülfat etkisi önlenmek isteniyorsa C_3A miktarı düşürülmeli ve C_4AF 'ye dönüşümü sağlanmalıdır (Mindess ve Young, 1981).

3.2 Agrega

Agrega tanımı TS EN 206-1 Türk Standardına göre yapılacak olursa beton hacminin önemli miktarını teşkil eden taneli mineral malzeme olarak tanımlanabilir. Agregalar, elde edilme yöntemlerine göre doğal ve yapay agregalar olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılabilir (TS EN 206-1, 2002). Agregalar ağırlıklarına göre ise normal, hafif ve ağır agregalar olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılabilir. Normal ve ağır agregalar prEN 12620:2000 standardına uygun, hafif agregalar ise prEN 13055-1:1997 standardına uygun olmalıdır (TS EN 206-1, 2002). Agrega maliyeti düşük ucuz bir beton bileşenidir. Su ile arasında bir kimyasal tepkime gerçekleşmez. Betonda basınç yüklerini agrega taşır ve aynı zamanda agrega beton durabilitesi üzerinde de önemli bir rol oynar. Agreganın işlenebilirliği belirlemede de önemli bir rolü vardır (Mehta ve Monteiro, 2006). Betonda agrega varlığı, çimento hamuru ile doldurulacak boşluğu azaltma açısından oldukça önemlidir. Beton üretimine başlanmadan önce üretimde kullanılacak agreganın granülometrisinin tayin edilmesi gerekmektedir. Ayrıca agreganın şekil ve yüzey yapısı, su emme kapasitesi, silt, kil veya ince madde miktarı, nem miktarı, özgül ağırlık gibi önemli özelliklerinin de belirlenmesi dikkate alınması gereken bir husustur (Dewar ve Anderson, 1992). Beton üretiminde kullanıma uygun kayaç agregaları Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Beton agregası olarak kullanılan kayaç tipi agregalar (BS 812): Kısım 102: 1989 (Dewar ve Anderson, 1992)

andezit	dolomit	hornfels
bazalt	flint	kireçtaşı
çört	gabbro	kuartz
diorit	granit	kumtaşı
dolerit	grittası	syenit

Agrega hacim olarak betonda % 60-75 civarında, ağırlıkça ise % 79-85 civarındadır. Karışım kalitesi artırılmak isteniyorsa ve maliyet düşürülmek isteniyorsa agrega miktarı belirli bir miktara kadar artırılmalıdır (Mamlouk ve Zaniewski, 1999).

3.2.1 Tanımlar, sınıflandırmalar, özellikler

Agregalar, çimento ve su ile birlikte beton üretiminde kullanımı mevcut olan, doğal veya yapay olabilen tanelerdir (Arioğlu ve ark., 2006). Betonda agrega önemli bir bileşendir. Agrega özellikleri, beton özelliklerini etkiler ancak betonun performansını kontrol etmezler. Agreganın betonda kullanılmasının üç farklı nedeni vardır. İlk neden agreganın çimentodan ucuz olması ve su ile tepkimeye girmemesi, ikincisi ise agreganın rötreyi ve sünmeyi azaltması, üçüncüsü ise agreganın betonun dayanıklılığını artırmasıdır (Newman ve Choo, 2003; Mehta ve Monteiro, 2006). Beton üretiminde kullanılan agregalar hacimce % 60-80 arasındadır ve mineral kökenlidir (Arioğlu ve ark., 2006; Mehta ve Monteiro, 2006). Beton özelliklerini etkileyen önemli bir faktör de agreganın fiziksel ve mekanik özellikleridir (Erdoğan, 2003). Agregalar sertliği ve dayanımı yüksek, kirliliği düşük olmalıdır (Baradan, 1996; Mindess ve Young, 1981). Agregaların, silt, kil, organik madde içermemesi gerekmektedir çünkü silt, kil ve diğer ince maddeler betonun ihtiyaç duyduğu su miktarını artırır, organik madde de çimento ile tepkimeye girebilir. Beton bileşenlerinin miktarlarının belirlenmesinde agreganın fiziksel özellikleri önemli rol oynar. Agrega şekil ve yüzey yapısı, porozite, elastisite modülü, tane boyutu dağılımı, su muhtevası (nem), özgül ağırlık ve birim ağırlık gibi fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Mindess ve Young, 1981; Mehta ve Monteiro, 2006). Agregaları sınıflandırma agregaların doğru kullanımının belirlenmesinde oldukça önemlidir (Erdoğan, 2003). Agregalar hakkında fikir sahibi olabilmek için sağlandığı kaynaklar, özgül ağırlıkları, üretim yöntemleri, mineral

yapıları bilinmelidir (Erdoğan, 2003). Sağlandığı kaynaklarına göre doğal ve yapay, özgül ağırlıklarına göre ise hafif, normal ve ağır agregalar olarak tanımlanırlar (Akman, 1992).

3.2.2 Doğal agregalar

Doğadaki agrega yataklarından ya da taş ocaklarından elde edilen malzemeler kırılarak elenir ve yıkandıktan sonra kullanılır (Erdoğan, 2004). Doğal agrega TS 706 EN 12620 standardında tanımlanmıştır. Bu standartta doğal agrega, mekanik bir işlem dışında herhangi bir işlem geçirmemiş olan mineral kaynaklardan sağlanan agrega olarak belirtilmiştir (TS 706 EN 12620, 2003). En bilinen doğal agregalar kum, çakıl ve kırmataştır (Akman, 1992; Baradan, 1996). Doğal mineral agregalar, Portland çimentosu içeren betonda doğal mineral agregalar kullanılır. Amerika'da beton sektöründe kullanılan toplam iri agreganın yarısı çakıl, diğer yarısı ise kırmataştır. Karbonat kayaçları, kumtaşı, granit, diorit, gabro ve bazalt kırmataş agregalardır. Karbonat kayaçlarının en yaygın olanı kireçtaşıdır. Kireçtaşı saf kireç taşından saf dolomite kadar farklılık göstermektedir (Mehta ve Monteiro, 2006).

3.2.3 Yapay agregalar

Atık malzemeler kullanılarak üretilen agregalar yapay agregalar olarak sınıflandırılır (Erdoğan, 2003). TS 706 EN 12620 standardında yapay agrega bir endüstriyel süreç geçirmiş mineral kökenli agrega olarak tanımlanmıştır (TS 706 EN 12620, 2003). Yapay agregaların en yaygın bilinenleri yüksek fırın cürufu, uçucu kül agregası, genişletilmiş kil agregası ve genişletilmiş perlittir (Erdoğan, 2003). Hafif beton ve hafif duvar elemanlarının üretilmesinde yapay agregalar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Akman, 1992). Döner fırında 1000–1200 °C'de sıcaklık sebebiyle çeşitli gazlar açığa çıkar ve bu gazların bir kısmı kil içerisine hapsolarak gözenekli hafif bir ürün oluşur (Erdoğan, 2003). Gözenekli bu hafif ürünün yoğunluğu 1,4–1,8 t/m³'tür (Erdoğan, 2003). Termik santral atığı olan uçucu kül çimento üretiminde kullanılır. Uçucu kül eğer 1100–1200 °C'de ayrıca ısıl işleme tabi tutulursa doğal çakıl ve kırmataş agregaya oranla daha hafif ve yuvarlak agrega taneleri üretilebilir (Erdoğan, 2003). Yapay hafif agrega üretiminde perlit kullanılabilir. Perlit yapısında % 2–6 civarında su içeren gri renkte volkanik bir kayadır. Bu kayacın kırılarak 800–1150 °C sıcaklığında ısıl işlem uygulanır. Genleşme meydana gelir ve 10–30 kat hacim artışı meydana gelir. Sonuçta yoğunluğu düşük, rengi beyaz, kullanım alanı

geniş bir hafif agrega oluşur (Erdoğan, 2003). Bu hafif agrega kullanılarak ağırlığı düşük ve ısı yalıtımı yüksek bir beton üretilebilir (Erdoğan, 2004). Perlit ayrıca yalıtımda ve sıva işlerinde de kullanılır (Erdoğan, 2004). Hafif agregaların yoğunluğu 1120 kg/m^3 'ten daha düşüktür ve hafif beton üretiminde hafif agregalar kullanılır. Agregadaki hafiflik boşluklu mikroyapıdan kaynaklanır. Doğal hafif agregalardan bazıları ponza taşı, skoria veya tüftür. Hafif agregaların yoğunluğu $80\text{--}900 \text{ kg/m}^3$ arasında değişim gösterir (Mehta ve Monteiro, 2006).

3.2.4 Ağır agregalar

Betonda kullanılan agregalar Türk standartlarında ağırlıklarına göre tanımlanmamıştır. Beton agregaları özgül ağırlıklarına sınıflandırılır; “Özgül ağırlıkları 2.4-2.8 arasında değişen agregalar normal ağırlıklı, özgül ağırlıkları 2.4'ten daha az olan agregalar hafif, özgül ağırlıkları 2.8'den daha büyük olan agregalar ise ağır agregalar olarak adlandırılır”. Betonda kum, çakıl, kırmataş gibi agregalar kullanıldığında üretilen beton "normal ağırlıklı beton" veya sadece "beton" olarak tanımlanabilir. Hafif betonda ise genleştirilmiş kil, genleştirilmiş perlit, bims kullanılır. Hafif agregalar kullanılarak üretilen betonlar ise "hafif beton" olarak adlandırılır. Ağır beton üretiminde ağır agregalar kullanılır. Ağır beton genellikle nükleer santrallerde radyasyonun geçişini önlemek amacıyla kullanılır. Ağır betonların birim ağırlığı $2900\text{--}6100 \text{ kg/m}^3$ arasında değişim gösterir. Nükleer santral betonu üretiminde ağır agregalar kullanılır (Mehta ve Monteiro, 2006). Çizelge 3.12'de ağır agregalar, kimyasal bileşimleri, özgül ağırlık ve yoğunluk değerleri sunulmuştur.

Çizelge 3.12 : Ağır agregaların bileşimi ve yoğunluğu (Mehta ve Monteiro, 2006)

Agrega tipi	Mineral kimyasal bileşimi	Saf mineralin özgül ağırlığı	Yoğunluk (kg/m ³)
Witherite	BaCO ₃	4,29	2320
Barit	BaSO ₄	4,50	2560
Manyezit	Fe ₃ O ₄	5,17	2720
Hematit	Fe ₂ O ₃	4,9–5,3	3040
Lepidocrocite	Sulu demir cevheri (% 8–12 su içeren)	3,4–4,0	2240
Geotit	Sulu demir cevheri (% 8–12 su içeren)	3,4–4,0	2240
Limonit	Sulu demir cevheri (% 8–12 su içeren)	3,4–4,0	2240
İlmenit	FeTiO ₃	4,72	2560
Ferrofosfor	Fe ₃ P, Fe ₂ P, FeP	5,7–6,5	3680
Demir agregası	Fe	7,8	4480

Ağır agregaların yoğunluk değerleri normal agregaların yoğunluk değerlerinden daha yüksektir. Baryum minerali, demir cevheri, titanyum cevheri ağır agregalar için uygun doğal kayaçlardır. Sentetik bir ürün olan ferrofosfor cürufu da ağır agregalar olarak kullanılabilir. ASTM C 637 ve C 638 Amerikan Standardları'na bakıldığında ferrofosfor agregası beton üretiminde tercih edildiğinde yanıcı toksik gazlar açığa çıkabilmekte ve bunun sonucunda yüksek basınçlar oluşabilmektedir. Sulu demir cevherleri, boron mineralleri, demir agregaları ağır beton üretiminde kullanılan diğer agregalardır. Boron ve hidrojenin nötron tutulmasında oldukça etkili olduğu belirtilmiştir (Mehta ve Monteiro, 2006).

3.2.5 Agregaların özellikleri

3.2.5.1 Tane boyut dağılımı

Agrega farklı boyutta tanelerden oluşabilir. Gradasyon agregalar için oldukça önemli bir özelliktir (Baradan, 1996). Agregalar gradasyonu elek analizi deneyi gerçekleştirilerek tayin edilmektedir (Arıoğlu ve ark., 2006). Agregalar tane boyut dağılımı tayini sürecinde agregalar taneleri büyüklüklerine bakılarak farklı gruplara bölünür. Her gruptaki agregalar tanelerinin toplam ağırlığı tüm agregalar yığınının toplam ağırlığına oranlanır (Erdoğan, 2004; TS 3530 EN 933–1, 1999). Betonda kullanılacak ideal agregalar şekil olarak küresele yakın olmalıdır. Doğal kum ve çakılın küresele yakın olduğu söylenebilir. Kırmataş ise köşelidir, pürüzlü bir yapıya sahiptir. Betonda mekanik özelliklerin iyi olması açısından yüzeyi pürüzlü agregalar kullanımı

daha iyidir. Agreganın granülometrisi betonda işlenebilirlik açısından önemli bir faktördür. Çimento maliyeti yüksek bir bileşen olduğundan dolayı ne kadar az çimento hamuru kullanılırsa beton maliyeti de o derecede düşecektir. İnce agreganın ile iri agreganın tanımlanmasında belirleyici bir etken mevcuttur. 4,75 mm açıklığa sahip elek üzerinde kalan agreganın iri agregası, 4,75 mm açıklığa sahip elekten geçen agregası ise ince agregası olarak belirtilmiştir (Mindess ve Young, 1981). Betondaki çimento hamuru miktarını etkileyen önemli bir parametre iri agreganın maksimum tane boyutudur. Eğer iri agreganın tane boyutu yüksek olursa taşıyıcı eleman kesitindeki beton taşıyıcı elemanı tanımlayamaz. İri agreganın maksimum agreganın tane boyutu, taşıyıcı eleman en küçük boyutunun 1/5'inden daha yüksek olmamalıdır. Döşemelerde durum biraz daha farklıdır. Döşemelerde maksimum agreganın tane boyutu, döşeme kalınlığının 1/3'ünü geçmemelidir (Mindess ve Young, 1981).

3.2.5.2 Birim ağırlık

Agreganın birim ağırlığı belirli bir hacmi kaplayan agreganın ağırlığı olarak belirtilebilir. Agreganın birim ağırlığı sıkışık veya gevşek birim ağırlık olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanabilir (Baradan, 1996; Erdoğan, 2004). Agreganın birim ağırlık denklemi (3.24)'de verilmiştir. Bazı doğal agregaların birim ağırlık değerleri Çizelge 3.13'de yer almıştır (Erdoğan, 2004).

$$U = \frac{W_a}{V} \quad (3.24)$$

U : Agreganın birim ağırlığı, (gr/cm³, kg/m³, ton/m³)

V : Agreganın doldurulduğu kabın hacmi

W_a: Kap içerisine konulan agreganın ağırlığı (gr, kg, ton)

Çizelge 3.13 : Bazı doğal agregaların ortalama birim ağırlıkları

Agrega	Nem durumu	Birim ağırlık, t/m ³	
		Gevşek	Sıkışmış
Kum	Kuru	1.52	1.68
	Nemli	1.44	-
Çakıl	Kuru veya nemli	1.53-1.59	1.65-1.74
Karışık agrega	Kuru	-	1.88
	Nemli	1.72	-
Kırma taş	Kuru veya nemli	1.46-1.59	1.52-1.67

3.2.5.3 Özgül ağırlık

Agrega özgül ağırlığı agreganın gerçek eşdeğer su hacminin ağırlığına oranlanmasıyla bulunur (Baradan, 1996; Erdoğan, 2003). Eğer betonda kullanılan su, çimento ve agregaların özgül ağırlıkları bilirse bu bileşenlerin 1 m³'teki hacim değerleri hesaplanabilir. Agreganın özgül ağırlık denklemi (3.25)'de sunulmuştur (Erdoğan, 2003).

$$S_{dyk} = \frac{W_s + V_p \gamma_w}{(V_s + V_i + V_p) \gamma_w} \quad (3.25)$$

W_s: Agreganın tamamen kuru (fırında kurutulmuş) ağırlığı, gr

V_p: Su geçirgen boşlukların hacmi

V_s: Agregadaki katı kısımların hacmi

V_i: Su geçirmeyen boşlukların hacmi

3.2.5.4 Su emme

Agreganın su emme kapasitesi durabilite açısından oldukça önemlidir. Eğer agreganın su emme kapasitesi yüksek olursa su boşluklu agregalar içine kolay bir şekilde girer ve soğuk havalarda bu su buz haline dönüşerek genleşmeye ve çatlamaya neden olabilir. Agreganın su emme kapasitesi denklemi (3.26)'daki formülde verilmiştir (Erdoğan, 2003).

$$\text{Su emme kapasitesi, \%} = \left[\frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \right] \times 100 \quad (3.26)$$

W_{dyk} : Agreganın doymun yüzey kuru ağırlığı

W_k : Agreganın tamamen kuru ağırlığı

3.2.5.5 Yassılık

Agrega şekli işlenebilirliği ve dayanımı etkileyen önemli bir parametredir. Eğer agreganın yüzey alanının hacmine oranı yüksekse işlenebilirlik azalır. Agregada yassılık beton basınç dayanımını negatif yönde etkiler. Yassılık indeksi, yassı tanelerin ağırlığının toplam agreg ağırlığına oranıdır ve deneye tabi tutulan kuru agreg ağırlığının yüzdesi olarak tanımlanır (Neville, 1983). Yassılık deneyi tane boyutu 4 mm'den az veya 80 mm'den yüksek olan agregalara uygulanmaz (TS 9582 EN 933-3, 1999). Agreg a yassılık deneyinde tane büyüklüğü belirlenmesi en önemli husustur. Bu deneyde farklı silindirik çubuklu elekler kullanılır. Agreg a yoğunluğu 2080 kg/m³'ten yüksek olan agregalar ağır agreg a olarak sınıflandırılmıştır. Kum, çakıl, kırmataş beton agregaları olarak bilinir. Bu agregalar doğal mineral agregalardır. Doğal agregaların yoğunluğu 1520-1680 kg/m³ aralığındadır. Agreg a yoğunluğu 1120 kg/m³'ten düşükse hafif agreg a olarak belirtilebilir. Diğer yandan, genleşmiş kil ve şeyl gibi ısıl işlem görmüş malzemeler hafif beton üretiminde kullanılır ve sentetik agregalar olarak adlandırılır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu külden üretilen agregalar sentetik agregalar sınıfına girmektedir. Agreg a özellikleri hem beton karışım özelliklerini hem de taze ve sertleşmiş beton özelliklerini etkiler. Çoğu agreg a için görünür yoğunluk 2,6 ve 2,7 arasında değişmektedir. Granit, kumtaşı ve kireçtaşı için görünür yoğunluk değerleri sırasıyla 2,69, 2,65 ve 2,60'dır. Agregadaki boşluklar suyla dolu yüzey kuru ise agreg a doymun-yüzey kuru durumdadır. Eğer agreg a doymun ise ve aynı zamanda yüzey nemli ise agreg a ıslaktır. Fırın kurusu durumda ise 100 °C'de agregadaki su buharlaşır. Agreganın parçalanma direnci, aşınma direnci ve elastisite modülü agregadaki boşluk yapısı ile yakından ilişkilidir. Granit, bazalt, kuartz kumtaşı ve kireçtaşı agregaları için tipik parçalanma direnci ve dinamik elastisite modülü değerleri 210-310 MPa ve 70-90 GPa arasında değişir (Mehta ve Monteiro, 2006).

3.2.5.6 Alkali-agrega reaksiyonu

Doğal halde bulunan silikanın en reaktif olan şekli opaldır. Opal amorf ve boşluklu bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda sodyum veya potasyum içeren borosilikatın da reaktifliği yüksektir (Mindess ve Young, 1981). Çizelge 3.14’de reaktifliği yüksek agregalar, fiziksel şekil yapıları ve kayaç cinsleri verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Reaktif agregalar, fiziksel şekilleri ve kayaç tipleri

Reaktif Bileşen	Fiziksel Şekil	Kayaç Tipleri	Görünüm
Opal	Amorf	Silisli (opalinli) kireçtaşları, çörtler, şeyler, flintler	Yaygın
Silika camı	Amorf	Volkanik camlar (riyolit, andezit, dasit ve tüfler; sentetik camlar)	Volkanik orijinli bölgeler; dere çakılları
Kalsedon	Zayıf, kristalli kuartz	Silisli kireçtaşları ve kumtaşları, çörtler ve flintler	Yaygın
Tridimit, kristobalit	Kristal	Opalinli kayaçlar, seramikler	Yaygın değil
Kuartz	Kristal	Kuartzit, kumlar, kum taşları ve metamorfik kayaçlar (granit gibi)	Yaygın

3.3 Su

3.3.1 Karışım suyu

Beton karışım suyunun iki önemli işlevi vardır (Popovics, 1979; Uyan ve Kılınç, 2003). Birinci işlev tanımlanacak olursa beton karışım suyu çimento ile agrega tane yüzeyleri ile temas eder, bu sayede bileşenler daha rahat karıştırılabilir. Taze betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması kolaylaşır. Bu sayede işlenebilirlik iyileşir. İkinci işlevi ise çimento ile kimyasal tepkimeler geçirmesi sonucunda hidrasyon mekanizmasını başlatmasıdır.

Beton karışım suyu kalitesi beton prizini, dayanım kazanma oranını ve korozyondan korunmayı etkilemektedir. Eğer kullanılacak suyun kalitesi bilinmezse bu durum beton üretimi için sıkıntılı olabilir. Bundan dolayı karışım suyu uygunluğunun belirlenmesi gerekmektedir (TS EN 1008, 2003). Beton üretiminde kullanılacak karışım suyu olarak içilebilen sular kullanılabilir (TS EN 1008, 2003). Karışım suyunun uygunluğu prEN 1008:1997 standardına göre belirlenmelidir (TS EN 206-1,

2002). Betonda kullanılacak karışım suyu betonun sertleşmesini, dayanımını, dayanıklılığını etkilememeli, çiçeklenme oluşmasına neden olacak donatıda paslanma oluşturacak yabancı maddeler ihtiva etmemelidir (Taylor, 1977; Uyan ve Kılınç, 2003).

3.3.1.1 Karışım suyu uygunluğu

Karışım suyu beton üretimi için önemli bir bileşendir (Mindess ve Young, 1981; Uyan ve Kılınç, 2003). "İçilebilir su beton üretimi için kullanılabilir" açıklaması her zaman kullanılmayabilir (McCoy, 1964; Uyan ve Kılınç, 2003). Örneğin düşük miktarlarda şeker ve limon tuzu tatlandırıcı ihtiva eden bazı sular içme suyu olarak uygundur ancak beton karışım suyu olarak uygunluğu mümkün değildir. Bazen beton üretimi için uygun bir suyun içme suyu olarak uygunluğu olmayabilir. Atıklara maruz olmayan bölgelerden sağlanan sular, tuzlu ve acımsı bir tat içermedikçe karışım suyu olarak tercih edilebilir (Troxell, Davis, Kelly, 1968; Uyan ve Kılınç, 2003). Bu suların testlerinin yapıp uygunluğunun belirlenmesi gerekmektedir (Taylor, 1977; Uyan ve Kılınç, 2003). Beton karışım suyunun kullanıma uygunluğunda suyun kokusu ve tadı da önemli parametrelerdir (Popovics, 1979; Uyan ve Kılınç, 2003). Eğer içme suyu yüksek oranda sodyum ve potasyum içeriyorsa alkali agrega reaksiyonu oluşabilir, bu durumda içme suyu beton karışım suyu olarak uygun olmayabilir (Neville, 1981; Uyan ve Kılınç, 2003). Beton karışım suyunda eğer renk koyu ve koku da kötüyse bu durum daima karışım suyunda zararlı madde bulunduğu anlamına gelmez. Karışım suyu beton prizini ve betonun durabilitesini olumsuz etkilememelidir (Akman, 1987; Uyan ve Kılınç, 2003). Karışım suyunda bulunması istenmeyen anyon ve katyonlar Cl^- , CO_3^{2-} , NH_4^+ , Mn^{++} , Mg^{++} , vb. maddelerdir. Ağır metal tuzları (kurşun ve çinko tuzları vb.) prizi geciktirebilir. Bundan dolayı bu tuzların karışım suyunda bulunmaması istenir. Karışım suyu ayrıca organik madde de içermemelidir. Karışım suyunda şeker, nişasta vb. maddeler prizi geciktirir ve bu durum da sorun meydana getirebilir. Betonda bir zarar meydana getirebilecek tuzlar kurak bölgelerdeki sularda mevcut olabilir (Eglinton, 1987; Uyan ve Kılınç, 2003). BS 3148 İngiliz standardında çimentonun priz süreleri ve beton basınç dayanımı ile ilgili bazı ifadeler yer almaktadır. Bu ifadeler, beton üretimi için karışım suyu uygunluğu, beton dayanımında izin verilen azalmalar ve priz sürelerindeki gecikmeler hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Kimyasal maddeler üretimi gerçekleştiren fabrikaların kanalizasyonlarından elde

edilen suyu beton karışım suyu olarak kullanabilme hususunda dikkatli olmak gerekir (Beton Laboratuvar Deneyle, 1985; Uyan ve Kılınç, 2003). Birinci dikkat edilmesi gereken husus koku, renk ve karıştırıldığında bulanıklık olup olmadığı ve eğer bulanıklık varsa bu bulanıklığın uzun süre devam edip etmemesidir. Eğer beton karışım suyu üzerinde yağ tabakası gözleniyorsa beton karışım suyu olarak kullanımının uygun olmadığı söylenebilir. Ayrıca beton karışım ve bakım suyu olarak yerel kaynaklardan elde edilen su da değerlendirilebilir (Waddell, 1962; Uyan ve Kılınç, 2003). Akıntı suyu veya göl suyu da temiz olmak şartıyla beton karışım suyu olarak kullanılabilir. Su çimen, kök, çamur ve katı maddeler ihtiva etmemelidir (Bayazıt, 1988; Uyan ve Kılınç, 2003). Beton karışım suyunda bulanıklık limiti 2000 ppm olmalıdır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyu uygunluğu deneysel olarak belirlenebilir (Erdoğan, 1995; Uyan ve Kılınç, 2003). Uygunluk kriterine bakıldığında kriter şüpheli su ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımlarının şahit su ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları ile kıyaslanmasıdır. Şüpheli su ile üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçları, şahit su ile üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı sonuçlarının en az % 90'ını sağlamalıdır. AASHTO 26 şartnamesinde (AASHTO T 26; Uyan ve Kılınç, 2003), şüpheli su ile üretimi gerçekleştirilen beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri ile şahit su ile üretilen beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri arasındaki farkın % 10' dan daha fazla olmaması gerektiği belirtilmiştir. BS 3148 İngiliz standardında (BS 3148, 1980; Uyan ve Kılınç, 2003), bu farkın % 10'dan büyük olması durumunda betonda zararlı bir etkinin oluşabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca bu standartta şüpheli su ile üretimi gerçekleştirilen beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları ile şahit su ile üretimi gerçekleştirilen beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları arasındaki farkın maksimum % 20 olabileceği de belirtilmiştir. ASTM C94-98c standardında ise (ASTM C94-98c; Uyan ve Kılınç, 2003), şüpheli su ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin 7 günlük ortalama basınç dayanımlarının, şahit su ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin 7 günlük ortalama basınç dayanımlarının en az % 90' ını sağlaması gerektiği yer almıştır. TS EN 1008 standardında da değerlendirme kriteri ASTM standardındaki değerlendirme kriterine benzerdir (TS EN 1008, 2003). BS 3148 standardında (BS 3148, 1980), şüpheli su kullanılarak hazırlanan çimento hamurunun priz süresinin, şahit su ile hazırlanan çimento hamurunun priz süresinden 30 dakikadan düşük veya 30 dakikadan yüksek

olmaması gerektiği açıkça vurgulanmıştır. ASTM C94–98c standardında da priz süreleri ile ilgili bir değerlendirme kriteri yer almıştır (ASTM C94-98c). Bu standarda göre şüpheli su ile üretimi gerçekleştirilen çimento hamurunun priz süresinin, şahit su ile üretimi gerçekleştirilen çimento hamurunun priz süresinden 1 saatten düşük 1,5 saatten yüksek olmamalıdır. TS EN 1008 standardına göre ise (TS EN 1008, 2003), karışım suyu olarak uygunluğu belirlenmeye çalışılan su ile üretimi gerçekleştirilen beton numunelerde bulunan priz başlama süresi bir saatten düşük olmamalı, saf su ile üretilen betonların priz başlama süresine göre % 25'ten daha yüksek olacak şekilde bir değişim meydana gelmemelidir. Priz sona erme süresi de 12 saati geçmemelidir. Saf su ile üretilen betonların priz sona erme süresine göre % 25'ten daha yüksek olacak şekilde bir değişim meydana gelmemelidir (Neville, 2000; Uyan ve Kılınç, 2003).

3.3.1.2 Karışım suyundaki yabancı maddeler

Beton karışım suyu farklı yabancı maddeler ihtiva edebilir (McCoy, 1964; Erdoğan, 1995; Steinour, 1960; Uyan ve Kılınç, 2003). Bu yabancı maddeler serbest asitler, sülfürler, kireç çözücü karbonik asit, serbest organik asitler, amonyum tuzları, magnezyum tuzları, alkali karbonatlar ve bikarbonatlar, klorürler ve sülfatlar, kalsiyum ve magnezyum karbonatlar ve bikarbonatlar, demir tuzları, çeşitli inorganik tuzlar, alkali bileşikler (sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit), şeker, silt ve askıda kalan katı maddeler, yağlar ve yosunlardır. Her bir yabancı maddenin beton özellikleri üzerindeki etkisi farklı olabilmektedir.

3.3.1.3 Karışım suyundaki yabancı maddelerin ölçü birimleri

Beton karışım suyundaki yabancı madde miktarı ppm (parts per million-bir milyonda kaç kısım) olarak tanımlanır (Erdoğan, 1995; Uyan ve Kılınç, 2003). Yabancı madde miktarı bazen (mg/lt) veya yüzde (%) olarak da belirtilebilir.

3.3.1.4 Karışım suyundaki yabancı maddelerin Türk ve Yabancı

standartlardaki bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri

Ulusal ve uluslararası standartlarda beton karışım suyundaki yabancı maddeler için limit değerler verilmiştir. AASHTO T26 (The American Association of State Highway Officials Specifications) (Amerikan Devlet Karayolları Şartnameleri)'da

karışım suyunda yer alan yabancı maddelerin izin verilebilir maksimum konsantrasyon değerleri sunulmuştur. Bu değerler Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.15 : Karışım suyu içerisindeki yabancı maddelerin bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri

Organik maddeler	en çok % 0,02
inorganik maddeler	en çok % 0,30
kükürt anhidriti (SO ₃)	en çok % 0,04
alkali klorid (NaCl olarak)	en çok % 0,10
pH	6-9

Çizelge 3.15 incelendiğinde AASHTO T26 'da tüm yabancı maddelere ait sınır değerlerin yer almadığı görülmektedir. Bu çizelgede diğer standartlardan farklı olarak kükürt anhidriti için (SO₃) bir sınır değer yer aldığı da görülmektedir. BS 3148:1980 standardında beton karışım suyunda yabancı madde miktarı ile ilgili yer alan sınır değerler (3.27)-(3.29)'da sunulmuştur.

kalsiyum klorür <500 mg/l (3.27)

sülfatlar (SO₃ olarak) < 1000 mg/l (3.28)

alkali karbonatlar ve bikarbonatlar < 1000 mg/l (3.29)

BS 3148 İngiliz standardında yalnızca yukarıdaki yabancı maddeler için sınır değerleri belirtilmiştir. ASTM C94 Amerikan standardında yabancı maddeler için geçerli olan maksimum sınır değerleri Çizelge 3.16'da görülmektedir. ASTM C94'de yer alan bu çizelge TS 11222'deki çizelge ile benzerdir.

Çizelge 3.16 : Karışım suyu içerisindeki yabancı maddelerin bulunabilecek maksimum konsantrasyon değerleri

Kimyasal Maddeler, (karma suyundaki konsantrasyon, ppm)		En Çok
Klorür, Cl ⁻	Ön gerilmeli betonda	500
	Diğer donatılı betonlarda	1000
Sülfat, SO ₄ ⁻²		3000
Alkaliler, (Na ₂ O+K ₂ O)		600
Toplam Katı Madde		50000

TS EN 1008 Türk standardında beton karışım suyu uygunluk kriteri olarak suyun gerekli testler yapıldıktan sonra belirlenen sülfat (SO_4^{2-}) içeriğinin 2000 mg/lt değerini aşmaması gerektiği vurgulanmıştır (TS EN 1008, 2003).

TS 500 Türk standardında beton karışım suyunun pH değerinin 7'den büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bu standarda göre karışım suyu içerisinde karbonik asit, mangan bileşikleri, amonyum tuzları, serbest klor, yağlar, organik maddeler ve endüstri atıklar bulunmamalıdır. Beton karışım suyunda izin verilebilir toplam tuz maksimum miktarları (3.30) ve (3.31)'de verilmiştir. Ancak bu standartta yabancı maddelerin sınır değerleri ile ilgili bir ifade mevcut değildir (TS 500, 2000).

Tuz, çözülmüş (erimiş) olarak, en çok 15 g / litre **(3.30)**

Madeni tuz, yüzer (askıda) olarak, en çok 2 g / litre **(3.31)**

TS 11222 Türk standardında bulunan sınır değerler Çizelge 3.17 ve Çizelge 3.18'de yer almaktadır (TS 11222, 2001).

Çizelge 3.17 : Beton karma suyu için kimyasal sınırlar

Kimyasal Maddeler, (karma suyundaki konsantrasyon, ppm)		En Çok
Klorür, Cl^-	Ön gerilmeli betonda	500
	Diğer donatılı betonlarda	1000
Sülfat, SO_4^{2-}		3000
Alkaliler, (Na_2O+K_2O)		600
Toplam Katı Madde		50000
Ph		≥ 7

Çizelge 3.18 : Şüpheli sularda kabul kriterleri

Özellikler (kontrol betonuna kıyasla)	Sınırlar
Basınç Dayanımı, (7 günde kontrol betonunun %' si)	En az % 90
Priz Başlangıcı	En geç 30 dakika
Priz Sonu	En erken 60 dakika
	En geç 90 dakika

3.3.1.5 Karışım suyundaki yabancı maddelerin taze beton özelliklerine etkisi

Beton karışım suyu içerisinde mevcut olan yabancı maddelerin beton priz süreleri üzerinde etkisi sözkonusudur. Sodyum karbonat varlığı betonda çok hızlı prize sebep olur. Sodyum bikarbonat ise prizi ya hızlandırır ya da geciktirir. Eğer sodyum bikarbonat miktarı 1000 ppm' den yüksekse, karışım suyunda priz süreleri etkisini ortaya çıkaracak deneyler gerçekleştirilmelidir. Priz sürelerinde etkisi yüksek olan özellikle priz sürelerini geciktirebilen tuzlar mangan, kalay, çinko, bakır ve kurşundur. Özellikle etkisi yüksek olanlar çinko, bakır ve kurşundur. Sodyum iyodat, sodyum fosfat, sodyum arsenat ve sodyum borat da priz sürelerini geciktiren tuzlardır. Bu tuzların miktarı 500 ppm'i geçmemelidir. Sodyum sülfür de karışım suyunda bulunabilecek bir inorganik tuzdur ve miktarı 100 ppm'in üzerine çıkmamalıdır. Eğer sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit konsantrasyonu 500 ppm üzerine çıkarsa betonda hızlı priz meydana gelir. Beton karışım suyunda şeker varlığı da priz sürelerini etkilemektedir. Çimento ağırlığının % 0,03-% 0,15'i oranında şeker karışım suyuna ilave edilirse priz sürelerinde gecikme meydana gelir. Bu oran çimento ağırlığının % 0,20'si olursa priz sürelerinde hızlanma görülür. Şeker yüzdesi % 0,25'e çıkarsa ani priz meydana gelir. Beton karışım suyunda şeker konsantrasyonu 500 ppm'i aşarsa beton karışım suyunun mutlaka priz süreleri deneyleri gerçekleştirilmelidir (Erdoğan, 1995; Uyan ve Kılınç, 2003).

3.3.1.6 Karışım suyundaki yabancı maddelerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Beton karışım suyunda sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO_3) varlığı sertleşmiş çimento ve agrega içerisindeki karbonat taneciklerinde çözünme ve ayrışma meydana getirir. Bu asitler kuvvetli asitlerdir. Sonuç olarak sertleşmiş beton dayanımı negatif olarak etkilenir. Eğer hidroklorik asit, sülfürik asit ve nitrik asit konsantrasyonu 10000 ppm'i aşarsa beton dayanımı olumsuz olarak etkilenir. Suyun pH değeri 3'den düşük olursa karışım suyu asitli su olarak tanımlanabilir ve bu karışım suyu beton karışım suyu olarak uygun değildir. Eğer sodyum karbonat, potasyum karbonat ve bikarbonat toplamı 1000 ppm'i aşarsa beton karışım suyunun 28 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirleyen deneyler yapılmalıdır. Beton karışım suyunda klor iyonlarının varlığı korozyona sebep olacağından dolayı istenmeyen bir durumdur. Eğer yüksek miktarda çözünemeyen

katılar karışım suyunda bulunursa bu durum karışım suyunda yüksek miktarda NaCl varlığını işaret eder. Sodyum klorür (NaCl) için sınır değer 20000 ppm'dir. Magnezyum klorür (MgCl₂) sertleşmiş çimentoda bulunan kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)₂) tepkimeye girer, bunun sonucunda yumuşak yapıda olan jelatinimsi bir görünüşe sahip magnezyum hidroksit oluşur. Magnezyum klorür için izin verilebilir üst sınır değer 40000 ppm'dir.

Magnezyum sülfat (MgSO₄) da sertleşmiş çimentoda yer alan kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)₂) tepkimeye girerek ürün olarak yumuşak yapıda jelatinimsi görünüşe sahip magnezyum hidroksiti oluşturur. Magnezyum hidroksit oluşumu sertleşmiş beton basınç dayanımını negatif olarak etkiler. Magnezyum sülfat için izin verilebilir üst sınır değer 40000 ppm'dir. Sodyum sülfat (Na₂SO₄) için bu değer 10000 ppm'dir. Beton karışım suyunda görüldüğü üzere magnezyum sülfatın izin verilebilir üst sınır değeri sodyum sülfatın izin verilebilir üst sınır değerinden daha yüksektir. Beton karışım suyunda kalsiyum ve magnezyum karbonatların suda çözünürlüğü düşüktür. Bundan dolayı beton basınç dayanımını negatif olarak etkilemezler. Bazı kent sularında kalsiyum ve magnezyum bikarbonat varolabilir. Kalsiyum ve magnezyum bikarbonat için izin verilebilir üst sınır değer 400 ppm'dir. Bu sınır değer aşıldığında betonun özellikleri olumsuz yönde etkilenir. Beton karışım suyu içerisinde yer alan mangan, kalay, çinko, bakır ve kurşun beton basınç dayanımını olumsuz olarak etkileyerek dayanım kazanma hızını düşürebilir. Özellikle çinko, bakır ve kurşun beton basınç dayanımını olumsuz etkiler. Beton karışım suyunda sodyum sülfür konsantrasyonu 100 ppm'i aşarsa beton basınç dayanımı negatif bir şekilde etkilenir. Eğer beton karışım suyunda sodyum hidroksit konsantrasyonu 6000-10000 ppm olursa beton basınç dayanımında olumsuz etkiler gözlenmez. Potasyum hidroksit konsantrasyonu 18000-24000 ppm olursa karışım suyunun beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Beton karışım suyunda askıda kalan kil ve küçük katı parçacık için izin verilebilir sınır değer konsantrasyonu 2000 ppm'dir. Eğer bu sınır değer aşılsa beton karışım suyu ihtiyacı artar, büzülme olasılığı yükselir, ayrıca çiçeklenme oluşabilir. Beton karışım suyunda farklı yağlar da mevcut olabilir. Çimento ağırlığının % 2'sinden fazla olduğu takdirde beton basınç dayanımında % 20'den fazla düşüşler meydana gelebilir. Beton karışım suyunda yosun varlığı beton üretimi için sıkıntı yaratabilir. Yosun varlığı çimentonun hidratasyon reaksiyonlarını etkiler, betonda hava boşluğu miktarını artırır ve beton basınç dayanımında önemli

düşüşlere neden olur. Yosun aynı zamanda agregada da varolabilir. Agregada yosun varlığı agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansı azaltır. Beton karışım suyunda yosun konsantrasyonu 500-1000 ppm'i aşarsa hava boşlukları meydana gelir ve bunun sonucunda beton basınç dayanımında düşüşler gözlenir.

Zayıf asit olan kükürtlü hidrojen beton özelliklerini olumsuz etkilemez ancak eğer kükürtlü hidrojen gaz formunda olursa betona absorbe olur, ayrıca havadaki oksijenle temas edip sülfürik asit veya sülfat oluşturabilir. Kireç çözücü olan karbonik asit sertleşmiş çimentodaki kalsiyum hidroksiti çözer ve betonda zararlı bir etki meydana getirir. Sirke asidi olan asetik asit, süt asidi olan laktik asit vb. organik asitler sertleşmiş çimentodaki kalsiyumu çözer. Organik asitler inorganik asitlere göre daha az etki ederler. Bazı organik asitler zararsızdır. Bunlara örnek olarak tartarik asit ve oksalik asit verilebilir. Amonyum tuzları sertleşmiş çimentodaki kalsiyum hidroksiti çözer ancak amonyum karbonat, amonyum oksalat ve amonyum flüorür bu çözünmeyi yapmaz (Erdoğan, 1995; Uyan ve Kılınç, 2003).

3.4 Kimyasal ve Mineral Katkılar

Katkılar betonun işlenebilirliğini iyileştirmede, priz sürelerini hızlandırma veya geciktirmede, dayanım kazanma oranını kontrol etmede, dona dayanıklılığı artırmada, alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi ve korozyondan korunmada tercih edilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Katkılar kimyasal katkıları ve mineral katkıları olarak bilinmektedir. Kimyasal katkıları priz sürelerini geciktirebilir, hızlandırabilir, betonda sürüklenmiş hava kabarcıkları oluşturabilir, suyun yüzey çekmesini değiştirebilir (Newman ve Choo, 2003). Kimyasal katkıların işlevi iki farklı şekilde olmaktadır. Birinci işlevi sağlayan kimyasal katkıları çimento-su ile etkileşim yaparak suyun yüzey çekmesini değiştirir. İkinci işlevi sağlayan kimyasal katkıları ise iyonik bileşenleri bozar ve çimento ile su arasında gerçekleşen kimyasal tepkimeleri yönlendirir. ASTM'de kimyasal katkıları için farklı standartlar mevcuttur. ASTM C 260 Amerikan standardı hava sürükleyici kimyasal katkıları tanımlamaktadır. ASTM C 494 Amerikan Standardı ise su kesici ve/veya priz sürelerini kontrol eden farklı kimyasal katkıları 7 sınıfa ayırmıştır (Mehta ve Monteiro, 2006; Mindess ve Young, 1981). Tip A su kesici, Tip B priz süresi geciktiren, Tip C priz süresi hızlandıran, Tip D su kesici ve priz süresi geciktiren, Tip E su kesici ve priz süresi hızlandıran, Tip F yüksek derecede su kesici, Tip G çok yüksek derecede su kesici ve priz süresi

geciktiren olmak üzere 7 farklı sınıf tanımlanmıştır (Mehta ve Monteiro, 2006; Mindess ve Young, 1981). Kimyasal katkıları beton özelliklerini iyileştirir. Çizelge 3.19'da kimyasal katkıların beton özelliklerini iyileştirmedeki faydaları, kimyasal katkı çeşitleri ve sınıfları sunulmuştur (Mindess ve Young, 1981).

Çizelge 3.19 : Kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde yararlı etkileri, kimyasal katkı tipleri ve kategorileri

Beton Özelliği	Kimyasal Katkı Tipi	Katkı Kategorisi
İşlenebilirlik	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Hava sürükleyiciler	Hava sürüklenme
	Mineral toz	Mineral
	Puzolanlar	Mineral
Priz kontrolü	Priz hızlandırıcılar	Kimyasal
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanım	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Puzolanlar	Mineral
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanıklılık	Hava sürükleyiciler	
	Puzolanlar	
	Su azaltıcılar	
	Su itici kimyasal katkıları	

Hava sürükleyici kimyasal katkıları betonda hacimce yaklaşık % 9 sürüklenmiş hava kabarcıkları oluşturarak betonun dona dayanıklılığını artırır (Mindess ve Young, 1981). Özellikle kütle beton ve hafif betonda kullanımı oldukça yaygındır. Hava sürükleyici kimyasal katkıları, çimento tanelerini hidrofobik (suyu iten) yapar. Eğer katkıların dozajı yüksek tutulursa çimento hidrasyonunda aşırı bir gecikme oluşur. Hava sürükleyici kimyasal katkıların önemli bir dezavantajı sürüklenmiş hava kabarcığı miktarının yüksek olmasına bağlı olarak dayanım kaybının oluşabilmesidir (Mehta ve Monteiro, 2006). Su kesici kimyasal katkıların işlevi çimento-su arasındaki hidrasyon reaksiyonlarına dayanır. Çimento ile su arasındaki hidrasyon reaksiyonları tamamlandıktan sonra etrenjit oluşumu gerçekleşir. Çimento inceliği ve bileşimi, özellikle C₃A anabileşen miktarı, SO₃ ve alkali

miktarları etrenjit oluşturma miktarını etkileyebilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Süperakışkanlaştırıcılar yüksek miktarda su kesici katkılardır. Karışım suyu kullanım ihtiyacını 3-4 kat düşürebilirler. 1970’lerde bulunan bir katkı sınıfıdır. Süperakışkanlaştırıcılar çimento taneleri tarafından adsorbe olduğunda, negatif yüke sahip olurlar. Negatif yüklü olması çevreleyen suyun yüzey çekmesini azaltır ve betonun akışkanlığı artar. Su miktarını % 20–30 azaltırlar (Mehta ve Monteiro, 2006).

Mineral katkılar ise puzolanlardır. Eğer bir malzeme kalsiyum hidroksitle tepkimeye girebiliyorsa puzolanik aktiviteye sahip bir malzemedir ve “puzolan” olarak adlandırılır. Bir puzolan amorf silika içerir ve bu da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek C-S-H jelini oluşturur (Mindess ve Young, 1981). Puzolanik malzemeler genellikle camsı formda silika ve alümina içerir ve bunlar da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girebilir. Bunun sonucunda ilave C-S-H hidratlar ve kalsiyum alüminat hidratlar oluşur. Bu reaksiyon çimento hidratasyonundan daha yavaştır ve puzolanik çimentoların dayanım artışı hızı Portland çimentolarının dayanım artışı hızından daha düşüktür. Uçucu kül, camsı taneli küresel şekle sahiptir. Beton işlenebilirliği üzerinde pozitif bir etkisi vardır. Uçucu küldeki iri taneleri atmak uçucu külün performansını artırabilir (Newman ve Choo, 2003). Puzolanlar, işlenebilirliği artırır, toplam hidratasyon ısısını düşürür. Çünkü puzolanik reaksiyon oldukça yavaştır. Puzolan Portland çimentosu ile karıştırıldığında Portland çimentosunun C₂S miktarı artar. Aynı zamanda puzolan kullanımı sertleşmiş betonun geçirimliliğini azaltır ve dayanıklılığını artırır. Puzolan kullanımı ile alkali-agrega reaksiyonundan kaynaklanabilecek genleşme de azalır. Silika (SiO₂) içeren malzemelerin puzolanik aktivitesi vardır. Doğal puzolanlar volkanik küller, tüfler, pomza, opalinli çörtler, killer ile şeyllerden oluşmaktadır. Doğal puzolanlar çimento inceliğinde olacak şekilde öğütülür ve daha sonra ısıl işleme maruz kalabilirler. Bu işlemler puzolanik aktiviteyi maksimum yapabilir. Uçucu kül en yaygın kullanılan puzolanlardandır (Mindess ve Young, 1981). Mineral katkılar betona yüksek miktarlarda ilave edilir. Maliyeti azaltması ve işlenebilirliği artırması dışında betonun alkali-agrega genleşmesini azaltır. Sülfat etkisi dayanıklılığını artırır. Uçucu kül ve cüruf, yaygın olarak kullanılan mineral katkılardır (Mehta ve Monteiro, 2006).

Kimyasal katkılar TS EN 206-1 Türk Standardında, taze veya sertleşmiş beton özellikleri değiştirilmek istendiğinde, karışım sürecinde betona, çimento ağırlılığının

yüzdesi olarak karışıma eklenir (TS EN 206-1, 2002). Bu standartta mineral katkı ise beton özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanımı mevcut olan katkı sınıfı olarak tanımlanmıştır. Mineral katkılar iki farklı sınıfta tanımlanmıştır. Birinci sınıf mineral katkılar inert mineral katkılar (Tip I), ikinci sınıf mineral katkılar ise puzolanik mineral katkılar (Tip II) olarak vurgulanmıştır (TS EN 206-1, 2002).

ASTM C 125 Amerikan standardında katkı, çimento, su, agrega ve lif dışında kullanılan, karışım yapılmadan önce veya karışım hazırlanırken ilave edilir şeklinde tanımlanmıştır. ACI Komite 212 katkı kullanımının 20 farklı amacı gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu amaçlardan bazıları su miktarını yükseltmeden betonun plastik kıvamını koruma, terleme ile segregasyon gibi istenmeyen durumları ortadan kaldırma, priz sürelerini kontrol edebilme, erken dayanımları yüksek kılabilme, hidrasyon reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ısı miktarını düşürebilme, betonda dayanıklılığın yüksek olmasını sağlamadır. Katkı kullanılması taze ve sertleşmiş beton özelliklerine olumlu bir katkı sağlar. Gelişmiş ülkelere bakıldığında beton üretiminde kimyasal katkı kullanımının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Katkılar kimyasal katkılar ve mineral katkılar olacak şekilde iki farklı sınıf halinde tanımlanmıştır. Mineral katkılara bakılacak olursa doğal puzolanlar (volkanik camlar, volkanik tüfler vb.) ve endüstriyel atık katkılar (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb.) mineral katkı grubuna girmektedir (Mehta ve Monteiro, 2006). Ayrıca kimyasal katkı kullanılmasının getireceği avantajlar belirtilecek olursa beton maliyeti azalabilir, beton özellikleri iyileşebilir, betonun karışım sürecinden yerleştirme sürecine kadar beton kalitesi iyileşebilir (Mamlouk ve Zaniewski, 1999). Kimyasal katkıların kullanım uygunluğunun EN 934-2 standardına göre incelenmesi gerekmektedir (TS EN 206-1, 2002). Puzolanlar Tip II sınıfı mineral katkılardandır. Kullanılacak uçucu külün uygunluk kriterleri EN 450 standardına göre belirlenir. Silis dumanı kullanım uygunluğu ise prEN 13623:1998 standardı esas alınarak değerlendirilir (TS EN 206-1, 2002).

4. TAZE BETON ÖZELİKLERİ VE KONTROLÜ

4.1 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik betonda ayrışma meydana gelmeden betonun kolayca yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve bunun sonucunda istenilen görünüşte olmasıdır. Eğer agrega tane şekli ve dağılımı uygunsa, beton kıvamı da yüksekse beton karışımının işlenebilirliği yüksektir. Karışım suyundan dolayı taze betonda bir akıcılık mevcuttur. Kıvam bu akıcılığın bir göstergesidir. Agrega şekil yapısına ve tane büyüklüğüne bağlı olarak karışım suyu ihtiyacı da farklılık gösterebilir. Eğer agrega köşeli ve yapısı gevşekse su ihtiyacı artar. Maksimum agrega tane boyutu yükselirse su ihtiyacı düşer. Ayrıca su ihtiyacını düşürebilmek için karışıma hava ilave edilmesi veya kimyasal katkı kullanılması da tercih edilebilir (TS 802, 1985).

İnceliğin artması ile su ihtiyacının artması, buharlaşma yoluyla hamurdaki suyun uzaklaşması ve bunun sonucunda su-çimento oranının azalması, hidrasyon sonucu hamurdaki suyun azalması işlenebilirliği azaltır (Dewar ve Anderson, 1992). Düşük çimentolu karışımlarda işlenebilirlik kaybı düşük oranda gerçekleşir çünkü sıcaklık artış oranı azdır ve suyun düşük bir miktarı hidrasyon sürecinde yer alır (Dewar ve Anderson, 1992). İnce agrega kullanımı su ihtiyacını artırır. İnce agrega/toplam agrega oranı azaltılırsa, bu etki minimuma indirilir (Dewar ve Anderson, 1992).

Betonun kıvamı, yerleştirme, sıkıştırma ve yüzey düzeltmesine uygun olmalıdır. Belirli kıvam için su ihtiyacı kum/iri agrega oranı ve kumdaki ince madde miktarı arttıkça artar. Betonda kohezyonu artırmak için kumdaki ince maddeyi artırma yerine kum/iri agrega oranı artırılmalıdır. Su kesici ve priz sürelerini geciktiren kimyasal katkıları tercih edildiğinde betonda çok akıcı bir kıvam elde edilebilir. Kıvamı artırmak için karışıma sonradan kesinlikle ekstra su ilave edilmemelidir (Mehta ve Monteiro, 2006).

İstenilen çökmeyi elde etmek için ve karışım suyunu azaltmak için maksimum agrega tane boyutu artırılmalı, agregadaki pürüzlü ve köşeli tane miktarı azaltılmalıdır, beton karışımında sürüklenmiş hava miktarı artırılmalı ve uçucu kül

kullanılmalıdır (Mehta ve Monteiro, 2006). Kohezyon zayıf olduğunda ise kum/iri agrega oranı artırılmalı, çimento veya kum uçucu kül ile kısmen yer değiştirmeli veya çimento hamuru/agrega oranı artırılmalıdır (Mehta ve Monteiro, 2006). Yoğunluğunun düşük olmasından dolayı, uçucu kül, hacimsel olarak çimento, su, veya kum miktarında bir artış olmadan çimento harcı/agrega oranını artırır (Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.1 İşlenebilirlik ölçeleri

Taze beton kolay karıştırılabilir ve taşınabilir olmalıdır. Üniform olmalıdır. Yerleştirme ve sıkıştırmada segregasyon olmamalıdır. Yüzeyi kolaylıkla düzeltilmelidir (Mindess ve Young, 1981). Taze betonun işlenebilirliğinin betonun pompalanması üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Çünkü işlenebilirlik segregasyona uğramadan betonun kolaylıkla dökülebilmesidir. Yerleştirilmesi ve sıkıştırılması zor bir beton karışımı maliyeti artırmakla kalmaz aynı zamanda dayanımı düşük, dayanıklılığı düşük bir beton üretilmiş olur. İşlenebilirlik hem beton karışımlarının maliyetini hem de kalitesini etkileyebilir. Sabit bir kıvam için kum/iri agrega oranı arttıkça su ihtiyacı artar. Kumdaki ince madde miktarı da arttıkça su ihtiyacı artar. Mümkünse betonun kohezifliği kumdaki ince taneleri artırmaktan ziyade kum/iri agrega oranı artırılarak iyileştirilebilir (Mehta ve Monteiro, 2006). ASTM C-125 Amerikan Standardı'nda işlenebilir beton homojenlik kaybı minimum olan betondur. ACI 116R-90 Amerikan standardına göre işlenebilir bir beton, kolay karıştırılabilir, kolay yerleştirilebilir, kolay sıkıştırılabilir ve yüzeyi kolay düzeltilbilir bir betondur (Newman ve Choo, 2003). ASTM C 125-93 Amerikan standardına göre ise homojenlik kaybının minimum olduğu bir beton, işlenebilir bir betondur (Newman ve Choo, 2003).

4.1.2 İşlenebilirliği ve kontrolünü etkileyen faktörler

Beton karışımlarının işlenebilirliği çimento özellikleri, karışım suyu miktarı, agrega oranları etkisi, agrega özellikleri, zaman ve sıcaklık, katkılardan etkilenmektedir (Mindess ve Young, 1981; Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.2.1 Çimento özellikleri

Çimento özelliklerinin işlenebilirliği belirlemede agrega özelliklerine göre önemi daha azdır. Ancak Tip III (hızlı sertleşen) Portland çimentosunda incelik yüksektir.

Kullanıldığında işlenebilirlik azalır. Bu tip Portland çimentolarının su ihtiyacı artar. Çünkü inceliğin yüksek olmasından dolayı özgül yüzey alanı daha yüksektir. 60–80 °C'den yüksek sıcaklıklarda ani priz görülebilir (Mindess ve Young, 1981).

Çimento miktarının oldukça düşük olması sert bir karışım meydana gelmesine neden olur. Zayıf bir beton yüzeyi elde edilir. Çok yüksek miktarda çimento içeren beton karışımlarında kohezyon mükemmeldir ancak yapışkanlık artar (Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.2.2 Karışım suyu miktarı

Betonun işlenebilirliğini yöneten en önemli faktör su miktarıdır. Su miktarını artırmak betonun kolay yayılma ve sıkıştırılabilme özelliğini artırır. Ancak dayanım azalmasının yanı sıra su miktarının artması segregasyona ve terlemeye neden olabilir. İnce tanelerin özgül yüzey alanı daha yüksektir. Bundan dolayı su ihtiyacı artar (Mindess ve Young, 1981).

ACI 211.1 Amerikan Standardı betonun slump veya kıvamının su miktarına bağlı olduğunu belirtmiştir. Örneğin; agrega-çimento oranı azalır ancak su-çimento oranı sabit tutulursa su miktarı artar ve bu da kıvamı artırır. Diğer yandan, su miktarı sabit tutulursa ancak agrega-çimento oranı azalır su-çimento oranı azalır ve kıvam etkilenmez. Çok yüksek kıvamlı beton karışımları segregasyon ve terleme eğilimi gösterir. Böylece, bu durum da betonun yüzeyinin düzlenmesini olumsuz etkiler. Kıvamı oldukça düşük olan karışımları yerleştirmek ve sıkıştırmak çok güçtür. İri agrega yerleştirmede segregasyona uğrayabilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Çok yüksek miktarda çimento ve ince tane içeren beton karışımları koheziftir (Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.2.3 Agrega oranları etkisi

Sabit bir su-çimento oranı için, agrega/çimento oranı artarsa işlenebilirlik azalır. Aynı zamanda, agrega gradasyonu ince olursa çimento miktarı artar. Diğer yandan, ince agreganın fazla olması işlenebilirliği artırır ancak geçirimsizlik artar ve ekonomiklik azalır (Mindess ve Young, 1981).

4.1.2.4 Agregada özellikleri

Agregada taneleri küresel olursa betonun işlenebilirliği artar. Küresel tanelerin yüzey/hacim oranı düşüktür. Taneleri kaplamak için harç ihtiyacı azalır. Yassı veya uzun taneler iri agregada mevcutsa, kum, çimento ve su miktarı artırılmalıdır (Mindess ve Young, 1981).

İri agreganın tane boyutu su ihtiyacını etkiler. Çok ince kumlar veya açılı kumların su ihtiyacı daha yüksektir. Doğal kum yerine kırmakum kullanıldığında beton % 2–3 daha fazla kuma ve 5–10 kg/m³ daha fazla karışım suyuna ihtiyaç duyar (Mehta ve Monteiro, 2006). Çok ince kum veya angular kum kullanıldığında su ihtiyacı artar.

4.1.2.5 Zaman ve sıcaklık

Sıcaklık artarsa işlenebilirlik azalır. Sıcaklık artması buharlaşma hızı ve hidrasyon oranını artırır (Mindess ve Young, 1981).

4.1.2.6 Katkılar

Beton karışımının su miktarı sabit tutulduğunda, su-azaltıcı katkı ilavesi kıvamı artırır. Sürüklenmiş hava hamur hacmini artırır ve betonun kıvamını artırır. Aynı zamanda terleme ve segregasyonu azaltarak kohezifliği artırır. Puzolanik katkılar, terlemeyi azaltır ve betonun kohezifliğini artırır. Uçucu kül kıvamı genelde artırır (Mehta ve Monteiro, 2006).

Devar, 1973'te düşük çimento miktarlı karışımların işlenebilmesini düşük oranda kaybettiğini belirtmiştir. Çünkü suyun daha küçük miktarı hidrasyonda yer almıştır. Yüksek su miktarı veya yüksek işlenebilmeye sahip karışımlar işlenebilmesini düşük oranda kaybederler. Dayanım saatte % 5 olarak zamanla genelde artar. Beton hala sıkıştırılabilecek durumdadır. İşlenebilme azalır. Devar'a göre (1962) bu değer çimento miktarı ve tipi, başlangıç işlenebilmesi ve uygun durumlara bağlıdır (Newman ve Choo, 2003).

Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisi çok düşüktür. Hava sürükleyici kimyasal katkılar, su azaltıcı kimyasal katkılar ve priz geciktirici kimyasal katkılar işlenebilirliği artırır (Mindess ve Young, 1981).

Su-azaltıcı kimyasal katkı taze beton karışımına ilave edildiğinde kıvam artar. Sürüklenmiş hava hamur hacmini artırır ve betonun kıvamını iyileştirir. Aynı

zamanda terleme ve segregasyonu azaltarak kohezifliği artırır. Puzolanik katkılar terlemeyi azaltır ve betonun kohezifliğini artırır. Uçucu kül kullanıldığında kıvamı artırır (Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.3 İşlenebilirlik ölçüm yöntemleri

Taze betonun kıvamı slump hunisi testi veya Ve-be testi ile belirlenir (Mehta ve Monteiro, 2006). Slump hunisi testi en yaygın kullanılan testtir. Ve-be testi ise düşük kıvamlı karışımlarda uygulanan bir testtir. Diğer bir test ise sıkıştırma faktörü testidir. Beton karışımının sıkıştırılabilirliğini belirler. Slump testi ASTM C-143 Amerikan standardında belirtilmiştir. Ve-be testi ve sıkıştırma faktörü testi ise ACI 211.3 standardında yer almaktadır. Slump testinde kullanılan huni 300 mm yüksekliğinde, üst çapı 100 mm alt çapı ise 200 mm olan bir hunidir. Huni beton ile doldurulur ve daha sonra yavaşça kaldırılır. Beton kendi ağırlığı ile çöker. Beton yüksekliğindeki azalma betonun slumpı (çökme değeri) olarak tanımlanır. Slump testi kıvamı çok yüksek veya kıvamı çok düşük beton karışımları için uygun değildir (Mehta ve Monteiro, 2006). Taze betonun kıvamının ölçülmesi için iyi bir ölçüm yöntemi olmasına rağmen işlenebilirliğin ölçümü için iyi bir ölçüm yöntemi değildir. Betonun reolojik davranışını ölçmek için uygun bir ölçüm yöntemi değildir. Popüler bir yöntem olmasının en temel sebebi hazır betonun partiden partiye üniformluğunu kontrol etmek için en kolay ve uygun yöntem olmasıdır. Örneğin; slump değerlerinde sonuçların dağılımında farklılıklar büyükse bu karışım oranları, agrega gradasyonu veya agrega neminde farklılıklar olduğunu gösterir. Ve-be testi İsveçli Mühendis V. Bährner tarafından geliştirilmiş bir testtir. Ve-be aparatında bir vibrasyon tablası, silindirik bir tava, bir slump hunisi ve cam veya plastik disk mevcuttur. Huni tavanın içine yerleştirilir, betonla doldurulur ve huni çekilir. Disk beton üzerine getirilir ve vibrasyon masası çalıştırılır. Betonun huni şeklinden silindirik şekle geçesiye kadar geçen süre Ve-be süresidir (Mehta ve Monteiro, 2006). Sıkıştırma faktörü testi Büyük Britanya'da geliştirilmiş bir testtir. Betonun sıkışma derecesini ölçer. Sıkıştırma derecesi sıkıştırma faktörü olarak adlandırılır ve yoğunluk oranı ile ölçülür. Yoğunluk oranı testte elde edilen yoğunluk oranının beton tamamen sıkıştırıldığında elde edilen yoğunluk oranına bölümüdür. Aparat iki koni şeklinde kova ve 150x300 mm silindir huni içerir. Üstteki kova beton ile doldurulur ve betonda sıkıştırma yapılmaz. Kovanın altı açılır ve beton kendi ağırlığı ile aşağıdaki

kovaya düşer. Altındaki kovanın da altı açılır ve beton silindir huniye düşer. Silindir hunideki net ağırlık tartılır (Mehta ve Monteiro, 2006).

İngiliz standardında işlenebilirliği ölçen 4 test mevcuttur. Bunlar; çökme (slump), sıkıştırma faktörü, Ve-be ve yayılma tablası deneyleridir. Çökme (slump) testi oldukça kolay, hızlı ve maliyeti düşük bir testtir (Newman ve Choo, 2003). Yayılma tablası testi, süperakışkanlaştırıcı ve hiperakışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen betonlar 1970'lerde popüler olduğunda Alman standartlarına girmiştir. Ancak bu testin önemi çökme (slump) testine göre artmaktadır. Çökme (slump) testine göre testi gerçekleştiren kişinin duyarlılığı oldukça önemlidir (Newman ve Choo, 2003). Yayılma 510 mm'yi aştığında beton kalınlığı yaklaşık olarak 20 mm agrega tanesi yüksekliğinde olur ve test beton özelliklerini ölçemez (Newman ve Choo, 2003). Çizelge 4.1'de BS EN 206-1 İngiliz Standardına göre kıvam aralıkları görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Kıvam sınıfları (BS EN 206–1: 2000) (Newman ve Choo, 2003)

Slump		Ve-be		Sıkıştırma derecesi		Yayılma	
Sınıf	Değer (mm)	Sınıf	Değer (sn)	Sınıf	Değer	Sınıf	Değer
S1	10–40	V0	≥31	C0	≥1.46	F1	≤340
						F2	350–410
S2	50–90	V1	30–21	C1	1.45–1.26	F3	420–480
S3	100–150	V2	20–11			F4	490–550
S4	160–210	V3	10–6	C2	1.25–1.11	F5	560–620
S5	≥220	V4	5–3	C3	1.10–1.04	F6	≥630

4.1.4 İşlenebilirlik problemleri ve çözüm yöntemleri

4.1.4.1 Çökme (slump) kaybı

Çökme (slump) kaybı taze betondaki zamanla kıvam kaybıdır. Tüm beton karışımları için bu normal bir durumdur çünkü hidrasyon devam ettikçe etrenjit ve kalsiyum-silikat-hidratlar gibi hidrasyon ürünleri oluşur. Beton karışımındaki serbest su hidrasyon reaksiyonları sonucu uzaklaşır. Normal koşullarda, çimentoya su ilave edilmesinden sonraki ilk 30 dakikada hidrasyon ürünlerinin hacmi küçüktür ve çökme (slump) kaybı ihmal edilebilir düzeydedir. Daha sonra, zaman geçtikçe betonda slump kaybı başlar (Mehta ve Monteiro, 2006).

Çökme (slump) kaybı problemleri sıklıkla sıcak havada görülür. Beton karıştırıldığında ve yerleştirildiğinde mevcut olan sıcaklık yüksek olursa çökme (slump) kaybı da yüksek olur. ACI Komite 305'e göre yerleştirme sıcaklığı 32 °C civarında olursa zorluklar yaşanabilir. Sıcak ve kuru havada, agrega depolanmalı ve su ile soğutulmalıdır. Beton sıcaklığını dengelemek için en iyi yol buz kullanılmasıdır. 3 kg buz kullanımı 1 m³ betonda sıcaklığı 0,7 °C azaltır. Beton sıcaklığı 10–21 °C olmalıdır (Mehta ve Monteiro, 2006). Taze beton karıştırmadan önce agrega doygun olmazsa agrega tarafından karışım suyunun absorbe olması, karışım suyunun buharlaşmasının işlenebilirlik kaybına neden olması, kimyasal katkı ve çimento veya bağlayıcı malzeme arasındaki etkileşimlerin işlenebilirlik kaybı meydana getirmesi gibi nedenlerden dolayı işlenebilirliğini kaybeder. Karışım suyunun agrega tarafından emilmemesi için doygun agrega kullanılmalıdır. Bu da agregayı sulamak ve agregayı sıcak havada örtmekle sağlanabilir. Bu olay hafif agregalarda zordur. Sıcaklığın artması, başlangıç çökme (slump) değerinin yüksek olması, çimento miktarının artması, çimentonun yüksek alkali ve düşük sülfat miktarı içermesi slump kaybını artırır (Newman ve Choo, 2003). Zaman geçtikçe işlenebilirlik kaybı oluşur. Bunun sebebi C3S ve C3A'nın kısmen hidrasyonundan kaynaklanır. Kısmen de buharlaşmadan kaynaklanan su kaybındandır. Çökme (slump) kaybı ilk yarım saat ile 1 saat arasında (karıştırmadan sonra) maksimumdur. Beton sıcaklığı artarsa çökme (slump) kaybı artar. Aynı zamanda priz hızlandırıcı kimyasal katkı kullanımı da çökme (slump) kaybını artırır (Mindess ve Young, 1981).

4.1.4.2 Taze beton sıcaklığı ve önemi

Betonun sertleşmesi kimyasal bir reaksiyondur. Sıcaklık arttıkça reaksiyon hızı da artar. 35 °C'de reaksiyon hızı 20 °C'deki reaksiyon hızının yaklaşık iki katıdır. Yüksek sıcaklıklarda reaksiyon hızının yüksek olması erken dayanımların yüksek olmasını sağlar. Ancak uzun süreli dayanım ve dayanıklılık genelde azalır (Newman ve Choo, 2003). 28 günlük dayanımı yeterli düzeyde olan bir beton üretmek için gerekli sıcaklık yaklaşık 13 °C'dir. Sıcaklık aralığı ise 15–25 °C olmalıdır. -10 °C'ye kadar hidrasyon gerçekleşir. Ancak 0 °C'nin altında dayanım artışı çok düşüktür. 5 °C'nin altında erken dayanım artışı büyük oranda gecikir (Newman ve Choo, 2003).

4.1.4.3 Segregasyon (ayrışma) ve terleme

Segregasyon taze betonda bileşenlerin ayrışması anlamına gelmektedir. Segregasyon üniform olmayan bir karışım meydana gelmesine neden olur. İri agrega harçtan ayrılır. Bu durum iki şekilde oluşabilir. Ya iri taneler taze betonun tabanında birikir ya da yetersiz yerleştirme veya vibrasyondan dolayı iri agregalar taze betondan ayrılır. Segregasyona neden olan faktörler maksimum agrega tane boyutu 25 mm üzerinde olan agregalar ve iri tanelerin çokluğu, iri agreganın özgül ağırlığının yüksek olması, kum veya çimento miktarının azalması, oldukça yüksek kıvamlı ve oldukça düşük kıvamlı karışımlardır (Mindess ve Young, 1981).

İki tip segregasyon vardır. Birincisi kuru beton karışımlarında meydana gelir. Harç betondan ayrışır. Terleme ise segregasyonun ikinci tipidir. Kıvamı yüksek karışımlarda meydana gelir. Terleme olayında beton prizini almadan önce beton yerleştirildikten ve sıkıştırıldıktan sonra yüzeyde su filmi oluşur. Beton karışımında su en hafif bileşendir. Böylece terleme segregasyonun bir tipidir. Çünkü karışımdaki katı maddeler aşağı doğru hareket eğilimi gösterir (Mehta ve Monteiro, 2006).

İnce mineral katkı veya hava sürükleyici katkı kullanımı segregasyon eğilimini azaltır ancak yerleştirme yöntemi oldukça önemlidir. Terleme ise taze beton yüzeyinde su filmi oluşması olarak tanımlanabilir. Ancak bu olay priz bitmeden önce oluşur. Su karışımdan ayrılır. Yüzeye çıkar. Terleme segregasyonun özel bir şeklidir. Terlemeden dolayı beton üst yüzeyinin su/çimento oranı oldukça yüksektir. Bu da üst yüzeyi zayıf ve dayanıksız kılar. Su filmleri iri agrega tanesi altında veya donatı altında da olabilir. Eğer sıcak ve kuru havalarda terleme suyu terleme oranından daha hızlı buharlaşırsa plastik rötre çatlakları oluşur. Bazen ince taneler yüzeye çıkabilir. Zayıf bir yüzey oluşur. Yüzeyde tuzlar kristalleşebilir. Bu durumda CaCO_3 oluşumuna neden olur. Terleme birçok farklı şekilde azaltılabilir. Çimento inceliğini artırarak, ince mineral katkılar kullanarak, yüksek alkali miktarına sahip veya yüksek C_3A içeren çimentoların kullanılmasıyla hidrasyon hızını artırarak, hava sürükleyici kimyasal katkı kullanarak, su miktarını azaltarak terleme azaltılabilir (Mindess ve Young, 1981).

4.1.4.3.1 Ölçüm

Segregasyonu ölçecek bir test yoktur. Görsel gözlem segregasyonun olup olmadığını tespit etmek için genelde yeterlidir. Ancak terleme oranı ve beton karışımının toplam terleme kapasitesini belirlemek için bir ASTM Standard testi mevcuttur. ASTM C-232 Amerikan standardına göre beton numunesi 250 mm çapında ve 280 mm yüksekliğinde bir silindirik konteynere yerleştirilir. Yüzeydeki terleme suyu ilk 40 dakika 10 dakika aralıklarla ölçülür. Daha sonraki sürede ise 30 dakika aralıklarla ölçülür. Terleme suyu miktarı yüzeydeki su miktarının karışımındaki net karışım suyunun yüzdesi olarak tanımlanmıştır (Mehta ve Monteiro, 2006).

4.1.4.3.2 Sebepleri ve kontrolü

Yetersiz kıvam, iri agrega miktarının aşırı yüksek olması, ince tanelerin az olması, yetersiz yerleştirme ve sıkıştırma betondaki segregasyon ve terlemenin genel sebepleridir. Kuru beton karışımlarında segregasyon su miktarını artırmak ile azaltılabilir. İri agrega maksimum tane boyutunu azaltmak ve daha ince ve daha çok kum kullanmak segregasyonu azaltır. Çimento miktarını artırmak, mineral katkı kullanımı ve hava sürükleyici katkı kullanımı terlemeyi azaltır (Mehta ve Monteiro, 2006).

Taze beton, özgül ağırlıkları 2,6 (çoğu agrega) ile 3,15 (Portland çimentosu) arasında değişen katı tanelerin bir karışımıdır. Taze beton yerleştirildikten sonra, taneler oturma eğilimi gösterir, su da yükselme eğilimi gösterir. Bu da segregasyona neden olur. Segregasyonun ve terlemenin temel sebepleri agrega gradasyonunun zayıf olması ve aşırı su miktarıdır. Çimentonun inceliğinin artması ile terleme azalır. Betondaki çimento miktarının artması ile terleme azalır. Puzolanik malzeme kullanımı ile terleme azalır. Eğer suyun buharlaşma hızı, terleme hızından yüksekse plastik rötre çatlakları (yüzey çatlakları) oluşur (Newman ve Choo, 2003).

5. BETON BASINÇ DAYANIMININ ÖNEMİ

5.1 Basınç Dayanımı ve Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler

Beton karışımı hazırlamadan önce, uygun bileşenin ve oranının seçimi ilk adımdır (Mehta ve Monteiro, 2006). 1918 yılında, İllinoi Üniversitesi'nde Lewis Enstitüsünde yapılan testlerin bir sonucu olarak, Duff Abrams su-çimento oranı ve beton dayanımı arasında bir bağıntı kurmuştur. Bu bağıntı, Abrams su-çimento oranı kuralı olarak bilinir. Bağıntı (5.1)'de verildiği gibidir (Mehta ve Monteiro, 2006).

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \quad (5.1)$$

w/c: su-çimento oranı

k₁, k₂: ampirik sabitler

Beton basınç dayanımı, su-çimento oranı ve hidrasyon derecesinin bir fonksiyonudur. Belirli sıcaklıkta hidrasyon derecesi zamana bağlıdır. Su-çimento oranı 0.3'ün altında ise su-çimento oranında düşük azalmalar yapılarak basınç dayanımında yüksek artışlar elde edilebilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Hidrasyon reaksiyonlarının gelişim süreci beton porozitesi ve basınç dayanımını etkiler. Sıcaklık değerleri normal olduğunda inceliği yüksek olan, hızlı hidrasyon gerçekleştirebilen ASTM Tip 3 Portland çimentosu tercih edilir. Bu yüzden 1, 3 ve 7. günlerde, Tip 3 Portland çimentolu betonun daha düşük porozitesi ve daha yüksek dayanımı olacaktır. Diğerlerinden farklı olarak Tip 4 ve Tip 5 Portland çimentolarında hidrasyon süreci gelişimi ve dayanım kazanma süreci 28. güne kadar yavaş ilerlemektedir (Mehta ve Monteiro, 2006). Agregada dayanımı, beton dayanımını belirleyen en önemli faktördür. Agregada boyutu, şekli, yüzey yapısı, tane boyutu dağılımı ve mineralojisi de beton dayanımını farklı derecelerde etkiler (Mehta ve Monteiro, 2006). İyi derecede gradasyonlu iri agreganın maksimum tane boyutunda yapılacak bir değişiklik beton basınç dayanımını iki farklı şekilde etkiler. İlk olarak eğer çimento miktarı benzer ve kıvamları birbirine yakın iki farklı karışım mevcutsa maksimum agregada tane boyutu daha yüksek olan betonda karışım suyu

ihtiyacı daha düşüktür. Diğer yandan, daha iri agregalar daha çok mikro-çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu etki su-çimento oranı ve gerilme tipine bağlı olarak değişecektir (Mehta ve Monteiro, 2006). Karışım suyundaki yabancı madde konsantrasyonu izin verilebilir sınır değeri aşarsa beton basınç dayanımı ve priz süreleri olumsuz olarak etkilenir. Asidik, alkali, tuzlu, renkli ve kokan sular kullanılmamalıdır. Suyun uygunluğunu belirlemede en uygun yol, çimentonun priz süresi ile dayanımlarını karşılaştırmaktır. Deniz suyu, normal betonun dayanımına zararlı değildir. Ancak, betonarme ve öngerilmeli betonda zararlıdır. Çünkü kullanıldığında donatı korozyon riski artar (Mehta ve Monteiro, 2006). Su azaltıcı kimyasal katkıları, betonun hem erken hem de son dayanımını artırabilir. Ekolojik ve ekonomik sebeplerden dolayı puzolanik malzeme kullanımı ve atık kullanımı (mineral katkı olarak) artmaktadır. Portland çimentosunun bir kısmı yerine kullanıldığında, mineral katkıların genellikle erken yaşlarda dayanım üzerinde geciktirici bir etkisi vardır. Mineral katkı kullanımı, betonda boşluk miktarını azaltır (Mehta ve Monteiro, 2006). ACI Yapı Kodu 318'e göre seçilen karışım oranları minimum dayanımdan daha yüksek dayanım vermelidir. Karışım dizaynı hesaplamalarında ortalama dayanım kullanılır (Mehta ve Monteiro, 2006). Betonun mekanik özelliklerinden uygulama bakımından en kolay ve en çok tercih edileni beton basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımı belirlenecek olursa betonun diğer özellikleri hakkında bir fikir yürütülebilir. Yüksek dayanıma sahip bir betonda porozite düşük, geçirimsizlik düşük ve beton dayanıklılığı yüksektir (Akman, 1987). Beton basınç dayanımını tayin etmede küp veya silindir numune kullanılabilir. Eğer beton basınç dayanımı belirlenmesinde, prEN 12390-3:1999 standardına göre küp numune tercih edilirse basınç dayanımı $f_{c,küp}$, silindir numune tercih edilirse basınç dayanımı $f_{c,sil}$ olarak tanımlanır. Numune şeklinin küp veya silindir olması tercihi basınç dayanımı deneyinden önce mutlaka belirtilmelidir. Basınç dayanımı deneyi genellikle 7 ve 28 günlük numunelerde gerçekleştirilir (TS EN 206-1, 2002). Betonda varolan gerilme taze betonda uygulanan sıkıştırma süreci, beton kür sürecine bağlı olarak farklılık gösterebilir (Mehta ve Monteiro, 2006).

5.1.1 Karakteristik basınç dayanımı (f_{ck})

Beton sınıfı belirlenmesinde esas olan betonun karakteristik basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımını etkileyen önemli bir parametre kullanılacak çimentonun tipi ve beton karışımında kullanılacak çimento miktarıdır. Eğer karışımında çimento dozajı

artarsa basınç dayanımı da artar ancak basınç dayanımı hakkında temel esas alınacak gösterge çimento miktarı değil su-çimento oranıdır. Beton karışım suyunun da basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi söz konusudur. Karışım suyu miktarı çok yüksek veya çok düşük olursa basınç dayanımı da buna bağlı olarak azalır. Aynı zamanda basınç dayanımı betonun kompazitesi ile de yakından ilişkilidir. Kompazite betonda varolan agrega ve çimentonun mutlak hacmidir. İstenilen özelliklere sahip bir beton elde edilmek istendiğinde kompazite değerinin 0,80'den yüksek olması gerekir. Eğer kompazite değeri yüksekse beton basınç dayanımı da yüksektir (Akman, 1987). Beton karakteristik basınç dayanımının Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de sunulan en düşük karakteristik basınç dayanım değerinden daha yüksek veya eşit olması gerekmektedir (TS EN 206-1, 2002).

Çizelge 5.1 : Normal ve ağır beton için basınç dayanımı sınıfları

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı	En düşük karakteristik küp dayanımı
	$f_{c, sil}$ N/mm ²	$f_{c, küp}$ N/mm ²
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Çizelge 5.2 : Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck, sil}$ N/mm ²	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{c, küp}$ N/mm ²
LC 8/9	8	10
LC 12/13	12	15
LC 16/18	16	20
LC 20/22	20	25
LC 25/28	25	30
LC 30/33	30	37
LC 35/38	35	45
LC 40/44	40	50
LC 45/50	45	55
LC 50/55	50	60
LC 55/60	55	67
LC 60/66	60	75
LC 70/77	70	85
LC 80/88	80	95

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanım sınıfında beton karışımı ve kendiliğinden yerleşen beton karışımı üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton haricinde her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si olarak alınmıştır. Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olmak üzere kimyasal katkı kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan kimyasal katkıları Çizelge 6.1-6.5'de görülmektedir. Üretimlerde 10 cm ebatlı küp kalıplar kullanılmıştır. Üretilen küp numuneler kür havuzunda 23±2 °C suda bekletilmiştir. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra 4 farklı yaşta basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testi haricinde yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. C20/25 beton karışımında orta akışkanlaştırıcı, C25/30 ve C30/37 beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı, C35/45 beton karışımında modifiye polikarboksilat kimyasal katkısı, kendiliğinden yerleşen beton karışımında ise polikarboksilat kimyasal katkısı kullanılmıştır.

6.2 Üretilen Betonların Özellikleri

Bu çalışmada üretilen betonların karışım dizaynları Çizelge 6.1-6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : C20/25 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	260	185	290	470	1200	0	0
KÜLLÜ	239	185	290	470	1200	52	2.6
KÜLSÜZ	260	185	290	470	1200	0	2.6

Çizelge 6.2 : C25/30 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	280	190	300	500	1150	0	0
KÜLLÜ	257	190	300	500	1150	56	2.8
KÜLSÜZ	280	190	300	500	1150	0	2.8

Çizelge 6.3 : C30/37 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	310	187	320	520	1100	0	0
KÜLLÜ	285	187	320	520	1100	62	3.1
KÜLSÜZ	310	187	320	520	1100	0	3.1

Çizelge 6.4 : C35/45 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	340	185	340	570	1030	0	0
KÜLLÜ	312	185	340	570	1030	68	3.4
KÜLSÜZ	340	185	340	570	1030	0	3.4

Çizelge 6.5 : Kendiliğinden yerleşen beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
KÜLLÜ	349	175	880	0	1000	76	4.9
KÜLSÜZ	380	175	880	0	1000	0	4.9

6.3 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

6.3.1 Çimento

Çalışmanın tamamında Kırklareli Pınarhisar Limak Çimento Fabrikasında üretilmiş CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 6.6-6.8'de sunulmuştur.

Çizelge 6.6 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi(%)
SiO ₂	19,13
Al ₂ O ₃	4,83
Fe ₂ O ₃	3,22
CaO	63,60
MgO	1,12
SO ₃	2,89
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,69
Cl	0,0098
Kızdırma Kaybı	3,56
Çözünmeyen Kalıntı	0,32
C ₃ A	7,36

Çizelge 6.7 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık		3,11
Priz süresi(dakika)	Başlangıç	195
	Son	235
Hacim Sabitliği(Le Chatelier) Toplam (mm)		1
Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /gr		3475

Çizelge 6.8 : CEM I 42,5R Portland çimentosunun mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımları (N/mm ²)
2	28,6
7	48,1
28	59,8

6.3.2 Agregalar

Çalışmada agrega olarak kırmataş I dolomit agregası (5-12 mm), kırmataş II dolomit agregası (12-19 mm) ve taş tozu dolomit agregası (0-5 mm) kullanılmıştır. Agregaların birim ağırlıkları ve özgül ağırlıkları bulunmuştur. Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı Çizelge 6.9'da verilmiştir. Agregaların elek analizi sonuçları Çizelge 6.10'da sunulmuştur.

Çizelge 6.9 : Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı

Malzeme	Gevşek Yığın Yoğunluk (Mg/m ³)	Özgül Ağırlık
Taş tozu	1,74	2,82
Kırmataş I	1,54	2,83
Kırmataş II	1,52	2,84

Çizelge 6.10 : Agregaların elek analiz sonuçları

Elek Boyutu(mm)	Elek altına geçen yüzde(%)		
	Taş tozu	Kırmataş I	Kırmataş II
31,5	100	100	100
22,4	100	100	100
16	100	100	47
11,2	100	99	3
8	100	47	0
5,6	100	13	0
4	96	2	0
2	61	1	0
1	38	0	0
0,5	26	0	0
0,25	21	0	0
0,125	18	0	0

6.3.3 Uçucu külün özellikleri

Deneylede Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. ASTM C 618 Amerikan standardına göre F tipi uçucu kül olarak tanımlanmaktadır (ASTM C 618, 2015). F tipi uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 6.11'de sunulmuştur.

Çizelge 6.11 : Çanakkale Biga Bekirli Termik Santrali uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	C Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450 ve ASTM C 618	F Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450 ve ASTM C 618
SiO ₂	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-
S+A+F	92,17	>50 ASTM C 618	>70 ASTM C 618
CaO	-	>10 (Yüksek Kireçli)ASTM C 618	<10 (Düşük Kireçli)ASTM C 618
MgO	0,682	-	-
SO ₃	-	<3 TS EN 450	<TS EN 450
K ₂ O	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-
TiO ₂	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-
Mn ₂ O ₃	-	-	-
Cl	0,01	<0,1 TS EN 450	<0,1 TS EN 450
Kızdırma Kaybı	2,7	<5 TS EN 450	<5 TS EN 450
Serbest CaO	0,1	<1 TS EN 450	<1 TS EN 450

6.4 Beton Karışımları

C20/25 beton karışım dizaynında dozaj 260 kg/m³, C25/30 beton karışım dizaynında dozaj 280 kg/m³, C30/37 karışım dizaynında dozaj 310 kg/m³, C35/45 beton karışım dizaynında 340 kg/m³, kendiliğinden yerleşen beton karışım dizaynında 380 kg/m³ olarak seçilmiştir. C20/25 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,71, C25/30 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,68, C30/37 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,60, C35/45 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,54, kendiliğinden yerleşen beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,46'dır. Her bir karışım için 15 dm³ beton üretilmiştir.

6.5 Beton Üretimi Karıştırma Yerleştirme Saklama Numune Boyutları

Beton karışımları laboratuvar tipi beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımın katı bileşenleri su ilave edilmeden önce 2 dakika mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra su ilave edilerek karışım mikserde 5 dakika daha karıştırılmıştır. Her bir beton karışımının 15 dm³ olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımında taze beton 12 adet 10x10x10 cm³ boyutundaki küp kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat sonra

sertleşmiş beton kalıplardan çıkarılarak 23 ± 2 °C su içerisinde bekletilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda uygulanmıştır.

6.6 Taze Beton Deneyleri

Her bir beton sınıfı için çökme değeri 150 mm olarak sabit alınmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonda ise yayılma değeri hesaplanmıştır. Aynı zamanda her bir karışım için yaş birim ağırlıklar belirlenmiştir.

6.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri

$10\times 10\times 10$ cm³ boyutlarında üretilen numuneler, 23 ± 2 °C su içerisinde saklanmıştır. 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. 28 günlük numuneler kullanılarak yarmada çekme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dayanıklılık deneylerinden olan donma-çözünme deneyi de yapılmıştır.

7. DENEY SONUÇLARI

7.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Bu çalışmada üretimi yapılan taze betonların birim ağırlıkları, çökme değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları, ayrıca kendiliğinden yerleşen betonun birim ağırlıkları, yayılma değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları Çizelge 6.12-6.16'da sunulmuştur.

Çizelge 6.12 : C20/25 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2534	150	21.3	22.8
KÜLLÜ	2504	150	20.7	22.5
KÜLSÜZ	2494	150	23.3	20.5

Çizelge 6.13 : C25/30 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2528	150	20.3	19.7
KÜLLÜ	2534	150	20.1	19.6
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

Çizelge 6.14 : C30/37 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2456	150	20.1	17.8
KÜLLÜ	2534	150	20.7	19.1
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

Çizelge 6.15 : C35/45 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2514	150	20.4	21.2
KÜLLÜ	2572	150	20.8	20.2
KÜLSÜZ	2560	150	20.3	20.2

Çizelge 6.16 : Kendiliğinden yerleşen beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Yayılma (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
KÜLLÜ	2563	72	22.7	22.1
KÜLSÜZ	2552	70	22.8	21.8

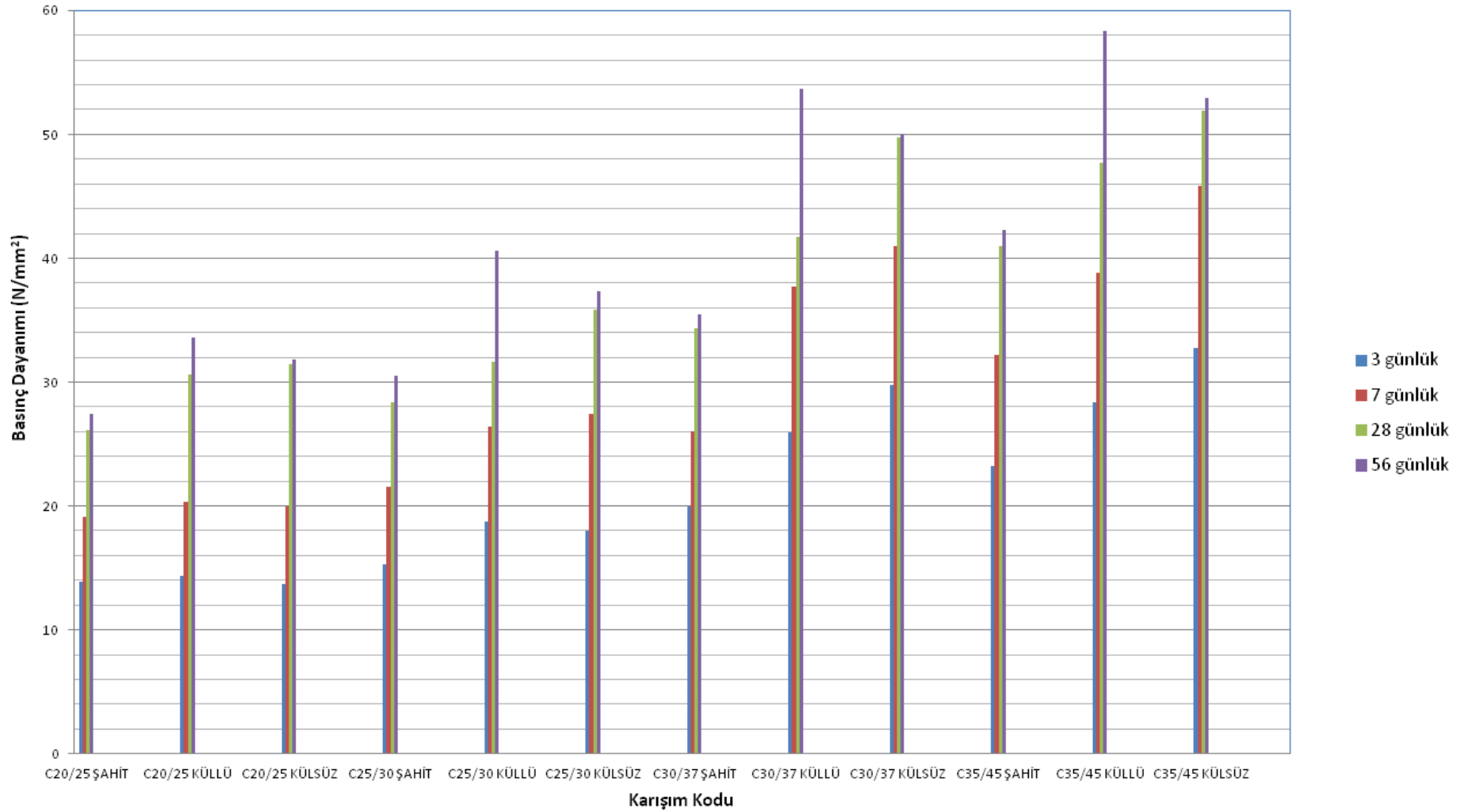
7.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

7.2.1 Basınç dayanımı tayini

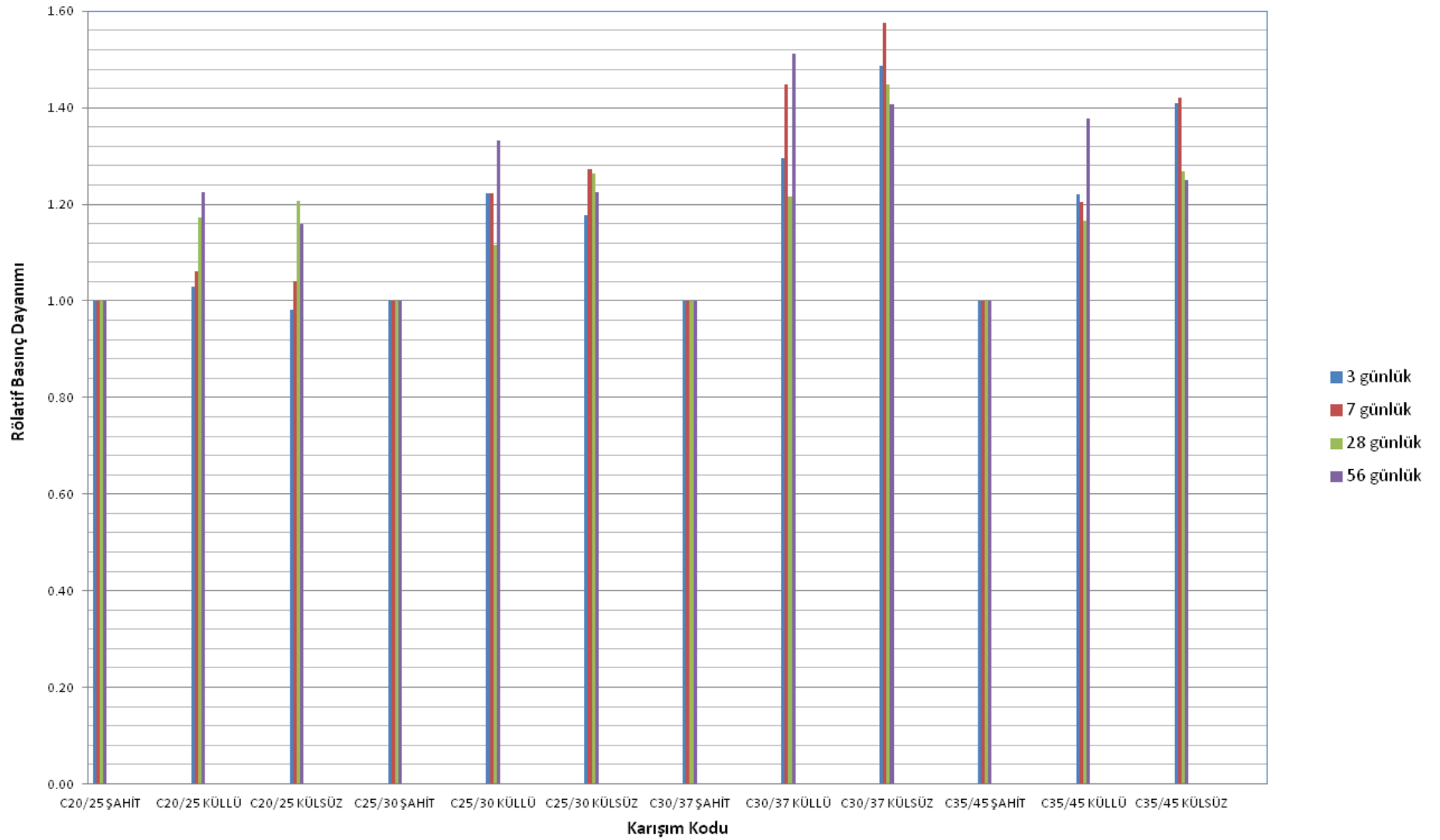
Bu çalışmada üretimi yapılan betonların basınç dayanımı değerleri, rölatif basınç dayanımı değerleri ile kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı değerleri ve rölatif basınç dayanımı değerleri Şekil 7.1-7.4'de verilmiştir.

7.2.2 Yarmada çekme dayanımı tayini

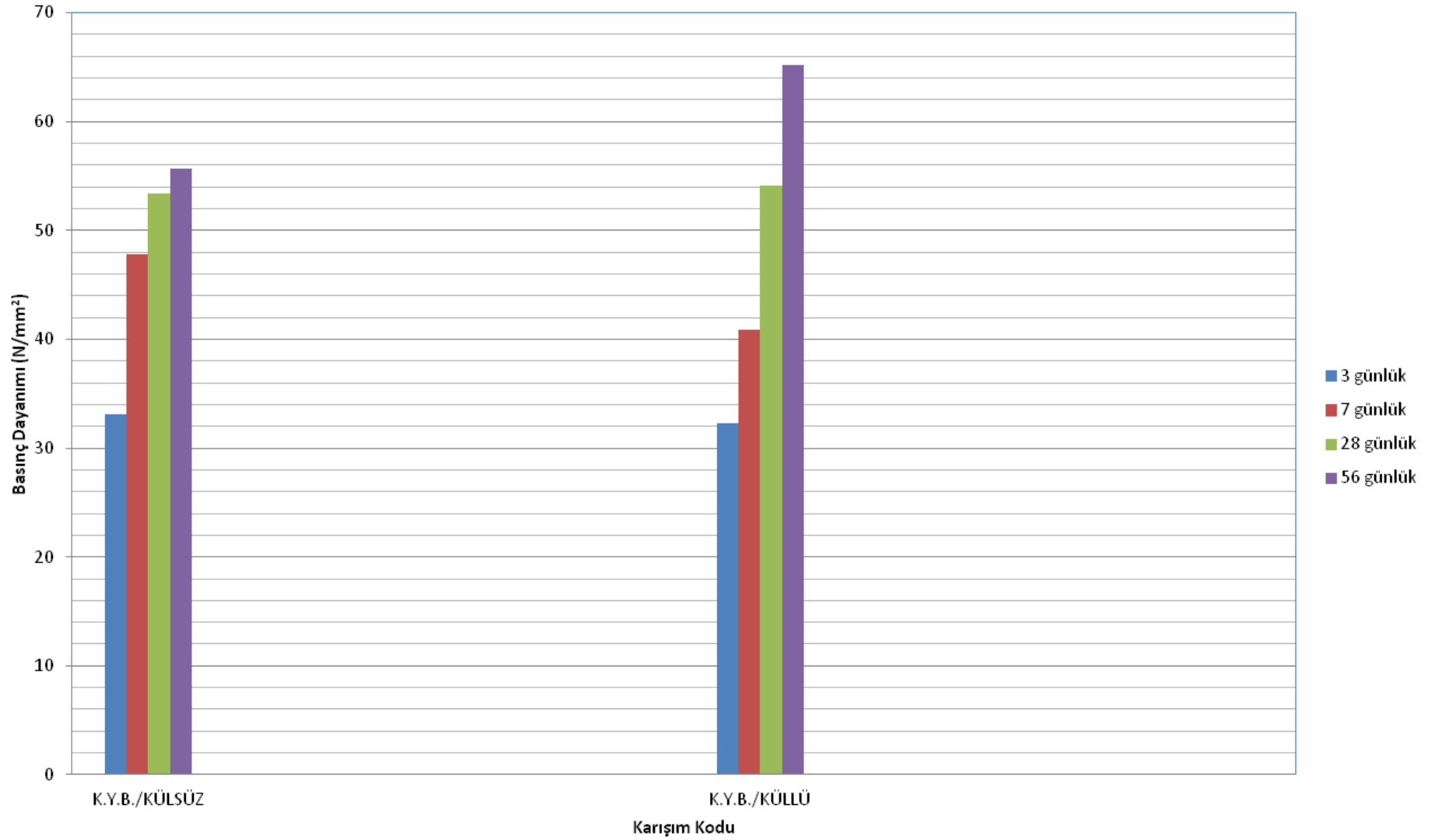
28 günlük küp numunelerde yarmada çekme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı beton sınıflarında üretilen betonların yarmada çekme dayanımı değerleri ve rölatif yarmada çekme dayanımı değerleri ile kendiliğinden yerleşen betonun yarmada çekme dayanımı değerleri ve rölatif yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 7.5-7.8'de verilmiştir.



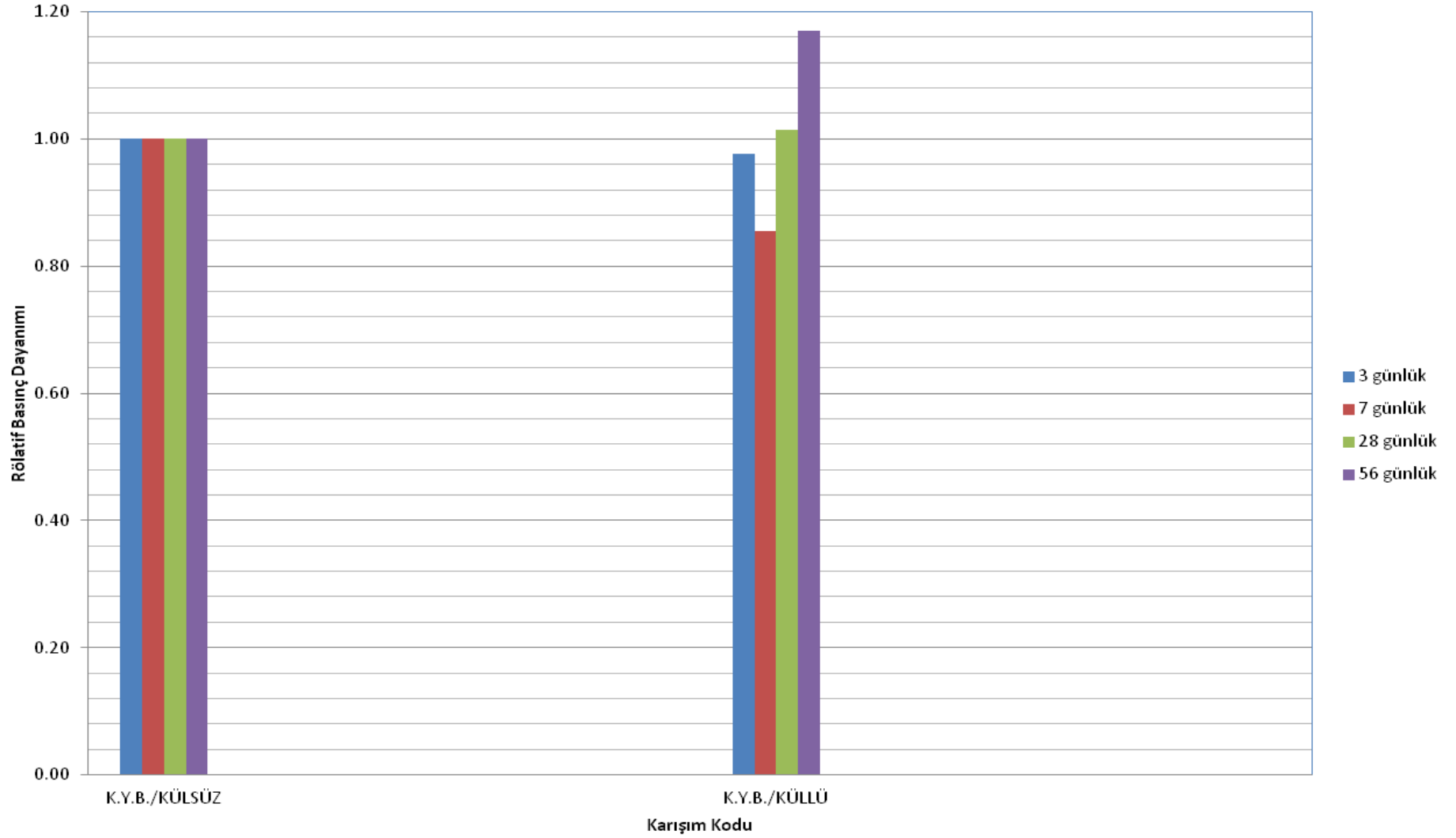
Şekil 7.1 : Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri



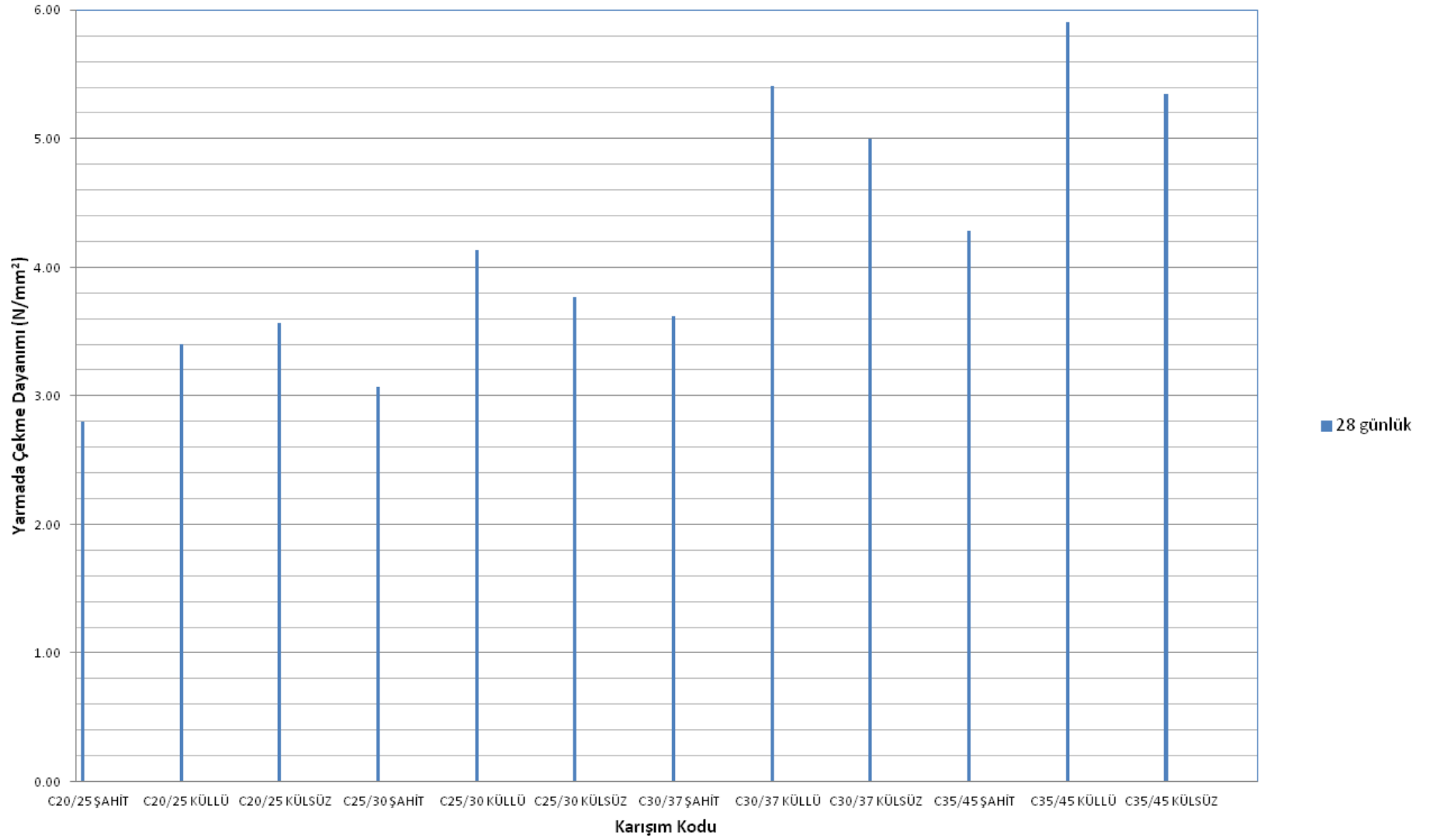
Şekil 7.2 : Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımı değerleri



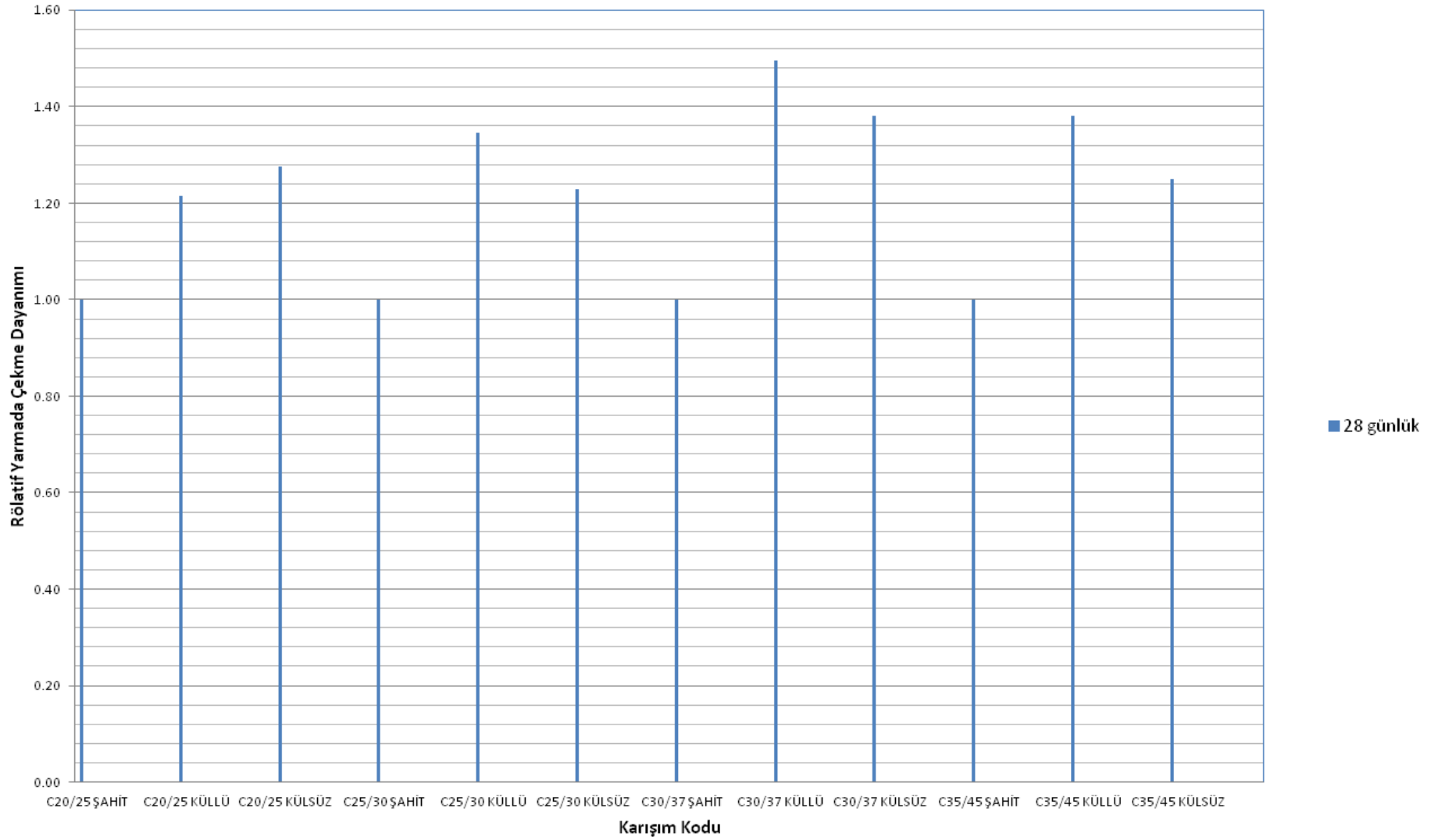
Şekil 7.3 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri



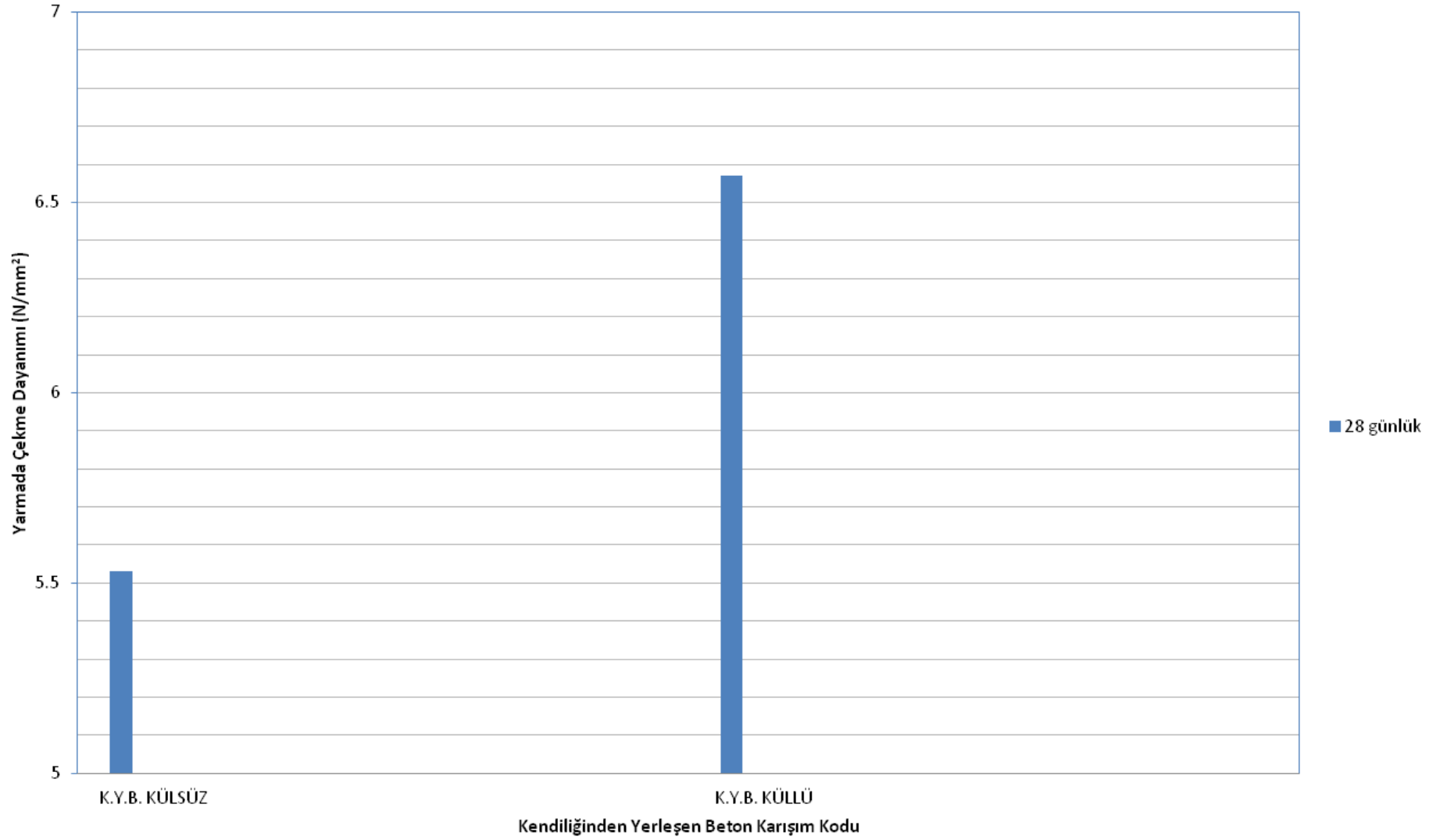
Şekil 7.4 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımı değerleri



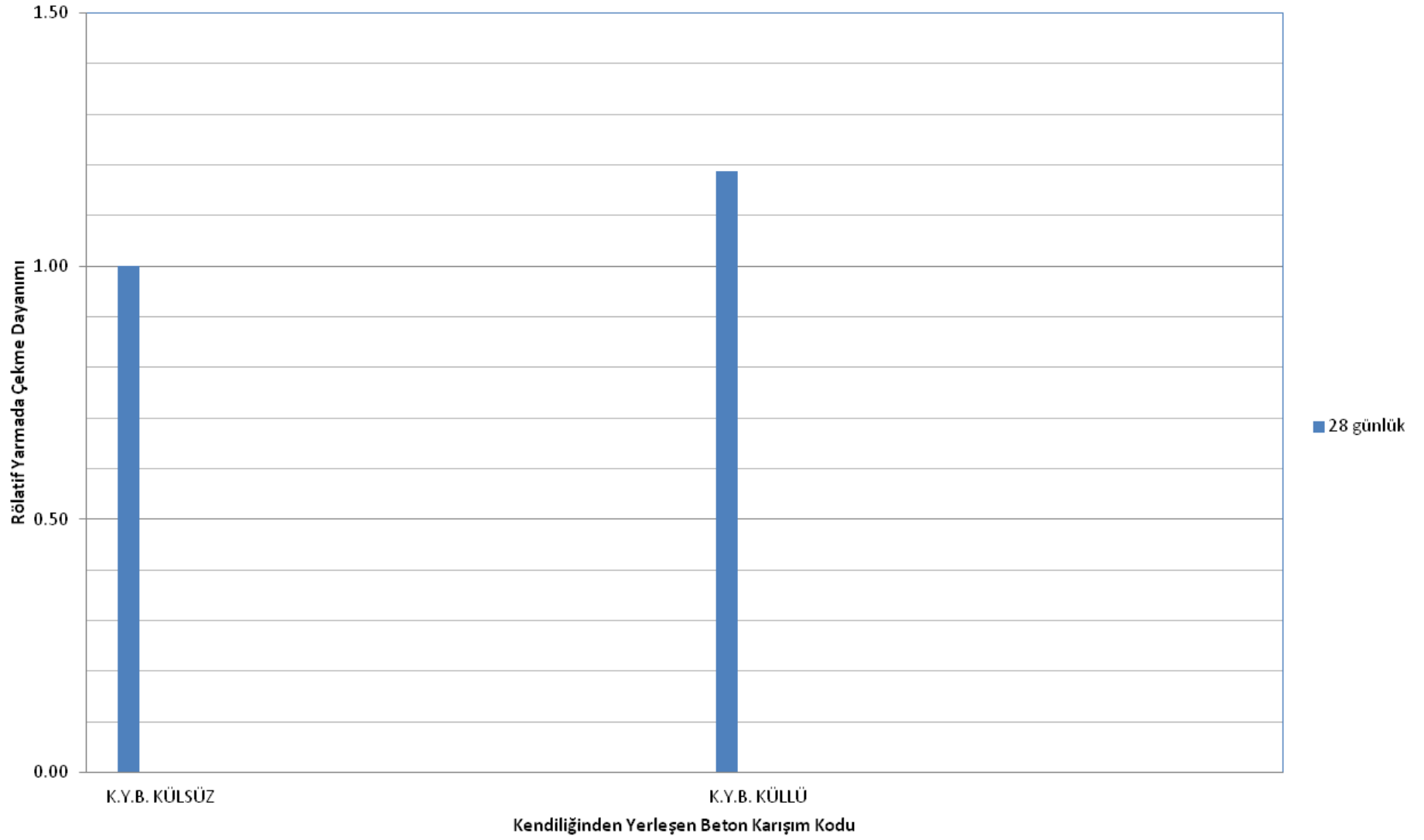
Şekil 7.5 : Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımları



Şekil 7.6 : Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük rölatif yarmada çekme dayanımları



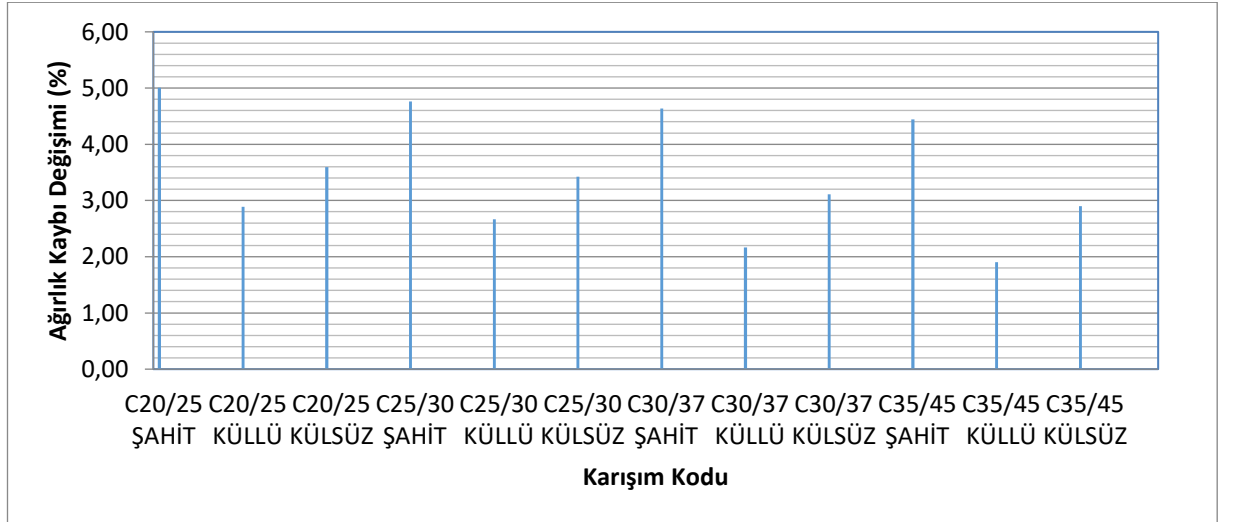
Şekil 7.7 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların yarmada çekme dayanımları



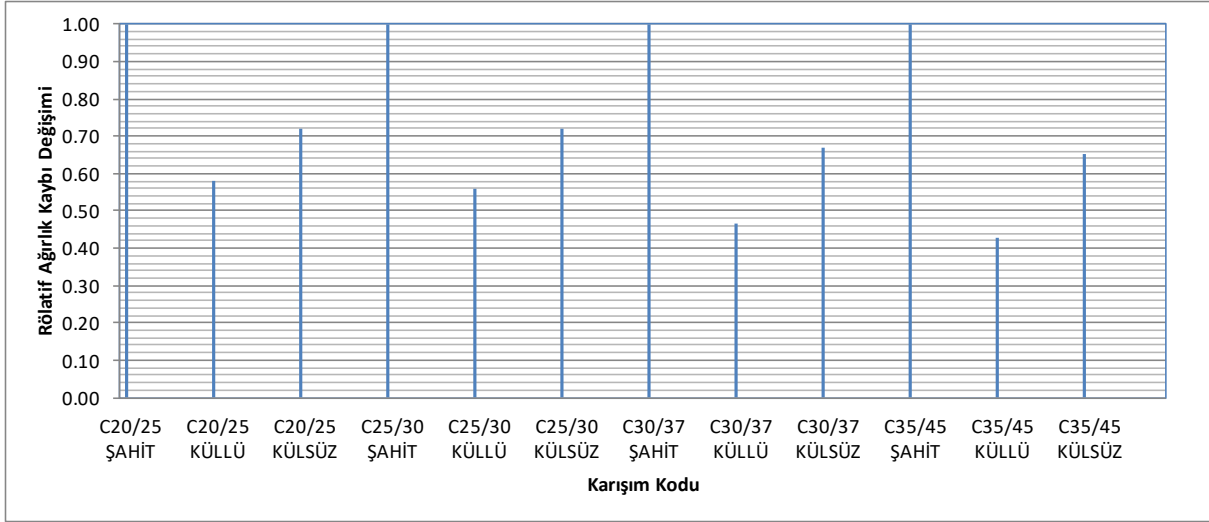
Şekil 7.8 : Uçucu külsüz ve uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların rölatif yarmada çekme dayanımları

7.2.3 Donma-çözünme direnci tayini

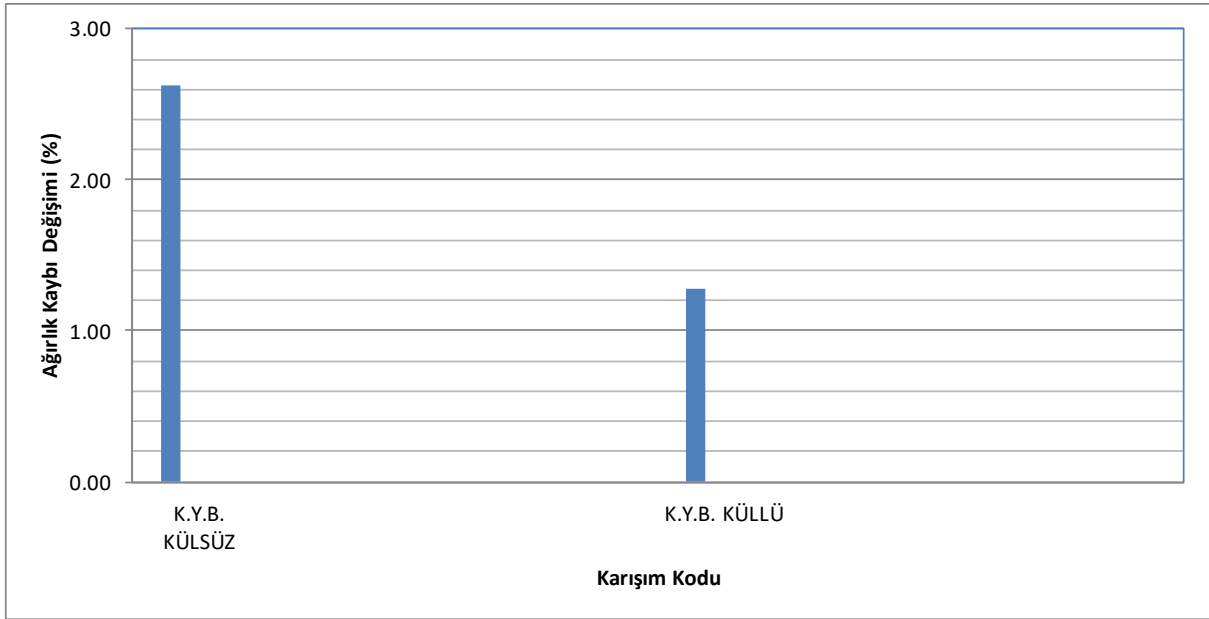
28 günlük küp numunelerde donma-çözünme direnci tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi ASTM C 666 standardına göre gerçekleştirilmiştir (ASTM C 666, 2015). 28 günlük küp numuneler donma-çözünme kabininde 12 saat -20 °C'de bekletilmiş, daha sonra numuneler donma-çözünme kabininden çıkarılıp 20 °C'deki suda 12 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. Bu tam 1 döngüdür. 25 donma-çözünme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık kayıpları deneysel olarak belirlenmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri Şekil 7.9'da sunulmuştur. Rölatif ağırlık kaybı değişimleri ise Şekil 7.10'da verilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonda donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri ve rölatif ağırlık kaybı değişimleri Şekil 7.11-7.12'de sunulmuştur.



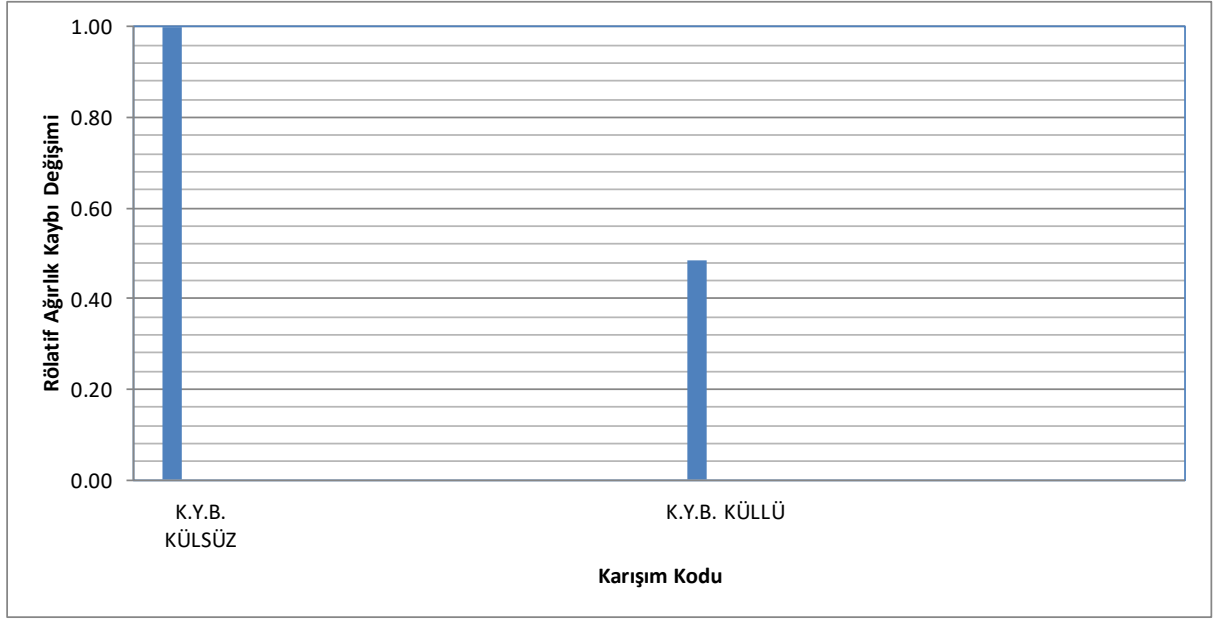
Şekil 7.9 : Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri



Şekil 7.10 : Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri



Şekil 7.11 : Kendiliğinden yerleşen betonda donma-çözünme deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri



Şekil 7.12 : Kendiliğinden yerleşen betonda donma-çözünme deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri

8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 6.12-6.15'de görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlar için çökme değeri sabit seçilmiş olup 150 mm'dir. Hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları da kaydedilmiştir. Hava sıcaklıkları 20.1 °C ile 23.3 °C arasında değişim göstermiştir. Beton sıcaklıkları ise 19.1 °C ile 22.8 °C arasında değişmiştir. Her bir beton karışımının yaş birim ağırlığı kg/m^3 cinsinden ölçülmüştür. Betonların yaş birim ağırlıkları 2400-2600 kg/m^3 arasında farklılık göstermiştir. Çizelge 6.16'da verildiği gibi kendiliğinden yerleşen betonlarda da aynı süreçler gerçekleştirilmiştir. Yayılma değerleri mm cinsinden belirlenmiştir. Uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betonda elde edilen yayılma değerinin uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yayılma değerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha yüksektir.

8.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 7.1'de görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. C20/25 sınıfı betonlarda 3, 7 ve 56 günlük sonuçlar incelendiğinde uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımının hem şahit betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından hem de uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 28 günlük sonuçlar irdelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonda gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür.

C25/30 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 7 günlük sonuçlarda farklı davranış gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük

basınç dayanımı şahit betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlarda ise 7 günlük sonuçlardaki davranışa benzer durum gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül nihai basınç dayanımlarını artıran bir puzolandır.

C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda sonuçlar irdelendiğinde uçucu kül içermeyen betonda 3 günlük basınç dayanımının uçucu kül içeren betonda 3 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük sonuçlarda da benzer davranış gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

C20/25 sınıfı betonlarda rölatif basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük rölatif basınç dayanımı hariç diğer tüm betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları şahit betonun rölatif basınç dayanımı değerlerinden daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlar ele alındığında uçucu kül içermeyen betonun rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun rölatif basınç dayanımından daha yüksektir. En yüksek rölatif basınç dayanımının uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı olduğu da açıkça görülmektedir.

C25/30 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ancak uçucu kül içeren betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. En yüksek rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımında gözlenmiştir.

C30/37 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları ele alındığında hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları

şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı uçucu kül içermeyen betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımından daha yüksektir.

C35/45 sınıfı beton sonuçlarında ise yine aynı şekilde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir.

Kendiliğinden yerleşen beton sonuçları incelendiğinde ise farklı sonuçlar gözlenmiştir. Uçucu kül içermeyen kendiliğinden yerleşen betonun 3 ve 7 günlük basınç dayanımları uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betonun 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ancak uçucu kül içermeyen kendiliğinden yerleşen betonların 28 ve 56 günlük basınç dayanımları uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betonların 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarından daha düşüktür.

Kendiliğinden yerleşen betonların rölatif basınç dayanımlarına bakıldığında uçucu kül içeren betonların 3 ve 7 günlük rölatif basınç dayanımlarının uçucu kül içermeyen betonların 3 ve 7 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşük olduğu, 28 ve 56 günlük sonuçların ise uçucu kül içermeyen betonların 28 ve 56 günlük sonuçlarından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yarmada çekme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde ise C20/25 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül içeren betonların ve uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca uçucu kül içeren betonların yarmada çekme dayanımının uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da açıkça görülmektedir. C30/37 ve

C35/45 sınıfı betonlarda da C25/30 sınıfı betonlarda elde edilen sonuçlardaki davranışa benzer bir durum gözlenmiştir.

Rölatif yarmada çekme dayanımı sonuçları irdelendiğinde C20/25 sınıfı betonlar için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonların rölatif çekme dayanımları uçucu kül içeren betonların rölatif çekme dayanımlarından daha yüksektir. C25/30 sınıfı betonlarda durum daha farklı gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımları şahit betonun yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların rölatif yarmada çekme dayanımları uçucu kül içermeyen betonların rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda da benzer davranış gözlenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonların yarmada çekme dayanımı sonuçları irdelenmiştir. Uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen betonların yarmada çekme dayanımları uçucu kül içermeyen kendiliğinden yerleşen betonların yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. Rölatif yarmada çekme dayanımı sonuçlarına bakıldığında ise uçucu kül içeren betonların rölatif yarmada çekme dayanımlarının uçucu kül içermeyen betonların rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonuçlarına bakıldığında farklı beton sınıflarında üretilen numunelerin donma-çözünme direnci deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinin her bir beton sınıfı için şahit betonun donma-çözünme direnci deneyi sonundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül kullanımı dayanıklılığı artırmaktadır. Uçucu kül kullanılan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimleri uçucu kül kullanılmayan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşüktür. Bu da beklenen bir durumdur. Sonuç olarak uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

Rölatif ağırlık kaybı değişimi sonuçları incelendiğinde her bir beton sınıfı için uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinin şahit

betonun rölatif ağırlık kaybı değişiminden daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda uçucu kl içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimleri uçucu kl içeren betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinden daha yüksektir.

Kendiliğinden yerleşen betonlarda yapılan donma-ęznme direnci tayini deneyi neticesinde elde edilen sonuçlara bakıldığında uçucu kl içeren betonların ağırlık kaybı değişiminin uçucu kl içermeyen betonların ağırlık kaybı değişiminden daha düşük olduğu aęıkęa görülmektedir. Benzer davranış rölatif ağırlık kaybı değişimleri için de geçerli olmuştur.

9. GENEL SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezi çalışmaları neticesinde elde edilen genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- Kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı yaş birim ağırlık ve yayılma değerini artırmıştır.
- C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür.
- C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. Uçucu külün ileri ki basınç dayanımlarını artırdığı gerçeği de burada doğrulanmıştır.
- C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür.
- Kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarını artırmıştır.
- Tüm beton sınıfları için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlarda uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımını artırmıştır.
- Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda ve kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

KAYNAKLAR

- AASHTO T26.** The American Association of State Highway Officials Specifications (Amerikan Devlet Karayolları Şartnameleri).
- Akman, M.S.** (1987). Yapı Malzemeleri, Birinci Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Akman, M.S.** (1992). Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N., Yılmaz, A.O.** (2006). Beton Agregaları-Çözümlü Problemler-Bilgi Föyleri, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Arıöz, Ö., Arslan, G., Tuncan, M., Kıvrak, S.** (2007). Web-based quality control of ready-mixed concrete, Building and Environment, 42, 1465-1470.
- ASTM C94.** Standard Specification for Ready-Mixed Concrete, The American Society for Testing and Materials (Amerikan Deney ve Malzeme Cemiyeti).
- ASTM C 618** (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International.
- ASTM C 666** (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International.
- Baradan, B.** (1996). Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bayazıt, Ömer Lütfi** (1988). Beton ve Deneyleri, sayfa 46, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Beton Laboratuvar Deneyleri** (1985). sayfa 97-100, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- BS 3148** (1980). Water for making concrete (including notes on the suitability of the water), British Standards (İngiliz Standartları).
- Coşgun, N., Esin, T.** (2006). A study regarding the environmental management system of ready mixed concrete production in Turkey, Building and Environment, 41, 1099-1105.
- Dewar, J.D., Anderson, R.** (1992). Manual of Ready-Mixed Concrete, Blackie Academic&Professional, An Imprint of Chapman&Hall, Taylor&Francis Group, LLC.
- Eglinton, M.S.** (1987). Concrete and its chemical behaviour, pp. 45-47, T. Telford, London.
- Erdoğan, Turhan** (1995). Karışım ve Bakım Suları, sayfa 10, 26-30, Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara.
- Erdoğan, T.** (2003). Beton, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayınları, Ankara.

- Erdoğan, T.** (2004). Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- ERMCO.** Environmental practices in the ready-mixed concrete industry.
- Gielen, D.J.** (1997). Technology characterisation for ceramic and inorganic materials, Input data for Western European Markal, Matter project, Materials Technologies for CO₂ Emission Reduction, ECN project number 7.7018.
- Illston, J.M., Domone, P.L.J.** (2001). Construction Materials, their nature and behaviour, third edition.
- Karaman, S., Esmeray, A., Öztoprak, B.** (2006). Ready-mixed concrete production and problems in the middle black sea region, KSU, Journal of Science and Engineering, 9(2).
- Kazaz, A., Ulubeyli, S., Türker, F.** (2004). The quality perspective of the ready-mixed concrete industry in Turkey, Building and Environment, 39, 1349-1357.
- Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P.** (1999). Materials for Civil and Construction Engineers, Addison-Wesley, An Imprint of Addison Wesley Longman, Inc.
- McCoy, W.J.** (1964). Water for Mixing and Curing Concrete, ASTM Special Technical Publication No. 169, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Aggregates, pages 515–520, American Society for Testing Materials.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.** (2006). Concrete Microstructure, Properties, and Materials, Third Edition, McGraw-Hill.
- Mindess, S., Young, J.F.** (1981). Concrete, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Nawy, E.G.** (2001). Fundamentals of High-Performance Concrete Second Edition, Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, The State University of New Jersey.
- Neville, A.M.** (1981). Properties of Concrete, 3rd Edition, pp. 347-350, The English Language Book Society and Pitman Publishing, London.
- Neville, A.M.** (1983). Properties of Concrete, 3rd Edition, The English Language Book Society and Pitman Publishing, London, pp. 779.
- Neville, A.M., Brooks, J.J.** (1987). Concrete Technology, Pearson Prentice Hall, England.
- Neville, A.M.** (2000). Water–Cinderella Ingredient of Concrete, Concrete International, Vol. 22, No. 9, pp. 66–71.
- Neville, A.M., Brooks, J.J.** (2001). Concrete Technology, Pearson Education Limited, England.
- Newman, J., Choo, B.S.** (2003). Advanced Concrete Technology Processes, Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, UK.

- Öztürk, M., Akakın, T., Uçar, S.** (2003). Hazır beton sektöründe agrega kullanımı, Türkiye Hazır Beton Birliği Teknik Çalışma Grubu, III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık/İstanbul.
- Popovics, S.** (1979). Concrete-Making Materials, McGraw-Hill Book Company, NewYork.
- Popovics, S.** (1992). Concrete Materials, Properties, Specifications and Testing, Second edition, Noyes Publications, USA.
- Ready-mixed concrete-a natural choice.** ERMCO.
- Steinour, H.H.** (1960). Concrete Mix Water–How Impure Can It Be?, Journal, Portland Cement Assn., Research and Development Laboratories, Vol. 2 No. 3, pp. 32–50.
- Taylor, W.H.** (1977). Concrete Technology and Practice, McGraw-Hill Book Company, NewYork.
- Troxell, G.E., Davis, H.E. and Kelly, J.W.** (1968). Composition and Properties of Concrete, pp. 94-95, McGraw-Hill Book Company, New York.
- TS EN 206-1** (2002). Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standardları Enstitüsü, Nisan, Ankara.
- TS EN 1008** (2003). Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Nisan, Ankara.
- TS 802** (1985). Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standardları Enstitüsü, Ocak, Ankara.
- TS 3530 EN 933–1** (1999). Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Eleme Metodu, Türk Standartları, Ankara.
- TS 9582 EN 933-3** (1999). Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 3: Tane şekli tayini-Yassılık Endeksi, Türk Standartları, Ankara.
- TS 500** (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620** (2003). Beton Agregaları, Türk Standartları, Ankara.
- TS 11222** (2001). Beton, Hazır Beton–Sınıflandırma, Özellikler, Performans, Üretim ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Usta, H.** (2005). Hazır beton sektör araştırması.
- Yalçın, H., Gürü, M.** (2006). Çimento ve beton, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Yan, S., Lai, W.** (2007). An optimal scheduling model for ready-mixed concrete supply with overtime considerations”, Automation in Construction, 16, 734-744.
- Uyan, M., Kılınc, K.** (2003). Beton Karışım Suyundaki Magnezyum Sülfat, Sodyum Sülfat ve Sodyum Sülfür Tuzlarının Taze ve Sertleşmiş Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Waddell (1962). Practical Quality Control for Concrete, pp. 137, McGraw-Hill Company.

ÖZGEÇMİŞ

20 Aralık 1970 yılında Edirne’de doğan İlker TULGA ilköğrenimini Karaağaç İlk ve Orta Okullarında tamamlamış, orta öğrenimini Kuleli Askeri Lisesinde yapmıştır.1988 yılında öğrenimine başladığı Kara Harp Okulu İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1992 yılında mezun olmuştur. Kara Harp Okulu’ndan mezuniyeti müteakip 1993 yılında İstihkam Okulu ve Eğridir Dağ Komando Okulundan mezun olan İlker TULGA Kara Kuvvetleri, NATO (Afganistan ISAF)’da çalışmıştır. 2014 yılında Kara Kuvvetlerinden yarbay rütbesiyle emekli olan İlker TULGA Kırklareli Üniversitesinde aynı yıl yüksek lisans eğitimine başlamıştır.Yüksek lisans eğitimi devam ederken 2016 yılında Kırklareli Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı görevine başlayan İlker TULGA halen bu göreve devam etmektedir.