



T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BETON KARIŞIM SUYU MİKTARINDAKİ DEĞİŞİMİN BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman AKÇAY

MAYIS 2019
GÜMÜŞHANE

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETON KARIŞIM SUYU MİKTARINDAKİ DEĞİŞİMİN BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman AKÇAY

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

“İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı”

Yüksek Lisans Programında Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17.05.2019

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 10.06.2019

MAYIS 2019



KABUL ve ONAY



Doç. Dr. Mustafa ÇULLU danışmanlığında **Osman AKÇAY** tarafından hazırlanan “**BETON KARIŞIM SUYU MİKTARINDAKİ DEĞİŞİMİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” isimli bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak Oy Birliği ile kabul edilmiştir.

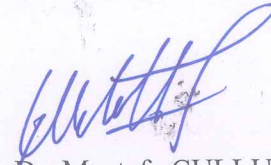
Başkan

:


Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN

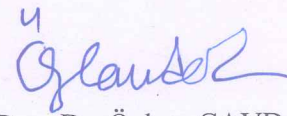
Üye (Danışman)

:


Doç. Dr. Mustafa ÇULLU

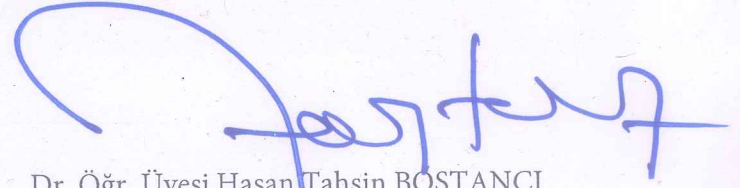
Üye

:


Doç. Dr. Özlem ÇAVDAR

ONAY

Bu tez 03/07/2019 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

TEZ BEYANNAMESİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlamış olduğum **“Beton Karışım Suyu Miktarındaki Değişimin Beton Özelliklerine Etkisi”** isimli tez çalışmasında; bütün bilgi ve belgeleri genel akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı bütün bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak hazırlayıp sunduğumu, başka kaynaklardan yararlandığım bilgileri metin ve kaynaklarda eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksi durumda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17/05/2019



Osman AKÇAY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETON KARIŞIM SUYU MİKTARINDAKİ DEĞİŞİMİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Osman AKÇAY

Gümüşhane Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ÇULLU

2019, 112 sayfa

Bu çalışmanın amacı, beton karışım suyuna hesaplanan miktardan farklı oranlarda karışım suyu ilavesi veya eksilmesi durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin ve üretilen beton örneklerin sülfatlı ortamdaki davranışının belirlenmesidir. Bu amaçla, C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerine karışım suyu miktarı %10, %20, %40, %70 ve %100 oranında artırılıp %10 ve %20 oranında azaltılmıştır. Üretilen beton örnekler üzerinde birim hacim ağırlık, impermeabilite, kapilarite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca beton örnekler, sülfatlı ortamdaki davranışlarını belirlemek amacıyla %5 sodyum sülfat konsantrasyonuna sahip korozif suda ıslanma-kurumaya maruz bırakılmıştır. 10 ıslanma-kuruma döngüsü sonucunda beton örneklerdeki ağırlık

değişimleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, beton örnekler e karışım hesaplarında belirlenen karışım suyu oranından farklı bir oranda su ilavesi ve eksilt ilmesinin, betonun fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca beton örneklerin korozi f ortamlara karşı dirençlerinde ciddi oranda azalmaların olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fiziksel ve Mekanik Özellikler, Karışım Suyu, S/Ç Oranı, Su Miktarı, Sülfat Etkisi

ABSTRACT

MS THESIS

THE EFFECT OF CHANGE OF CONCRETE MIXTURE WATER ON THE CONCRETE CHARACTERISTICS

Osman AKÇAY

Gümüşhane University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Associate Professor Mustafa ÇULLU

2019, 112 pages

The purpose of this work, calculated to water of concrete mixture the amount in different rates addition of mixing water or in case of reduction concrete physical and mechanical Properties and produced concrete samples sulfated the behavior of the environment is determined. For this purpose, C20/25, C30/37 and C40/50 prepared in resistance classes concrete samples mixing water quantity %10, %20, %40, %70 and %100 ratio is reduced. Produced concrete samples on unit volume weight, impermeabilite, capillarity, compressive strength, tensile strength during splitting experiments took place. Also concrete examples, sulfated environment purpose of determine their behavior %5 sodium sulfate concentration having corrosive wetting-drying stay exposed. 10 wetting-drying cycle as a result concrete samples weight changes determined. As a result concrete

samples mixture calculations determine mixing water ratio water addition and reduction, physical and mechanical of concrete has effect on properties is determined. Also for concrete samples resistance against corrosive places is seriously reduced as it seems.

Key Words: Physical and Mechanical Properties, Mixing Water, W/C Ratio, Amount of Water, Sulfate Effects.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Sayın hocam Doç. Dr. Mustafa ÇULLU'ya tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Çalışmalarımda büyük emeği olan Dr. Hakan BOLAT'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen anneme, babama, abime, kardeşime ve Hatice AYDOĞDU'ya teşekkür ederim.

Osman AKÇAY
Gümüşhane, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	IV
ABSTRACT	VI
TEŞEKKÜR	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Beton.....	3
1.1.1. Betonun Bileşenleri	4
1.1.1.1. Agrega	4
1.1.1.2. Çimento	13
1.1.1.3. Su	29
1.1.2. Betonun İç Yapısı	42
1.1.2.1. Mikro (Jel) Boşlukları	42
1.1.2.2. Kılcal Boşluklar	43
1.1.3. Betonun Geçirimsizliği	45
1.1.4. Beton Dayanımını Etkileyen Faktörler	47
1.1.4.1. Çimento Miktarının Dayanıma Etkisi.....	48
1.1.4.2. Çimento Kalitesi ve Türünün Dayanıma Etkisi.....	48
1.1.4.3. Su/Çimento Oranının (Kıvamın) Dayanıma Etkisi	49
1.1.4.4. Agrega Granülometrisinin ve En Büyük Agrega Çapının Dayanıma Etkisi.....	50

1.1.4.5.	Kompasitenin Dayanıma Etkisi	51
1.1.4.6.	Katkı Maddelerinin Dayanıma Etkisi	51
1.1.4.7.	Sıcaklığın Dayanıma Etkisi	52
1.1.4.8.	Nemin Dayanıma Etkisi.....	52
1.1.4.9.	Betonun Karılması, Taşınması ve Yerleştirme Sıkıştırma Özelliklerinin Dayanıma Etkisi	53
1.1.4.10.	Donma-Çözülmenin Dayanıma Etkisi.....	54
1.1.4.11.	Deney Şartları ve Numune Boyutlarının Dayanıma Etkisi	54
1.1.4.12.	Beton Yaşının Dayanıma Etkisi	55
1.1.5.	Betonda Su/Çimento Oranı.....	55
1.1.5.1.	Su/Çimento Oranının Çimento Hamurundaki Etkileri	56
1.1.5.2.	Su/Çimento Oranının Beton Basınç Dayanımındaki Etkileri.....	57
1.1.5.3.	Su/Çimento Oranının Beton Geçirimsizliğine (Permeabilitesi) Etkileri	58
1.1.5.4.	Su/Çimento Oranının Betonun Dayanıklılığı Üzerindeki Etkileri	59
1.1.5.5.	Su/Çimento Oranının Beton Rötresi Üzerindeki Etkisi.....	59
1.1.5.6.	Su/Çimento Oranının Beton Sünmesi (Krip) Üzerindeki Etkileri.....	60
1.1.6.	Betona Korozyon Ortam Etkileri	60
1.1.6.1.	Sülfat Etkisi	60
1.1.6.2.	Klor etkisi	64
1.2.	Çalışmanın Amacı	66
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	67
2.1.	Materyal.....	67
2.1.1.	Agrega	67
2.1.2.	Çimento	67
2.1.3.	Karışım Suyu	68
2.2.	Metot.....	68

2.2.1.	Beton Örneklerin Üretimi	68
2.2.2.	Basınç Dayanımının Tayini	69
2.2.3.	Geçirimlilik (impermeabilite) Tayini	70
2.2.4.	Yarmada Çekme Dayanımı Tayini	71
2.2.5.	Kapilarite Tayini	72
2.2.6.	Sülfat Dayanıklılığı Tayini	73
3.	BULGULAR VE İRDELEME	75
3.1.	Birim Hacim Ağırlık.....	75
3.2.	Beton Basınç Dayanımı	78
3.3.	Yarmada Çekme Dayanımı	83
3.4.	Geçirimlilik (İimpermeabilite).....	87
3.5.	Kapilarite	91
3.6.	Sülfat Etkisi ile Ağırlık Değişimi	99
4.	SONUÇLAR.....	106
5.	KAYNAKLAR.....	109
	ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. a) Yuvarlak agreg a b) Yassı agreg a c) Uzun agreg a d) Köşeli agreg a (URL-1)	10
Şekil 1.2. a) Düzgün agreg a b) Pürüzlü agreg a (URL-1)	11
Şekil 1.3. a) Granit b) Diyorit c) Siyenit d) Gabro (URL-2)	11
Şekil 1.4. a) Çakıl taşı b) Mil taşı c) Kil taşı d) Konglomera (URL-2)	12
Şekil 1.5. a) Granit b) Gnays c) Kum taşı d) Kuvarsit (URL-2).....	12
Şekil 1.6. Çimento üretim şeması	15
Şekil 1.7. Portland çimentosunun sertleşme mekanizmasını gösteren dört aşama (Çetin, 2003).	23
Şekil 1.8. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (URL-4, 2019).....	24
Şekil 1.9. Mikroskobik ortamda betonun iç yapısı	43
Şekil 1.10. Beton içerisindeki boşluk çapları ve dağılımları	44
Şekil 1.11. A.B.D. Çimento Endüstrisi Birliği tarafından elde edilen beton basınç dayanımı su ilişkisi	57
Şekil 1.12. Etrenjit oluşumuyla agreg a çevresinde ve çimento hamurunda çatlak oluşumu (Taylor vd., 2001).	63
Şekil 1.13. Klorür içeriği - Derinlik ilişkisi (Concrete for Marine and Highway Structures, 1999).....	65
Şekil 1.14. Klorür içeriği - Derinlik ilişkisi (Concrete for Marine and Highway Structures, 1999).....	65
Şekil 2.1. Kireçtaşı agregası	67
Şekil 2.2. Beton basınç presi.....	70
Şekil 2.3. İmpermeabilite cihazı	71

Şekil 2.4.	Yarmada çekme deney düzeneği	72
Şekil 2.5.	Kapilarite deney düzeneği	73
Şekil 2.6.	Sülfat testi ıslanma - kuruma döngüsü	74
Şekil 3.1.	C20/25 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları	75
Şekil 3.2.	C30/37 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları	76
Şekil 3.3.	C40/50 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları	77
Şekil 3.4.	C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları	80
Şekil 3.5.	C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları	81
Şekil 3.6.	C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları	82
Şekil 3.7.	Ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri	86
Şekil 3.8.	Ortalama impermeabilite değerleri	90
Şekil 3.9.	C20/25 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	93
Şekil 3.10.	C20/25 dayanım sınıfında su miktarı eksiltelen numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	93
Şekil 3.11.	C30/37 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	95
Şekil 3.12.	C30/37 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	96
Şekil 3.13.	C40/50 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	98

Şekil 3.14. C40/50 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	98
Şekil 3.15. C20/25 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri.....	100
Şekil 3.16. C30/37 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri.....	101
Şekil 3.17. C40/50 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri.....	103

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Oluşacak ideal klinkerin yüzde bileşimleri ve oksitlerin birbirine oranı.....	18
Tablo 1.2. Kil ve kalker (kireçtaşı) numunelerinin kimyasal analizleri.....	19
Tablo 1.3. Beton karışım suyu niteliği.....	30
Tablo 1.4. Klorür içeriğinin beton cinsine göre alabileceği değerler.....	31
Tablo 1.5. Zararlı kirlenmeye neden olabilecek malzemelerden bazılarının maksimum değerleri	31
Tablo 1.6. TSEN 1008'e göre Suyun Kabul Edilebilirliği.....	33
Tablo 1.7. Agrega Büyüklüğünün Su İhtiyacına Etkisi	37
Tablo 1.8. Su miktarındaki azalmanın dayanıma etkisi	57
Tablo 1.9. TS 802'ye göre 28 günlük beton basınç dayanımlarına göre su/çimento oranları.....	58
Tablo 1.10. Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi.....	62
Tablo 1.11. TS 3340'a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri	63
Tablo 2.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	68
Tablo 2.2. Beton karışım tasarımı.....	69
Tablo 3.1. Beton dayanım sınıflarına göre ortalama yarmada çekme dayanımı.....	84
Tablo 3.2. Beton dayanım sınıflarına göre ortalama impermeabilite değerleri	88
Tablo 3.3. C20/25 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	91
Tablo 3.4. C30/37 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	94
Tablo 3.5. C40/50 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı	96

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Ref.	: Su miktarı karışım hesabı ile belirlenen ve optimum olan referans betonlar.
S+10	: Optimum su miktarının %10 fazlası eklenerek dökülen betonlar
S+20	: Optimum su miktarının %20 fazlası eklenerek dökülen betonlar
S+40	: Optimum su miktarının %40 fazlası eklenerek dökülen betonlar
S+70	: Optimum su miktarının %70 fazlası eklenerek dökülen betonlar
S+100	: Optimum su miktarının %100 fazlası eklenerek dökülen betonlar
S-10	: Optimum su miktarından %10 eksiltilerek dökülen betonlar
S-20	: Optimum su miktarından %20 eksiltilerek dökülen betonlar

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, çimento, su ve agrega maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

Günümüz yapı dünyasında geniş bir kullanım alanı bulunan beton, üretim ve uygulamaya kadar her aşamasında son derece dikkat ve özen gerektiren bir yapı malzemesi olarak hayatımıza girmiştir. Yapıdaki taşıyıcı sistemi oluşturan betonarme uygulamalarında kullanılan betonun, standartlara uygun bir şekilde ve yüksek dayanım sınıflarında üretilmiş olması, topraklarının çoğunluğu deprem kuşağında olan ülkemiz için çok önemlidir. Bu nedenle beton malzemeleriyle alakalı bilgiler giderek artmakta bunun sonucunda da agregalar, bağlayıcılar, katkı malzemeleri, betonun yapımı, dökümü ve kür şartlarının azami standartlara uygun olması gerekmektedir.

Bir yapının ve o yapıyı oluşturan malzemelerin yapı hizmet süresi boyunca görevlerini bozulmadan yerine getirmesine durabilite denir. Bundan ötürü bir yapı hakkında sağlam ve güvenilir kelimelerinin kullanılabilmesi projelendirme ve imalat sırasında doğru malzeme seçimine bağlıdır. Malzemenin iyi kullanımı ve yapıya etki edebilecek çevresel faktörlerin önceden belirlenerek alınacak tedbirlerle birlikte yapının hizmet süresi boyunca minimum bakım gerektirecek şekilde kaliteli imal edilmesi istenmektedir. Eğer ki yapı bu şekilde inşa edilirse durabilitesi yüksek, istenildiği gibi hizmet süresi uzun, sağlam ve güvenilir bir yapı meydana getirilir.

Betonun önemli karakteristik özelliklerinden bir tanesi basınç dayanımıdır. Laboratuvar şartlarında kolayca ölçülebilen bu özelliğin bilinmesi betonun diğer birçok özelliği (eğilme, çekme ve kesme dayanımları, elastik özellikleri vb.) hakkında da fikir verir. Bu sayede betonun zarar verebilecek çevresel etkilere karşı nasıl davranacağı kestirilebilir.

Betonun basınca karşı dayanımını olumlu ve olumsuz yönde etkileyen birçok etmen vardır. Bu etmenler agrega türü ve gradasyonu, çimento türü ve miktarı, su/çimento oranı, betonun kürü, kimyasal ve mineral katkı maddesi kullanımı, taze betonun üretim metodu, karıştırılma süresi, karışım aşamaları, yerleştirme metotlarındaki değişkenler şeklinde sıralanabilir. Betonun işlenebilme özelliği; taze betonun homojenliğini yitirmeden nakledilebilme, yerleştirilebilme ve sıkıştırılabilmesi olarak açıklanmaktadır. Betonun işlenebilirliği, sadece içerisindeki su miktarına göre değil, betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine, karışım oranlarına, beton yerleştirme ve sıkıştırma ekipmanlarının türüne, kalıp ve donatının durumuna ve ortam şartlarına bağlı olarak değerlendirilir. Diğer taraftan, çimento miktarının, ince agrega miktarının ve su miktarının artması, kaba agrega miktarının azalması betonun işlenebilme özelliğini artırır. Ortam şartlarını dikkate alarak sıcak havalarda beton kıvamını ayarlamak için beton suyunu artırmak, dolayısıyla su/çimento oranını değiştirmek doğru bir uygulama olarak görülmemektedir. Bu şekilde katılacak fazla su beton mukavemetinin düşmesine neden olabileceği gibi, betonda ayrışmanın oluşumunu da kolaylaştırır.

Çimento ile su reaksiyona girdikten sonra fazla su, döküm sonrası bünyeden uzaklaşarak yapı içinde boşluklar oluşturur. Bu boşluklar ise betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Yani beton harcının taşınması sırasında, suyun buharlaşması sonucu oluşacak kıvam kaybını telafi etmek için beton harcına bilinçsizce su ekleyerek su-çimento oranını değiştirmek betonun mekanik özelliklerinde önemli oranda değişime neden olmaktadır.

Beton üretiminde hesapların yanlış yapılması, betonun oluşturulma aşamasında yapılan hatalar, sonradan betona su ekleme, dış etkilere dolayı beton su miktarının artması gibi betondaki su miktarının değişmesi beton dayanımının çok büyük ölçülerde azalmasına neden olur.

Bu çalışmanın amacı, betona karışım oranında belirlenen su miktarının üzerinde eklenecek veya çıkarılacak suyun betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, farklı dayanım sınıflarında çimento miktarı sabit tutularak farklı s/ç oranlarında betonlar üretilmiştir.

1.2. Beton

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı malzemesini belirli oranlarda bir araya getirerek elde edilmiş bir karışımı, istenilen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirerek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen önemli bir kompozit yapı malzemesidir. Betonarme ise basitçe ifade etmek gerekirse çelik olan donatı çubukları ile betonun uyumlu bir şekilde çalışmasıdır. Betonda, bağlayıcılık görevini, çimento ve suyun bir araya gelmesiyle oluşan “çimento hamuru” yapmaktadır. Çimento hamurunun görevi kum, çakıl gibi agrega tanelerinin yüzeyini sararak boşlukları doldurmakta ve betonu oluşturan malzemelerin bir bütün halinde hareket etmesini sağlamaktır. Su ve çimentonun birleşmesi sonucu aralarında hidratasyon (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar) başlar. Hidratasyon ilerledikçe başlangıçta plastik yapıya sahip olan çimento hamuru zamanla plastikliğini kaybedip sertleşerek katı bir maddeye dönüşmektedir. Taze veya prizini almamış betonun buharlaşmadan dolayı meydana gelen su kaybı neticesinde zamana bağlı olarak hacminin azalmasına rötire denir. Rötire sonucunda sade beton ve betonarme elemanlar olumsuz etkilenmektedir. Beton eleman içinde nem dağılımının homojen olmasından dolayı öncelikle numunenin dış yüzeyi kuruyarak rötreye uğrarken, iç tabaka ıslak kalmakta ve büzülmemektedir. Bunun sonucunda kuruma süreci ilk başladığında iç tabaka basınç etkisine maruz kalırken dış tabaka çekme etkisine maruz kalmaktadır. Çekme gerilmesi yüzeyde yerel mikro çatlaklar oluşmasına veya çekme deformasyon yumuşamasına sebep olmaktadır. Çekme gerilmesinden kaynaklanan betonun non-lineerine elastik davranışına bağlı olarak, mikro çatlaklar sonuçta nem dağılımı üniform dağılıma ulaşırken tamamıyla kapanamazlar. Sonuç olarak, numunenin gerçek rötresi ölçülen rötresinden her zaman daha büyüktür. Öte yandan, kuru rötire numuneleri için tam kesit alanının basınç altında olmasından dolayı basınç yönüne dik doğrultudaki düzlemlerde mikro çatlamlar görülmektedir. Böylece gözlenen numune rötresi, mikro çatlama ve bununla ilgili geri çevrilemeyen deformasyonlar yüzünden azaltılamazlar (Bazant, 1994). Büzülmenin etkisiyle yüzey katmanlarda çekme gerilmeleri oluşurken iç katmanlarda basınç gerilmeleri oluşur. Bu oluşuma bağlı olarak beton yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar sonucunda betonun dış etkilere karşı savunması zayıflayarak servis ömrü azalır (Neville, 1987). Rötire olayı çimentonun yapısından dolayı meydana gelmektedir. Çimento miktarı fazla olduğunda, hidratasyon ilgisi çok yüksek çimento kullanıldığında ve ortam sıcaklığı çok yüksek olduğunda rötire daha şiddetli olmaktadır. Baraj gövdesi gibi kütle betonlarında yol

ve havaalanı betonlarında rötre önemli problemlere neden olmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için betonun rötresi hakkında yeterli bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Çeşitli deneyler yaparak bu bilgiler elde edilebilir. Fakat rötrenin birçok faktöre bağlı olduğu unutulmamalıdır. Özellikle zamana bağlı bir olay olması deneylerin uzun sürmesine neden olmaktadır (Altoubat, 2001).

1.2.1. Betonun Bileşenleri

1.2.1.1. Agreg

Agregadaki su miktarı agreganın hem birim ağırlığına hem de  zg l ağırlığına etki eder. Birim ve özgül ağırlık doğgun kuru yüzey hali için verilir. Agreg

Agregaların birim ağırlığı, özgül ağırlığı ve kompasitesi;

Birim Ağırlık: Agreganın belirli bir hacmi dolduran ağırlığına denir. Agregayı kuru halde iken gevşek olarak bir kaba bo altarak bulunan birim ağırlığa “gevşek birim ağırlık” ve yine kuru iken belli sayıda çubuk darbesi ile sıkıştırılarak bulunan birim ağırlığa ise “sıkı ık birim ağırlık” denir.

Birim ağırlık sayesinde boşluk miktarının yanında özel kullanımlar için agreganın uygunluğu kontrol edilebilir. Ayrıca agreg

Birim ağırlığa etki eden faktörler;

- Boşluk miktarına bağlı olarak agreg
- Fazla miktarda kusurlu malzeme olursa agreg
- Yerleştirme esnasında agreganın  i lenmesi ve sıkı tırması özenli bir şekilde yapılırsa boşluk miktarı azalır ve buna bağlı olarak birim ağırlık yükselir.
- Agreganın  zg l ağırlığı fazla ise agreg

- Betonun birim ağırlığı yüksek olursa dayanımı, dayanıklılığı ve taşıma gücü de yüksek olur. Bu nedenle beton agregalarının birim ağırlığı 1300–1850 kg/m³ arasında değişmektedir.
- Agreganın sıkışma oranının yüksek olması betonun basınç dayanımının ve dış etkilere karşı dayanımının da yüksek olmasını sağlar.

Özgöl Ağırlık: Belli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin, havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtık suyun havadaki ağırlığına oranıdır. Bu özellik sayesinde agrega kökeni ile ilgili fikir sahibi olunabilir ve beton karışım hesaplarında kullanılabilir. Betonda kullanılacak agreganın özgöl ağırlığının 2.2–2.7 kg/dm³ arasında olması istenir.

Özgöl ağırlık, agreganın uygunluğunu belirtir. Özgöl ağırlık düşük ise malzemenin sağlam olmadığını, özgöl ağırlık yüksek ise kaliteli beton için uygunluğu gösterir. Beton karışım hesabı yapılırken, hesapların düzeltilmesinde ve betonun homojen olmasının zorunlu olduğu durumlarda özgöl ağırlık gereklidir. Özgöl ağırlığın düşük olması agreganın boşluklu ve zayıf olduğunun bir göstergesidir.

Agreganın Kompositesi: Birim hacmindeki tanelerin işgal ettiği gerçek hacimdir. Kompositenin hesaplanabilmesi için birim ağırlık ve özgöl ağırlığın bilinmesi gerekir. Özgöl ağırlık her zaman birim ağırlıktan büyük olduğundan dolayı komposite birden küçüktür. V toplam hacim, V_d dolu hacim olmak üzere, birim ağırlık, $\Delta=W/V$ ve özgöl ağırlık $\delta=W/V_d$ olduğuna göre komposite $k=\Delta/\delta$ 'den V_d/V özgöl ve birim ağırlık cinsinden hesaplanabilir. (Δ) birim ağırlık ve (δ) özgöl ağırlıktır. Agreganın sıkıştırma işlemi yapılmadan yerleştirilmesi sonucunda komposite 0.40–0.70 arasında bir değer alır.

Agreganın kompositesinin küçük olması sonucunda şu zararlar meydana gelmektedir;

- Üretilen betonun da kompositesi ve mukavemeti düşük olur.
- Çimento miktarının artırılması gerekir.
- Betonun maliyeti yükselir.
- Kusurlu malzeme miktarı artar. Bunun sonucunda işlenebilirlik özelliği olumsuz etkilenir ve mukavemetin düşmesine neden olur.
- Dış etkilere karşı dayanıklılık azalır.

Agreganın Mekanik Özellikleri

Basınç mukavemetinin olması yüksek agregaların mekanik özellikleri arasındaki en önemli özelliklerden biridir.

Agrega basınç mukavemeti: Basınç mukavemeti ile malzemenin porozitesi arasında yakın bir ilişki vardır. Porozite küçük olursa agreganın mukavemeti yükselir. Agreganın jeolojik kökeni bize mekanik mukavemeti ile ilgili kuvvetli fikirler verir. Betonda kullanılacak agregaların basınç dayanımları en az 600 MPa olması gerekmektedir.

Agrega aşınma mukavemeti: Hava alanı ve yollardaki beton çarpma ve aşınma etkisine maruz kalmaktadır. Bu etkilere karşı dayanıklı beton üretilebilmesi için üretimde kullanılan iri agreganın mukavemetinin çarpma ve aşınmaya karşı yüksek olması gerekmektedir.

Basınç dayanımının 1000 MPa den az olduğu durumlarda veya yapay agregalarda aşınmaya dayanıklılık deneyleri sonuçlarına bakılır. Agreganın yeterli olarak kabul edilebilmesi için Bilyalı Tanburla (Los Angeles Aşındırma Cihazı) yapılan aşınmaya dayanıklılık tayini deneyinde 100 devir sonunda %50'den az kayıp olması gerekir. Darbe ile aşınmaya dayanıklılık tayini deneyinde aşınmaya maruz beton yapımında kullanılacak agregalar için %30'dan az, diğer agregalar için ağırlıkça %45'den az kayıp olması gerekmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda belirlenen kayıpların bu değerlerden büyük olması halinde söz konusu agreganın beton yeterlik deneyi yapılmalıdır.

Camsı agregaların, şistlerin, marnlı kireçtaşlarının ve iri kristalli taşların aşınmaya mukavemet gösteremedikleri bilinmektedir. Aşınma mukavemetinin yüksek olması için özgül ağırlığın fazla ve taşların da sert olması gerekmektedir. Bir agreganın aşınma mukavemeti yüksek ise basınç mukavemeti de yüksek olur.

Agrega çarpmaya dayanıklılığı: Betonun çarpmaya karşı dayanıklı olabilmesi için kullanılan agreganın büyük bir önem arz etmektedir. Bundan dolayı kullanılacak olan agreganın önce kontrol edilmelidir. 12.5 mm'lik elekten geçen ve 10 mm'lik elek üzerinde kalan en az 500 g numune tartılarak kaydedilir. Numune deney cihazı haznesine koyulur ve cihazın çelik gövdeli çekiç kısmı 15 kez hazne üzerine 15 inçlik (yaklaşık 38 cm) bir mesafeden bırakılır. Her serbest düşme arası zaman aralığı 1 saniyeden fazla olmalıdır. 15 düşmeden sonra hazne içindeki numune alınır ve 2.36 mm'lik elekten geçirilir. 2.36 mm'lik elekten

geçen malzeme ile elek üstünde kalan malzeme toplamı, deneye tabi tutulan malzeme miktarı 1 g'dan daha az olmamalıdır. Aksi durumda deneyin tekrar edilmesi gerekmektedir (Neville, 1987).

Agregaların Sınıflandırılması

Betonun ana iskeletini oluşturan agreganın beton hacmi içerisinde yaklaşık olarak %60–80 yer kapladığı bilinmektedir. Bu agregaların bazı önemli özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Agrega suyun etkisi altında yumuşayıp dağılırsa, çimento içerisindeki bileşenlerle zararlı bileşikler oluşturursa ve donatıyı korozyona karşı savunmasız hale getirirse betonda kullanımı uygun değildir. Agreganın kullanılma şekline ve amacına göre, granülometrisinin, tane şeklinin, tane dayanımının, aşınma direncinin, donmaya dayanıklılığının ve zararlı madde içeriğinin standartlarda belirtilen aralıklarda olması gerekmektedir.

Bu sebeple belirtilen özellikleri sağlayıp sağlamadığını kontrol edebilmek için agrega çeşitlerini tanımakta yarar vardır. Agregalar genel olarak, elde ediliş şekillerine, birim ağırlıklarına, boyutlarına, tane şekline, yüzey dokusuna, kaynaklarına, jeolojik ve mineralojik yapılarına göre sınıflandırılabilir (Neville, 1987).

Elde Ediliş Şekillerine Göre Agregalar

Doğal Agregalar; Akarsu yatağı, deniz, buzul ve teras agregaları olarak gruplandırılmaktadırlar. Akarsu yatağından elde edilen agregalar bu gruplar içerisinde en yaygın olarak kullanılındır.

a) Dere agregaları: Akarsu yataklarındaki agrega ocakları en çok rastlanan ve en fazla kullanılmak istenen kaynaklardır. Çünkü;

- Taneleri çoğunlukla yuvarlaktır.
- Aşınma esnasında malzeme içerisindeki yumuşak ve zayıf taneler elemine edilir.
- Sürüklenme sonucu meydana gelen aşınma ile birlikte ufalanan tanelerden sadece geriye sert, sağlam ve dayanıklı taneler kalır.

Doğal agregalar arasında en iyi malzemeler derelerden elde edilmektedir. Bunlar temiz, düzgün tanelerden oluşmaktadırlar. Kompasitesi yüksek olduğu için beton dayanımına olan etkileri de yüksektir.

Bazı akarsu yataklarından çıkarılan malzeme beton agregası olarak o kadar iyi kaliteye sahiptir ki, uygun granülometrik dağılım olarak şartnamelerde istenen derecelenmeyi tam olarak sağlamaktadır. Örneğin; Türkiye'nin Karadeniz yöresindeki akarsuların çoğunun yatakları, mansaba doğru yaklaştıkça bu derecelenmeyi verir.

b) Deniz Agregası: Deniz ve göllerden elde edilen agregaların içinde tuz bulunduğu gibi su canlılarının kabukları da bulunmaktadır. Bunlar tekdüze taneli genellikle ince malzemelerdir. Tuzların agrega veya harç içerisinde aşırı miktarda bulunması çatlamaya ve parçalanmaya neden olur.

Deniz kenarlarındaki midye, istiridye kabukları bazı durumlarda sorunlar çıkarırlar. Bunlar agreganın yerleşmesini güçleştirir, dona dayanıklılığını düşürür, bazen de düşük dayanımlı taneler oluştururlar.

Deniz ve göllerden elde edilen agregalar istenmeyen maddelerden arındırıldıktan sonra beton üretiminde kullanılabilirler. Arındırma işlemi ayrı bir harcama getireceği için ekonomik değildir.

c) Teras Agregası: Yamaç birikintileri dik ve yüksek yamaçlardan kayan ve kopan kaya parçalarının dipte birikmesiyle meydana gelir. Bu tip agregada, derecelenme pek iyi olmaz, agrega şeklen köşeli tane yapısı gösterir. Kırma ve eleme işlemlerinden sonra beton agregası olarak kullanılabilir.

Rüzgârların sürüklemesi sonucunda meydana gelmiş birikinti malzemesi çok ince kum tanelerinden oluşmuştur. Normalde rüzgârın şiddetli aşındırma etkisiyle az dayanıklı parçalar ayrılmış olduğundan genellikle kuvars taneciklerinden oluşmaktadır.

Betonda tek başına veya tane çapı dağılımında ince malzeme eksikliği gösteren agregaya karıştırılarak kullanılır. Betonda yalnız başına ince agrega olarak kullanıldığında karışımındaki yüzdesine çok dikkat edilmelidir. Miktarın gerekenden az veya çok oluşu, çok kötü neticeler verebilir.

d) Yapay Agregalar: Yapay agregaların bir diğer adı da sanayi ürünü agregalarıdır. İkinci bir işlem sonucu beton yapımında kullanılır hale getirilebilir. Bunlar yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya yüksek fırın cüruf kumu sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış

yoğun yapılı agregalardır. Yapısal, fiziksel ve şekilsel değişiklikler gösterir. Özel amaçlar için ihtiyaç duyulduklarından, kullanılma yerleri sınırlıdır.

Genel olarak yapay agregalar gözenekli bir yapıya sahip olduklarından ses ve ısı yalıtımı ile hacimleri bölme amacıyla üretilen betonlarda kullanılır. Bu agregalar arasında kırılmış kiremit veya tuğla, rende talaşı, hızar talaşı vb. sayılabilir. İyi kalite tuğlaların kırıklarıyla yapılan beton yangına karşı dayanıklı olur (Neville, 1987).

Birim Ağırlıklarına Göre Agregalar

Hafif Agregalar: Bu agregalar betona ısı ve ses yalıtımı kazandırmak, betonun birim ağırlığını azaltmak veya atık maddeleri değerlendirmek maksadıyla kullanılır. Gözenekli yapılarından dolayı boşluk oranları ve su emmeleri yüksektir. Çarpma, aşınma ve basınç dayanımları çok düşüktür. Birim ağırlıkları 2000 kg/m^3 'ten küçük olan agregalardır. Doğadan doğrudan elde edilebileceği gibi dolaylı olarak da elde edilebilirler. Bu agregalar sünger taşı (pomza, bims), volkan tüfleri, diatomit, yüksek fırın cürufu, hızar talaşı, rende talaşı ve genişletilmiş kil, perlit, şist vb. isimler altında sıralanmaktadır.

Betonda hafif agrega kullanımında çimento miktarı da artacağından maliyet yükselecektir. Ve döküm sırasında da çok dikkat edilmesi gerekmektedir.

Ağır Agregalar: Bu agregaların tercih edilme sebebi ağır beton üretmektir. Birim ağırlıkları 3200 kg/m^3 'ten büyüktür. Çoğunlukla nükleer santrallerde ve (Stratejik Askeri) özellik taşıyan inşaatların betonlarında kullanılmaktadırlar. Doğal ağır agregalardan bazıları basit, manyetit, hematit, limonit vb. yapay ağır agregalara ise çelik ve demir hurdası gösterilebilir. Ağır agregalarla üretilen betonların dökümü sırasında karıştırılması, yerleştirilmesi ve sıkıştırması için ayrı bir işçilik gerekmektedir (Neville, 1987).

Tane Boyutlarına Göre Agregalar

Boyutlarına göre, ince agrega (kum), iri agrega (çakıl) ve tüvenan (karışık) agrega olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadırlar (Neville, 1987).

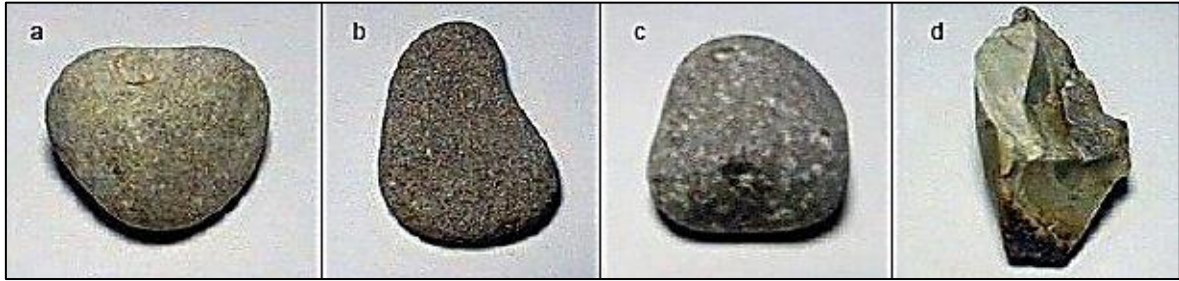
İnce agrega (kum): Doğal kum, kırma kum (ince mıcır) veya bunların karışımından elde edilen ve 4 mm göz açıklıklı kare gözlü elekten geçen agregalardır. İnce agrega taneleri sert ve sağlam olmalıdır.

İri agrega (çakıl): Doğal çakıl, kırma taş (iri mıcır) veya bunların karışımından elde edilen ve 4 mm göz açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregalardır.

Tüvenan (karışık) agregası: Doğal agregası ocağından doğrudan doğruya elde edilen herhangi bir elenme işlemine maruz kalmadan olduğu gibi kullanılan agregalardır.

Tane Şekline Göre Agregalar

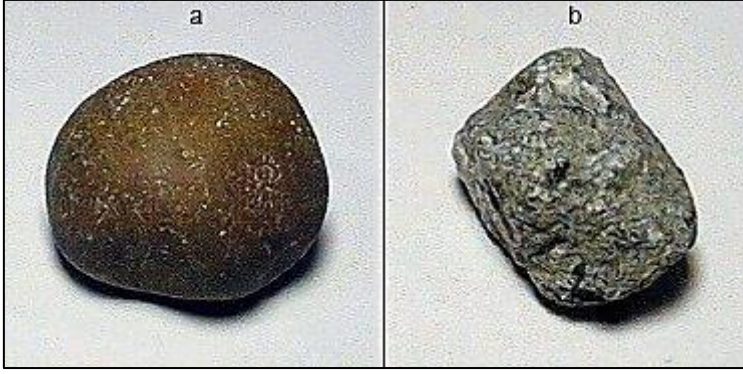
Doğal agregası ocağından çıkan malzemeler genel olarak, yuvarlak, yassı, uzun ve keskin köşelidirler ve bu şekillerine göre sınıflandırılır. Aynı zamanda kırma agregada keskin köşeli agregası grubuna girer. Tane şekline göre agregalara ilişkin örnekler Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. a) Yuvarlak agregası b) Yassı agregası c) Uzun agregası d) Köşeli agregası (URL-1)

Yüzey dokusuna göre agregalar

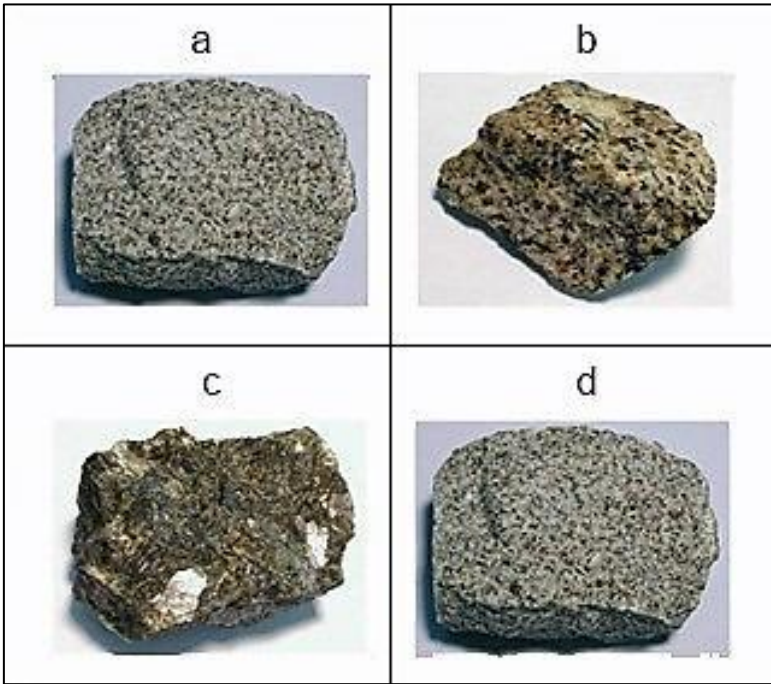
Düzgün ve pürüzlüdürler. Kırmataş agregaları düz köşelidirler. Yüzeylerinin daha pürüzlü olmasından dolayı bileşimlerinde daha fazla çimentoya ihtiyaç duyulur. Bu durum hidrasyon ısısını artıracığından rötreye neden olur. Dere agregalarının yüzeyleri daha yuvarlaktır. Dere agregası kompasitesi 0.65 iken kırmataşın ki 0.6 civarlarındadır. En uygun agregası şekli küp ve küre olandır. İnce ve yassı olanlar kusurlu malzeme sınıfına girerler. Kusurlu taneler %15’ten fazla olmamalıdır Yüzey dokusuna göre agregalara ilişkin örnekler Şekil 1.2’de gösterilmiştir (URL-1, 2019).



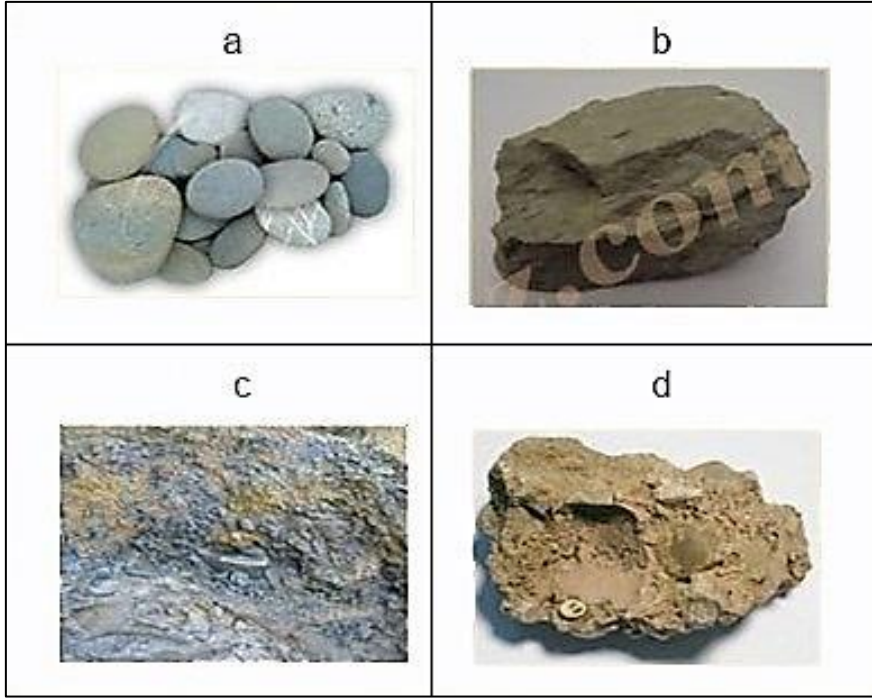
Şekil 1.2. a) Düzgün agrega b) Pürüzlü agrega (URL-1)

Jeolojik orjinlerine göre agregalar

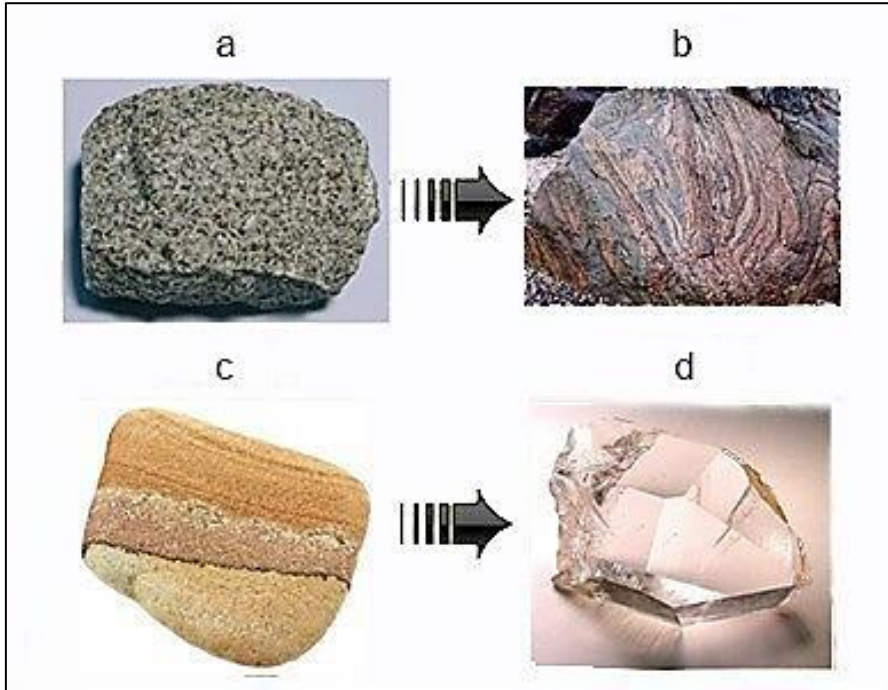
Agregalar jeolojik kökenlerine göre, volkanik, tortul ve metamorfik olmak üzere üçe ayrılırlar. Volkanik kökenli agregalara ilişkin örnekler Şekil 1.3’de, tortul kökenli agregalara ilişkin örnekler Şekil 1.4’de ve metamorfik kökenli agregalara ilişkin örnekler Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. a) Granit b) Diyorit c) Siyenit d) Gabro (URL-2)



Şekil 1.4. a) Çakıl taşı b) Mil taşı c) Kil taşı d) Konglomera (URL-2)



Şekil 1.5. a) Granit b) Gnays c) Kum taşı d) Kuvarsit (URL-2)

Mineralojik yapısına göre agregalar

Agregalar mineralojik yapılarına göre silis mineralli, karbonat mineralli ve mika mineralli olarak genelleştirilebilir (URL-3, 2019).

1.2.1.2. Çimento

Dünyada ilk çimento üretimi 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde Joseph Aspdin tarafından ince taneli kalker ve kil karışımının pişirilmesinin ardından öğütülerek gerçekleştirilmiştir. Üretilen çimentonun özellikleri ve rengi bu Leeds'e yakın Portland isimli adadan getirilen doğal yapı taşına benzediği için adına Portland çimentosu denilmiştir. Çimento yeterli sıcaklıkta pişirilmediği için bazı olumsuz (yetersiz) tarafları görülmüştür. 1845 yılında Isaac Johnson isimli İngiliz, Portland çimentosunun özelliklerini iyi pişirmeden sonra geliştirerek bugün dünyanın her tarafında kullanılır hale getirmiştir. 1845 yıldan bu yana üretilmekte olan çimento, günümüzde en önemli yapı malzemesi olma özelliğini korumaktadır. Bu süre içinde çimento üretim teknolojisinde büyük önem kaydedilmiştir. Öncelikle yaş öğütme sistemden kuru öğütme sisteme geçilerek enerjide büyük ölçüde tasarrufu sağlanmıştır. Bunun yanında üretilen çimento kalitesinde geliştirilerek kalitede iyileşme sağlanmıştır. Her çeşit beton ve harç yapımı için uygun olan Portland çimentosu dünyada olduğu gibi ülkemizde de başlangıçta sadece portland çimentosu olarak üretilirken, daha sonra çimento klinkerine tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi pozolanik özellikte maddelerde katılarak farklı özellikler taşıyan çimento tipleri de kullanılmaya başlanılmıştır. Türkiye'de üretilen çimentonun neredeyse %98'i TS EN 197-1 Standardı'nda yer alan genel çimento tipleridir. TS EN 197-1'de 27 adet genel çimento tipi ve 7 adet sülfatlara dayanıklı çimento tipi yer almaktadır. Ancak bunların içinde portland ve katkılı portland çimentoları tüketimin önemli kısmını oluşturur. Türkiye de 2017 yılında 80.552.257 ton (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2017), 2018 yılında 72.544.430 ton (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2018) çimento üretimi gerçekleştirilmiştir. Tüm dünyada üretilen çimentoların %90'ını normal portland çimentosu oluşturmaktadır.

Ülkemizde Çimento Üretiminin Tarihçesi

Çimento sektörü; başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum, demir oksitlerini içeren hammaddelerin teknolojik metotlarla sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde

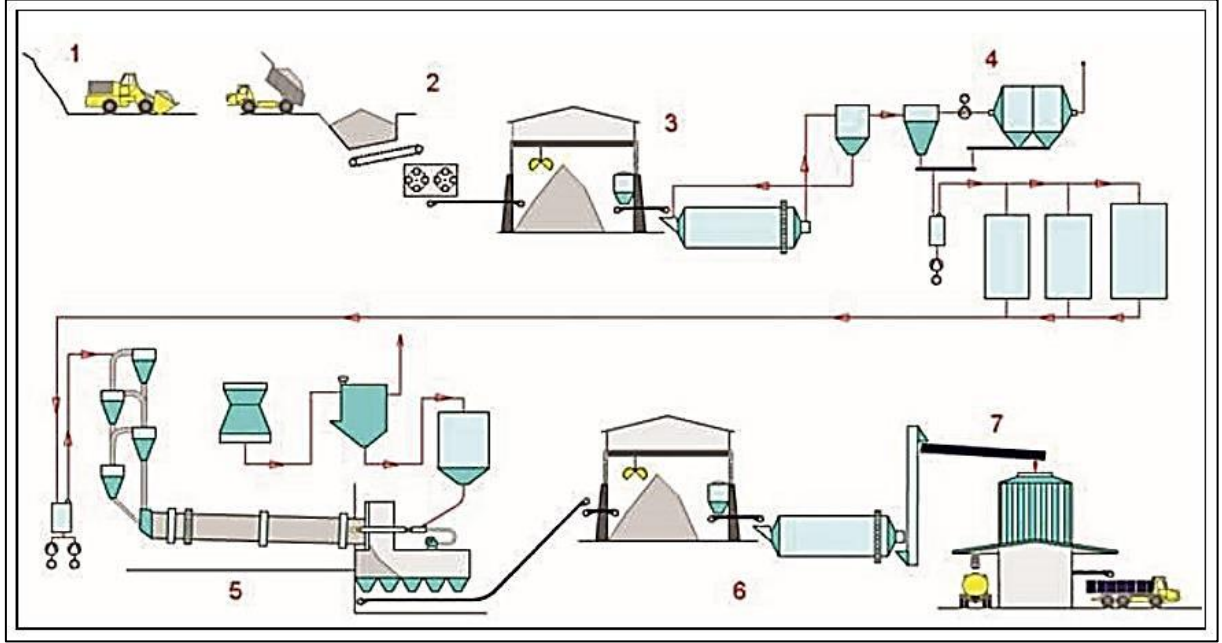
edilen yarı mamül madde “klinker”in, tek veya daha fazla cins katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen hidrolik bağlayıcıları içeren bir sektördür. Türkiye’de ilk çimento fabrikası 1911 yılında tek fırınla Darıca’da kurulmuştur. 1950’li yıllara kadar Ankara, Zeytinburnu (İstanbul), Kartal (İstanbul) ve Sivas’ta çimento fabrikaları açılmıştır. 1950’den sonra Türkiye Çimento Sanayi kurulmasıyla üretim artışı sağlanmasına rağmen 1970’lere dek talep yeterli derecede karşılanmamıştır. 1978 yılı sonlarında temeli atılmış olan 15 kadar çimento fabrikası projesinin hammadde araştırmaları Devlet Planlama Teşkilatı o zaman ki ismi Maden Tetkik Arama Enstitüsü olan MTA Genel Müdürlüğü’nü görevlendirilmiştir (Uygun, 2012). MTA, rezerv konusunda etütleri olumlu sonuçlandırılan Lalapaşa, Denizli, Ladik, Kurtalan, Ergani, Şanlıurfa ve Adıyaman fabrikaları kurulmuştur. Daha sonraki yıllarda ise çeşitli çimento fabrikalarının hammadde ihtiyaçlarının etüdünün yanında, son yıllarda çeşitli illerde kurulmak istenen çimento fabrikalarına yönelik olarak hammadde etütlerinin bir kısmı talepler doğrultusunda yine Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir (Uygun, 2012).

Çimento Üretim Aşamaları

Çimento üretim esnasında belirli aşamalardan geçmektedir. Şekil 1.6’da görülen çimento üretim şemasına göre;

1. aşamada ocaklardan patlatılarak çıkarılan çeşitli hammaddeler nakil araçlarına yüklenerek kırılmak üzere konkasörlere taşınmaktadırlar.
2. aşamada konkasörlerde kırılan hammaddeler ayrı ayrı stoklanmaktadır.
3. aşamada stoklardan alınan hammaddeler belli oranlarda karıştırılarak farin değirmenlerinde öğütülmektedir.
4. aşamada Farin adını alan karışım pişirilmek üzere farin stoklarında stoklanmaktadır.
5. aşamada ön ısıtıcılardan geçirilerek döner fırına sevk edilen farin yaklaşık 1400-1450°C sıcaklıkta pişirilmektedir.
6. aşamada döner fırından klinker olarak çıkan yarı mamül ürün soğutucuda soğutulularak klinker stok holünde stoklanmaktadır. Daha sonra alçıtaşı ve üretilecek çimento türüne uygun katkılarla çimento değirmenlerinde öğütülmektedir.

7. aşamada çimento türlerine göre ayrı silolarda stoklanan çimento, torbalı ve dökme çimento olarak satışa sunulmaktadır.



Şekil 1.6. Çimento üretim şeması

Çimento Elde Edilmesi

Portland çimento klinkeri esas olarak kalker ve kilin uygun oranlarda karıştırılması ve döner fırında yüksek sıcaklıkta sinterleşmeye kadar kızdırılmasıyla elde edilmektedir. Dolayısıyla klinker kabaca CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerinden oluşmaktadır. Çimento üretimi sırasında priz ayarlayıcısı olarak bir miktar alçıtaşı da ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılmaktadır. Ancak Portland çimentosu içinde her bir bileşenin kütleli oranının belli sınırlar içinde tutulması zorunludur.

Klinker bileşiminde bulunan bu oksitler, stokiometrik değerlere, klinkerin fırında kızdırılma sıcaklığına ve fırın çıkışında soğutma derecesine bağlı olarak farklı oranlarda kalsiyum silikat ve alüminyum silikat bileşiklerini oluşturmaktadırlar.

Çok çeşitli çimento olmasına rağmen bu gün dünyada en çok üretilen Portland çimentosunun üretimine imkân veren en uygun kayaç marnlı kalker (killi kireçtaşı)'dir.

Fakat her yerde uygun kimyasal bileşimdeki kayacı bulmak mümkün olmadığından tek hammaddeden çimento klinkeri yapılamaz.

Portland çimentosu klinkerinin temel hammaddeleri olan kireçtaşı ve kil hiçbir vakit doğada saf halde bulunmazlar. İçerlerinde çeşitli yabancı maddeler vardır ve bunlar da çimento içerisinde yer bulmaktadır. Bundan dolayı da Portland çimentolarının %90'ını oluşturan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi temel bileşenlerin dışında MgO , SO_3 ve Alkali oksitler (K_2O , Na_2O) de bulunmaktadır.

Çimentoyu oluşturan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 klinker oluşumu sırasında yüksek sıcaklıkta birbiri ile birleşerek Tri-kalsiyum silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), di-kalsiyum silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), tri-kalsiyum alüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ve tetra-kalsiyum alümino ferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)'i oluşturmaktadır. Bu bileşikler saf bir şekilde laboratuvarında elde edilebilir. Ancak hammadde karışımı içinde değişik stokiometrik oranda bulunan oksitlerin birbirlerini etkilemeleri ve bunların dışında yabancı maddelerinde bulunması klinker bileşenlerini ideal ve teorik durumlardan farklı bir şekilde bulunmasına yol açar.

Çimento Hammaddeleri

Bunun için çeşitli kimyasal bileşimdeki kayaçlar kullanılır. Başlıca kullanılan çimento hammaddeleri kireçtaşı, marn, kil, kilaşı, şeyl, killi şistten ibarettir. Bunların dışında hammaddelerin karışımını düzenlemek için demir cevheri, pirit külü, silisli kum, kumtaşı, boksit, diyasporit, alüvyon kili gibi maddeler kullanılır. Ayrıca kireçtaşının öğütülmesi sırasında alçıtaşı (jips) puzolanik maddeler ve tras ile yapay olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, uçucu küller kullanılır. Beş adet çimento hammadde grubu bulunmaktadır.

I. Grup: Karbonatlı hammaddeler; marnlı kalker, marn, kalker (kireçtaşı), tebeşir ve mermer.

II. Grup: Killi hammaddeler, kil ve kilaşı, şeyl, curüf, uçucu küller, killi şist, alüminyum cevheri atıkları ve kaolin.

III. Grup: Silisli hammaddeler, kum, kalsiyum silikatlar, kuvarsit, diyatomit, puzolanik topraklar.

IV. Grup: Demirli hammaddeler, demir cevheri (genellikle hematit), pirit külü ve demir oksit.

Portland çimentosu yapımında kullanılan ana hammadde klinkerin kimyasal bileşimine en uygun olan %75-76 CaCO_3 içeren marnlı kalkerdir (killi kireçtaşı). Marnlı kalkerin bulunmadığı durumlar da kalker ve kil ana hammadde olarak kimyasal bileşimlerine göre ham karışımların teorik formüllerinden belirlenen miktarlarda karıştırılarak çimento yapılır. Düzenleyici olarak demirli, silisli maddeler katılmaktadır.

Son 35 yıl içinde Türkiye’de endüstriyel hammaddeler konusunda önemli mesafeler kat edilmiştir. Ülkenin cam, seramik ve çimento sektöründe Avrupa’da eriştiği konum ortadadır. Bu noktadan hareketle bugün Türkiye’nin pek çok önemli sanayi ve madencilik kuruluşunun temelinde Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü’nün katkısı çok büyüktür. Ülkenin sanayileşme sürecinde sanayi kuruluşlarının hammadde ihtiyacını gidermeye yönelik olarak Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü bünyesinde Endüstriyel Hammaddeler ayrı bir daire başkanlığı altında endüstriyel hammadde aramalarını gerçekleştirmiştir.

Bu kapsam da yukarıda isimleri verilen doğal çimento hammaddelerinin yanında Türkiye’ de profillit, zeolit, halloysit, olivin, trona, tenardit, spirolit (lületaşından farklı amaçla kullanılan), huntit gibi endüstriyel kaynaklar ortaya çıkarılmış ve bunların bir kısmı çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar çimento hammaddesi sıkıntısı yok olarak görülüyorsa da fabrikalara yakın kaynakların azalması veya fabrikaların şehir merkezi için de bulunması gibi sebepler ve çevreye duyarlı düzenlemeler madencilik faaliyetlerine kısıtlamalar getirmektedir.

Türkiye de yılda yaklaşık 72.000.000 ton çimento üretilmektedir. Çimento klinkerinin %65 CaO olarak alınmakta olup, $72/100 \times 65 = 46.800.000$ ton CaO ’e (kirece) ihtiyaç vardır. Yakılan saf bir kireçtaşının %56’sı CaO ’dur. 46.800.000 ton CaO elde edebilmek için $46.800.000 \times 100/56 = 83.570.000$ ton kireçtaşına ihtiyaç vardır. O halde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 gibi oksitleri elde edilebilecek diğer hammaddelerle birlikte 100.000.000 ton bir hammaddeye ihtiyaç vardır.

Çimento uygun kimyasal ve mineralojik bileşimde tek hammadde bulunmadığı takdirde genellikle değişik nitelik ve kimyasal bileşimdeki kayaçların bir oran ve esasa göre yapılan karışımlardan elde edilir. Bu karışımlardaki hedef uygun nitelikte klinker yapmaktır.

Çimento yapımında kireç (CaO), silis, alüminyum, demir oksitlerin miktar ve oranlarına göre temin edilecek bir hammadde karışımının önemini vurgulayan bu formüller

bir kısmı yalnızca teorik varsayımlara, bir kısmı da pratik ve teknik deneyimlerin uygulaması ile elde edilir. Hangi durumda olursa olsun çimento yapımında kullanılacak hammaddeler ile elde edilen çimentonun nitelik ve özelliklerini göstermek için saptanan formüller olup, çimentoların bileşimleri hakkında bir fikir verse de tek başına fazla bir anlam ifade etmemektedir.

Bunun için günümüze kadar çok yönlü araştırmalar yapılarak gerek hammadde açısından ve gerekse elde edilen çimentonun nitelikleri açısından bazı prensipler sağlanmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde çoğunlukla hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları esas alınmaktadır, karışım oranlarının belirlenmesinde Echel formülü, modüller için ise Michaelis formülü en fazla kullanılan formüllerdir. Bunlardan Echel formülü; bir miktar marn veya kilin, ne kadar kireçtaşı ile karıştırılması gerektiğini göstermektedir.

Çimento hammaddesi etütlerinde, Kireçtaşı kil kombinasyonları ile oluşacak klinker özelliklerini belirlemeden önce genel olarak ideal klinkerin kimyasal kompozisyonlarını ve oksitlerin birbirine oranını bilmek saha hammadde özelliklerini açıklamada önemlidir. Oluşacak ideal klinkerin yüzde bileşimleri ve oksitlerin birbirine oranı (modüler) Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Oluşacak ideal klinkerin yüzde bileşimleri ve oksitlerin birbirine oranı

Bileşenler	Sınır Değerler % min-%max	Tipik Bileşim(%)
CaO	60-67	63
SiO ₂	17-25	20
Al ₂ O ₃	3-8.0	6
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0	3
MgO	0.1-0.4	2
Na ₂ O + K ₂ O	0.2-1.3	2
SO ₃	1.0-3.0	1
Kızdırma kaybı	1.0-2.0	2
Çözünmeyen kalıntı	1.0-2.0	1

$$\text{➤ Hidrolik modül} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 2 \text{ (1.7 – 2.2)}$$

$$\text{➤ Silikat modülü} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 2 \text{ (2.4-2.7)}$$

$$\text{➤ Alüminyum (ergime modülü)} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 2 \text{ (21.5)}$$

$$\text{➤ Kireç silis oranı} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \text{ 2.5-3.0}$$

$$\text{➤ Titrasyon} = \frac{\text{CaO}}{0.56(\text{İdeal kireç taşıdaki CaO kütlesi})}$$

Çimentonun su ile muamelesinde kirecin (CaO) silis ve alüminlerle tam olarak bağlanması yanında ve ortamda kireç kalmaması gerekir. Bu durum çimentonun yapılmasında kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimine bağlıdır. Bunun için çimento yapımında kullanılan kalkerdeki (kireç taşıdaki) kireç (CaO), silis ve alüminyum oksitler dikkate alınarak Vicat ‘Hidrolik indeks’ bulunmuştur.

$$\text{➤ Hidrolik indeks} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Ca}} \quad \text{Burada MgO bulunmamaktadır.}$$

M. E. Eckel asit nitelikteki bileşenlerin (SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃) bazik nitelikli bileşenlere (CaO-MgO) oranına Hidrolik indeks (bağlama veya çimentolama indeksi) olarak belirlemiştir. Newberry ‘de aşağıda verilen formülle portlant çimentolarının hammaddeleri için yapılan hesaplamalarda kullanmıştır.

$$\text{➤ Hidrolik indeks} = \frac{(2.8 \times \text{SiO}_2) + (1.1 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)}{\text{CaO} + (1.4 \times \text{MgO})}$$

İdeal bir Portland çimentosu hidrolik indeksin 1 veya biraz daha büyük olmalıdır. Çimento yapımında kalkerin yakılması ile oluşan CaO, silis ve alüminyumla tam olarak birleşmesi, ortamda kireç kalmaması istenir. Bu durum çimentonun yapımında kullanılacak maddelerin kimyasal bileşimine bağlıdır. Çimento yapımında kullanılacak hammaddelerin miktarını ve oranını saptamak için Echel pratik formülü geliştirilmiştir. Echel’in geliştirmiş olduğu bu formüle bir örnek verirse: Kil ve kalker (kireçtaşı) numunelerinin kimyasal analizleri aşağıdaki Tablo 1.2’deki gibidir.

Tablo 1.2. Kil ve kalker (kireçtaşı) numunelerinin kimyasal analizleri

	Kalker	Kil
SiO ₂	2.4	62.2
Al ₂ O ₃	2.0	16.2
Fe ₂ O ₃	0.3	4.2
CaO	50.2	1.6
MgO	1.5	1.2
SO ₃	0.6	1.7
Alkaliler	0.4	0.6
Ateş zaiyatı	42.6	12.2

Eckel formülü ile hammadde karışımlarının hesaplanması:

$$\text{Kalkerde } \frac{(2.8 \times \text{SiO}_2) + (1.1 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) - \text{CaO} + (1.4 \times \text{MgO})}{\text{Kilde } \text{CaO} + (1.4 \times \text{MgO}) - (2.8 \times \text{SiO}_2) + (1.1 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)}$$

İşlemin sonunda 1 kısım kil için 4.44 kısım kalker gerekli olduğu ortaya çıkar.

Sonuç olarak çimento hammaddelerinde istenmeyen oluşumlar şu şekildedir: Kalkerde, magnezyumlu bileşiklerin %5'i geçmemesi istenir. Bunlar dolomit ve manyezit olduğu gibi çeşitli tuzlar halinde de bulunurlar.

Kil ve alüminalı bileşiklerde serbest silis istenmez. Sonradan kirlenme ve kile bağlı olarak bulunan alkaliler, kükürt ve fosfat (fosforit ve apatit), NaCl potasyum klorür, kalsiyum florür ve florit mineralleri istenmemektedir.

Çimento sanayinde klorür ve bromürler korozyon etkiye neden olduklarından istenmezler. Bunlar kalker çevresindeki volkanik faaliyetlere bağlı olarak oluşurlar. Bugün nakliyenin pahalı oluşu ve çimentonun stoklanamaması raf ömrünün kısa oluşu nedeniyle malzemenin temin edildiği yerin fabrikaya uzaklığına ve malzemenin cinsi göz önüne alınarak bütün bu modüller ve karışım oranlarını optimum şekilde hesap edecek bilgisayar programları ile de yapmak mümkündür.

Çimento Çeşitleri

Türkiye'de standardı olan çimento tipleri 5 çeşittir.

- 1- Portland çimentosu
- 2- Portland kompoze çimento
- 3- Yüksek fırın cürufu çimento
- 4- Puzolanik çimento
- 5- Kompoze çimento

Bu çimento türlerinin dışında gerek klinker üretimi sırasında, gerekse sonradan ilave edilen mineral katkıları sayesinde özel kullanım amaçlı olarak üretilmiş, TS EN 197-1 standardının kapsadığı 5 çeşit daha çimento bulunmaktadır. Bunlar:

- 1- Sülfatlara dayanıklı çimento: Trikalsiyum alüminat miktarının maksimum %5 olarak üretildiği ve kalsiyum sülfat ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen çimentolardır.

2- Beyaz Portland çimento: Özel nitelikli kil ile kireçtaşının birlikte pişirilmesi sonucu elde edilen beyaza yakın klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile birlikte öğütülmesiyle elde edilmektedir.

3- Harç çimentosu: Dayanımı geliştirmesi için Portland çimentosu klinkeri içine ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. İlave bileşene gerek duyulmadan sadece kum ve su karıştırılarak duvar, sıva ve kaplama işlerinde kullanılan uygun harç yapımını sağlar. Su ile tepkisinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere “Hidrolik Bağlayıcı” adı verilmektedir. Çimento; hava ile suda sertleşen ve sertleştikten sonra da suda çözünmeyen hidrolik bağlayıcı bir maddedir.

4- Yüksek fırın cürufu katkılı düşük erken dayanımlı çimento: Sınırlandırılmış hidrasyon ısısına sahip, yüksek fırın cürufu katkılı ve erken dayanımı düşük olan çimentolardır.

5- Çok düşük hidrasyon ısılı özel çimento: Su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan, sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyabilen ve geliştirebilen, genel çimentoların hidrasyon reaksiyonlarına sahip olan çimentodur.

Kimyasal bileşimi belirli sınırlar içinde tutulan Portland çimentolarının hammadde bileşiminde meydana gelen küçük değişimler elde edilen çimentonun fiziksel özelliklerinde önemli farklılıklar doğurur. Böylece hammadde bileşimi değiştirilerek çeşitli tipte Portland çimentosu elde etmek mümkün olabilir. Diğer taraftan klinker içine değişik puzolanlar katılarak fiziksel özellikleri tamamen farklı çimento çeşitleri de üretilmektedir. Böylece hem kullanım amacına uygun çimentoyu seçebilmek mümkün olmakta, hem de daha ucuza maliyet sağlanmaktadır.

Portland çimentoların bütün fiziksel ve mekanik özellikleri klinkerin minerolojik bileşimine bağlıdır. Böyle olduğu için klinkerin minerolojik bileşimi ayarlanarak hidrasyon ısısı düşük veya yüksek, başlangıç mukavemeti daha yüksek, sülfata daha dayanıklı olan bazı özel çimento tiplerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Portland çimentosu

Tüm dünyada üretilmekte olan çimentoların %90'ını normal Portland çimentosu oluşturmaktadır. Portland çimentoları her çeşit beton ve harç yapımı için uygun çimentolardır. Türk çimento standartlarında 5 tip Portland çimentosu bulunmaktadır. Bu

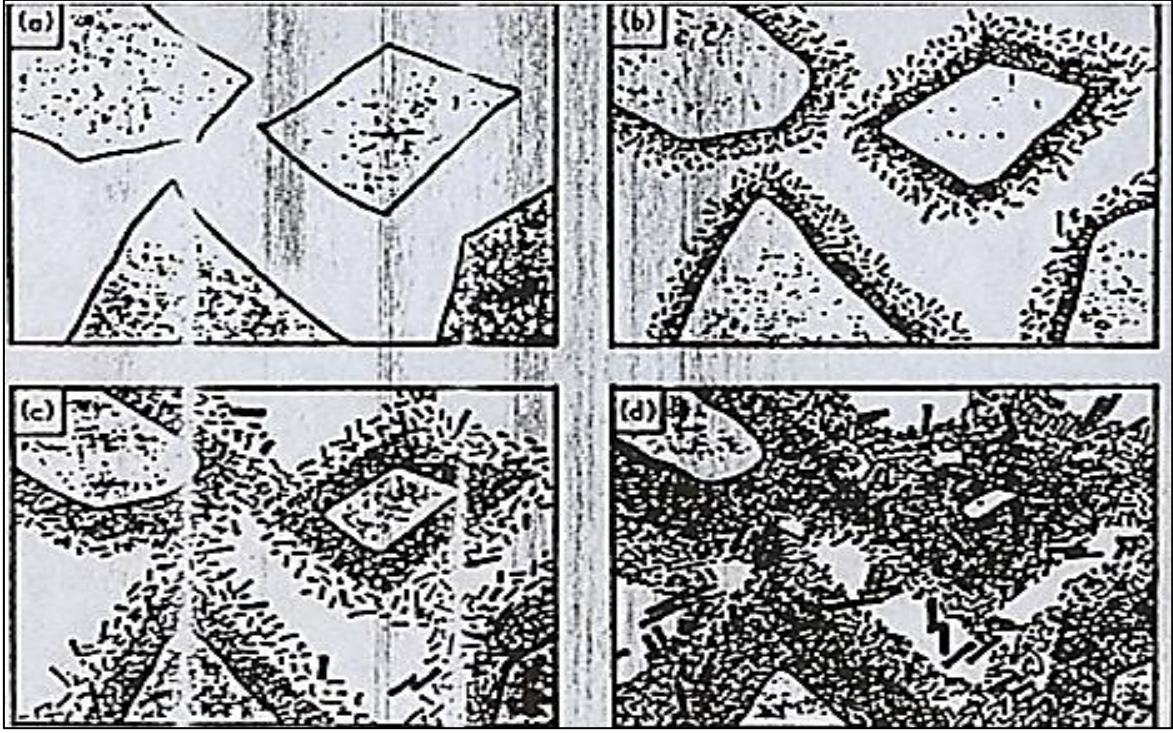
çimentolar 28 günlük mukavemet değerleri göz önüne alınarak sınıflandırılmaktadırlar. Çimentonun kimyasal bileşimi SO_3 ve MgO dışında serbest bırakılmıştır.

- 1- Alite (alit) : C_3S (Trikalsiyum silikat)
- 2- Belite (belit) : C_2S (α) (Dikalsiyum silikat)
- 3- Felite (Felit) : C_2F (β) (Dikalsiyum ferrit)
- 4- $3CaO.Al_2O_3$: C_3A (Trikalsiyum alüminat)
- 5- Celite (veya : C_4AF (Tetra-kalsiyum ferrik faz) alümino ferrit)

Klinker bileşenleri içerisinde en önemlisi Tri-kalsiyum silikat (C_3S) ve di-kalsiyum silikat (C_2S)'tir. Diğer iki alüminat bileşiği olan C_3A ve C_4AF çimento mukavemeti açısından önemsizdir.

Borlu aktif belit (BAB) çimentosu, doğada bulunan bor mineralinin çimento hammaddesi olarak belirli bir oranda kullanılması ile elde edilen ve boroksit (B_2O_3) içeren bir tür portland çimentosudur.

Portland çimentosu klinkeri üretimi esnasında bor mineralinin belirli bir oranda hammadde olarak kullanılması sonucunda normal bir Portland çimentosu bileşiminde yer alan fazlardan en önemlisi olan alit (C_3S) fazı oluşmamakta ve bunun yerine daha kararlı ve aktif olan alfa/beta (C_2S) kristal fazı oluşmaktadır. Bu oluşan çimento çok düşük hidrasyon ısı ve yüksek oranda aktif belit fazlı bor katkılı Portland çimentosu olarak bilinir.



Şekil 1.7. Portland çimentosunun sertleşme mekanizmasını gösteren dört aşama (Çetin, 2003).

Yüksek fırın cüruf çimentoları

Yüksek fırın cürufllu çimentolar; portland klinkeri ile %95'e kadar granüle yüksek fırın cürufunun birlikte öğütülmesi ile üretilmektedir. Bu amaçla kullanılan granüle yüksek fırın cürufu, pik demir üretimi sırasında yan ürün olarak oluşan cürufun su ile ani soğutulmasıyla granüle hale getirilmesiyle elde edilir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi esas olarak $\text{CaO-SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşur. Cürufun kimyasal bileşimi yaklaşık olarak şöyledir:

Optik mikroskop, X-ışınları difraksiyonu (XRD), taramalı elektronik mikroskobu (SEM) ile yapılan mineralojik incelemelerde Portland çimentosu klinkerde 5 fazın olduğu ortaya çıkarılmıştır.

SiO_2 : %40.2

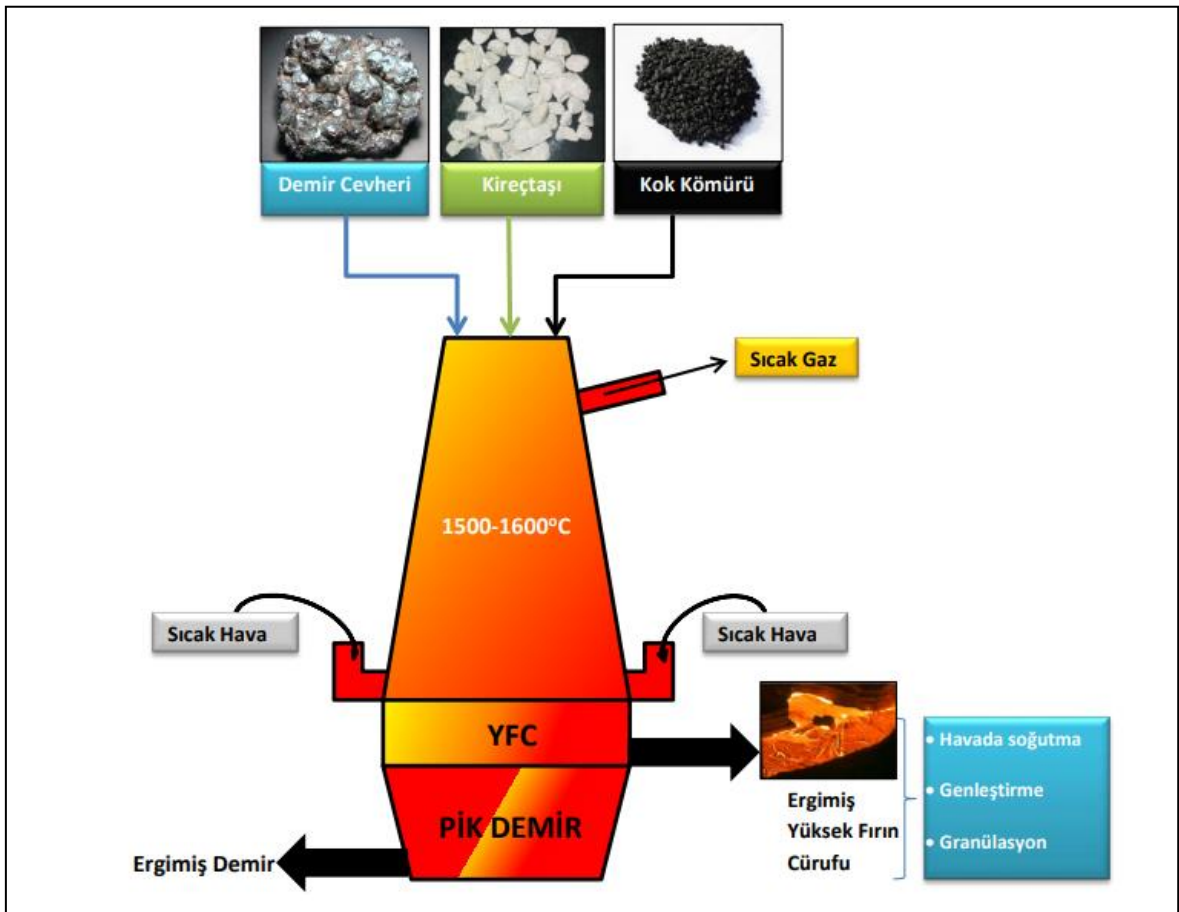
CaO : %34.2

MgO : %9.4

Al_2O_3 : %15.2

Fe_2O_3 : %0.8

Cürufun kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önem arz etmektedir. Yüksek fırın cürufu yavaş bir şekilde soğutulduğunda kristalimsi bir yapıya sahip olmaktadır. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve puzolanik özellik göstermemektedir. Yavaş soğutulmuş cüruf ancak beton agregası olarak kullanılabilir. Eğer ki cüruf su ile hızlı bir şekilde soğutulmaya çalışırsa granüle camsı bir yapı kazanır. Bu tür cüruflara granüle yüksek fırın cürufu denir ve puzolanik özelliğe sahiptir. Yüksek fırından erimiş halde çıkan cüruf hızlı olarak soğutulduğunda akışkanlığında ani azalma meydana gelir. Bu durum cürufun kristal hale gelmesini engellemekte ve camsı yapıda bir katı eriyik ortaya çıkarmaktadır. Bu yarı-kararlı camsı malzeme yeteri incelikte öğütüldükten sonra kalsiyum hidroksit ile reaksiyona sokulur ise normal sıcaklıkta kalsiyum silikat hidratları oluşturur (Cüruflar ve Cürufllu Çimentolar TÇMB/AR-GE/ Y97.2; Traslar ve Traslı Çimentolar TÇMB/AR-GE/ Y99.2).



Şekil 1.8. Yüksek fırın cürufunun üretim süreci (URL-4, 2019)

Puzolanlı çimentolar

Yalnız başlarına oldukları zaman bağlayıcı özellik göstermedikleri halde, kireç veya çimento ile karıştırıldıkları vakit su ile girdiği reaksiyon sonucunda bağlayıcı madde özelliği gösteren maddelere puzolan denilmektedir.

Puzolanik maddelerin içerisinde fazla miktarda kolloidal halde silisyum ve alüminyum bulunur. Bu maddelerin kireçle girmiş olduğu reaksiyon sonucunda puzolan, bağlayıcılık özelliği kazanır. Bir portland çimentosuna puzolan karıştırıldığında çimentonun hidratasyonu sonucunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile puzolan içinde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 arasındaki reaksiyonlar puzolana bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır.

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Doğal puzolanlar başta tras olmak üzere volkanik küller, pumucite, opal ve çört vb. aktif silis içeren minerallerdir. En önemli yapay puzolan olan uçucu kül, toz kömürü yakan termik santrallerde baca gazı içine karışan toz halindeki küllerin baca çıkışında elektrostatik olarak tutulması ile elde edilmektedir. Yaklaşık çimento inceliğinde olan bu küller yanma bölgesinden çabuk bir şekilde uzaklaştığı için ani olarak soğumakta ve puzolanik aktivite kazanmaktadırlar. Doğal puzolanlar içerisinde bulunan silis genellikle amorf haldedir. Kristal içindeki silis çok az aktivite gösterir. Doğal puzolanların çoğu içerisinde bulunan fazla miktardaki su nedeniyle doğrudan puzolan olarak kullanılamazlar. Bu tip puzolanların önceden $550-1100^\circ\text{C}$ 'a kadar kızdırılması ve aktif hale getirilmeleri gerekmektedir.

Asit karakterli puzolanlar yani $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ toplamı fazla olan puzolanlar, kuvvetli bir baz olan kalsiyum hidroksil ile daha kolay reaksiyona girmektedirler. Bir puzolanın reaksiyon sonucunda kimyasal olarak bağlamış olduğu kireç miktarı ne kadar fazla olursa reaktivitesi o kadar büyük olur veya puzolanik özelliği o kadar yüksek olur. Bu özellik puzolanın özgül yüzeyine de bağlıdır. O halde puzolanik özelliği artırabilmek için puzolanı çok ince bir şekilde öğütmek gerekir. Puzolanik özelliği etkileyen bir diğer faktör ise puzolanın içerdiği reaktif maddelerin amorf veya camsı yapıda olması ve zeolitik fazda bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 yüzdesidir. Diğer taraftan puzolanik özellik SiO_2 ve Al_2O_3 'ün kireç ile yaptığı reaksiyon sonucunda kazanıldığından bir puzolanda CaO 'ın mümkün olduğunca az miktarda bulunması gerekir.

Zeolitleşme trastaki camsı yapının zeolit grubu minerallerine dönüşmesidir. Zeolitleşme, sayesinde malzemenin puzolanik özelliği artar.

ASTM C-618 standardında puzolanların $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ şartı aranmaktadır. Buna ek olarak CaO miktarı da $\%4$ 'ün altında olmalıdır. Bu kimyasal koşulları sağlamış olması bir maddenin puzolan olduğunu göstermez.

Çünkü puzolanda silis ve alüminyumun reaktif halde bulunması gerekir. İçerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 amorf yapıda değilse, o maddenin puzolanik özellik göstermesi mümkün değildir. Şu halde kimyasal analiz sonuçlarının olumlu olması halinde ayrıca yapılacak puzolanik aktivite deneyi veya mukavemet deneyleri ile söz konusu olan maddenin puzolanik özelliği ortaya konmalıdır.

Puzolanik özellik deneyi şöyledir: Puzolan+çimento karışımı ($\%20$ - 40 puzolandan ve $\%60$ - 80 'de portland çimentosundan oluşan karışım) 7 gün boyunca su içerisinde bırakılır. Bu süre içerisinde puzolanın bir kısmı çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birleşerek onu kimyasal olarak bağlar. Reaksiyona girmemiş olan kalsiyum hidroksit çözelti içinde serbest olarak kalır. Aynı deney puzolansız çimento için tekrarlanır. Deney sonunda puzolanlı ve puzolansız çimentoların içinde olduğu sulara çözünmüş olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarları saptanır. Puzolanlı çimento halinde kirecin bir kısmı reaksiyona girmiş olduğundan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı daha az bulunacaktır. Puzolanlı ve puzolansız iki numunede ölçülen kireç miktarının, yani CaO yüzdelerinin birbirine oranının (puzolanlı çimentodakinin puzolansız çimentodakine oranı) belirli bir değerden küçük olması halinde maddenin puzolanik özelliğine sahip olduğu kabul edilir.

Mekanik deney yolu ile puzolanik özelliği mevcut olup olmadığını anlamak için aşağıda belirtilen miktarda puzolan, sönmüş kireç ve standart kum ile karıştırılarak $4 \times 4 \times 16$ cm boyutunda prizma hazırlanır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulduktan sonra sökülmeden ve açık yüzleri kapalı olacak şekilde 55 ± 2 °C'lik etüv içinde 6 gün bekletilir.

Bu süre sonunda kalıptan çıkartılarak çimento deneylerinde olduğu gibi eğilmede çekme, mukavemeti deneyi ve kırılan parçalar üzerinde de basınç mukavemeti deneyleri yapılır. Eğilme mukavemetinin 10 bar'dan, basınç mukavemetinin 40 bar'dan büyük olmaması halinde maddenin puzolanik özelliğe sahip olduğu kabul edilir.

TS-25'e göre traslarda aranılan kimyasal özellikler şöyledir:

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	en az $\%70$
MgO	en çok $\%5$
SO_3	en çok $\%3$

Rutubet

en çok %10

TS 25'e göre puzolanik aktivite deney sonucunda 7 günlük eğilme dayanımı en az 10 MPa, 7 günlük basınç dayanımı en az 40 MPa olmalıdır. Kızdırma kaybı en çok %5, özgül yüzeyi en az 3000 cm²/g olmalıdır.

Tras olarak asit ve nötr kökenli volkanik tüflerin kullanılır olduğu açıktır. Fakat pratikte bazalt cürufalarının da kullanıldığına rastlanmaktadır. Asit ve bazik kökenli kayalar arasında mineralojik bileşim farkları vardır. Bu farklardan biri asit volkaniklerde (riyolit, dasit, trakit) silis oranının asitten bazik kayalara doğru gidişte azalan bir sıra izlediği bilinmektedir.

Doğal tras yatakları içinde serbest silis, kireçtaşı veya dolomit, killi karbonatlı seviyeler tuzlar vb. oluşumlar bulunmamalıdır. Trasın en ekonomik şekilde istihracı yanında öğütme ve ulaşım kolaylıklarına sahip olması gerekir.

Puzolanlı çimentoların başlangıçta mukavemeti düşüktür. İlk günlerdeki mukavemet artışları puzolanik aktiviteye ve karışım yüzdelerine bağlıdır. Puzolanik çimentoların başlangıçta mukavemeti düşük olmasına rağmen nihai mukavemetleri normal Portland çimentoları kadardır, hatta daha fazladır.

Puzolanlar çimentoya pişirilmeden katıldığından önemli maliyet azalmaları sağlamaktadır. Puzolanlı çimentolar beton içinde bulunan serbest kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikatlar halinde beton boşluklarını doldurur. Böylece betonun geçirgenliğini azaltıcı etki yapar. Bunun sonucu olarak başta sülfat korozyonu olmak üzere, betonun kimyasal etkilere dayanıklılığı artırılır. Puzolan katkısı betonun fiziksel özellikleri üzerine en çok geçirgenlik ve su emme özelliğinde gösterir.

Oksijen beton için zararsızdır, ancak betonarme demirleri üzerinde korozyon yapıcı etkisi ile zararlıdır. Geçirgenliği düşük bir beton yapmak suretiyle oksijenin betonarme demire ulaşması zorlaştırılır. Betonun hava geçirimsizliğini azaltması nedeniyle puzolanlı çimentolar betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkili olur.

Beton içine giren su içinde çözülmüş halde bulunan karbondioksit beton içinde bulunan kalsiyum bileşiklerini bikarbonat halinde çözerek dışarı taşır. Karbonik asitli suların kireci çözmesine karşı alınacak ilk önlem geçirimsiz beton yapımıdır. Bunu için puzolanik çimento kullanımı sorunu çözecektir. Suda çözülmüş klorür iyonu hem beton hem de betonarme demirleri için zararlıdır. Klorlu sular beton içinde bulunan serbest

kirecin yıkanmasını hızlandırır. Böylece harç ve betonda gözeneklilik artar. Bu etki sonucu beton şişerek mukavemet kaybına uğrar.

Kalsiyum, sodyum, magnezyum sülfatlar harç ve beton içinde hidrate olmuş çimento ile etkileşerek genişleyen bileşenler meydana getirirler ve hacim genişmesi ile mukavemet kaybına yol açarlar. Magnezyum sülfat etkisi kalsiyum ve sodyum sülfat etkilerinden daha fazladır. Ancak puzolan katkısı sülfatlara dayanıklılığı artırır.

Agrega içindeki bazı reaktif silika türleri (opal, tridimit) çimentodaki alkalilerle reaksiyona girerek alkali silikatlardan oluşan ve hacim genişmesine neden olan viskoz bir jel meydana getirir. Çimentoda NaO eşdeğeri alkali oksitler toplamı %0.6'dan az ise genişleme söz konusu olmaz. Ancak beton içine dışarıdan alkali hidroksitler girerse bu sınır değeri yükselir. Alkali-agrega reaksiyonunun zararlı etkileri puzolanik çimento kullanılarak azaltılır. Yeterli miktarda puzolan katılması halinde klinker içinde bulunan alkali oksitleri bir sorun yaratmaz. Puzolanik aktivite gösteren bir puzolandan çimentoya %30-40 katılması halinde genişleme önlenabilir. Bazı puzolanlar içinde alkali yüzdesi fazla olmasına rağmen puzolanik etki sonucu alkali agregaya reaksiyonu etkisiz hale getirir.

Alüminalı çimentolar

Bu çimentolar, boksit ile kireçtaşının fırında eritilinceye kadar pişirilmesi sonucu elde edilmektedir. Boksitin içerisindeki Al_2O_3 miktarı %50'den fazla olduğu için bu çimentoların içinde bulunan Al_2O_3 miktarı da %30'dan fazladır. Bu çimentolar çoğunlukla aşağıdaki ortalama bileşime sahiptir.

Al_2O_3	%40-50
CaO	%35-42
Fe_2O_3	%5-15
SiO_2	%4-10

Alüminalı çimentonun mineralojik bileşimi portland çimentolardan tamamen farklı olup, esas olarak monokalsiyum alüminat ($CaO \cdot Al_2O_3$) ve dikalsiyum silikat ($2CaO \cdot SiO_2$)'dan oluşur. Bu bileşiklerden başkade ($3CaO \cdot 5Al_2O_3 - 5CaO \cdot 3Al_2O_3$)'a bu çimento içinde yer alır. Alüminalı çimentoların en önemli özelliği çok çabuk priz almasıdır. Bu çimentolar ile üretilen betonlar bazı şartlar altında zamanla bozulmaya başlamaktadır.

Beyaz çimento

Beyaz Portland çimentosunun üretim teknolojisi aynen Portland çimentosu klinker üretiminde olduğu gibidir. Ancak hammadde içerisinde demir ve mangan gibi renk verici bileşenlerin bulunamaz. Klinker içerisine kül karışmasını önlemek için fırında yakıt olarak kömür yerine fueloil veya doğal gaz kullanılır. Portland çimentosu üretimi esnasında hammadde içerisinde demir oksit bulunması klinker pişirilirken akıcılık sağlar. Beyaz çimento üretiminde ise bu görevi yerine getirmek için hammadde içerisine sodyum alümina florür katılmaktadır. Beyaz çimento üretimindeki diğer bir farklılık ise renk bozulmasının önüne geçmek için öğütme işlemi çelik bilyalı değirmenler yerine nikel-molibden bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Bunun sonucunda malite Portland çimentosunun iki katına çıkmaktadır. Hammadde olarak propillit ve/veya kaolen kullanılır.

1.2.1.3. Su

Beton Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılmakta olan karışım suyunun üç ana işlevi vardır.

Birinci işlevi çimentonun kimyasal yapısında değişmeye neden olarak çimentoya mekanik özellik kazandırmasıdır. Bu işleve göre suyun miktarı, çimentonun türüne, miktarına ve inceliğine, havanın sıcaklığına ve havadaki nispi neme bağlı olarak ağırlığının %25-30'u oranında artma ya da azalma gösterebilir (TS EN 196-1, 2016).

İkinci işlevi, agregaların çimento hamuru sayesinde birbirine yapışmasını sağlamaktır. Bu işleve göre suyun miktarı, agregaların yüzey şekli, nem durumu ve granülometrisi ile ilişkilidir. Agregaların tane grupları, dere yatağı ya da kırmataş agregalar olup olmaması su miktarını etkiler.

Üçüncü işlevi ise, taze betonu boşluksuz ve homojen bir şekilde kalıba yerleştirmek için gereklidir. Bu suya işlenebilirlik için gerekli olan su da denir (Şimşek, 2001).

Beton kalıba yerleştirilip yüzeyine son şekli verildikten sonra işlenebilirlik suyunun varlığı betonda olumsuz etkilere sebep olur. Gerçekte betonun ihtiyacı olan su, hidrasyon için gerekli olan sudur. Hidrasyon için gerekli olan su/çimento (s/ç ya da w/c) oranı 0.26-0.30 arasında iken betonun işlenebilmesi için bu oran genelde 0.40'tan fazladır. Hidrasyon için gerekli olan su haricindeki işlenebilirlik suyu taze betonda serbest halde bulunur. Bu su serbest su adını da alır. Yani bu su, hidrasyon sonucu jel olmayan sudur.

Serbest su betonda segregasyona (ayrışmaya) neden olur. Taze betondaki iri agregaların yerçekimi ve ağırlıkları nedeniyle kalıpta dibe doğru çökmesine neden olur. Serbest suyun betonda bekleme süresi ne kadar fazla olursa segregasyonda o oranda fazla olur. Bu da betonun derinliği boyunca homojen dayanım gösterememesine neden olur.

Betonda karışım suyu optimum miktarda kullanılmalıdır. Gereğinden fazla kullanılması çimentonun dayanımını ve yapışkanlık özelliğini düşürür. Gereğinden az kullanılması ise agrega yüzeylerinin tam ıslanmamasına, bu nedenle agregaların çimento hamuruyla birbirine iyi yapışmamasına neden olarak koyu kıvamlı, işlenebilirliği iyi olmayan betonlar elde edilir.

Betonda kullanılan suların tümünün temiz olması gereklidir. İçinde standartlarda belirtilenden fazla oranda organik madde, asit ve tuz özelliği gösteren sular kullanılmamalıdır. Mart 2004 tarihi itibarıyla beton karışım suyu standartları Avrupa Standartlarıyla uyumlu hale getirilmiştir. TS EN 206:2013+A1'ya (TS EN 206:2013+A1, 2017) göre karma suyu TS EN 1008 'e (TS EN 1008, 2003) uygun olmalıdır. Beton karışım suyu özellikleri standartta verilen Tablo 1.3'deki şartları sağlamalıdır.

Tablo 1.3. Beton karışım suyu niteliği

Özellik	Kabul Şartı
Deterjanlar	Herhangi bir köpük iki dakika içerisinde kaybolmalı
Renk	Geri kazanılan suların dışında rengi açık sarıdan daha açık olmalı
Askıdaki katı madde miktarı	Geri kazanılan suların dışında 4ml'den az olmalı Geri kazanılan sularda içinde çimento veya yüksek fırın cürufu çimento olması halinde az bir miktar sülfür
Koku	kokusu dışında koku bulunmamalıdır Diğer sularda içilebilir sularda bulunanın dışında herhangi bir koku bulunmamalı hidroklorik asit eklendiğinde hidrojen sülfür kokusu alınmamalıdır.
Asitler	pH \geq 4 olmalıdır
Organik madde	NaOH eklendiğinde belirlenen renk sarıya dönük kahverengi veya daha açık olmalıdır

Klorür İçeriği

Klorür içeriği TS EN 206:2013+A1 Madde 5.2.7.'deki seçilen değerleri geçmediğinin gösterilmesi halinde aşağıdaki değerleri geçebilir.

Tablo 1.4. Klorür içeriğinin beton cinsine göre alabileceği değerler

Karışım Suyunun Kullanılacağı Betonun Cinsi	En Yüksek Klorür İçeriği mg/l
Öngermeli veya şerbet	500
İçerisinde donatı veya diğer metal bulunan	1000
İçerisinde donatı veya diğer metal bulunmayan beton	4500

Alkali

ASR'ye karşı önlem alınmadıkça alkali seviyesi 1500 mg/l'yi geçmemelidir.

Zararlı Kirlenme

Öncelikle şekerler, fosfatlar, nitratlar, kurşun ve çinko için deneyler yapılabilir. Fakat bunların varlığında priz süresine etkisi ve miktarı belirlenmelidir.

Tablo 1.5. Zararlı kirlenmeye neden olabilecek malzemelerden bazılarının maksimum değerleri

Madde	En Fazla Miktar(mg/l)
Şekerler	100
FosfatPb ₂ O ₅	100
NitratNO ₃	500
Kurşun Pb ₂	100
Çinko Zn ₂	100

Priz Süresine Etkisi

Saf su ile uygunluğu araştırılan su üzerinde yapılan karşılaştırmalı deneylerde elde edilen priz başlangıç süresi bir saatten daha az olmamalı ve en fazla %25 sapma

göstermelidir. Priz bitiş süresi 12 saatten daha uzun olmamalı ve en fazla %25 sapma göstermelidir. 7 günlük basınç dayanımı %90'dan da düşük olmamalıdır.

Geri Dönüşüm Suyu

Geri dönüşüm suyunun kaynakları

- Geri dönen betondaki su
- Transmikser, pan mikser , pompa ve ajitatörlerin yıkanmasından açığa çıkan su
- Sertleşmiş betonun su basıncıyla işlenmesinden açığa çıkan su
- Beton üretimi sırasında doğan atık su

Geri Kazanılan Sular Hakkında Dikkat Edilecek Hususlar

- Çimento hidratasyonu izlenmelidir.
- Yoğunluk (taze su eklenmesiyle) azaltılmalıdır
- Kirlenmeye karşı önlem alınmalıdır
- Yağlar (tuzakla) tutulmalıdır
- Asit, deterjan ve tuzlardan uzak tutulmalıdır.
- Asılı maddeler (0.2 mm altı) sıklıkla karıştırılmalıdır
- İnce madde miktarı
- Klorür miktarı

Geri dönüşüm sularının da kimyasal içerik olarak tabloda verilen sınırları sağlaması gerekmektedir. Suyun kimyasal analizinin ilk ay içerisinde her hafta daha sonra ise her altı ayda bir yapılması gerekmektedir.

Geri Dönüşüm Suyu Kullanımında Dizayn

- Su geri dönüştürüldüğünde suyla birlikte gelen ilave agrega toplam agreganın%1'ini geçemez.
- Betonla ilgili özel durumlar olduğunda (öngermeli, hava sürüklemeli) etkiler göz önüne alınmalıdır.
- Geri dönüşüm suyunun miktarı mümkün olduğunca gün içerisindeki beton üretimine eşit bir şekilde dağıtılmalıdır.
- Suyun yoğunluğu ya otomatik olarak ya da gün içerisinde yoğunluğun en yüksek olacağı zamanda ölçülmelidir.

Tablo 1.6. TSEN 1008'e göre Suyun Kabul Edilebilirliği

Su Tipleri				
Su kabul edilebilir	←	Evet	1	İçilebilir su
Su reddedilir.	←	Evet	2	Kanalizasyon suyu
Ek A'ya bakılmalıdır.	←	Evet	3	Beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılmış su ve karışık su
6 no'lu kutuya gidilmelidir.	←	Evet	4	-Yeraltı kaynaklarından alınan su -Tabii yüzey suları ve endüstriyel atık sular
Sadece, içerisinde donatı veya gömülü metal bulunmayan betonda kullanılır.	←	Evet	5	Deniz suyu veya acı göl suyu
İlk muayene				
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	6	Sıvı ve katı yağlar: görünür izler.
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	7	Deterjanlar: kalıcı köpük
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	8	Renk: açık sarıdan daha koyu renk
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	9	Askıdaki madde: >4ml
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	10	Koku: içilebilir su kokusundan daha keskin koku
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	11	Asitler: pH<4
28 no'lu kutuya gidilmeli veya su reddedilmelidir.	←	Evet	12	Organik madde: sarımtırak kahverengiden daha koyu renk

Aynı zamanda madde 4'e bakılmalıdır.

6'dan 12 nolu'ya kadar olan kutular için Çizelge 1'e bakılmalıdır.

Yüksek fırın cürufu bulunması halinde Çizelge 1'in 5. satırına bakılmalıdır.

(Filtrasyon:0.45 µm gözenek açıklıklı membran filtre kullanılır ve daha sonraki deneyler filtreden geçen kısma uygulanır.)

Tablo 1.6.'nın devamı

Su kabul edilir.	←	Evet	13	Çözünmüş madde<100mg/l	Betonun klorür muhtevasının, EN 206-1'de Madde 5.2.7'den seçilen sınıf için belirlenmiş en büyük değeri geçmediğinin gösterilmesi halinde su kullanılabilir.
Betonda izin verilen en yüksek klorür seviyesinin geçilmesi halinde su reddedilir.	←	Evet	14	Klorür muhtevası Çizelge 2'de verilen seviyeyi geçiyor	
Su reddedilir.	←	Evet	15	Sülfat muhtevası>2000mg/l	Bu sınır aşılmışsa ve betonda alkali reaktif agrega kullanılma ihtimali varsa su, ancak zararlı alkali-silika reaksiyonlarını önleyici tedbirlerin alındığının gösterilebilmesi halinde kullanılabilir. CR 1901 sayılı CEN raporuna bakılmalıdır. NaCl miktarı suda ölçülen Cl miktarının NaCl olarak bulunduğu kabulüyle hesaplanır.
Betonda, alkali reaktif agregaların kullanılma ihtimali yoksa su kabul edilir.	←	Evet	16	Suyun eşdeğer sodyum oksit muhtevası>1500mg/l	
Su kabul edilir.	←	Evet	17	Çözünmüş madde- NaCl≤100mg/l	
Su kabul edilir.	←	Evet	18	Çözünmüş madde- NaCl- Na ₂ SO ₄ ≤100mg/l	Na ₂ SO ₄ ve Na ₂ CO ₃ miktarları, sülfatlar ve karbonatların sodyum tuzları olarak bulunduğu kabulüyle hesaplanır.
Su kabul edilir.	←	Evet	19	Çözünmüş madde- NaCl-Na ₂ SO ₄ - Na ₂ CO ₃ ≤100mg/l	

Tablo 1.6'nın devamı

Zararlı kirlenme					
28 no'lu kutuya gidilir.	←	a)	a) Priz süresi ve dayanım üzerindeki etki tayin edilir veya b) Nitel kimyasal analizler yapılır.	b) →	20. kademeye gidilir.
			20		Aşağıda verilenlere ait nitel deneyler yapılır: -Şekerler -Fosfatlar -Nitratlar -Kurşun -Çinko
Su kabul edilir.	←	Evet	21		Nitel deney sonuçlarına göre 20 no'lu kutuda verilen maddeler yok
28 no'lu kutuya ← gidilir.	a)		a)Priz süresi ve dayanım üzerindeki etki tayin edilir. veya b)Nicel (kantitatif) kimyasal analizler yapılır.	b) →	22 no'lu kutuya gidilir.
Su reddedilir.	←	Evet	22		Şekerler>100 mg/l
Su reddedilir.	←	Evet	23		Fosfatlar (P ₂ O ₅ olarak ifade edilen)>100 mg/l
Su reddedilir.	←	Evet	24		Nitratlar (NO ₃ olarak ifade edilen)>500 mg/l
Su reddedilir.	←	Evet	25		Kurşun (Pb ²⁺ olarak ifade edilen)>100mg/L
Su reddedilir.	←	Evet	26		Çinko (Zn ²⁺ olarak ifade edilen)>100mg/L

Tablo 1.6'nın devamı

Su kabul edilir.	←	Evet	27	Nicel deneyler kirlenmenin Çizelge 3'te verilen seviyenin altında kaldığını gösteriyor.		
Priz süresi ve dayanım						
Su reddedilir	←	Evet	28	Priz süresi Madde 4.4'te verilen şartları sağlamıyor.	Hayır	→ 29 no'lu kutuya gidilir.
Su reddedilir.	←	Evet	29	Dayanım Madde 4.4'te verilen şartları sağlamıyor.	Hayır	→ 30 no'lu kutuya gidilir.
			30	Numunenin 6 no'lu kutudan 12 no'lu kutuya kadar (6 no'lu ve 12 no'lu kutu dâhil) olan kutularda verilen deneylerden herhangi birinde yetersiz bulunması halinde "Kimyasal Deneyler" bölümüne gidilir ve 13 no'lu kutudan 19 no'lu kutuya kadar (13 no'lu ve 19 no'lu kutu dâhil) olan kutularda gösterilen deneyler uygulanır.		
Su kabul edilir.						

Betonda Karışım Suyunun Miktarını Etkileyen Faktörler

Betonda kullanılacak karışım suyunun miktarını tespitite genel olarak agreganın özellikleri, çimento özellikleri, iklim etkileri, katkı maddesi ve suyun kalitesi gibi birçok faktörün etkilerini görmek mümkündür (Owens, 1989).

Agregaların Etkileri

Başlıca agreganın özellikleri tane büyüklüğü, geometrik şekil ve su emmedir.

Tane Büyüklüğü (tane çapı):

Agregada ince malzeme miktarı arttıkça agregaların yüzey alanları artar. Yüzey alanı arttıkça agrega yüzeyini ıslatmak için gerekli duyulan su miktarı da artar. İnce agrega ile karışım suyu doğru orantılıdır. Tablo 1.7’de su/çimento oranı 0.55 alındığı durumda agrega tane büyüklüklerine bağlı olarak karışım suyunun miktarı görülmektedir (Owens, 1989; Şimşek, 2000).

Tablo 1.7. Agrega Büyüklüğünün Su İhtiyacına Etkisi

Maksimum Agrega Büyüklükleri (mm)		Tipik serbest su s/ç = 0.55 (1m³)
Nominal	ASTM E 11	
40	37.5	150
30	31.5	165
20	19	180
15	13.2	195
10	9.5	215

Tane şekli:

Agregaların tane şeklinin keskin köşeli, kübik, biçimsiz, yassı vb. gibi şekillerde olma olasılığı vardır. Bunlardan keskin köşeli olanların diğer yüzey şekilli agregalara göre su ihtiyacı fazladır. Agregaların su ihtiyacının artmaması için yuvarlak taneli yani yüzey alanı az olan agregalardan olması gerekmektedir (Özkul vd., 1999).

Özellikle ince agregaların şekillerinin bozuk olması betonda kuma ve ayrışmalara, kaba agregaların şekillerinin bozuk olması da betonun işlenebilirliğinin önemli derecede düşmesine neden olmaktadır (Cilason, 1980).

Agreganın absorpsiyonu (su emme):

Owens’a (1989) göre agreganın 100°C’de yüzeyinden çıkan su agreganın porozitesinin göstergesidir. Fakat betonun permeabilitesi ile karşılaştırılmamalıdır. Genellikle betonda kullanılan agregaların absorpsiyonu %3 kabul edilir. Bu da hafif agregaların yapının taşıyıcı olarak amaçlanmış kısımlarında kullanımını önler. Hafif agregaların eğilmede çekme dayanım kapasiteleri termal çatlamaya daha çok dayanıklılık gösterirler. Betonda yapay hafif agregaların daha ilerideki hidratasyon için su absorpsiyonu

yapması gereklidir. Hidratasyonu devam eden beton içinde agregaların rölatif nemi %80'den fazla olduğu halde suyu tutması önemli bir noktadır. Özellikle Portland çimentolarının hidratasyonunun çabukluğu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile uçucu külün daha yaygın şekilde kullanılması bunun önemini artırır. Agregaların absorbansının her %1'inin 15-18 l/m³ içsel suyu rezerve ettiği düşünüldüğünde, bunun beton için yararı anlaşılır.

Owens'a (1989) göre taze betonun çökme değerinde her 25 mm artış için su miktarı 5-15 l/m³ artar. Tipik olarak maksimum tane çapı 20 mm (3/4 inch) agregaların kullanıldığı betonlarda her 25 mm için 10 l/m³, daha büyük agregalar için daha az su gerekir.

İklim etkileri

Sıcaklık betona önemli derecede etkir. Beton karışımı sırasında 5°C'nin altında veya 27°C'nin üstünde çalışılmadıkça sıcaklık etkileri pek göz önüne alınmaz. Sıcaklığın her 10°C artması ile betondaki kimyasal reaksiyon hızı yaklaşık iki kat artar. Burada reaksiyon, ısıtmak, soğutmak veya beton katkısı kullanmak ile kontrol edilebilir. Özellikle 350 kg ve daha üzeri dozlu betonların karıştırma süresi sıcaktan etkilenir. Farklı sıcaklıklarda üretilen betonlarda kullanılan su, miktar olarak değişiklik gösterir. 2°C'de 20°C'dekinden 15 l/m³ daha azdır. Tersine sıcaklık 40°C'ye doğru artarken, su miktarı 40 l/m³ artar (Owens, 1989).

Çimento özelliklerinin etkileri

Çimentonun tazeliği:

Karışım suyu alkalinitesi çimento ile temastan sonra artar. Yeni üretilmiş taze çimento, üretimden sonra soğumuş ve nem çekmemiş durumdadır. Taze çimentonun reaksiyon hızı daha fazladır (Özkul vd., 1999).

Çimentonun inceliği ve tipi:

Çimento taneleri inceldikçe bunları ıslatacak su miktarı artar. Ayrıca çimento taneleri inceldikçe hidratasyon ısısı da artacağından bunu dengelemek içinde daha fazla suya ihtiyaç gerekir. Bu olumsuzlukların engellenebilmesi için çimentolarda, boyutları 90 mikrondan büyük tanelerin oranının %14'ten fazla olmaması istenir (Şimşek, 2000).

Çimento miktarından eksiltilerek yerine uçucu kül, cüruf, tras gibi katkıları katılarak üretilen çimentolar daha az suya ihtiyaç duyarlar. Ayrıca herhangi bir çimento çeşidinin ihtiyaç duyduğu su miktarı TS 24'te anlatılan deneylerle tespit edilmektedir (TS 24, 1985).

Çimento miktarı:

Beton yapımı için gerekli karışım suyu miktarı, doymuş agreganın yüzeysel nem suyu ve ilave olarak verilecek suyun toplamıdır. Su/çimento (s/ç) oranı betonun (katkılı veya katkısız) sınıfı ve karşı karşıya kalacağı dış etkilerin şiddeti ile ilişkilidir (TS 802, 2016).

Birçok beton için minimum su miktarı çimento miktarının (s/ç) %55'i kadardır. Çimento miktarı bu oranın üstünde veya altında olması durumunda betonun su ihtiyacı artar. Özellikle s/ç artarken veya çimento miktarı azaltıldığında su miktarı fazla gelir ve terleme görülür. Bunun nedeni agregalar arasındaki boşluklar çimento ile dolmaz ve suyu tutacak ince taneler daha az olduğu için sedimentasyon görülür. Tersine çimento miktarı s/ç 0.37'ye göre, her 30 kg/m³ çimento artışı için yaklaşık 10 litre su artar. Çünkü artan hidratasyon ısısını dengelemek ve çimentonun inceliği nedeniyle su ihtiyacını karşılamak gereklidir. Bu nedenle çekme, çatlama gibi uzun süreli hareketlere engel olmak için önerilmeli betonlarda maksimum çimento miktarı için sınır konulmuştur (Owens, 1989).

Katkıların etkileri

Katkı maddeleri kimyasal ve puzolan olarak iki grup altında betona katılırlar. Hazır betonlarda genellikle hava sürükleyici, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıları kullanılır. Katkı maddeleri beton üretim esnasında betonu iklim şartlarına göre ya da betonu döküm yerine kolay ulaştırmak için kullanılır (Beton Teknik, 2000).

Kimyasal ve süper akışkanlaştırıcılar:

Betonda akışkanlaştırıcı katkıların kullanım amacı su miktarının azaltılması veya betona akışkanlık kazandırmaktır. Betonun döküleceği bölge soğuk ve kış aylarında beton dökülmek isteniyorsa veya betonun erken dayanım kazanması isteniyorsa akışkanlaştırıcı katkıları kullanılır. Beton soğuk havada dökülürken hidratasyon sonucu ortaya çıkan ısıyla birlikte buharlaşacak su donma tehlikesiyle karşı karşıya kalır. Su miktarı azaltılıp akışkanlaştırıcı katılarak su ile çimentonun yapacağı reaksiyonlar normale çevrilir ve tehlike ortadan kaldırılabilir. Sıcak havalarda ise betondaki su hızlı bir şekilde

buharlaşmaktadır. Buharlaşma sonucunda ortaya çıkabilecek büzülmeleri önlemek için ise su azaltıcı ve betona uzun süre işlenebilirlik sağlayan akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır (Orchard, 1979).

Hava Sürükleyici Katkılar:

Hava sürükleyici katkıları ilk olarak 1930’larda geliştirilmiş olup genellikle betonun üretimi sırasında eklenmektedirler. Bu katkıları yüzey gerilmelerini azaltmakta, hava boşluklarının bir araya gelmesini önlemekte ve hava boşluklarını çimento ve agrega parçalarına sabitlemektedirler. Böylece küçük hava boşluklarının beton içinde kalmasını sağlamaktadırlar. Bu küçük boşlukların çapı 1 mm’den az olup çoğunlukla 0.01 mm ile 0.1 mm arasındadır. Hava sürükleyici katkıları dâhil olduğu kimyasal gruba “sümfaktant” denir. Moleküllerin bir ucu hidrofil(su isteyen) olup artı veya eksi elektrik yükü taşıırken diğeri ucu suyla karışmaz ve hidrofobiktir. Hava boşluklarının etrafında su iten (repel) bir film oluştururlar. Değişik hammaddelerin bir araya gelmesiyle bu katkıları oluşmaktadır. Başlıca hammaddeleri ise: ağaç reçinesi tuzları (çam kütüklerinden), sentetik deterjan (petrol fraksiyonunda), linyosülfonatlar (kağıt endüstrisinden), asitli tuzlar (petrol arıtmadan), proteinli tuzlar (hayvan derisinden), yağlı ve reçineli tuzlar (kağıt endüstrisi, hayvan derisinden), sülfonatlı hidrokarbon tuzlarıdır (petrol rafinesinden) (Kevorkian, 2006).

Priz hızlandırıcılar:

Bütün döşemelerde olduğu gibi kışın geç sertleşmeyi önlemek için kullanılan bu katkı maddeleri hızlı bir şekilde taze betondaki suyun buharlaşmasına neden olur. Döşeme hacmi içinde, yüzey sertleştirici tabakaya göre daha hızlı sertleşmeye yol açtıklarından sertleştirici tabakanın ayrılıp kopmasına neden olurlar. Bunun için kullanılması tavsiye edilmez (Beton Teknik, 2000).

Priz geciktiriciler:

Bu katkı maddeleri döşeme yüzey işleminin tamamlanmasına ve özellikle kontrol edilemeyen rötire çatlaklarının ortaya çıkmasından önce derzlerin kesilmesine imkân vermek üzere kullanılır. Özellikle sıcak havalarda taze betonun yüzey kısmında suyun hızlı buharlaşmasını önlerler (Beton Teknik, 2000).

Suyun kalitesi

Beton suyunda bulunabilecek fazla miktarda organik madde beton içerisine hava sürüklemekte ve beton basınç dayanımını düşürmektedir. Özellikle yosunlu sularla yapılmış beton içerisine %8 civarında hava sürüklendiği buna bağlı olarak 28 günlük basınç dayanımlarında %30'a yakın azalmalar olduğu belirlenmiştir (Erdoğan, 1995).

Beton Bakım Suyu

Hazırlanan taze betonun kalıplara yerleştirilmesinden sonra beton içerisindeki suyun çimento ile kimyasal reaksiyonlara devam edebilmesine olanak sağlamak amacıyla, bu suyun hava sıcaklığı ve rüzgâr gibi etkenler nedeniyle buharlaşarak azalmasını önlemek gerekmektedir. Hidratasyon için gerekli suyun buharlaşarak kaybolması çimento reaksiyonlarının tam olarak oluşamamasına ve betondan beklenen gerekli mekanik özelliklerin elde edilmemesine yol açmaktadır. Betonun bakımı, özellikle taze beton reaksiyonlarının daha hızlı yer aldığı ilk saatlerde ve ilk günlerde çok büyük önem taşımaktadır (Erdoğan, 1995).

Bakım suyunun amacı dökülen taze betonun içindeki suyun çok çabuk buharlaşmasını önlemek içindir. Bu buharlaşmanın hızı, dış ortam sıcaklığına, bağıl neme, güneş ışığı vuran saat sayısına ve bulunulan yerin havalandırılmasına veya açık havada bulunulması halinde rüzgâr hızına bağlıdır (Beton Teknik, 2000).

Priz aldıktan sonra betonun yüzeydeki sıcaklığı, bakım amacıyla dışarıdan uygulanan sudan da etkilenecektir. Bu suyun buharlaşması halinde beton ısı kaybedecektir. İlaveten bakım suyu soğuk ise beton ısı transferi yolu ile soğuyacaktır. Sıcak iklimlerde bu yararlı olabilir. Diğer taraftan, hava sıcaklığı düşüyorsa ve don olasılığı varsa soğuk su ile bakım tehlikeli olabilir. Genelde su ile bakım çok erken başlamalı, sürekli ve uzun süreli olmalıdır. Beton eleman yüzeyinin bakım suyu ile soğutulması konusunda yüzey ile iç kısımlar arasında olabilecek sıcaklık farkına dikkat edilmelidir. Eğer sıcaklık farkı fazla olursa ısıl gerilmeler artar ve çatlaklar oluşabilir (Yeğinboğalı, 2001).

Betonun bakımı ve korunması (kürü) bakım suyunun yanında farklı fiziksel ve kimyasal işlemlerle de yapılabilir. En çok kullanılan metot normalde bir solvent içindeki sentetik reçinelerden meydana gelen bir bileşiğin püskürtülmesidir. Bazen renkli yüzeylere uygulanan işlem ürünlerinin kendileri de renkli olur. Ruloyla uygulandıklarında yüzeydeki çukurlar doldurularak çok iyi bir son görünüm veren balmumu esaslı işlem

ürünleri de bulunmaktadır Döşemenin üzerine bir beton kaplama uygulanacak ise, kaplamanın yapışmasına engel olacağından buharlaşmayı önleyici bir film püskürtülmemeli. Böyle durumlarda yaklaşık bir hafta boyunca üzerine düzenli olarak su püskürtülen bir polietilen örtü ile kaplanabilir. Bazı belli uygulamalarda betonun kurumasını bekleme ihtiyacını ortadan kaldıran epoksi esaslı bir kaplamanın kullanılması avantajlı olabilir. Böyle durumlarda son işlem görmüş ıslak betona tatbik edilen bir su/epoksi emülsiyonu, hem kür maddesi hem de ondan sonra uygulanacak bir kaplamanın yerini tutabilir (Beton Teknik, 2000; Şimşek, 2001).

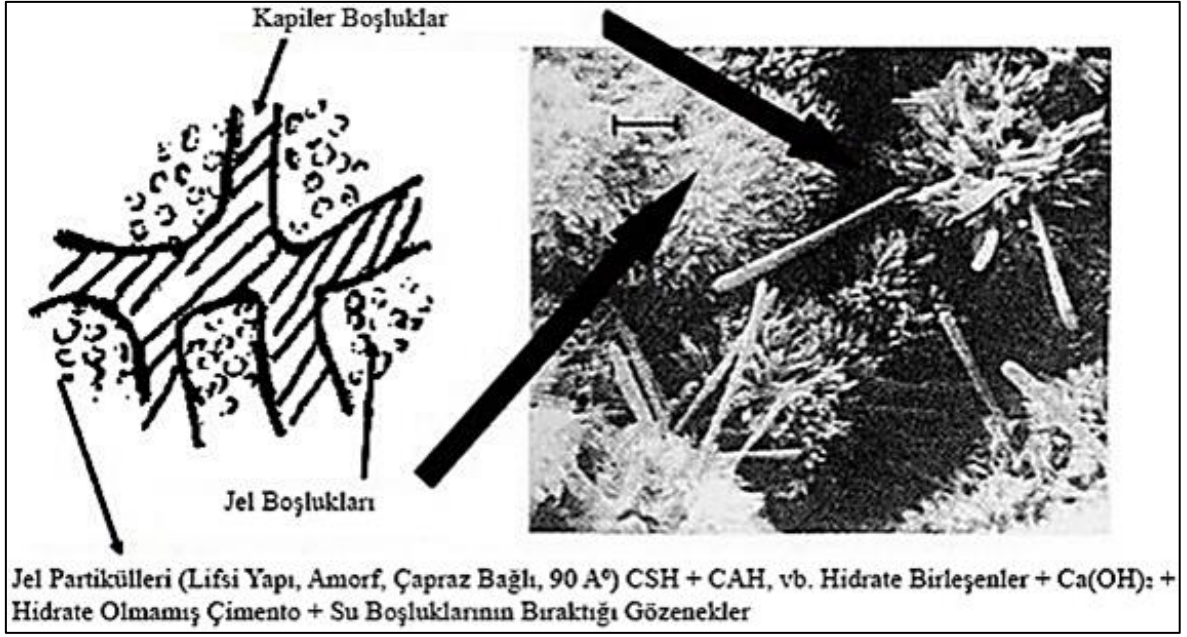
Agrega Yıkama Suyu

Yıkama suyu beton yapımında kullanılan agregaların kil, silt, tuz ve organik maddelerden temizlenmesi için kullanılan sudur. Bu maddeler, karışım hesabında hesaplanan suyun bir kısmının emilmesine, su/çimento oranının düşmesine, en önemlisi çimento hamuru ile agregaların arasındaki aderansı zayıflatmasına, bunlara bağlı olarak betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olurlar. Yıkama işlemi genellikle agregacı ocaklarında yapılır (Erdoğan, 2007).

1.2.2. Betonun İç Yapısı

1.2.2.1. Mikro (Jel) Boşlukları

Jel boşluklarının boyutu çok küçük olduğu için, bu boşluklar da bulunan su molekülleri komşu katı yüzeylere çekim kuvvetleri ile sıkıca bağlıdırlar ve bu durumda sıfır derecenin çok altındaki sıcaklıklarda dahi kristalleşip donmazlar ve betona zarar vermezler (URL-5, 2019).



Şekil 1.9. Mikroskopik ortamda betonun iç yapısı

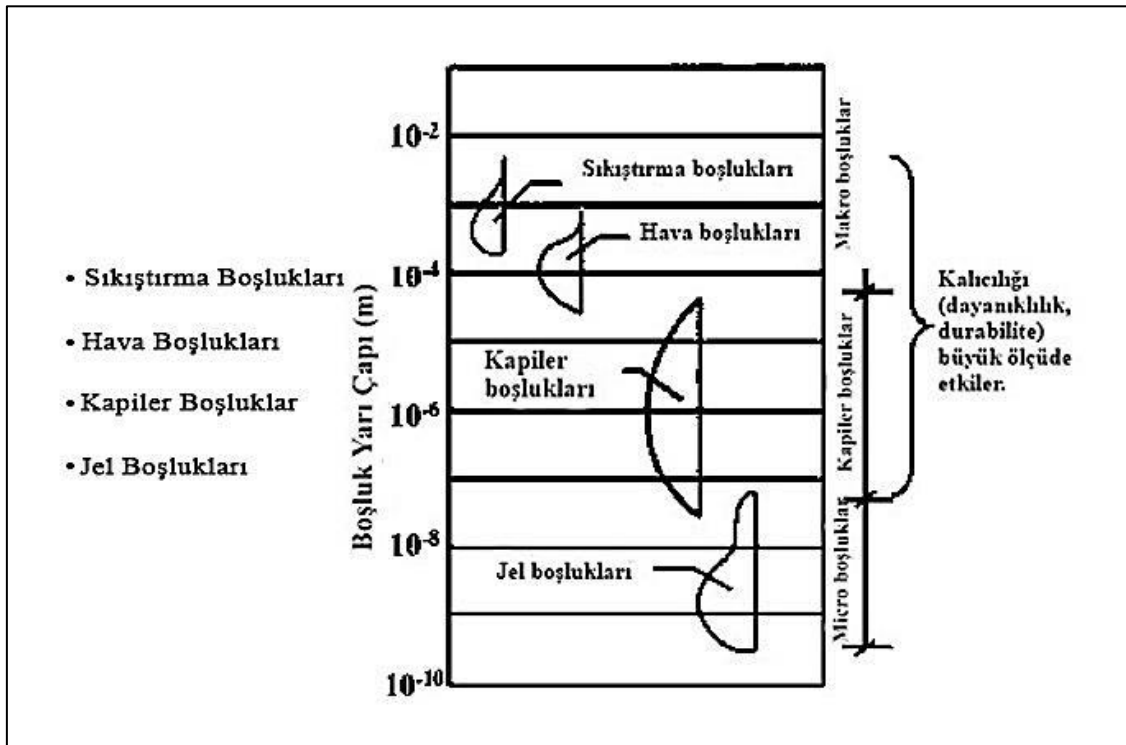
Araştırmalar çimento hamurunun don direncinin su/çimento oranına ve çeşitli katkı maddeleri ile beton içerisine sürüklenen hava miktarına bağlı olduğunu göstermiştir. Hava sürükleyici katkı maddeleri sayesinde beton içerisindeki hacminin %4-6'sı oranında küçük kapalı baloncuklar şeklinde dağınık hava boşlukları oluşturularak, hem malzeme daha elastiki yapılı hem de buz basınçlarına karşı dayanımı artar. Bunun yanı sıra boşluklar da kılcal kanalları kesecekleri için kılcal su emme azalacaktır. Bu durum suyun beton dışına uzaklaştırılmasına ve hidrostatik basınçların azalmasına olanak sağlayacaktır. Bu gelişmelerin ışığında soğuk iklim şartlarına maruz kalabilecek betonların dökümünde hava sürükleyici katkı kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Su/çimento oranı ise çimento hamurundaki boşlukların şeklini, miktarını ve çaplarını önemli derecede etkiler (URL-5, 2019).

1.2.2.2. Kılcal Boşluklar

Bir malzemenin kılcallık özelliğini belirleyebilmek için öncelikle kuru ağırlığı tartılır, daha sonra alt yüzeyi suya temas edecek şekilde su dolu bir kabın içerisine yerleştirilir. Emilen su miktarının bulunabilmesi için belirli zaman aralıklarında ağırlık ölçümleri tekrarlanır.

Kılcal emme, suyun ıslak yüzeyli küçük boşluklar tarafından yüzey gerilmesinden dolayı çekilmesidir. Betondaki boşluklar ne kadar küçük olursa daha yüksek kılcal-emme basıncına maruz kalır. Ancak, bu etki geçirgenliğin az olması nedeniyle dengelenir.

Kılcal emme süreci en iyi şekilde görülmek istenirse, beton numunesinin tuzlu su bulunan bir tepside ve nemsiz bir odada bir kaç ay bekletilmesi yeterlidir. Tuzlu su çözeltisi bu süreçte beton tarafından yukarı doğru çekilecektir. Bu emme, korumasız dış yüzeye kadar devam edecek ve buharlaşma meydana gelecektir. Bunlar meydana gelirken yüzeye yakın boşluklar buharlaşma ile birlikte kristalize tuz ile dolar. Boşluklarda bulunan tuz betonun parçalanması için gerekli basıncı oluşturmuş olur. Tuzun kristalizasyonu sonucu oluşan bu hasar mekanizması en çok az yağışlı iklimlerde görülür (URL-6,2019).



Şekil 1.10. Beton içerisindeki boşluk çapları ve dağılımları

1.2.3. Betonun Geçirirnililiği

Betonun hava koşullarına, kimyasal etkilere, aşınmalara ve diğeri bozunmalara karşı gösterdiği dirence durabilite denir (Tullmin, 2000).

Betonun geçirirnililiği, durabilite için çok büyük önem arz etmektedir. Geçirirnil bir betonda durabiliteden bahsedilemez. Suyun ve su içerisindeki zararlı kimyasal maddelerin beton içerisinde hareket edebilmelerine geçirirnililik denir. Beton içerisindeki boşluğun cinsi, büyüklüğü, dağılımı ve mikro ve makro çatlaklar suyun beton içerisindeki hareketi için çok önemlidir. Bundan dolayı beton içerisindeki boşluk ve çatlakları minimum seviyede tutmak betonun durabilitesi için hayati önem arz etmektedir. Bu boşluk ve çatlaklar arasındaki gaz ve su hareketleriyle taşınan zararlı kimyasallar durabilite için büyük tehdit oluşturmaktadır. Çimentonun kimyasal yapısı ve beton içerisindeki agregaların özellikleri, boşlukların ve çatlakların oluşmasında etkilidirler (Mays, 1991)

Betonun geçirirnil olmasından dolayı beton birçok sorunla karşı karşıya kalmaktadır. Sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu, korozyon, donma ve yangın dayanımına karşı betonun direnç gösterememesi bu sorunların başlıcalarındandır. Sülfat iyonlarının sertleşmiş beton içerisindeki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda etrenjit ve alçı taşı oluşması olayına sülfat etkisi denir. Betonların sülfatlı ortamlardaki koroziif etkiden etkilenmeleri iki türlü gerçekleşir. Birinci etki çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan hidrat kirecin sülfat anyonları ile reaksiyona girmesiyle alçı taşının oluşmasıdır. Katyon türüne bağılı olarak alçı taşının sülfat tuzu ile birlikte oluşturduğu reaksiyon ürünü, suda eriyen (NaOH) veya suda erimeyen $Mg(OH)_2$ olmak üzere iki türde olmaktadır. Alçı taşının veya suda eriyik şekilde bulunan kalsiyum sülfatın C_3A ile tepkimesi sonucu sülfatın asıl önemli etkisi ortaya çıkmaktadır. Etrenjitin büyük hacim artışına sebep olmasının nedeni içerdiği kristal suyun fazla olmasıdır. Katı halde bulunan tuzun kristalleşmesi sonucu beton boşluk çeperlerinde büyük basınç gerilmeleri oluşur, önce çatlamlar şeklinde oluşan hasar, betonun yaşı ilerledikçe ayrışmaya ve parçalanmalara dönüşmektedir.

Beton içerisindeki agregaların içerdiği reaktif bileşenler ile dış kaynaklardan gelen alkali hidroksitle veya betonda kullanılan çimentoyla arasında meydana gelen kimyasal reaksiyona alkali agrega reaksiyonu denir. Alkali agrega reaksiyonu üç farklı şekilde oluşabilmektedir: Alkali-karbonat reaksiyonu (AKR), alkali-silikat reaksiyonu (yavaş ilerleyen alkali silika reaksiyonu) ve alkali-silika reaksiyonu. Betonda kullanılan agrega

dolomit ve/veya kil mineralli ve ince taneli kireçtaşı içeriyorsa alkali karbonat reaksiyonu (AKR) ortaya çıkmaktadır. Fillosilikat grubu minerallerden oluşan agregayla imal edilen betonlarda ise alkali silikat reaksiyonu görülebilmektedir (Mays, 1991). Metalik malzemelerin katı, sıvı ve gazlar tarafından aşındırılması sonucu özelliklerini kaybetmesi ve kullanılamaz hale gelmesine korozyon denir. Metal ve alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bundan dolayı da metaller içinde bulundukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşip bileşik haline dönmeye çalışmaktadırlar. Yani kimyasal değişime uğrayarak bozunurlar. Sonuç olarak metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özellikleri istenmeyen değişikliklere uğrayarak zarar görmektedir. Metal veya alaşımın bozunma reaksiyonuna da bu reaksiyonun sebep olduğu zarara da korozyon adı verilmektedir. İçinde bulundukları ortamla tepkimeye giren metalik malzemelerin dışarıdan enerji vermeye gerek kalmadan Metalik malzemelerin dışarıdan enerji vermeye gerek kalmadan içinde bulundukları ortamla tepkimeye girmeleri ile doğal olarak gerçekleşen bu olaya korozyon denir.

Betonarme Yapı Üzerinde Bozunma Mekanizmaları

Betonun durabilitesi, kalitesine bağlı olup, performansta ise bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kürü gibi süreçler ile çevre koşulları da etkili olmaktadır. Betonun bakımı uygun bir şekilde yapılmazsa dayanımı yaklaşık %30 düşebilir. Bu durumdan durabilite daha da olumsuz etkilenmektedir. Eğer betonun kürü yapılmamışsa geçirimsizliği yaklaşık olarak 10 kat artabilmekte, bu da korozyonu negatif yönde etkilemektedir. Bunun sonucunda da betonun durabilitesi ciddi şekilde zarar görmektedir. Amaca uygun malzeme seçilip, su da dâhil bütün bileşenler standartlara uygun olacak şekilde karışım iyi tasarlanır ve taze betonun en iyi şekilde yerine yerleştirilmesi sağlanırsa, özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılıp, beton iyi korunur ve gereken bakım da aksatılmadan yapılırsa uygun durabilite sağlanmış olur. Tüm bunlar yapıldığı takdirde betonda meydana gelebilecek oturma çatlaklarının, plastik rötre çatlaklarının ve kısıtlanmış rötre çatlaklarının engellenmesi sağlanır. Betonun durabilitesi açısından bu çatlakların engellenmesi çok önemlidir (Mays, 1991). Kılcal su emme, yavaş ve hızlı klor geçirimsizliği gibi deneylerin yapılış amacı betonun kullanılacağı yerdeki çevresel koşullara göre geçirimsizliğini tespit etmektir (Mays, 1991).

1.2.4. Beton Dayanımını Etkileyen Faktörler

Betonun üzerine gelen yüklerin neden olabileceği şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı maksimum seviyede direnç göstermesine beton dayanımı denir.

Betonun üzerine değişik yönlerde yükler uygulanması sonucunda değişik etkiler ortaya çıkabilmektedir. Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti, sırasıyla, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Yorulma dayanımı ise betonun tekrarlayan yükler altındaki şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Betonda dayanımdan söz edildiğinde, diğer dayanımlar belirtilememişse, basınç dayanımı anlaşılmalıdır. Bunun sebebi de betonun basınç yükleri altında daha iyi davranış göstermesidir (Erdoğan, 2007; Özkul, 1999).

Bir yapı tasarlanırken o yapıda kullanılacak betonun basınç dayanımı önemli bir ölçüttür. Yapı elemanlarının taşıma gücü ve kesit alanları bu ölçüte göre belirlenmektedir. Betonarme yapılarda taşıma gücünü etkileyen temel unsur betonun basınç dayanımıdır. Ayrıca basınç dayanımı betonun nitelik denetiminde evrensel bir büyüklük olarak kullanılmaktadır. Basınç dayanımının betonun çoğu özelliğiyle doğru orantılı olması, betonun basınç dayanımı deneyinin diğer dayanım deneylerine göre daha kolay yapılabilmesi, beton sınıfları oluşturulurken basınç dayanımının temel alınması vb. nedenlerden ötürü beton dayanımları arasındaki en önemli olan dayanım basınç dayanımıdır (Başka, 2006).

Beton oluşumu sırasında çimento ve su bir araya geldiğinde her ana bileşen su ile ayrı ayrı tepkimeye girmektedir. Bu ana bileşenlerden her birinin tepkime hızı tepkime sırasında açığa çıkan ısı ve tepkime sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcılığına katkısı farklı olabilmektedir. Çimentonun ana bileşenlerinin su ile bir araya gelerek başlattığı kimyasal tepkimeler ısı açığa çıkarırlar. Bu tepkimeler devam ettiği sürece ısı da açığa çıkmaya devam edecektir. Betonun ilk yaşlarındaki hidrasyon hızı yüksek olsa da zaman ilerledikçe hidrasyon hızı yavaşlamaktadır (Erdoğan, 2007).

C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidrasyonu sonucu ortaya çıkan C-S-H jellerinin miktarı çimento hamurunun dayanımını doğrudan etkiler. Buradan hareketle, C-S-H jellerinin tümünün bir anda meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Hidrasyon olayı devam ettiği sürece, C-S-H jellerinin üretimi de devam edecek ve çimento hamurunun dayanımı

da artacaktır. C_3S ana bileşenlerinin çimentonun ilk zamanlarındaki dayanım artışına katkısının daha fazla olmasının nedeni çimentonun hidratasyonunda C_3S ana bileşenlerinin hidratasyonunun C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonundan daha hızlı yer almasından kaynaklanmaktadır (Özkul vd., 1999).

1.2.4.1. Çimento Miktarının Dayanıma Etkisi

Çimento, belirlenen karışım oranlarında su ile bir araya gelerek agregaları birbirine bağlayan çimento hamurunun oluşmasını sağlayan bir malzemedir. Çimento, su ve havadan oluşan bağlayıcı hamurun agrega ile birleşmesi sonucunda beton kütlesi ortaya çıkmaktadır (İstanbuluoğlu, 1987).

Beton kütlesindeki agrega taneciklerinin yeterli sağlamlıkta (dayanımda) oldukları varsayılırsa, bağlayıcı hamurun agrega tanecikleri arasındaki boşlukları doldurucu yeterlilikte ve sağlamlıkta olmasının betonun dayanımı üzerindeki etkisi ortaya çıkar. Nitekim basınç altındaki beton kütlesi en zayıf yeri olan bağlayıcı hamurundan kırılmaktadır ki, bağlayıcı hamurun güçlendirilmesi doğrudan betonun güçlendirilmesidir. Bağlayıcı hamurun yeterliliğinin ve sağlamlığının diğer faktörlerin yanı sıra önemli ölçüde içindeki çimento miktarına bağlı olduğu bilindiğine göre, belli bir kritik değere kadar betonun içerisinde çimento miktarı arttıkça betonun dayanımı da artacaktır (İstanbuluoğlu, 1987).

1.2.4.2. Çimento Kalitesi ve Türünün Dayanıma Etkisi

Genel olarak bir tanım yapılmak istenirse karışım içerisinde su ile birleştiğinde bağlayıcı hamur oluşturarak agregaları birbirine bağlayan malzemeye çimento denir. Bu genel tanımlama içerisinde farklı türden çimentolar bulunmaktadır. Portland çimentoları bunlar arasında en yaygın kullanılanıdır.

Portland çimento klinkerinin, alçı taşı ve istenmesi halinde %10'a kadar herhangi bir doğal ya da yapay puzolanik madde ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcıya portland çimentosu denir. Kireç taşı, silisli kum ve kilin belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi ve en az sinterlemeye kadar pişirilmesiyle de portland çimento klinkeri meydana gelmektedir. Kendi başlarına herhangi bir bağlayıcılığı bulunmayan fakat ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle

tepkimeye girerek bağlayıcı özellik kazanan doğal ve yapay maddelere puzolanik madde denir.

Yüksek fırın cürufu, uçucu küller, tras, asit nitelikli riyolit, trakit ve tüfleri, asit nitelikli bazaltlar, ince silis kumları, pomza ve perlitler puzolanik maddelere örnek olarak verilebilir.

Çimentonun yaşı (taze ya da bayat oluşu), nemlenme durumu ve kirliliği gibi niteliğini değiştiren öteki etmenlerin beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi yaygın olarak bilinmektedir (İstanbuluoğlu, 1987; Türkiye Jeoloji Bilimsel ve Teknik Kurultayı Kitabı, 1983).

1.2.4.3. Su/Çimento Oranının (Kıvamın) Dayanıma Etkisi

Yoğurma suyunun karışım içerisindeki çimentoya oranı (s/ç oranı) betonun dayanımına etki eden en önemli faktörlerdendir (İstanbuluoğlu, 1987).

Karışım içerisine eklenen beton yoğurma suyunun iki temel görevi bulunmaktadır:

- Yoğurma suyunun çimento ile tepkimeye girerek bağlayıcı hamuru oluşturması betonun mukavemeti açısından önemli olan görevidir. Oluşan bağlayıcı hamuru çimentonun priz almasını (hidratasyon) ve sertleşmesini sağlamaktadır. Bağlayıcı hamur oluşturulabilmesi için gerekli olan yoğurma suyu miktarı literatürde çimento ağırlığının 0.08 ile 0.22'si arasında belirlenmiştir (İstanbuluoğlu, 1987; Akbulak vd, 1967).
- Betonun akıcılığı ve işlenebilirliği üzerindeki görevi ise agrega ve çimento taneciklerini ıslanmasını sağlayarak betona belirli bir kıvam kazandırmaktır. Bu görev için gerekli yoğurma suyu miktarı ise, çimento ağırlığının 0.30 ile 1.50'si arasında değişmektedir.

Literatürde belirlenen rakamlardan da anlaşılacağı üzere tanecikleri ıslatmak için gereken su miktarı bağlayıcı hamur oluşturmak için gereken su miktarından çok fazladır. Görüldüğü üzere beton yoğurma suyu belirlenirken taze betonun akıcılığı esas alınmaktadır.

Çimento priz (hidratasyonundan) aldıktan sonra taze betonda akıcılığı sağlamak için konulan su zamanla buharlaşıp ayrılarak betonda boşluklar oluşturur. Oluşan bu boşluklardan dolayı beton dayanım kaybına uğramaktadır. Başka bir şekilde ifade edilecek

olursa betona hidrasyon için gerekli olan suyun dışında fazladan katılan su miktarı her ne kadar akıcılığı artırıyor olsa basınç dayanımını düşürmektedir (Postacıoğlu, 1969).

1.2.4.4. Agreganın Granülometrisinin ve En Büyük Agreganın Dayanıma Etkisi

Bağlayıcı hamurun niteliği elde edilmek istenen basınç dayanımının sağlanabilmesi için en önemli faktörlerdendir. İstenilen dayanım en ekonomik şekilde elde etmek istenirse bağlayıcı hamur azaltılarak yerine daha fazla agreganın kullanılması gerekmektedir. Ancak yeterli akıcılığın da sağlanabilmesi bağlayıcı hamur miktarının artırılmasına bağlıdır. Bağlayıcı hamur, agreganın boşluklarını doldurmanın yanı sıra agreganın taneciklerinin etrafını ince bir tabaka halinde sararak onların fazla grift olmamasını sağlamaktadır. Bu da homojen bir yapı oluşmasına imkân sağlayacaktır.

Bağlayıcı hamurun miktarında agreganın boşlukları ve agreganın yüzeyleri olmak üzere iki belirleyici unsur bulunmaktadır. Bunlardan birini önemseyip, ötekini ihmal etmemek gerekir. İdeal bir granülometrinin olabildiği kadar az boşluklu ve mümkün olduğu kadar az toplam tanecik yüzeyli olması gerekmektedir. En az toplam tanecik yüzeyinin sağlanabilmesi için agreganın içindeki maksimum tanecik çapının (betonda istenilen şartların sınırları içinde) en büyük alınması ve diğer agreganın çaplarının da buna bağımlı olarak büyümesinin sağlanması gereklidir. Büyük taneciklerin aralarındaki boşlukların sürekli daha küçük taneciklerle doldurulabileceği bir agreganın granülometrisi düzenlemesi yapıldığı takdirde minimum boşluklu agreganın elde edilmiş olur.

Agregaların granülometri ve maksimum tane büyüklüğü dışında, beton basınç dayanımını etkileyen başka özellikleri de vardır:

- Betonda kullanılacak agregalar nem ve sıcaklık etkisinden dolayı hacim değişikliği gösterirse bu durum agregalarda önemli derecede genişleme ve büzölmelere yol açar. Bunun sonucunda beton çatlayarak basınç dayanımını düşürmektedir. Agregaların don direncinin yüksek olması su emme kabiliyetlerinin düşük olmasına bağlıdır.
- Agreganın yüzeyi yapısı, temizliği ve kimyasal dayanıklılığı agregaların beton içinde bağlanma özelliklerini, dolayısıyla betonun basınç dayanımını da etkilemektedir. Yüzeye dik çıkıntılar sayesinde karışımın agregaya daha iyi bir şekilde bağlanması sağlanmaktadır.

- Betonun sertleşmesi esnasında agreganın hacim değişikliği yapabilecek bir kimyasal tepkimeye girmemesi gerekir. Suda kolay çözünen mineralleri kapsayan agregalar, oksidasyon ve hidratasyona eğilimli mineralleri kapsayan agregalar, alkaliyle reaksiyona giren agregalar, portland çimentosu ile reaksiyona giren agregalar beton basınç dayanımının düşmesine neden olurlar.
- İçerisinde kil, silt, mika, humus, tahta parçaları ve diğer organik maddeler, kimyasal tuzlar, yumuşak elemanları kapsayan agregalar beton basınç dayanımının düşmesine neden olurlar. Granül kalker ile yapılan deneylerde, altere olmuş ve bir miktar kil kapsayan kalkerin kırılmasıyla yapılan agregaların, 7 günlük beton basınç dayanımlarında yaklaşık yüzde yirmi oranında düşmeye neden olduğu saptanmıştır.
- Agregada tanecikleri geometrik şeklinin beton dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. İnce uzun agregada tanecikleri (eni boyunun beşte birinden küçük olanlar) kolay kırılmalarından dolayı beton dayanımının düşmesine sebep olurlar. Bu nedenle agregada yüzde on beş oranından fazla ince uzun parçacıkların olması istenmemektedir. Kırılarak hazırlanan agregalarda ise ince ve sivri uçların bulunmaması tercih edilmektedir (İstanbuluoğlu, 1987).

1.2.4.5. Kompositenin Dayanıma Etkisi

Taze betondaki katı maddelerin haciminin birim hacme oranına kompozite denilmektedir. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse; içerisindeki gözenekleri az olan beton kompozitesi yüksek betondur. Taze betonun kompozitesi yüksek olduğu takdirde basınç dayanımı ve sızdırmazlığı da yüksek olmaktadır (İstanbuluoğlu, 1987).

1.2.4.6. Katkı Maddelerinin Dayanıma Etkisi

Su, agregada ve çimento dışında betonun döküleceği ortama ve koşullara bağlı olarak betona çok düşük miktarlarda eklenen organik ve inorganik kimyasal maddelere katkı maddeleri denilmektedir. Betonun üretimi esnasında veya üretildikten sonra çimentonun özelliklerini olumlu yönde ve belli bir ölçüde değiştirmek amacıyla kullanılırlar. Katıldığı takdirde taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirmektedirler (Beton Katkı Bülteni, 1999).

Katkı maddeleri mineral ve kimyasal olmak üzere iki ayrılır. Kimyasal katkıların kullanım amacı; betonun akışkanlığını artırmak, erken ve yüksek dayanıma ulaştırmak,

geçirimsizliği ve donda dayanımı sağlamaktır. Bunun yanında isteğe göre priz sürelerinin değişebilmesine olanak sağlar. Akışkanlaştırıcılar, uygulamada su/çimento oranını azaltarak dayanımı artırmayı, kütle betonlarında hidrasyon ısını düşürebilmek için çimento miktarının azaltılmasını veya aynı işlenebilirliği sağlamayı ve kolay yerleşmeye imkân vermek için kullanılırlar.

Günümüzde beton sektöründe birçok farklı katkı maddesi mevcuttur. Bu katkı maddeleri sektörün işlerini büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle beton katkıları, beton bileşenleri arasında büyük öneme sahiptir.

1.2.4.7. Sıcaklığın Dayanıma Etkisi

Bakım yapılan ortamdaki sıcaklık azaldığı takdirde, taze beton içerisindeki çimentonun kimyasal tepkimelerini yavaşlatarak bağlayıcı hamurun sertleşme zamanını uzatmaktadır. Bu nedenle betonun yeterli dayanıma ulaşması için gereken zaman normal sıcaklık ortamındaki zamana göre daha fazladır. Ayrıca, sıcaklık 0°C'ın altına düşmesi durumunda taze beton içindeki su donarak betonda önemli ölçülerde hacim genişlemesine neden olur. Bununla birlikte betonda çatlaklar ve bozulmalar meydana gelmektedir (İstanbuluoğlu, 1987).

Kür ortamında sıcaklık çok yüksek olursa, bu defa da taze beton içindeki kimyasal tepkimelerin, dolayısıyla da betonun sertleşme hızı artacaktır ve bu durum betonun ani priz yapmasına neden olacaktır. Ayrıca, beton yapısı gereği zamanla dayanım kazanmaktadır. Sıcaklığın fazla olması durumunda taze beton içerisindeki su hızla buharlaşacağı için çimentonun tam hidrasyonunu sağlayacak su kalmayacaktır. Yine sıcak bir ortamda sertleşmekte olan betonda, ortamın değişip soğuması halinde termal büzülme ve yüzeyde çatlaklar meydana gelecektir ki bu durum da dayanımın düşmesine neden olan bir diğer etkidir (İstanbuluoğlu, 1987).

1.2.4.8. Nemin Dayanıma Etkisi

Taze beton ilk tasarlandığı zamanki su miktarı, çimentonun hidrasyonu için gerekli olan su miktarından daha fazladır. Bu suyun, hidrasyonun devam ettiği ilk evrelerde buharlaşmadan dolayı veya başka nedenlerle önemli ölçüde azalması, ya da tam hidrasyonun gecikmesine ya da daha kötüsü hidrasyonun durmasına neden olacaktır. Bu durum agrega tanecikleri arasındaki bağlayıcı hamur tam sertleşmeyeceği için betonun

dayanımının düşmesine neden olacaktır. Bundan dolayı, betonun sertleşme süreci esnasında, tam hidrasyon için gerekli suyun kaybına engel olunması ya da olabilecek su kayıplarının yerinin doldurulması gerekmektedir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılmakta olan yöntemlerden bazıları şunlardır: Betona su püskürtülmesi; beton yüzeylerine toprak, kum, ıslak çuval vs. örtülmesi veya kalıpların geç sökülerek su kaybının önlenmesi; betona su buharı ile kür yapılması, kür maddeleri ile kür yapılması gibi (İstanbuluoğlu, 1987).

Nem eksikliğinden dolayı rötre olayı da artmaktadır. Betonun yeni hazırlandığı andaki bağlayıcı hamurun hacmi sertleştikten sonraki hacimden daha büyük olmaktadır. Bu hacim değişikliği nedeniyle sertleşmekte olan betonda bir büzülme meydana gelir, çatlaklar oluşur ve bu olaya rötre adı verilmektedir. Rötre değerinin büyüklüğünü etkileyen birçok faktör olsa da bu faktörlerden en önemlisi kür ortamındaki nem miktarıdır. Kür ortamında nem azalırsa rötre değeri artar. Bunun sonucunda da betondaki çatlaklar büyümekte ve dayanım düşmektedir (İstanbuluoğlu, 1987).

1.2.4.9. Betonun Karılması, Taşınması ve Yerleştirme Sıkıştırma Özelliklerinin Dayanıma Etkisi

Beton yapımına uygun malzemelerin uygun oranlarda bir araya getirilerek karılmaları işlemindeki süre gerekenden çok kısa veya çok uzun olmamalı, üretilen taze betonda segregasyon yer almamalı ve üniform bir beton elde edilmelidir. Betonun çok kısa süre karılması durumunda malzemelerin üniform dağılımı sağlanamayacaktır. Karılma süresi çok uzun tutulduğu takdirde hem beton karışım sıcaklığının yükseleceği, hem de iri agregalarda kırılmalar ufalanmalar meydana geleceği bilinmektedir. Agregalardaki ufalanmalar sonucunda, istenilen kıvamı elde edebilmek için daha çok suya ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak su miktarının artırılması durumunda su/çimento oranı yükselerek, beton dayanımının düşmesine yol açmaktadır (Erdoğan, 2007).

Taze betonun taşınması ve yerleştirilmesi sırasındaki işlemlerin segregasyona neden olmayacak ve betonun üniformitesini bozmayacak tarzda yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde, beton kesitindeki farklı bölgeler farklı özellikler göstererek beton dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Erdoğan, 2007).

Beton yerine yerleştirildikten sonra taze haldeyken içerisinde büyük boşluklar bulunmaktadır. Betonun o haliyle sertleştiği takdirde basınç dayanımında büyük düşüşler görülecektir. Bundan dolayı, yerine yerleştirilen taze betona uygun tarzda sıkıştırılma

(vibrasyon gibi) yöntemlerinin uygulanması ve betonun mümkün olabildiği kadar az boşluklu olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum beton dayanımı üzerinde çok büyük öneme sahiptir (Erdoğan, 2007).

Yerel bozuklukları olan, boşluklu ve homojen olmayan bir beton içyapısı, yetersiz yerleştirmeden kaynaklanmaktadır. Yetersiz yerleştirme sonucu dayanımda azalmalar meydana gelir. Yerleştirmedeki asıl amaç beton içerisindeki sıvı, gaz ve iyon hareketini kolaylaştırarak geçirimsizliğin artmasına yol açan boşluk hacminin minimize edilmesidir. Beton içinde kalan her %1 hava boşluğu dayanımda yaklaşık %6 kayıp oluşmasına neden olmaktadır. Taze betonda boşluklar azaltıldığı takdirde dayanım ve dayanıklılık olumlu yönde etkilenecek betonarme yapının hizmet süresini uzatacaktır (Yılmaz ve Canpolat, 2002).

1.2.4.10.Donma-Çözülmenin Dayanıma Etkisi

Beton binaların çıplak kalacak yüzleri, köprü kirişleri, barajlar, beton yol döşemeleri, hava alanı pistleri gibi yüzleri atmosfer etkilerine açık kalacak elemanlarda soğuk iklim bölgelerinde donmaya dayanıklılık şartı aranmaktadır. Beton boşluklarına giren su burada donmaktadır. Boşluklar içerisindeki su donduğu zaman hacmi genişleyerek betonun zarar görmesine neden olmaktadır. Tekrar tekrar devam eden donma-çözülme olayları karşısında, betondaki iç gerilmeler nedeniyle, beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, beton içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelmektedir. En iyi betonlar bile şiddetli bir donma çözünmeye maruz kalmaları durumunda en fazla bir iki yıl dayanabilmekte ciddi hasarlara uğramaktadırlar. Hava sürükleyici katkı kullanılarak üretilen betonlar donma çözünmeye karşı yeterli dayanıklılığın gösterilmesini sağlar (URL-7, 2019).

1.2.4.11.Deney Şartları ve Numune Boyutlarının Dayanıma Etkisi

Basınç dayanımı standart silindir($\phi 15/30$ cm) veya küp (15x15x15 cm) şeklinde numunelerle belirlenir. Bazı durumlarda numuneler standart boyutlarından veya biçimlerinden farklı olabilmektedir. Özellikle yapıdan çıkarılan veya kesilen karot adı verilen örneklerde bu durumla karşılaşılır. Aynı betondan üretilen, aynı yaşta denenene, fakat farklı boy/çap oranlarına sahip, aynı boy/genişlik oranında ve farklı boyutta veya farklı şekilde (küp veya silindir) numuneler üzerinde farklı sonuçlar elde edilmektedir (URL-7, 2019).

Beton numunenin maruz kaldığı yükün hızının azalması halinde(yük daha uzun bir süreyle uygulandıkça), numunenin kırıldığı basınç dayanımı değerinin de küçüldüğü tespit edilmiştir. Eğer numuneye, yüksek yük hızı uygulanırsa daha büyük bir yük altında kırılır. Bu sayede daha yüksek basınç dayanımı değeri elde edilmiştir (URL-7, 2019).

Basınç dayanımı üzerinde yükleme hızının yanında, numune ile pres tablası arasındaki sürtünme bozuklukları da etkili olduğundan basınç dayanımı sabit bir malzeme özelliği olarak tanımlanamaz. Standartlar da bu sebeple numune şeklini, boyutunu, yükleme hızını ($2 \text{ kg/cm}^2.\text{san}$), numune başlıklarının düzeltilmesini titiz kurallara bağlamışlardır (URL-7, 2019).

Numune kalıplarının niteliği ve bakımı da önemlidir. Kalıp, yerleştirme sırasında şekli bozulmayacak kadar rijit olmalı ve titizlikle sökülüp, temizlenip, saklanmalıdır. Bir gün kalıpta kalan ve rutubet kaybı önlenen numuneler, ikinci gün 20°C sıcaklıktaki kirece doygun suya konulurlar. Deneylerden önce numunelerin basınç pres tablasına geçecek yüzleri başlık yapılarak (kükürtle veya çimento + alçı karışımıyla) düzeltilirler. Bu önlemlerin alınmaması halinde laboratuvar sonuçları düşük çıkar ve aslında belki de iyi üretilen bir beton kötü diye reddedilir (URL-7, 2019).

1.2.4.12.Beton Yaşının Dayanıma Etkisi

Hidratasyonun zamana bağlı olarak artması ve devam etmesi sonucunda beton dayanımı da yaşıyla birlikte artar. Erken yaşlardaki dayanımın artış hızı daha yüksektir. Betonun 28 günlük dayanımı çok önemlidir. Bunun sebebi betonun zamanla kazanacağı dayanımın büyük bir kısmını bu 28 günlük süre içerisinde Dayanım artış hızı erken yaşlarda daha yüksektir. Pratikte, betonun 28 günlük dayanımı büyük önem taşır. Bunun nedeni, betonun zaman içinde ulaşabileceği dayanımın neredeyse tamamına ilk 28 günde ulaşması olarak gösterilebilir. Beton yaşı ilerledikçe dayanım kazanma hızı yavaşlar (Topçu, 2008).

1.2.5.Betonda Su/Çimento Oranı

TS 802'ye (2016) göre su/çimento oranı, betonun (katkılı veya katkısız) sınıfı ve karşı karşıya kalacağı dış etkilerin şiddeti ile bağlantılıdır. Şimşek'e (2000) göre beton karışım hesabındaki s/ç oranı çeşitli iklim şartlarına, betonun döküleceği alana ve basınç dayanımına göre seçilmesi gerekmektedir. Beton özelliğine bağlı olarak seçilecek s/ç oranı da değişiklik göstermektedir. Betonun döküleceği ve hizmet vereceği ortam şartları, önemli

dış iklim etmeni altında ise s/ç oranı küçülür. Böyle durumlarda kılcal boşlukları süreksiz ve en az olan betonlar üretmek her zaman uyulması gereken bir husustur.

1.2.5.1. Su/Çimento Oranının Çimento Hamurundaki Etkileri

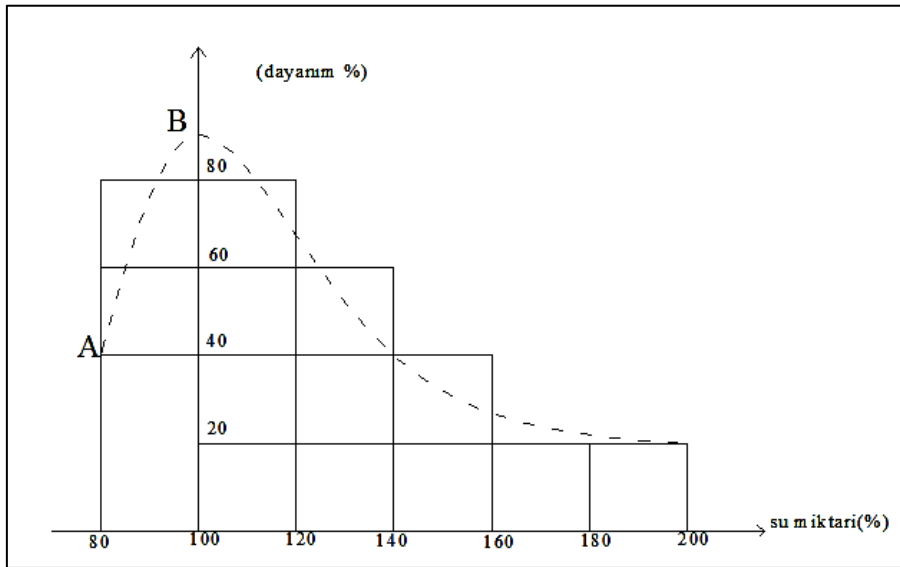
Su ve çimentodan oluşan çimento hamurunda, suyun çimentoya oranı ne kadar düşük olursa hamur o kadar koyu kıvamlı olur ve böyle bir hamura sahip betonun dayanımı, dayanıklılığı ve hacim sabitliği o derece iyi değerler alır (Özdemir, 1992; Postacıoğlu, 1987).

Özdemir'e (1992) göre betonda hidratasyonun başlamasıyla çimento tanelerinin yüzeylerindeki jel tabakları gelişir. Bu jelleşme çimento tanelerinde bir genişlemeye neden olur. Çünkü çimento tanelerinin jelleşen kısımlarının yaklaşık 2.06 katı hacminde jel oluşur. Bu şekilde gittikçe genişleyen jeller belli bir süre sonra birbirine değer ve sürekli bir iskelet meydana getirirler. Böylece priz olayı gerçekleşir. Çimento tanelerinin hidrate olmamış kısımlarının jele dönüşmesi priz olayından sonra da uzun aylar (yeterli suyun bulunması durumunda yıllar) boyunca sürer. Bu durum betonun zaman geçtikçe daha yüksek dayanımlar kazanmasına neden olur. Jel fazı bir kılcal boşluk şebekesi tarafından kesilir. Kılcal boşluklar, karışım suyunun hidratasyon tamamlanmış olmasına rağmen reaksiyona katılmamış kısımları olarak düşünülebilir. Karışım suyu tam hidratasyonun gerektirdiği kadar olsa, bu kılcal boşlukların oluşması minimuma inerdi. Tam hidratasyon durumunda S/Ç:0.38 değeri için hiç kılcal boşluk olmayacaktır. Bu değerden daha büyük s/ç oranlarında kılcal boşluklar oluşur. Daha küçük değerlerinde ise bilhassa iri çimento tanelerinin ortalarında hidrate olmamış kısımlar kalır. Çimento jelinin kendi yapısı ise s/ç oranından bağımsız olup jel boşluklarının kapladığı hacim %28 civarındadır. Burada bahsedilen su/çimento oranı, yeterli işlenebilmeyi sağlayabilmek için kâfi gelmez. Bu bakımdan yapılardaki betonlarda hidratasyon tamamlansa bile kılcal boşluklar bulunur. Su/çimento oranı arttıkça kılcal boşlukların miktarı da artar. Kılcal boşlukların miktarı, beton karakteristikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Tablo 1.8. Su miktarındaki azalmanın dayanıma etkisi

Su miktarının optimum değerden	Dayanımda
%10 eksik olması	%10 azalmaya
%20 eksik olması	%60 azalmaya
%20 fazla olması	%30 azalmaya
%30 fazla olması	%50 azalmaya
%100 fazla olması	%80 azalmaya

Sonuç olarak beton suyunun gerekli olan optimum değerden az ya da fazla olması beton basınç dayanımı üzerinde önemli oranlarda etki edebilir. A.B.D. Çimento Endüstrisi Birliği tarafından elde edilen sonuçlar yukarıdaki gibi özetlenmiş ve Şekil 1.11’de gösterilmiştir (Postacıoğlu, 1987).



Şekil 1.11. A.B.D. Çimento Endüstrisi Birliği tarafından elde edilen beton basınç dayanımı su ilişkisi

1.2.5.2. Su/Çimento Oranının Beton Basınç Dayanımındaki Etkileri

Su/çimento oranı düşük betonlar yeterli sıkıştırılmadığı takdirde betonda oluşacak büyük boşluklar dayanımı düşürmektedir. Bu dayanım düşüşü en büyük tane büyüklüğüne bağlı olmakla beraber oldukça fazla olmaktadır. Buna karşın sıkıştırılmış betonların birim hacim ağırlıkları fazladır. Birim hacim ağırlığı artan betonların basınç dayanımının da doğru orantılı olarak arttığı bilinmektedir. Tablo 1.9’da 28 günlük basınç dayanımı 325

MPa olan çimento kullanılarak hazırlanmış, en büyük tane büyüklüğü 32 mm, tane dağılımı uygun betonların 150 mmx300 mm ebatlarındaki silindir dayanımları verilmiştir. Küp dayanımlar bu değerden yaklaşık %20 daha büyük kabul edilir. Aynı su/çimento oranı için elde edilecek basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımı 325 MPa'dan büyük çimento kullanıldığında çizelgede verilen değerlerden fazla, en büyük tane büyüklüğü büyüdükçe, çizelgede verilen değerlerden fazla olacaktır (TS 802, 2016).

Tablo 1.9. TS 802'ye göre 28 günlük beton basınç dayanımlarına göre su/çimento oranları

Su/çimento oranı (ağırlık esasına göre) (w/c)		
Basınç dayanımı (MPa)	Hava katkısız beton	Hava katkılı beton
45	0.38	-
40	0.43	-
35	0.48	0.40
30	0.55	0.46
25	0.62	0.53
20	0.70	0.61
15	0.80	0.71

Betonda %5 oranında boşluk bulunması durumunda %30, %2 boşluk bulunması durumunda ise %10 kadar dayanım eksilmesi oluşmaktadır. Beton içerisindeki boşluk ya hapsedilmiş hava kabarcıklarıdır ya da hidratasyonda kullanılmayan fazla suyun buharlaşmasıyla oluşan kısımlardır (Özdemir, 1992).

1.2.5.3. Su/Çimento Oranının Beton Geçirimsizliğine (Permeabilitesi) Etkileri

Geçirimsizlik betonun sıvı ve gazları geçirme özelliği olarak tarif edilebilir. Betonun geçirgenliği, beton içindeki boşluklar ile çimento hamuru agrega ara yüzeyindeki mikro çatlakların bir fonksiyonudur. Karışım suyunun optimum miktarda kullanılmasının betonun geçirimsizliğine önemli etkisi vardır. Betonun karışım suyu ile geçirimsizliği arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Su gerektiğinden çok az olduğu durumlarda geçirimsizliğe olumsuz etkide bulunur (Cilason, 1980; Şimşek, 2000).

Çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen serbest kireç suda çözünür. Bunun sonucunda betonun zamanla porozitesi artar ve mukavemet azalır.

Betonların geçirimli olması ortamın zararlı kimyasal etkilerinin artmasına yol açar.

Betonların donma olayında hasara uğraması permeabilitenin bir sonucu olarak görülür.

Betonarme yapılarda betonun içine giren su donatıların korozyonuna neden olur (Postacıoğlu, 1987).

1.2.5.4. Su/Çimento Oranının Betonun Dayanıklılığı Üzerindeki Etkileri

Suyun betona verdiği en büyük zarar oluşturduğu boşluklardır. Su bu boşluklara girdiğinde, soğuk havanın da etkisiyle hamurun dış yüzeyinden içe doğru donmaya başlaması sonucu, jel boşluklarındaki suyu da çekerek hacmini genişletir ve çevresindeki boşluğa buz basıncı yapar, bu basınç buzun arkasındaki donmamış olan suya hidrostatik basınç şeklinde iletilir. Kılcal boyuttaki boşluklar içerisindeki suyun akış hızı çok düşük olduğundan iç basınçlar yüksek değerlerini uzun süre koruyabilirler. Bu olay arka arkaya tekrarlandıkça, çimento hamurunda çatlaklara, hacim genişlemelerine, yüzeyden dökülmelere ve tahribata yol açar. Su/çimento oranının değeri, hamur içindeki boşlukların şekil, miktar ve çaplarını tayin ederek donmaya karşı dayanıklılığı etkilemektedir. Bu nedenle iklim şartlarına ve yapı tiplerine göre donmaya dayanıklılığı sağlayacak s/ç değerlerinin üst sınırları TS 802’de açıklanmıştır (Özdemir, 1992; Çetmeli, 1985).

1.2.5.5. Su/Çimento Oranının Beton Rötresi Üzerindeki Etkisi

Betonda oluşan rötrenin en büyük sebeplerinden birisi çimentodur. Rötrenin su/çimento oranına göre oluşma sebepleri aşağıdaki gibidir:

- Çimento hamurunda kapiler ve jel suyu miktarının değişmesi,
- Beton karışım suyunun zamanla azalması,
- Karışım suyu miktarının artması sonucu betonda boşluk oranının fazlalaşması buna bağlı olarak agreganın betondaki hacminin azalması,
- Beton içindeki ince agrega ve ince öğütülmüş çimentonun fazla bulunması,
- Beton döküldükten sonra herhangi bir şekilde küre tabi tutulmaması, rötre çatlaklarının artmasına neden olacaktır (Şimşek, 2000; Cilason, 1980).

1.2.5.6. Su/Çimento Oranının Beton Sünmesi (Krip) Üzerindeki Etkileri

Sünme, betonda uzun süreli sabit yükler altındaki şekil değişme olarak görülür. Sünme çimento hamurunun jel yapısının bir sonucudur ve rötre gibi absorbe su tabakasının hareketleri sonucu oluşmaktadır. Ancak bu daha karmaşık bir olaydır ve rötre de olduğu kadar tam belirlenmiş değildir. Yüksek s/ç oranı çimento hamuru içerisindeki boşluk büyüklüklerini artırır ve bu boşluklardan suyun kaçmasını kolaylaştırır. Devamlı yükleme altında absorbe olmuş su daha kolay uzaklaşarak yüksek oranda sünmeye neden olur (Özdemir, 1992; Bayazıt 1988).

Bunların yanı sıra sabit yük altında kurumakta olan betonda kuruma sünmesi denilen bir büzülme meydana gelir. Bu kuruma sünmesi, yük altında betonun içine ve dışına suyun hareketini önlerse temel sünme oluşur. Böylece su, betonun sabit yük altında zamana bağlı deformasyonunda önemli rol oynar. Bu durum, suyun yükten bağımsız olarak meydana gelen rötredeki rolünden tamamen farklıdır (Yeğinboğalı, 2001; Orchard, 1979).

1.2.6. Betona Korozi Ortam Etkileri

1.2.6.1. Sülfat Etkisi

Çimentodan kalsiyum alüminat hidrat ve kalsiyum hidroksit ile sülfat iyonları arasındaki tepkime sonucunda betonda genleşme yaratan ürünler meydana gelmesi olayına sülfat etkisi denir. Bu ürünler etrenjit ve jips olup, betonda genleşme, çatlak oluşumu yüzeyin pul pul dökülmesi şeklinde hasara dolayısıyla dayanım kaybına sebep olmaktadır. Genleşme oluşmasının dışında da sülfat etkisi betonda dayanım kaybına neden olmaktadır. Bu nedenlerden bir tanesi de sülfat etkisiyle hidrate portland çimentosunun başlıca fazlarından olan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidratının bozulması da yapıdaki adezyon kuvvetlerinin zayıflamasına ve bunun sonucunda da dayanım kaybına neden olmaktadır. Çimentonun, sülfata karşı göstereceği performansı etkileyen en önemli bileşenler yapısında bulunan C_3A ve C_4AF bileşenleridir. Çünkü sülfat hücumu sonunda meydana gelen ve sertleşmiş çimento ve betonun yapısında genleşmelere sebep olan etrenjit ve monosülfoalüminatların oluşumunda bu ana bileşenler doğrudan rol oynamaktadır. Çimentonun yapısında bulunan C_3A miktarı, beton taze haldeyken meydana gelecek monosülfoalüminat miktarını belirlemekte, monosülfoalüminatlar ise sertleşmiş betonda zararlı genleşmelere sebep olan etrenjit oluşumuna sebep olmaktadır.

Yapılan araştırmalar imento kimyasalının betonda sülfat hücumunu önleyici tek faktör olmadığını göstermektedir. Çimentoda bulunan düşük miktardaki C_3A bileşenin yanı sıra üretilen betonun geirimsiliğinin düşük olması, sülfat hücumunu engelleyici ve azaltıcı faktörler arasında sayılmaktadır. Bilindiği gibi toprakta ve yeraltı sularındaki sülfatlar, betonun içerisine sızan sularla birlikte girebilmektedir. Bu nedenle betonun geirimsiliğinin az olması betona girecek sülfat miktarının azalmasını sağlayacaktır. Sülfat hücumu sonucu oluşabilecek hasarları nleme yollarından bir diğeri ise beton üretiminde mineral katkıların kullanılmasıdır. Mineral katkılar, özelliklerine göre betonu sülfat hücumuna karşı daha dayanıklı hale getirebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda mineral katkı kullanımının çimentonun sülfata karşı direncini arttırmada etkili olduğu bildirilmektedir (Ilıca, 2008).

$Ca(OH)_2$ ile tepkimeye giren zararlı kimyasallar su içerisinde çözünen tuzlar oluştırmaktadırlar. Bu tuzların betondan yıkanması geirimsiliği artırarak zararlı kimyasalların beton içerisine girişine hız kazandırmaktadır. Slfatlarda bu tip tepkimelere girdiğinde betonda genleşmelere ve çatlaklara sebep olan etrenjit üretmektedirler (Postacıoğlu, 1986).

Freeman ve Carrasquillo, uçucu külü betona döküm esnasında karıştırmak yerine uçucu kll imento kullanımının sülfat direnci açısından daha faydalı olduğunu belirtmişlerdir (zturan, 1993).

Betonda yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) ve amorf kalsiyum alüminat içeren uçucu küllerin kullanılması durumunda betonun sülfat direncinin azaldığı, düşük miktarda kalsiyum içeren uçucu küllerin kullanımının ise betonun sülfat dayanımını arttırdığı yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır (Tikalsky ve Carrasquillo, 1992).

Sülfat, imentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alminlive kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleye yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dklmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür. Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çalılık dışında, bitki ve ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanı sıra, yeraltı suyu

ve topraktan örnekler alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır. Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Bir diğer sülfat kaynağı ise çimentodur. Çimentonun C_3A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genişlemenin ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemek için genelde çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlandırmıştır.

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcı ile reaksiyona girerler. Bazı killeri alkali, magnezyum ve kalsiyum sülfatlar gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yeraltı suyu ile birleşince olumsuz etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Ancak magnezyum sülfata ($MgSO_4$) da birçok bölgede rastlanır. Bu tür birikimlerin, nispeten kuru iklimlerde fazla buharlaşma sonucu, yeraltında bulunan tuz tabakalarındaki çözünabilir sülfatların yukarıya emilip, tırmanması sonucu olduğu sanılmaktadır. Doğal alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) tabakalarındaki sülfat konsantrasyonu oldukça yüksektir. $CaSO_4$ 'ların düşük çözünürlükleri olduğundan etki lokal olarak kalır. Buna karşılık uzun süre açıkta kalmaları halinde bu yataklar, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi daha kolay eriyebilen tuzlara dönüşebilirler. Beton açısından sülfat etkisinin şiddeti toprak veya suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Zemindeki SO_4^{-2} veya SO_3^{-2} yoğunlukları yüzde (%) veya mg/kg olarak verilir. Yer altı suyundaki sülfat konsantrasyonu ise ppm veya mg/l olarak gösterilir. Tablo 1.10'da ACI 201 standardında sülfat etkisi açısından yapılmış sınıflama gösterilmiştir.

Tablo 1.10. Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi

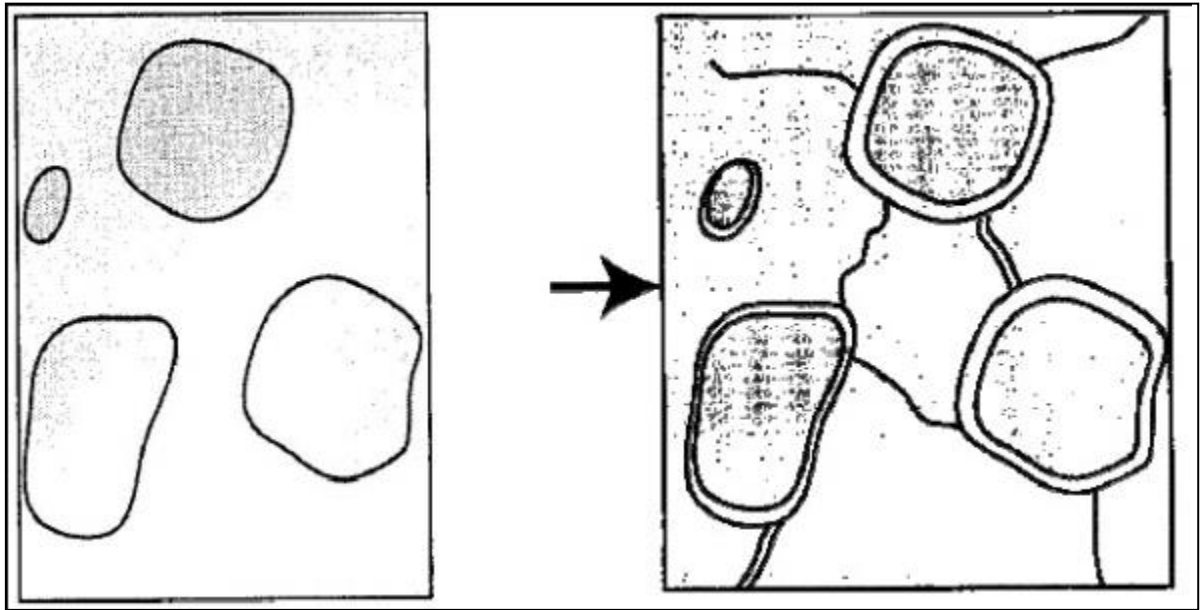
Etki derecesi	Zeminde suda çözünen (Sülfat SO_4^{-2})	Suda SO_4^{-2} (mg/l)
İhmal edilebilir	0.00-0.10	0-150
Orta	0.10-0.20	150-1500
Şiddetli	0.20-2.00	1500-10000
Çok şiddetli	2.00 ve üstü	10000 ve üstü

TS 3340 “Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları” standardına göre ise sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri Tablo 1.11’deki gibi sınıflandırılmıştır. Sülfat iyonu konsantrasyonunu zaman zaman SO_4^{-2} olarak, bazen ise SO_3^{-2} olarak ifade edilmektedir. SO_3^{-2} konsantrasyonunu 1.2 ile çarparak SO_4^{-2} konsantrasyonuna geçmek mümkündür.

Tablo 1.11. TS 3340’a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri

Etkinlik Derecesi	Suda SO_4^{-2} (mg/l)	Suda SO_4^{-2} (mg/l)
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	>5000
Çok kuvvetli	>3000	-

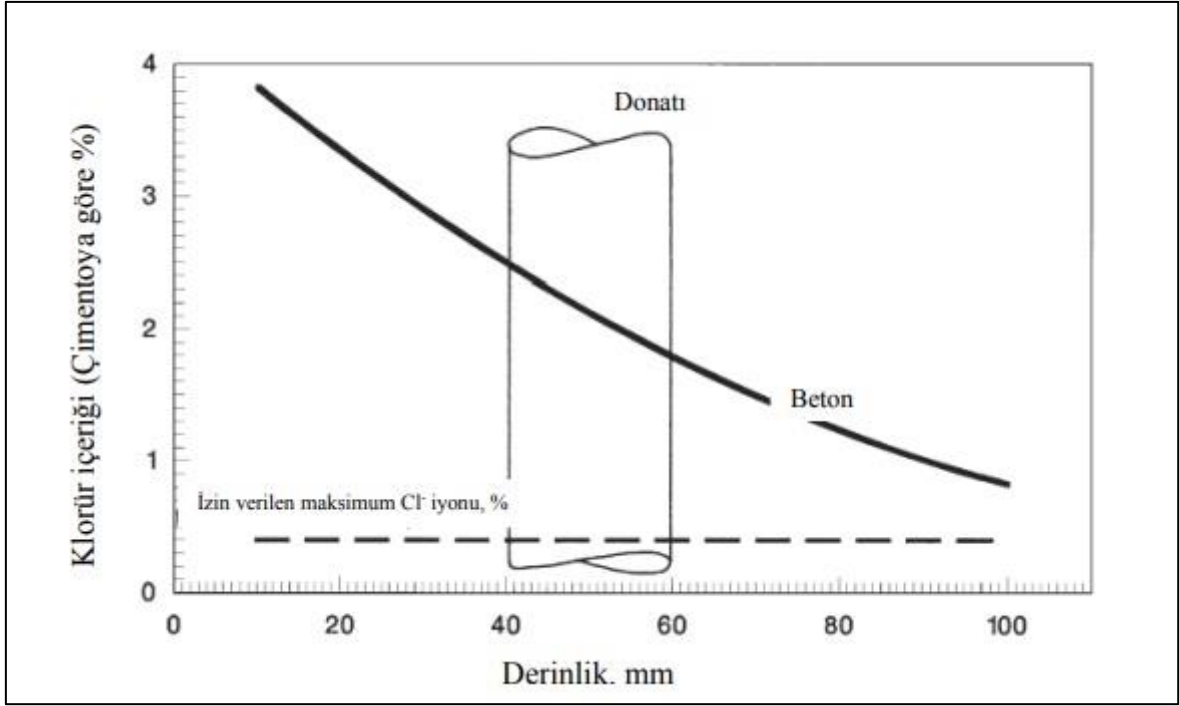
Standartlarda yapılan sınıflandırmalar beton ile sürekli temas eden durgun sular için geçerlidir. Suyun basıncının ve sıcaklığının artması, ıslanma-kuruma olayları, çarpma, sürtünme gibi mekanik etkiler etkinlik derecesini artırır. Betonun özellikle doymuş hale gelip ardından kuruması ve bu olayın sürekli gerçekleşmesi halinde hasarın boyutu büyür (Baradan, Yazıcı, Ün, 2002).



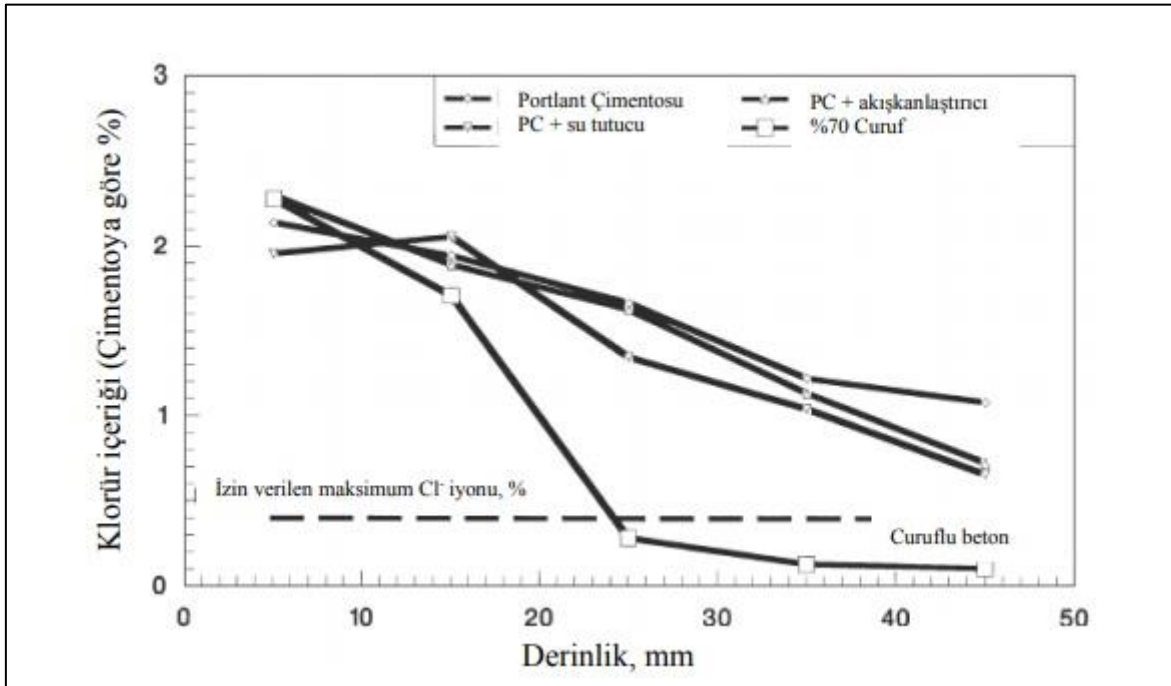
Şekil 1.12. Etrenjit oluşumuyla agrega çevresinde ve çimento hamurunda çatlak oluşumu (Taylor vd., 2001).

1.2.6.2. Klor etkisi

Klor iyonları çelik çubukların etrafındaki koruyucu tabakanın yok olmasına sebep olmakta ve korozyonu hızlandırmaktadır. Klorür iyonları temel olarak dış ortamdan difüzyon yoluyla veya betonun hammaddeyi yoluyla betona karışır. Özellikle bazı priz hızlandırıcı katkılardan, kullanılan agregalardan, beton karma suyundan, deniz suyundan veya kışın buz çözmek için kullanılan tuzlardan geçebilir. Klorürün dışarıdan penetrasyonu sonucunda korozyon riski daha fazladır çünkü toplam klorürün büyük bir kısmı serbest klorür olarak boşluk suyuna geçer. Deniz yapılarında deniz suyunun alçalıp yükseldiği bölgelerdeki önemli korozyon hasarları, bu bölgelerdeki klorür konsantrasyonunun artışıyla bağlıdır. Beton içerisindeki donatının korozyonunu önlemek veya hızını düşürmek için geçirimsiz bir beton üretmek ve gerekli pas payını bırakmak önemlidir. Geçirimsiz bir beton üretmek için mineral katkı kullanımı sırasında süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkıları anionik türde oldukları için, çimento hamuru Cl^- iyonlarını adsorbe edemez, bu iyonlar boşluk suyu içinde kalır. Sonuç olarak mineral katkıları ile süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanıldığında betonun boşluk suyundaki serbest Cl^- iyonu konsantrasyonu artar. Önlem olarak beton içindeki çimento dozajı artırılabilir. Çünkü beton içindeki çimento dozajını arttırmak betonun pH değerini arttırmaktadır. Fakat çelik donatı çevresinde klorür iyonları var ise, betonun pH 17 değeri 11'in üzerinde olsa bile, çukurcuk korozyonu oluşur (Yüzer ve Aköz, 2003). Yapılan bir çalışmada yirmi yıl içerisinde betona işleyen klorür iyonlarının, betonun yüzeyinden itibaren derinliğe göre değişimini veren grafik hazırlanmıştır. Şekil 1.13'de görüldüğü gibi beton yüzeyinden 50 mm derinde bulunan bir donatıda klorür iyonları miktarı BS5328'de müsaade edilen maksimum değerin yaklaşık beş katı kadar olmuştur. Değişik beton karışımları hazırlanmış, altı yıl boyunca deniz etkisindeki, klorür iyonlarının derinliğe göre değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir. %70 oranında granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı betonda, beton yüzeyinden 20 mm derinde bile izin verilen maksimum değerin altında klorür iyonları bulunmaktadır (Şekil 1.13, Şekil 1.14) (Concrete for Marine and Highway Structures, 1999).



Şekil 1.13. Klorür içeriği - Derinlik ilişkisi (Concrete for Marine and Highway Structures, 1999)



Şekil 1.14. Klorür içeriği - Derinlik ilişkisi (Concrete for Marine and Highway Structures, 1999)

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, beton karışım suyuna hesaplanan miktardan farklı oranlarda karışım suyu ilavesi veya eksilmesi durumunda betonun fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin ve üretilen beton örneklerin sülfatlı ortamdaki davranışının belirlenmesidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri belirtilmiştir. Çalışma kapsamında karışım suyu miktarındaki değişimin betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar da kullanılan metotlar ayrıntılı olarak belirtilmiştir.

2.1. Materyal

Yapılan çalışmada beton üretiminde kireçtaşı agregası, çimento ve Gümüşhane şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.1. Agregat

Yapılan çalışmada (0-4 mm, 4-11.2 mm, 11.2-32 mm) agregat gruplarından, beton santrallerinde normal ve yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan Gümüşhane yöresine ait kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Kireçtaşı agregası

2.1.2. Çimento

Üretilen betonlarda CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento Gümüşhane’de bulunan Aşkale Çimento Fabrikası’ndan temin edilmiştir. Tablo 2.1.’de çimentoya ait kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analizler		Fiziksel Testler	
SiO ₂	18.10	İncelik (45 µ elek üstü %)	7.15
Al ₂ O ₃	4.48	Yoğunluk (g/cm ³)	3.1
Fe ₂ O ₃	3.09	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3698
CaO	63.65	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2saat-31dk
MgO	2.58	Priz Sonu (saat-dk)	3saat-11dk
SO ₃	2.84	Hacim Genişlemesi (mm)	1.0
Kızdırma Kaybı	3.90	Su İhtiyacı (%)	29.5
Na ₂ O	0.21		
K ₂ O	0.62		
CI	0.015	Basınç Dayanımı (MPa)	
Ölçülemeyen	0.52	2.Gün	27.9
Toplam	100	28.Gün	58.0

2.1.3. Karışım Suyu

Çalışmada Gümüşhane şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Beton Örneklerin Üretimi

Bu çalışmada standart silindir numuneler için uygun plastik kalıp kullanılmıştır. Kalıpların iç yüzeyleri beton dökülmeden önce iyice temizlenmiş ve betonun kalıba yapışmadan kolayca sökülmesi için hafifçe yağlanmıştır.

Beton yapımında kullanılan agrega uygun olarak ağırlık hesabına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan agrega karışımının üzerine daha önceden tartılarak hazırlanmış olan çimento ilave edilerek, mikser de önce beş dakika kuru karılmıştır, daha sonra her bir test serisi için hazırlanan tasarım suyu ve bu tasarım suyunun belli oranlarda değiştirilmiş miktarları karışımlara ilave edilmiş ve betonda çözülme oluşmaması için 20 dakika daha karılmıştır. Karşım sonucu tasarım betonu ve agrega, çimento miktarları sabit tutularak su miktarının optimum su miktarına göre %10, %20, %40, %70, %100 artırıldığı ve %10, %20 azaltıldığı beton karışımları elde edilmiştir. Beton önceden hazırlanan silindir kalıplara yerleştirilmiştir. Her kalıba yerleştirildiğinde beton içerisinde hava kabarcığı kalmayınca kadar vibratör ile sıkıştırılmıştır. Kalıpların üzeri mala ile sıyrılmış ve numaralandırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler 24 saat laboratuvar da üzerleri camla kapatılarak bırakılmış ve 24 saat sonunda kalıplardan çıkartılarak su sıcaklığı 20 ±

2°C’ de sabit olan kür havuzuna yerleştirilmiştir. Numuneler deney yapılacakları günden bir gün öncesine kadar su içinde bekletilmiştir.

Çökme değeri TS 802 den 8-10 cm aralığı ve S/Ç=0.6 seçilmiştir.

Tablo 2.2. Beton karışım tasarımı

		C20/25		C30/37		C40/50	
Malzeme		Hacim	Ağırlık	Hacim	Ağırlık	Hacim	Ağırlık
Agrega	Çimento	105	316	134	404	172	519
	Su	218	218	218	218	218	218
	Hava	20	-	20		20	0
	0-4 (%49)	322	847	308	809	289	760
	4-11.2 (%30)	197	511	188	488	177	458
	11.2-32 (%21)	138	356	132	340	124	319
	Su/Çimento	0.69		0.54		0.42	
Toplam		1000	2247	1000	2259	1000	2274

2.2.2. Basınç Dayanımın Tayini

Basınç dayanımı tayini 100x200 mm boyutlarında hazırlanan 8 adet silindir beton örnek üzerinde TS EN 12390-3 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır.

Beton basınç dayanımının hesaplanması:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{eşitliği kullanılmıştır.}$$

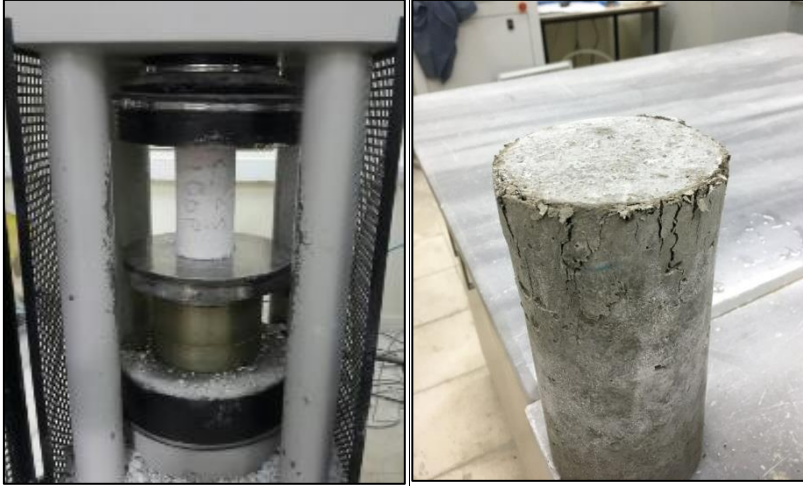
Eşitlikte:

f_c = Basınç dayanımı, MPa,

F= Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c = Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, (mm²) ifade etmektedir.

Basınç dayanımın belirlenmesinde Şekil 2.2’de görülen basınç presi kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Beton basınç presi

2.2.3. Geçirimsizlik (impermeabilite) Tayini

TS EN 12390-8’ de belirtilen esaslara uygun olarak, 100x200 mm boyutlarında hazırlanan 8 adet silindirik beton örnek, basınçlı suyun uygulanacağı impermeabilite cihazına yerleştirildi ve 72 saat süreyle 5 bar (500 kPa) basınçlı su verildi. Bu süre sonunda beton örnekler basınçlı su uygulanan yüzeye dik bir şekilde yarıldı. Suyun beton içerisinde ilerlediği alan işaretlendi. Basınç uygulanan deney alanından itibaren suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek impermeabilite derinliği belirlendi. İmpermeabilite değerinin belirlenmesinde Şekil 2.3’de görülen impermeabilite cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.3. İmpermeabilite cihazı

2.2.4. Yarmada Çekme Dayanımı Tayini

Yarmada çekme dayanımı (YÇD) 100x200 mm boyutlarında hazırlanan 8 adet silindirik beton örnek üzerinde TS EN 12390-6 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı değerleri belirlenirken Şekil 2.4’de gösterilen beton pres cihazı kullanılmıştır.

YÇD hesaplanmasında:

$$f_d = \frac{2.F}{\pi.L.d} \quad \text{eşitliği kullanılmıştır.}$$

Eşitlikte:

f_d : Yarmada çekme dayanımı, (MPa),

F: En büyük yük, (N),

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, (mm),

d: Numunenin seçilen en kesit boyutlarını (mm) ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Yarmada çekme deney düzeneği

2.2.5. Kapilarite Tayini

Kapilarite tayini 100x200 mm boyutlarında hazırlanan 8 adet silindir beton örnek üzerinde TS EN 12390-4 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmıştır. 100x200 mm ebadında silindir beton örnek $50 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 5 mm batacak şekilde saf su içerisine yerleştirilmiş ve “1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 600, 1440, 2280, 4320, 5760, 11520” dak’lık sürelerde, numunelerin yüzeylerindeki serbest su nemli bir bez ile alınarak, 0.01 g hassasiyetle tartılarak kütle artışları belirlenmiştir. Betonların kapiler su emme değerleri EŞ.(1)’de ki formülle hesaplanmıştır. Kümülatif olarak hesaplanan kapiler su emme değerleri zamanın kareköküne bağlı olarak grafik haline dönüştürülmüştür. Betonun kapiler olarak emdiği su miktarı, yüzey alanı ve geçen zamanın karekökü ile doğru orantılıdır. Orantı sabiti olan ve kapilarite katsayısı adı da verilen K sayısı, betonun boşluklarına bağlı bir özelliktir. Numunelerin başlangıçtaki ağırlıklarına göre, ağırlık farkları hesaplanarak KSE değerleri belirlenmiştir. Kapilarite katsayılarının hesaplanmasında aşağıda gösterilen eşitlik (2)’den yararlanılmıştır. Kapilarite katsayısı her birim alandan sızan su miktarının hacimlerinin yorumlanması için hesaplanmaktadır.

$$I = \frac{m_t}{a/d} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

I : Kapiler su emme (mm),

m_t : Beton örneğin zamana bağlı (t) gram olarak kütleindeki değişim,

a : Deneye maruz beton örneğin alanı (mm²),

d : Suyun yoğunluğu (g/mm³).

$$K = Q^2 / (A^2 \cdot t) \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

K : Kapilarite katsayısı (cm²/s),

A : Su ile temas eden alan (cm²),

t : Geçen zaman (s),

Q : Emilen su miktarı (cm³)' dır.

Kapilarite deney düzeneği Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Kapilarite deney düzeneği

2.2.6. Sülfat Dayanıklılığı Tayini

Beton örneklerin sülfat direncini belirlemek amacıyla, beton örnekler ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılmıştır. 105°C'de 2 gün bekletildikten sonra Na₂SO₄ içeriği

%5 olan solüsyon içerisinde 2 gün bekletilmiş ve çevrim tamamlanmıştır. Bu şekilde bir ıslanma-kuruma çevrimi yapılmıştır. Her çevrimden sonra beton örneklerin ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Sonuçlar grafikler üzerinden yorumlanmıştır. Sülfat deneyi uygulaması Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

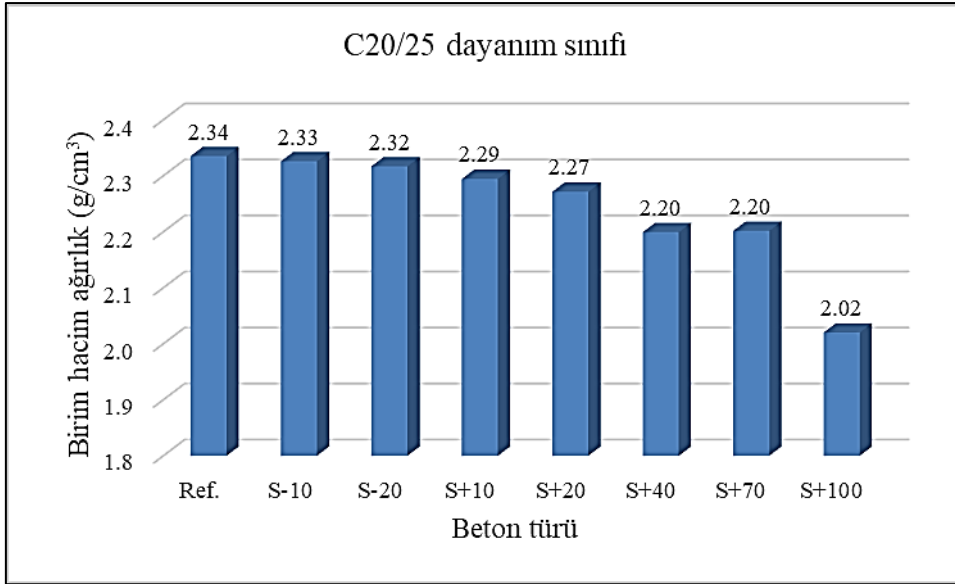


Şekil 2.6. Sülfat testi ıslanma - kuruma döngüsü

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Birim Hacim Ağırlık

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerin birim hacim ağırlıkları ölçülmüştür. Değerler karışım suyu miktarının artışı ve azalışı ile değişen birim hacim ağırlık değerlerine göre kıyaslanmıştır. Beton dayanım sınıfına göre birim hacim ağırlık değerlerini gösterir grafikler Şekil 3.1-Şekil 3.3’de görülmektedir.

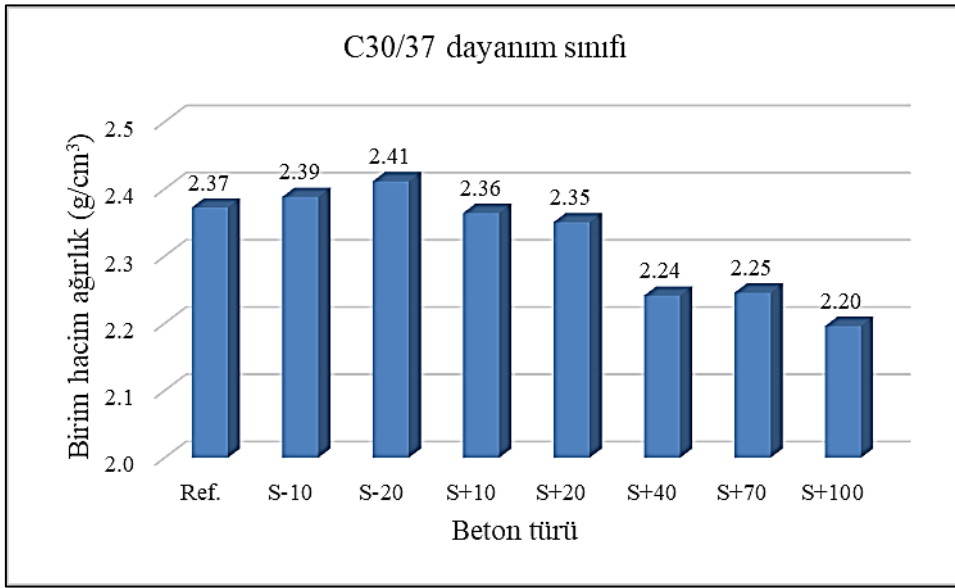


Şekil 3.1. C20/25 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları

C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artırma ve eksiltme miktarına bağlı olarak birim hacim ağırlıkları değerlendirmesine göre;

- En büyük birim hacim ağırlık değerinin 2.34 g/cm^3 ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük birim hacim ağırlık değerinin 2.02 g/cm^3 ile S+100 örneklerde olduğu,

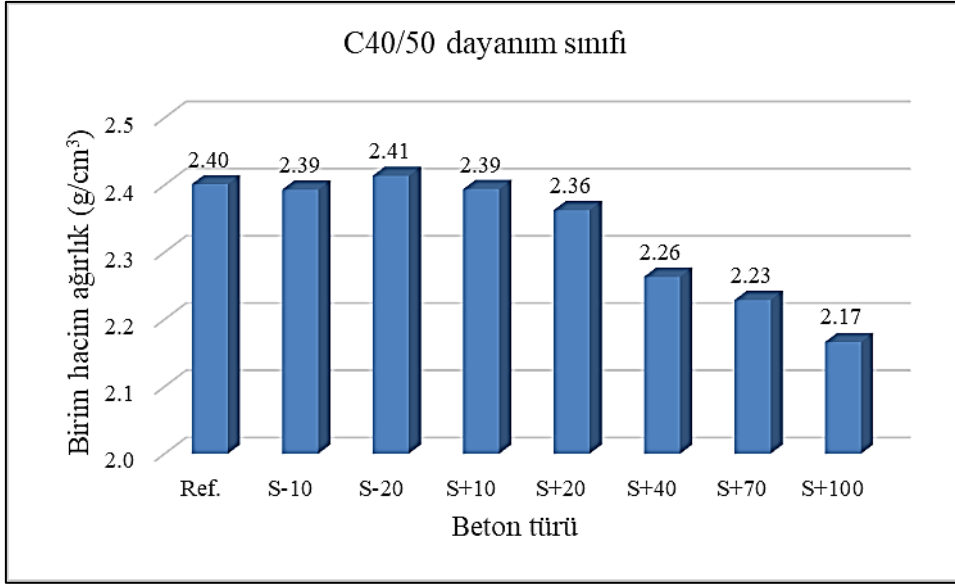
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %1.7, %2.7, %5.8, %5.7, %13.5, daha az olduğu görülmüştür.
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %0.4, %0.8 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.



Şekil 3.2. C30/37 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları

C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artırma ve eksiltme miktarına bağlı olarak birim hacim ağırlıkları değerlendirmesine göre;

- En büyük birim hacim ağırlık değerinin 2.41 g/cm^3 ile S-20 örneklerde olduğu,
- En küçük birim hacim ağırlık değerinin 2.20 g/cm^3 ile S+100 örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %0.3, %0.9, %5.5, %5.3, %7.4 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %0.7, %1.6 daha fazla olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.



Şekil 3.3. C40/50 dayanım sınıfındaki beton örneklerin ortalama birim hacim ağırlıkları

C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artırma ve eksiltme miktarına bağlı olarak birim hacim ağırlıkları değerlendirmesine göre;

- En büyük birim hacim ağırlık değerinin 2.41 g/cm^3 ile S-20 örneklerde olduğu,
- En küçük birim hacim ağırlık değerinin 2.17 g/cm^3 ile S+100 örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %0.3 %1.6, %5.7, %7.2, %9.8 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10 beton türlerinde referans örneklere göre %0.3 daha az olduğu S-20 beton türlerinde referans örneklere göre 0.5% daha fazla olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

Sonuç olarak, beton karışım suyunun artırılması ile Su/Çimento oranının artacağı bilinmektedir. Beton priz almaya başladıktan sonra fazla su buharlaşmakta ve beton içerisinde boşluklar oluşmaktadır. Buna bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığının azaldığı gözlemlenmiştir. Su oranı azaltıldığında ise boşluk oranı azalacağından referans betona yakın değerler elde edilmiştir. Beton karışım suyunun azaltılması ile betonun işlenebilirliği azalmıştır. Bu durum, betonun kalıba yerleştirilmesinde zorluğa neden olmuştur. Özenli bir beton sıkıştırma yapılmaması durumunda birim hacim ağırlıkta düşmeler olacağı düşünülmektedir. Bütün beton dayanım sınıflarında karışım suyunun

%100 arttırılması ile referans betona göre birim hacim ağırlığın %7-%15 arasında azaldığı tespit edilmiştir. Karışım suyu miktarının %20 oranında azaltılmasında ise bütün beton dayanım sınıflarında referans betona göre yaklaşık olarak %1 civarında birim hacim ağırlık kaybı belirlenmiştir. Dayanım sınıfı yükseldikçe birim hacim ağırlık değerlerinin de buna bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca dayanım sınıfı yükseldikçe suyun artışına bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerindeki azalma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı tip malzeme ile hazırlanan betonların birim hacim ağırlığındaki değişim, betonun boşluk yapısı ile ilişkilidir. Sertleşmiş betonun içerisindeki boşluk miktarı porozite ile anılmaktadır. Beton içerisindeki porozite miktarının artışı ile mekanik özelliklerde azalmalar olduğu bilinmektedir. Usta, 2012’de yaptığı, agrega granülometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompasite ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenme çalışmasında, porozite ve kompozite değerlerinin betonun mekanik özelliklerine etkisini ortaya koymuştur. En ideal karışım agregasını elde etmeye yönelik yapılan karışım hesapları ile agrega taneleri arasındaki boşluk miktarı (Porozite) minimum düzeye indirilerek, maksimum doluluk (Kompasite) sağlanabileceğini belirtmiştir (Usta, 2012). Betonda belirlenen bir kıvamı daha düşük miktarlarda karışım suyu ile elde etmek için akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Bu katkının türüne bağlı olarak Su/Çimento miktarı 0.3 değerine kadar düşürülebilir. İşlenebilirlikte ve kıvamda değişim olmadan karışım suyu miktarındaki azalma, betonun boşluk yapısını, birim hacim ağırlığını etkilemektedir. Bu fiziksel özelliklerdeki değişim, betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. Khudhair ve ark, yaptığı çalışmada, Uzun Süreli Çökme elde etmek için gelişmiş Süper akışkanlaştırıcı (ASPPSR402) katkı kullanımı ile beton karışım suyunun azaltılabildiği, bu şekilde fiziksel özelliklerde olumlu etki sağlayacağı belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkıların, karışım suyunu azaltarak, kısa ve uzun vadede mekanik özellikleri geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır (Khudhair, 2018).

3.2. Beton Basınç Dayanımı

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerin basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Değerler karışım suyu miktarının artışı ve azalışı ile değişen 7 ve 28 günlük basınç dayanımına göre kıyaslanmıştır. Beton örneklerin basınç dayanımı değerlerini gösterir grafikler Şekil 3.4-Şekil 3.6’de görülmektedir.

C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış ve eksiltme miktarına bağlı olarak,

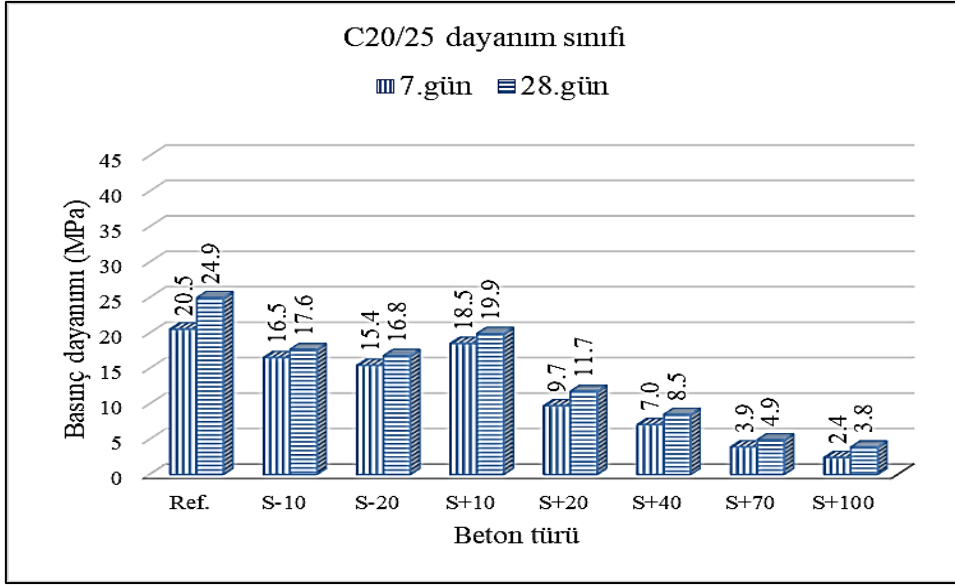
7 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük basınç dayanımı değerinin 20.50 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 2.39 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %9.9, %52.8, %65.7, %81.1, %88.3 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %19.6, %25.0 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

28 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük basınç dayanımı değerinin 24.91 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 3.85 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %20.2, %52.9, %66.0, %80.4, %84.6 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %29.7, %32.7 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımını gösterir grafik Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları

C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış ve eksiltme miktarına bağlı olarak,

7 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

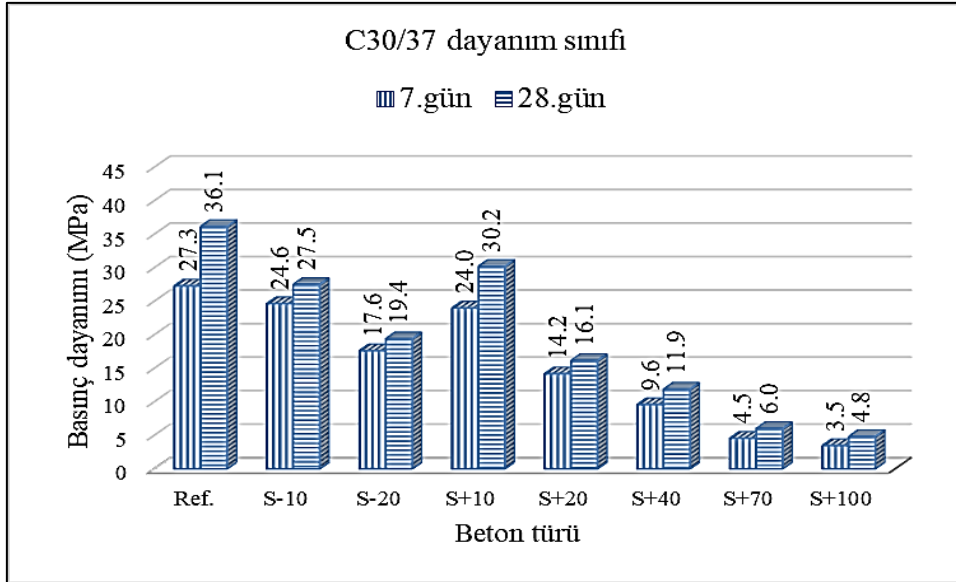
- En büyük basınç dayanımı değerinin 27.27 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 3.45 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %12.1, %48.0, %64.9, %83.4, %87.3 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %9.7, %35.5 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

28 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük basınç dayanımı değerinin 36.14 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 4.81 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,

- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %16.4, %55.4, %67.2, %83.4, %86.7 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %23.9, %46.3 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımını gösterir grafik Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5. C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları

C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış ve eksiltme miktarına bağlı olarak,

7 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

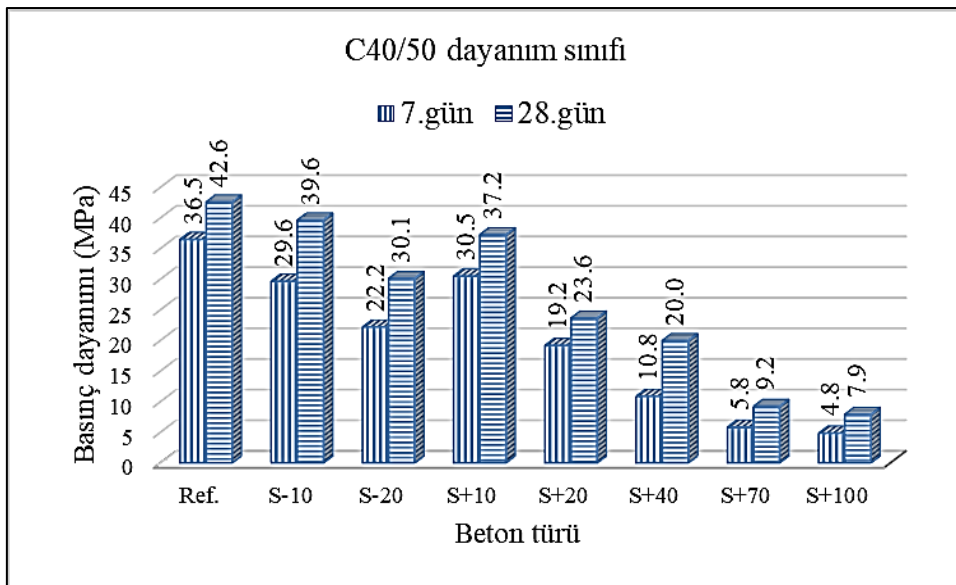
- En büyük basınç dayanımı değerinin 36.47 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 4.84MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,

- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %16.4, %47.5, %70.3, %84.1, %86.7 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %18.7, %39.3 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

28 günlük basınç dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük basınç dayanımı değerinin 42.57 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük basınç dayanımı değerinin 7.88 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü artırıldığı su miktarlarına göre S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %12.5, %44.5, %53.1, %78.4, %81.5 daha az olduğu,
- Karışım suyunun kontrollü azaltıldığı su miktarlarına göre, S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %6.9, %29.3 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımını gösterir grafik Şekil 3.6’de görülmektedir.



Şekil 3.6. C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları

Sonuç olarak, beton karışım hesaplarında bulunan suyun miktarının hesap sonucunda bulunan miktardan fazla eklenmesi ile Su/Çimento oranını arttıracak bililmektedir. Çimento priz almaya başladıktan sonra fazla su buharlaşmakta ve betonun yapısında boşluklar oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da betonun başta basınç dayanımı ve birçok mekanik özellikleri de olumsuz yönde etkilenecektir. Su miktarı azaltıldığında ise betonun işlenebilirliği azalacağı için betonda yeteri kadar sıkışma olmayacağından basınç dayanımında azalma görülmüştür. Beton örnekleri kontrollü bir şekilde eklenen suyun miktarının artışı ile basınç dayanımında azalmalar belirlenmiştir. Bütün beton dayanım sınıflarında karışım suyunun %100 arttırılması ile referans betona göre basınç dayanımının %80'in üzerinde azaldığı tespit edilmiştir. Karışım suyu miktarının %20 oranında azaltılmasında ise bütün beton dayanım sınıflarında referans betona göre yaklaşık olarak %30'un üzerinde dayanım kaybı belirlenmiştir.

Montero ve ark. yaptığı çalışmada, geri dönüşüm agregalarının beton karışımında kullanılması durumunda, agreganın gözenekli yapısından dolayı karışım suyunu doygun kuru yüzey haline gelmek için kullanacağı ve bu durumun basınç dayanımında düşmelere neden olacağını vurgulamıştır. Fakat agreganın doygun kuru yüzey durumuna gelmek için karışım suyuna eklenecek fazla su basınç dayanımının artışına neden olmuştur. Sabit Su/Çimento oranı ve çökme değerini elde etmek için su miktarındaki artışla çimentonun arttırılması gerektiği sonucu ile çelişmektedir (Montero, 2017). Geri dönüşüm agregalarının betonda kullanımı durumunda su miktarının kontrollü olarak arttırılmasında fayda olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat yapılan bu çalışmada literatüre uygun olarak normal agrega kullanılması durumunda karışım suyunun arttırılması basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir.

3.3. Yarmada Çekme Dayanımı

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerin yarmada çekme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiş. Değerler karışım suyu miktarının artışı ile değişen yarmada çekme dayanımına göre kıyaslanmıştır. Beton dayanım sınıfına göre yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 3.1'de görülmektedir. Ayrıca beton örneklerin yarmada çekme dayanımı değerlerini gösterir grafikler Şekil 3.7'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Beton dayanım sınıflarına göre ortalama yarmada çekme dayanımı

Beton türü	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		
	C20/25	C30/37	C40/50
R	1.69	2.70	3.40
S-10	1.57	2.23	2.76
S-20	1.28	2.18	2.52
S+10	1.58	2.60	2.70
S+20	1.50	2.07	2.31
S+40	1.35	1.24	2.13
S+70	0.59	0.83	1.44
S+100	0.47	0.77	1.20

C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yarmada çekme dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük yarmada çekme dayanımı değerinin 1.69 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük yarmada çekme dayanımı değerinin 0.47 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %6.5 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %11.4 daha az olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %20.2 daha az olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %64.9 daha az olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %72.4 daha az olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %7.3 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %24.3 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.

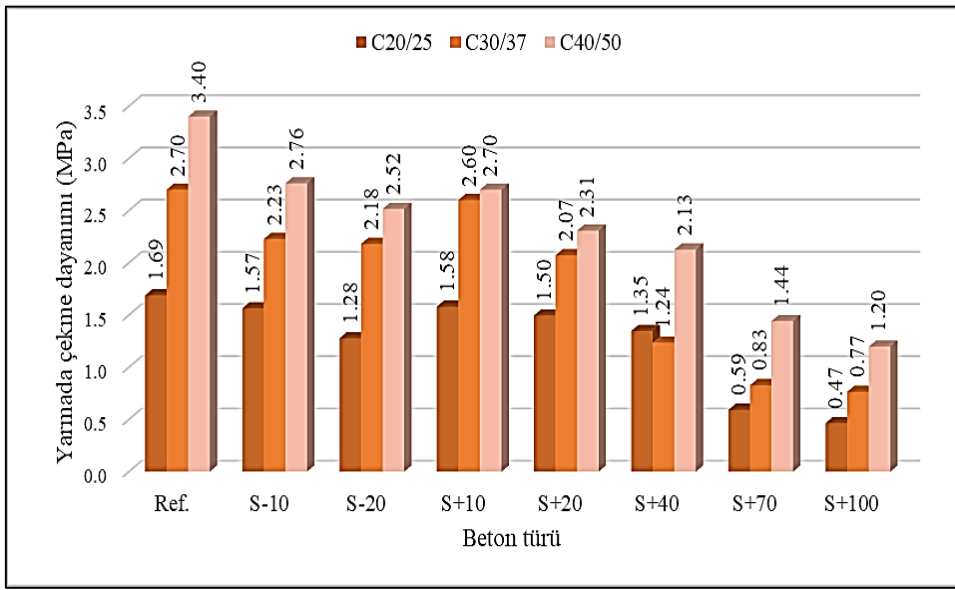
C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yarmada çekme dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük yarmada çekme dayanımı değerinin 2.7 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük yarmada çekme dayanımı değerinin 0.77 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %3.7 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %23.3 daha az olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %54.2 daha az olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %69.3 daha az olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %71.7 daha az olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %17.5 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %19.2 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.

C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yarmada çekme dayanımı değerlendirmesine göre;

- En büyük yarmada çekme dayanımı değerinin 3.40 MPa ile Referans örneklerde olduğu,
- En küçük yarmada çekme dayanımı değerinin 1.20 MPa ile S+100 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %20.6 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %32.1 daha az olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %37.5 daha az olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %57.6 daha az olduğu,

- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %64.8 daha az olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %18.8 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre yarmada çekme dayanımı değeri %26.0 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.



Şekil 3.7. Ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri

Sonuç olarak, beton karışım hesaplarında bulunan suyun miktarının hesap sonucunda bulunan miktardan fazla eklenmesi ile Su/Çimento oranını arttıracak bilinmektedir. Çimento priz almaya başladıktan sonra fazla su buharlaşmakta ve betonun yapısında boşluklar oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da betonun başta basınç dayanımı ve birçok mekanik özellikleri de olumsuz yönde etkilenecektir. Su miktarı azaltıldığında ise betonun işlenebilirliği azalacağı için betonda yeteri kadar sıkışma olmayacağından yarmada çekme dayanımında azalma görülmüştür. Beton örnekleri kontrollü bir şekilde eklenen suyun miktarının artışı ile yarmada çekme dayanımında azalmalar belirlenmiştir. Bütün beton dayanım sınıflarında karışım suyunun %100 arttırılması ile referans betona göre yarmada çekme dayanımının %60'ın üzerinde azaldığı tespit edilmiştir. Karışım suyu miktarının %20 oranında azaltılmasında ise yarmada çekme dayanım değerlerinin bütün beton

dayanım sınıflarında referans betona göre yaklaşık olarak %20'nin üzerinde azaldığı belirlenmiştir. Beton karışım suyunun artışı beton içerisindeki porozite artacaktır. Porozitenin artışı betonda mekanik özelliklerde önemli ölçüde zayıflamaya neden olacaktır. (E.K. Nambiar, D.K. Panesar, D. Falliano, E.P. Kearsley, Tiong-Huan Wee). Gong ve ark yaptığı çalışmada puzolanların köpük betonda kullanımı ile mekanik özellikler ve donma çözülme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Beton porozitesinin artışı ile donma çözölmeye bağı ağırlık kaybı artışı olduğı ve mekanik dayanımlarda önemli oranda kayıplar olduğınu belirlemişlerdir. Puzolan kullanımı ile porozite miktarının azaldığı ve mekanik dayanımlarda artış olduğınu belirlemişlerdir (Gong, 2019). Liu ve ark yaptığı çalışmada, betonun kür sıcaklığı ile boşluk yapısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu ilişkiye bağı olarak mekakik özelliklerin (basınç dayanımı ve çekme dayanımı) değışimini incelemişlerdir. Farklı kür sıcaklıklarına maruz kalan Cıva sızması porozimetrisi “MIP” yöntemi ile boşluk yapısı belirlenmiştir. Sıcaklık artışı ile boşluk yapısının arttığı ve basınç ve çekme dayanım değerlerinin 100°C derece %90'a yaklaşan değerlerde dayanım kayıpları olduğı sonucuna varılmıştır (Liu, 2019). Beton karışıma giren fazla suyun ve karışımın suyunun azaltılması ile betondaki işlenebilirliğin azalması neticesinde betonda gözenekli yapılar oluşmaktadır. Bu gözenekli yapılar, betonda basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır.

3.4. Geçirimsilik (İmpermeabilite)

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerin impermeabilite deneyi gerçekleştirilmiş. Değerler karışım suyu miktarının artışı ile değışen impermeabilite değerlerine göre kıyaslanmıştır. Beton dayanım sınıfına göre impermeabilite değerleri Tablo 3.2'de görölmektedir. Ayrıca beton örneklerin impermeabilite değerlerini gösterir grafik Şekil 3.8'de görölmektedir.

Tablo 3.2. Beton dayanım sınıflarına göre ortalama
impermeabilite değerleri

Beton türü	�impermeabilite (cm)		
	C20/25	C30/37	C40/50
Referans	9.70	6.0	3.90
S-10	7.4	5.6	3.7
S-20	6.5	4	2.9
S+10	10.30	7.4	4.60
S+20	10.52	8.7	6.10
S+40	13.64	15.3	8.30
S+70	17.66	20.0	14.70
S+100	20.00	20.0	20.00

C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yapılan impermeabilite değerlendirmesine göre;

- En büyük impermeabilite değerinin 20 cm ile S+100 örneklerde olduğu,
- En küçük impermeabilite değerinin 6.20 cm ile S-20 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %6.2 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %8.5 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %40.6 daha fazla olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %82.1 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %106.2 daha fazla olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %23.7 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %33.0 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.

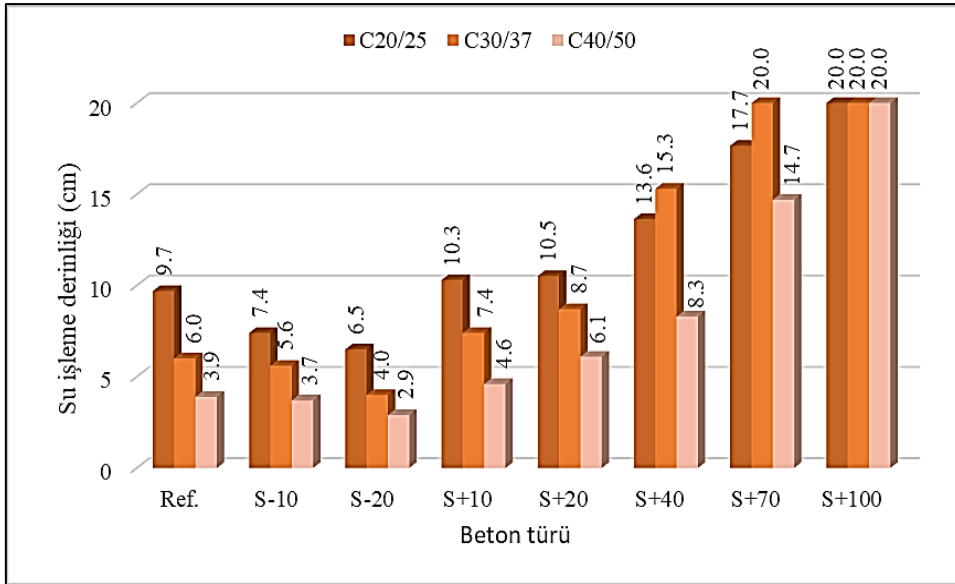
C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yapılan impermeabilite değerlendirmesine göre;

- En büyük impermeabilite değerinin 20 cm ile S+100 ve S+70 türü beton örneklerinde olduğu,
- En küçük impermeabilite değerinin 4 cm ile S-20 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %23.3 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %45.0 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %155.0 daha fazla olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %233.3 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %233.3 daha fazla olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %6.7 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %33.3 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.

C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak yapılan impermeabilite değerlendirmesine göre;

- En büyük impermeabilite değerinin 20 cm ile S+100 türü beton örneklerinde olduğu,
- En küçük impermeabilite değerinin 2.9 cm ile S-20 türü beton örneklerde olduğu,
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %17.9 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %56.4 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %112.8 daha fazla olduğu,

- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %276.9 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %412.8 daha fazla olduğu,
- %10 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %5.1 daha az olduğu,
- %20 karışım suyu azaltılmış numunenin referans numunesine göre impermeabilite değerinin %25.6 daha az olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmektedir.



Şekil 3.8. Ortalama impermeabilite değerleri

Sonuç olarak, beton karışım suyu miktarının karışım hesaplarından farklı olarak su ilavesi veya eksiltilmesi durumunda betonun boşluk miktarının artışı ile beton geçirimli hale gelmektedir. Bu beton örneklerin impermeabilite testine tabi tutulması durumunda betonun su geçirimsizlik değerlerinin ilave su miktarının artışı ile artmakta olduğu belirlenmiştir. Su miktarının %100 artırılması durumunda deneye tabi tutulan 10x20 cm ebadındaki silindir örneklerin 20 cm'lik beton boyunun tamamına su işledi belirlenmiştir. Beton basınç dayanımının artışı ile su ilavesi durumunda su işleme derinliğindeki artış miktarı azalmıştır. Beton örneklerden karışım suyunun eksiltilmesi durumunda su işleme

derinliği %20-%30 oranında azalmaktadır. Bu azalma miktarı, işlenebilirlikteki azalmadan dolayı betonu örneklerin hazırlanması sırasında özen gösterilip daha iyi yerleştirilmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Beton örneklerin geçirimsizlik değerleri basınç dayanım sınıfının artışı ile düşmektedir.

3.5. Kapilarite

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan beton örneklerin kapilarite “numune tabanı suya batırılarak beton kılcal boşluklarını belirleme ” deneyi gerçekleştirilmiştir. Değerler zamana bağlı kütle artış miktarına göre kıyaslanmıştır. Kapiler yolla emilen su miktarları ve Kapilarite katsayıları Tablo 3.3-Tablo 3.5’de görülmektedir. Ayrıca beton örneklerin kapilarite değerlerini gösterir grafikler Şekil 3.9-Şekil 3.13’de görülmektedir.

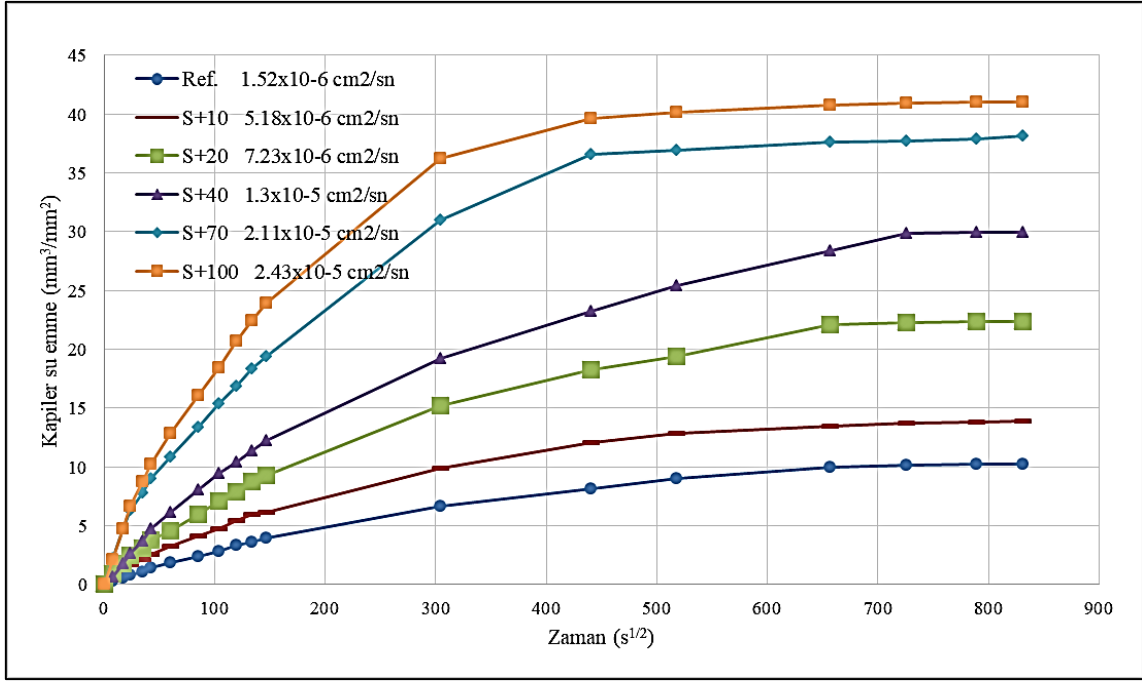
Tablo 3.3. C20/25 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

Süre (sn)	Ref.	S+10	S+20	S+40	S+70	S+100	S-10	S-20
	Kapilarite katsayısı (cm ² /sn)							
	1.52x10 ⁻⁶	5.18x10 ⁻⁶	7.23x10 ⁻⁶	1.3x10 ⁻⁵	2.11x10 ⁻⁵	2.43x10 ⁻⁵	1.76x10 ⁻⁶	7.9x10 ⁻⁷
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0.32	0.45	0.89	0.64	2.23	2.10	0.70	0.38
300	0.57	1.27	1.78	1.78	4.71	4.78	1.15	0.83
600	0.83	1.72	2.48	2.68	6.31	6.69	1.40	0.83
1200	1.08	2.10	3.06	3.69	7.77	8.79	1.66	1.02
1800	1.40	2.55	3.82	4.71	9.04	10.25	1.91	1.40
3600	1.85	3.25	4.59	6.11	10.83	12.87	2.36	1.66
7200	2.42	4.14	5.92	8.03	13.38	16.05	2.93	1.97
10800	2.80	4.78	7.07	9.43	15.35	18.47	3.31	2.42
14400	3.31	5.48	7.90	10.45	16.88	20.70	3.76	2.61
18000	3.63	5.92	8.73	11.40	18.34	22.48	4.14	2.93
21600	3.95	6.18	9.30	12.23	19.36	23.95	4.39	2.99
92220	6.69	9.87	15.22	19.24	30.96	36.24	7.32	4.84
193200	8.15	12.10	18.22	23.25	36.56	39.62	8.92	5.86
268500	8.98	12.87	19.43	25.41	36.94	40.13	9.49	6.50
432000	9.94	13.44	22.10	28.41	37.58	40.76	10.76	6.94
527580	10.13	13.76	22.29	29.87	37.71	40.96	10.83	7.32
622200	10.25	13.82	22.36	29.94	37.83	41.02	10.89	7.39
691200	10.25	13.89	22.36	29.94	38.15	41.02	11.02	7.39

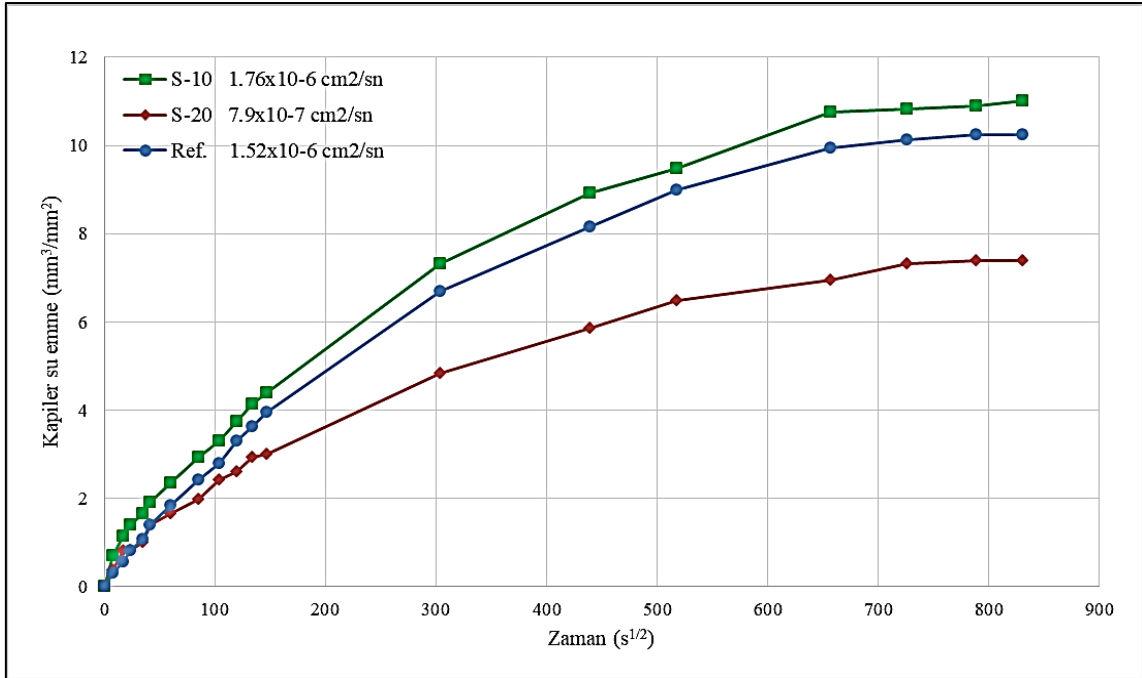
C20/25 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak kapiler su emme miktarındaki ve kapilarite katsayısındaki değişim değerlendirmesine göre;

- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %35.4 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %118 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %191.9 daha fazla olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %272 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %300 daha fazla olduğu,
- Karışım suyunun %10 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %7.5 daha fazla olduğu,
- Karışım suyunun %20 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %28 daha az olduğu,
- Karışım suyuna kontrollü eklenen su miktarına göre, kapilarite katsayılarının S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %240.3, %375.3, %752.2, %1284.2, %1500.0 daha fazla olduğu,
- Karışım suyundan kontrollü eksiltelen su miktarına göre, kapilarite katsayılarının S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %15.5 daha fazla, %48.1 daha az olduğu görülmüştür.

C20/25 dayanım sınıfındaki beton örneklerin kapiler su emme ve kapilarite katsayısını gösterir grafikler Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'de görülmektedir.



Şekil 3.9. C20/25 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı



Şekil 3.10. C20/25 dayanım sınıfında su miktarı eksiltelen numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

Tablo 3.4. C30/37 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

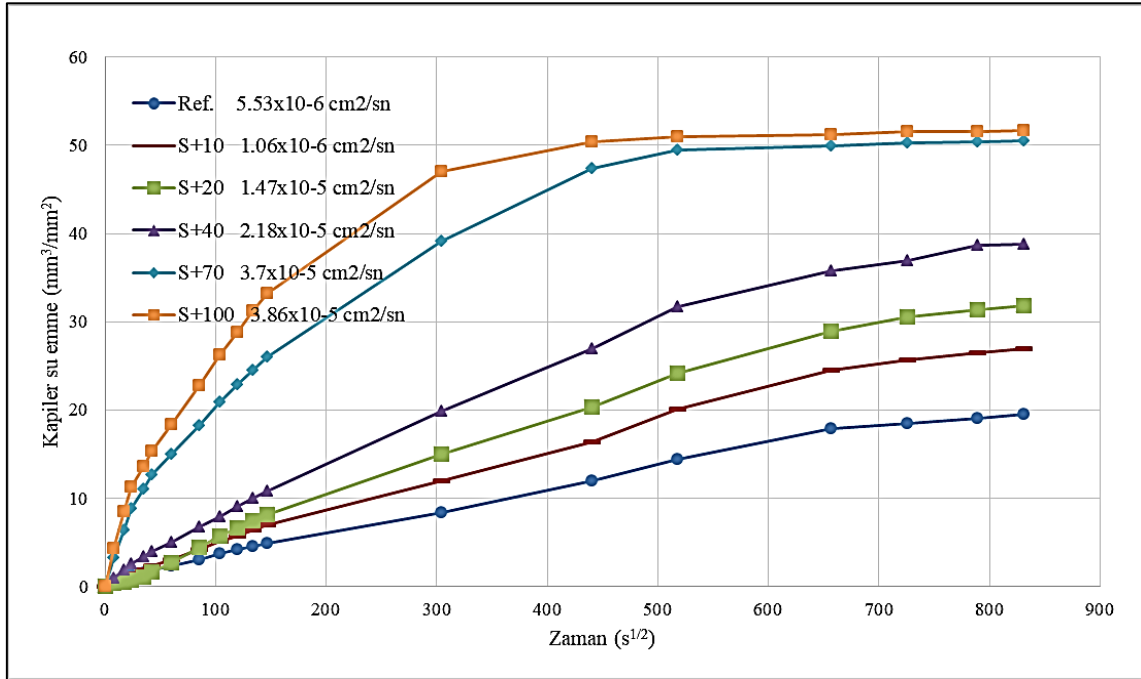
Süre (sn)	Ref.	S+10	S+20	S+40	S+70	S+100	S-10	S-20
Kapilarite katsayısı (cm ² /sn)								
	5.53x10 ⁻⁶	1.06x10 ⁻⁶	1.47x10 ⁻⁶	2.18x10 ⁻⁵	3.7x10 ⁻⁵	3.86x10 ⁻⁵	4.37x10 ⁻⁶	1.58x10 ⁻⁶
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0.57	0.45	0.38	0.96	3.31	4.27	0.45	0.25
300	0.89	1.02	0.51	1.85	6.43	8.47	0.83	0.57
600	1.27	1.40	0.70	2.61	8.85	11.27	1.27	0.70
1200	1.53	1.91	1.08	3.38	11.02	13.57	1.59	0.89
1800	1.91	2.36	1.59	4.01	12.61	15.35	1.97	1.08
3600	2.29	2.99	2.68	5.03	14.97	18.34	2.36	1.27
7200	3.06	4.14	4.39	6.69	18.28	22.74	3.12	1.66
10800	3.76	5.10	5.67	7.90	20.89	26.24	3.63	1.85
14400	4.14	5.73	6.62	9.04	22.93	28.85	3.89	2.10
18000	4.52	6.37	7.45	10.00	24.52	31.21	4.33	2.17
21600	4.90	6.94	8.15	10.83	26.05	33.18	4.59	2.36
92220	8.34	11.97	15.03	19.81	39.17	47.01	7.71	4.01
193200	11.97	16.37	20.32	26.94	47.39	50.45	10.06	5.35
268500	14.39	20.13	24.20	31.72	49.43	51.02	11.78	6.43
432000	17.83	24.52	28.92	35.73	49.94	51.21	14.59	8.28
527580	18.47	25.67	30.57	36.94	50.32	51.53	15.80	9.11
622200	19.11	26.43	31.40	38.73	50.45	51.59	16.69	10.00
691200	19.55	27.01	31.85	38.79	50.57	51.66	17.39	10.45

C30/37 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış ve azalış miktarına bağlı olarak kapiler su emme miktarındaki ve kapilarite katsayısındaki değişim değerlendirmesine göre;

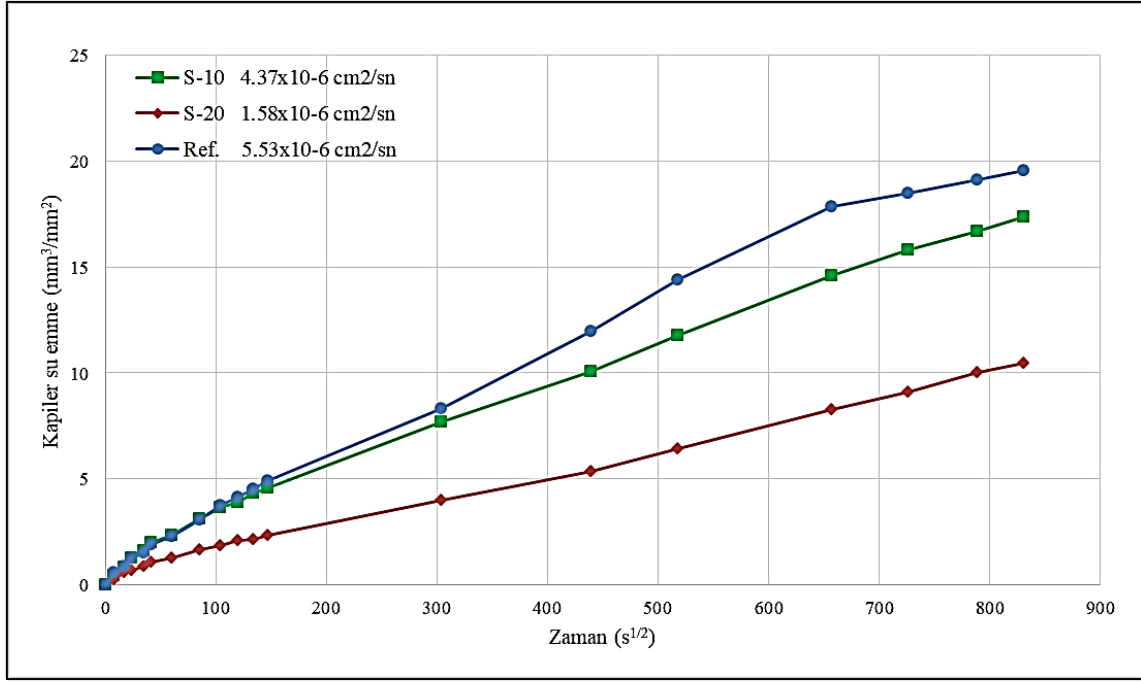
- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %38.11 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %62.87 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %98.37 daha fazla olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %158.63 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %164.17 daha fazla olduğu,
- Karışım suyunun %10 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %11.07 daha az olduğu,

- Karışım suyunun %20 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %46.58 daha az olduğu,
- Karışım suyuna kontrollü eklenen su miktarına göre, kapilarite katsayılarının S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %90.7, %165.3, %293.5, %568.9, %597.9 daha fazla olduğu,
- Karışım suyundan kontrollü eksiltelen su miktarına göre, kapilarite katsayılarının S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %20.9, %71.5 daha az olduğu görülmüştür.

C30/37 dayanım sınıfındaki beton örneklerin kapiler su emme ve kapilarite katsayısını gösterir grafik Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.11. C30/37 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı



Şekil 3.12. C30/37 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

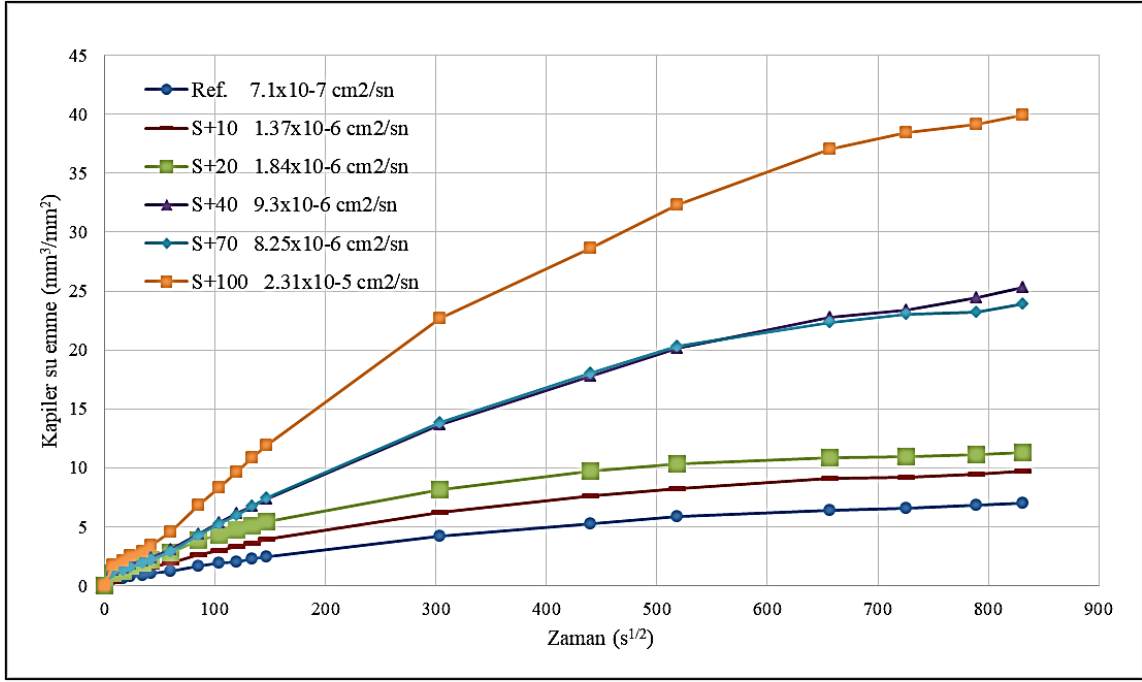
Tablo 3.5. C40/50 dayanım sınıfında karışım suyu miktarına göre beton türünün kapilarite yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

Süre (sn)	Ref.	S+10	S+20	S+40	S+70	S+100	S-10	S-20
	Kapilarite katsayısı (cm²/sn)							
	5.53x10 ⁻⁶	1.06x10 ⁻⁶	1.47x10 ⁻⁶	2.18x10 ⁻⁵	3.7x10 ⁻⁵	3.86x10 ⁻⁵	4.37x10 ⁻⁶	1.58x10 ⁻⁶
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0.57	0.38	1.02	1.34	1.15	1.72	0.57	0.19
300	0.64	1.02	1.27	1.53	1.34	2.10	0.70	0.38
600	0.76	1.27	1.66	1.85	1.59	2.55	0.83	0.57
1200	0.89	1.40	1.91	2.10	1.91	2.93	0.96	0.76
1800	1.02	1.59	2.17	2.36	2.23	3.44	1.08	0.96
3600	1.21	1.97	2.80	3.06	2.93	4.59	1.34	1.21
7200	1.66	2.61	3.82	4.39	4.27	6.82	1.78	1.53
10800	1.91	2.99	4.33	5.35	5.22	8.34	2.10	1.78
14400	2.04	3.31	4.71	6.11	5.99	9.62	2.36	1.85
18000	2.29	3.63	5.10	6.75	6.75	10.83	2.55	2.04
21600	2.48	3.95	5.41	7.39	7.45	11.91	2.68	2.23
92220	4.20	6.24	8.15	13.63	13.82	22.68	4.08	3.44
193200	5.29	7.64	9.75	17.77	18.03	28.66	5.03	4.08
268500	5.86	8.28	10.32	20.13	20.32	32.36	5.54	4.46
432000	6.37	9.11	10.89	22.74	22.29	37.07	6.24	4.90
527580	6.56	9.24	10.96	23.38	23.06	38.41	6.31	4.97
622200	6.82	9.43	11.15	24.39	23.25	39.11	6.31	5.03
691200	7.01	9.75	11.27	25.35	23.89	39.94	6.31	5.03

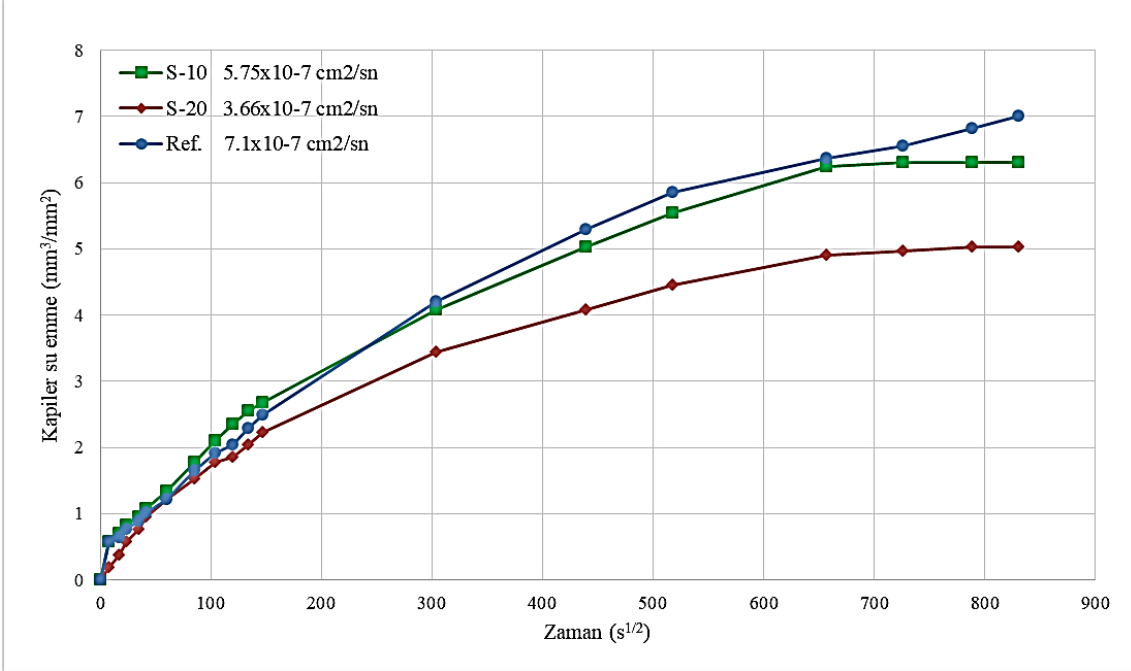
C40/50 dayanım sınıfında beton örneklerin karışım suyundaki kontrollü artış miktarına bağlı olarak kapiler su emme miktarındaki ve kapilarite katsayısındaki değişim değerlendirmesine göre;

- %10 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %39.09 daha fazla olduğu,
- %20 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %60.91 daha fazla olduğu,
- %40 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %261.82 daha fazla olduğu,
- %70 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %240.91 daha fazla olduğu,
- %100 karışım suyu artırılmış numunenin referans numunesine göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %470 daha fazla olduğu,
- Karışım suyunun %10 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %10.00 daha az olduğu,
- Karışım suyunun %20 azaltılmış örneklerde referans örneklere göre kapiler su emme sonucu oluşan kütle değeri %28.18 daha az olduğu,
- Karışım suyuna kontrollü eklenen su miktarına göre, kapilarite katsayılarının S+10, S+20, S+40, S+70, S+100 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %93.5, %158.9, %1209.1, %1062.2, %3149 daha fazla olduğu,
- Karışım suyundan kontrollü eksiltelen su miktarına göre, kapilarite katsayısının S-10, S-20 beton türlerinde referans örneklere göre sırasıyla %19.0, %48.4 daha az olduğu görülmüştür.

C40/50 dayanım sınıfındaki beton örneklerin kapiler su emme ve kapilarite katsayısını gösterir grafik Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de görülmektedir.



Şekil 3.13. C40/50 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

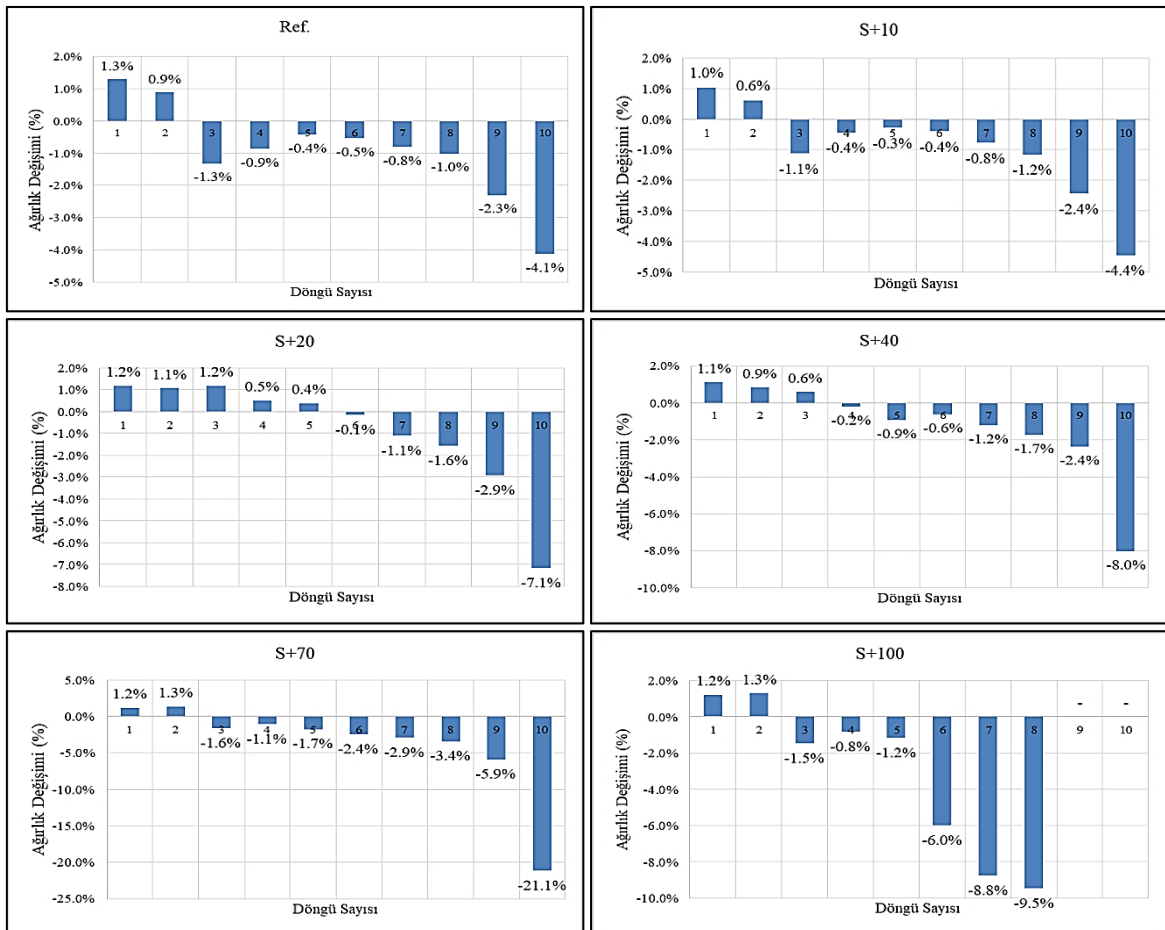


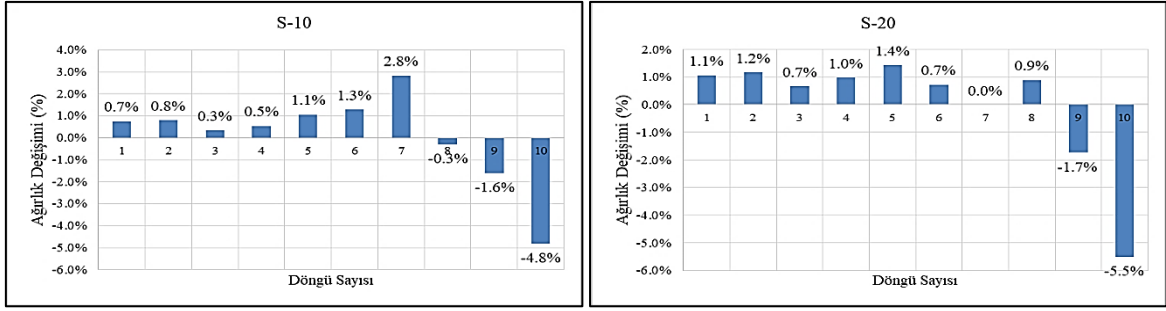
Şekil 3.14. C40/50 dayanım sınıfında su miktarı artırılan numunelerin kapiler yolla emilen su miktarları ve kapilarite katsayısı

Sonuç olarak beton karışım suyunun hesaplananın haricinde ilave yapılması betonun kapilarite özelliklerini de etkilemektedir. Beton içerisindeki fazla su hidratasyon olayı gerçekleşirken betonun yüzeyine terleme yoluyla çıkmaktadır. Bu olay gerçekleşirken de beton yüzeyine doğru kılcal boşluklar oluşmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde bu durumu doğrular veriler elde edilmiştir. Su miktarının artışı ile kapiler yolla emilen su miktarı ve kapilarite katsayısı artmaktadır. Beton dayanım sınıfının artışı ile kapiler yolla emilen su miktarı ve kapilarite katsayısındaki artış azalmaktadır.

3.6. Sülfat Etkisi ile Ağırlık Değişimi

C20/25, C30/37 ve C40/50 dayanım sınıflarında hazırlanan kontrollü su artış ve azaltma miktarlarına bağlı olarak sülfat etkisine maruz bırakılan beton örneklerinde zamana bağlı olarak ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. Beton dayanım sınıfına göre sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimlerini gösterir grafikler Şekil 3.15-Şekil 3.17’de görülmektedir.





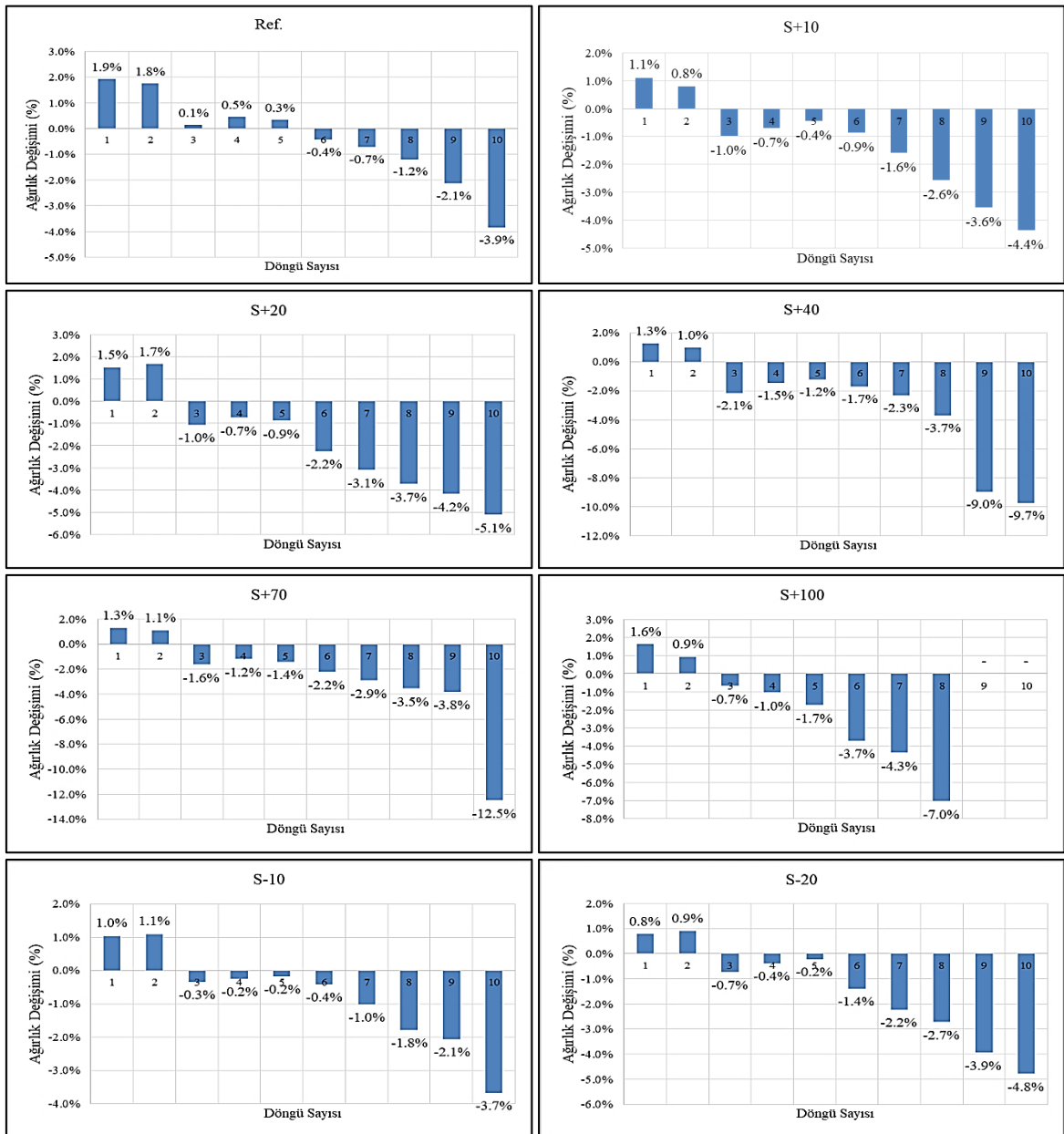
Şekil 3.15. C20/25 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri

C20/25 dayanım sınıfındaki beton örneklerin sülfat etkisinde ıslanma kuruma döngüsü değerlendirmesinde;

- Referans beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.3 ve %0.9 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.1'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+10 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.0 ve %0.6 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.4'lük ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+20 beton örneklerinde 1., 2., 3., 4. ve 5. döngülerde sırasıyla %1.2, %1.1, %1.2, %0.5 ve %0.4 ağırlık artışı olurken, 6. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %7.1'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+40 beton örneklerinde 1., 2. ve 3. döngülerde sırasıyla %1.1, %0.9 ve %0.6 ağırlık artışı olurken, 4. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %8.0'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+70 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.2 ve %1.3 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %21.1'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+100 beton örneklerin 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.0 ve %0.6 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 8. döngü sonunda, %9.5'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S-10 beton örneklerin 1., 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. döngülerde sırasıyla %0.7, %0.8, %0.3, %0.5, %1.1, %1.3 ve %2.8 ağırlık artışı olurken, 8. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.8'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.

- S-20 beton örneklerin 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7. ve 8. döngülerde sırasıyla %1.1, %1.2, %0.7, %1.0, %1.4, %0.7, %0.0 ve %0.9 ağırlık artışı olurken, 9. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %5.5'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.

C30/37 dayanım sınıfında kontrollü su artış ve azaltma miktarlarına bağlı olarak sülfat etkisine maruz bırakılan beton örneklerinde zamana bağlı ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir.

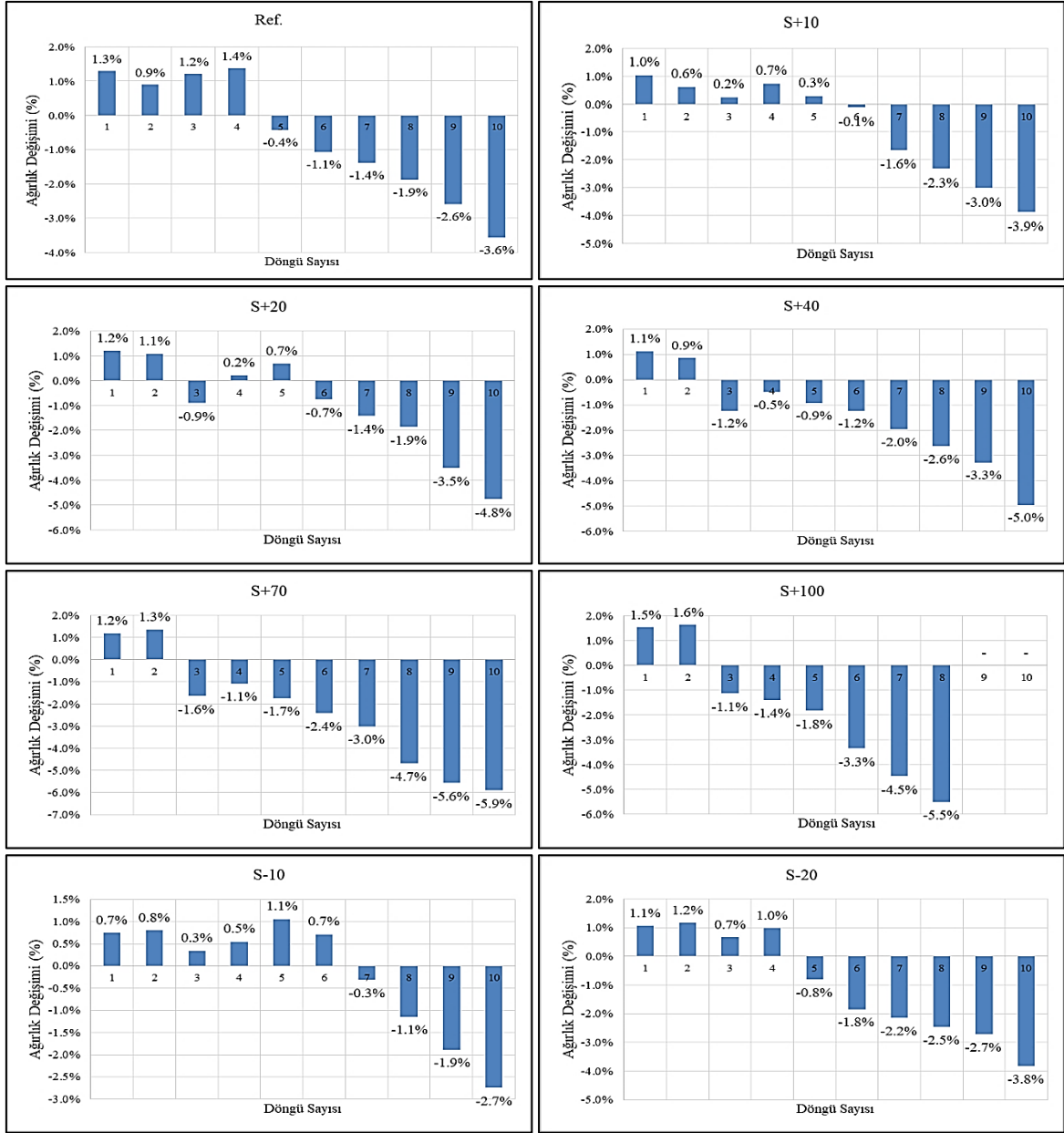


Şekil 3.16. C30/37 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri

C30/37 dayanım sınıfındaki beton örneklerin sülfat etkisinde ıslanma kuruma döngüsü değerlendirmesinde;

- Referans beton örneklerinde 1., 2., 3., 4. ve 5. döngülerde sırasıyla %1.9, %1.8, %0.1, %0.5 ve %0.3 ağırlık artışı olurken, 6. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %3.9'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+10 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.1 ve %0.8 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.4'lük ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+20 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.5 ve %1.7 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %5.1'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+40 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.3 ve %1.0 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %9.7'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+70 beton örneklerinde 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %1.3 ve %1.1 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %12.5'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+100 beton örneklerin 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %1.0 ve %0.6 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 8. döngü sonunda, %7.0'lık ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S-10 beton örneklerin 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %1.0 ve %1.1 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %3.7'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S-20 beton örneklerin 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %0.8 ve %0.9 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.8'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.

C40/50 dayanım sınıfında kontrollü su artış ve azaltma miktarlarına bağlı olarak sülfat etkisine maruz bırakılan beton örneklerinde zamana bağlı ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.17. C40/50 dayanım sınıfındaki betonların sülfat etkisi altında zamana bağlı ağırlık değişimleri

C40/50 dayanım sınıfındaki beton örneklerin sülfat etkisinde ıslanma kuruma döngüsü değerlendirmesinde;

- Referans beton örneklerinde 1., 2., 3. ve 4. döngülerde sırasıyla %1.3, %0.9, %1.2 ve %1.4 ağırlık artışı olurken, 5. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %3.6'lık ağırlık kaybı belirlenmiştir.

- S+10 beton örneklerinde 1., 2., 3., 4. ve 5. döngülerde sırasıyla %1.0, %0.6, %0.2, %0.7 ve %0.3 ağırlık artışı olurken, 6. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %3.9'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+20 beton örneklerinde 1., 2., 3., 4. ve 5. döngülerde sırasıyla %1.2, %1.1, %0.3, %0.2 ve %0.7 ağırlık artışı olurken, 6. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %4.8'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+40 beton örneklerinde 1. ve 2. döngülerde sırasıyla %1.1 ve %0.9 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %5.0'lık ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+70 beton örneklerinde 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %1.2 ve %1.3 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %5.9'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S+100 beton örneklerin 1 ve 2 döngülerde sırasıyla %1.5 ve %1.6 ağırlık artışı olurken, 3. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 8. döngü sonunda, %5.5'luk ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S-10 beton örneklerin 1., 2., 3., 4., 5. ve 6. döngülerde sırasıyla %0.7, %0.8, %0.3, %0.5, %1.1 ve %0.7 ağırlık artışı olurken, 7. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %2.7'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.
- S-20 beton örneklerin 1., 2., 3. ve 4. döngülerde sırasıyla %1.1, %1.2, %0.7 ve %1.0 ağırlık artışı olurken, 5. döngüden sonra ağırlıklarda azalma gözlenmiştir. 10. döngü sonunda, %3.8'lik ağırlık kaybı belirlenmiştir.

Sonuç olarak sülfat etkisi beton ve betonarme elemanların hizmet süreleri göz önüne alındığında çok kısa sürelerde betonda deformasyona neden olan kimyasal bir olaydır. Betonun sülfattan etkilenmesi geçirimliliği ile doğrudan ilgilidir. Yapılan çalışmada beton karışım suyuna ilave edilen fazla su beton bünyesinde boşlukların artmasına ve betonun daha geçirimli olmasına neden olmuştur. Boşluk miktarı fazla ve geçirimli olan betonların sülfattan etkilenme hızları da artmaktadır. %5 sülfat konsantrasyonu ile daha kısa sürelerde betonda oluşacak yıkımı görmek amacıyla yapılan bu çalışmada gerçekleştirilen on çevrim ıslanma-kuruma döngüsü sonucunda C20/25 dayanım sınıfında referans örneklerde %4 civarında ağırlık kaybı olurken su miktarının artmasıyla birlikte ağırlık kayıp miktarı da artmaktadır. Beton örneklerin ıslanma-kuruma çevriminde ortalama 3-4. çevriminden sonra ağırlık değişimleri gözlemlenmiştir. Karışım suyunun %100 arttırılması durumunda 9. ve

10. çevrimde beton örnekler tamamen deforme olmuştur. Beton dayanım sınıfının artışı ile birlikte sülfatın betonlar üzerindeki etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıda sunulan yargılara varılabilir;

Birim hacim ağırlık değerlendirmesinde;

Sonuç olarak, beton karışım suyunun artması durumunda Su/Çimento oranının da artacağı bilinmektedir. Karışım hesaplarında hesaplanan suyun üzerine ilave eklenen su betonun priz almaya başlamasıyla birlikte hidrasyon ısısının da etkisiyle buharlaşarak betondan uzaklaşacaktır. Uzaklaşan suyun yerinde boşluklar oluşmakta ve oluşan bu boşluklar betonun birim hacim ağırlığının azalmasına neden olmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda su miktarının artışı ile birim hacim ağırlığın azaldığı gözlemlenmiştir. Su miktarının %100 arttırıldığı betonlarda birim hacim ağırlık değerinin C20/25 betonunda %13.5, C30/37 betonunda %7.4 ve C40/50 betonunda ise %9.8 oranında azaldığı görülmüştür. Su miktarı azaltıldığında ise referans betona yakın birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Beton dayanım sınıfı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin de yükseldiği görülmüştür.

Basınç dayanımı değerlendirmesinde;

Betona karışım oranlarında belirlenen miktarın üzerinde ilave edilecek su betondaki boşluk miktarını arttıracaktır. Bunun sonucunda basınç dayanımında düşmeler görülecektir. Su miktarı hesaplanandan az olduğu takdirde işlenebilirlik düşeceğinden yeterli sıkışma sağlanamaz. Bu da dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda su miktarının artışıyla beton basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Su miktarının %100 arttırıldığı betonlarda basınç dayanımının bütün dayanım sınıflarında %80' in üzerinde azaldığı görülmüştür. Su miktarının %20 azaltıldığı betonlarda ise basınç dayanımının %30' un üzerinde azaldığı görülmüştür.

Yarmada çekme dayanımı değerlendirmesinde;

Beton örnekler kontrolü bir şekilde eklenen suyun miktarının artışı ile yarmada çekme dayanımında azalmalar belirlenmiştir. Bütün beton dayanım sınıflarında karışım suyunun %100 arttırılması ile referans betona göre çekme dayanımının %65'in üzerinde azaldığı tespit edilmiştir. Karışım suyu miktarının %20 oranında azaltılmasında ise bütün beton dayanım sınıflarında referans betona göre yaklaşık olarak %20'nin üzerinde dayanım kaybı belirlenmiştir.

İmpermeabilite değerlendirmesinde;

Sonuç olarak, beton karışım suyu miktarının karışım hesaplarından farklı olarak su ilavesi veya eksilmesi durumunda betonun boşluk miktarının artışı ile beton geçirimli hale gelmektedir. Bu beton örneklerin impermeabilite testine tabi tutulması durumunda betonun su geçirimsizlik değerlerinin ilave su miktarının artışı ile artmakta olduğu belirlenmiştir. Su miktarının %100 arttırılması durumunda deneye tabi tutulan 10x20 cm ebadındaki silindir örneklerin 20 cm'lik beton boyunun tamamına su işledi belirlenmiştir. Beton basınç dayanımının artışı ile su ilavesi durumunda su işleme derinliğindeki artış miktarı azalmıştır. Beton örneklerden karışım suyunun eksilmesi durumunda su işleme derinliği %20-%30 oranında azalmaktadır. Bu azalma miktarı, işlenebilirlikteki azalmadan dolayı betonu örneklerin hazırlanması sırasında özen gösterilip daha iyi yerleştirilmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Beton örneklerin geçirimsizlik değerleri basınç dayanım sınıfının artışı ile düşmektedir.

Kapilarite değerlendirmesinde

Sonuç olarak beton karışım suyunun hesaplananın haricinde ilave yapılması betonun kapilarite özelliklerini de etkilemektedir. Beton içerisindeki fazla su hidratasyon olayı gerçekleşirken betonun yüzeyine terleme yoluyla çıkmaktadır. Bu olay gerçekleşirken de beton yüzeyine doğru kılcal boşluklar oluşmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde bu durumu doğrular veriler elde edilmiştir. Su miktarının artışı ile kapiler yolla emilen su miktarı ve kapilarite katsayısı artmaktadır. Beton dayanım sınıfının artışı ile kapiler yolla emilen su miktarı ve kapilarite katsayısındaki artış azalmaktadır.

Sülfat etkisinin değeriendirilmesi

Sonuç olarak sülfat etkisi beton ve betonarme elemanların hizmet süreleri göz önüne alındığında çok kısa sürelerde betonda deformasyona neden olan kimyasal bir olaydır. Betonun sülfattan etkilenmesi geçirirnililiğı ile doğrudan ilgilidir. Yapılan çalışmada beton karışım suyuna ilave edilen fazla su beton bünyesinde boşlukların artmasına ve betonun daha geçirirnil olmasına neden olmuştur. Boşluk miktarı fazla ve geçirirnil olan betonların sülfattan etkilenme hızları da artmaktadır. %5 sülfat konsantrasyonu ile daha kısa sürelerde betonda oluşacak yıkımı görmek amacıyla yapılan bu çalışmada gerçekleştirilen on çevrim ıslanma-kuruma döngüsü sonucunda C20/25 dayanım sınıfında referans örneklerde %4 civarında ağırlık kaybı olurken su miktarının artmasıyla birlikte ağırlık kayıp miktarı da artmaktadır. Beton örneklerin ıslanma-kuruma çevriminde ortalama 3-4. çevriminden sonra ağırlık değışimleri gözlemlenmiştir. Karışım suyunun % 100 arttırılması durumunda 9. ve 10. çevrimde beton örnekler tamamen deforme olmuştur. Beton dayanım sınıfının artışı ile birlikte sülfatın betonlar üzerindeki etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Beton üretimi yapılırken karışım hesabında belirlenen optimum su miktarı üzerinde su ilave edilmesi veya eksiltilmesi durumunda beton basınç dayanımının yanı sıra diğer mekanik özelliklerin de olumsuz etkilendiğı görülmüştür. Ayrıca su miktarındaki değışimin sülfat etkisine karşı direnci azalttığı da gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı beton üretimi yapılırken veya yapıldıktan sonra döküm esnasında karışım hesabında belirlenen su miktarının arttırılmaması ve eksiltilmemesi önerilmektedir.

İleride su miktarının arttırılması veya azaltılması ile alakalı çalışma yapacak araştırmacılara, karışım suyu miktarının arttırılmasıyla betonun servis ömrü boyunca maruz kalacağı diğer koroziif etkilere karşı durabilite özelliklerinin araştırılması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Akbulak, A., Baydar, A., Çorumluoğlu, C. ve Işık, C., 1967, 'Beton ve Beton Katkı Malzemeleri' Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Altoubat, S.A. ve Lange, D.A., 2001, Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, ACI Materials Journal, 98, 323331, U.K..
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002, "Betonarme Yapılarda Kalıcılık", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Başka, M.A., 2006, Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 94s.
- Bayazıt, Ö. L., 1988, Beton ve Deneyleri, Bayındırlık Bakanlığı, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Bazant, P.Z. ve XI, Y., 1994. Drying Creep of Concrete Constitutive Model and New Experiments Separating its Mechanisms, *Materials and Structures*, 165, 3-14.
- Beton Katkı Bülteni, 1999, Yıl:1 Sayı:2 Haziran, İstanbul.
- Cilason, N., 1980., Beton., STFA Yayın No:21,İstanbul.
- Concrete for Marine and Highway Structures, Civil and Marine, Slag Cement Limited, 1999,sheet 4, 1-3
- Çetin, U., 2003, Düşük Su/çimento Oranlı Betonlarda Gevrekliğin İçyapıyla İlgisi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çetmeli, E., 1985, Vacuum Processed Concrete, Proceedings of the First International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, Yarmouk University, Irbid, Ürdün.
- Panesar, D.K., 2013, Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Constr. Build. Mater.* 44 575–584.D. Falliano, D. De Domenico
- Erdoğan, T.Y., 1995, Betonu Oluşturan Malzemeler, Karışım ve Bakım Suları., ODTÜ İnşaat Mühendisliği, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, Ankara
- Erdoğan, T.Y., 2003, "Beton", METU Press, Ankara, 11-61.
- Erdoğan, T.Y., 2007, Beton. ODTU Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 757 s., Ankara.
- Erdoğdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P., 1999, Traslar ve traslı çimentolar. TÇMB/AR-GE/Y99.2, Ankara.

- E.P. Kearsley ve P.J. Wainwright, 2002, The effect of porosity on the strength of foam concrete, Cem. Concr. Res. 32 (2) 233–239.
- Gong, J. ve Wenjie Z., 2019, "The effects of pozzolanic powder on foam concrete pore structure and frost resistance." Construction and Building Materials 208 : 135-143.
- İlca, T., 2008, Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimsizliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., İstanbul.
- İstanbuluoğlu, S., 1987, TKİ, OAL, İşletmesi Müessesesi. Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler ve Ramble Betonunun Seçimi İle İlgili Bir Çalışma, Çayırhan-Ankara
- Kevorkian, A. A., 2006, Air-Entraining Admixtures. ASTM STP 169D. American Society for Testing and Materials, pp. 474-483.
- Khudhair, M.H., Mohamed S.E.Y. ve Ahmed, E., 2018, "Data on effect of a reducer of water and retarder of setting time admixtures of cement pastes and mortar in hardened stat." Data in brief 18 : 454-462.
- Liu, P., Cui, S., Li, Z., Xu, X. ve Guo, C., 2019, Influence of surrounding rock temperature on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high-temperature geothermal tunnel. Construction and Building Materials, 207, 329-337.
- Mays, G., 1991, Durability of Concrete Structures, Chapman and Hall, U.K
- Montero, J. ve Laserna, S., 2017, "Influence of effective mixing water in recycled concrete." Construction and Building Materials 132 : 343-352E.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Air-void characterisation of foam concrete, Cem. Concr. Res. 37 (2) (2007) 221–230.
- Neville, A.M. ve Brooks, J.J., 1987, Concrete Technology, Longman Group Limited, pp. 237-261, U.K.
- Orchard, D.F., 1979, The Vacuum Concrete Process, Concrete Technology Volume 2, Londra.
- Owens, P., 1989, Su ve Betondaki Rolü, (DSİ Teknik Bülteni 1991 sayı :73, DSİ TAKK Dairesi Başkanı Güner Ağarcık tarafından tercüme edilmiştir.) Concrete International Vol.11 No: 11-12, Ankara.
- Özdemir, Ö., 1992, Vakumlu Beton., Bayındırlık Bakanlığı DSİ Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı., Yayın No:MLz 817, Ankara
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 1999, Her Yönüyle Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, 128s, İstanbul.

- Özturan, T., 1993, *Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, pp. 57-78.
- Postacıoğlu, B., 1969, "Yapı Malzemesi", İTÜ Yayını, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., 1986, *Bağlayıcı Maddeler Cilt-1*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- Postacıoğlu, B., 1987, "Beton" , Cilt 1-2, *Matbaa Teknisyenleri Basmenevi*, syf 354-388, İstanbul
- Ricciardi, G. ve Gugliandolo, E., 2018, Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density, *Constr. Build. Mater.* 165, 735–749.
- Şimşek, O., 2000, *Yapı Malzemesi 2*, Gazi Üni. T.E.F. Yapı Eğitimi, Ankara.
- Şimşek, O., 2001, *Beton teknoloji ders notları*, Gazi Üni. T.E.F. Yapı Eğitimi, Ankara.
- Taylor, H.F.W., Famy, C. ve Scrivener, K.L., 2001, "Delayed ettringite formation", *Cement and Concrete Research*, 31: 683-693.
- Tikalsky, P. J. ve Carrasquillo, R. L.. 1992, Influence of FlyAsh on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 89, pp. 69-75.
- Tiong-Huan, W., Saradhi, D.B. ve Thangayah, T., 2011, Effect of w/c ratio on air-void system of foam concrete and their influence on mechanical properties, *Mag. Concr. Res.* 63 (8) 583–595.
- Toktay, M. ve Erdoğan, K., 2002, *Cüruf ve Cüruf Çimentolar*, TÇMB/AR-GE/Y97.1, Ankara
- Topçu, İ. B., 2008, *Yapı Malzemeleri ve Beton*. Uğur Ofset, 550 s., Eskişehir.
- T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2017 yılı Çimento Sektörü Raporu, 2017.
- T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2018 yılı Çimento Sektörü Raporu. 2018.
- TS EN 196-1, 2016, *Çimentoların fiziki ve mekanik deney metotları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.35.
- TS 802, 2016, *Beton karışım hesap esasları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.43.
- TS EN 206:2013+A1, 2017, *Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.104.
- TS EN 1008, 2003, *Beton - Karma suyu - Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.18.

"Türkiye'nin Çimento Hammaddeleri ve Sorunları Paneli", 1983, 37. Türkiye Jeoloji Bilimsel ve Teknik Kurultayı Kitabı, Ankara, s. 33-48.

Usta, Selçuk, 2012, "Agrega Granülometrisinin Beton Bilesimindeki Teorik Malzeme Miktarları ile Betonun Kompasite ve Porozite Değerleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi." Electronic Journal of Construction Technologies/Yapi Teknolojileri Elektronik Dergisi 8.1.

Uygun, A., 2012, MTA Jeolog Defteri. İstanbul.

Yeğinboğalı, A., 2001, Su ve Beton: "Bir Sevgi Nefret İlişkisi"., (ACI izni ile "Concrete International" daki Adam Neville'in makalesinden tercüme edilmiştir.) (Vol 22 , no:12 , 2000)., Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, sayı 29, Ankara.

Yeğınobalı, A. ve Ertün, T., 2009, Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar TÇMB/AR-GE/Y04.01

Yılmaz, K. ve Canpolat, F., 2002, 'Etkin Vibrasyonun Beton Kalitesindeki Önemi', Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi C.XVI, S.2.

Yüzer, N. ve Aköz, F., 2003, Silis Dumanı Katkılı Betona Klorür Etkisi, V. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 1-3 Ekim, s. 65 – 74

URL-1, <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/67153/45353/agrega.pdf>, 2 Mayıs 2019

URL-2, <https://cografyahocasi.com/10-sinif/kayaclar-ve-ozellikleri.html#prettyPhoto>, 2 Mayıs 2019

URL-3, http://www.yapisanatlari.com/agrega_1_30.htm, 2 Mayıs 2019

URL-4, <http://www.betonvecimento.com/wp-content/uploads/2015/02/Y%C3%BCksek-F%C4%B1r%C4%B1n-C%C3%BCrufu-El-Kitab%C4%B1.pdf>, 2 Mayıs 2019

URL-5, <https://forum.yapisal.net/showthread.php?t=738>, 3 Mayıs 2019

URL-6, http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/10.1._Fiziksel_ozellikler-web.pdf, 2 Mayıs 2019

URL-7, <https://docplayer.biz.tr/1077970-5-beton-5-1-betonun-basinc-dayanimi.html>, 3 Mayıs 2019

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Gümüşhane’de doğdu. Sırasıyla Aysın Rafet Ataç İlköğretim Okulu, Ali Fuat Kadirbeyoğlu Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2011 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi, 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılından bu yana Yıldız Bakır Madencilik Sanayi A.Ş.’nde inşaat mühendisi olarak görev yapmaktadır.