

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI KOMPOZİSYONLARDAKİ ZARARLI
KİMYASAL ORTAMLARA MARUZ KALAN
BETONLAR İÇİN UYGUN ÇİMENTO SEÇİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş.Müh. Bedri Caner ALPAY

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Prf. Dr. Kemalettin YILMAZ

Haziran 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI KOMPOZİSYONLARDAKİ ZARARLI
KİMYASAL ORTAMLARA MARUZ KALAN
BETONLAR İÇİN UYGUN ÇİMENTO SEÇİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ


İnş.Müh. Bedri Caner ALPAY

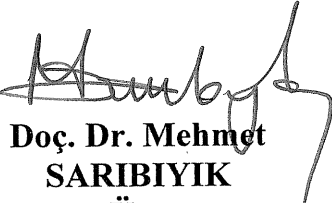
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

Bu tez 16 / 06 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


**Prof. Dr. Kemalettin
YILMAZ
Jüri Başkanı**


**Yrd. Doç. Dr. Hüseyin
KASAP
Üye**


**Doç. Dr. Mehmet
SARIBIYIK
Üye**

ÖNSÖZ

Günümüzde en yaygın yapı malzemesi olarak kullanılan beton; çimento, agrega, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve karışım suyundan oluşan kompleks bir yapıya sahiptir. Yalın betonun yapısal özellikleri esas olarak çimento ve su ve bununla birlikte diğer karışım malzemeleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Sülfatlı ortamlar beton ve betonarme yapıların durabilitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli dış etkenlerden biridir. Bu konu ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır ve tartışmalar halen devam etmektedir.

Araştırmamızda CEM I, CEM II, CEM IV ve SDÇ çimento tipleri ve iki farklı çimento dozajı kompozisyonlarında hazırladığımız beton küp numuneleri zararlı kimyasal ortamlara ve temiz suya maruz kaldığında 28 ve 180 günlük basınç dayanımlarını C 20/25 ve C 30/37 beton sınıflarında olmak üzere incelendi. Bu çalışma Ambarlı İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinde kullanılacak beton bileşimindeki en uygun çimento türünü belirlemek için gerçekleştirildi.

Bu çalışmanın daha sonradan yapılacak bütün çalışmalara yardımcı olmasını ve yol göstermesini temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
BETON.....	4
2.1. Beton Kalitesi.....	5
2.1.1. Agrega faktörü	6
2.1.2. Çimento faktörü	10
2.1.3. Su faktörü	11
2.1.4. Üretim ve çevre şartları	13
2.2. Betonun Bozulması.....	15
BÖLÜM 3.	
BETONUN KİMYASAL NEDENLERLE BOZULMASI.....	16
3.1. Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkanması.....	18
3.2. İyon Değişirme Reaksiyonları.....	20
3.2.1. Asit saldırısı	20

3.2.2. Magnezyum iyonu içeren çözeltilerin kimyasal saldırıları....	22
3.3. Genleşen Ürünler Oluşturan Reaksiyonlar.....	23
3.3.1. Sülfat etkisi	23
3.3.2. Sülfat etkisiyle bozulma mekanizması	25
3.3.3. Değişik çimentolarla ve puzolanlarla yapılan karşılaştırmalı çalışmalar.....	28
3.3.4. Sülfat etkisi ve hasar mekanizmaları	30
3.3.4.1. Yalnızca fiziksel etki.....	30
3.3.4.2. Kimyasal etki ve ardından meydana gelen fiziksel etki.....	33
3.3.4.3. Na ₂ SO ₄ saldırısı ve etki mekanizması.....	35
3.3.4.4. MgSO ₄ saldırısı ve etki mekanizması.....	38
3.3.5. Çimento esaslı kompozitlerin sülfata karşı dayanıklılığını etkileyen parametreler.....	41
3.3.5.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu.....	41
3.3.5.2. Çimento inceliği.....	44
3.3.5.3. Mineral katkı kullanımı.....	44
3.3.5.4. /Çimento (S/Ç) oranı, çimento dozajı ve boşluk yapısı.....	45
3.3.6. Çimento esaslı kompozitlerin sülfata karşı dayanıklılığını ölçen deney yöntemleri.....	46
3.3.6.1. Boy ölçümü.....	46
3.3.6.2. Ağırlık değişimi.....	48
3.3.6.3. Basınç dayanım değişimi.....	48
3.3.6.4. Yüzeysel görünüm.....	49
3.3.7. Alkali etkisi.....	49
3.3.7.1. Alkali - Silika reaksiyonu.....	50
3.3.7.2. Alkali – Karbonat reaksiyonu.....	58
3.3.7.3. Kalsiyum ve magnezyum oksitinin (CaO, MgO) gecikmiş hidratasyonu.....	59

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	60
4.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	60
4.1.1 Çimentolar.....	60
4.1.1.1. CEM I 42.5 R.....	60
4.1.1.2. CEM II/A-P 42.5 R.....	62
4.1.1.3. SDÇ 42.5 R.....	64
4.1.1.4. CEM IV/A-P 32.5 R.....	65
4.1.2. Standart kum.....	66
4.1.3. Agregalar.....	66
4.2. Numune Hazırlama ve Malzeme Oranları.....	67
4.3. Farklı Kompozisyonlardaki Zararlı Kimyasal Ortamlar.....	69
4.4. Numunelerin Deney Metodu.....	71

BÖLÜM 5.

DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME.....	73
5.1. Basınç Dayanım Analizleri.....	73
5.2. Sonuçlar.....	80
5.3. Öneriler.....	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

PÇ	: Portland Çimentosu
KPÇ	: Katkılı Portland Çimentosu
TÇ	: Traslı Çimento
SDÇ	: Sulfata Dayanıklı Çimento
SSÇ	: Süper Sulfat Çimentosu
CÇ	: Cürüflu Çimento
TS	: Türk Standartları
mol	:Avogadro sayısı (6,02 x 10 ²³) tane
ASR	:Alkali Silika Reaksiyonu
CSH	:Kalsiyum Silika Hidrat
CH	:Kalsiyum Hidrat
CAH	:Kalsiyum Alüminat Hidrat
MSH	:Magnezyum Silikat Hidrat
ACI	:Amerikan Beton Enstitüsü
GEO	:Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
pH	:Bir çözeltilinin asitlik ya da bazlık derecesini tarif eden ölçü birimidir.Açılımı 'power of hydrogen' dir.
ASTM	:American Society for Testing and Materials.Yaklaşık 100 yıl önce kurulan Amerikan standartizasyon kurumu.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Su/Çimento oranına göre beton basınç dayanımındaki değişim.....	6
Şekil 3.1.a	Ağırlıkça %10 luk Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 150 saat bekletilen örneklerde yüzeyde tuz oluşumu.....	31
Şekil 3.1.b	Aynı süre aynı konsantrasyonda MgSO ₄ çözeltisinde bekletilen yüzeylerde tuz oluşumuna rastlanmamıştır.....	31
Şekil 3.2.a	Tenardit kristallerinin 400 kat büyütmeyle çekilmiş taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları.....	32
Şekil 3.2.b	Mirabilit kristallerinin 400 kat büyütmeyle çekilmiş taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları.....	32
Şekil 3.3.a	Tuz kristallerinin buharlaşma ile ortaya çıkışı; duvarın tabandan nem alması ve nemin taşıdığı tuzların yüzeyden suyun buharlaşması sonucu birikimi.....	32
Şekil 3.3.b	İstinat duvarının arkasından nemin taşıdığı tuzların ön tarafta suyun buharlaşması sonucu birikimi.....	32
Şekil 3.4.a	Na ₂ SO ₄ etki mekanizmasının şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.4.b	Reaksiyonların gelişimi.....	37
Şekil 3.5.	Sülfat etkisinde yüzeye yakın bölgelerde oluşan alçıtaşı bantları..	38
Şekil 3.6.a	MgSO ₄ etki mekanizmasının şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.6.b	Reaksiyonların gelişimi.....	40
Şekil 3.7.	Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genişleme değeri C ₃ A içeriği ilişkisi.....	42
Şekil 3.8.	Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genişleme değeri C ₄ AF içeriği ilişkisi.....	42
Şekil 3.9.	Na ₂ SO ₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genişleme değeri C ₃ A/C ₄ AF içeriği ilişkisi.....	43

Şekil 3.10.	Beton briketlerin sülfatlı zeminde parçalanması.....	49
Şekil 3.11.	ASR jelinin beton içinde oluşumu.....	53
Şekil 3.12.	Silisli agrega içeren bir betonun iç yapısı.....	54
Şekil 3.13.	ASR'nin neden olduğu harita çatlakları.....	56
Şekil 3.14.	ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin görünüşler.....	57
Şekil 4.1.	CEM I 42.5 R portland çimentosu.....	62
Şekil 4.2.	Deneyde kullanılan kum numunesi.....	66
Şekil 4.3.	Deneyde kullanılan agrega numunelerinin TS 706' ya göre standart granülometri eğrileri arasında gösterilmesi.....	67
Şekil 4.4.	Kalıplardan çıkarılmış C30 sınıfı beton numuneleri.....	68
Şekil 4.5.	Kalıplardan çıkarılmış C20 sınıfı beton numuneleri.....	69
Şekil 4.6.	Numunelerin bekletildiği atık su havuzları.....	70
Şekil 4.7.	Numunelerin bekletildiği zararlı ortam havuzları.....	71
Şekil 4.8.	Numunelerin basınç dayanımlarının ölçülmesi.....	72
Şekil 4.9.	Havuzlardan 6 ay sonra çıkarılan numunelerin durumu.....	72
Şekil 5.1.	CEM I türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı.....	75
Şekil 5.2.	CEM II türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı.....	75
Şekil 5.3.	CEM IV türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı.....	76
Şekil 5.4.	SDÇ türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı.....	76
Şekil 5.5.	Üç ayrı ortamda bekletilen C20 türü beton numunelerine ait 28 günlük basınç dayanımları.....	77
Şekil 5.6.	Üç ayrı ortamda bekletilen C30 türü beton numunelerine ait 28 günlük basınç dayanımları.....	77
Şekil 5.7.	Üç ayrı ortamda bekletilen C20 türü beton numunelerine ait 180 günlük basınç dayanımları.....	79

Şekil 5.8. Üç ayrı ortamda bekletilen C30 türü beton numunelerine ait 180 günlük basınç dayanımları.....	79
--	----

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Betonun dayanımı etkileyen parametreler.....	6
Tablo 3.1.	Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi.....	21
Tablo 3.2.	Betonda bozulmayı etkileyen faktörler.....	25
Tablo 3.3.	Toprak ve suda çözünebilen sülfat konsantrasyonu dikkate alınarak yapılan etki derece sınıflandırılması.....	44
Tablo 4.1.	Deneyde kullanılan CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	61
Tablo 4.2.	Deneyde kullanılan CEM II/A-P 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	63
Tablo 4.3.	Deneyde kullanılan SDÇ 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	64
Tablo 4.4.	Deneyde kullanılan CEM IV/A-P 32.5 R çimentonun fiziksel özellikleri.....	65
Tablo 4.5.	Standart Kumun Elek Analizi.....	66
Tablo 4.6.	Deneyde Kullanılan Agregaların Elek Analizi.....	67
Tablo 4.7.	1m ³ için beton karışım dizaynı.....	68
Tablo 4.8.	Deneyde kullanılan zararlı kimyasal ortamların kompozisyonları	69
Tablo 5.1.	Basınç Dayanım Analizleri Kırım Sonuçları.....	73
Tablo 5.2.	Basınç Dayanım Analizlerine Oranlanmış Bağıl Değerler.....	74

ÖZET

Anahtar kelimeler: Atık su, Beton, Durabilite

Deney programında agrega tipleri ve miktarları, su/çimento oranları sabit tutulan, değişken olarak sadece CEM I, CEM II,CEM IV ve SDC 42,5 olmak üzere dört tip çimentoyla kübik beton numuneler hazırlanmıştır. Üretilen beton sınıfları C20 ve C30 olmak üzere iki tiptir. Her bir beton sınıfı için 72 taneden toplam 144 tane; yani her bir çimento sınıfıyla 36 adet numune hazırlanmıştır. Daha sonra bu numuneler biri temiz su, ikisi farklı kompozisyonlardaki atık suyla dolu havuzlarda bekletilmiş, 28 ve 180 günlük kırım sonuçları irdelenmiştir.

Sonuçta, farklı çimento tipleriyle hazırlanan betonların atık su içerisindeki davranışları karşılaştırılmış ve bunun durabiliteye etkisi araştırılmıştır.

THE BEST FIT CEMENT SELECTION FOR CONCRETES THAT RECEIVE DESTRUCTIVE CHEMICAL MILEUS IN DIFFERENT COMPOSITIONS

SUMMARY

Key Words: Waste Water, Concrete, Durability

The cubic concrete examples are prepared with four type cements as CEM I, CEM II, CEM IV and SDÇ. The aggregate types, amounts and the water/cement rates are constant in this experiment, the only flexible thing is cement type. We have two different concrete types as C 20 and C 30. Also we have 72 examples for each concrete type and totally 144 examples. So we prepared 36 examples for each cement type. After that these examples are waited in three different pools that two of them contains different compositions waste water and the other one is clean water. Crack results are considered after 28 and 180 days later.

As a result, concretes are prepared different cement types. These concretes' state is compared in waste water and researched how to effect durability.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yapı sektöründe beton, hem ülkemizde hem de dünyada önemli yer tutmaktadır. Gelişen ve ilerleyen teknoloji, artan talepler ve bunun paralelinde doğan malzeme sıkıntısı nedeniyle malzemenin en verimli ve en iyi şekilde kullanma gerekliliği yaratmıştır. Bunun için betonun en önemli bileşeni olan çimentonun etkin biçimde kullanılması, içyapısının ve bağ özelliklerinin iyi bir biçimde analiz edilerek ve mekanik davranışının en iyi şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Betondan beklenen özellikler dayanım ve dayanıklılık (durabilite)' dir. Beton ortamında yer alan ve korozyonu etkileyen faktörler vardır. Betonun içerisindeki çelik çubuğun korozyon göstermemesi veya düşük hızda korozyon gösterebilmesi için; geçirimsiz beton üretilmesi, beton yüzeyinin su-itici kimyasal maddelerle veya uygun bir malzeme tabakasıyla kaplanması, beton üretiminde korozyon engelleyici katkı maddelerinin kullanılması, çelik donatıların yüzeylerinin epoksi veya uygun bir madde ile korunması, çelik çubukların üzerindeki beton örtüsünün (pas payının) yeterli kalınlıkta olması, katodik koruma uygulanması gibi önlemlere başvurulur.

Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan beton, hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etkenle karşılaşmaktadır.

Betonun içerisine sızan su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır.

Islanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma, aşınma ve karbonatlaşma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır. Kimyasal saldırılar sonucu betonda geçirimsizlik artar, çatlama ve dökülmelerle birlikte, beton

dayanımını kaybeder. Betonda karşılaşılan en önemli kimyasal etkiler sülfat, asit ve alkali saldırıları sonucu meydana gelir. Ayrıca atık su ve tuz etkileri de beton üzerinde önemli sorunlar oluştururlar. Bu yıpratıcı reaksiyonların çoğunda çimentodaki C_3A içeriğinin olumsuz etkisi vardır. Çünkü çimento içinde C_3A varlığıyla oluşan bazı yarı kararlı yapılar, ortama kimyasal maddelerin girmesiyle bozulur ve genleşen veya beton bünyesinden uzaklaşan yeni yapılar oluşur. Betonda yer alan kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir. Bütün bu olaylar, betonun hasar görmesine, hizmet edemez duruma gelmesine yol açmaktadır.

Betonun dayanıklılığına etki eden ve bozulmasına yol açan başlıca prosesleri sülfat etkisi, donatı korozyonu, alkali-agrega reaksiyonları, karbonatlaşma ve normal veya asidik sular vasıtasıyla süzülme etkisi olarak sıralamak mümkündür. Bunlar arasında sülfat etkisinin zarar verme potansiyeli diğerlerine oranla daha yüksektir. Sülfatların betona olumsuz etkileri vardır. Sertleşmiş beton içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, betonun genleşip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Sülfat hücumuna maruz kalan betonların yüzeyi beyazımsı bir görünüm almaktadır.

Portland Çimentosu ve Sülfata Dayanıklı Çimento betonları zeminler, yeraltı suları, deniz suları ve atık sularda bulunması mümkün olan sülfat tuzları eriyiklerinin etkisine maruz kalabilirler. Söz konusu etkinin hızı ve derecesi sülfat tuzunun katyon cinsine (ör. Na^{+1} , Ca^{2+} , Mg^{2+}), ortamda su bulunmasına betonun çimento ve puzolan kompozisyonuna, en başta geçirimsizlik olmak üzere, çeşitli beton özelliklerine bağlıdır. Sülfat etkisi zaman içinde betonda dayanım kaybı, hacim genleşmesi, çatlama, yumuşama, pullanma ve tabakalaşma gibi bozulmalara yol açar. Sonuçta, sertleşmiş çimento hamurunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler betonun bütünüyle kullanılamaz duruma gelmesine yol açarak durabilitesini olumsuz etkiler.

Atık suyun etkisi, genel olarak zemin, deniz ve yeraltı sularından kaynaklanan sülfat etkisinden farklı olarak ele alınmakla birlikte, içerdiği yüksek sülfat konsantrasyonu nedeniyle atık su etkisini de sülfat etkisi olarak ele almak mümkündür.

Sülfat etkisini önleyici ve azaltıcı bazı önlemleri sülfata dayanıklı çimento kullanılması, düşük su-çimento oranı kullanılması, çimento miktarının azaltılması, hava sürüklenme, su geçirimsiz yüzey kaplamaları, su tahliyesi, pas payı kalınlaştırılması, puzolanik malzemeler kullanılması vb. olarak sıralamak mümkündür.

Sülfatların zararlı etkisini azaltmak veya önlemek amacıyla C_3A miktarı düşük çimento kullanımı ve/veya puzolan kullanımı bugüne kadar bir çok araştırmanın konusu olmuştur.

Puzolanlar çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldıklarında, bu yandan çimentonun C_3A miktarında azalmaya, diğer yandan da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek daha fazla çimentolaşabilen malzemeler oluşturup çimento hamurunun porozitesinin azalmasına yol açarlar. Böylece, meydana gelen kimyasal ve fiziksel değişiklikler betonun sülfat direncini artırır. Ayrıca kullanılan çimento tipi de bu davranışı etkiler.

Böyle bir araştırma yalnız farklı çimento tiplerini değil, farklı sülfat tiplerini, sülfat eriyiği tiplerini, asit tiplerini, C_3A miktarlarını, su-çimento oranlarını, dayanım ve kütle değişimlerini, olgunluğu vb. de dikkate almalıdır. Bu düşünceden hareketle, uzun süreli ve kapsamlı bir araştırma yapılması kararlaştırılmıştır.

Araştırma yöntemi farklı numunelerin birden fazla farklı kompozisyonlardaki kimyasal ortamlara maruz kalmasını içermelidir. Bunun sonucu olarak hangi çimento tipinin atık su için en uygun olacağına karar verebiliriz.

BÖLÜM 2.BETON

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

Betonun mutlak hacmini %70 oranında agrega (kum, çakıl, mıcır), %10 oranında çimento, % 20 oranında su oluşturur. Gerektiğinde, çimento ağırlığının %5'sinden fazla olmamak kaydıyla, katkı malzemesi ilave edilebilir.

Betonu günümüzün en yaygın taşıyıcı yapı malzemesi yapan özellikleri şöyle sıralamak mümkündür :

- Ucuzluğu,
- Bilgisayar kontrollü santraller, transmikserler, pompalar... vb. ile üretim, taşıma ve yerleştirme aşamalarında büyük gelişmelerin sağlanmış olması,
- Şekil verilebilme kolaylığı,
- Çelik donatı ile (betonarme) çekme mukavemetinin yetersizliğinin dengelenmesi
- Yüksek basınç dayanımlarına ulaşılması
- Fiziksel ve kimyasal dış etkilere karşı dayanıklılığı (uzun ömür, bakım kolaylığı),
- Hafif agrega ile hafifletilmesi, pigmentlerle renklendirilmesi

Mühendis, tasarlayacağı her yapı elemanını boyutlarken, bunların dış etkilere karşı dayanmasını sağlamak durumundadır.

Dış kuvvetlerin tesiri altında kalan yapı elemanlarında bir takım şekil değişmeler ve iç kuvvetler (gerilmeler) meydana gelir. Birim alana gelen iç kuvvet tanımına göre normal gerilme, kayma gerilmesi, eğilme, burulma, burkulma gibi zorlanmalara maruz kalır. Taşıyıcı elemanlar öz ağırlık, servis yükleri, deprem ve rüzgar

kuvvetlerinin etkileri altındaki bu zorlanmalara göre hesaplanır, tahkik edilir ve boyutlandırılırlar. Bu mekanik etkilere göre yapıların dayanımları sağlanmış olur.

Durabilite özelliği ise yapının kullanım sırasında hava koşullarına, kimyasal etkenlere, aşınmaya ve diğer yıpratıcı etkenlere karşı dayanıklılık gösterme (dayanma) kabiliyetidir.

2.1. Beton Kalitesi

Beton, agrega adını verdiğimiz kum, çakıl, mıcır gibi taneli mineral malzemenin, onları bağlayıcı çimento ve su ile karıştırılması sonucu meydana gelir. Bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla kimyasal sıvı veya mineral katkıları da ilave edilebilmektedir.

İnşaat sektöründe en çok kullanılan ve kompozit bir malzeme olan betonun kendisini oluşturan malzemelerin özellikleri ile karışım oranları, beton kalitesine etki etmektedir. Betonun dayanımını etkileyen parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir. Bunlara göre beton kalitesini artırıcı önlemler aşağıda verilmiştir[1].

Tablo 2.1. Betonun Dayanımını Etkileyen Parametreler

DAYANIMI ETKİLEYEN PARAMETRELER		
AGREGA	ÇİMENTO	SU
1.Tane Dağılımı (granülometrisi) 2.Yüzey Pürüzlülüğü 3.Tane Şekli (kübik) 4.Taş Yapısı (mineralojik ve petrografik yapı) a)Tane dayanımı b)Kile dönüşme özelliği c)Çimento ve çevre etkileriyle kimyasal reaksiyon özelliği d)Çimento hamuru ile aderansı (arayüzey) 5.Yabancı ve İnce Madde İçeriği (temizliği)	1.İncelik 2.Depolama Şartları (nemlenmemeli) 3.Çimento Türü (PÇ,KPÇ,TÇ,SDÇ,SSÇ,C Ç,..) 4.Normal Dayanımı (kalitesi) (PÇ 32.5 – PÇ 42.5) 5.Doç (miktar) 6:Mineral Katkıları (silis dumanı,uçucu kül,tras gibi diğer puzolanlar)	1.Su / Çimento Oranı 2.Suyun Kalitesi ve Uygunluğu
ÇEVRE ŞARTLARI	BETON KOMPASİTESİ	ÜRETİM,DÖKÜM,BAKIM ŞARTLARI
1.Karbonatlaşma 2.Tuz Etkisi (deniz suyu ve deniz kumu) 3.Sülfat Etkisi a)Zeminle temel irtibatı b)Yer altı suyu ile teması (temas suyu) c)Karışım ve bakım (kür) suları d)Alkali – agrega reaktivitesi e)Klor etkisi ve asidik ortam oluşturarak donatı korozyonu	1.İyi Yerleştirme (vibrasyon) 2.Kil Oranı,Su Miktarı ve Agrega Şekli 3.Akışkanlaştırıcı veya Geçirimsizlik Katkı İlavesi	1.Karışım Malzemelerinin Ölçümü 2.Betoniyerde Karıştırma 3.Taşıma 4.Kalıba Yerleştirme ve Sıkıştırma 5.Bakım ve Koruma (su veya buhar kürü)

2.1.1. Agrega faktörü

Agrega beton hacminin yaklaşık % 70-75'ini oluşturur ve doğal, yapay ve her iki cins yoğun mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve / veya kırılmış tanelerin yığını olarak tanımlanır. Tane boyutu 4 mm' den küçük olanlara ince agregaya veya kum, 4 mm' den büyük olanlara iri agregaya veya çakıl denir.

Agrega; suyun etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile zararlı reaksiyonlar meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir. Agreganın kullanım yeri ve amacına göre granülometrisi (uygun tane dağılımı), tane şekli, tane dayanımı, aşınma dayanımı, dona dayanıklılığı, birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığı ile içerebileceği ince ve zararlı maddeler bakımından TS 706 ve ilgili standartların gereğini yerine getirmelidir. Böylece beton uygun şartları sağlamalıdır.

Literatürde fiziko-mekanik özellik bakımından beton agregalarına ait kriterlerin şöyle olduğu görülmüştür:

Normal agregaların özgül ağırlıkları genellikle 2,5-2,8 g/cm³'dür. Özgül ağırlığı 2 g/cm³'den küçük olanlar iri hafif agregalar olabilmektedir.

Birim hacim ağırlıkları; agreganın granülometrisi, gözenekliliği, kusurlu tane oranı, yerleştirme şekli ve özgül ağırlığı gibi değişik faktörlere bağlı olarak, değişmektedir. Bu değerler genellikle tüvenan malzemede 1.5-1.85 g/cm³, kırmataşlarda 1.35-1.50 g/cm³'dür. Bazı deneylerde kum için gevşek 1.52; sıkışmış 1.68 g/cm³; çakıl gevşek 1.53-1.59; sıkışmış 1.65-1.75 g/cm³ bulunmuştur.

Agregaların su emme özelliği tanelerinin türüne, yapı ve dokusuna, çimentolaşma türüne, tanelerin boyutu ve gözeneklilik durumuna, maruz kaldığı fiziksel ve kimyasal ayrışma şiddetine ve granülometrisi ile ince madde miktarına bağlı olarak değişmektedir. Ancak uluslararası standartlarda su emme yüzdesinin en fazla % 3 olması belirtilmiş, yerli literatürde % 10 dolaylarında bulunmasının doğal olduğu söylenmiştir.

Agrega tanelerinin şekli mümkün oldukça küresel ve kübik biçimde olmalıdır. Tanenin en büyük boyutunun en küçük boyutuna oranı 3'ten büyük olan tanelere şekilce kusurlu taneler denir. Bunlar yassı (disk) ve uzun (bağet) olarak bulunabilirler. TS 706'ya göre 8 mm' nin üzerindeki iri agregalarda kusurlu tanelerin oranı ağırlıkça % 50'den çok olmamalıdır.

Agreganın tane dayanımı taşın cinsi ile ilgilidir. Kırmataşlarda taşın basınç dayanımı min. 1000 kg/ cm² olması durumunda başka deneye gerek kalmamaktadır. Aksi durumda ve diğerleri için bilyalı tamburla (Los Angeles deneyi ile) aşınmaya dayanıklılığı tespit edilir. 100 dönüş sonunda ağırlıkça % 10'dan, 500 dönüşte % 50'den az ufalanma (kayıp) olursa yeterli kabul edilir.

Agreganın dona dayanımı Na₂SO₄ çözeltisi ile yapılan deneyde kum için % 15, çakıl için % 18'den az kayıp vermişse veya Mg SO₄ çözeltisi ile yapılan deneyde kum için % 22, çakıl için % 27'den az kayıp vermişse yeterli sayılmaktadır.

Agregada yıkanabilir maddeler, ince halde dağılmış olarak kil toprakları halinde veya iri tanelere yapışık olarak bulunabilir. Bu maddeler kil, silt ve çok ince taş unudur. Genellikle kil olarak anılır.

Özellikle tüvanan agregalar yıkanarak kil kirliliğinden arındırılmalı, eleme sistemlerinden geçirilerek uygun karışımlarla granüler hale getirilmelidir. TS 706'da izin verilen max kil miktarları: Kumlarda % 4; Çakıllarda % 2'dir.

Beton agregalarında fazla miktarda kil bulunmasının şu sakıncaları görülmüştür:

Karışım suyunun artmasına yol açmakta ve priz süresini etkilemektedir (hidratasyonu geciktirmektedir).

İri tanelere yapışık olması durumunda çimento hamuru ile agrega ara yüzeyi arasındaki aderansı bozmakta, yük etkisinde betonun bu arayüzeyden çatlamasına yol açmaktadır.

Agregada topraklar halinde bulunursa yüzeylerine kumlar yapıştığı için çakıl sanılırlar. Bunlar betonarme elemanın içinde boşluk gibi davrandığı için kesit zayıflamasına yol açarlar. Zamanla bünyesine su işledikçe hacim genişlemesi yaparak betonu çatlatırlar.

Çimento bileşenleri ile bazı kil türleri zararlı kimyasal reaksiyona girerek ayrılmaya ve bünyesine su alarak genleşme şeklinde betonun parçalanmasına sebep olabilirler.

Bu olumsuz etkileri sebebiyle beton agregalarında varlığını tanımlayabilmek için killerin oluşumu, çeşitleri ve bazı özellikleri hakkında da bilgi sahibi olmak gerekmektedir.

Kili oluşturan ana eleman (Al) içeriği yüksek olan minerallerdir. Bu minerallerin başında kaolin gelmektedir. Halloysit, illit ve montmorillonit de kilin bünyesinde bulunabilir. Montmorillonitin ana bileşen olması halinde kayaç, bentonit olarak isimlendirilir. Killerin fiziko-kimyasal özellikleri farklı olmaktadır. Su emme kapasitesi, ayrışma ve bozuşma özellikleri hep farklıdır. Bizzat kil minerallerinin; montmorillonit, illit, sepolit, kaolen, kaolinit, bentonit, biyotit, vermikulit gibi onlarca çeşiti bulunmaktadır. Genişleyen kafesli montmorillonit grubu killer su alınca hacminin 6-7 kat artması sebebiyle betonda tehlike oluşturabilmektedir.

Agrega yığını tane dağılımı bakımından, max. tane çapına göre TS 706'da belirlenen uygun bölgede eğri vermelidir. Çakıl yük etkilerini karşılar, kum ise çimento ile birlikte boşlukları doldurarak sıkı beton oluşmasını sağlar. Bu sebeple her tane büyüklüğünün uygun miktarda olması için gradasyon yapılarak beton kompozitesinin % 80'i aşması sağlanmalıdır. Agregaya yüzey pürüzlülüğünün de dayanıma etkisi önemlidir. Parlak, yuvarlak ve düz yüzeyli dere çakıllarının çimento hamuru ile iyi aderans yapamayacağı ve yük etkilerinde ara yüzeyde sıyrılma yapacağı unutulmamalıdır. Yüzeyi pürüzlü ve kırmataş karışımı agregalarda aderansın yüksek olduğu kanıtlanmıştır.

Betonda kullanılacak agreganın mineralojik-petrografik incelemesi yapılmalıdır. Görünüşüne, esas taşın kökenine ve varsa kokusuna göre değerlendirilmelidir. Tuz yatakları; Kurşun, Çinko, Jips veya anhidrit yatakları; selüloz ve şeker fabrikaları gibi bazı sanayi bölgelerinin yakınından elde edilmesi durumunda kirlilik hususunda incelenmelidir. Zararlı maddelerin ve kayaçların zararlı miktarda bulunduğu tespit edilirse yıkanıp temizlenmeli ve deneyler sonucunda kullanılabilirliğine karar verilmelidir. Aksi durumda bu tür agregaların kullanımı yasaklanmalıdır. Jips (sülfat) bileşiklerinin yanı sıra beton agregalarında istenmeyen önemli kayaç ve mineral türleri de feldispatlar ve mikalardır. Potasyum Alümin silikat (ortoz) ile

sodyum ve kalsiyum alümino silikat (plajioklaz) türlerindeki feldispatlar kolay bozularak altere olurlar, kile dönüşürler. Biyotit, klorit, serizit ve muskovit türleriyle mikalar düzgün plakalar halinde olması, ince bölünürlük göstermesi, çakıl yüzeylerinde kil gibi tabaka oluşturması, erken prizlenmeye yol açması gibi sebeplerle beton dayanımını azaltabilmektedir.

Çakmaktaşı, kumtaşı, bazalt, opalinli kaya kökenli agregalarda bulunabilecek opal, tridimit, kristobalit gibi aktif silisler, çimento bileşiminde serbest bulunabilen alkaliler (Na_2O ve K_2O) ile kimyasal reaksiyona girerek çok büyük genişleme kapasitesine sahip alkali-silis jellerinin oluşmasına yol açarlar. Alkali-agrega reaksiyonu sonucu oluşan bu genişlemeler sertleşmiş betonun çatlamasına sebep olurlar[1]. Bu sebeplerden dolayı şüpheli durumlarda mineralojik-petrografik incelemeler yaptırılarak bu zarar verici durumlar tespit edilmeli ve o agregaların kullanımı önlenmelidir. Agregalarda herhangi bir sebeple karışan sülfat miktarı % 1'den, nitratlar ve klorürler % 0,2'den fazla olmamalıdır. Çimento bileşimindeki fabrikasyon hatası olarak bulunabilen alkali miktarı % 0,6'yı geçmemelidir.

2.1.2. Çimento faktörü

Gerek beton kalitesi bakımından proje dayanımının sağlanması için, gerekse zararlı etkilere maruz kalan beton elemanların bozulmasını önlemek için uygun çimento seçiminin yapılması zorunludur. Sülfatlı ortamlarda sülfata dayanıklı çimento (SDÇ), süper sülfat çimentosu (SSÇ) gibi özel üretimler tercih edilmeli ya da Portland çimentosuna yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül gibi mineral katkıları ilave edilmelidir. Böylece diğer koruyucu şartları da yerine getirerek betonarme yapıda durabilite sağlanabilmektedir. Çimento çeşidinin dayanıma etki etmesi gibi norm dayanımı da önemlidir. Daha yüksek norm dayanımına sahip çimento ile üretilen beton, diğer şartlar da sağlanmak suretiyle yüksek dayanım kazandırmaktadır. Yüksek normda olan PÇ 42,5 çimentosu ile üretilen betonun, düşük norm dayanımlı KPÇ 32,5 çimentosu ile üretilen betondan daha mukavemetli olduğu kanıtlanmıştır. Benzer şekilde çimento miktarı da etkindir.

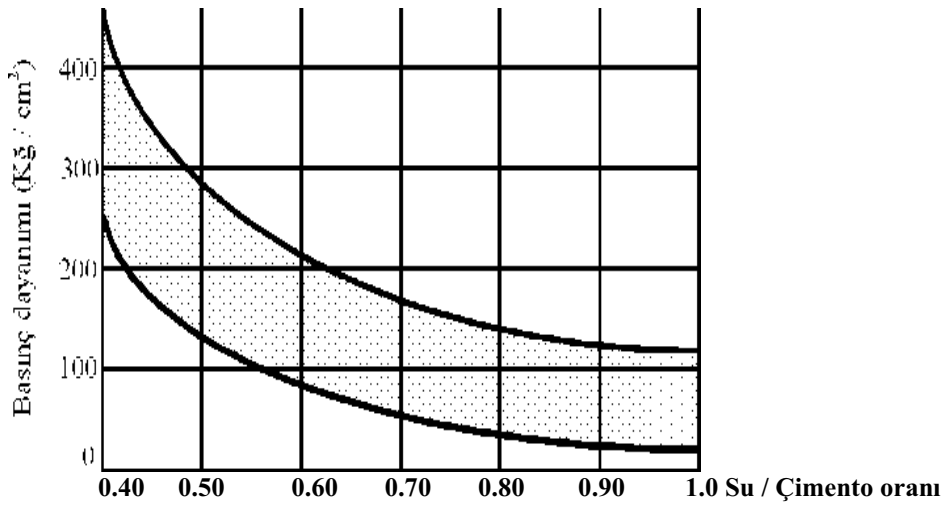
Yüksek dozlu betonun dayanımı da düşük dozlu betondan daha fazla olmaktadır. Normal betonarme yapılar için en düşük doz 300 kg'dır. Çok katlı yapılar, sanayi yapıları, su yapıları gibi önemlilik arzeden durumlarda ise en düşük doz 350 kg alınmaktadır. Çimento miktarı ile dayanım arasında doğrusal bağlantının varlığı gözlenmiş, ancak çimento miktarının fazlalaşmasının rötreye neden olduğu ve bunun da dayanımı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. O bakımdan agregaların maksimum tane çapına, boşluk oranına, tanelerin şekli ve yüzey pürüzlülüğü gibi kriterlere göre çimento miktarı denenerek tespit edilmelidir. İncelik ve depolama şartları da dayanım için önemli faktörlerdendir. Klinker öğütülerek 90-6.5 μ arasında değişen tanelere dönüştürülmektedir. Çimento tanelerinin bundan daha büyük olması hidratasyona ve dayanıma olumsuz yönde etki eder. Çimentonun şantiyede depolanması sırasında nemlenmesi ya da 4-5 sıradan fazla üstüste yığılıp uzun süre bekletilmesi sonucu oluşan taşlaşmalar, bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına ve geç prizlenmeye yol açmaktadır. Taşlaşan çimento parçacıkları hidratasyona giremediği için beton içinde boşluk gibi davranıp, yapıda yük etkisiyle o bölgede çatlamalara sebep olur. Çimento tanelerinin tek tek su zerreciği olarak hidratasyona girmesi gerekirken, bir çok tane birleşerek etrafına su zarı oluşturarak kümeleşme sonucu içine su işleyememektedir. Flokülleşme denilen bu olayda içte reaksiyon tamamlanmadan su fazlalığı yüzeye çıkarak terleme oluşturmaktadır. Beton yüzeyinde biriken suyun hava şartlarında buharlaşması sonucu rötreye (kılcal çatlamalara) yol açmaktadır.

2.1.3. Su faktörü

Suyun betonla ilişkisi dört ana başlıkta sıralanabilir :

- 1) Çimento ve agregalarla birlikte harç ve betonun karılmasında karışım suyu,
- 2) Kalıba yerleştirilmiş olan betonun bakım safhasında sulama ve kür suyu,
- 3) Beton agregalarının kil ve yabancı madde kirliliğinden arındırılmasında, betonu karıştırma ve taşıma araçlarının yıkanıp temizlenmesinde yıkama suyu,
- 4) Yeraltı su seviyesi yüksek bölgelerde binanın betonarme temellerine zararlı etki yapabilecek agresif temas suyu.

Betonun dayanımı ve kıvamı kullanılan çimento ve agreganın cinsine göre değişebilir. Geçirimsizlik ve donatıyı paslanmaktan korumak için çimento dozajının belirli bir miktardan az olmaması gerekir. Ancak hiçbir zaman unutulmamalıdır ki, dayanım dozaja değil su/çimento oranına bağlıdır. Çeşitli deneyler arasında farklar görüldüğünden dayanım ve su/çimento oranı arasındaki ilişki tek bir eğri yerine bir bant olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Su / Çimento oranına göre beton basınç dayanımındaki değişim

Betonun kalıba iyi yerleşmesini sağlamak, işlenebilirlik özelliğini kazandırmak şantiye mühendisinin amacıdır. Normal betonlar için su/çimento oranının %45-55 arasında tutulmasıyla iyi sonuç alınabilmesinin mümkün olduğu deneylerden anlaşılmıştır. Bu oranın daha yüksek olması hidrasyon ve jel yapısı için gereken ve reaksiyona giren su miktarından artakalan kısmının ilerde buharlaşarak bünyede kılcal boşlukların oluşmasına yol açacak ve dayanımı düşürecektir. Şekil 2'deki eğrilerin incelenmesi ile % 10 oranında su artırımının dayanımda %20-30 mertebelerinde azalma oluşturacağı görülebilmektedir. Akıcı kıvamda beton üretmek ve iyi yerleşmesini sağlamak için kesinlikle su miktarını artırmamalı, bunun için akışkanlaştırıcı katkı maddesi karıştırılması yoluna gidilmelidir. Normal şartlarda su miktarını çok azaltarak katı kıvamda beton üretmek de, katı kıvamda işlenebilirlik özelliği olmayan bir beton kalıba iyi yerleştirilemediği için oluşacak büyük boşluklar nedeniyle mukavemeti düşürmektedir. Bu sebeplerle su miktarını ayarlamak beton üretiminin en nazik, en zor, en önemli problemi olmaktadır. TS 802 standardı veya benzeri

bilimsel çalışma sonucu oluşan literatürle karışım malzeme miktarları tespit edilebilmektedir. Ancak ortam özellikleri göz önüne alınarak laboratuarda bu teorik karışım denenmeli, istenen kıvamı ve dayanımı sağladığı görüldükten sonra karar verilmelidir. İstenen çökme değeri sağlanana kadar su ayarlaması yapılmalı, gerekirse hesaplar yenilenmeli, buna göre gerçek miktarlar bulunmalıdır. Karışım hesabı kuru agregalarla yapıldığı için şantiyede de agrega yığınının kuru olması gerekir. Ancak mevsim şartlarına göre kışın ıslak olması durumunda, su muhtevası tespit edilerek karışım suyu bu kadar azaltılmalıdır. Yaz aylarında agregaların, karışım ve taşıma araçlarının ısınmış olması sebebiyle karışım suyu miktarının bir bölümü buharlaşmakta, plastik kıvam amaçlanmışken katı kıvam elde edilmesine yol açmaktadır. Bunu önlemek için de agrega ağırlığının % 20-25 oranında ya da agreganın su emme oranı kadar bir ıslatma suyu ile ortamın ve agrega yüzeyinin ıslatılması gerektiği deneylerle gözlenmiştir.

Beton karışım suyu, kullanma ya da içme suyu niteliğinde olmalıdır. Sülfat bileşikli, tuz bileşikli ya da betonu bozucu yabancı maddeler içeren özellikte olmamalıdır.

2.1.4. Üretim ve çevre şartları

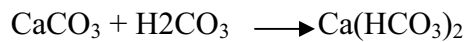
Taze hazırlanmış betonun pH derecesi 12.5 civarında olup bazik ortamdadır. Gerek dış ortamın zararlı kimyasal etkileri ile gerekse priz hızlandırıcı olarak kullanılan klorürlü katkıları etkisiyle pH derecesi azalarak asidik ortam meydana gelmektedir. Asidik ortam ve o kesitte elektriksel iletkenliğin yükselmesi, donatının korozyonuna sebep olacaktır. Çelik donatı paslanırken hacmini arttıracığı için nüfuz eden klorürlerin etkisi daha da artacak, meydana gelen gerilme beton örtüyü çatlatacak, böylece koroziv bölgenin büyük ölçüde yayılmasına yol açacaktır.

Karbonatlaşma olarak bilinen zararlı etki ise hava kirliliği olarak atmosferde bulunan karbondioksit'in çimento bileşimindeki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturmasıdır. Yüzeyde oluşan bu reaksiyon betonun içine yıllarca nüfuz eder. Yüzeydeki sertleşme ve kabuklaşma, betonun bu bölgelerinde ek gerilmeler oluşturur ve çatlamalara, yarılan beton örtününün atılmasına sebep olur.

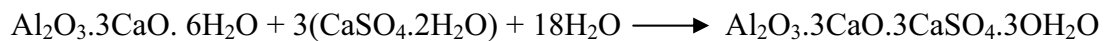
Prefabrike beton yapı elemanları üretiminde buhar kürüne tabi tutuldukları için karbonatlaşma rötresi meydana gelmektedir. Priz ve sertleşme aşamasında ortamda mevcut karbondioksit gazlarının beton bünyesine difüzyon yapmaları sonucu iç yapıda bazı karbo-alüminatlar teşekkül etmektedir. Bu olayın bir büzülme ile meydana geldiği gözlenmiştir.

Bazı çalışmalar sonucunda "hata sonucu çimento içinde önemli miktarda serbest CaO, MgO ve SO₃ bulunursa, bu maddeler suyla birleşerek hacim artışına neden olurlar ve beton parçalanır" denmiştir.

İkinci bir etki olarak taze betonda karışım suyu içinde fazla miktarda çözülmüş karbondioksit bulunması durumunda su ile karbonik asiti, CaO ile kalsiyum karbonatı oluşturduğu belirlenmiştir. Ortamda fazla olan karbonik asit kalsiyum karbonatı da kalsiyum bikarbonata dönüştürerek çözündürmekte ve betonu ayrıştırmaktadır :

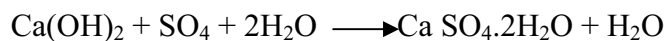


Üçüncü önemli etki, karışım ve temas suyu olarak sülfatlı suların çimento üzerine zararlı etkisidir. Hidratlaşmış trikalsiyum alüminat üzerine suda çözülmüş kalsiyum sülfat tuzu etki yapmaktadır :



Reaksiyon sonucu meydana gelen 30 mol. sulu Candlot tuzu hacim büyümesine yol açar. Sonuçta iç basınca dayanamayan eleman çeşitli zayıf noktalardan patlama yapar.

Dördüncü etki de, sülfatça zengin suların çimentodaki kalsiyum hidroksit üzerine etkisi olarak belirlenmiştir:



reaksiyonu sonucu oluşan jips, hacim genişlemesine yol açar ve beton zarar görür.

Betonunu iyi sıkıştırılmaması ve boşluklu olması, iyi korunmaması, bilinçsiz katkı kullanımı, yalıtım yapılmaması gibi durumlar da bu tür zararlı etkileri artırmış olmaktadır. Prizini tamamlamamış veya yeni dökülmüş betonlar, dış etkilere karşı çok duyarlı olduklarından zararlı kimyasal etkilere dayanıklılıkları yeterli düzeye ulaşmaya kadar direkt etkilerden korunmalı ve bu konuda yapısal önlemler alınmalıdır. Zararlı etkiler karşısında kalacak betonlarda uygun malzeme kullanımı, uygun üretim ve iyi yerleştirme sağlandıktan sonra, zararlı çevre etkileri ile betonun doğrudan temasını önlemek amacıyla uygun yalıtım ve koruma önlemleri de alınmalıdır. Bu amaçla fırça ile uygulanan bitüm esaslı yalıtıcılar, bitüm ile doyurulmuş kartonlar, keçeler ve yalıtım pestilleri kullanılabilir. Oluşturulan yalıtım tabakaları en az üç kat olarak beton yapı elemanlarının yüzeyine tam ve iyi yapışacak nitelikte olmalıdır. Geçirimsizliği bozacak çatlak bulunduran yapı elemanlarının zararlı etkilerden korunabilmesi için kil veya kireç taşından oluşturulan bir koruyucu perde katmanı düşünülebilir. Yapının temel ve subasman kısımlarında beton kesitinin büyütülmesi ve pas payının artırılması, donatı aralığı büyük tutularak betonun kolayca geçmesi ve iyi sıkılaşmasının sağlanması en ekonomik ve uygun çözüm yolu olabilmektedir.

2.2. Betonun Bozulması

Betonarme yapıların hemen tamamı az veya çok agresiv etkilere maruz kalmaktadır. Üretilen betonun, diğer yapılarda olduğu gibi betonarme yapılar için de, üretim öncesi hedeflenmiş özelliklerini zamanla yitirmemesi ve çevre şartlarına karşı dayanıklı olması, istenilen çok önemli bir özelliktir. Betonun bozulma nedenlerini fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç grupta toplayabiliriz. Bu çalışmada farklı kimyasal ortamlar deneyeceğimizden dolayı betonun kimyasal nedenlerle bozulmasını inceleyeceğiz.

BÖLÜM 3. BETONUN KİMYASAL NEDENLERLE BOZULMASI

Betonda ortaya çıkan zararlı kimyasal reaksiyonlar kendini, betonun gözenekliliğinin ve geçirimsizliğinin artması, çatlamlar, dökülmeler, kapak atmalar ve betonun yumuşaması, dayanımı ve rijitliğini kaybetmesi şeklinde gösterir. Betonun hasar görme derecesinin artışıyla bozulma süreci hızlanır. Pratikte beton birçok kimyasal etkiye aynı anda maruz kalabilir ve bu etkiler bir diğerini ortaya çıkarabilir veya şiddetlendirebilir.

Betonun kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla bozulması sürecinde, zararlı maddelerin (iyon veya molekül) çoğunlukla çevreden beton bünyesine taşınımı söz konusudur. Bazı hallerde zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Bu durumda dahi zararlı maddeler reaksiyona girecekleri yere taşınırlar. Madde transferi olmadığı takdirde zararlı reaksiyonlar gelişemez. Dolayısıyla beton bünyesinde kimyasal reaksiyonların oluşması için ön koşul taşınmayı sağlayan su veya su buharının varlığıdır. Zararlı maddeler ve betonun reaktif bileşenleri arasındaki reaksiyon gerekli ortam oluşunca hemen başlar. Ancak genelde, beton bünyesi içinde veya yüzeyden içeri taşınım hızı oldukça yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra ortaya çıkabilir.

Kimyasal reaksiyonların gelişimi, büyük ölçüde zararlı maddelerin beton bünyesine taşınım hızına dolayısıyla betonun geçirimsizliğine bağlıdır. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, sıcaklık reaksiyon hızını arttıran bir faktördür. Bunun nedeni sıcaklığın iyon veya moleküllerin hareketliliğini arttırmasıdır. Kimyasal reaksiyonlar değişik tiplerde oluşabilir ve çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenlerle bir arada ve peş peşe gelişip betonun bozulmasına neden olurlar. İyi bir şans eseri uygulamada kullanılan beton veya betonarme yapı elemanlarının yalnızca küçük bir kısmı ciddi kimyasal etkilerle karşılaşır. En çok karşılaşılan kimyasal saldırılar

sülfat, asit ve alkali saldırılarıdır. Deniz suyu ve tuz etkileri de önemli kimyasal ve fiziksel etkileri olan saldırı kaynaklarıdır.

Betonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı konusunda çeşitli fiziksel ve kimyasal deney yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak henüz bu deneylerin çoğu tüm bilim çevrelerince kabul edilecek düzeyde standardize edilmemiştir. Burada önemli olan, uygulamada uzun sürede gerçekleşen olayları, laboratuvar ortamında kısa sürede aslına benzer şekilde gerçekleştirebilmektedir. Olayı hızlandırmak için çoğunlukla zararlı maddelerin konsantrasyonu artırılır. Ancak zararlı maddenin dozajını ayarlamak önemlidir. Örneğin, konsantre asit eriyiklerinde tüm çimentolar erir. Düşük konsantrasyonlarda ise zararlı etki uzun süre ortaya çıkmayabilir. Bu nedenle sonuçları yorumlamak oldukça zordur. Ancak bu deneyler kıyaslamalı araştırmalar için çok yararlıdır.

Kimyasal reaksiyonlar sonucu bozulmasının engellenmesi için değişik boyutlarda önlemler alınabilir. Bunları kısaca özetlemek olanaklıdır: Kimyasal reaksiyonlar değişik transfer mekanizmaları ile geliştiğinden, zararlı maddelerin beton içinde taşınımını engellemek gerekir. Taşınım su veya su buharı vasıtasıyla gerçekleştiğinden, suyun varlığını engellemekle sorun çözülebilir. Ancak bu durumu uygulamada gerçekleştirmek oldukça zordur. Çünkü havanın neminde bile su vardır. Kimyasal saldırının etki derecesine ve türüne bağlı olarak alınacak önlemler de farklılık gösterir:

- 1) Kimyasal etki zayıf ise geçirimsiz bir beton üretmek suretiyle sorun çözülebilir.
- 2) Kimyasal etki orta şiddette ise geçirimsiz bir beton üretiminin yanı sıra, beton üretiminde kullanılan malzemelerde değişikliğe gidilebilir. Örneğin, sülfata maruz kalacak betonda sülfata dayanıklı çimento kullanılabilir.
- 3) Kimyasal etki şiddetli ise bu durumda (2) maddesinde sözü edilen önlemlere ek olarak, yapıyı dıştan izole etmek gerekir.

Genelde betonun kalıcılığı kullanılan çimento tipine göre değişir. Çimentoların kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı aşağıdaki sıralamaya göre artmaktadır:

- 1) Normal ve hızlı dayanım kazanan Portland çimentoları

- 2) Curuflu Portland Çimentosu veya düşük hidrasyon ısıklı Portland Çimentoları
- 3) Traslı Çimentolar
- 4) Sülfata dayanıklı çimentolar
- 5) Süper sülfat çimentoları
- 6) Alüminli çimento

Ancak bu sıralama diğerk etkenlerin aynı kalması koşuluyla geçerlidir.

Betonun bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyonları üç ana grupta toplamak mümkündür:

Grup Reaksiyonlar düşük sertlikteki suların çimento hidrate bileşenlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde gelişir.

Grup Reaksiyonlar agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesidir. Reaksiyon ürünleri ya yıkanarak uzaklaşır ya da suda çözünmeyen yeni bir yapı oluşturur. Asitlerin ve Mg iyonu içeren suların oluşturdukları hasarlar bu tür reaksiyonlara örnektir.

Grup Reaksiyonlar genişleyen ürünler oluşturarak betonda hasara yol açarlar. Sülfat etkisi MgO ve CaO gibi çimento bileşenlerinin gecikmiş hidrasyonları, alkali silika reaksiyonu (ASR), beton içine gömülü çelik donatının korozyonu bu tür bozulmaların en tipik örnekleridir.

3.1. Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkınması

Önceki bölümlerde söz edildiği gibi, hidrate çimentonun katı fazını göreceli olarak çözünmeyen kalsiyum hidratlar (CSH, CH ve CAH) oluşturmaktadır. Bu bileşenler pH'ı oldukça yüksek olan gözenek suyu içinde kararlı durumdadır. Gözenek suyu içindeki Na^+ , K^+ ve $(OH)^-$ iyonları betonun pH değerini 12.5-13.5 aralığında tutmaktadır. Buradan çıkarılabilecek doğal sonuç, betonun asidik ortamla karşılaştığında kimyasal kararlılığını kaybedeceğidir. Teorik olarak pH'ı düşük sular çimento

hidrate bileşenlerinin çözülmesine yol açar. Bu açıdan bakıldığında birçok endüstriyel atık ve doğal su beton açısından saldırgan kabul edilebilir. Ancak, kimyasal saldırının şiddeti sıvının pH değeri ve betonun geçirimliliğinin fonksiyonudur. Sıvının pH değerinin 6.5'in üzerinde olması ve betonun geçirimliliğinin çok az olması halinde kimyasal saldırı çok yavaş gelişir ve sonucu ihmal edilebilir mertebelerde kalabilir. Özellikle sülfat ve klor iyonları içeren yer altı suları, atık sular, deniz suyu, serbest CO₂ ve H⁺ iyonu içeren sular, endüstriyel atıkların, kanalizasyonların karıştığı sular zararlı reaksiyonlara neden olabilir. pH 5.5 ve altındaysa saldırı şiddetli, 4.5 ve altındaysa çok şiddetli gerçekleşir. Ancak belirtildiği gibi sıvının beton içinde taşınım hızı da önemli bir faktördür.

Doğada rastlanan yer altı, nehir ve göl suları sertliklerine bağlı olarak bir miktar kalsiyum ve magnezyum iyonları içerirler ve genellikle çimento hamuru bileşenlerinde hidrolize yol açmazlar. Diğer taraftan, sertlik derecesi düşük olan ve özellikle erimiş kar suyu, yağmur suyu gibi saf sular çimento hamuru içindeki kalsiyumlu bileşenlerin çözünmesine neden olurlar. Hidrate çimento bileşenleri içinde kalsiyum hidroksit litrede 1230 mg çözünürlükle saf su ile en fazla hidrolize uğrayan bileşendir. Çimento hamuru ile temas halinde olan su kirece doyduğunda hidroliz sona erer. Suyun sürekli akması veya yenilenmesi durumunda ise kalsiyum hidroksit tamamen çözünüp yıkanarak hamur dışına atılabilir ve bu kez çözünürlük bağlayıcı özellikteki CSH jellerinde başlar. Kireç içeriğinin azalması sonucu betonda dayanım kaybı meydana gelir ve kirecin boşalttığı gözenekler sebebiyle geçirimlilik artar dayanıklılık azalır. MEHTA (1997) tarafından yapılan araştırmalara göre, asidik veya magnezyum içeren sular nedeniyle çimento hidrate bileşenlerinin çözünmesi ve yıkanarak uzaklaşması halinde, kaybedilen her %1 kireç (CaO eşdeğeri olarak) içeriği için beton basınç dayanımının %2 azaldığı, betonun orijinal kireç içeriğinin dörtte birini kaybetmesi halinde dayanımının yarısını kaybettiği görülmektedir. Ayrıca betondan çıkan kalsiyum hidroksit havadaki CO₂ ile reaksiyona girip CaCO₃ oluşturarak beton yüzeyinde beyaz kabuk veya şeklinde olumsuz bir görünüş meydana getirir. Bu olaya çiçeklenme adı verilir.

3.2. İyon Değişirme Reaksiyonları

İyon değişirme reaksiyonları, agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesi şeklinde gerçekleşir. Asitlerin veya magnezyum iyonları içeren sıvıların betona etkisi bu grupta incelenmiştir.

3.2.1. Asit saldırısı

Asitler iyon değişimi ile çimento hamuru bileşenlerinden çözünebilen veya çözünmeyen kalsiyum tuzları meydana getirirler. Ayrıca, magnezyum tuzlarının çimento hamuru ile teması halinde magnezyum CSH jelindeki kalsiyumun yerini alır ve bu jel bağlayıcılık değerini kaybeder. Asitlerin sertleşmiş beton üzerindeki etkisi, kalsiyum bileşenlerini (Ca(OH)_2 , CSH ve CAH), saldırıda bulunan asidin kalsiyum tuzlarına dönüştürmesi şeklinde gelişir. Kalsiyum tuzları suda yavaş veya hızlı çözündüklerinden, çimento harcı belirli zaman sürecinde çözülür ve beton harap olur. Dolayısıyla reaksiyonun hızı oluşan tuzun çözünebilirliğine bağlıdır. Örneğin; hidroklorik asit çok kolay çözünebilen bir madde olan kalsiyum klorür oluşumuna neden olur. Benzer şekilde nitrik asit, kalsiyum nitrat oluşturur. Sülfirik asit ise kalsiyum sülfat (alçı) meydana getirir. Organik asitler de benzer şekilde etki yaparlar. Örneğin laktik asit kalsiyum laktat, asetik asit kalsiyum asetat oluşumuna neden olur.

Portland Çimentolarının bazı karakterde olmaları nedeniyle hiçbirinin asit dayanıklı olmadığı düşünülürse, konu birçok yerde önemli olmaktadır. Asit etkisi farklı yerlerde kendini gösterebilir. Örneğin, nemli ortamlarda özellikle endüstriyel bölgelerde atmosferde bulunan SO_2 ve CO_2 gazları asid dönüşerek beton elemanları etkileyebilir.

Asit etkisine; bacalarda, buharlı trenlerin geçtiği tünellerde, asit buharlarının olduğu döküm yapılan tesislerde, bataklık sularında, buz etkisinde dağlık bölgelerde, kanalizasyon sularında, açık madenlerden sızan sularda, arıtma tesisleri gibi yerlerde rastlanır. Asit reaksiyonlarının hızı ve şiddeti; asit tipine, etkilenme süresine, asit yoğunluğuna göre değişir. Ancak en önemli etken oluşan kalsiyum

tuzunun çözünürlüğüdür. Çözünürlük arttıkça, su ile taşınan maddelerin zararı atmaktadır. Reaksiyonların gelişimine bağlı olarak sertleşmiş betonun yüzeyinden başlamak suretiyle bünyesinde yumuşama ve gözenekler oluşur.

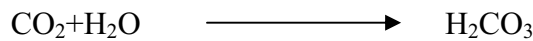
Tablo 3.1. Değişik asitlerin beton üzerindeki etkisi

Saldırı Hızı	Asit Tipi	
	İnorganik	Organik
Hızlı	Hidroflorik,Hidroklorik Nitrik,Sülfürik	Asetik,Formik,Laktik
Orta	Fosforik	Tannik
Yavaş	Karbonik	-
İhmal Edilebilir	-	Oksalik,Tartarik

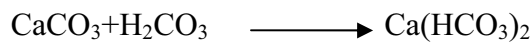
Asit etkisi; su, zemin ve gaz ortamlarında gelişebilir. Ayrıca sertlik derecesi düşük suların beton üzerinde olumsuz etkileri vardır. Daha önce de belirtildiği gibi pH değeri 6.5'ten küçük sular, betonun bünyesindeki çimento harcı ve agrega içindeki karbonat kökenli tanecikler üzerinde çözücü ve ayrıştırıcı etki yapar.

Değişik asit saldırılarının tipik örnekleri aşağıda özetlenmiştir[2]:

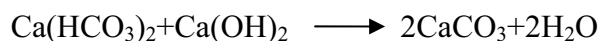
Doğada çok bulunan CO₂ gazı suda kolaylıkla çözünerek karbonik asit oluşur.



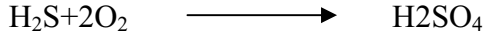
Suyun içinde CaO yine su içinde bulunan CO₂ ile birleşerek CaCO₃'ü oluşturur. CaCO₃ ise karbonik asitle reaksiyona girip, kalsiyum bikarbonatı oluşturur.



Kalsiyum bikarbonat çimentodaki Ca(OH)² ile birleşerek yeniden CaCO₃'ü oluşturur.



Evsel atıklar alkali olduklarından betona zarar vermezler ancak yüksek sıcaklıkta kalmaları halinde, kükürlü bileşenler anaerobik bakteriler tarafından H₂S'e dönüşür. H₂S zayıf asittir, ancak H₂S'in gaz halinde nemli beton yüzeyinde su filmi içinde çözünüp, havanın oksijeni ile birleşerek sülfirik aside dönüşmesi ile hasar oluşabilir.

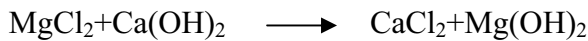


Asit saldırısı ile sülfat, alkaliler gibi zararlı maddelerin etkileri arasında önemli bir farklılık vardır. Asit saldırısında sertleşmiş çimento harcının değişimi ve boşluk sisteminin tahribi, çözünmesi söz konusudur. Burada bozulma-çözülme yüzeyden başlar ve betonun geçirimsizliği ikinci derecede önemlidir. Diğer saldırılarda ise özellikle pas payı tabakasının geçirimsizliği çok önemlidir.

Betonun değişik asitlere dayanıklılığı konusunda, çeşitli fiziksel ve kimyasal deney yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak bunların çoğu kıyaslama için yararlı olup, standart deneyler değildir. Sorun uygulamada uzun sürede gerçekleşen olayları, kısa sürede laboratuvar ortamında benzeştirmektedir.

3.2.2. Magnezyum iyonu içeren çözeltilerin kimyasal saldırıları

Magnezyum klorür, magnezyum bikarbonat veya magnezyum sülfata yer altı sularında, deniz suyunda veya endüstriyel atık sularda rastlanmaktadır. Magnezyum klorür (MgCl₂) sertleşmiş çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çözünen CaCl₂ ve çözünmeyen Mg(OH)₂ (brusit) meydana getirir.



Betonun Mg tuzlarıyla uzun süreli teması halinde CSH içindeki kalsiyumun magnezyum iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar. Magnezyum sülfat aynı zamanda betonda sülfat etkisine yol açtığı için magnezyum tuzları içinde en zararlısı olarak kabul edilir.

3.3. Genleşen Ürünler Oluşturan Reaksiyonlar

Betonarme yapılara zarar veren kimyasal saldırı türleri arasında en çok karşılaşılan etkilerden biri olan sülfat etkisi ve son yıllarda ülkemizde de görülen alkali-silika reaksiyonu bu grup içinde değerlendirilir. Kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi gecikmeli hidratasyon gösterebilen çimento bileşenleri de benzer şekilde betonda genleşmeye yol açabilirler.

3.3.1. Sülfat etkisi

Sülfat etkisi, kaynağına bağlı olarak, iç kaynaklı veya dış kaynaklı sülfat etkisi adlarıyla iki gruba ayrılır. İç kaynaklı sülfat etkisine agregalarda bulunan veya erken yaşlardaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle çimento hamurunda oluşan alçı neden olur. Dış kaynaklı sülfat etkisi yeraltı suları, deniz suyu, atık sular gibi kaynaklarda bulunan sülfatların betona penetrasyonu sonucunda meydana gelir. İç kaynaklı sülfat etkisi betonun her bölgesinde oluşabilirken dış kaynaklı etki daha çok yüzeye yakın bölgelerde gözlemlenir.

Doğal kaynaklı sülfat iyonları deniz sularında, çeşitli zeminlerde ve yeraltı sularında bulunurken birçok endüstriyel, tarımsal, evsel atıklar (atık sular) veya yan ürünler de sülfat iyonu içeren yapay kaynaklar olarak adlandırılabilir.

Deniz suları tuzlar, organik bileşenler ve fazlar gibi eriyik haldeki maddelerle gaz kabarcıkları, organik ve inorganik katılar gibi askıdaki maddeleri içerirler. Bu Karışım, yaklaşık olarak, 70 farklı element içerir ancak en önemli altı iyon olan Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} ve K^+ eriyik haldeki bileşenlerin %99.5'ini oluşturur. %3.5 tuzlulukta bir deniz suyunda bu iyonların miktarı sırasıyla, % 19.35, 10,76, 2.71, 1.29, 0.41 ve 0.39 dur. Deniz suyundaki ortalama sülfat iyonu konsantrasyonu 2750 ppm civarındadır. Deniz sularının pH'ı ise 7.5 - 8.4 arasındadır.

Toprakta mineral kükürt genellikle demir veya bakır sülfür olarak bulunur. Organik kaynaklı kükürt ise hayvan ve bitki artıklarından kaynaklanır. Oksidasyon ve bakteriyel etki ile sülfürler sülfatlara dönüşür. Kalsiyum, sodyum, potasyum ve

magnezyum sülfatlar zeminlerde ve yeraltı sularındaki ana sülfat iyonu kaynaklarıdır. Alçının normal sıcaklıklarda eriyebilirliğinin düşük olması nedeniyle, yeraltı sularındaki yüksek sülfat iyonu miktarı magnezyum ve alkali sülfatların göstergesidir. Öte yandan, kimyasal gübre kullanımı sonucu amonyum sülfat, yüksek kükürtlü yakıt kullanımı sonucu sülfüroz ve sülfürik asit oluşumu gibi diğer nedenlerle de sülfat iyonları betonları etkileyebilir.

ACI Komite 201 çeşitli kimyasalların betonun bozulmasına etkilerini sınıflayarak özetlemiştir. Bu sınıflandırmaya göre amonyum, sodyum, magnezyum ve kalsiyum sülfatların etkisi orta olarak belirtilmiştir. Beton bozulma direncini etkileyen önemli faktörler Tablo 3.2'de özetlenmiştir:

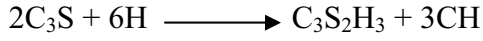
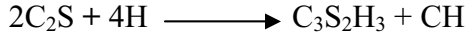
Tablo 3.2. Betonda Bozulmayı Etkileyen Faktörler

Etkiyi Çoğaltan Faktörler	Etkiyi Azaltan Faktörler
<p>1. Yüksek Porozite</p> <p>a) Yüksek su emme kapasitesi</p> <p>b) Geçirimsizlik</p> <p>c) Boşluklar</p>	<p>1. Yoğun Beton</p> <p>a) Uygun karışım oranları</p> <p>b) Su miktarının azaltılması</p> <p>c) Bağlayıcı madde miktarının artırılması</p> <p>d) Hava Sürüklenmesi</p> <p>e) Uygun sıkıştırma</p> <p>f) Uygun bakım</p>
<p>2. Çatlaklar</p> <p>a) Gerilme yoğunlaşmaları</p> <p>b) Işıl şoklar</p>	<p>2. Çekme Gerilmelerinin Azaltılması</p> <p>a) Donatı kullanımı</p> <p>b) Puzolan kullanımı (ısı artışını azaltmak için)</p> <p>c) Uygun derz yapımı</p>
<p>3. Süzülme ve Sıvı Penetrasyonu</p> <p>a) Akan sular</p> <p>b) Göllenme</p> <p>c) Hidrolik basınç</p>	<p>3. Yapısal Tasarım</p> <p>a) Temas yüzeylerinin ve türbülansın azaltılması</p> <p>b) Penetrasyonu önleyici membranlar ve koruyucu bariyer sistemleri oluşturulması</p>

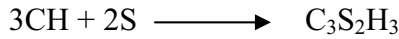
3.3.2. Sülfat etkisiyle bozulma mekanizması

Çimento hamuru üzerindeki sülfat etkisi hem sülfat iyonu konsantrasyonuna hem de sülfatların katyon cinsine (Ca^+ , Na , Mg^{2+}) bağlıdır. Burada, sodyum ve magnezyum sülfatların etkileri açıklanacaktır.

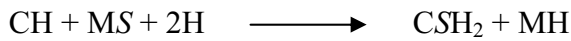
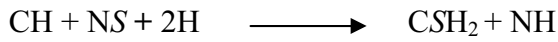
Çimentonun kalsiyum silikat bileşenleri olan C_3S ve C_2S in hidratasyonu sonucunda C-S-H jeli ve kalsiyum hidroksit (CH) oluşur [3]



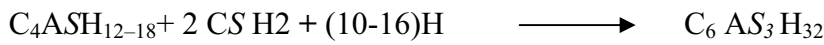
Ortamda puzolan bulunuyorsa, silika ile CH in reaksiyonu ilave C-S-H jeli oluşturur.



Sodyum sülfat (NS) ve magnezyum sülfat (MS) CH ile reaksiyona girerek alçı (CSH_2), sodyum hidroksit (NH) ve magnezyum hidroksit (MH) oluşturur:

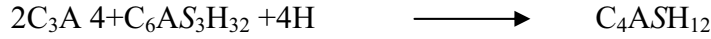


Konuyla ilgili araştırmalar arasında yukarıdaki denklemlerde gösterilen reaksiyonların çimento hamuru üzerindeki zararlı etkisi hakkında tam bir görüş birliği bulunmamaktadır. Ancak, oluşan alçı kalsiyum aluminat hidrat (C_4AH_{13}), kalsiyum sülfaluminat hidrat (monosülfat C_4ASH_{12-18}) veya hidrate olmamış C_3A ile reaksiyona girerek trisülfat hidrat, yani etrenjit oluşturur:



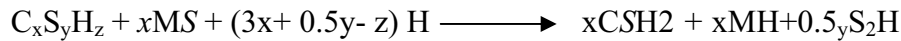
Etrenjit oluşumunun neden olduğu genleşme mekanizması hakkında değişik görüşler olmakla birlikte, genel anlamda, genleşmenin kristalleşme basıncından kaynaklandığı bilinmektedir.

C_3A nın bütünüyle hidrale olmasından önce ortamdaki tüm sülfat reaksiyona girerse oluşan etrenjit daha sonra monosulfoaluminat formuna dönüşür:



Yukarıda belirtilen reaksiyon ürünlerinin oluşması sistemdeki alçı C_3A oranına bağlıdır.

Mg^{2+} ve Ca^{2+} iyonlarının eşit valanslıkları ve yakın iyonik yarıçapları nedeniyle MS C-S-H jeliyle aşağıda gösterilen reaksiyonu yapabilir.



Bu reaksiyon sonucu oluşan alçı kalsiyum aluminatlarla reaksiyona girerek daha fazla etrenjit oluşumuna neden olur. Ayrıca, yine bu reaksiyonla meydana gelen MH ve SH da reaksiyona girerek bağlayıcı olmayan bir reaksiyon ürünü oluşturur.



Meydana gelen eriyik 10.5 civarında bir pH değerine sahiptir. Sistemin stabilize olabilmesi için C-S-H jelinin bir miktar CHT serbest bırakarak ortamın pH'ını artırması gerekir. Ancak, yine ortamda MS bulunduğu sürece çevrim Denklem 5 den başlayarak kendini tekrar eder ve zararlı etki sürer. C-S-H jelinin bağlayıcı olmayan MSH' a dönüşmesi yalnız MS etkisiyle mümkündür. Sülfat etkisinin şiddeti sülfat konsantrasyonuyla artar. Aynı zamanda, zararlı etkinin tıpi veya mekanizması da bazı değişimler gösterebilir.

Sodyum sülfat etkisinde, zararlı mekanizma sodyum sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak, iki bölümden oluşur. Düşük konsantrasyonlarda (<0.12 veya $SO_3 < 830$ mg/l) zararlı etki etrenjit oluşumuyla, daha yüksek konsantrasyonlarda ise alçı oluşumuyla kendini gösterir.

Magnezyum sülfat etkisinde ise, zararlı mekanizma üç bölümden oluşur. $SO_3 < 3200$ mg/l olan düşük konsantrasyonlarda zararlı etki etrenjit oluşumuyla, MS konsantrasyonunun %0.48 - 0.75 olduğu durumlarda hem etrenjit hem de alçı oluşumuyla, daha yüksek konsantrasyonlarda ise C-S-H jelinin MSH 'a dönüşmesiyle

kendini gösterir. Son aşamada hidroksil iyonlarının MH oluşturması nedeniyle etrenjit için yeterli miktarda bulunmaması sonucunda etrenjit oluşmaz.

3.3.3. Değişik çimentolar ve puzolanlarla yapılan karşılaştırmalı çalışmalar

Yaklaşık 57 yıldan bu yana yapılmakta olan çimentoların sülfat direncinin artırılmasına yönelik deneysel çalışmalarda, betonların çimento miktarının, hava miktarının, kullanılan çimentonun inceliğinin, tipinin, C_3A miktarının, yüksek fırın cürufunun, uçucu külün, pişirilmiş şeylin, buhar kürünün, çeşitli yüzey kaplama malzemelerinin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Su-bağlayıcı malzeme oranının azaltılması sülfat direncini artırmak için en etkili yöntemdir.
- 2) Betonun sülfat çözeltisi içinde sürekli kalmasının zararlı etkileri ıslanma-kuruma tekrarlarına maruz sülfat etkisindeki betonlara göre daha az olmaktadır.
- 3) Çok düşük veya çok yüksek su-bağlayıcı madde oranları kullanıldığında çimento tipinin sülfat direnci üzerindeki etkisi önemli olmamaktadır. Buna karşılık, orta su-bağlayıcı madde oranlarında (0.45-0.55) çimentonun kimyasal kompozisyonu, özellikle C_3A miktarı, sülfat direncinde belirleyici rol oynamaktadır.

ASTM Tip I, Tip V çimentolar ve uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak yapılan bir çalışmada, harçların sodyum sülfat ve magnezyum sülfat ortamlarındaki genleşmeleri ve basınç dayanımlarındaki azalmalar belirlenmiştir. Sonuçlar, tüm katkılı çimentoların kontrol çimentolarına göre, sodyum sülfat ortamında, daha iyi davranış gösterdiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, magnezyum sülfat ortamındaki davranışlar arasında önemli farklılıklar gözlenmemiştir.

60-110 MPa basınç dayanımlarına sahip betonların $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ortamında tekrarlı ıslanma-kurumaya tabi tutulması sonucunda, sülfat direncinin betonun porozitesi ve kılcal su emme kapasitesine bağlı olduğu saptanmıştır. Su-çimento oranında, yüksek akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak, sağlanan azalmanın, mineral katkı kullanılmasından daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Deniz suyu ortamının etkilerinin araştırıldığı ve 15 farklı standart ve katkı çimentonun kullanıldığı bir çalışmada donatı paslanmasının, artan önem sırasına göre, çimentonun C\A miktarı, su-çimento oranı ve mineral katkı kullanımından etkilendiği saptanmıştır. Buna karşılık, AL-AMOUDİ tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren katkı çimentoların gerek sülfat direnci gerekse donatı korozyonu bakımından yeterli performansı gösteremediği belirlenmiştir.

MANGAT ve KHATIB ise çimentonun ağırlıkça %22 ve %32si yerine uçucu kül, %5-15 silis dumanı ve %80 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak çok yüksek sülfat direnci elde edildiği saptanmıştır. Öte yandan, aynı çalışmada, %40 granüle yüksek fırın cürufunun zararlı etkiyi artırdığı görülmüştür.

Yol kaplamalarında kullanılmak üzere hazırlanan, iri agrega olarak kırma kireçtaşı ve bağlayıcı olarak ASTM Tip I ve Tip V çimentolarıyla yüksek kireçli kazan altı külünün çeşitli kombinasyonlarının denendiği silindirle sıkıştırılmış betonlar üzerinde yapılan bir çalışmada sülfat direncinin çimento miktarı ve/veya iri agrega miktarının artmasıyla arttığı saptanmıştır. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinin sertleşmiş portland çimentosu hamuru üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında GALLOP ve TAYLOR numunelerini altı ay süreyle bu çözeltiler içinde tuttuktan sonra taramalı elektron mikroskop ve X-ışınları kırınımı yöntemleri kullanarak iç yapıdaki değişimleri izlemişlerdir. Sodyum sülfat içinde bekletilen numunelerin iç kısımları zarar görmemiş olmakla birlikte, içten dışa doğru sırasıyla,

- 1) C-S-H jeliyle karışmış durumda kısmen etrenjite dönüşen monosülfat formları,
- 2) CH miktarında bariz azalma, C-S-H jelinde kısmi dikalsifikasyon ve alçı çökelmeleri,
- 3) daha ileri düzeyde dikalsifikasyon gözlemlenmiştir.

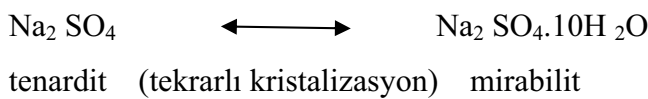
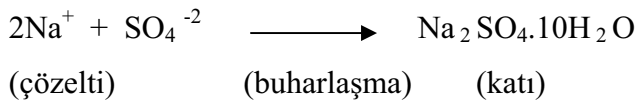
Magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerde de benzeri oluşumlar gözlenmiş ancak bunların yanı sıra, yüzeye yakın bölgelerde yüzeye paralel alçı ve brusit tabakaları saptanmıştır.

3.3.4. Sülfat etkisi ve hasar mekanizmaları

Sülfat etkisi ile oluşan hasar mekanizmasına geçmeden önce hasarı oluşturan fiziksel ve kimyasal olayları birbirinden ayrı olarak açıklamakta yarar vardır.

3.3.4.1. Yalnızca fiziksel etki

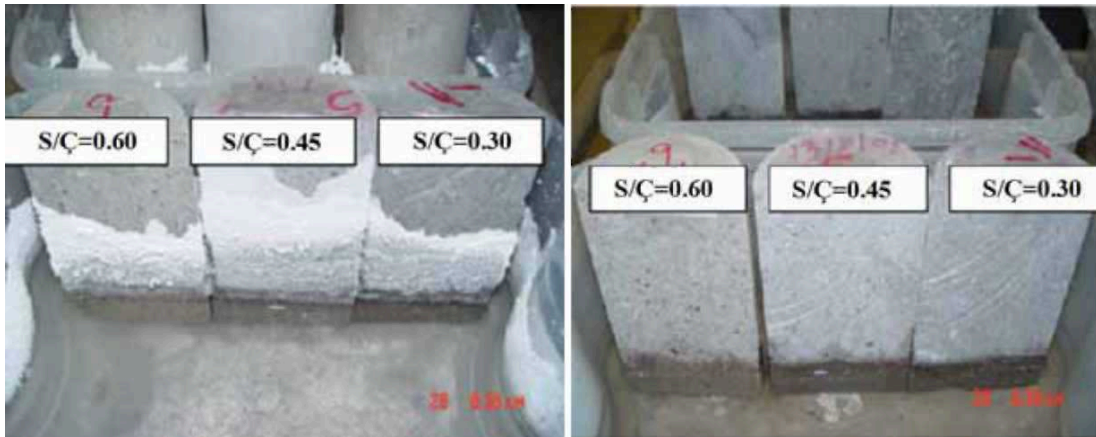
Bazı tuzlar, farklı sıcaklık ve çözelti konsantrasyonlarında termodinamik denge gereği kristalize olma ve/veya çözülme eğilimindedirler. Özellikle Na_2SO_4 tuzunda sözü edilen kristalizasyon mümkündür. Kalsiyum karbonat (CaCO_3), Trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Birunit ($8.5\text{CaSiO}_3 \cdot 8.5\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), Nahkolit (NHCO_3) ve Halit (NaCl) tuzları da kristalize olma eğilimindedir. Öte yandan MgSO_4 tuzunun oda sıcaklığında herhangi bir hidrate hali olmadığından tuz kristalizasyonu MgSO_4 tuzunda gözlenmez. Çözelti sıcaklığı 70°C 'nin üzerine çıkartılırsa kiserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) veya epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kristalleri oluşabilir. Bu konuda NEHDI ve HAYEK (2005) 'in yaptığı çalışmalarda elde ettikleri sonuçlar bu görüşü doğrulamaktadır. Farklı su/çimento (S/Ç) oranlarına sahip betonlar ağırlıkça, %10'luk Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerine tabandan batırılmış ve 150 saat sonra sırasıyla Şekil 3.1a ve 3.1' deki görünümde elde edilmiştir. Şekil 3.2a' da örnek yüzeyinde görülen beyaz oluşum tenardit olup taramalı elektron mikroskobu fotoğrafı verilmiştir. Çözeltinin örnekle kesiştiği yüzeyden alınan parçalarda mirabilit kristali olup Şekil 3.2.b' de sunulmuştur. Uygun koşullarda oluşursa anhidrat sodyum sülfat (Na_2SO_4 - tenardit) sulu çözeltisinde 10 mol su alarak mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kristaline dönüşür. Çift yönlü olan ve aşağıda verilen bu reaksiyon ilk olarak 1929'da LAFUMA tarafından açıklanmıştır.



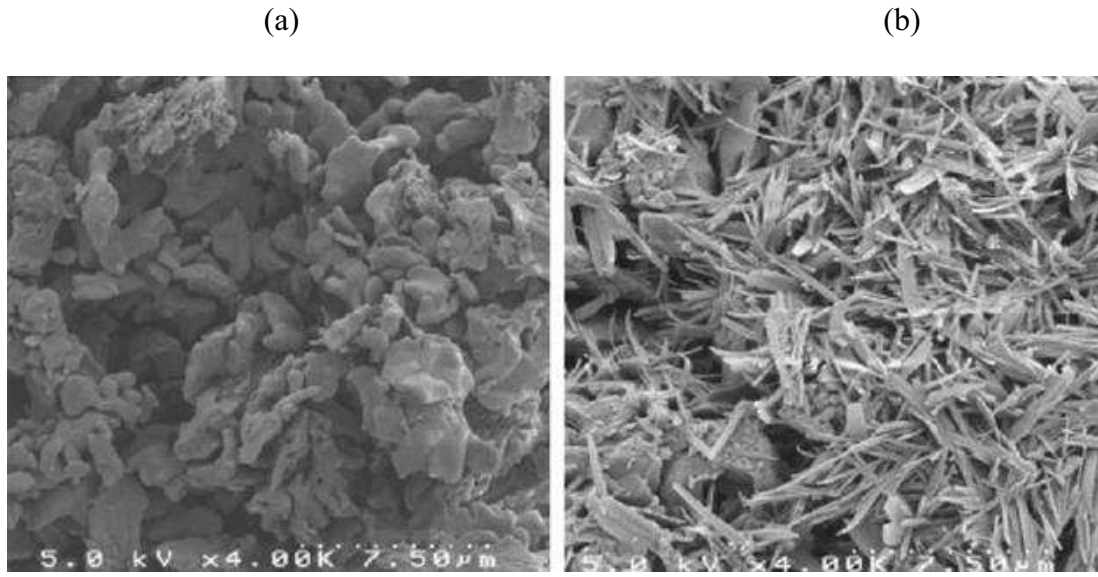
Kristalizasyon, bir katı maddenin boşluklarında meydana gelirse genişleme nedeniyle boşluk çeperlerinde yaratacağı basınç hasar oluşturabilir. Sülfat kristalizasyonunu, beton gibi çekme dayanımı düşük, kırılğan malzemelerde iç gerilme yaratarak hasara neden olabileceği 1939'da gösterilmiştir. Sodyum sülfat için en uygun tenardit - mirabilit dönüşüm ortamı 30-33°C %85 bağıl nem ortamıdır. Özellikle Akdeniz iklimi ve tropikal iklimin hüküm sürdüğü bölgelerde bu tür ortamlara sürekli rastlanır. Bazı araştırmacılar sülfat etkisinin sahada tamamen fiziksel olduğunu savunsa da, yapılan incelemeler bazı kimyasal reaksiyonlardan meydana gelen etrenjit ve alçıtaşının da hasar mekanizmasında payı olduğunu iddia etmektedir. Öte yandan açık boşluklarda tuz kristalizasyonu meydana gelirse, kristal yapı dış kısımlara sızar ve buradaki daha düşük nem değerlerinde kuruyarak toz hale gelir ve çiçeklenme denilen olayı meydana getirir. Geçirimli bir içyapıya sahip çimento esaslı kompozitlerde çiçeklenmeye rastlanır. Sözü edilen ikinci durumda dayanım açısından bir sorun meydana gelmez ancak estetik yapı bozulur ve beton tuzlar beraberinde kalsiyum hidroksiti de dışarı sürüklediğinde boşluklu bir mikro yapı ortaya çıkar[4].

(a)

(b)



Şekil 3.1. a) Ağırıkça %10'luk Na₂SO₄ çözeltisinde 150 saat bekletilen örneklerde yüzeyde tuz oluşumu, b) Aynı süre aynı konsantrasyonda MgSO₄ çözeltisinde bekletilenlerde yüzeyde tuz oluşumuna rastlanmıştır.



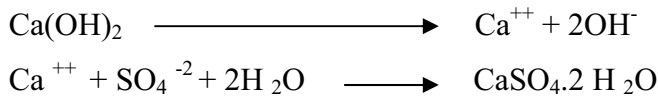
Şekil 3.2. Tenardit (a) ve mirabilit (b) kristallerinin 4000 kat büyütmede çekilmiş taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları



Şekil 3.3. Tuz kristalizasyonunun buharlaşma ile ortaya çıkışı; a) duvarın tabandan nem alması ve nemin taşıdığı tuzların yüzeyde suyun buharlaşması sonucu birikimi, b) İstinat duvarının arkasından nemin taşıdığı tuzların ön tarafta suyun buharlaşması sonucu birikimi.

3.3.4.2. Kimyasal etki ve ardından meydana gelen fiziksel etki

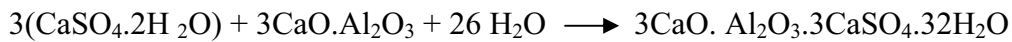
Sülfat etkisinde söz edilmesi gereken en önemli kimyasal reaksiyonlar, alçıtaşı ve etrenjit oluşumu ile ilgili olanlardır. Sertleşmiş betonda alçıtaşı oluşumunun kaynağı kalsiyum hidroksit ve dış ortamdan gelen sülfat iyonlarıdır. Formüllerdeki reaksiyonlar katyondan bağımsız olarak verilmiştir. Kalsiyum hidroksit kaynağı da esas olarak C_3S 'dir. Bu yüzden sadece alçıtaşı oluşumu dikkate alındığında C_3S/C_2S oranı yüksek olan çimentolar uzun vadede sülfat etkisine maruz kalacak ise ve bu dönemde geçirimsizliklerini olumsuz etkileyecek etkilerle karşılaşılırsa hasar görme ihtimalleri oldukça yüksektir. Literatürde alçıtaşı oluşumunun genleşme oluşturmayacağını iddia eden araştırmacıların yanında, genleşme oluşturacağını savunan araştırmacılar da mevcuttur. TIAN ve COHEN (2000) yaptıkları literatür taramasında bu araştırmacıların görüşlerini bir araya getirmiştir. HANSEN alçıtaşının genleşme yaratıcı etkisi olmadığını belirtmiştir. MEHTA ise alçıtaşının genleştirici etkisinin, etrenjite kıyasla daha az olduğunu ve daha belirgin olduğunu iddia etmektedir. Laboratuvar ortamını azaltıcı etkisinin altında sentezlenen saf C_3S ile hazırlanan çimento hamuru hazırlanıp sülfat çözeltisinde bekletildiğinde alçıtaşı oluştuğu ve genleşme meydana geldiği ispatlanmıştır. Ancak sahada daha farklı parametreler de işin içine girdiği için, C_3S oranı yüksek örneklerde mikro yapı incelemelerinde alçıtaşına rastlansa bile genleşme oluşmadığının rapor edildiği çalışmalar mevcuttur[5].



Alçıtaşının yanında etrenjit oluşumu da sülfat etkisi ile meydana gelen kimyasal reaksiyonlar arasındadır. Ancak etrenjit oluşumu her zaman hasar verici etki yaratmaz. Etrenjit aynı zamanda hidrasyon ürünlerinden biri olup, taze betonda oluşarak priz dengeleme işlevini yerine getirir. Bu yüzden sülfat hasarı görmemiş örneklerde de bir miktar etrenjite rastlanır. Sertleşmiş betonda da etrenjit, termodinamik denge ve betonun boşluk yapısına bağlı olarak çözünüp yeniden oluşabilir. Üstelik ortamda ilave sülfat olması da gerekmez. Bu şekilde oluşan ve genleşme yaratmayan etrenjite ikincil etrenjit denir. Mikroskop incelemelerinde

zaman zaman hiç hasar görmemiş bir betonun boşluklarında ve kılcal çatlaklarında zararsız etrenjit oluşumuna rastlanır.

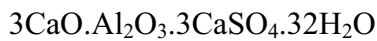
Dış ortamdan beton bünyesine sülfat girişi olması halinde (uygun boşluk suyu pH değeri de mevcutsa) alçıtaşı, C₃A ve/veya monosülfat ile sülfat reaksiyona girer ve etrenjit oluşturur. Belli bir konsantrasyona kadar etrenjit oluşumu yine iç yapıda hasara yol açmaz. Hatta basınç dayanımında boşluk tıkama nedeniyle, artış da meydana gelebilir. Bu yüzden belli miktarın altındaki etrenjitle genişleme ve/veya dayanım arasında ilişki kurmak sağlıklı olmayabilir. Öte yandan yapılan karşılaştırma benzer boşluk yapısında (aynı su/ç oranı) örnekler kullanılarak yapılırsa yüksek sülfat konsantrasyonlarında bir sonuç elde edilebilir. Sülfat girişi sürekli devam ederse, boşluk yapısına bağlı olarak etrenjit oluşumundaki doygunlukla birlikte hızlı bir genişleme meydana gelir. Tüm bu oluşumlar dış ortamdan SO₄⁻² girişi etkisinde söz konusu olup



alçıtaşı trikalsiyum alüminat su etrenjit



alçıtaşı monosülfat su



etrenjit

Etrenjitin yoğunluğunun 1.73 g/cm³, diğer hidratasyon ürünlerinin ortalamasının 2.50 g/cm³ olması teorik olarak genişleme oluşabileceği izlenimini yaratmaktadır. C₃A'nın etrenjite dönüşümünde %126'lık bir hacim genişmesi meydana gelmektedir. Ancak aynı zamanda su ve alçıtaşı da tükenmektedir. Monosülfatın etrenjite dönüşümünde ise %51'lik bir hacim genişmesi olmaktadır. Ancak yine su ve alçıtaşı harcanmaktadır. Teorik hacim hesapları ile genişleme olup olmayacağını öngörmek betonun boşluk yapısını ve boşluk suyu konsantrasyonunu bilmeden sağlıklı sonuç vermeyecektir. Etrenjitin hasar verebilmesi için boşluk suyunda kompozisyon açısından süper doygunluğa ulaşıp mikro kristalin yapıda oluşması

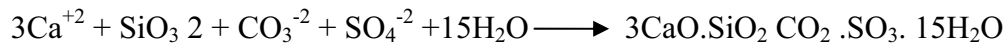
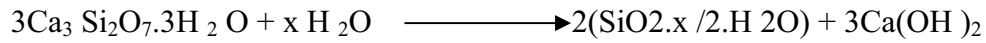
gerekir. Kristalizasyon basıncının boşluk çeperlerini itererek matris çekme dayanımını aşması genişmeyi ve hasarı ortaya çıkaracaktır.

3.3.4.3. Na₂SO₄ saldırısı ve etki mekanizması

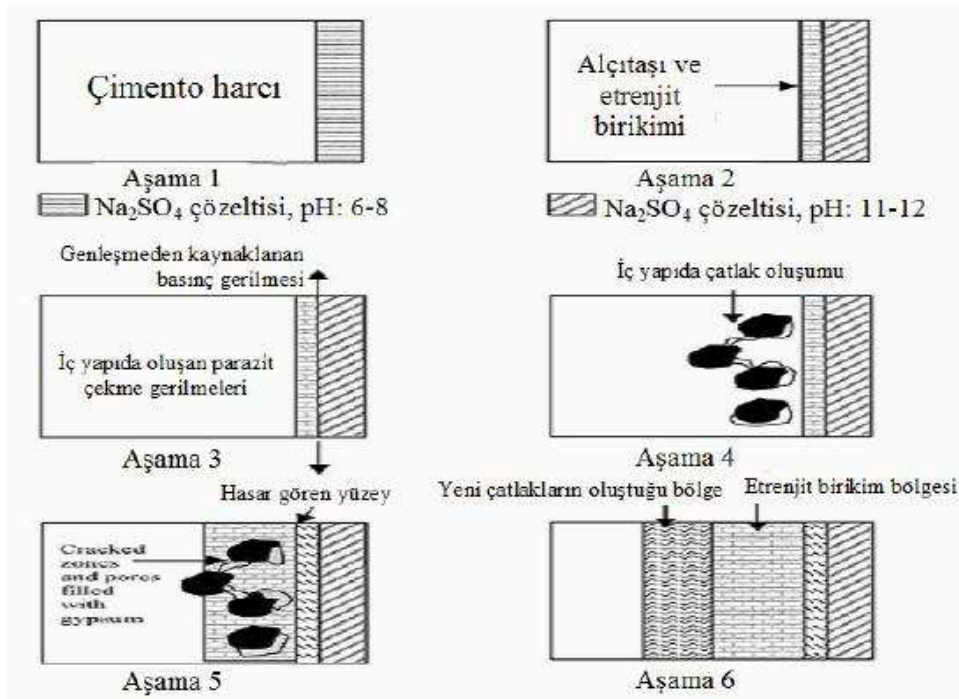
Yukarıda açıklanan fiziksel ve kimyasal etkiler mekanizmanın sülfat katyonuna göre çok büyük değişiklikler gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Farklı araştırmacıların bu konuda önerdiği pek çok hasar mekanizması mevcuttur. Bunlardan en çok kabul görenlerinden biri hem sodyum hem de MgSO₄ için önerilmiştir. Mekanizmaya göre Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen örneklerde meydana gelen değişiklikler, Şekil 3.4a' da şematik olarak, Şekil 3.4b' de ise kimyasal formüller yardımı ile gösterilmiştir. Birinci aşamada Na₂SO₄ çözeltisi hazırlanmış ve örnekler çözeltiliye yeni bırakılmıştır. Bu aşamada çözelti pH'ı sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak 6-8 arasındadır. Örnekten Ca(OH)₂ çıkışı nedeniyle pH zamanla yükselmekte, sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak 11-12'lere kadar çıkabilmektedir (ikinci aşama). Su eğer durgunsa bu pH değeri korunur, ancak çözeltinin hareketli olması durumunda çözelti pH'ı tekrar 6-8 aralığına düşer.

Çözelti pH'ının düşüşü teorik olarak etrenjit oluşumunu hızlandırır ve dolayısıyla genişleme hızlanır. Aynı genişlemenin elde edilmesi için geçen süre alkali (pH) kontrollü deneylerde, pH'ın serbest bırakıldığı deneylerden kabaca iki kat daha kısadır. Aslında ASTM C1012 standardında pH'ın sabit tutulması için sürekli sülfat çözeltisinin değiştirilmesindeki amaç pH'ın düşük tutulmasıdır. Bazı araştırmacılar sülfat çözeltisini pH'ının sabit tutulması için seyreltik sülfürik asit kullanımını önermektedir. Ancak tüm bu sözü edilenler çözeltilideki durumdur. Örnek bünyesinde de derinlikle pH ve sülfat konsantrasyonu değişimi meydana gelmekte, buna bağlı olarak ürünler oluşmaktadır. Etrenjit pH=10.7-12.5 aralığında oluşabilir. Derinliğe bağlı olarak sülfatın ulaştığı, konsantrasyonun etrenjit oluşumu için uygun olduğu ve boşluk suyunun pH değeri belirtilen aralıktaki bölgelerde etrenjit meydana gelecektir. Na₂SO₄ durumunda kesit boyunca boşluk suyu SO₄⁻² konsantrasyonu 1000 ppm'den az ise etrenjit, 1000-8000 ppm SO₄⁻² arasında ise alçıtaşı meydana gelmektedir. Yüzeydeki ve örnek derinliğindeki boşluk yapısı ve boşluk suyu pH ve sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak üçüncü aşamada belirtilen alçıtaşı ve etrenjit

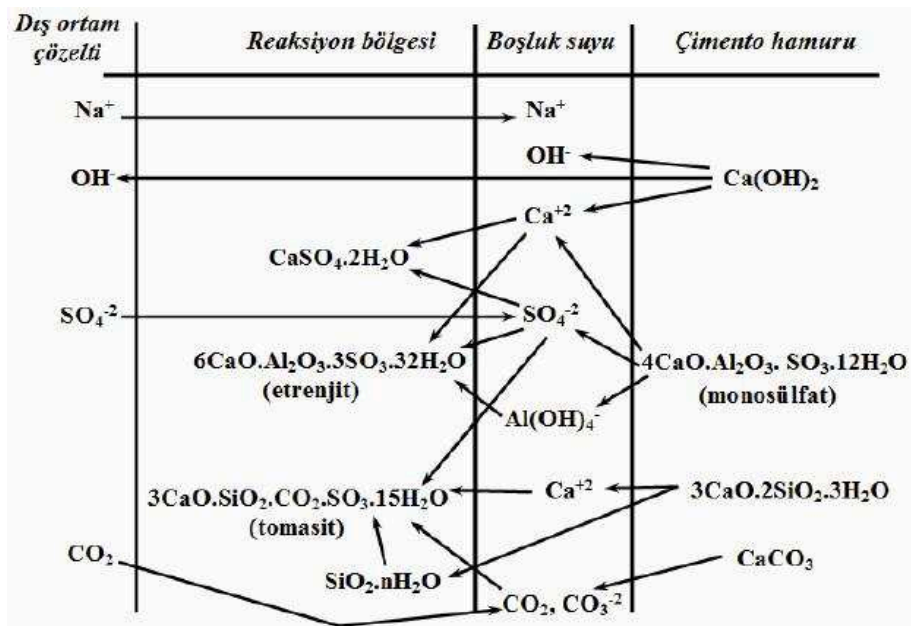
tabakası meydana gelir. Bu tabakada boşluk suyu pH'ı yüksek ve sülfat konsantrasyonu göreceli olarak düşük olan iç kısımlarda etrenjit daha yoğun olarak gözlenirken, dış yüzeye yakın, pH'ın nispeten düştüğü ve sülfat konsantrasyonunun yüksek olduğu kısımlarda alçıtaşı oluşumu hakimdir. Oluşan tabaka genişirken henüz hasar görmemiş iç kısımda çekme gerilmeleri yaratarak kılcal çatlaklar oluşturur (dördüncü aşama). Oluşan çatlaklara sülfat iyonlarının girişi ile daha iç kısımlarda da hasar meydana gelmeye başlar. Sülfat; CH ve var ise C₃A ve/veya monosülfat ile reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjiti oluşturur. Boşluk ve çatlaklar etrenjit ve alçıtaşı ile dolar (beşinci aşama). Son aşamada üç tabaka meydana gelmiştir: Henüz hasar görmeyen kısım, boşluk ve çatlaklara alçıtaşı ve etrenjit dolmuş kısım ve tamamen hasar görmüş en dış kısım. Bu kısımda alçıtaşı yüzeye paralel çatlaklara yerleşmiştir ve bazı araştırmacılar kesitte damarsı bir görümün varlığını tespit etmiştir. Son iki aşamada eşzamanlı olarak CH'in harcanması ile azalan pH nedeniyle CSH jeli de kalsiyum kaybetmeye (dekalsifikasyon) başlar ve Ca/Si oranı azalarak özellikle en dış tabakanın taşıyıcılığında azalmaya yol açar. Ortamın pH' ı düşükse ve sülfat çözeltisi ile destekleniyorsa sözü edilen olay hızlanarak devam eder. Bu esnada tomasit oluşumu gözlenebilir. Tomasit normal koşullar altında ender görülen bir sülfat etkisi ürünüdür. Özellikle hasarın en fazla olduğu (CSH'in kalsiyum kaybederek zayıfladığı) en dış bölgede tomasit oluşumu için gerekli çoğu kaynak (zayıflayan CSH'tan Si, Ca, etrenjit ve alçıtaşından Ca, S) mevcuttur. Bu açıdan en dış bölgede CSH tamamen dekompoze olursa, SiO₂ sulu çözeltisi açığa çıkar. Ancak tomasit oluşumu için ilave karbonat kaynağına da ihtiyaç vardır (kalker katkısı veya karbonatlaşma). Tomasit oluşumunda yüksek pH (>10.5) ve düşük sıcaklıklar CO₂'nin sudaki çözünürlüğünü arttırdığından olumlu etki yapmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, tomasitin normal sıcaklıklarda daha yavaş da olsa meydana geldiğini göstermiştir. Tomasit etrenjit kristaline çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın Al₂O₃ içermemekte, bu bileşen yerinde SiO₂ bulunmaktadır. Genleştirici etkisi etrenjite kıyasla daha zayıftır. Meydana getirdiği hacim genişmesi etrenjitin %45'i kadardır. Özellikle Kuzey Avrupa ve İngiltere'de tomasit kaynaklı hasarlar sülfat içeren zeminlerde inşa edilmiş pek çok köprü ayağında gözlenmiştir. Konu ile ilgili daha geniş bilgi sonraki bölümlerde sunulacaktır.

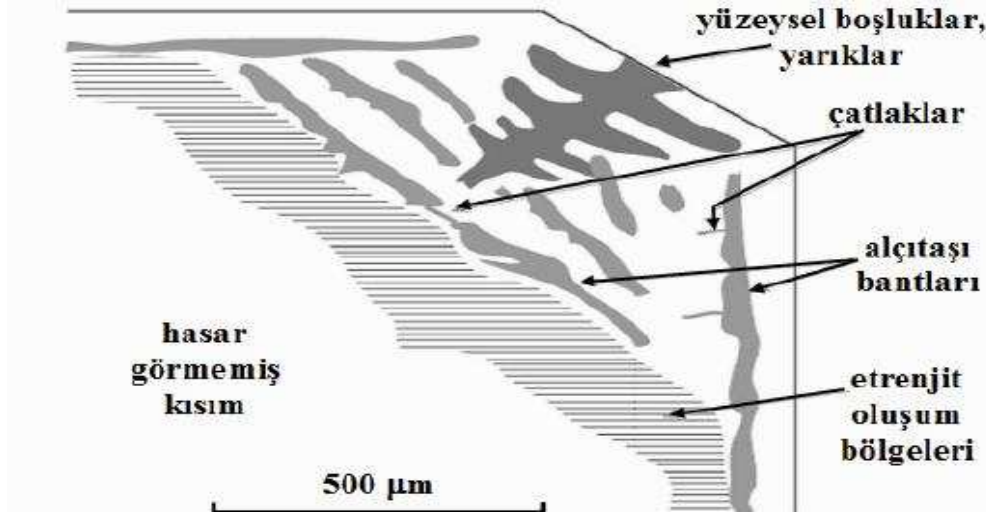


(a)



(b)

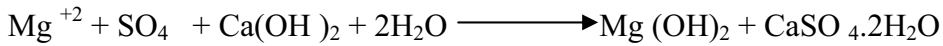
Şekil 3.4. Na₂SO₄ etki mekanizmasının şematik gösterimi (a) ve kimyasal reaksiyonların gelişimi (b)



Şekil 3.5. Sülfat etkisinde yüzeye yakın bölgelerde oluşan alçıtaşı bantları

3.3.4.4. MgSO₄ saldırısı ve etki mekanizması

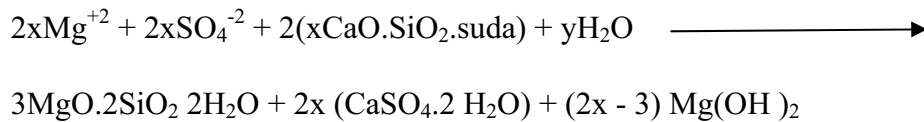
SANTHANAM vd.'nin (2003) MgSO₄ saldırısı için öne sürdükleri mekanizma şematik olarak Şekil 3.6.a' da verilmiştir. Kimyasal olarak meydana gelen reaksiyonlar da Şekil 3.6.b' de görülmektedir. İlk aşamada pH değeri 7-8 olan MgSO₄ çözeltisine bırakılan örneklerde pH değeri boşluk suyundaki Ca(OH)₂'nin çözeltiliye çıkışı ile bir miktar yükselir. Ancak bu yükselme sınırlı kalır. Çünkü özellikle örnek yüzeyinde Ca(OH)₂ ile Mg⁺² reaksiyona girerek, Mg(OH)₂ (brusit) tabakası meydana getirir (ikinci aşama). Bu reaksiyon şu şekilde verilmiştir:



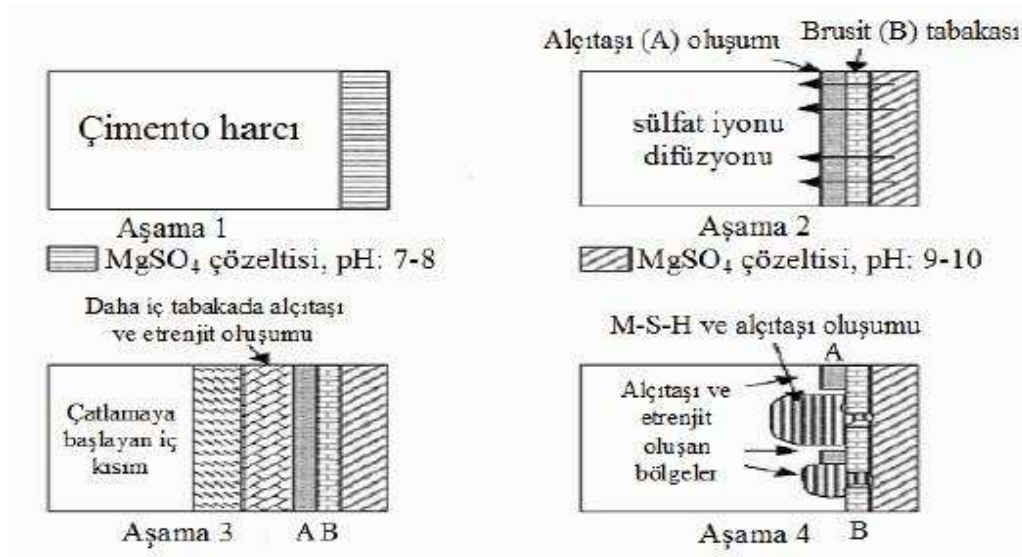
Brusit tabakası ile birlikte penetre olan sülfat ile Ca(OH)₂'nin reaksiyonundan alçıtaşı oluşur. Daha iç kısımlarda ise pH'nın daha yüksek ve sülfat konsantrasyonunun nispeten düşük olduğu kısımda etrenjit meydana gelir. En dışta oluşan brusit tabakasının, sülfat girişini engelleyerek reaksiyon hızını yavaşlattığını iddia eden çalışmalar mevcuttur. MgSO₄ etkisinin, örnek görünümünde ve genişleme değerinde daha az hasar yarattığı bazı araştırmacılar tarafından savunulmaktadır. Ancak bu durum etki süresine, ortam pH'ı ve çözeltilideki sülfat ve Mg konsantrasyonuna bağlı olarak değişebilir. Bir süre sonra brusit tabakası altında

oluşan alçıtaşı ve etrenjit genişerek üst kısma baskı uygulamakta ve dış bölgelerde parçalanmaya yol açmaktadır. Bu durumda sülfat penetrasyonu birden hızlanır (üçüncü aşama). Böylece derinlik boyunca sözü edilen oluşumlar yenilenir (üçüncü aşama). Son aşamada en çok hasar gören dış kısımlardan başlamak üzere çok çok azalmış olan pH'nın etkisi ile CSH jeli dekalsifiye olur. Açığa çıkan kalsiyum ile sülfatın reaksiyonundan alçıtaşı oluşumu gözlenir. Ayrıca pH'nın 10'un altına düştüğü dış tabakalarda daha önce pH yüksekken oluşan etrenjit de, dekompoze olarak ilave alçıtaşı meydana getirir. Ortamdaki alkali düşüşü Na_2SO_4 çözeltisinde gözlenenden çok daha kuvvetlidir. Bunun nedeni $\text{Mg}(\text{OH})_2$ oluşumu ile boşluk suyundaki OH^- iyonlarının hızla tüketilmesidir. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'in düşük çözünürlüğü OH^- iyonlarının bağlanmasına ve ortam alkalinitesinin düşmesine yol açar. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin Mg^{+2} ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'nin oda sıcaklığında doymuş çözeltisinin çözünürlüğü 0.01 g/l olup, oldukça düşüktür ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'ye göre 185 kat daha az. Diğer katyonda (Na^{+2}), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sistemde çözünüp alçıtaşı oluştururken, bol miktarda OH^- iyonu serbest kalmakta ve ortam pH'ı korunmakta veya yükselmektedir. Oysa $\text{Mg}(\text{OH})_2$ çözünmediği için, ortam pH'ı azalmaktadır. Ortam pH'ının azalması, hem CSH hem de etrenjit stabilitesini olumsuz etkilemektedir.

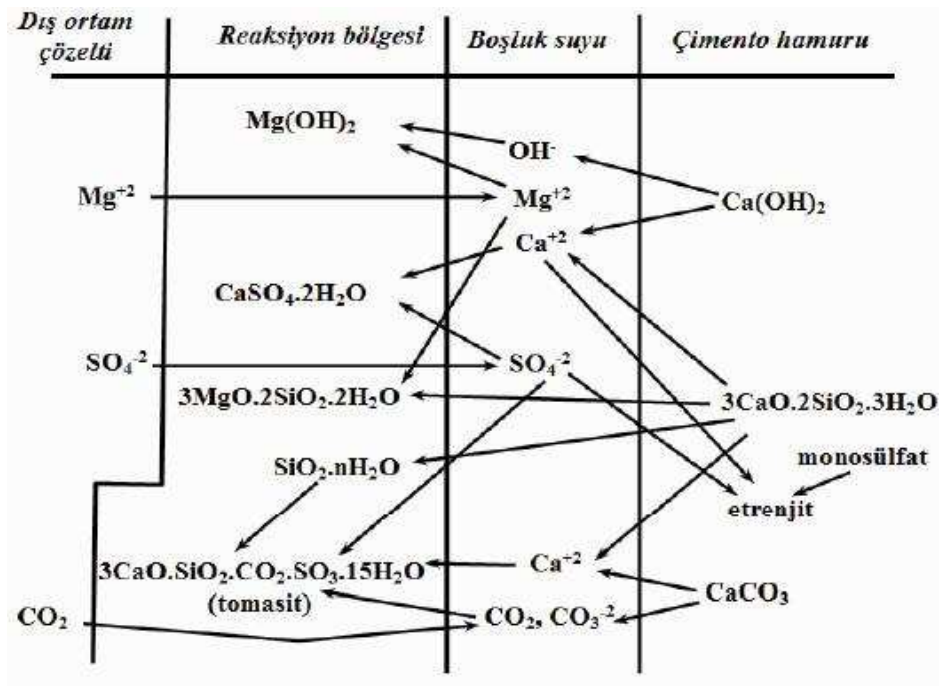
Aynı zamanda CSH, sülfat varlığında, önce SiO_2 sulu çözeltisine ardından taşıyıcı özelliği olmayan MSH'a ve alçıtaşına da dönüşmektedir. Öte yandan pH değerinin 10'un üstünde kaldığı bölgelerde eğer ortamda karbonat kaynağı mevcutsa tomasit oluşumu beklenebilir:



(a)



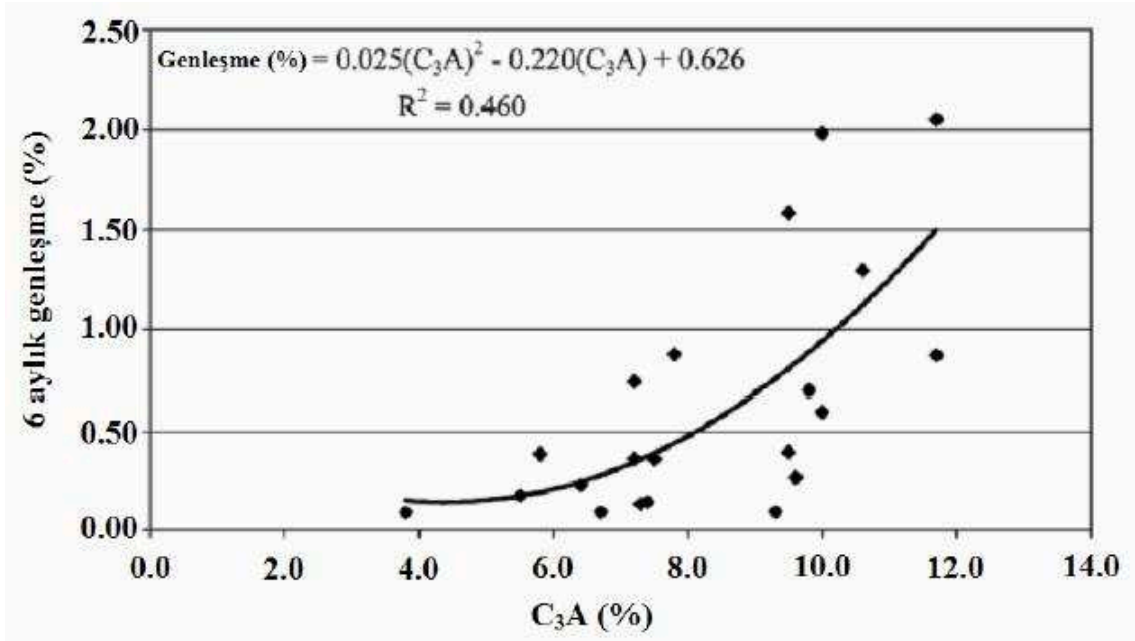
(b)

Şekil 3.6. MgSO₄ etki mekanizmasının şematik gösterimi (a) ve kimyasal reaksiyonların gelişimi (b)

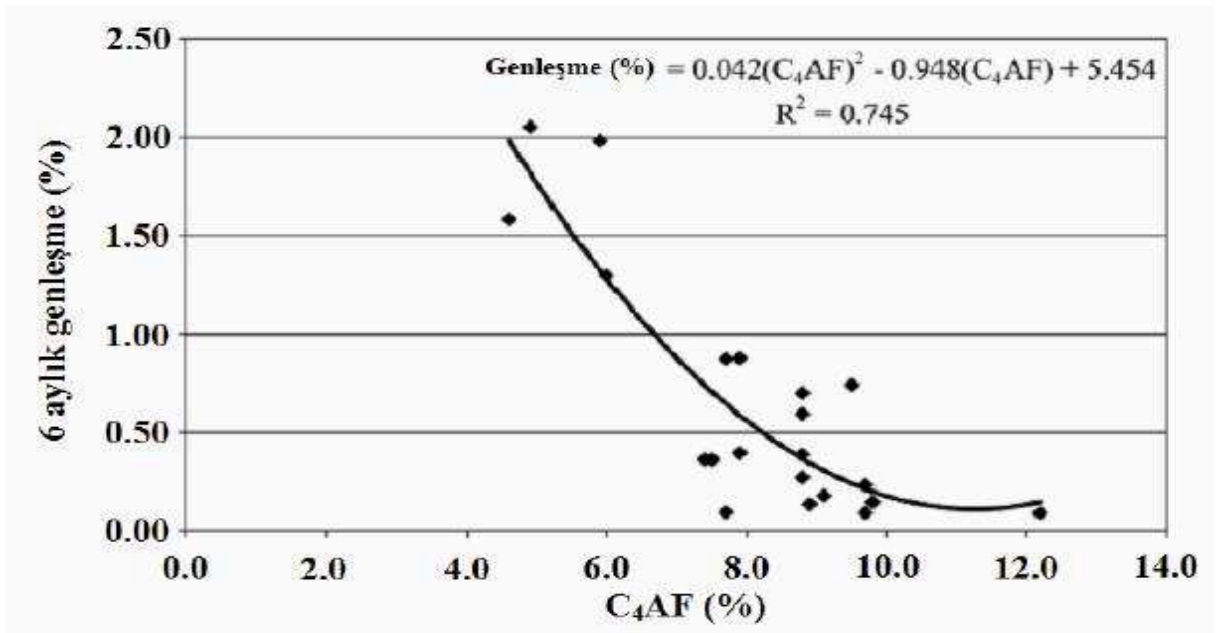
3.3.5. Çimento esaslı kompozitlerin sülfata karşı dayanıklılığını etkileyen parametreler

3.3.5.1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu

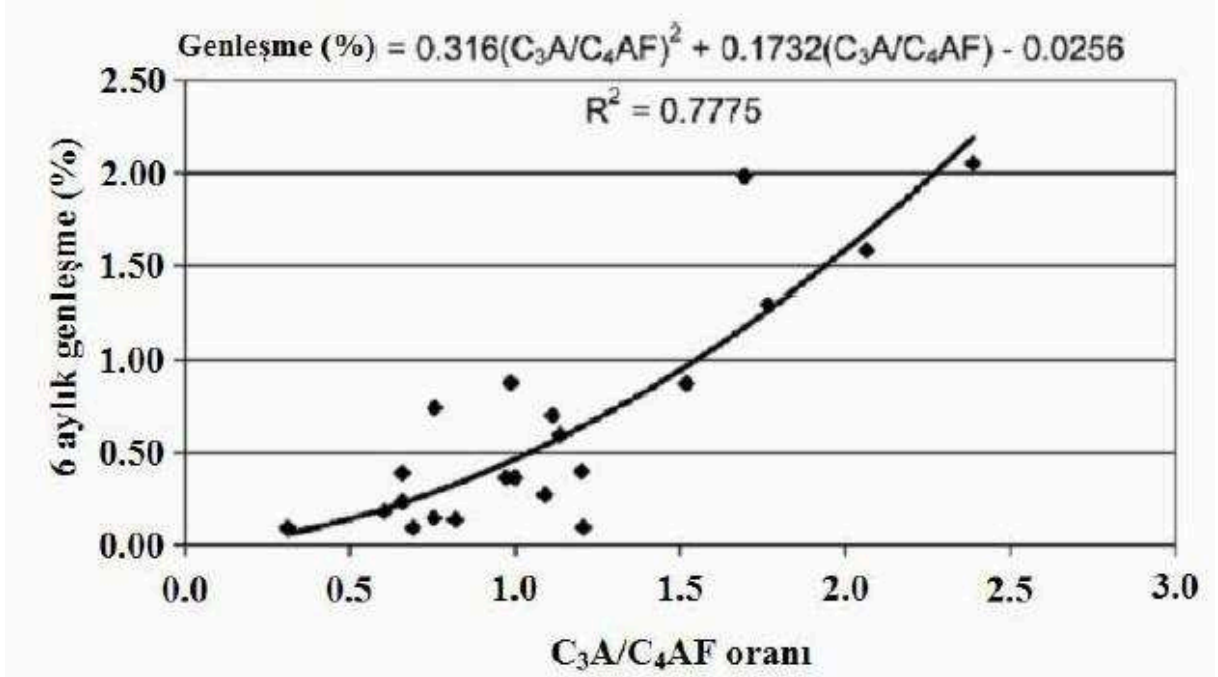
Sülfat etkisi mekanizmalarında, çimento ile ilgili parametrelerin her biri ayrı ayrı incelendiğinde, en önemlilerinin C_3A içeriği, C_3S/C_2S oranı ve C_4AF oranı olduğu söylenebilir. Pek çok araştırmacı tarafından kullanılan ASTM C1012 yönteminde 50 g/litrelik Na_2SO_4 çözeltisi kullanılmakta ve harç çubuğu örneklerinin bu çözeltideki genleşme miktarları 3-6 aylık süreler boyunca ölçülmektedir. Aşağıdaki grafikte farklı kompozisyonlara sahip çimentolarla hazırlanmış standart harçların deney sonrası 6 aylık genleşmeleri C_3A içeriklerine bağlı olarak çizilmiştir. Grafikten görüleceği üzere özellikle %5 ve üzeri C_3A içeriği genleşmeyi artırmaktadır. C_3A %5-8 arasında iken monosülfat ve alüminahidrat oluşurken, %8'in üzerinde hidrogarnet oluşumu da meydana gelmektedir. Tüm bu ürünlerin sülfatla reaksiyonu sonucu etrenjit oluşmakta, etrenjit de genleşme yaratmaktadır. Pratikte çimentoların diğer özellikleri de sabitlenemeyeceğinden ilişkide saçılma olması kaçınılmazdır. Bu yüzden çok fazla değişken içeren çimentolar kullanılarak hazırlanan örneklerin birbiri ile karşılaştırılması, yorumlamada zorluk yaratmaktadır. Ancak genel eğilimi elde etmek mümkündür. Öte yandan C_4AF içeriğinin genleşmeye etkisi incelendiğinde tersi bir sonuçla karşılaşılmıştır. İlişkinin regresyon katsayısı C_3A/C_4AF oranı dikkate alındığında daha da güçlenmektedir. Oysa ASTM C 150'nin sülfata dayanıklı çimento sınıflandırmasında C_3A+2C_4AF oranı da %25 ile sınırlandırılmış, diğer bir deyişle C_4AF oranının da yükselmesi istenmemiştir. Diğer taraftan TIKALSKY'e göre demir içeren katı eriyik oranının arttırılması Na_2SO_4 etkisine karşı direnci arttırmaktadır. Bunun nedenini C_4AF hidratasyon ürünlerinin sülfatla reaksiyonu sonucunda oluşan etrenjitin demirce zengin olması ve bu yapısı nedeniyle genleşmeye önemli bir katkısının olmaması ile açıklanmıştır[5].



Şekil 3.7. Na₂SO₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genleşme değeri C₃A içeriği ilişkisi



Şekil 3.8. Na₂SO₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genleşme değeri C₄AF içeriği ilişkisi



Şekil 3.9. Na₂SO₄ çözeltisinde 6 ay bekletilen örneklerin genişleme değeri C₃A/C₄AF içeriği ilişkisi

Sülfat etkisine karşı direncin öngörülmesinde, C₃A ve C₄AF'nin çimento kompozisyonunda bulunma oranlarının yanında C₃S/C₂S oranı da dikkate alınmalıdır. C₃S/C₂S oranının rolü sülfat etkisinin katyon tipine göre de değişkenlik göstermektedir. Bu durumda, farklı katyona sahip sülfatlar kullanılarak yapılan araştırmalarda beklenmedik sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir, C₃A oranı %5'in altında ve birbirine yakın olan iki çimento kullanarak harç çubuğu örnekleri hazırlamıştır. Bu iki çimentonun C₃S/C₂S oranı çok farklıdır. Hatta C₃S/C₂S oranı yüksek olanın C₃A'sı bir miktar daha düşüktür. MgSO₄ çözeltisinde bekletilen örneklerden C₃S/C₂S oranı yüksek olan diğerine kıyasla çok hızlı bir şekilde ve büyük derecede hasar görmüştür. Sülfat etkisinde en önemli parametrelerden biri olmasına karşın, C₃A oranının düşüklüğü, bu katyona (Mg⁺²) sahip sülfat etkisinde yeterli olamamıştır. Sülfata dayanıklı olarak isimlendirilen bu iki çimento, MgSO₄ çözeltisinde bekletildiğinde çok farklı performans verebilmektedir. Bu yüzden sülfat dayanıklılığının standartlarca sadece C₃A ile sınırlandırılması yeterli değildir. C₃S/C₂S oranı da sınırlandırılmalıdır.

3.3.5.2. Çimento inceliği

Teorik olarak, çimento inceliğinin artırılması hidrasyon ürünlerinin arasındaki kapiler boşlukları azaltacağından geçirimsizliği azaltacaktır. Bu durumda sülfat etkisine karşı dolaylı olarak boşluk yapısını etkileyerek direnci arttıracakları öngörülebilir. Ancak, incelik artışı kıvam suyunu aşırı arttırırsa ve/veya hidrasyon ısısını aşırı yükselterek termal büzülme çatlaklarına yol açarsa çimentonun inceltmesi, bu çimento ile üretilecek yapının sülfata karşı dayanıklılığını azaltıcı yönde rol oynayacaktır.

Tablo 3.3. Toprak ve suda çözünebilir sülfat konsantrasyonu dikkate alınarak yapılan etki derecesi sınıflandırması (ACI 201.2R)

Etki Derecesi	Suda Çözünen SO ₄ -2	
	Toprakta %	Suda ppm
Hafif Etki	<0.1	<150
Orta Şiddette	0.1-0.2	150-1500
Şiddetli	0.2-2.0	1500-10000
Çok Şiddetli	>2.0	>10000

Çözelti konsantrasyonunun yanında, hatta daha da önemli olarak, örneğe penetre olan çözeltinin boşluk suyundaki konsantrasyonun örnek derinliği ile değişimi, sülfat etkisinin derinlikle meydana getirdiği ürünlerde ve bu ürünlerin yarattığı hasarda etkilidir. Bu açıdan aynı sülfat çözeltisinde bekletilen geçirimsiz ve geçirimsiz örneklerin iç yapılarının farklı derecelerde etkileneceği öngörülebilir.

3.3.5.3. Mineral katkı kullanımı

Uçucu kül, doğal puzolanlar, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin, pirinç kabuğu külü gibi puzolanik özellik gösteren mineral katkıların, çimento esaslı kompozitlerin sülfat etkisine dayanıklılıkları pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Elde edilen bulgular, çoğunlukla bu malzemelerin sülfat etkisine karşı

olumlu etkisinin olduğunu göstermektedir. Ancak bazı istisnalar da söz konusudur. Katkılı çimentolar kullanılan puzolanik ve/veya puzolanik olmayan katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre farklı performans gösterebilmektedir. Örneğin silika dumanı ve cüruf içeren örneklerin Na_2SO_4 kaynaklı sülfat etkisine karşı oldukça etkili olduğu, ancak MgSO_4 kaynaklı sülfat saldırısında direnci olumsuz etkilediği bazı araştırmacılar tarafından deneysel olarak kanıtlanmıştır. MgSO_4 kaynaklı sülfat saldırısında, ikincil CSH jelinin (silis dumanının kalsiyum hidroksitle yaptığı reaksiyon sonucu oluşan) hasar gördüğü ve dayanım kayıpları meydana geldiği gözlenmiştir. Silis dumanı aynı zamanda betonun kapiler boşluk yapısını küçülttüğü için başlangıçta sülfat iyonlarının betona girişini güçleştirir ve sülfat reaksiyonlarını geciktirir. Ancak, başka nedenlerden dolayı meydana gelebilecek kılcal çatlaklardan ilerleyen sülfat, bu küçük gözeneklerde reaksiyona girerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturduğunda daha yüksek iç parazit gerilmeler oluşturarak, uzun vadede betonun dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir.

Mineral katkıların etkinliği ile ilgili bir başka önemli bulgu da SIDERIS tarafından rapor edilmiştir. Benzer kompozisyona sahip, ancak incelikleri farklı uçucu küllerin kullanımı sülfat direnci açısından çok farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Aynı kompozisyondaki kaba kül, sülfat saldırısı karşısında beton performansını olumsuz etkilerken, yüksek incelikteki kül olumlu sonuç vermiştir. Bu sonuç, külün hem kimyasal hem de fiziksel olarak uygunluğunun sülfat direnci açısından ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

3.3.5.4. Su/Çimento (S/Ç) oranı, çimento dozajı ve boşluk yapısı

Tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi, S/Ç oranının azaltılması kapiler boşluk miktarını azaltacağından sülfat etkisine karşı direncin sağlanmasında en etkili yoldur. Uygun çimento dozajının kullanılması, 300 kg/m^3 sınırının altına inilmemesi de sülfat direnci açısından gereklidir. Çimento dozajı ve S/Ç oranı beton yoğunluğunu yüksek tutmak amacıyla uygun seçilmelidir. Özellikle betonun geçirimsizliği ile sülfat etkisine karşı direnç arasında güçlü bir bağıntı bulunmaktadır. İyi sıkıştırılmış, düşük S/Ç oranına sahip bir betonda çimento kompozisyonu da sülfat etkisine karşı dirençte ikincil derecede önemlidir.

Sülfat etkisinin beton örneklerde incelenmesi ile harç örneklerde incelenmesi arasındaki en önemli fark, betonda iri agreganın varlığının yanında, örnek geçirimsizliğinin sülfat etkisine karşı dirençte daha ayırt edici olmasıdır. KHATRI, yaptıkları kapsamlı araştırma projesinde, beton örneklerin çimento kompozisyonundan bağımsız şekilde S/Ç oranlarına yani diğer bir deyişle geçirimsizliklerine bağlı olarak sülfat etkisine karşı direnç gösterdiklerini belirlemiştir. Çimento harcı örneklerinde ise sabit S/Ç oranında elde edilen bulguların, sülfat direnci açısından çimento tipini ayırt edici olduğu sonucu çıkarılmıştır.

3.3.6. Çimento esaslı kompozitlerin sülfata karşı dayanıklılığını ölçen deney yöntemleri

Türk standartlarında betonun sülfata karşı dayanıklılığının tespitine yönelik bir deney yöntemi bulunmamaktadır. Amerikan standartlarına göre çimento esaslı kompozitlerin sülfat direnci, çimento harcı örnekleri üzerinde deneyler yapılarak belirlenmektedir (ASTM C1012, ASTM C452, ASTM C1038). Beton için standartlaşmış bir deney yoktur. Betonun sülfata karşı dayanıklılığını tespit için kullanılan yöntemler, Na_2SO_4 , MgSO_4 , CaSO_4 çözeltilerinde veya bunların karıştırıldığı çözeltilerde bekletme prensibine dayanır. Bekleme esnasında örneklerin zamana bağlı olarak dinamik elastisite modülleri belirlenebilir. Boy değişimleri ve/veya basınç dayanımları takip edilebilir. Tuz kristalizasyonunun etkisini de incelemek için için ıslanma kuruma, ısınma soğuma gibi hızlandırılmış yöntemler kullanılabilir. Ya da saha örnekleri çok uzun dönemli olarak açıkta sülfatlı çözeltilerde veya toprakta bekletilmektedir[5].

3.3.6.1. Boy ölçümü

Sülfat etkisi çoğunlukla genişlemeye yol açtığı için etki derecesinin belirlenmesinde boy ölçümü sıkça kullanılır. Amerikan standartlarından en çok kullanılan ASTM C1012 standardıdır. Standart harç örnekleri hazırlanarak yeteri kadar dayanım kazanması beklenir (20 MPa). Ardından 50 g/litrelik Na_2SO_4 çözeltisinde (33600 ppm SO_4^{2-}) bekletilen örneklerin 3-6 aylık genişleme değerleri takip edilir. Genişleme değeri için ASTM C1157'de 26 haftada %0.1' in altında ise orta derecede sülfata

dirençli, %0.05'in altında ise yüksek derecede sülfata dirençli sınıflandırması yapılmıştır. Çimentoların kimyasal kompozisyon açısından Na_2SO_4 çözeltisindeki performansını yansıtmaktadır. Bu standart sadece Na_2SO_4 çözeltisi içindeki performansı vermekte, diğer katyonlu sülfatlardaki performans hakkında fikir vermemektedir. Deney örneklerinin çimento harcı olması geçirimsizliğin etkisini ikinci plana atmaktadır. Bu yüzden ASTM C1012 kullanıldığında, silis dumanı gibi maddelerin yarattığı geçirimsizlik etkisinin yeteri kadar ortaya çıkmadığı belirtilmektedir. Uzun deney süresi bir diğer dezavantajdır. ASTM C452 ve ASTM C1038 standartlarında ise sülfat, çimento harcı hazırlanırken bünyeye katılmakta ve örnekler suda bekletilmektedir. Bu deney yöntemlerinden ASTM C452'de örnekler çözeltiliye kalıptan alındıktan hemen sonra girdiği için katkılı çimentolarda kullanılmamalıdır. Öte yandan, standart Portland çimentosu için kullanıldığında ASTM C452 standardı ile 14 günde sonuç elde edilebilmektedir. Bu standardın dış sülfat etkisinden çok iç sülfat etkisi yarattığı için uygun olmadığını savunan araştırmacılar da mevcuttur.

ASTM C1012 standardı sülfat çözeltisinin pH değerinin de sabit tutulmasını, bu amaçla çözeltinin belirli zaman aralıklarında değiştirilmesini önermektedir ve araştırmacılar çoğunlukla bu yöntemi kullanmaktadır. Ancak bu işlem örnek bünyesine sürekli yeni sülfat girişini sağlamakta, boşluk suyu sülfat konsantrasyonunu yükseltmektedir. Standart değiştirme aralığı için pH değeri dışında bir kıstas vermediği için, sık değiştirme ile seyrek değiştirme arasında farklılık oluşabilmektedir. Çözeltinin değiştirilmesi aynı zamanda boşluk suyu pH'ının daha hızlı azalmasına yol açarak alçıtaşı kaynaklı sülfat etkisini hızlandırmaktadır. Oysa pH'ın daha yüksek olduğu durumlarda etrenjit oluşumu da mümkündür. Literatürde çözelti değiştirilerek yapılan çalışmalardan elde edilen genleşme değerleri ile çözelti değiştirilmeden elde edilen genleşme değerleri karşılaştırıldığında, genleşmeye başlama süresinin, çözelti değiştirilmediği durumda iki misli uzadığı belirlenmiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar çözeltilerdeki sülfat konsantrasyonunun sabit kalması için çözeltiyi değiştirmeden sadece seyreltik sülfürik asit ilavesi ile pH'ı düşürme yoluna gitmiştir.

3.3.6.2. Ağırlık değişimi

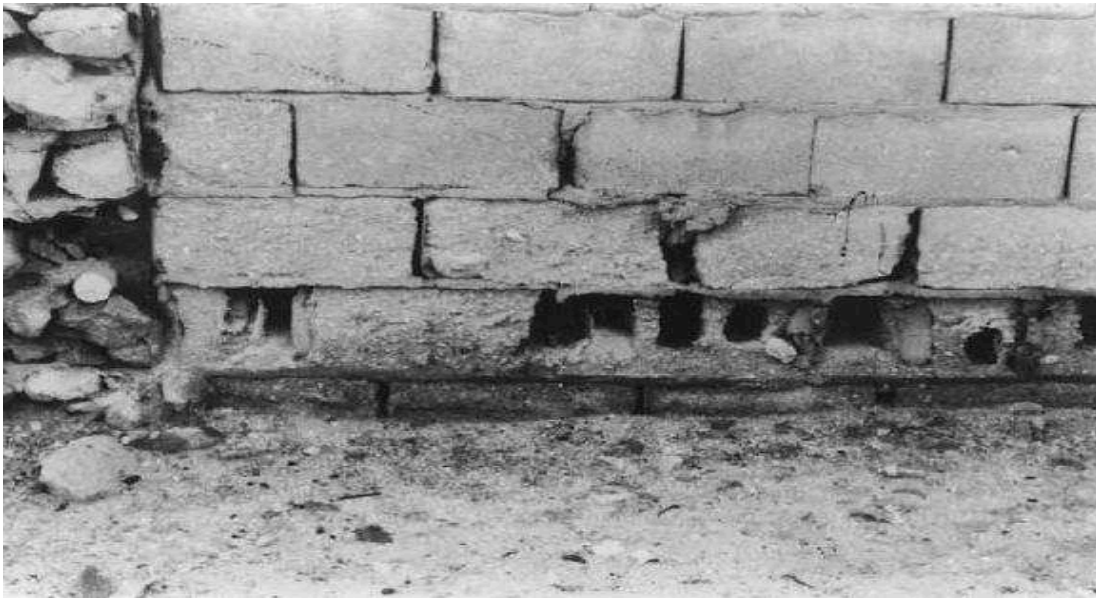
Sülfat etkisi altındaki örneklerin ağırlık değişimi teorik olarak önce artan, ardından hasarın şiddetine bağlı olarak azalan bir eğilimdedir. İlk aşamada sülfat tuzlarının bünyeye girişi ve reaksiyonlarda bol miktarda su kullanılması ağırlıkları arttırmaktadır. İkinci aşamada hasarın meydana gelmesi ile birlikte parça kopmaları, kesit kayıpları yaşanarak ağırlık azalması gözlenecektir. Ancak pratikte bazı ölçüm sorunları ile karşılaşılabilir. Örneğin ilk ağırlığı, kuru olarak ölçülürse her ölçüm için kurutma gerekir ve bu da ilave bir hasar etkisi oluşturacaktır. Örneğin ilk ağırlığı, kuru yüzey doygun olarak ölçülecekse her seferinde örneğin yüzeyi kurulanmalıdır. Bu esnada zayıflayan parçalar dökülerek örneğin hafiflemesine yol açacaktır. Aynı zamanda örnek içine penetre olan sülfat ve su ilave ağırlık yaratarak örneğin ağırlaşmasına yol açacaktır. Zayıflayan örneklerin dökülen parçalarının ne dereceye kadar temizlenmesi gerektiği de önemli bir sorundur. Tüm bu nedenlerden dolayı ağırlık değişimi ölçümleri çeşitli hatalar içermekte, zaman zaman yorumlamada güçlük yaratmaktadır.

3.3.6.3. Basınç dayanım değişimi

Na_2SO_4 etkisi altındaki örneklerin basınç dayanımları, ağırlık artışında olduğu gibi önce artıp, daha ileri evrelerde azalmaktadır. Uzun vadede dayanımdaki azalma, sülfat konsantrasyonuna bağlı olduğu gibi, kation tipiyle de yakından ilişkilidir. Düşük sülfat konsantrasyonlarında ise ilk aşamada meydana gelen dayanım artışı korunabilir veya dayanım düşüşü için çok uzun süreler gerektirebilir. Sülfat etkisi sonucu oluşan ürünler iç yapıda çatlaklara yol açtığı için boşluk yapısı bozulmakta ve etki derecesi de gittikçe şiddetlenmektedir. NEVILLE, iç yapı hasarı ile her %1'lik boşluk artışının %5.5'lik dayanım kaybına yol açtığını belirtmiştir. MgSO_4 etkisinde ise ortam pH'ına bağlı olarak örnek yüzeyinde hızla bir brusit tabakası oluşur, tabaka altına penetre olan sülfat bu bölgede alçıtaşı oluşumunu hızlandırır. Brusit tabakası bir süre sonra daha iç kısımda oluşan alçı tabakası nedeniyle parçalanır ve ortam pH'ı iyice düşer. Bu aşamada CSH'nin da bozunması sonucu basınç dayanımında belirgin şekilde azalma gözlenir.

3.3.6.4. Yüzeysel görünüm

Laboratuvar koşullarında sülfat çözeltilerinde bekletilen örneklerde, önce köşelerden başlayan çatlama, dökülme ve parça atmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle harç çubukları çabuk elden çıkmaktadır. Bazı araştırmacılar, harç çubuklarının üst ve alt kısımlarına yalıtım malzemesi sürerek deney yapmanın, örneklerin daha uzun süre ölçümüne olanak sağlaması açısından, daha sağlıklı olduğunu savunmaktadır. Saha örneklerinde ise çatlama, dökülme ve parça atmanın yanında tuz kristalizasyonu ile beyaz toz birikimleri, yumuşama vb. görünüm değişimleri de oluşmaktadır.



Şekil 3.10. Beton briketlerin sülfatlı zeminde parçalanması

3.3.7. Alkali etkisi

Beton agregalarında aranan özelliklerden biri çimento harcı ile zararlı kimyasal reaksiyona girmemesidir. Ancak bazı tür agregalar, belirli ortamlarda aşırı genleşme gösteren reaksiyonlara yol açıp, betonun zamanla çatlmasına,, bozulmasına neden olabilmektedir. Bu tür reaksiyonlar arasında en yaygın görüleni alkali-agrega reaksiyonu adıyla da bilinen alkali silika (ASR) reaksiyonudur. Bir diğer reaksiyon ise alkali-karbonat reaksiyonudur. Ayrıca agregadaki bazı kararsız bileşenlerin

oksidasyonu veya hidratasyonları da betonun hacim sabitliğinin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir. Son yıllarda İzmir yöresinde bazı betonarme yapıların ASR sonucu hasar gördüğü bilinmektedir. Bu sebeple betonda ASR oluşumuyla ilgili bilgilerin daha ayrıntılı olarak verilmesi uygun görülmüştür.

3.3.7.1. Alkali silika reaksiyonu

Betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine birçok faktör sebep olabilir. Yapı elemanının durabilitesini belirleyen etkenler arasında beton bileşimini oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden kaynaklanan dış etkiler sayılabilir. Bazı durumlarda, beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlar yapabildiği, böylece yapının yada yapı elemanının hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle zarar görebildiği bilinmektedir. Alkali-Silika Reaksiyonu, bu tür kimyasal bozulma nedenlerinden biridir.

1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD, Kaliforniya'daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumlarına bağlı yıkımlar rapor edilmiştir. Beton malzemelerin standartlara uygun olmasına rağmen, yapım yılını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar oluşmuştur. Genellikle harita çatlağı şeklinde görülen sorun bazen de çatlaklardan jel çıkışı, betonun patlaması gibi belirtiler de göstermiştir. STANTON, 1940 yılında çatlamanın (daha sonra Alkali-Silika Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyonun sonucu olduğunu açıklamıştır.

Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde birçok betonarme yapıda hasarlar meydana getiren ASR, oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) gibi alkali oksitler beton gözenek suyunda çözülerek sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) oluştururlar ve aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olurlar. Reaksiyonun neden olduğu genişleme belli bir sınırı aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur.

Çimento, hammaddesi en kolay ve bol bulunan bir ürün olarak bilinir. Özellikle ülkemizde, hemen hemen her bölgede çimento temel hammaddesi olan kalker ve kile rastlamak mümkündür. Ancak doğada bulunan bu maddelerin hiçbiri ideal bir klinker üretimi için istenilen özelliklere uygun olmadığı gibi, hiçbir zaman sürekli bir homojen yapı göstermezler. Bilindiği gibi çimento fabrikalarında günde binlerce ton kalker ve kil kullanılır. Bu çapta bir madde akışı içinde ocaklarda seçme, ayırma ve kontrol olanakları son derece sınırlı kalır.

Ocaklardan doğrudan alınan hammadelerde, içinde klinker üretimi için sakınca yaratabilen birçok bileşen bulunabilir. Genellikle sediman bir oluşum olan kil mineralleri içinde magnezyum oksit, sülfat, klorür, serbest silis (kuvars), sodyum ve potasyum oksitlerine rastlanabilir. Hammade içinde fırına giren bu bileşimler klinker oluşum reaksiyonlarına katılmazlar. Ancak pişirme, öğütme ve üretilen çimentonun hidratasyonu sırasında çeşitli sakıncalar yaratırlar.

Hemen hemen bütün kil mineralleri içinde alkali oksitlerine ve klorür tuzlarına rastlanır. Bu bileşenlerin çimento içinde belli değerlerden fazla bulunması istenilmez. Hatta normal değerlerde bulunması halinde bile, özellikle ön ısıtmalı klinker üretim sistemlerinde büyük sorun yaratırlar. En uygun hammadde kullanımı halinde bile alkali oksit ve klorür etkilerinden tam olarak kurtulmak söz konusu olmadığına göre, bu bileşenlerin zararlı etkilerinden kurtulmak için özel önlemlerin alınması gerekir.

Pratikte çimento içinde bulunan alkali oksit yüzdesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz standartlarında herhangi bir sınır değer bulunmamakla beraber, ASTM standartlarında çimento içindeki toplam alkalinite yüzdesinin % $(Na_2O+0,658 K_2O)$ 0,6 'dan fazla olmaması şartı bulunmaktadır[6].

ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları, yeterli miktarda alkali ve ortamda nem bulunmalıdır. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genişleme de olmayacaktır. ASR basitçe iki aşamada görülebilir;

Alkali + Reaktif Silika \longrightarrow Alkali-silika jel ürünleri

Alkali-silika jeli + Nem \longrightarrow Genleşme

Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin "eşdeğer Na₂O" değeri olarak % 0,6 değerini aşması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak şu ifade ile hesaplanmaktadır;

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0,658 K_2O$$

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl vb) kaynaklanır. Ayrıca alkaliler, çimento dışında; agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilirler.

Genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak, betona katılan kimyasal yada mineral katkıları alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı göz önüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği şu ifade ile hesaplanabilir;

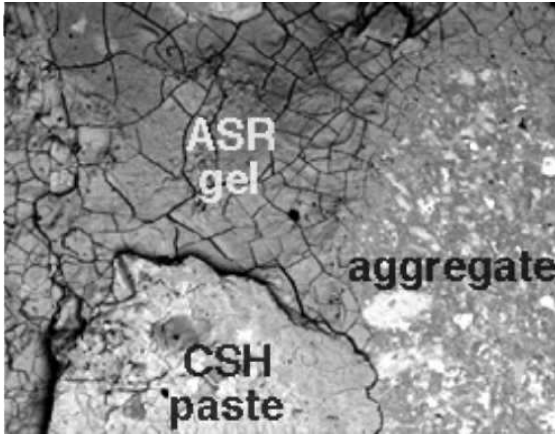
$$[\text{Çimentonun alkali \%}] \times [\text{Çimento dozajı (kg/m}^3\text{)}] = \text{Betondaki alkali miktarı (kg/m}^3\text{)}$$

Betonun alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar. Alkali hidroksit çözeltisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girer. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltide, silikanın kararlı formları bile güçlü silikon bağlarının kırılması nedeniyle reaksiyona girebilir. Agreganın reaktifliği arttıkça daha düşük alkalili çözeltilerde bile jel reaksiyonu oluşabilir. Silika mineralleri reaktiflikleri açısından opal, kalsedon, kristobalit, kriptonkristal kuartz olarak sıralanabilir. Bu minerallerden bir veya birkaçının birarada bulunduğu kayalar arasında, opal, kalsedon, kuartz çörtleri, silisli kireçtaşları, silisli dolomitler, riyolit ve tüfleri, dazit ve tüfleri, silisli şeyller, filitler, opalli oluşumlar, çatlamış ve boşlukları dolmuş kuartzlar sayılabilir.

ASR'nin genel mekanizması bilinmekle birlikte, beton üzerine yapmış olduğu etkiler henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Örneğin çimento alkalinitesi belli bir değere erişince betonda şişme görülmekte, fakat alkalinite ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Buna karşılık çimento dozajının artışı, şişmenin de artmasına neden olmaktadır. ASR için mutlaka suya ihtiyaç olduğu halde, su içinde bekletilen

betonlarda şişme meydana gelmemektedir. Maksimum şişme betonun doymuş rutubetli atmosferde tutulması halinde görülmektedir. Reaktif agreganın inceliği reaksiyon hızını arttırmakla beraber, yüksek incelikte olan mineraller her zaman aynı derecede şişmeye neden olmamaktadır. Beton yapının poröz olması halinde, oluşan alkali silikat jeli beton boşlukları içine dolarak betonda herhangi bir şişme meydana getirmemektedir.

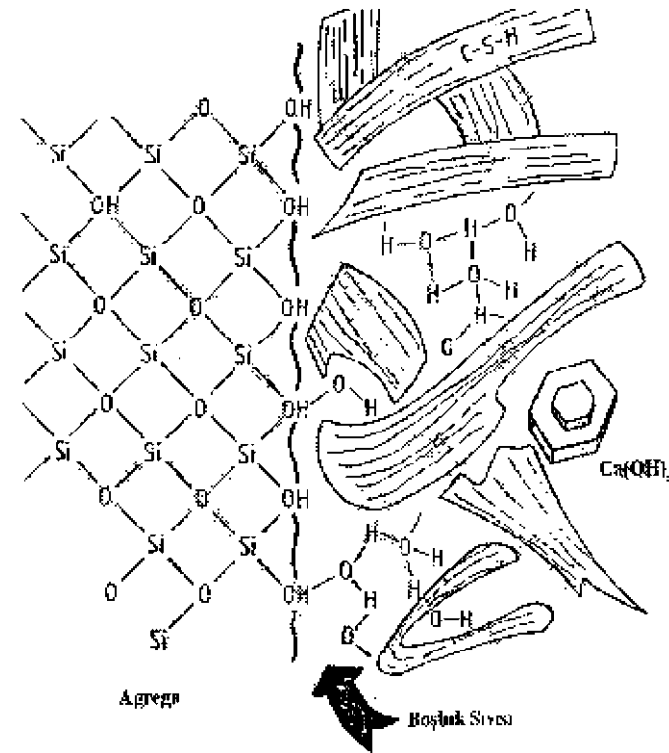
ASR' nin oluşumuna neden olan bir diğer koşul olan nem, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ASR, yalnızca nem varlığında gerçekleşir. Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olurlar. Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır. Su, ASR' de iki rol üstlenmiştir, taşıyıcılığın yanı sıra jelin büyümesini de sağlar. Betonun kurutulması ve ileride su ile temasının önlenmesi reaksiyonun durdurulması için etkilidir. Aksine, tekrarlı ıslanma ve kuruma, alkali iyonlarının göçünü hızlandırarak reaksiyonun şiddetini artırır.



Şekil 3.11. ASR jelinin beton içinde oluşumu

ASR üzerinde beton karışım oranları, agrega boyutu, hava katkısı, mineral ve kimyasal katkıların ve ortam sıcaklığının da etkisi vardır.

Reaktif agrega/alkali oranının belirli bir değerde olması maksimum genişmeye neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar bu oranın 3 ile 10 arasında değiştiğini göstermekte, pik genişmeye neden olan bu değere "pesimum oran" denmektedir. Bu davranış, deneylerde şüpheli kumlar ve reaktif olmayan kırmataş tozu farklı oranlarda kullanılarak belirlenebilmektedir.



şekil 3.12. Silisli agrega içeren bir betonun iç yapısı

Uygulayıcılar, ASR' nin betonu kendiliğinden tahrip etmediğini doğrulamaktadırlar. Daha ziyade, ASR' ye maruz kalan beton, günden güne ortaya çıkan zararlarla daha erken yıpranarak, gszleşmektedir. ASR' nin yıpratıcı kimyasal reaksiyonlarına dair bilinenler köprü tabliyelerindeki harita şeklinde ve uzunlamasına çatlaklar ile taşıyıcı kolonlardaki uzunlamasına çatlaklardır. ASR' nin sebep olduğu neden-sonuç ilişkileri, ASR' nin " betonun AIDS' i " olarak adlandırılmasına yol açmaktadır.

Reaktif agrega içeren bir betonun karışım oranlarını değiştirerek betonun reaktif agrega içeriği ve hidroksil iyonu konsantrasyonu değiştirilebilir. Bu değişim aynı zamanda betonun sonuçtaki genişleme miktarını da etkiler.

Genleşmenin reaktif alkali/silis oranına bağlı olduğu bilinmektedir. Maksimum genişleme, reaktif alkali/silis oranının 3.5 ile 5.5 olması durumunda meydana gelmektedir. Harç ve betonların bu davranışı pratikte önemlidir.

Su altında saklanan numunelerin genişmesi su/çimento oranına bağlı iken su altında saklanmayan numunelerde reaksiyon, su buharının difüzyon hızına bağlı olarak kontrol edilmektedir.

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunu, betonun alkali içeriğini ve reaktif silis/alkali oranını değiştirir. Suda bekletilen harç çubuklarında çimentonun alkali içeriğinin genişlemeye etkisini şu şekilde açıklayabiliriz; çimentonun alkali miktarı arttıkça maksimum davranış eğrisi genişlemekte ve maksimum genişleme reaktif silis/alkali oranı 4.5 civarında iken meydana gelmektedir.

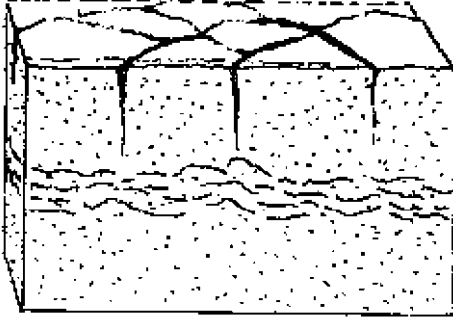
Benzer alkali içeriklerinde, genişleme miktarlarında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar aşağıdaki faktörlere bağlı olabilir;

- 1.) Çimentolardan farklı hızlarda alkali açığa çıkması.
- 2.) Çimentoların sodyum/potasyum oranlarındaki değişimler.
- 3.) Farklı hızlarda dayanım kazanımı.

Kar mücadelesinde kullanılan tuz (NaCl), deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine dışarıdan giren alkaliler, dış alkaliler olarak adlandırılır. Özellikle geçirimli betonlarda ve/veya çatlaklar oluşmuş betonlarda dış alkaliler ASR' nin neden olduğu genişmeleri artırır.

Deniz suyunun sertleşmiş betonda oluşan ASR genişlemelerini artırıcı etkisi, hidrate C_3A ve portlandit bileşenlerinin NaCl ile oluşan reaksiyonu sonucu OH^- miktarının artması sebebiyledir.

ASR varlığının en tipik göstergesi, genleşmelerle ortaya çıkan harita çatlağı tipindeki çatlak desenleridir. Şekil 3.13' deki ASR çatlaklarının deseni, yapılarda oluşan zemin ve muhtelif yüklerin neden olduğu çatlak düzenlerinden oldukça farklıdır.



Şekil 3.13. ASR' nin neden olduğu harita çatlakları

Yapılabilecek göz muayenesi ile; çatlakların konumu ve deseni, uzunlukları, genişlikleri, görünür derinlikleri, çatlakların agrega kesitinden mi yoksa çimento hamurundan mı geçtiği saptanabilir. ASR' nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciği içinde veya agrega taneciği çevresinde reaksiyon halkası biçiminde gelişebilir. Bulabildiği ölçüde su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe hacimsel olarak büyür (şişer). ASR' den kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlaklar oluşur. ASR jelinin su emerek şişmesi sonucu beton içinde depolanan potansiyel enerji, bu çatlaklarla boşalır.



Şekil 3.14. ASR' den kaynaklanan çatlaklara ilişkin görüntüler

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler, beyaz sarımtırak veya renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan ya da sert olabilirler.

Yüzeyde veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki parçalanmalar, tipik bir mısır patlaması gibi davranarak beton yüzeylerinde küçük çukurlar oluşturur. İleri yaşlarda, ASR kopmalarının kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda, rutubet yoğunlaşması patlama türü parçalanmaları arttırır.

Yüzeyde renk kaybı veya renklenmeler, genellikle harita çatlakları ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR' den kaynaklanmaktadır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme yada kahverengileşme görülebilir.

ASR' unu önlemenin en iyi yolu beton dökülmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bunun için bağlayıcı malzemelerin ve agregaların dikkatlice analiz edilmesi ve malzeme seçiminin verimliliğini ve ekonomikliğini optimize eden bir kontrol stratejisinin seçilmesi gerekir.

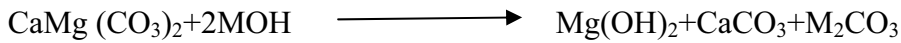
ASR' unu önlemek için malzeme seçiminde aşağıdaki konulara dikkat edilmelidir;

- 1.) Aktif silis içermeyen agregaların tercih edilmesi,
- 2.) Betonun alkali içeriğini sınırlamak,
- 3.) Ortamın nemini kontrol altında tutmak,
- 4.) Katkı maddesi kullanımı.

3.3.7.2. Alkali karbonat reaksiyonu

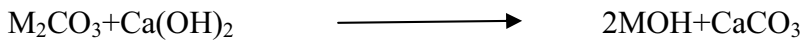
Bazı tip karbonat mineralleri alkali saldırısından etkilenirler. Dolomit veya magnezyum içeren kireçtaşları reaksiyon sonucu magnezyum hidroksite dönüşürler. Dedolomitasyon adı verilen bu olay, harita şeklinde çatlaklara ve betonun tamamen parçalanmasına yol açabilir. Dolomitin esas maddesi $MgCO_3$ su etkisiyle $Mg(OH)_2$ 'e dönüşmekte, $Mg(OH)_2$ ise suda çözünerek suyun taşın içine sızmasını sağlamaktadır. Taşın iç kısımlarında jeolojik devirlerden kalma kil damarları varsa bunlar su ile temas edip şişmekte ve agregaları patlatmaktadır. Alkali-karbonat jeli miktarca az olup genişlemeye daha ziyade dolomitin boşalması ile suya maruz kalıp şişen kıl bileşenleri neden olmaktadır[7].

Tipik bir alkali karbonat reaksiyonu (5.12)'de gösterildiği şekilde gelişir:



Burada M ;potasyum, sodyum ve lityum' u temsil etmektedir.

Bu şekilde oluşan alkali karbonatlar betonda Portland çimentosunun hidrasyon ürünleri ile birleşerek yeniden alkali üretirler.



Bu işlem dolomitin tümü reaksiyona girinceye kadar veya tüm alkali tükenene kadar sürer. Reaksiyonun oluşumunda dolomitin yapısı da önemlidir. Kaba taneli bit yapıda reaksiyon oluşmazken, ince taneli yapıdaki dolomitlerde bu reaksiyon özellikle alkali asit oranı yüksek çimentolarla birlikte kullanılması halinde görülür. Yüksek sıcaklıklar da genişleme miktarını artırır. Reaksiyonun engellenmesi olaya neden olan öğelerin kaldırılması ile olanaklıdır. Diğer bir deyişle, agreganın akılcı

seçimi ile reaksiyon önlenir. Puzolanların alkali-karbonat reaksiyonunu önlemedeki etkinlikleri tartışmalıdır.

3.3.7.3. Kalsiyum ve Magnezyum Oksitinin (cao , mgo) gecikmiş hidratasyonu

Çimento içinde bulunabilen CaO ve MgO'un gecikmiş hidratasyonları da betonda genleşmelere ve çatlamalara yol açabilmektedir. Döner fırında yüksek sıcaklıklarda pişiren kristal yapıya sahip olan bu bileşenler diğer çimento bileşenlerinden daha geç reaksiyon gösterirler. Bu nedenle çimento içindeki miktarlarının sınırlı olması istenir.

Üretim sırasında ham maddelerin yanlış harmanlanması veya yetersiz öğütme ve pişirme gibi nedenlerle çimentoda serbest (bağlanmamış) CaO kalabilir. Çimentoya MgO genellikle kalker ham maddesindeki dolomitten gelir. Bir bölümü çimento bileşenlerinin katı eriyikleri içine girerken, geri kalan bölümü kristal yapıda (periklas) olarak serbest kalır.

Özellikle geçen yüzyılın başında üretilen çimentoların %30 gibi çok yüksek oranlarda MgO içerdiği, bu sebeple birçok yapının hasar görmesinden sonra konunun önem kazandığı bilinmektedir. Ancak günümüzde çimento üretimindeki sıkı kalite kontrolü nedeniyle bu bileşenlerin çimentodaki serbest miktarları çok düşük mertebelere düşürülmüştür ve aynı zamanda maksimum oranları için standartlarda genellikle sınırlamalar mevcuttur. Örneğin MgO için genellikle getirilen üst limit %5'tir. Çimentolarda zararlı miktarlarda serbest CaO ve MgO bulunup bulunmadığı La Chatelier deneyi adı verilen basit ve pratik bir deney yöntemi ile saptanabilir. Ayrıca ASTM C 151 Portland Çimentosunun Otoklav Genleşmesi deney yöntemiyle çimentonun hacim sabitliği konusunda fikir edinmek mümkündür. Yöntemin esası normal kıvamda çimento hamuru kullanılarak hazırlanan 25x25x285 mm boyutlu örneklerin yüksek basınçlı (2MPa) buhar küründe 3 saat bekledikten sonra yaptıkları boy değişimlerini ölçmeye dayanır[8].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Çimentolar

4.1.1.1. CEM I 42.5 R

Portland çimento; kalker, marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit, vb. hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek, pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin, bir miktar priz düzenleyici (genellikle alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesinden oluşan; suyla karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Genel olarak yüksek dayanım gerektiren yapılarda, yol yapılarında, yer betonlarında, kayar kalıp sisteminin kullanıldığı betonlarda, köprülerde, demiryolu traverslerinde, köprülerde, soğuk havada dökülen betonlarda, prefabrik yapılarda, tünel-kalıp uygulamalarında, yapı kimyasalları üretiminde ve ön germeli betonlarda uygulamalarında kullanılır[9].

Tablo 4.1. Deneyde kullanılan CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

CEM I 42.5 R		
Fiziksel Özellikleri		
	Nuh Çimento	Standart
Priz Başlangıcı (dak)	190	min. 60
Priz Sonu (dak)	250	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.13	-
Hacim Genleşmesi (cm)	1	max. 10
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3410	-
Litre Ağırlığı (g/l)	1000	-
2 Günlük Dayanım (MPa)	26	min. 20
28 Günlük Dayanım (MPa)	58	min./maks. 42.5/62.5
Kimyasal Özellikleri		
SO ₃ (%)	2.5	maks. 4
MgO (%)	1.1	-
Kızdırma Kaybı (%)	2.1	maks. 5
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.6	maks. 5
Cl (%)	0.01>	maks. 0.1
Toplam Alkali Na ₂ O + 0.658 K ₂ O (%)	0.53	-
Serbest Kireç	1.1	-



Şekil 4.1. CEM I 42.5 R portland çimentosu

4.1.1.2. CEM II/A-P 42.5 R

Standartlarında tanımlanmış oranda (en çok % 20) mineral katkı maddeleri (tras) ile portland çimentosu klinkerinin belirli miktarda priz düzenleyici (alçıtaşı) ile beraber öğütülmesi sonucu elde edilen; suyla karıştırıldıktan bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür.

Genel olarak portland çimentonun kullanıldığı tüm uygulamalarda kullanılabilir. Hidratasyon ısısı göreceli olarak portland çimentoya göre daha düşüktür. Sülfat ve/veya klorür vb. iyon içeren agresif ortamlarda yapılan beton işlerinde kullanılması uygundur. Bunun dışında su depolarında, beton briket üretiminde, duvar ve sıva işlerinde, beton veya betonarme kanalizasyon borularında kullanılır.

Tablo 4.2. Deneyde kullanılan CEM II/A-P 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

CEM II 42.5 R		
Fiziksel Özellikleri		
	Nuh Çimento	Standart
Priz Başlangıcı (dak)	170	min. 60
Priz Sonu (dak)	205	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.13	-
Hacim Genleşmesi (cm)	1	max. 10
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3770	-
Litre Ağırlığı (g/l)	880	-
2 Günlük Dayanım (MPa)	26	min. 20
28 Günlük Dayanım (MPa)	57	min./maks. 42.5/62.5
Kimyasal Özellikleri		
SO ₃ (%)	2.5	maks. 4
MgO (%)	1.1	-
Kızdırma Kaybı (%)	2.1	maks. 5
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.6	maks. 5
Cl (%)	0.01>	maks. 0.1
Toplam Alkali Na ₂ O + 0.658 K ₂ O (%)	0.53	-
Serbest Kireç	1.1	-

4.1.1.3. SDÇ 42.5 R

SDÇ 42,5R; kalker, marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit, vb. hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek, pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin, bir miktar priz düzenleyici (genellikle alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesinden oluşan; suyla karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Genel olarak normal portland çimentoların kullanıldığı yerlerde kullanılabileceği gibi, C₃A miktarının %5'in altında olması dolayısı ile baraj inşaatları, açık deniz yapılarında, tünel kaplamalarında, liman inşaatları, arıtma tesislerinde, sulama kanalları, yapı kimyasalları gibi sülfatlı sulara maruz kalan ortamlarda kullanılması uygundur[10].

Tablo 4.3. Deneyde kullanılan SDÇ 42.5 R çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

SDÇ 42.5 R		
Fiziksel Özellikleri		
	Nuh Çimento	Standart
Priz Başlangıcı (dak)	170	min. 60
Priz Sonu (dak)	205	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.14	-
Hacim Genleşmesi (cm)	1	max. 10
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3610	-
Litre Ağırlığı (g/l)	980	-
2 Günlük Dayanım (MPa)	26	min. 20
28 Günlük Dayanım (MPa)	54	min./maks. 42.5/62.5
Kimyasal Özellikleri		
SO ₃ (%)	2.7	maks. 4
MgO (%)	1.1	-
Kızdırma Kaybı (%)	2.4	maks. 5
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.6	maks. 5
Cl (%)	0.01>	maks. 0.1
Toplam Alkali Na ₂ O + 0.658 K ₂ O (%)	0.53	-
Serbest Kireç	1.1	-

4.1.1.4. CEM IV/A-P 32.5 R

Standardlarında tanımlanmış oranda (en çok % 55) mineral katkı maddeleri (puzolan) ile portland çimentosu klinkerinin belirli miktarda priz düzenleyici (alçıtaşı) ile beraber öğütülmesi sonucu elde edilen; suyla karıştırıldıktan bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. Portland çimento (CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 N) ile portland puzolanlı çimentoya (CEM II/A-P 42,5 R) göre daha geç dayanım kazanır. Su/çimento oranları da göreceli olarak daha yüksektir. Alkali-agrega reaksiyonuna ve kimyasal dış etkilere karşı daha dayanıklıdır. Genel olarak yüksek dayanım gerektirmeyen beton imalatlarında, yapılarda tamirat işlerinde, taban seviye ve şap betonlarında, sıva yapımı ve yapı kimyasalları üretiminde kullanılır.

Tablo 4.4. Deneide kullanılan CEM IV/A-P 32.5 R çimentonun fiziksel özellikleri

CEM IV/A-P 32.5 R		
Fiziksel Özellikleri		
	Nuh Çimento	Standart
Priz Başlangıcı (dak)	200	min. 60
Priz Sonu (dak)	240	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.14	-
Hacim Genleşmesi (cm)	1	max. 10
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4980	-
Litre Ağırlığı (g/l)	870	-
2 Günlük Dayanım (MPa)	14	min. 20
28 Günlük Dayanım (MPa)	38	min./maks. 42.5/62.5
Kimyasal Özellikleri		
SO ₃ (%)	2.4	maks. 4
MgO (%)	1.1	-
Kızdırma Kaybı (%)	2.4	maks. 5
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.6	maks. 5
Cl (%)	0.01>	maks. 0.1
Toplam Alkali Na ₂ O + 0.658 K ₂ O (%)	0.53	-
Serbest Kireç	1.1	-

4.1.2. Standart kum

Harç karışımlarının yapılmasında TS819'a uygun standart kum kullanılmıştır. Kumun elek analizi aşağıda verilmiştir (Tablo 4.5.).

Tablo 4.5. Standart Kumun Elek Analizi

Elek Açıklığı (mm)	0.08	0.16	0.50	1.00	1.60	2.00
% Geçen	0	10	32	65	90	100



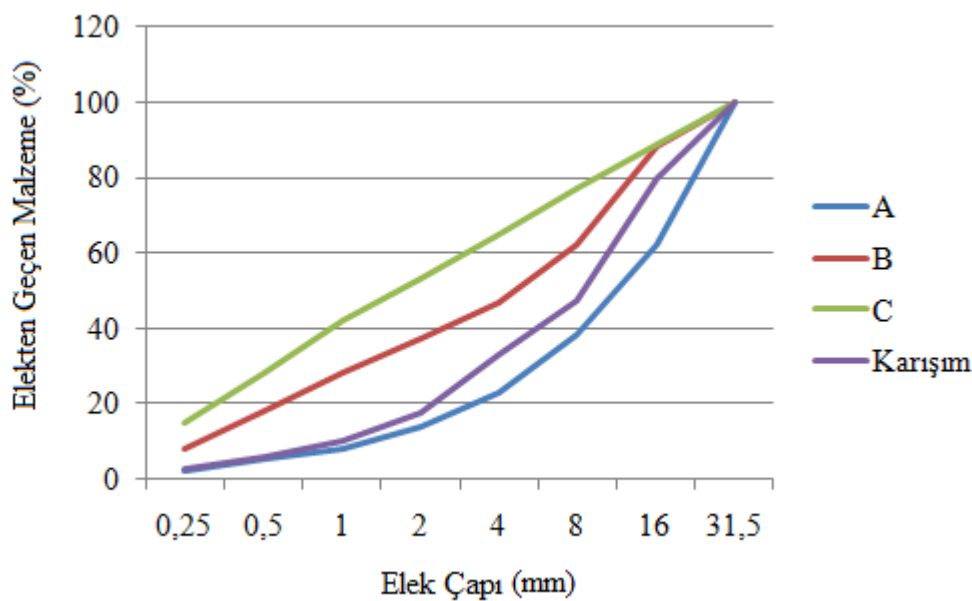
Şekil 4.2. Deneyde kullanılan kum numunesi

4.1.3. Agregalar

TS 3530 (EN 933-1) standardı esaslarına göre kullanılan agregaların granülometrisi aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.6. Deneyde Kullanılan Agregaların Elek Analizi

Agrega Cinsi	31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25
Kırmataş Kumu	100	100	100	95	53	30	17	7.8
Kırmataş 1	100	80	41	3.7	0.2	0.1	0	0
Kırmataş 2	100	60	0.9	0.3	0	0	0	0
Karışım	100	80	47.3	33	17.7	10	5.7	2.5



Şekil 4.3. Deneyde kullanılan agrega numunelerinin TS 706' ya göre standart granülometri eğrileri arasında gösterilmesi

4.2. Numune Hazırlama ve Malzeme Oranları

Numuneler agregaları ve kıvamları sabit olmak üzere, sadece çimento tipleri değişken olarak üretilmişlerdir. Kullanılan çimento tipleri CEM I, CEM II, CEM IV ve SDÇ 42.5 'tur. Bu çimentolar kullanılarak C30 ve C20 olmak üzere iki tip beton üretilmiştir. Her bir çimento tipi için 18'i C30 ve 18'i C20 olmak üzere 36 adet, toplamda ise 144 numune alınmıştır. Bu numuneler 15x15 kalıplarda kübik olarak hazırlanmıştır. Her bir çimento tipi ve beton sınıfı için kullanılan malzeme oranları aşağıdaki tabloda verilmiştir:

Tablo 4.7. 1m³ için beton karışım dizaynı

Beton Sınıfı	I numara mıcır (kg)	II numara mıcır (kg)	Doğal Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Katkı (lt)	Kıvam Sınıfı (mm)
C 20/25	513	566	387	646	312	177	3	S4 (160-210)
C 30/37	533	565	377	586	377	164	5	S4 (160-210)



Şekil 4.4. Kalıplardan çıkarılmış C30 sınıfı beton numuneleri



Şekil 4.5. Kalıplardan çıkarılmış C20 sınıfı beton numuneleri

4.3. Farklı Kompozisyonlardaki Zararlı Kimyasal Ortamlar

Numuneler 100x150 cm boyutlarındaki havuzlara, 3 farklı değişik ortamda bekletilmek üzere yerleştirilmiştir. Bu ortamlardan biri temiz su (şahit numune) diğer ikisi ise farklı kompozisyonlardaki atık sulardır. Bu atık sular Ambarlı Atık su Arıtma Tesisi'ne girecek olan Ambarlı ve Gürpınar tünellerinden alınmıştır. Kullanılan atık suların kompozisyonları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.8. Deneyde kullanılan zararlı kimyasal ortamların kompozisyonları

Zararlı Ortamlar	BOI	KOI	AKM	UAKM	Tuzluluk	TOP-N	TOP-P
I. Zararlı Ortam	349	696	631	337	4.64	69.4	12
II. Zararlı Ortam	531	995	934	472	4.85	78.8	19.8
Birim	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	%	mg/l	mg/l

BOI : Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı. Bakterilerin suda bulunan organik maddeleri parçalarken tükettikleri oksijen miktarı.

KOI : Kimyasal Oksijen İhtiyacı. Bakterilerin suda bulunan organik maddeleri parçalarken tükettikleri oksijen miktarı atık su arıtma sistemi planlamasında çok önemli bir parametredir.

AKM : Askıda Katı Madde. Suda ve lağım suyunda bulunan, yaklaşık 1 mikron büyüklüğünde veya daha büyük olmakla birlikte, sözgelimi kum tanesinden daha küçük katıları ifade etmek için kullanılan terimdir.

UAKM : Uçucu Askıda Katı Maddeler. Suda ve lağım suyunda bulunan, yaklaşık 1 mikron büyüklüğünde veya daha büyük olmakla birlikte, sözgelimi kum tanesinden daha küçük katıları ifade etmek için kullanılan terim.

TOP-N : Bir litre atık sudaki toplam azot miktarı.

TOP-P : Bir litre atıksudaki toplam fosfor miktarı.



Şekil 4.6. Numunelerin bekletildiği atık su havuzları



Şekil 4.7. Numunelerin bekletildiği zararlı ortam havuzları

4.4. Numunelerin Deney Metodu

Numuneler 7 gün dışarıda bekletildikten sonra hazırlanan havuzlara yerleştirilmiştir. 28 gün sonra her bir çimento tipinden 18, toplamda 72 numune basınç dayanımları kıyaslanmak üzere kırılmıştır. Bu 18 numunenin 9'u C20, 9'u ise C30 beton sınıfına aittir. Bu 9 numune ise temiz su, I. ve II. zararlı ortam olmak üzere her havuzdan 3'er tane olmak üzere çıkarılmıştır. Daha sonra aynı sayıda (72 adet) numune 180 gün sonra kırılarak numunelerin bu zararlı kimyasal ortamlarda nasıl etkilendiği gözlenmiş ve basınç dayanımlarına tekrar bakılmıştır. Bu deneylerde incelenen toplam numune sayısı 144 'tür.



Şekil 4.8. Numunelerin basınç dayanımlarının ölçülmesi



Şekil 4.9. Havuzlardan 6 ay sonra çıkarılan numunelerin durumu

BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

5.1. Basınç Dayanım Analizleri

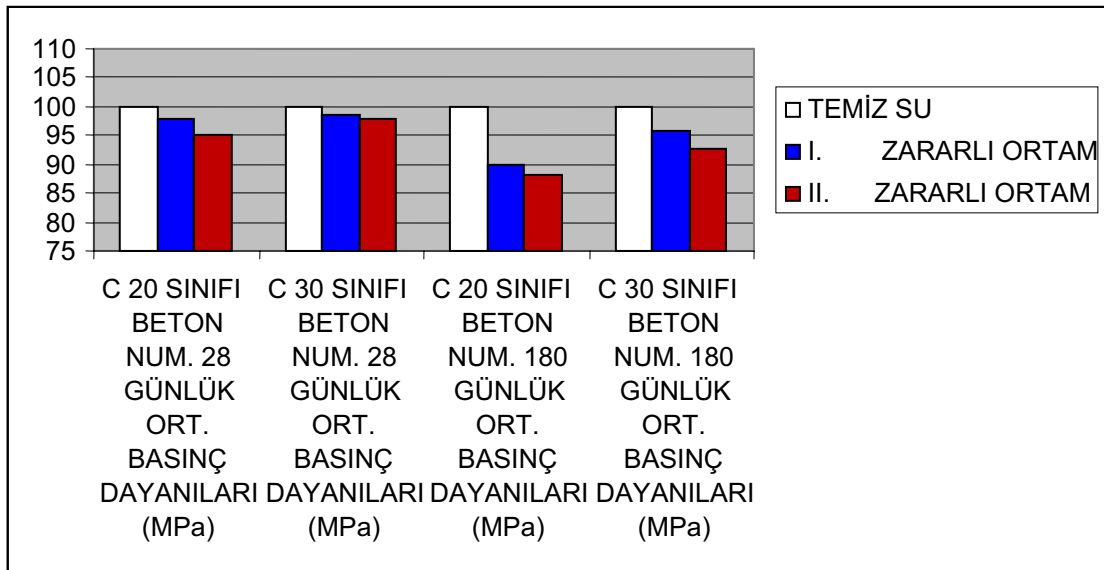
Bu çalışmada dört farklı tip çimentoyla hazırlanan, C 20/25 ve C 30/37 beton sınıfındaki beton numunelerin üzerinde durabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden bulunan sonuçlar aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir:

Tablo 5.1. Basınç Dayanım Analizleri Kırım Sonuçları

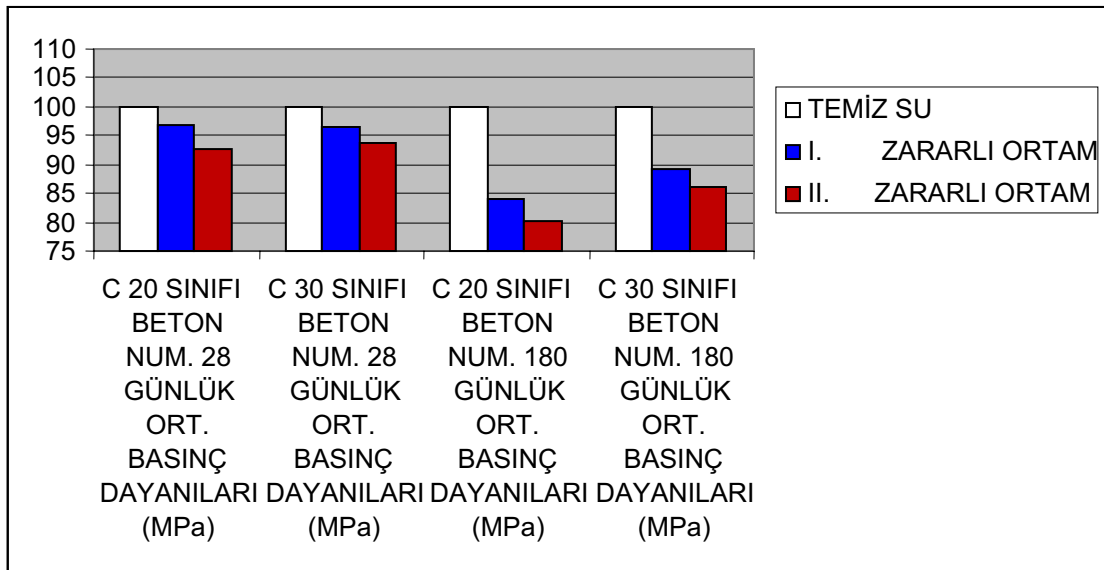
ÇİMENTO TİPLERİ	KİMYASAL ORTAMLAR	BETON SINIFLARI	28 GÜNLÜK BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)			ORT.	180 GÜNLÜK BASINÇ DAYANIMLARI (MPa)			ORT.
CEM I	TEMİZ SU	C 20/25	26.19	27.03	27.21	26.81	28.33	28.43	28.93	28.56
		C 30/37	37.23	38.03	38.41	37.89	38.64	39.88	40.05	39.52
	I. ZARARLI ORTAM	C 20/25	25.74	26.42	26.69	26.28	25.82	26.13	25.18	25.71
		C 30/37	36.89	37.37	37.94	37.40	37.64	37.98	38.14	37.92
	II. ZARARLI ORTAM	C 20/25	25.11	25.85	26.24	25.73	25.02	25.18	25.84	25.35
		C 30/37	36.42	37.21	37.45	37.03	36.14	36.79	37.21	36.71
CEM II	TEMİZ SU	C 20/25	25.30	25.61	25.77	25.56	27.58	27.84	28.39	27.94
		C 30/37	34.30	35.12	35.70	35.04	35.78	36.98	37.44	36.73
	I. ZARARLI ORTAM	C 20/25	24.65	24.76	24.89	24.77	23.13	23.62	23.73	23.49
		C 30/37	33.65	33.73	34.12	33.83	32.42	32.65	33.09	32.72
	II. ZARARLI ORTAM	C 20/25	23.45	23.74	23.87	23.69	21.85	22.59	22.77	22.40
		C 30/37	32.51	32.93	33.07	32.84	31.47	31.62	31.95	31.68
CEM IV	TEMİZ SU	C 20/25	22.76	23.04	23.32	23.04	24.33	24.84	24.21	24.46
		C 30/37	32.20	32.71	32.83	32.58	33.63	33.79	34.03	33.82
	I. ZARARLI ORTAM	C 20/25	21.32	21.49	21.75	21.52	20.45	20.53	20.73	20.57
		C 30/37	30.82	31.12	31.21	31.05	29.19	29.22	29.65	29.35
	II. ZARARLI ORTAM	C 20/25	21.27	21.53	21.46	21.42	19.86	20.31	20.48	20.22
		C 30/37	30.67	31.05	31.17	30.96	28.74	28.85	29.12	28.90
SDÇ	TEMİZ SU	C 20/25	27.44	27.84	28.11	27.80	29.33	29.79	30.31	29.81
		C 30/37	38.12	38.43	38.93	38.49	40.05	40.37	40.44	40.29
	I. ZARARLI ORTAM	C 20/25	27.09	27.31	27.56	27.32	28.85	29.12	29.30	29.09
		C 30/37	38.06	38.24	38.39	38.23	39.32	39.68	39.84	39.61
	II. ZARARLI ORTAM	C 20/25	27.23	27.38	27.43	27.35	27.59	28.38	28.84	28.27
		C 30/37	37.74	38.05	38.27	38.02	39.66	39.42	39.51	39.53

Tablo 5.2. Basınç Dayanım Analizlerine Oranlanmış Bağlı Değerler

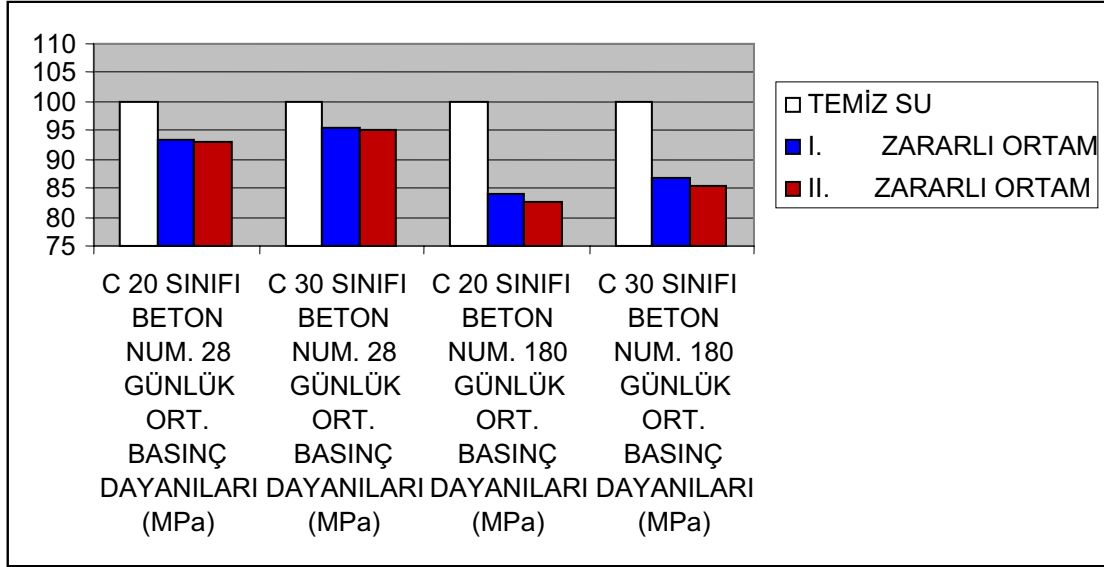
ÇİMENTO TİPLERİ	BETON SINIFLARI	KİMYASAL ORTAMLAR	28 GÜNLÜK ORT. BASINÇ DAYANILARI (MPa)	180 GÜNLÜK ORT. BASINÇ DAYANILARI (MPa)
CEM I	C 20/25	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	98	90
		II. ZARARLI ORTAM	95	88
	C 30/37	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	98.7	95.9
		II. ZARARLI ORTAM	97.7	92.8
CEM II	C 20/25	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	96.9	84
		II. ZARARLI ORTAM	92.7	80.1
	C 30/37	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	96.5	89.1
		II. ZARARLI ORTAM	93.7	86.2
CEM IV	C 20/25	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	93.4	84.1
		II. ZARARLI ORTAM	93	82.7
	C 30/37	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	95.3	86.8
		II. ZARARLI ORTAM	95	85.4
SDÇ	C 20/25	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	98.2	97.6
		II. ZARARLI ORTAM	98.3	94.8
	C 30/37	TEMİZ SU	100	100
		I. ZARARLI ORTAM	99.3	98.3
		II. ZARARLI ORTAM	98.8	98.1



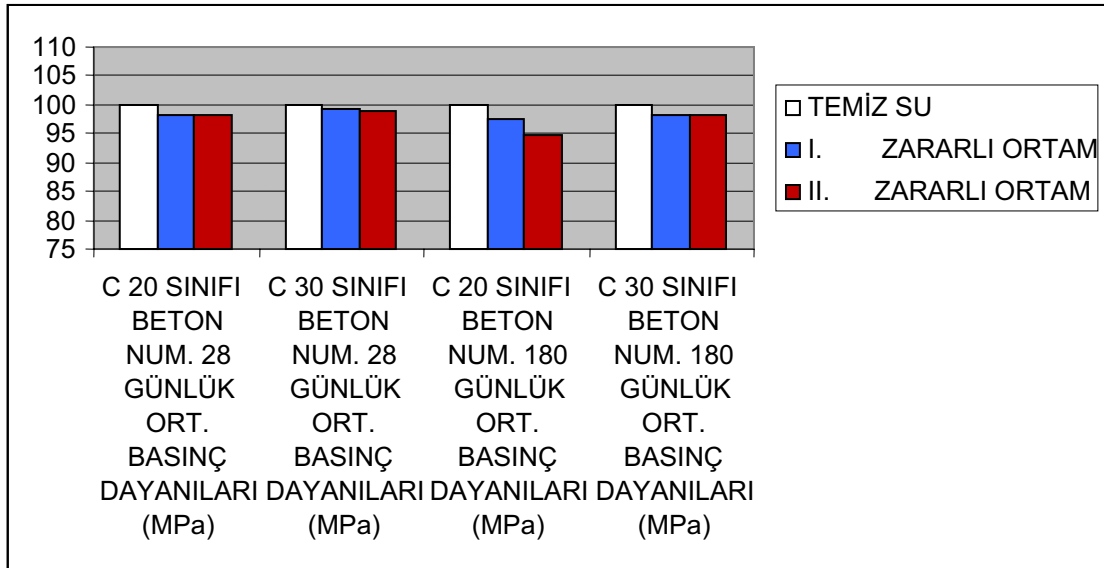
Şekil 5.1. CEM I türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı



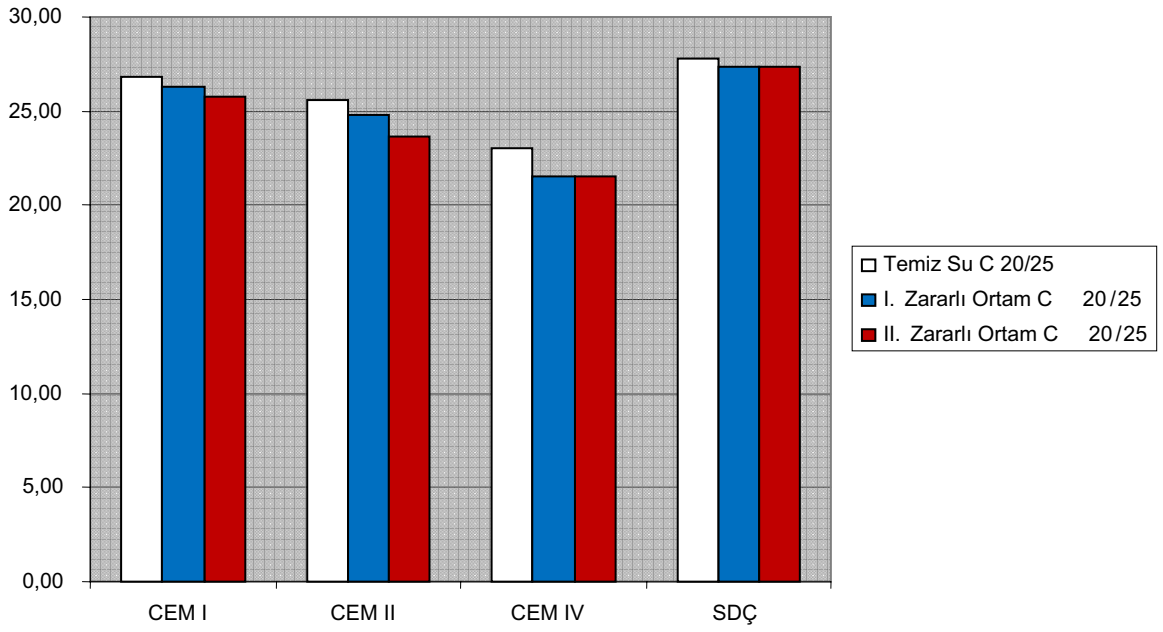
Şekil 5.2. CEM II türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı



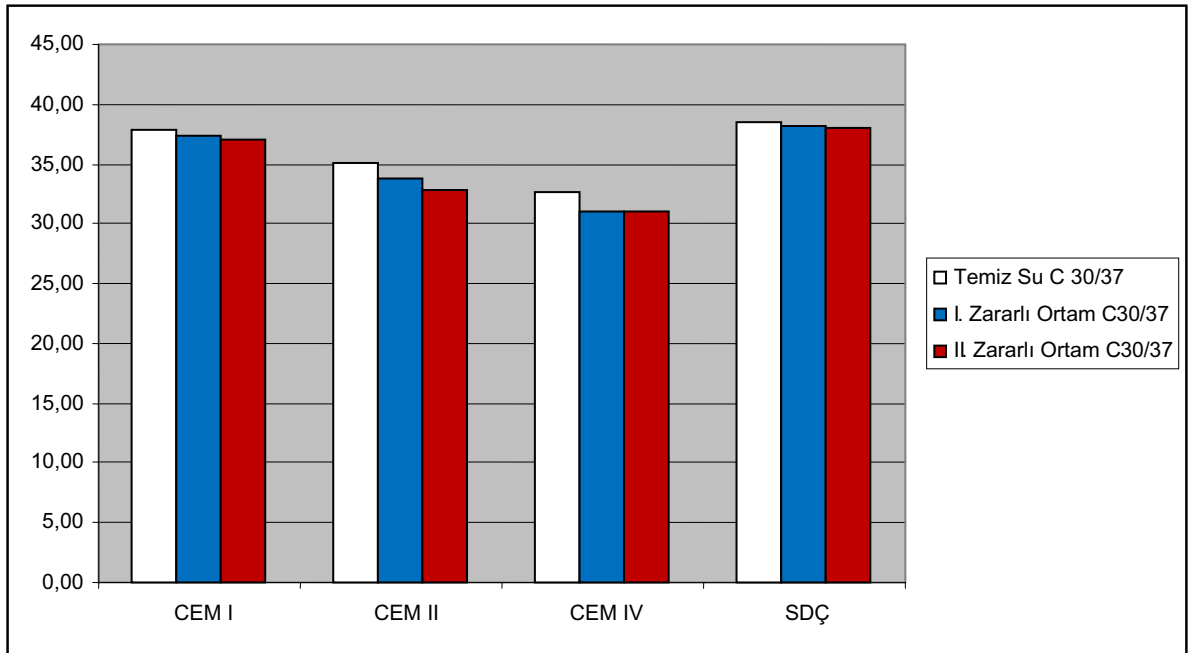
Şekil 5.3. CEM IV türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı



Şekil 5.4. SDC türü çimento ile hazırlanan ve zararlı ortamlara maruz bırakılan beton numunelerin basınç mukavemetlerinin temiz suda bekletilen numune mukavemetine bağlı değerlerle oranı



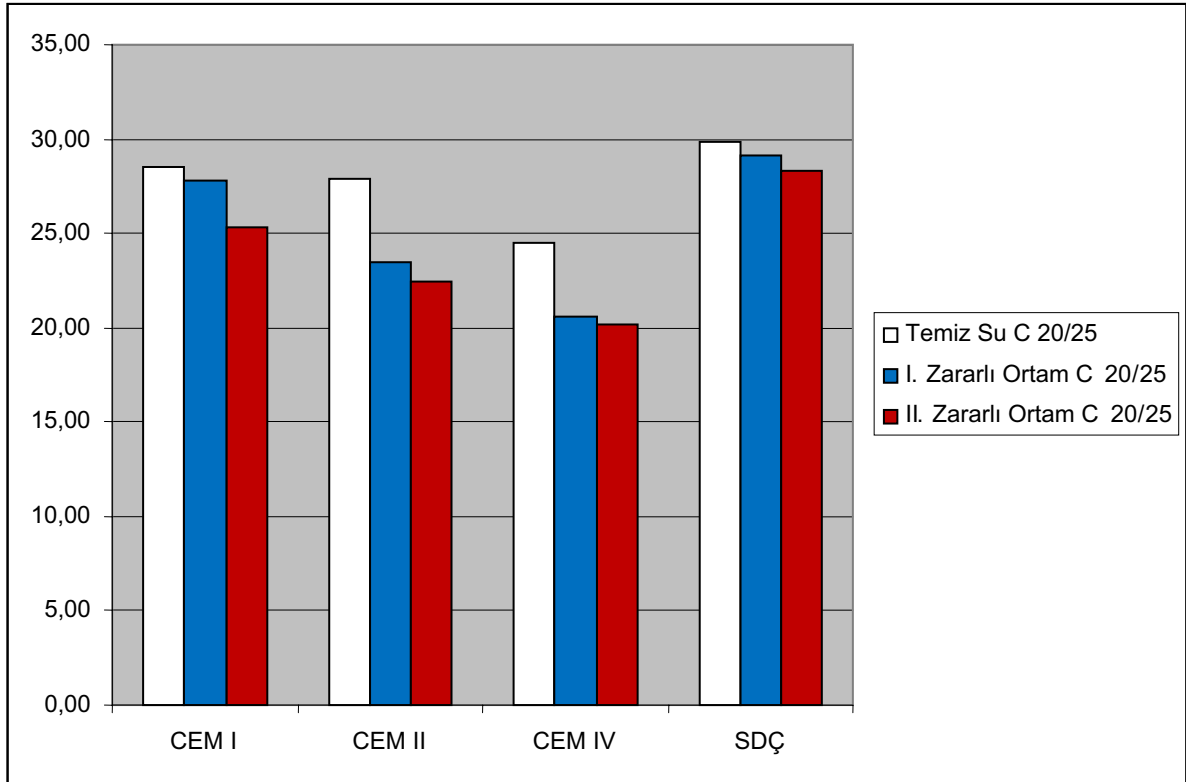
Şekil 5.5. Üç ayrı ortamda bekletilen C20 türü beton numunelerine ait 28 günlük basınç dayanımları



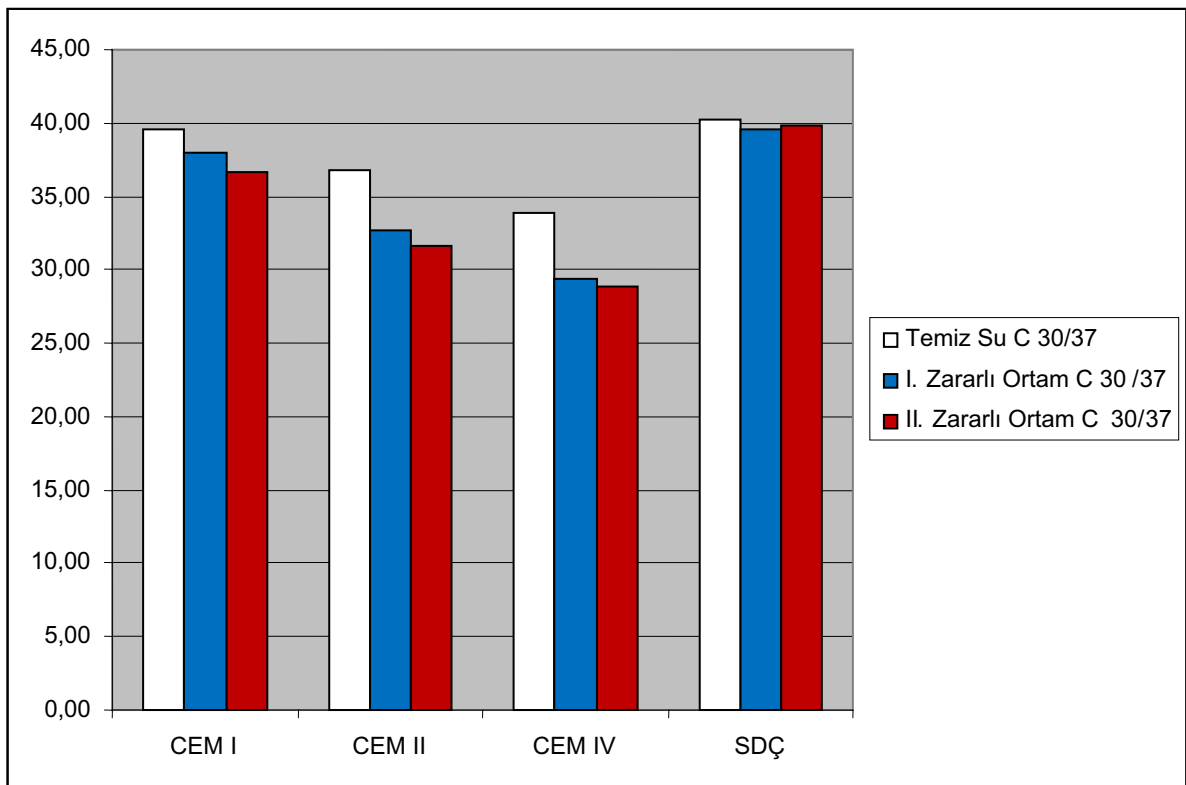
Şekil 5.6. Üç ayrı ortamda bekletilen C30 türü beton numunelerine ait 28 günlük basınç dayanımları

C20 ve C30 sınıfı beton numunelere ilişkin 28 gün sonra yapılan kırım deneyi sonucunda I. ve II. zararlı ortama maruz kalan her numune dayanımının temiz su ortamında bulunan numuneye nispeten daha düşük basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. İki zararlı ortam arasında yapılan mukayese neticesinde ise CEM I ve

CEM II türü çimento ile hazırlanan numunelerin II. tür zararlı ortamda daha düşük dayanım gösterdiği, CEM IV ve SDC türü çimento ile hazırlanan numunelerin dayanımlarında ise daha az değişiklik olduğu görülmüştür. Sonuç olarak zararlı ortama maruz kalan her numune dayanım kaybı yaşarken, zararlı ortamın yoğunluğu arttıkça CEM I ve CEM II türü çimento ile hazırlanan numunelerde dayanım kaybının arttığı, CEM IV ve SDC türü çimento ile hazırlanan numuneler de ise 28 günlük dayanımların yoğunluk ile orantılı olarak daha az bir kaybın olduğu görülmüştür. CEM II ve CEM IV türü çimentoyla hazırlanan numunelere ortalama %6-7 civarlarında dayanım kaybı yaşarken bu değer CEM I' de %10' lara kadar çıkmış SDC de ise %1-2 sınırlarında kalmıştır. Yine deney sonuçlarından anlaşılacağı üzere dozaj arttıkça dayanım farklarının azaldığını iki beton sınıfı arasındaki farktan anlamaktayız. CEM IV türü çimentonun dayanım kaybı yaşamamasına rağmen basınç mukavemetinin CEM I türü çimentonun altında olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni ise muhteviyatlarındaki C_2S , C_4AF ve C_3S , C_3A oranlarıdır. CEM I çimentosunda C_3S ve C_3A oranı yüksek olduğundan düşük hidratasyon ısıyı sağlaması avantajıyla yüksek dayanım değeri kazanmış olup ancak bunu zamanla elde etmiştir. Aradaki fark bundan kaynaklanmıştır. CEM IV tip çimentonun ilerleyen yaşlarda % 20' ye yaklaşan dayanım kayıpları yaşadığını göreceğiz[11].



Şekil 5.7. Üç ayrı ortamda bekletilen C20 türü beton numunelerine ait 180 günlük basınç dayanımları



Şekil 5.8. Üç ayrı ortamda bekletilen C30 türü beton numunelerine ait 180 günlük basınç dayanımları

C20 ve C30 sınıfı beton numunelere ilişkin 180 gün sonra yapılan kırım deneyi sonucunda I. ve II. zararlı ortama maruz kalan her numune dayanımının temiz su ortamında bulunan numuneye nispeten daha düşük basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. İki zararlı ortam arasında yapılan mukayese neticesinde ise bütün çimento türleri ile hazırlanan numunelerin II. tür zararlı ortamda daha düşük dayanım gösterdiği, yalnızca SDÇ çimento ile hazırlanan C30 beton sınıfına ait numunelerin I. tür zararlı ortama göre daha yüksek sonuç verdiği görülmüştür. 28 günlük sonuçlarda çıkan CEM I tür çimento tipiyle hazırlanan numunelerin dayanım kaybı bu yaştaki kırımda CEM II ve CEM IV' e göre daha azdır. Bunun nedeni de içeriğindeki C₃A ve C₂S' den dolayı geç mukavemet kazanmasıdır. CEM I, CEM II, CEM IV türü çimento ile hazırlanan numunelerin bu yaşlarda %10-20 civarı dayanım kayıpları yaşamış olup SDÇ ile hazırlanan numunelerde bu değer çok aşağılarda kalmış nerdeyse ihmal edilebilir şekilde % 2-5 civarında olmuştur. Yine bu sonuçlarda da görüldüğü üzere dozajın artması dayanım farkını azaltmıştır. CEM I, CEM II ve CEM IV türü çimento ile hazırlanan numunelere ait dayanım kaybı yüksek nispetlere ulaşmış ve özellikle II. tür zararlı ortamda bu numuneler 180 gün sonra hemen hemen bir alt beton sınıfına ait mukavemeti temsil eder hale gelmiştir. Özellikle bu dayanım kayıpları CEM II ve CEM IV türü çimentolar için tolere edilemez seviyelerde olmakta ve bu tür betonların kullanıldığı eleman veya yapılar böyle bir ortama maruz kalması halinde ise uzun yıllar sonra dayanım kaybı yüksek değerlere ulaşabilecek ve amacına uygun olarak ihtiyacı karşılayamaz hale gelecektir. CEM I türü çimento ile hazırlanan beton numunelerin dayanım kayıpları nispeten kabul edilebilir değerlerde olup, bu kayıp II. tür zararlı ortamda da daha fazla olmaktadır, böylece belli bir yoğunluğun altındaki zararlı ortamlar bu tür beton elemanlar için risk teşkil etmeyebilir. Bu sebeple düşük yoğunluğa sahip zararlı ortamlara maruz kalan yapılarda CEM I türü çimento kullanılması risk teşkil etmemektedir[12].

5.2. Sonuçlar

- 1- CEM I tip çimento ile hazırlanan numuneler % 5-10 civarlarında mukavemet kaybı yaşamıştır.
- 2- CEM I tip çimentoyla hazırlanan numuneler, CEM II ve CEM IV' e kıyasla 28 günde daha fazla dayanım kaybı yaşamış olmasına rağmen 180 günlük kırımlarda

bu olay tam tersine dönmüş sırasıyla CEM II ve CEM IV numuneleri daha çok dayanım kaybı vermiştir.

3- CEM II tip çimento ile hazırlanan beton numune mukavemetine etkileri; I. Zararlı ortamda mukavemet kaybı düşük oranda iken, daha yoğun oranda olan II. Zararlı ortamda mukavemet kaybı daha yüksek oranlardadır.

4- CEM II tip çimento ile hazırlanan beton numune mukavemetine etkileri; I. Zararlı ortamda mukavemet kabul edilemeyecek oranlardadır.

5- En yüksek dayanım kaybını CEM II tip çimento ile hazırlanan C 20/25 beton sınıfına ait numuneler 180 günlük kırımlarda vermiştir. Bu kayıp % 20 civarındadır.

6- CEM IV tip çimento ile hazırlanan beton numuneleri 28 günlük basınç dayanım sonuçlarında her iki beton sınıfında da mukavemet kaybı olmadığını kabul edebileceğimiz çok küçük kayıplar yaşamışlardır.

7- SDÇ tip çimento ile hazırlanan beton numune mukavemetine etkileri; I. ve II. Zararlı ortamlarda dikkate alınmayacak oranlardadır.

8- SDÇ tip çimento ile üretilen betonların zararlı ortamlarda mukavemet kayıplarının minimum düzeyde kalmıştır, diğerlerine oranla yüksek mukavemet değerleri vermiştir.

9- Dozaj arttıkça iki beton sınıfı arasındaki kırım sonuçlarından anlaşılacağı üzere dayanım kaybı azalmıştır.

10- Numuneler 180 gün sonra atık su havuzlarından çıkartıldığında yüzeylerinde kararma ve keskin olan köşe kısımlarda hacim kayıpları gözlenmiştir.

5.3. Öneriler

Yapılan test ve muayeneler sonucunda çimento türlerinin zararlı ortamlarda bulunan beton elemanların mukavemetine olan etkisi anlaşılmaya çalışılmış ve çalışma sonucunda zararlı ortamların yoğunluğuna göre hangi çimento türleri ile hazırlanan betonun kullanılabilmesi ve kullanılmaması gerektiği anlaşılmıştır. Çalışmalarımızda üç tür ortam teşkil edilmiş olup, bunlar temiz su, I. zararlı ortam ve II. zararlı ortam olarak değerlendirilmiştir. Yapılan kırım sonuçlarında ; SDÇ türü çimento ile hazırlanan betonun zararlı ortamlara maruz kalması neticesinde mukavemetinde dikkate değer bir kayıp olmadığı ve bu tür betonların zararlı ortamlarda kullanılması gerektiği, CEM II ve CEM IV türü çimento ile hazırlanan betonların zararlı ortamlarda kullanılmaması, CEM I türünün yoğun zararlı ortamlarda kullanılmaması ve düşük yoğunluklu ortamlarda kullanılabilmesi görülmüştür.

Yapılan deney ve testler neticesinde, ihtiyaca yönelik yapılan ve atık suya maruz kalması muhtemel olan yapı ve tesislere ilişkin beton tercihinde SDÇ türü çimento ile hazırlanan karışımların seçilmesi tesis veya yapıya ait beton elemanların mukavemet kaybına maruz kalmayıp, imal amacını kaybetmeyeceği ve ömürlerinin yüksek olacağı görülmüştür. Bu sebeple çimento tercihi, zararlı ortama maruz yapılar ve tesislerin kullanım ömrü açısından en belirleyici özelliklerden biri olmaktadır.

Sonuç olarak, zararlı ortamlara maruz kalan beton elemanların SDÇ türü çimento ile hazırlanması gerektiği anlaşılmış olup, yalnızca zararlı ortamın yoğunluk durumunun düşük olması halinde CEM I türü çimento ile hazırlanan beton elemanların kullanılabilmesi görülmektedir. Örneğin düşük yoğunlukta zararlı ortama maruz kalması muhtemel bir beton eleman için gerekli ekonomik kıyaslar yapılarak CEM I türü çimento ile hazırlanan beton elemanların kullanılması ekonomik bir çözüm olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] KÜÇÜK, B., Betonun Dayanım ve Durabilitesini Sağlayan Parametreler, 6, 1, sf. 79-85, 2000.
- [2] BARADAN, B., YAZICI, H., ÜN, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), ISBN: 975-441-189-1, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, sf. 79-88, İzmir, 2002.
- [3] TOKYAY, M., DİLEK, F.T., Mineral Katkılı Çimentolu Sistemlerin Sülfata Dayanıklılığı, ICTAG-645, Tübitak Çevre Teknolojileri Araştırma Grubu, sf. 13-28, Ankara, 2003.
- [4] AKMAN, M.S., Betonlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Fiziko-Kimyası Hasar Düzeyi ve Onarım Sonuçları, Sika Teknik Bülten, 4, 1999.
- [5] BARADAN, B., TOSUN, K., FELEKOĞLU, B., ALTUN, A., Portland Kalkerli Çimento Üretiminde Mekanik Performans ve Sülfat Kaynaklı Durabilite Problemleri Açısından Optimum Kalker Oranının Belirlenmesi, MAG-104I083, Tübitak Çevre Teknolojileri Araştırma Grubu, sf. 5-22, İzmir, 2008.
- [6] UĞUR, L.O., Alkali-Silika Reaksiyonu, Yüksek Lisans Tezi, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf. 6-12, 2002.
- [7] ARSLAN, M., Beton, ISBN: 975-6574-02-X, Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., sf. 205-208, İstanbul, 2001.
- [8] BARADAN, B., YAZICI, H., ÜN, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), ISBN: 975-441-189-1, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, sf. 120-121, İzmir, 2002.
- [9] ŞEN, L., PÇ 42.5 ve PKÇ 32.5 Çimentolarla Üretilen Harçların Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sf. 1-19, 2005.
- [10] ERTEN, E., Deniz Suyunun Çimento Tipi Farklı Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sf. 64-87, 2009.
- [11] AGAR, S., Farklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Durabiliteye Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sf. 51-71, 2009.

- [12] TMMOB İNŞAAT MÜH. ODASI, İSTANBUL ŞUBESİ, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), Maya Basın Yayın, sf. 411-419, İstanbul, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Bedri Caner ALPAY, 21.07.1984'te İstanbul'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Kartal'da, lise eğitimini Kadıköy'de devlet okullarında tamamladı. 2002 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2006 yılında bitirdi. Yine 2006 yılında başladığı İSKİ Genel Müdürlüğü, Atıksu İnşaat Daire Başkanlığı, Arıtma Tesisleri Müdürlüğü'ndeki görevine halen devam etmektedir. Bu süre içerisinde Paşabahçe Ön Arıtma Tesisi, Paşaköy İleri Biyolojik Arıtma Tesisi ve Tuzla İleri Biyolojik Arıtma Tesisi işlerinde kontrol mühendisi olarak görev yapmıştır. Şu anda inşaatı devam etmekte olan Ambarlı Atıksu Arıtma Tesisi işinde kontrol mühendisi olarak görev yapmaktadır.