

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ SUYUNUN ÇİMENTO TİPİ FARKLI  
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Ebru ERTEN**

**Ocak, 2009  
İZMİR**

**DENİZ SUYUNUN ÇİMENTO TİPİ FARKLI  
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

**Ebru ERTEN**

**Ocak, 2009  
İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**EBRU ERTEN**, tarafından **DOÇ. DR. SELÇUK TÜRKEL** yönetiminde hazırlanan  
**“DENİZ SUYUNUN ÇİMENTO TİPİ FARKLI HARÇLARIN MEKANİK VE  
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş,  
kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
-----  
Danışman

.....  
-----  
Jüri Üyesi

.....  
-----  
Jüri Üyesi

-----  
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tez aşamasında değerli bilgileri, sabrı ve güler yüzü ile çalışmalarına ışık tutan Tez Danışmanım Sayın Doç Dr. Selçuk TÜRKEK'e, tüm değerli bilgileri ve tecrübeleriyle tez çalışmasının ilerleyişi esnasında yol göstericim olan Sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN'a, her konunun irdelenmesinde ve her sorunun çözümünde destek aldığım Sayın Yard. Doç Dr. Halit YAZICI'ya, teknik desteklerinden ötürü Sayın Dr. Müh. Kamile TOSUN, Sayın Dr. Müh. Hüseyin YİĞİTER, Araş. Gör. Burak FELEKOĞLU ve Araş. Gör. Serdar AYDIN'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar donanımı hakkında teknik destek sağlayan laboratuvar teknisyeni Kamil TAHTA'ya, atıksu laboratuvarında klorür miktarı belirlemede yer alan kimya konularında yardımlarını esirgemeyen Çevre Mühendisliği Bölümü Çevre Bilimleri Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Dr. Zihni YILMAZ'a ve tekniker Orhan ÇOLAK'a, tezimin hazırlanmasında emeği geçen adını sayamadığım herkese ve tüm değerli arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı zamanda Çimentaş Çimento Fabrikası'ndan çimento temin edilmesinde yardımcı olan Sn. Burak Akyol'a, Sn. Nilüfer Azrak Karakaş'a, Sn. Burcu Beyazıtıoğlu'na teşekkür ederim. Karçimsa Çimento Fabrikası'ndan ise cüruflu çimento temin edilmesinde yardımcı olan Sn. Selma Cesur'a teşekkür ederim.

Hoşgörü ve sevgi ortamında her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan, başta annem olmak üzere, değerli aile bireylerime minnet ve şükranlarını sunarım.

**Ebru ERTEN**

# DENİZ SUYUNUN ÇİMENTO TİPİ FARKLI HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

## ÖZ

Sülfat etkisi çimento harçlarında genleşmelere ve çatlaklara yol açan başlıca problemlerden biridir. Deniz suyunda var olan sülfat ve klorür iyonları bu problemin sebeplerindendir. Bu çalışmada, 5 tip çimento ve 3 farklı su/çimento oranı ile üretilen deney örneklerinin ıslanma-kuruma çevrimli deniz suyunda ve 50000-ppm sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmesi sonrası elde edilen mekanik ve kalıcılık özellikleri yer almaktadır. Prizmatik örneklerle eğilme dayanımı, basınç dayanımı, klorür miktarı tayini, kılcal yolla su emme ve toplam su emme deneyleri yapılmıştır. ASTM C 1012 standardına göre, 50000-ppm sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harç çubuklarının komparatörle boy değişimleri ölçülmüştür. Silindirik örneklerle klor geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Yüksek sülfat konsantrasyonunda bekletilen örneklerin mekanik ve kalıcılık özelliklerinin standart deney örneklerine göre, genellikle azaldığı görülmüştür. Mineral katkı içeren çimentolarla hazırlanan örneklerin Portland çimentosuyla hazırlanan örneklerden her koşulda daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

**Anahtar sözcükler:** Farklı çimento tipleri, sülfat etkisi, deniz suyu, kalıcılık, mekanik özellikler, kılcal yolla su emme, toplam su emme, boy değişimi, klor geçirimsizlik.

# SEA WATER EFFECT ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF DIFFERENT TYPES OF CEMENT MORTARS

## ABSTRACT

Sulfate attack, which causes expansion and cracking on cement mortars, is one of the major problems. Sulfate and chloride ions in the sea water causes destruction of mortars. In this study, mechanical and durability properties of specimens, which include five types of cements and three different water/cement ratios, were investigated after exposure to seawater and 50000-ppm sodium sulfate solution. Flexural and compressive strength, chloride amount, capillary suction of water, total absorption were determined after exposure by prismatic specimens. Length changes of mortar bars immersed in 50000-ppm sodium sulfate solution were determined according to ASTM C 1012. Chloride-ion penetration tests of cylindrical specimens were done. Durability and mechanical properties of specimens exposed to high sulfate concentration were underdeveloped compared to standard specimens. Specimens, which include mineral additive cement, exhibited better performance than normal portland cement in every conditions.

**Keywords:** Different cement types, sulfate attack, sea water, durability, mechanical properties, capillary suction of water, total absorption, length change of mortar bars, chloride ion penetration.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - BETON VE ÇİMENTO HARÇLARINDA KALICILIK.....</b>	<b>3</b>
2.1 Betonun ve Çimento Harcının Bozulmasına Sebep Olan Etkenler.....	3
2.2 Betonun ve Çimento Harcının Üretiminde ve Küründe Kullanılacak Suyun Kalitesi.....	7
2.3 Beton Karışımında ve Çimento Harcında Deniz Suyu Kullanılmasının Beton Özelliklerine Etkisi.....	8
2.4 Deniz Suyu Etkisindeki Betonlar.....	10
2.4.1 Teorik Görüşler .....	15
2.4.2 Geçmiş Olaylardan Çıkarılan Dersler .....	17
2.4.2.1 Geçirgenlik .....	17
2.4.2.2 Hasarın Tipi ve Şiddeti .....	18
2.4.2.3 Gömülü Çeliğin Korozyonu.....	19
2.4.3 Islanma-Kuruma Etkisindeki Betonlar.....	21
2.4.3.1 Islanma-Kuruma Çevrimi Hasarına Karşı Önlemler.....	24
2.5 Sülfat Etkisi.....	25
2.5.1 Sülfat Saldırısı Karşısında Betonda Yer Alan Reaksiyonların Mekanizması.....	28
2.5.2 Sodyum Sülfatın ve Magnezyum Sülfatın Etkilerinin Karşılaştırılması.....	31
2.5.3 Suda ve Toprakta Yer Alan Sülfat Konsantrasyonunun Sülfat Saldırısının Hızına Etkisi.....	32

2.5.4 Sülfat Saldırısını Azaltıcı Önlemler.....	35
2.5.4.1 Betonun “Geçirimsiz” Olmasının Etkisi.....	35
2.5.4.2 Çimento Tipinin Etkisi.....	36
2.5.4.2.1 Portland Çimentosu ve Özellikleri.....	36
➤ C <sub>3</sub> S ve C <sub>2</sub> S.....	37
➤ C <sub>3</sub> A.....	37
➤ C <sub>4</sub> AF.....	39
2.5.4.2.2 Kimyasal Kompozisyon.....	40
2.5.4.2.3 İncelik.....	41
2.5.4.2.4 Kalsiyum Sülfatın Miktarı ve Formu.....	41
2.5.4.2.5 Alkali Etkisi.....	43
2.5.4.3 İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Etkisi.....	45
2.6 Puzolanların Sülfat Saldırısına Karşı Kullanımı.....	46
2.6.1 Puzolan.....	46
2.6.1.1 Doğal Puzolanlar.....	46
2.6.1.1.1 Volkanik Kökenli Puzolanlar.....	47
2.6.1.1.2 Pişirilmiş Kil ve Şeyl.....	48
2.6.1.1.3 Diatomlu Topraklar.....	48
2.6.1.2 Yapay Puzolanlar.....	48
2.6.1.2.1 Uçucu Kül.....	49
➤ Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri.....	50
I. Beton Karışımının Su İhtiyacı.....	50
II. İşlenebilme.....	51
III. Priz Süresi.....	51
IV. Hidratasyon Isısı.....	52
V. Terleme.....	52
VI. Dayanım.....	52
VII. Betonun Su Geçirimsizliği.....	52
VIII. Sülfatlara Dayanıklılık ve Alkali-Agrega Reaksiyonu.....	52
IX. Betonun Ekonomikliği.....	53
2.6.1.2.2 Silis Dumanı.....	53



➤ Silis Dumanının Betonun Dayanıklılığına Olan Etkileri.....	55
I. Geçirgenlik.....	55
II. Zararlı Kimyasal Maddeler ve Sülfatlara Karşı Direnç.....	55
2.6.1.2.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	57
➤ Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri.....	57
➤ Fiziksel Özellikler.....	58
➤ Dayanım Özellikleri.....	58
➤ Dayanıklılık Özellikleri.....	59
I. Sülfat Etkisine Dayanıklılık.....	59
II. Klor Etkisine Dayanıklılık.....	60
III. Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık.....	61
<b>BÖLÜM ÜÇ – LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>64</b>
3.1 Deniz Suyu ve Sülfat Etkisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	64
3.2 Kılcal Yolla Su Emme ve Ağırlık Değişimiyle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	77
3.3 Klor İyon Geçirgenliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	81
3.4 Klor İşleme Derinliği ve Mekanik Özelliklerin Ölçümü ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	87
<b>BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>97</b>
4.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	97
4.2 Malzeme Özellikleri.....	100
4.2.1 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) kullanılan malzemelerin özellikleri.....	100
4.2.1.1 Çimento.....	100
4.2.1.2 Doğal Kum .....	103
4.2.1.3 Su .....	104
4.2.1.4 Deniz Suyu.....	104
4.2.2 Çalışma 2’de (Önceki Deneysel Çalışma) kullanılan malzemelerin özellikleri.....	105

4.2.2.1 Çimento.....	105
4.2.2.2 Doğal Kum .....	109
4.2.2.3 Su .....	109
4.2.2.4 Deniz Suyu.....	109
4.3 Standart Deney Yöntemleri.....	110
4.3.1 Prizmatik Harç Örneklerinin Eğilmede Çekme Dayanımının ve Basınç Dayanımının Elde Edilmesi (ASTM C 348; ASTM C349).....	110
4.3.2 Sülfat Çözeltisine Maruz Kalan Hidrolik Çimento Harçlarının Boy Değişimleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1012).....	112
4.3.3 Hidrolik Çimento Harçlarında Kılcal Yolla Su Emme Hızının Hesaplanması için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1585) ve Geçirimsizlik.....	112
4.3.4 Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu (TS 3624).....	113
4.3.5 Klor İyonu Geçirgenliğinin Elektrik Akımı ile Tayini için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1202).....	115
4.3.6 Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu (TS 3732).....	117
4.3.7 Hidrolik Çimentoların Performans Özellikleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1157).....	120
4.4 Deney Yöntemlerinin Çalışmaya Uyarlanması.....	121
4.4.1 Prizmatik Harç Örneklerinin Eğilmede Çekme Dayanımının (ASTM C 348) ve Basınç Dayanımının (ASTM C 349) Elde Edilmesi.....	121
4.4.2 Sülfat Çözeltisine Maruz Kalan Hidrolik Çimento Harçlarının Boy Değişimleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1012).....	122
4.4.3 Hidrolik Çimento Harçlarında Kılcal Yolla Su Emme Hızının Hesaplanması için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1585).....	122
4.4.4 Sertleşmiş Betonun “Su Emme” Miktarının Tayini (TS 3624).....	123
4.4.5 Klor İyonu Geçirgenliğinin Elektrik Akımı ile Tayini için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1202).....	123
4.4.6 Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu (TS 3732).....	124
4.5 Karışımların Hazırlanması ve Örneklerin Kürü.....	124
4.5.1 Çalışma 1’de karışımların hazırlanması ve örneklerin kürü.....	124

4.5.2 Çalışma 2’de karışımların hazırlanması ve örneklerin kuru.....	128
<b>BÖLÜM BEŞ - BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>132</b>
5.1 “Çalışma 1”in (Tez Çalışması) Bulguları.....	132
5.2 “Çalışma 2”nin (Önceki Deneysel Çalışma) Bulguları .....	205
<b>BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>218</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>227</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>238</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Çevremizde kullanılan birçok yapının temel malzemesi olan beton, kullanımda olduğu süre içerisinde değişik nedenlerle bozulmalara uğrar. Bu bozulmalar betonun kimyasal, fiziksel veya fiziko-kimyasal etkilere maruz kalmasından dolayı meydana gelmektedir. Kimyasal etkilere maruz kalan betonlarda, içeri sızan sularda bulunan sülfat, asit ve bu gibi zararlı maddeler beton içerisindeki bileşenlerle reaksiyona girerek, sertleşmiş betonun bozulup hasar görmesine neden olurlar. Sülfat saldırısı çimento harçlarında ve betonlarda genleşmelere ve çatlaklara yol açan başlıca problemlerden biridir. Deniz suyunda da var olan sülfat ve klor iyonları, harç, beton ve donatı çeliğinde bozulmalara yol açar. (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

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 deniz suyu 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 (Baradan ve diğer., 2002).

Betonların kimyasal etkilere dayanıklılığı için geçirimsiz ve düşük su/çimento oranları ile üretilmesinin yanı sıra özel tip çimento (değişik puzolan katkı) kullanımında fayda vardır (Baradan ve diğer, 2002).

Bu çalışmada, değişik çimento tipleriyle üretilen deney örneklerinin ıslanma-kuruma çevrimli deniz suyunda ve 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmesi sonrası elde edilen mekanik ve durabilite özellikleri yer almaktadır. Sülfat etkisinin varlığı, örneklerin basınç dayanımında meydana gelen azalmayla belirlenmiştir. Deneylerde 5 tip çimento ve 3 farklı su/çimento oranı kullanılmıştır. Çimento tipi olarak CEM I 42,5 R, CEM II/A-M (P-W) 42,5 R, CEM II/B-M (P-W)

32,5 R, CEM II/A-W 52,5 N ve CEM III/A 42,5 N kullanılmıştır. Çimento, doğal kum ve şehir şebeke suyuyla hazırlanan harçlar 40x40x160 mm, 25x25x285 mm boyutlarındaki prizmatik ve 100/50 mm boyutundaki silindir kalıplara dökülmüştür. Elde edilen örnekler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri, klorür miktarı tayini, kılcal yolla su emme ve toplam su emme deneyleri, komparatörle boy değişimi ölçümleri ve klor iyon geçirgenliği deneyi yapılmıştır.

Deneylelerden elde edilen sonuçlara göre, mineral katkı içeren çimentolarla hazırlanan örneklerin Portland çimentosuyla hazırlanan örneklerden her koşulda daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Artan su/çimento oranı genleşmelerin artmasına sebep olmaktadır. 0,7 su/çimento oranında en az genleşme gösteren örnek tipi CEM III/A 42,5 çimentosuyla üretilenler olmuştur. Ayrıca, artan su/çimento oranının, örnek yapısındaki boşlukların artmasına neden olarak eğilme ve basınç dayanımlarını düşürdüğü saptanmıştır.

Kılcal yolla su emme miktarları su/çimento oranı arttıkça artış göstermiştir. Kirece doymuş suda kür edilmiş 350 günlük örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının 28 günlük örneklerden daha fazla olması sebebiyle 350 günlük örneklerin kılcallık katsayıları daha büyüktür. Kirece doymuş suda bekletilen örneklerin basınç dayanımları ile kılcallık katsayıları arasında doğru orantı olduğu saptanmıştır. Kılcal su emme miktarları deniz suyunda bekletilen örneklerde, tıkanan gözenekler nedeniyle, kirece doymuş su kürüne kıyasla azalmıştır.

Örneklerin toplam su emme miktarları, su/çimento oranı arttıkça artış göstermiştir. Deniz suyundaki tuz kristallerinin örnek gözeneklerini tıkaması sonucu deniz suyunda bekletilen 350 günlük örneklerin, kirece doymuş suda bekletilen aynı yaştaki örneklerden daha az su emme miktarına sahip olduğu görülmüştür.

Ayrıca, mineral katkılı çimentolarla üretilen tüm örneklerin genellikle her koşulda CEM I 42,5 çimentosuyla üretilenlerden daha az klor geçirimsizlik değerine sahip olduğu görülmüştür.

## **BÖLÜM İKİ**

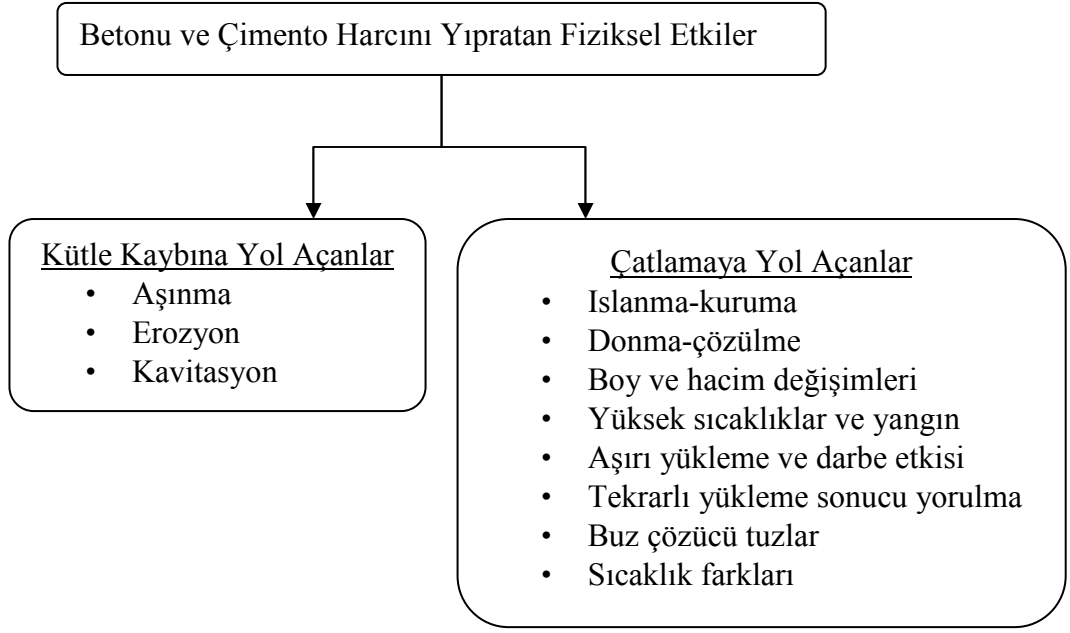
### **BETON VE ÇİMENTO HARÇLARINDA KALICILIK**

#### **2.1 Betonun ve Çimento Harcının Bozulmasına Sebep Olan Etkenler**

Yapı tasarımında yapının servis ömrü mutlaka göz önüne alınmalıdır. Yapıların yeterli dayanıma sahip olmasının yanında verimli bir kalıcılık özelliğini de göstermesi gerekir. Servis ömrü süresince yapı çeşitli çevresel etkiler altında kalmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olan beton, servis ömrü boyunca dış kuvvetlerin ve çeşitli çevresel etkilerin altındadır. Bunlar: fiziksel, kimyasal veya fiziko-kimyasal ve mekanik etkilerdir (Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu, 2003). Uygulamada beton, fiziksel ve kimyasal birçok etkiye tekrarlı olarak maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerinin gelişimini hızlandırabilmektedir (Baradan ve diğer., 2002). Örneğin, yüzey aşınması ve çatlaklar sebebiyle oluşan kütle kaybı, betonun kimyasal bozulmasına yol açan geçirgenliği artırır (Mehta ve Monteiro, 2005). Benzer şekilde betonun kimyasal süreçlerle bozulması sonucu gözenekliliğinin artması, aşınma gibi fiziksel etkilere dayanıklılığını büyük ölçüde azaltabilmektedir (Baradan ve diğer., 2002). Örneğin, çimento hamuru bileşenlerinin, su ya da asidik sıvılarla yıkanması, betonun gözenekliliğini artırır. Bu durum, betonu aşınma ve erozyona karşı savunmasız bırakır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Mehta ve Gerwick, betonun fiziksel bozulmasına sebep olan etkenleri iki kategoride gruplamıştır: (a) yüzey aşınması nedeniyle oluşan kütle kaybı, erozyon ve kavitasyon; (b) normal sıcaklık ve nem koşullarında oluşan çatlaklar, tuzun gözeneklerde kristalize olması, yapısal yükler ile donma ve yangın gibi değişik sıcaklıklara maruz kalma durumlarıdır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Şekil 2.1’de betonu yıpratıcı fiziksel etkiler bir arada gösterilmiştir (Baradan ve diğer., 2002).



Şekil 2.1 Betonun ve çimento harcının fiziksel nedenlerle bozulması (Baradan ve diğer, 2002)

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 içeriye taşınım hızı oldukça yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra ortaya çıkabilir (Baradan ve diğer., 2002).

Betonun bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyonlar üç grupta toplanabilir:

I. Grup reaksiyonlar düşük sertlikteki suların çimento hidrate bileşenlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde gelişir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

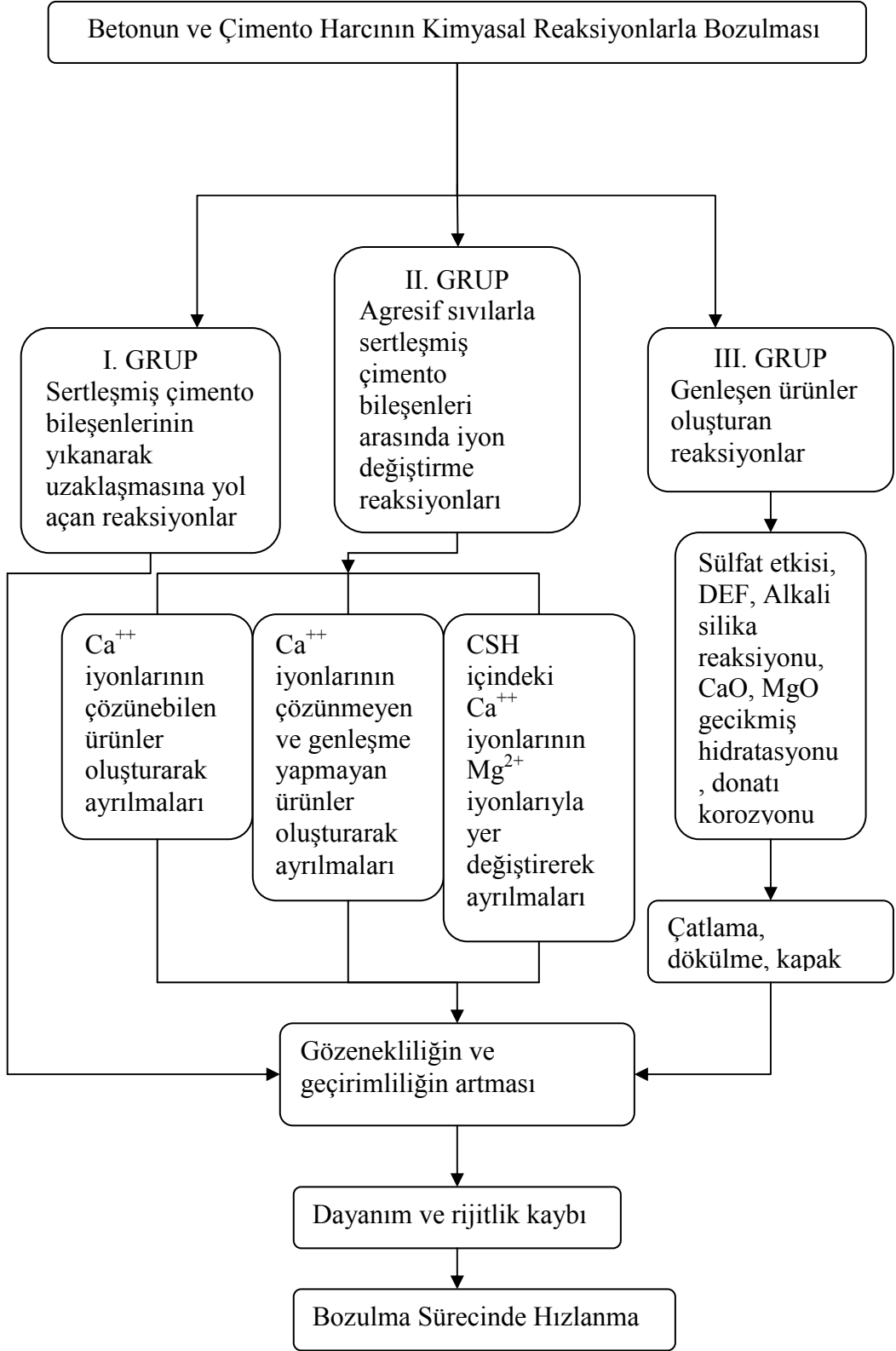
II. Grup reaksiyonlar agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesidir. Reaksiyon ürünleri ya yıkanarak uzaklaştırılır veya suda çözünmeyen yeni bir yapı oluşturur. Asitlerin ve  $Mg^{2+}$  iyonu içeren suların oluşturdukları hasarlar bu tür reaksiyonlara örnektir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

III. Grup reaksiyonlar genişleyen ürünler oluşturarak betonda hasara yol açarlar.

Sülfat etkisi, MgO ve CaO gibi çimento bileşenlerinin hidratasyonları, alkali-silika reaksiyonu (ASR), beton içine gömülü çelik donatının korozyonu bu tür bozulmaların en tipik örneklerdir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

Betonda gelişebilen kimyasal etkilenme mekanizmaları Şekil 2.2'de bir arada verilmektedir.





Şekil 2.2 Betonun ve çimento harcının bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyon türleri (Baradan ve diğer., 2002)

## 2.2 Betonun ve Çimento Harcının Üretiminde ve Küründe Kullanılacak Suyun Kalitesi

Beton imalinde kullanılan karma suyunun kalitesi, betonun priz süresini, dayanım kazanma hızını ve donatının korozyona karşı korunmasını etkileyebilir. Kalitesi bilinmeyen bir suyun, beton imali için karma suyu olarak uygunluğunun tayininde, suyun bileşimi ve imal edilecek betonun kullanım yeri dikkate alınmalıdır. Beton imalinde kullanılan suyun uygunluğu, genellikle kaynağına bağlıdır. Sular, içilebilen sular, beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan sular, yeraltı kaynaklarından çıkan sular, tabii yüzey suları ve endüstriyel atık sular, deniz suyu ve acı göl suları, kanalizasyon (lâğım) suları şeklinde tiplere ayrılabilir. İçme suyu şebekesinden alınan suyun, bu standartta verilen özellikleri sağladığı kabul edilir. Suyun, TS EN 196-21'e göre deney yapılarak tayin edilen ve Cl<sup>-</sup> olarak ifade edilen klorür içeriği, Tablo 2.1'de verilen seviyeyi geçmemelidir. Ancak, betonun toplam klorür içeriğinin, belirlenen beton sınıfı için TS EN 206-1:2002'de yer alan Madde 5.2.7'den (Tablo 4.10) seçilen en büyük değeri geçmediğinin gösterilmesi halinde, Tablo 2.1'de verilenlerden daha yüksek klorür içeriğine izin verilebilir (TS EN 1008).

Tablo 2.1 Karma suyunun azami klorür muhtevası (TS EN 1008)

Karma suyunun kullanılacağı beton cinsi	Azami klorür içeriği mg/L	Deney işlemi
Öngörülen beton veya şerbet	500	TS EN 196-21
İçerisinde, donatı veya diğer metal bulunan beton	1000	
İçerisinde, donatı veya diğer metal bulunmayan beton	4500	

Suyun, TS-EN 196-2'ye göre deney yapılarak tayin edilen ve SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> olarak ifade edilen sülfat içeriği 2000 mg/L'yi geçmemelidir (TS EN 1008).

Deneye tâbi tutularak, uygunluğu araştırılan su ile yapılan beton numunelerde elde edilen priz başlangıç süresi, bir saatten daha az olmamalı ve damıtık su veya deiyonize su ile yapılan beton numunelerde elde edilen priz başlangıç süresine göre % 25'ten daha fazla sapma göstermemelidir. Priz bitiş süresi ise 12 saatten daha uzun olmamalı ve damıtık su veya deiyonize su ile yapılan beton numunelerde elde edilen priz sona erme süresine göre % 25'ten daha fazla sapma göstermemelidir. Uygunluğu araştırılan su ile yapılan beton veya harç numunelerin 7 günlük ortalama basınç dayanımı, aynı yaşta deneye tâbi tutulan damıtık su veya deiyonize su ile hazırlanmış numune basınç dayanımının %90'ından daha küçük olmamalıdır (TS EN 1008).

Betonun kürü için kullanılacak su, sertleşmiş betonda hacim değişikliğine yol açacak veya betonun yüzeyinde lekeler oluşturabilecek türde ve miktarda yabancı maddeler içermemelidir. Türk standartlarında ve ASTM'de, betonda kür suyu olarak kullanılacak suyun kalitesine dair değerler verilmemektedir. ABD'deki bazı standartlar, betonun kür işleminde kullanılacak suyun beton yüzeyinde leke oluşturup oluşturmayacağı için araştırılabilmesi için aşağıdaki yöntemi belirtmektedir: Çimento harcından veya alçıdan, bir yüzü, üzerine dökülen suyu tutabilecek kadar konkav olan numuneler hazırlanmaktadır. Bu numunelerin üzerindeki çukura su dökülmekte ve merceklerle veya sıcaklık veren lambalarla bu su buharlaştırılmaktadır. Numunelerin yüzeyindeki saf suyun ve betonun kürü için kullanılacak şüpheli suyun buharlaşma sonucu bırakacakları lekeler, gözle, karşılaştırılarak incelenmekte, bakım suyunun uygun kalitede olup olmadığına karar verilmektedir (Erdoğan, 2003).

### **2.3 Beton Karışımında ve Çimento Harcında Deniz Suyu Kullanılmasının Beton Özelliklerine Etkisi**

Deniz suları değişik türlerde ve miktarlarda yabancı madde içermektedir (Tablo 2.2 ve 2.3).

Tablo 2.2 Deniz sularındaki iyonlar, g/lit (Erdoğan, 2003)

İyon	Akdeniz	Karadeniz	Dünya Ortalaması
Na	11,56	4,90	11,00
K	0,42	0,23	0,40
Mg	1,78	0,64	1,33
Ca	0,47	0,24	0,43
Cl	21,38	9,50	19,80
SO <sub>4</sub>	3,06	1,36	2,76

Tablo 2.3 Deniz sularındaki tuzlar, g/lit (Erdoğan, 2003)

Tuz	Akdeniz	Tipik Okyanus
NaCl	30,0	26,0
MgCl <sub>2</sub>	4,6	3,2
MgSO <sub>4</sub>	2,3	2,2
CaSO <sub>4</sub>	1,4	1,3
CaCl <sub>2</sub>	0,7	0,6

Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'ten görülebileceği gibi, deniz sularında değişik türlerde ve miktarlarda tuzlar yer almaktadır. Deniz sularının içerisindeki sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki, topraktaki ve yeraltı sularının içerisindeki sülfatların etkisi kadar şiddetli olmamaktadır. Deniz sularının içerisinde klorür iyonunun bulunuyor olması, sülfat reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ürünlerin daha az genleşme yaratmasına neden olmaktadır. Zira klorür, sülfat saldırısı sonunda betonun içerisinde oluşan alçıtaşının ve etrenjitin bir miktarının çözünerek, betonun yüzeyine çıkmasına yol açmaktadır. Böylece, alçıtaşının ve etrenjitin, sertleşmiş betonun içerisinde genleşme-yaratıcı etkileri birazcık azalmış olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Deniz sularının betonarme yapılara esas zararı, bu tür sularda bulunan klordan kaynaklanmaktadır. Deniz suyundaki klor, betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu (paslanmasını) hızlandırmakta, betonun parçalanmasına yol açabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Deniz suyundaki tuzların yaklaşık %78'ini sodyum klorür ve %10 kadarını magnezyum klorür oluşturmaktadır (Erdoğan, 2003)

Deniz suyunun beton karışımında kullanılmasının beton özelliklerine etkisinin araştırılması 1920'li yıllarda Abrams tarafından başlatılmış ve daha sonraları bu konuda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Değişik araştırmacıların bulguları biraz farklılık göstermekle birlikte, çok sayıda araştırmacı tarafından ileri sürülen ortak görüş şu şekilde özetlenebilmektedir:

(1) Beton karışımında deniz suyu kullanılması, betonun prizini hızlandırmakta ve hatta ilk günlerdeki dayanımını birazcık arttırabilmektedir. (Bu durum, sudaki klorürlerden kaynaklanmaktadır.) Ancak, betonun nihai dayanımında %10-%20 kadar azalma olmaktadır (Erdoğan, 2003).

(2) Deniz suyunun yol açtığı bir başka çok önemli olumsuzluk, içerdikleri yüksek miktardaki klorür iyonu nedeniyle, betonarme yapılardaki betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu arttırmasıdır. O nedenle, öngörülen betonların yapımında kesinlikle deniz suyu kullanılmamalıdır. Hatta betonarme yapıların betonlarının üretiminde de deniz suyu kullanımından olabildiği kadar kaçınılmalıdır (Erdoğan, 2003).

(3) Deniz suları ile yapılan betonlar, ayrıca, daha çok çiçeklenme göstermekte, beton yüzeyinin görünümü bozulmakta, betonun dayanıklılığı azalmaktadır (Erdoğan, 2003).

#### **2.4 Deniz Suyu Etkisindeki Betonlar**

Deniz ortamında bulunan betonarme elemanlar değişik fiziksel ve kimyasal etkilere maruzdur. Bu etkiler Şekil 2.3'te gösterilmektedir (Baradan ve diğer., 2002).

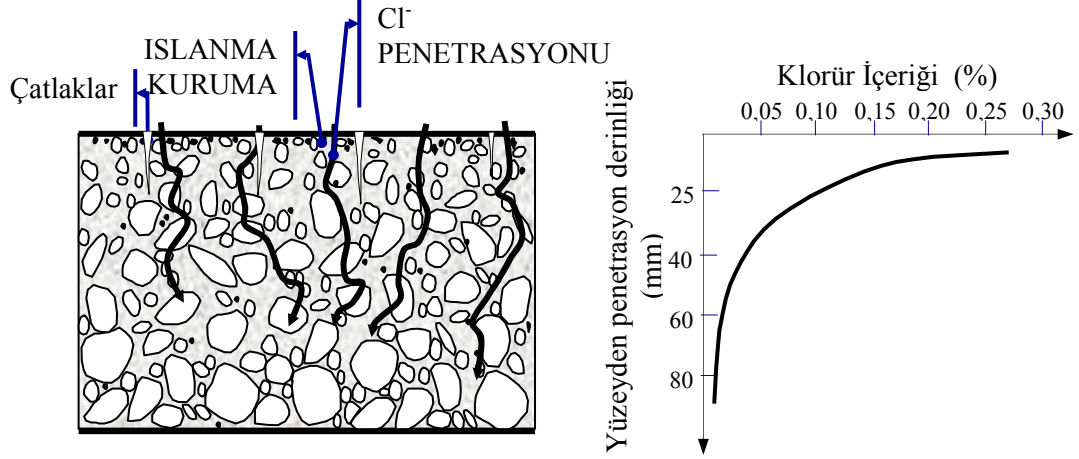


Şekil 2.3 Deniz ortamında bulunan yapıların maruz kalabilecekleri yıpratıcı etkiler (Baradan ve diğer., 2002)

Yapının veya yapı elemanının yukarıdaki etkilerden herhangi birine veya hepsine maruz kalması ve etkinin şiddeti deniz-seviyesine göre bulunduğu konuma bağlıdır. Genel olarak en çok hasarın ıslanma-kuruma bölgesinde bulunan elemanlarda olduğu söylenebilir (Baradan ve diğer, 2002).

Klorürler beton bünyesine  $CO_2$  gibi difüzyon yoluyla girerler. Beton içinde ilerleme hızları karbonatlaşma olayındakine benzer olarak zamanın karekökü ile ilişkilidir. Klorür iyonları beton içine çeşitli yollardan girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması,  $CaCl_2$  içeren priz hızlandırıcı ya da su azaltıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, klorür içeren mineral katkıların kullanılması, deniz suyunun karma suyu olarak beton üretiminde kullanılması olarak sayılabilir. Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. İslanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, zamanla beton içinde, yüzeyden derinlere inildikçe azalan bir klorür iyonu dağılımı gözlenir. Tuzlu

suyun kapiler yolla emilimi, difüzyon periyotları, ıslanma-kuruma döngüsü  $Cl^-$  konsantrasyonunu ve  $Cl^-$  işleme derinliğini artırır (Baradan ve diğer., 2002).



Beton klorür iyonlarının bir kısmını fiziksel ve kimyasal olarak bağlayabilmektedir. Bu nedenle, beton içindeki klorür iyonları bağlı ve serbest klorür olarak ikiye ayrılır. Kimyasal bağlama sırasında çimento bileşenleri ve klorürler arasındaki reaksiyondan Friedel tuzu adı verilen yeni bir ürün meydana gelir. Fiziksel bağlama jel boşluklarında klorür iyonlarının adsorbe edilmesiyle gerçekleşir. Donatının korozyonu açısından suda çözünen serbest klorür miktarı önemlidir. Bağlı ve serbest klorür iyonları arasında normal şartlarda beton içinde bir dengenin teşekkül ettiğini, karbonatlaşma gibi dış sebeplerle, kimyasal olarak bağlı klorürlerin de serbest kalarak, beton boşluk suyuna karışma risklerinin olduğunu belirtmek gerekir (Baradan ve diğer., 2002).

Birçok beton veya betonarme yapı yeryüzünün yaklaşık % 78'ini oluşturan denizlerle doğrudan temas halindedir veya dolaylı olarak deniz ortamından etkilenmektedir (Yazıcı, Türkel, Yiğiter ve Aydın, 2003).

Deniz ortamında bulunan betonarme yapılar, servis ömürleri boyunca fiziksel ve kimyasal kökenli birçok yıpratıcı etkiye aynı anda ve tekrarlı olarak maruz kalırlar. Bu fiziksel etkiler arasında, aşınma, ıslanma-kuruma ve donma çözülme etkileri sayılabilir. Deniz suyunun içerdiği zararlı iyonlar nedeniyle betonda oluşturduğu

kimyasal bozulma süreçleri ise, sülfat etkisi, magnezyum iyonu etkisi ve karbonik asit etkisi şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, klorürlerden kaynaklanan donatı korozyonu, deniz ortamındaki betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli kalıcılık problemi olarak kabul edilir. Yapının bu etkilerden hangilerine maruz kalacağını ise büyük ölçüde deniz seviyesine göre konumu belirler. Ancak, en şiddetli etkiye ıslanma-kuruma bölgesindeki yapı elemanlarının maruz kaldığı söylenebilir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi çözülmüş bazı tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır. Denizlere ve okyanuslara göre farklılıklar olsa da, tipik tuzluluk oranı % 3,5 civarındadır. Buharlaşmanın yüksek olduğu sıcak iklimlerde tuzluluk oranı artmaktadır. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), magnezyum sülfat (MgSO<sub>4</sub>), kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>), potasyum klorür (KCl) ve potasyum sülfat (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) olarak sıralanabilir. Deniz suyunun tipik iyon konsantrasyonuna bakıldığında 11000 mg/l Na<sup>+</sup>, 20000 mg/l Cl<sup>-</sup>, 1400 mg/l Mg<sup>+2</sup>, 2700 mg/l SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, 500 mg/l kalsiyum, 400 mg/l potasyum içerdiği görülmektedir. Çimento hidrasyon ürünlerine kimyasal saldırı açısından bakıldığında ise deniz suyunun yüksek miktarda sülfat ve magnezyum içerdiği söylenebilir. Ayrıca, deniz suyunun önemli miktarda çözülmüş oksijen ve karbondioksit içerebildiğini ve bu gazların yoğunluğunun lokal şartlara göre çok değişken olduğunu ilave etmek gerekir. Tablo 2.4'te Ege denizinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları gösterilmiştir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Tablo 2.4 Ege denizinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları (Yazıcı ve diğer., 2003)

\* Toplam tuzluluk yüzeyde veya az derinde yaz aylarında ölçülen değerlerdir.

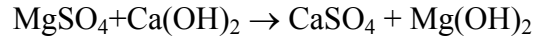
Deniz	Yöre	Toplam Tuzluluk (%)*	İyon Konsantrasyonları (mg/l)				
			Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>
Ege	Ayvalık	3,8	1400	2830	18770	11770	560

İçerdiği yüksek sülfat iyonu konsantrasyonu ile deniz suyu beton üzerinde sülfat etkisi yapar. C<sub>3</sub>A ve CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur.



Yapılan araştırmalar klorür iyonlarının bulunduğu ortamda oluşan etrenjitin genleşmeye yol açmadığı ve deniz suyunda çözüldüğünü göstermektedir. Yüksek C<sub>3</sub>A içerikli çimento kullanıldığında hasar genleşme ile değil katı bileşenlerin erozyona uğrayarak kütlede ayrılmalarıyla kendini göstermektedir. Bu nedenle sülfat etkisi açısından deniz suyu yüksek miktarda sülfat iyonu içermesine rağmen genellikle orta şiddetli etki sınıfında kabul edilir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Deniz suyunun beton üzerindeki bir diğer kimyasal etkisi ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı aşağıda gösterilen yer değiştirme reaksiyonudur:



Oluşan Mg(OH)<sub>2</sub> brusit adıyla da bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca Ca(OH)<sub>2</sub>'nin CO<sub>2</sub> ile reaksiyonundan aragonit formundaki CaCO<sub>3</sub> oluşur ve çökeler. Kısa sürede oluşan bu koruyucu tabakaların kalınlığı 20–50 µm civarındadır ve yapının suya tamamen gömülü kısımlarında görülürler. Ancak, yapının dalgaların aşındırıcı etkilerine maruz kısımlarında bu tabakaların uzaklaşmasıyla reaksiyon tekrarlanır ve kütle kaybı süreklilik kazanır. Betonun magnezyum tuzlarıyla uzun süreli teması halinde CSH içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratin (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar (Yazıcı ve diğer., 2003).

Atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazının bir kısmının su içinde kolayca çözünmesi nedeniyle doğadaki tüm sular karbonik asit içerirler. Sudaki karbonik asit içeriği, kireçtaşını çözebilen karbondioksit miktarı ile tanımlanmaktadır. Deniz suyundaki çözünmüş CO<sub>2</sub> miktarı ise 35–60 mg/l civarındadır. Genellikle, deniz suyunun pH değeri 8'in altına düşmedikçe kireçtaşını (CaCO<sub>3</sub>) çözmesi beklenmez. TS EN 206-1 Standardı sudaki 40-100 mg/l CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu orta şiddetteki etki sınıfı olarak kabul etmektedir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Betonlar üzerinde deniz suyu etkisi, birkaç nedenden dolayı, özel dikkat gerektirir. İlk olarak, denizel etki altındaki yapılar, bir dizi fiziksel ve kimyasal bozulma işlemine maruz kalır. Bu durum, betonun kalıcılık problemlerinin karmaşıklığının anlaşılmasına olanak tanır. İkincisi, okyanusların dünya yüzeyinin %80'ini oluşturması nedeniyle birçok yapı doğrudan veya dolaylı olarak deniz suyu etkisine maruz kalır. Rüzgârlar deniz suyunu kıyıdan birkaç mil içeriye taşıyabilir. Beton ayaklar, döşemeler, dalgakıranlar ve istinat duvarları, liman ve marinaların yapımında kullanılır. Kentsel alanları kalabalıktan ve çevre kirliliğinden uzak tutmak amacıyla, yeni havaalanları, enerji santralleri ve atık su uzaklaştırma üniteleri inşası için beton yüzer platformlar tasarlanır. Deniz suları genellikle kütüce %3,5 çözünebilen tuzlar içerir.  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Cl}^-$  iyonlarının konsantrasyonları sırasıyla, 11000 ve 20000 mg/l civarında olmak üzere diğer iyonlara göre yüksek değerlerdedir. Bununla birlikte,  $\text{Mg}^{2+}$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$  iyonları sırasıyla 1400 ve 2700 mg/l civarında bulunmaktadır. Deniz suyunun pH değeri 7,5 ile 8,4 arasında değişir; atmosferdeki karbondioksit ile denge halinde ortalama pH değeri 8,2'dir. Dalgakıran bulunan koylarda ve gelgit olaylarının yoğun olduğu haliçlerde, deniz suyunun yüksek miktarda  $\text{CO}_2$  içermesi halinde 7,5'in altındaki pH değerlerine de rastlanabilir ki bu durumda deniz suyunun beton üzerinde daha fazla etkili olacağı açıktır. Denizel etkiye maruz kalan betonlar, deniz suyu bileşenlerinin kimyasal etkileşiminin çimento hidrasyon ürünleri üzerindeki etkisi sonucu yıpranabilir. Bu etkileşimler, alkali-agrega genleşmesi, bir yüzü ıslanma, diğer yüzü kurumaya maruz kalan betonun içindeki tuzların kristalizasyon basıncı, soğuk iklimlerde donma olayı, betonarme çeliğinin ya da öngörülen elemanların korozyonu ve dalga hareketlerinin ya da yüzen nesnelere sebep olduğu fiziksel erozyon olarak ortaya çıkabilir. Bu etkenlerin herhangi birinden kaynaklanan saldırı, betonun geçirgenliğini artırır. (Mehta ve Monteiro, 2005).

#### **2.4.1 Teorik Görüşler**

Deniz suyundaki sülfat ve magnezyum iyonlarının zararlı bileşikler olduğu, hidrate çimento hamurunun bileşenlerine karşı oluşan kimyasal saldırıdan anlaşılabilir. Yeraltı sularında, sülfat iyonu konsantrasyonu 1500 mg/l'den fazla

olduğu zaman oluşan sülfat saldırısı “şiddetli” olarak sınıflandırılır. Benzer şekilde, magnezyum iyonu konsantrasyonu 500 mg/l’yi aştığı zaman oluşan katyon değişim reaksiyonları, portland ĉimento hamurunda hasara sebep olabilir. İlginĉ şekilde, deniz suyundaki istenmeyen yüksek sülfat iĉeriđine rağmen saha ĉalıřmaları şunu göstermektedir: Yüksek C<sub>3</sub>A iĉerikli portland ĉimentosu kullanılmış olsa bile ve ĉimento hamurunun maruz kaldığı sülfat saldırısı sonucunda önemli miktarlarda etrenjit oluşsa bile, betondaki hasar genleşme ve ĉatlama şeklinde değil, erozyon veya katı bileşenlerin kütleden uzaklaşması şeklinde meydana gelir. Etrenjit genleşmesi, ortamdaki (OH)<sup>-</sup> iyonlarının Cl<sup>-</sup> iyonları ile yer değiştirmesi ile bastırılır. Bu durum, su emmeyle gelişen etrenjit genleşmesi iĉin gerekli olan ortamın alkali iĉerikli ortam olmasının gerekliliği ile örtüşür. Deniz suyuna maruz kalan betonlarda, yüksek C<sub>3</sub>A iĉerikli portland ĉimentosu tarafından baskılanan etrenjitle ortak ĉalıřan sülfat genleşmesinin mekanizmasına bakmaksızın, sülfat genleşmesi üzerindeki klor etkisi, malzemelerin davranışının modellenmesi esnasındaki hatayı sergiler. ACI 318’e göre, deniz suyundaki sülfat genleşmesi, ASTM Tip II portland ĉimentosu (maksimum %8 C<sub>3</sub>A) ve maksimum 0,5 su /ĉimento oranı kullanıldığında “orta” etki sınıfına dhildir. Gerĉekte bu durum, %10’a kadar C<sub>3</sub>A iĉeren ĉimentoların, su/ĉimento oranının maksimum 0,40 değerine indirilmesiyle kullanılabileceğini ACI 318R-21’de belirtir. Harĉ ya da betondaki serbest kalsiyum hidroksit değerini, magnezyum iyonlarını iĉeren bir değişim reaksiyonuyla hasar yaratabilir. Bu gerĉek, Vicat tarafından 1818 yılında kireĉ-puzolan betonlarının parĉalanması üzerine yapılan araştırmalardan ĉıkarılmıřtır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Deniz suyuna maruz kalan portland ĉimentosu harĉları ve beton karışımlarıyla yapılan uzun dönemli ĉalıřmalardan anlaşılan şudur: Magnezyum iyonlarının saldırısı, brusitin beyaz tortusu veya Mg(OH)<sub>2</sub> ve magnezyum silika hidrat varlığında gerĉekleřir. Yüksek oranda crf veya puzolan iĉeren iyi kür edilmiş beton, sadece portland ĉimentosu iĉeren betona oranla deniz suyunda daha iyi performans gösterir. Bunun sebebi, krden sonra ilkinin daha az serbest kalsiyum hidroksit iĉermesidir. Hidrate ĉimento hamurundaki kalsiyum hidroksit kaybı, magnezyum iyonu saldırısı ya da CO<sub>2</sub> saldırısı ile sonuĉlanır. ĉnk deniz suyu analizleri nadiren ĉznmř CO<sub>2</sub> iĉerir, hidrate ĉimento hamurundan uzaklaşan katı kalsiyum hidroksit sonucu

meydana gelen beton kütle kaybı potansiyeli sıklıkla gözden kaçırılır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Newport News'teki James River Köprüsü'nün kazık duvarlarının beton kazık ve başlıklarında 21 yıllık kullanımın sonrasında 1,4 milyon dolara mal olan tamirata ve kazıkların %70'i olan 2500 adedinin değişimine ihtiyaç duyulmuştur. Benzer şekilde, 1932 yılında New Jersey'deki Ocean City'de çakılan önceden dökülmüş 750 beton kazık, 25 yıllık servis ömrü sonunda 1957'de tamir edilmiş olup bazıları 550 mm'lik orijinal boyundan 300 mm'ye indirilmiştir. Her iki durumda, malzeme kaybı deniz suyunda normalden daha yüksek oranda bulunan çözünmüş CO<sub>2</sub> içeriği ile birleşmiştir. Normal oranda CO<sub>2</sub> içeren deniz suyu, geçirgen betondaki çimento ürünlerini çözmek için yeterlidir. Uzun zaman boyunca deniz suyuna maruz kalmış hasarlı betonlardan alınan çimento hamuru örneklerinde tomasit (kalsiyum silikakarbonat), hidrokalumit (kalsiyum karboalüminat hidrat) ve aragonit (kalsiyum karbonat)'ın varlığına rastlanmıştır (Mehta ve Monteiro, 2005).

#### ***2.4.2 Geçmiş Olaylardan Çıkarılan Dersler***

Gelecekte inşa edilecek olan beton deniz yapıları için, geçmiş olaylardan ders alınabilir (Mehta ve Monteiro, 2005)

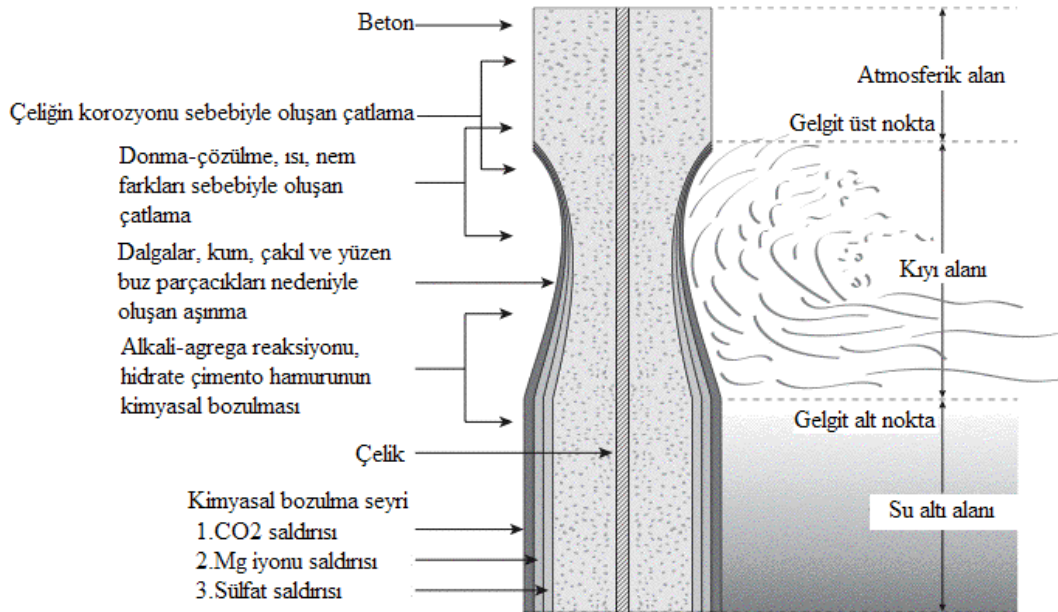
##### ***2.4.2.1 Geçirgenlik***

Deniz suyunun betonun içine girişi engellenmezse hidrate portland çimentosu bileşenleri ile deniz suyu arasında oluşan etkileşimler ciddi hasarlara sebep olur. Yeterli olmayan geçirimsizliğin tipik sebepleri: yetersiz oranlanmış beton karışımları, soğuk havada dökülen beton için kullanılan hava sürükleyicinin yetersizliği, verimsiz yerleştirme ve kür koşulları, donatı üzerindeki yetersiz paspayı, kötü tasarlanmış ve inşa edilmiş birleşimler ve sertleşmiş betonun yükleme koşullarına veya diğer faktörlere bağlı olarak gelişen etkenler olarak sıralanabilir (Mehta ve Monteiro, 2005).

Mühendisler beton teknolojisinde zararlı sıvılara maruz kalan betonda geçirgenliğin öneminin bilincine varmışlardır. Örneğin, Amerika’da buz çözücü tuzlara maruz kalan döşemeler ve garajlar, ASTM C 1202’ye göre 2000 Coulomb veya daha altındaki klor geçirimliliğini karşılayacak özellikte inşa edilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2005).

#### 2.4.2.2 Hasarın Tipi ve Şiddeti

Deniz suyuna maruz kalan, Şekil 2.5’te gösterilen betonarme silindirin gelgit seviyesinin üst kısmında yer alan kesiti donma ve korozyon olaylarına daha açık olacaktır. Gelgit seviyesinin en alçak ve en yüksek çizgisi arasında yer alan kesit, ıslanma-kuruma çevrimleri nedeniyle çatlak ve kabarmalara karşı savunmasız olacaktır. Alkali-agrega reaksiyonu ve deniz suyu- çimento hamuru etkileşimi sonucu oluşan kimyasal saldırılar, beton kesitinde etkili olacaktır. Mikro-çatlaklar ve kimyasal saldırılar sonucunda zayıflamış beton, aşındırma etkeni ile kum, çakıl ve buz etkenleri sonucu parçalara ayrılacaktır. Böylece en fazla hasar, gelgit bölgesinde oluşacaktır. Diğer taraftan, yapının deniz suyuna gömülü olan kısmı ise sadece deniz suyunun kimyasal saldırısına maruz kalacaktır. Çünkü yapı donma sıcaklıklarına maruz kalmadığından donma hasarı oluşmaz. Oksijen yokluğu sonucunda da dikkate değer korozyon oluşmayacaktır (Mehta ve Monteiro, 2005).



Şekil 2.5 Deniz suyuna maruz kalan betonarme silindirin gösterimi (Mehta ve Monteiro, 2005)

Çimento hamurunun yüzeyinden içine kadar, deniz suyu etkisiyle aşama kaydeden kimyasal hasar, genel bir seyir izler. CO<sub>2</sub> saldırısı sonucu aragonit ve bikarbonat oluşumu, genellikle yüzeyle sınırlıdır; magnezyum iyonlarının saldırısı sonucu brusit oluşumuna yüzeyin altında rastlanır ve iç kısımda etrenjit oluşumunun kanıtları ise sülfat iyonlarının derinlere sızabileceğini gösterir (Mehta ve Monteiro, 2005).

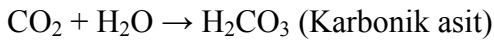
Eğer beton çok geçirimli değilse, çimento hamuruna deniz suyunun kimyasal etkisi hasara neden olmaz çünkü aragonit, brusit ve etrenjit gibi suda çözünmeyen reaksiyon ürünleri, geçirimsizliği azaltmaya ve deniz suyunun beton içine sızmasına engel olmaya eğilimlidir. Bu çeşit koruma etkeni, gelgit bölgesindeki dinamik yükleme koşullarında mümkün değildir, çünkü bu durumda reaksiyon ürünleri oluşur oluşmaz dalgalarla yıkanır ve uzaklaşır (Mehta ve Monteiro, 2005).

#### 2.4.2.3 Gömülü Çeliğin Korozyonu

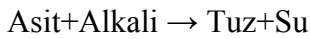
Betonda gömülü çelik, çimento hamurunun alkaliliği nedeniyle oluşacak korozyona karşı korunur. Koruma kaybı ya klorürlerin varlığı nedeniyle veya karbonatlaşma nedeniyle olabilir (Kutlu ve Demiriz, 2007). Atmosferde asit oluşturan gazlar vardır. Bunların en önemlileri CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> olup üç aşamada reaksiyon gösterirler (Baradan ve diğer., 2002):

1.Aşama: Gazların betonun gözenek sistemine işlenmesi,

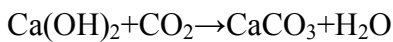
2.Aşama: Gazların gözenek suyu ile oluşturduğu reaksiyon,



3. Aşama: Oluşan asitlerin, gözenek suyu içinde çözülmüş olan çimentonun alkali bileşenleri ile reaksiyon yaparak bunları nötr hale getirmesi,



En önemli reaksiyon ise basitleştirilmiş olarak şu şekildedir:



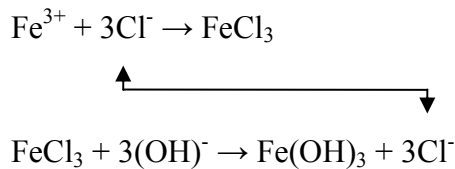
pH≈12,6



pH≈8,3

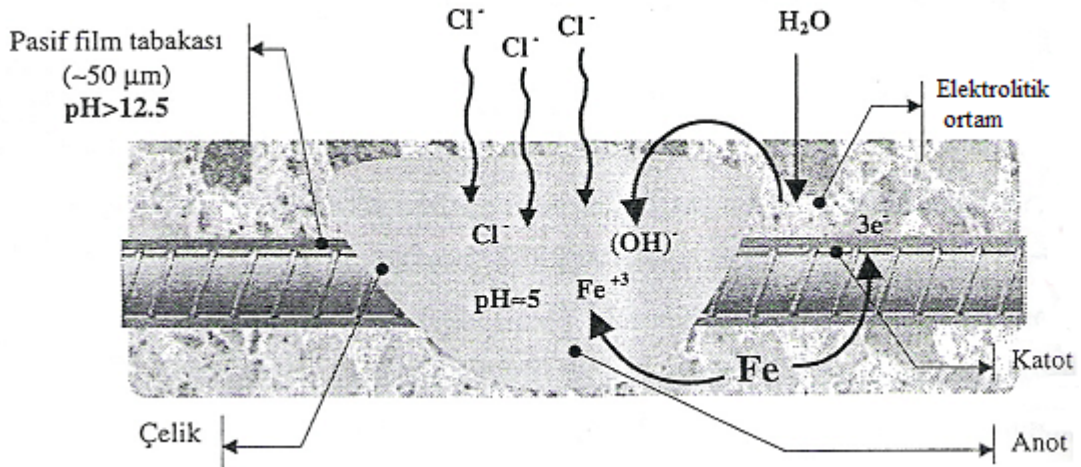
Oluşan kalsiyum karbonatın pH değeri sadece 8,3'tür. pH değerinin 9,5'un altına düşmesi halinde beton, betonarme çeliğini koruma etkinliğini kaybeder. Çelikteki pasif tabaka kararsız duruma geçer. Bazı araştırmacılar ise bu durumun betonun pH değerinin 11,5 değerinin altına düşmesiyle görülebileceğini belirtmektedir (Baradan ve diğer., 2002).

Klorür iyonları çelik donatının korozyonu açısından en zararlı madde olarak kabul edilirler. Korozyon sürecine olumsuz birçok etkileri mevcuttur. Çelik donatı üzerinde oluşan ve korozyonun gelişimini engelleyen pasif tabakanın çözünmesine yol açmaları bu etkilerden en önemlisidir. Klorür iyonlarının donatıya ulaştıklarında pasif tabakayı gevşettikleri, yüzeydeki kararlı tabaka ile reaksiyona girerek  $Fe(OH)_2$ . $FeCl_2$  gibi kararsız klor kompleksleri oluşturdukları düşünülmektedir. Yapılan araştırmalar, bu tür çözünebilir bileşiklerin oluşmasında  $Cl^-/(OH)^-$  oranının önemli bir parametre olduğunu, bu oranın 0,6 değerini aşması halinde pasif tabakada hasarın belirginleştiğini göstermektedir. Klorür iyonları, ortamın elektrolitliğini arttırarak ve elektriksel direncini azaltarak anot-katot iyon akışını kolaylaştırırlar. Böylece akım şiddetinin artışına bağlı olarak korozyon hızı da artar. Asit karakterli olmaları ve ortamın pH değerini indirgemeleri bir diğer olumsuz etkidir. Pasif tabakanın kararlılığını koruması için ortamın pH değerinin 9,5-11,5'in üzerinde olması gerekir. Klorür iyonları metal tarafından  $O_2$  ve  $(OH)^-$  iyonlarına kıyasla çok daha kolay adsorbe edilirler. Böylece katalizör görevi görerek, anodik reaksiyonun kolaylıkla oluşmasını sağlarlar ve demirin iyonlaşmasını hızlandırır. Klorür bulunan ortamda korozyonun gelişimi şu formüllerle gösterilmektedir (Baradan ve diğer., 2002):



Ortamda demir ve  $(OH)^-$  iyonlarının bol miktarda bulunması nedeniyle klorür iyonları reaksiyon sonucu sürekli yenilenmekte ve donatıda tahribat devamlılık arz etmektedir (Baradan ve diğer., 2002).

Gömülü çeliğin korozyonu, deniz suyuna maruz kalan betonarme ve öngermeli betonlarda oluşan beton hasarının başlıca nedenidir. Fakat düşük geçirgenliğe sahip betonda hasar, çatlamanın başlıca sebebi olarak ortaya çıkmaz. Çatlama-korozyon etkileşimi belli bir rota izler, çünkü korozyon hızı, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi katot-anot bölgesine bağlıdır, çeliğin korozyonu ile birlikte oluşan belirgin genleşme, çelik yüzeyinde yeterli miktarda oksijen bulunana kadar ortaya çıkmaz. Ve çelik-çimento hamuru arayüzeyini saran beton kaplaması geçirimsiz kaldığı sürece de ortaya çıkmayacaktır. Gözenekler ve mikro-çatlaklar arayüz bölgesinde daha önceden varolmaktadır, korozyondan farklı olaylarla bunların genişlemesi kaçınılmazdır. Korozyon için gereken koşullar bir kez sağlandığında, çatlama-korozyon ötesi-çatlama döngüsü başlar ve bu döngü yapıda önemli hasara neden olur (Mehta ve Monteiro, 2005).



Şekil 2.6 Betonarme donatısında klorür iyonlarının yol açtığı oyulma tarzı korozyon (Baradan ve diğer, 2002)

### 2.4.3 Islanma-Kuruma Etkisindeki Betonlar

Deniz suyu etkisine maruz kalan betonlar, sülfat saldırısının yanı sıra, gözeneklerinde çökelen (biriken) tuz kristallerinin yarattığı basınç nedeniyle de genişip, yıpranabilmektedirler. Sertleşmiş betonun gözeneklerinde tuz birikmesi, betonun içerisine giren deniz suyunun kapiler hareketle yukarı çıkması ve buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu olay, betonun, su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmektedir. Deniz sularının gel-git hareketiyle yükselip alçalması



sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma-kuruma devirlerinin etkisinde kalmaktadır. Bu tür ıslanma-kuruma durumu ile karşı karşıya kalan beton devamlı olarak su içerisinde bulunan betona göre daha çok hasar görmektedir. Öte yandan, deniz suyunun içerisinde bulunan magnezyum sülfat, betondaki bağlayıcı özellikteki kalsiyum-silika-hidrat jelinin çözünmesine neden olmakla birlikte, bu çözünme oldukça yavaş tempoda yer almaktadır. O nedenle, gözeneklerde biriken magnezyum sülfat kristalleri, gözeneklerin bir ölçüde tıkanmasına ve böylece dışarıdan daha az su sızabilmesine yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

İstinat duvarının bir yüzü veya geçirgen bir döşeme, tuz çözeltisiyle temas halindeyken ve diğer yüzeyler buharlaşmanın yol açtığı nem kaybına maruz kalıyorken, tuzların gözeneklerde çökmesi sonucu oluşan gerilmeler malzemeyi yıpratır. Bu durumun sebebi, aşırı doygun tuz çözeltilerinin kristalizasyonu sonucu oluşan büyük basınçlara bağlanabilir. Tuz kristalizasyonunun sebep olduğu hasarlardan yola çıkarak, Binda ve Baroni iklimsel koşulların hasara yol açıp açmayacağını tartışmışlardır. Onlara göre, hasarların büyük bölümü tuz kristalizasyonunun oluşum yerine bağlıdır. Kristalizasyona maruz kalan buharlaşma hızı ile tuz çözeltisinin kaynaklanma hızı arasındaki dinamik denge ile bu yer belirlenir. Buharlaşma hızı, kaynaklanma hızından azsa tuz kristalizasyonu herhangi bir hasara sebep olmaksızın dış yüzeyde yer alır. Tuz çözeltisinin gözeneklerarası göçü, gözeneklerin yeniden dolma hızından küçükse, kuruma bölgesi yüzeyin alt kısmında oluşur. Bu koşullardaki tuz kristalizasyonu tabaka tabaka ayrılmaya ve kabarmaya sebep olan genişlemeyle sonuçlanır. Sodyum Sülfat ve Magnezyum Sülfat gibi hidrate edebilen tuzlara maruz kalan gözenekli betonda gözlemlenen durum, literatürde, pullanma, ayrışma ve hidratasyon saldırısı olarak tanımlanır (Mehta ve Monteiro, 2005) .

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcıyla reaksiyona girerler. Bazı killer alkali magnezyum ve kalsiyum sülfat gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yeraltı suyuyla birleşince zararlı etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da birçok bölgede rastlanır.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve

$C_3A$  ile  $CaSO_4$  ise yalnızca  $C_3A$  ile reaksiyona girer. Deniz suyunda da bulunabilen  $MgSO_4$ ,  $Ca(OH)_2$  ve  $C_3A$ 'nın yanı sıra kalsiyum silikat hidrate (CSH) yapıyla da reaksiyona girebilmektedir (Tosun, Yazıcı, Yiğiter, Baradan, 2006).

Reaksiyonun gelişimini, sülfatlı ortamın şiddeti, betonun geçirimsizliği, betonda kullanılan çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir. Sülfat dayanıklılığını arttırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanılabilir. Puzolanlar,  $Ca(OH)_2$ 'yi bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki  $Ca(OH)_2$  ve  $C_3A$  oranının azaltılmasını sağlar (Tosun ve diğer., 2006).

Dış etkilere açık saha ve özellikle sıcak ve kurak iklimlerde sulama kanalı kaplama betonları diğer zararlı etkilere ek olarak ıslanma-kuruma çevrimleri etkisindedir. Islanma-kuruma çevrimi beton elemanın kesiti boyunca çok eksenli gerilme ve şekil değiştirme çevrimi oluşmasına yol açar. Islanma veya kuruma sırasında yaklaşık olarak sıcaklık veya bağıl nem veya su içeriği gradyanına dik doğrultuda belirginleşen basınç veya çekme ve kayma gerilmeleri oluşur. Islanma-kuruma tekrarlarının betonda oluşturacağı hasar, kuruma ortamının sıcaklık ve bağıl nemine, kuruma olayından sonra ıslanma uygulanırken suyun ve betonun sıcaklıklarına, bu sıcaklıklar arasındaki farka bağlıdır. Kuruma sıcaklığı yüksek ve süresi uzun ve bağıl nem az olduğunda ve kurumuş beton sıcaklığı ile ıslatma suyu sıcaklığı arasındaki fark arttıkça etki şiddeti ve sonuçta doğurduğu tekrarlı gerilme genliği artar. Betonda ıslanma-kuruma çevriminin (IKÇ'nin) şiddeti ile genliği artan tekrarlı gerilme ve şekil değiştirmeler etkir. Ayrıca betona dışarıdan su ile gelen ve yapısında da bulunan çözünen tuzlar ve kireç, su ile taşınarak buharlaşmanın olduğu dış katmanlarda ve yüzeyde birikir. Kururken kristalleşme ve ıslanma sırasında ozmos nedeniyle iç basınç ve şişme etkisi oluşabilir. Bu nedenle sürekli kuruma etkisinde kalmış betonun büzülmesi IKÇ görmüş betonunkinden büyük olabilir; hatta IKÇ gören betonda, toplam su içerikleri aynı olsa dahi, büzülme değil şişme görülebilir. Özellikle doğal ortamda bir yüzeyi zeminle temasta, diğeri atmosfere açık olan kanal kaplama betonlarında, kanalda su bulunmadığı kuruma sürelerinde

zeminden gelen tuzlar özellikle kuruma etkisindeki yüzey katmanlarında birikerek tekrar ıslanma sırasında şişmeyi ve sülfat etkisinin şiddetini arttırabilir. Kuruma sırasında yüzey katmanlarına taşınan tuz ve kirecin bir bölümü ıslanma sırasında yıkanarak uzaklaşır. ıslanma kirece doygun su ile olursa yıkanma etkisi azalabilir (Köksal, Güllü ve Güner, 1996).

#### *2.4.3.1 ıslanma-Kuruma Çevrimi Hasarına Karşı Önlemler*

ıslanma-kuruma çevriminin yapının toplam yıllık maliyetine etkisini azaltmak için alınabilecek önlemler arasında: betonu yalıtarak, ıslanma-kuruma sürecini durdurmak veya şiddetini azaltmak; betonun zararlı düzeyde kurumasına meydan vermemek, kuruma süresini olabildiğince kısaltmak, örnek olarak özellikle güneşli, sıcak zamanlarda kanalı su ile dolu bulundurmak; betonu söz konusu etkiye yeterince dayanıklı ve düşük maliyetli yaparak beton yapının yıllık maliyetini en aza indirmek ve yukarıda sayılan üç önlemin uygun bir birleşimini uygulamak sayılabilir (Köksal ve diğer., 1996).

Bu önlemlerden birincisi beton yüzeyleri dayanıklı ve suya geçirimsiz plastik ve/veya bitümlü madde katmanlarıyla yalıtarak gerçekleştirilebilir. İkinci önlem, içerisinde sürekli su bulunan büyük kanallarda su seviyesinin altında kalan bölümlerde ve/veya kanalın işletme programının uygun düzenlenmesi durumunda uygulanabilir. Üçüncü önlem ise betonun şişme ve büzülmesini azaltarak ıslanma-kuruma dayanıklılığını arttırıcı çoğu aktif silis içeren mineral atık madde ve/veya yan ürünlerin kullanılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür mineral katkıları kullanılarak niteliklerinin uygun olması halinde çimento hamuru ve beton yapısının homojen, agrega çimento hamuru bağ dayanımının yüksek, boşluk sayısının ve geçirimsizliğin az olması yoluyla dayanım ve dayanıklılığı veya performansı yeterli beton elde edilebilmektedir (Köksal ve diğer., 1996).

Mühendislik yapılarının amaçlanan işlevlerini olabildiğince düşük maliyetle yerine getirmeleri istenir. Bunun için karar ve projelendirme aşamasından başlayıp yapım ve kullanım aşamalarında da yapının ve bulunduğu yerin özellik ve her türlü

kaynaklarına en uygun seçeneklerin veya seçenek birleşimlerinin değerlendirilmesi gerekir (Köksal ve diğer., 1996).

## 2.5 Sülfat Etkisi

Yeraltı sularında, bazı killi topraklarda ve cüruflla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarlarda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilmektedir (Şekil 2.7). Sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, betonun genişip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki, “sülfat saldırısı” olarak adlandırılmaktadır. Sülfat saldırısına maruz kalan betonların yüzeyi, karakteristik olarak, beyazımsı bir görünüm almaktadır. Sülfatların yıpratıcı etkisi, genel olarak, beton blokların kenarından ve köşelerinden başlamaktadır. Daha sonra, bu etki, betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır. Yapıların temel betonları, istinat duvarı betonları, kanal kaplama betonları ve beton borular, sülfat saldırısının çok sık rastlandığı betonlardır (Erdoğan, 2003).



Şekil 2.7 Sülfatlı bir zeminin genel görünüşü (Çiğli-İzmir)  
(Baradan ve diğer., 2002)

Su, sülfat reaksiyonlarında rol almakla kalmaz aynı zamanda bu iyonların beton içine taşınmasını sağlar. Bu bağlamda yer altı suyunu drene ederek beton yüzeylerle

temasını önlemek ve temelleri kuru tutmak reaksiyonun gelişimini engellemek için etkili bir önlemdir. Şekil 2.8’de yüksek oranda termik santral baca gazı temizleme ürünü yapay alçıtaşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), çimento (PÇ 42,5) ve uçucu kül içeren 5 cm ayrıtlı küp formundaki harç örneklerinin su içinde ve havada 84 gün bekletildikten sonraki durumları görülmektedir. Soldaki çok ağır hasarlı örnek kalıptan çıkar çıkmaz suya konulmuş, sağdaki örnek ise laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir. Şekil 5.8, reaksiyonun gelişiminin suyun varlığına bağlı olduğunu ve gerekli ortamın oluşması halinde sülfat saldırısının bağlayıcı matrisi tamamen harap edebileceğini vurgulamaktadır (Baradan ve diğer.,2002).



Şekil 2.8 Yüksek oranda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) içeren harç örneklerinin havada ve su içinde bekletilmeleri halinde 84 gün sonundaki durumları. Soldaki ağır hasarlı örnek su içinde, sağdaki örnek ise havada bekletilmiştir (Baradan ve diğer.,2002).

Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ve kalsiyumlu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır (Tosun ve diğer., 2006).

Sülfat saldırısının şiddeti, sülfat iyonu türüne ve konsantrasyonuna bağlı olduğu kadar beton üretiminde kullanılan çimento miktarına ve tipine, betonun geçirimsizliğine, kür süresine ve ortam sıcaklığına da bağlıdır.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ürününü tespit etmek suretiyle doğrudan sülfat direnci yaratan ve betondaki boşlukları doldurarak geçirimsizlik sağlayan silis dumanı, uçucu kül ile cüruf ve puzolan gibi mineral katkı maddelerinin betonda kullanımı son zamanlarda yaygınlaşmıştır. Sülfat saldırısına ilişkin gerçekleştirilen çalışmaların pek çoğunda sülfat ortamı sadece ya sodyum sülfat veya magnezyum sülfat ya da bunların kombinasyonu ile elde edilen çözeltiler ile temsil edilmiştir. Üstelik bu çözeltilerin sülfat iyonu konsantrasyonları doğal ortamlarda karşılaşılandan oldukça yüksektir. Oysa beton yapılar çoğu kez, bazı denizlerde olduğu gibi, deneysel çalışmalarda kullanılan sülfat iyonu konsantrasyonunun çok altında konsantrasyona sahip ortamlara maruz kalmaktadır (Erdoğan ve Karataş, 2003).

Bir yapıdaki betonun sülfat saldırısından zarar görüp görmediğini tam olarak anlayabilmek için deneysel yöntemlere başvurmak gerekir. Betonda yer alan boşluklar betonun basınç dayanımını düşürür. Betonda yer alan %1 boşluk oranı betonun dayanımını % 5,5 oranında düşürür. Bu sebeple, hidrasyon ürünlerinin hidrolizi veya çatlak oluşumunun basınç dayanımında düşüşe yol açması beklenebilir. Yapı yerinden alınan karot örneklerinin dayanımının, aynı betonun 28 günlük dayanımından daha düşük olması yapının yerinde hasar gördüğü anlamına gelmektedir. Bu hasar, sülfat saldırısı sonucu oluşabilir. Sülfat saldırısını tespit edebilmek için kullanılan yöntemlerden biri basınç dayanımındaki değişimi gözlemlemektir. Dayanımda değişiklik olmaması ise ortamdan herhangi bir saldırı olmadığını gösterir. Sülfat saldırısı söz konusu olduğunda, basınç dayanımındaki artış (erken yaşlar hariç) mantıksızdır. Sülfat etkisindeki laboratuvar örnekleri genellikle gerilme altında olmayan örneklerdir ve deneyler bunlarla yapılmaktadır. Oysa yapı yerindeki beton örneklerinde gerilme ile sülfat saldırısı birlikte etkilenebilir. Gerilmeye maruz beton örneklerinin sonuçları sülfat saldırısına uğrayan betonda kalıcılığın, yapı yerindeki gerilme seviyesine bağlı olduğunu göstermektedir. Laboratuvar örneklerinin gerilme-dayanım oranı genellikle pratikteki örneklerden daha yüksektir (Neville, 2004).

### 2.5.1 Sülfat Saldırısı Karşısında Betonda Yer Alan Reaksiyonların Mekanizması

Portland çimentosu klinkerinin küçük bir miktar alçıtaşı ile öğütülmesi sonucunda elde edilen portland çimentosunda,  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  ve  $C_4AF$  gibi anabileşenler yer almaktadır. Çimento ve suyun birleşmesiyle, bu anabileşenler su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve değişik hidratasyon ürünlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Çimentodaki  $C_2S$  ve  $C_3S$  anabileşenlerinin hidratasyonu, çimento hamuruna bağlayıcılık sağlayan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin yanı sıra, kalsiyum hidroksit (CH) oluşmasına yol açmaktadır.  $C_4AF$  ve özellikle  $C_3A$  ile çimento içerisinde yer alan alçının ve suyun arasındaki reaksiyonlar ise, etrenjit  $(C_6A\bar{S}_3H_{32})$ , ve kalsiyum-alümino-monosülfohidrat  $(C_4A\bar{S}H_{12})$  gibi ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Özetle, çimento ve su arasındaki reaksiyonlar sonucunda, çimento hamurunun yapısında yer alan başlıca hidratasyon ürünleri, C-S-H, CH ve kalsiyum-alümino-sülfohidratlardır (Erdoğan, 2003).

Hem  $C_4A\bar{S}H_{12}$ , hem de  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ , çimento hamurunun genişmesine yol açmaktadır. Özellikle,  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ , çok büyük genişleme yaratma kapasitesine sahiptir (Erdoğan, 2003).

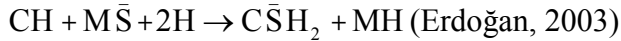
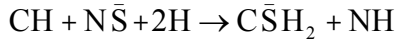
Sülfat etkisine bağlı olarak betonun yıpranması, donatı korozyonundan sonra ikinci sırada öneme sahip kalıcılık sorununu teşkil etmektedir. Bu tip yıpranma çoğunlukla deniz suyuna ve/veya sülfat içeren yeraltı sularına maruz beton yapılarda dikkat çekmektedir. Sülfatlar bu ortamlarda sodyum sülfat ( $Na_2SO_4$ ), magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ ) ve kalsiyum sülfat ( $CaSO_4$ ) bileşiminde bulunurlar. Bu tuzların çözünürlükleri oldukça yüksek olup konsantrasyonları 1000 ppm eşik değerini aşması halinde kalıcılık açısından beton için zarar teşkil ettikleri iddia edilmektedir. Yıpranma mekanizması hidrate olmuş çimento hamuru ile sülfat iyonları arasında meydana gelen kimyasal etkileşime endeksli olup zamana bağlı karmaşık bir olaydır. Sülfat saldırısının zamana bağlı bir olay olarak nitelendirilmesinin nedeni sülfat

iyonlarının beton içine difüzyonunun nispeten düşük hızlarda gerçekleşmesine atfedilmektedir. (Erdoğan ve Karataş, 2003)

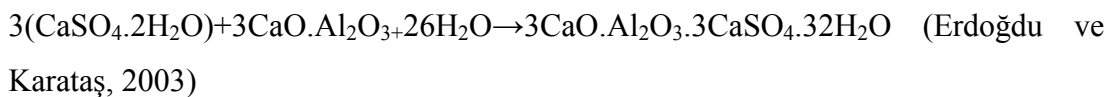
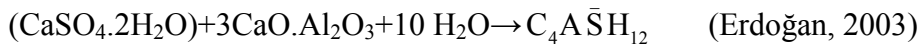
Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) veya magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) gibi sülfatlar bulunduğu takdirde, betonda iki aşamalı reaksiyonların yer almasına neden olmaktadır. Bunlar,

(1) Sertleşmiş betonun bünyesinde hidratasyon ürünü olarak yer almakta olan kalsiyum hidroksit ile sülfatlar arasındaki reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı oluşmasına yol açan reaksiyonlar,

(Aşağıdaki formüllerdeki  $\text{CH}$ ,  $\text{N}\bar{\text{S}}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ,  $\text{M}\bar{\text{S}}$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{MH}$ ,  $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$  ve  $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ , sırasıyla, kalsiyum hidroksitin, sodyum sülfatın, suyun, alçıtaşının, magnezyum sülfatın, sodyum hidroksitin, magnezyum hidroksitin, kalsiyum-alümino-monosülfhidratın ve etrenjitin çimento kimyasındaki sembollerle gösterilmiş halidir.)



(2) Alçıtaşının kendisinin yarattığı hacim artışına ilaveten asıl önemli etkisi  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ile doğrudan reaksiyona girerek sülfat içeriği bakımından zengin ancak çözünürlüğü olmayan bir yapı gösteren etrenjit oluşumuna neden olmasıyla ortaya çıkar.

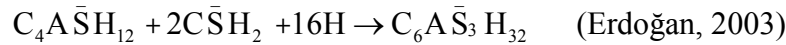


$\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$  (kalsiyum-alümino monosülfhidrat) ürünü, bünyesine 12 molekül su olarak oluşmaktadır. Bu kristalin oluşması, çimento hamurunun içerisinde bir miktar genişmeye yol açmaktadır. Plaka şekline sahip (tipik boyutu  $1 \times 1 \times 0,1 \mu\text{m}$  olan) bu



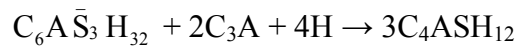
kristaller yarı-kararlı özelliktedir. Yani, daha fazla sülfatın bulunduğu ortamda  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  durumuna dönüşebilmektedirler (Erdoğan, 2003).

Sertleşmiş çimentonun bünyesinde bulunan yarı-kararlı yapıdaki  $C_4A\bar{S}H_{12}$  ile sülfat etkisiyle oluşmuş olan alçıtaşı arasındaki reaksiyonlar sonucunda  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  oluşmasına yol açan reaksiyonlar:



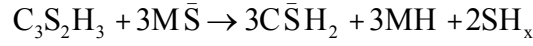
Bu şekilde meydana gelen etrenjit, bünyesinde mevcut yüksek oranda su nedeniyle çimento hamurunun genişmesine ve dolayısıyla betonun çatlamasına neden olur. Öte yandan alçıtaşı, sertleşmiş betonda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli civarında birikmesi sonucu sülfat iyonlarının çimento hamuruna nüfuz etmesini kolaylaştırmakta ve çimento hamurunun zayıflamasına neden olmaktadır. Bu nedenle,  $C_3A$  bakımından zayıf çimentoların  $C_3S$  miktarlarının fazla olması durumunda açığa çıkan  $Ca(OH)_2$  miktarı fazla olacağı için sülfat saldırısı etkin olmaktadır. Bu durumda etkileşim genişmeyi takiben çatlama biçiminde değil, kısmen çimento hamurunun yumuşaması sonucu rijitlik kaybı şeklinde oluşmaktadır. Bu bakımdan, sülfatların yoğun olarak bulunduğu ortamlara maruz betonların üretiminde  $C_3A$  miktarı düşük çimento kullanımı tek başına çözüm olmayabilir, aynı zamanda çimentonun  $C_3S$  miktarının da düşük olması gerekir (Erdoğan ve Karataş, 2003).

Ortamdaki alçıtaşı tükendiğinde sistemdeki  $C_3A$  henüz tükenmemişse, kalan  $C_3A$  etrenjitle reaksiyona girerek tekrar aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi monosülfata dönüşür (Aytaç, 2006; Ramachandran, 1995).



### 2.5.2 Sodyum Sülfatın ve Magnezyum Sülfatın Etkilerinin Karşılaştırılması

Yukarıda anlatıldığı gibi, hem sodyum sülfat, hem de magnezyum sülfat, betonun içerisinde alçıtaşı oluşmasına ve yarı-kararlı durumdaki  $C_4A\bar{S}H_{12}$  ürünlerinin etrenjit durumuna gelmesine yol açmaktadırlar. Ancak, magnezyum sülfatın beton içerisindeki reaksiyonları alçıtaşının oluşmasına yol açan reaksiyonlarla sınırlı değildir. Magnezyum sülfat, çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlayan kalsiyum-silika-hidrat ( $C_3S_2H_3$ ) jelleri ile de reaksiyona girmekte, bu jellerin bir miktarının çözünmesine neden olmaktadır:



Bu reaksiyon sonucunda oluşan  $SH_x$  (silis jeli), magnezyum hidroksit (MH) ile oldukça yavaş bir reaksiyona girerek bağlayıcılık değeri olmayan kristal magnezyum silikat oluşmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Özetlenecek olursa, betonun içerisine sızan sularda bulunan magnezyum sülfat, sodyum sülfat gibi genleşme yaratmakta ve ayrıca betondaki çimentonun bağlayıcılık değerini azaltabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Öte yandan, magnezyum sülfatın neden olduğu reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünlerin hacmi sodyum sülfatın reaksiyonu sonucu oluşan ürünlerinkinden daha büyüktür. Ancak, magnezyum sülfatın kalsiyum hidroksitle veya kalsiyum-silika-hidrat ile yaptığı reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan magnezyum hidroksit (MH), betonun içerisindeki boşlukların içerisine yerleşmesiyle, boşluklar belirli ölçüde kapatılmakta, betonun içerisine daha fazla sülfatın sızması önlenmiş olmaktadır. O bakımdan, magnezyum sülfatın betonda yarattığı genleşme, sodyum sülfatınki kadar yıpratıcı değildir (Erdoğan, 2003).

### ***2.5.3 Suda ve Toprakta Yer Alan Sülfat Konsantrasyonunun Sülfat Saldırısının Hızına Etkisi***

Betonla teması bulunan topraktaki ve sudaki sülfat miktarı ne kadar yüksek olursa, sülfat saldırısı daha şiddetli olmakta, beton daha kısa süre içerisinde hasar görmektedir (Erdoğan, 2003). Şekil 2.9’da sülfatlı toprağın genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 2.9 Sülfatlı toprak

Sudaki sülfat konsantrasyonu, toplam  $SO_3$  veya  $SO_4$  miktarının, ağırlık olarak, bir milyonda kaç kısım oluşturduğu belirtilerek ifade edilmektedir. Atom ağırlıklarına göre,  $SO_4=SO_3 \times 1,2$ ’dir. Topraktaki sülfat miktarı, çözünebilir  $SO_3$  veya  $SO_4$ ’ün % olarak ifadesi şeklinde olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), suda veya toprakta bulunabilecek sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak, betonun sülfat saldırısına maruz kalacağı ortamları, “az etkili (yumuşak) ortam”, “etkili ortam”, “çok etkili ortam” ve “aşırı etkili ortam” olarak Tablo 2.5’te gösterildiği gibi tanımlamaktadır. Bu tabloda, değişik sülfat ortamlarında kullanılacak betonlar için önerilen maksimum su/çimento oranlarına da yer verilmektedir (Erdoğan, 2003).

Tablo 2.5 Betonun sülfat saldırısına maruz kalacağı ortamların sınıflandırılması (ACI 201)

\*ppm=part per million= bir milyon içerisindeki kısım (mg/l)

Sülfat Ortamı	Topraktaki suda çözünebilir SO <sub>4</sub> miktarı (%)	Sudaki SO <sub>4</sub> miktarı (ppm)*	Betondaki Maksimum Su/Çimento Oranı
Az Etkili	0,00–0,10	0–150	-
Etkili	0,10–0,20	150–1500	0,50
Çok Etkili	0,20–2,00	1500–10000	0,45
Aşırı Etkili	>2,00	>10000	0,45

Tablo 2.6’da, doğal zeminler ve yer altı sularından kaynaklanan kimyasal etkiler için etki sınıflarının sınır değerleri TS-EN 206-1’de görüldüğü gibi belirtilmektedir. Tablo 2.6a’da ise bu etki sınıfları tanımlanmaktadır.

Tablo 2.6 Doğal zeminler ve yer altı sularından kaynaklanan kimyasal etkiler için etki sınıflarının sınır değerleri (TS-EN 206-1)

Kimyasal özellik	Referans deney metodu	XA1	XA2	XA3
En büyük su/çimento oranı		0,55	0,50	0,45
Yeraltı suyu				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	EN 196-2	≥200 ve ≤600	>600 ve ≤ 3000	> 3000 ve ≤ 6000
Zemin				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg <sup>a</sup> (toplam)	EN 196-2 <sup>b</sup>	≥ 2000 ve ≤ 3000 <sup>c</sup>	> 3000 <sup>c</sup> ve ≤ 12000	> 12000 ve ≤ 24000
a Geçirgenliği (permeabilitesi) 10 <sup>-5</sup> m/s'den daha düşük olan kil zeminler bir aşağı sınıfa geçirilebilirler.				
b Deney metodunda, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 'ün hidroklorik asitle ekstraksiyonu tarif edilmiştir; Alternatif olarak, betonun kullanılacağı yerde yapılıyorsa, su ile açığa çıkarma metodu da kullanılabilir.				
c Islanma kuruma döngüleri veya kapiler emme nedeniyle, betonda sülfat iyonu birikimi tehlikesi olan yerlerde 3000 mg/kg olan sınır 2000 mg/kg'a indirilir.				
XA2 ve XA3 etki sınıfında baskın etkinin SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 'den kaynaklanması halinde sülfatlara dayanıklı çimento kullanılması zorunludur. Sülfatlara dayanıklılık bakımından çimentonun sınıflandırılması halinde orta ve yüksek dayanıklı olarak sınıflandırılan çimento XA2 etki sınıfında (uygulanabiliyorsa XA1 etki sınıfında) ve yüksek dayanıklı çimento ise XA3 etki sınıfında kullanılmalıdır.				

Tablo 2.6a Etki sınıfları (TS EN 206-1)

XA 1	Tablo 2.6'ya göre az zararlı kimyasal ortam
XA 2	Tablo 2.6'ya göre orta zararlı kimyasal ortam
XA 3	Tablo 2.6'ya göre çok zararlı kimyasal ortam

#### **2.5.4 Sülfat Saldırısını Azaltıcı Önlemler**

Sülfat saldırısını azaltabilmek için alınacak önlemler şunlardır:

- (1) Beton, mümkün olabildiği kadar “geçirimsiz” olarak üretilmeli,
- (2) Beton üretiminde, uygun türde bir çimento ve/veya puzolanik özellikli mineral katkı maddesi kullanılmalıdır (Erdoğan, 2003).

Sülfat saldırısını azaltan önlemler olarak sıralananlar, deniz suyunun etkisini azaltmak için de geçerlidir. Deniz suyunun etkisine maruz kalacak betonların üretiminde kullanılan su/çimento oranı 0,45'i geçmemelidir. Şayet, eşiklerde, denizliklerde ve kaldırım betonlarında olduğu gibi beton kesiti ince ise veya betonarme betonlarındaki donatının pas payı 2,5 cm'den az ise, su/çimento oranı 0,40'tan yüksek olmamalıdır (Erdoğan, 2003).

##### **2.5.4.1 Betonun “Geçirimsiz” Olmasının Etkisi**

Topraktaki ve yeraltı sularındaki sülfatlar, betonun içerisine sızan sularla birlikte girmektedir. O nedenle, betonun geçirimsizliğinin az olması, betona girecek sülfat miktarının az olmasını sağlamaktadır (Erdoğan, 2003).

Tablo 2.5'ten de görülebileceği gibi, sülfat konsantrasyonu yüksek olan ortamlarda kullanılacak betonların üretiminde, su/çimento oranı 0,45'ten daha fazla olmamalıdır (Erdoğan, 2003).

#### 2.5.4.2 Çimento Tipinin Etkisi

2.5.4.2.1 *Portland Çimentosu ve Özellikleri.* Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür. Bu ürün su ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanır (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

Çimento üretiminde kullanılan klinkerin hammaddeleri kalkerli ve killi malzemelerdir. Kalker ( $\text{CaCO}_3$ ), yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ( $900^\circ\text{C}$ ), sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) ve karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) olarak ayrışır. Kalkerli malzemeleri çoğunlukla saf olarak bulmak mümkün olmayabilir. Çok büyük miktarı  $\text{CaCO}_3$ 'den oluşan kalkerin içerisinde bir miktar da magnezyum karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) bulunabilmektedir.  $\text{MgCO}_3$ , yüksek sıcaklık etkisinde  $\text{MgO}$  ve  $\text{CO}_2$  olarak ayrışır (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

Killi malzemeler ise esas olarak silika ve alümin'den oluşmaktadır. Kil yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve alümin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) olarak ayrışır. Killerde çok küçük miktarlarda demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve başka yabancı maddeler de bulunabilmektedir (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003)

Pişirilme işlemine tabi tutulacak hammadde karışımında uygun oranlarda  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi oksitlerin yer almış olması gerekmektedir. Hammadde karışımının döner fırınlarda pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını oluşturan ana bileşenler Tablo 2.7'de gösterilmiştir. Çimentonun yapısını oluşturan ana bileşenler klinkerdeki bileşenlerin aynısıdır (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

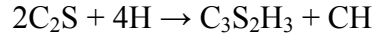
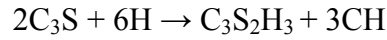
Tablo 2.7 Çimentonun ana bileşenleri (Erdoğan, 2003)

Ana bileşenler	Çimento kimyasına göre sembolü
Dikalsiyum silikat, 2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Trikalsiyum silikat, 3CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Trikalsiyum alüminat, 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Tetrakalsiyum alüminoferrit, 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Çimento ve su birleştiği anda her ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte (hidratasyon) ve bu reaksiyonlar etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Aşağıda çimentonun ana bileşenleri ile ilgili kısaca bilgi verilmiştir (Aytaç,2006).

➤ C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S

C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S'in su ile yaptığı reaksiyonlar aşağıdaki denklemlerle gösterilmektedir:



Bu denklemlerde "H" suyu (H<sub>2</sub>O); "CH" ise sönmüş kireci (Ca(OH)<sub>2</sub>) simgelemektedir. "C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>", "tobermorit" olarak adlandırılmaktadır ve sistemdeki asıl bağlayıcılık özelliği bu ürün tarafından sağlanır. Gerek C<sub>3</sub>S, gerekse C<sub>2</sub>S'nin hidratasyonu sonucu oluşan ürünlerin türü aynıdır (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

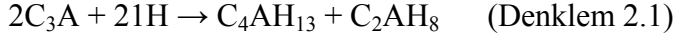
➤ C<sub>3</sub>A

Portland çimentosundaki C<sub>3</sub>A miktarı ortalama olarak %4–11 arasında değişir. C<sub>3</sub>A, hidratasyonun ilk zamanlarındaki reaksiyonları önemli ölçüde etkiler (Aytaç, 2006; Ramachandran, 1995).

C<sub>3</sub>A'nın suyla reaksiyona girmesiyle birlikte termodinamik açıdan kararsız, hegzagonal yapıdaki C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> ve C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> oluşur (Denklem 2.1). Bunlar kısa süre sonra, kararlı kübik yapıdaki C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>'ya dönüşür (Denklem 2.2). Bu yapı 80°C ve

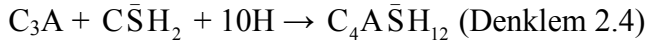


üzerindeki sıcaklıklarda doğrudan C<sub>3</sub>A'nın hidrate olmasıyla da oluşabilir (Denklem 2.3) (Aytaç, 2006; Ramachandran, 1995).



C<sub>3</sub>A'nın su ile yaptığı reaksiyonlar çok hızlı gerçekleştiğinden çimento hamurunun “ani priz” yapmasına sebep olur. Ani priz sonucunda çimento hamuru derhal katılaşma gösterdiği gibi, önemli sayılabilecek bir dayanım da kazanmaz (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

Çimentonun ani prizini kontrol altına alabilmek amacıyla klinkere bir miktar (%3–6) alçıtaşı (C $\bar{S}$ H<sub>2</sub>) katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. C<sub>3</sub>A, alçıtaşı ve suyun reaksiyonu Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'te verilmiştir.



C<sub>3</sub>A, çimento içerisinde farklı polimorfik formlarda bulunabilir. Regourd (1978), C<sub>3</sub>A'nın içerisinde hapsolmuş bulunan Na<sup>+</sup> iyonlarının %2,4'den az olması halinde kübik, %2,4–5,3 arasında bulunması halinde ortorombik, %5,3'den fazla olması halinde ise monoklinik yapının oluştuğunu söylemiştir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006). C<sub>3</sub>A'nın içerisinde hapsolmuş olan Na<sup>+</sup> iyonlarının miktarı, fırındaki Na<sup>+</sup> / SO<sub>3</sub><sup>-</sup> dengesine bağlıdır. Grzeszczyk (1994) ve Miller ve Tang (1996), özellikle sülfür açısından zengin olan yakıt kullanıldığında, ortamda aşırı miktarda bulunan SO<sub>3</sub>'ün hızlı bir şekilde alkalilerle reaksiyona girerek ilk alkali sülfatları oluşturduğunu söylemiştir. Bu durumda, C<sub>3</sub>A'nın içerisine girme eğiliminde olan Na<sup>+</sup> iyonları azaldığından, C<sub>3</sub>A kübik formda kristalleşir. Bu durumun tam aksine, eğer alkali miktarı SO<sub>3</sub> miktarından fazla ise, çok sayıdaki Na<sup>+</sup> iyonları C<sub>3</sub>A'nın içerisine girer ve C<sub>3</sub>A ortorombik formda kristalleşir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Ticari çimentolardaki  $C_3A$ , genel olarak kübik ve ortorombik yapının karışımı olarak bulunmaktadır.  $C_3A$ 'nın kristal yapısı, süperakışkanlaştırıcının varlığında, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda reolojik açıdan büyük önem taşımaktadır (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006). Kübik formda olan  $C_3A$ , sülfat iyonlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakası sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylece, çimento hidrasyonunun durgunluk devresinde çok fazla kıvam kaybı gerçekleşmeden betonun taşınması ve yerleşmesi mümkün olur. Ortorombik yapıda olan  $C_3A$  ise, kübik forma göre biraz daha yavaş bir tepkime gösterir ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna neden olur. Ancak bu etrenjit yapısı kübik formdaki durumun aksine sıkı bir tabaka değil, gevşek bir ağ şeklinde kendini gösterir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Odler ve Wonnemann (1983),  $SO_3$ 'ün yokluğunda,  $Na_2O$  ve  $K_2O$ 'nun klinkerdeki  $C_3A$  fazının içine girerek yapısını değiştirdiğini (kübik formdan ortorombik yapıya dönüştürdüğünü) söylemiştir.  $C_3A$ 'nın içine  $Na_2O$ 'nun girmesi durumunda hidrasyonun yavaşladığı,  $K_2O$  girmesi durumunda ise hızlandığı belirtilmiştir (Aytaç, 2006).

#### ➤ $C_4AF$

$C_4AF$  bileşenin hidrasyonu,  $C_3A$ 'nın hidrasyonuna benzemektedir.  $C_3A$ 'nın hidrasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum alümina sülfhidrat ürünleri,  $C_4(A,F)SH_{12}$  ve  $C_6(A,F)S_3H_{32}$  kompozisyonuna sahip olmaktadır (Aytaç, 2006; Erdoğan, 2003).

Genel olarak,  $C_3A$  ve göreceli olarak daha az öneme sahip  $C_4AF$  miktarı, çimento inceliği ve sülfatların çözünebilirliği gibi faktörler, düşük s/ç oranına sahip yüksek performanslı betonların reolojik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olarak bilinmektedir (Aytaç, 2006; Tagnit-Hamou ve Aİtcin, 1993). Bu faktörler ve bunların dışında uyumu etkileyen çimento kaynaklı diğer unsurlar, aşağıda ana hatlarıyla özetlenmiştir (Aytaç, 2006).

2.5.4.2.2 *Kimyasal Kompozisyon*. Piyasada üretilen çimentolardaki  $C_3A$ , genel olarak kübik ve ortorombik yapının karışımı olarak bulunmaktadır. Kübik yapı ortorombik yapıya göre daha reaktiftir.  $C_3A$ 'nın kristal yapısı, süperakışkanlaştırıcının (SA) varlığında, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda reolojik açıdan büyük önem taşımaktadır (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006). Kübik formda olan  $C_3A$ , sülfat iyonlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve üzerinde oluşan etrenjit tabakası sonraki hidrasyon sürecini yavaşlatır. Böylece, çimento hidrasyonunun durgunluk devresinde çok fazla kıvam kaybı gerçekleşmeden betonun taşınması ve yerleşmesi mümkün olur. Ortorombik yapıda olan  $C_3A$  ise, kübik forma göre biraz daha yavaş bir tepkime gösterir ve sürekli devam eden iğne şekilli etrenjit oluşumuna neden olur (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Kübik  $C_3A$  yapısı, ortorombik yapıya göre daha reaktif olmasına rağmen, özellikle SA varlığında kübik yapının  $SO_4^{2-}$  iyonlarıyla olan reaksiyonu daha iyi kontrol edilir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006). Vernet ve Noworyta (1992), çimentodaki kübik  $C_3A$  yapısının fazla olması durumunda, reolojik özelliklerin daha kolay kontrol edilebileceğini söylemiştir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Genel olarak  $C_3A$  içeriğinin az olması, reoloji açısından istenen bir durumdur. Yüksek performanslı beton üretiminde  $C_3A$ 'nın olabildiğince az ve mümkünse kübik yapıda olması istenir.  $C_3A$  saf kübik yapıda değilse, en azından kübik yapının baskın olduğu kübik-ortorombik karışımı bir yapıya sahip çimento tercih edilmelidir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Sarkar ve Aimin (1992), kübik ve ortorombik yapının etrenjit gelişimine etkisini incelemiştir. SA'nın yokluğunda hidrasyonun 5. dakikasında kübik formdaki  $C_3A$  iğne şekilli etrenjit oluşumuna yol açarken, ortorombik yapıdaki etrenjit, uzun plaklar halinde oluşmuştur. 20. dakikada ise bu plakların yerini iğne şekilli etrenjit almıştır. SA'nın varlığında ise 25. dakikada kübik formdaki  $C_3A$ , etrenjite benzeyen çok çok kısa liflerden oluşan bir yapının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Araştırmacılar bu yapının reaksiyonları geciktirdiğini söylemiştir. (Ramachandran, 1995; Aytaç, 2006).

Çimento içerisinde hızlı reaksiyon gösteren ve önemli miktarda suyu tüketen iki faz, öğütme esnasında alçıtaşının su kaybı ile oluşan hemihidrat fazı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ve ara fazlardır ( $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$ ) (Aytaç, 2006; Tagnit-Hamou ve Aïtcin, 1993).

*2.5.4.2.3 İncelik.* SA katılarak hazırlanmış çimento hamurunun viskozitesi çimentonun inceliğine de bağlıdır. Yüksek inceliğe sahip olan çimentolarda yüksek viskozite gözlenir. Nawa ve Eguchi (1992) yaptıkları çalışmada, 11 mikrometreden küçük tane boyutuyla viskozite arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur (Aytaç, 2006; Ramachandran, 1995).

Bonen ve Sarkar (1995), göreceli olarak düşük  $\text{C}_3\text{A}$  içeriği ve inceliğe sahip çimentoların daha iyi akışkanlık özelliği gösterdiğini söylemiştir (Aytaç, 2006; Griesser, 2002). Bununla birlikte inceliğin reolojik özellikler üzerindeki etkisi her zaman aynı şekilde ortaya çıkmayabilir. Çimentonun inceliği reaktiviteyi arttırmasına rağmen, çimento taneleri iyi bir tane dağılımına sahipse akışkanlıkta artış meydana gelebilir. Bu durum, boşluk doldurma etkisi sayesinde su ihtiyacının azalmasına bağlanmıştır (Aytaç, 2006; Griesser, 2002).

Çimento tanelerinin küreselliğinin, akışkanlık üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada araştırmacılar, göreceli olarak küresel forma daha yakın tanelere sahip çimentoyla hazırladıkları beton karışımlarında, sabit bir akışkanlık seviyesinde, kontrol karışımına göre %33 oranda daha az akışkanlaştırıcı katkı kullanmışlardır. Bu durum ise, göreceli olarak daha küresel tanelerden oluşan çimentonun, küresel form nedeniyle daha düşük yüzey alanına sahip taneler içermesi dolayısıyla daha az katkı gerektirmesi şeklinde açıklanmıştır (Aytaç, 2006; Tanaka ve diğer., 1998).

*2.5.4.2.4 Kalsiyum Sülfatın Miktarı ve Formu.* Karışımın viskozitesi, üretim esnasında çimentoya eklenen sülfatın tipine de bağlıdır. Sülfatlar dehidrat (alçıtaşı- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hemihidrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ya da anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ) formunda olabilir (Aytaç, 2006; Ramachandran, 1995).

Mork (1994) ve Dodson ve Hayden (1989), klinker ve alçıtaşının öğütülmesi esnasında bağül olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların, “alçıtaşı/hemihidrat” ya da “alçıtaşı/çözülebilir anhidrit” oranlarının azalmasına neden olduğunu söylemiştir. Bu oranlardaki azalışın mertebesini etkileyen faktörler de genel olarak kullanılan alçıtaşının kalitesi ve üretimden sonraki saklama ve nakliye koşullarıdır. Hemihidrat ve çözünebilir anhidritin çözünebilirliği, alçıtaşına göre yaklaşık 3 kat daha fazla olduğu için, söz konusu oranlarda kontrolsüz meydana gelen değişimler, kimyasal reaksiyonlarda da kontrolsüz değişiklikler yaratmakta, bu da taze betonun işlenebilir özelliklerini etkileyebilmektedir (Aytaç, 2006; Mork ve Gjoerv, 1997).

Göreceli olarak yüksek su/bağlayıcı oranına sahip ( $s/b > 0,50$ ) karışımların reolojik özellikleri kalsiyum sülfatın türünden çok fazla etkilenmez. Ancak bu durum, düşük  $s/b$  oranına sahip karışımlar için geçerli değildir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Claisse ve diğer. (2001), 14 farklı yöreye ait çimento ve 3 farklı kökendeki SA ile hazırladıkları hamur örnekleri üzerinde yaptıkları çalışmalar neticesinde, sülfat morfolojisinin (alçıtaşı, hemihidrat ve anhidritin bağül miktarlarının) işlenebilir özelliği üzerinde çok fazla etkisinin olmadığını, özgül yüzey alanının etkisinin ise oldukça önemli olduğunu öne sürmüştür. Buna karşın hemihidrat miktarının sadece akışkanlaştırıcı katkının kullanılmaması durumunda önem kazanacağı belirtilmiştir. Araştırmacılar literatürde verilen bilgilere paralel olarak, alüminat fazlarının oldukça etkili olduğunu ve genel olarak alümin içeriğinin azalmasıyla işlenebilmenin arttığını belirtmiştir (Aytaç, 2006).

Greszczyk ve Kucharska (1991), yüksek reaktivitede klinker (ortorombik morfolojiye sahip  $C_3A$  ve yüksek alkali miktarı) kullanarak yaptıkları çalışmada,  $C_3A$  ve alkali içeriğinin artmasıyla kayma gerilmesi değerlerinin arttığını öne sürmüşler, bunu da, alkalilerin  $C_3A$ 'nın reaktivitesini artırmış olması sebebiyle, prizi kontrol etmek amacıyla kullanılan alçıtaşının etkinliğinin azalmasına bağlamışlardır (Aytaç, 2006; Claisse ve diğer., 2001).

2.5.4.2.5 *Alkali Etkisi*. Alkalilerin işlenebilirlik üzerindeki etkilerine yönelik olarak yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Jawed ve Skalny (1978) tarafından yapılan araştırma, SA kullanılmadığı takdirde, yüksek oranda alkali içeren çimentoların genellikle daha kötü reolojik davranış sergilediğini göstermiştir (Aytaç, 2006).

Locher (1982), çözeltideki alkali içeriğinin artmasıyla  $C_3A$ 'nın çözünübilirliğinin ve dolayısıyla etrenjit oluşumunun arttığını bildirmiştir (Aytaç, 2006; Griesser, 2002).

Jiang ve diğer. (1999), süperakışkanlaştırıcı katkı ile üretilmiş çimento hamurlarının akışkanlığını ve akışkanlık kaybını kontrol eden ana parametrenin, çözelti içerisine ilk zamanlarda geçen çözünebilen alkali miktarı olduğunu bildirmiştir. Başlangıç akışkanlığını artırma ve zamanla akışkanlık kaybını azaltma bakımından optimum çözünebilen alkali içeriği, süperakışkanlaştırıcı dozajından ve çimento tipinden bağımsız olarak, %0,4-%0,5  $Na_2O$  eşdeğeri olarak bulunmuştur. Ayrıca, optimum çözünebilen alkali miktarına sahip olan çimentolarda,  $C_3A$  içeriğinin akışkanlık kaybı üzerinde pratik olarak hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür (Aytaç, 2006).

Odler ve Wonnemann (1983),  $SO_3$ 'ün yokluğunda,  $Na_2O$  ve  $K_2O$ 'nun klinkerdeki  $C_3A$  fazının içine girerek yapısını değiştirdiğini (kübik formdan ortorombik yapıya dönüştürdüğünü) söylemiştir. Ayrıca  $C_3A$ 'nın içine  $Na_2O$ 'nun girmesi durumunda hidratasyonun yavaşladığı,  $K_2O$  girmesi durumunda ise hızlandığı belirtilmiştir. Klinkerleşme sürecinde, yakıttan kaynaklanan sülfür ( $SO_3$ ) miktarına bağlı olarak, çimentodaki alkaliler, alkali sülfat ( $K_2SO_4$  ve  $Na_2SO_4 \cdot 3K_2SO_4$ ) formunda olabilir ya da  $C_3A$  ve  $C_2S$ 'in içinde hapsolmuş olarak bulunabilir. "Sülfür/toplam alkali" değeri, klinkerdeki toplam alkali sülfat miktarını gösterir. Klinker göreceli olarak yüksek miktarda  $SO_3$  içeriyorsa, alkalilerin büyük çoğunluğu birkaç dakika içerisinde çözeltiye geçer. Düşük  $SO_3$  içeren klinkerlerde ise  $Na_2O$  ve  $K_2O$ ,  $C_3A$  ve  $C_2S$  fazlarının içine girer. Dolayısıyla benzer  $SO_3$  ve alkali miktarına sahip çimentolarda çözünebilen alkali miktarı değişebilmektedir (Aytaç, 2006; Jiang ve diğer., 1999).

Portland çimentosu üretiminde, sülfür ve alkali arasındaki oran genel olarak klinkerin sülfürizasyon derecesi olarak ifade edilir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

$$\text{Sülfürizasyon derecesi} = \frac{\text{SO}_3 * 100}{1,292\text{Na}_2\text{O} + 0,85\text{K}_2\text{O}}$$

Sülfürizasyon derecesi C<sub>3</sub>A'nın reaktivitesini ve oluşan etrenjitin tipini ve miktarını kontrol ettiği için, klinkerdeki önemli bir karakteristik olarak bilinir (Aİtcin, 2004; Aytaç, 2006).

Tagnit-Hamou ve diğ. (1992), Marsh hunisi deneyi ile yaptıkları bir çalışmada, klinkerin sülfürizasyon derecesinin çimento hamurunun reolojisini etkilediğini söylemiş; sülfürizasyon derecesindeki artışın akışkanlık kaybını azalttığını ortaya koymuştur (Aytaç, 2006; Tagnit-Hamou ve Aİtcin, 1993).

Çimentodaki C<sub>2</sub>S anabileşenin hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit miktarı C<sub>3</sub>S miktarından daha az olduğuna göre, C<sub>2</sub>S miktarı nispeten yüksek olan çimentoların kullanılması, bu çimentoların hidrasyonu sonucunda daha az kalsiyum hidroksit meydana gelmesine yol açmaktadır. ASTM Tip II (Normal Portland çimentosuna göre daha az hidrasyonu ısısına ve daha çok sülfat dayanıklılığına sahip Portland çimentosu), Tip IV (Düşük ısı Portland çimentosu) ve Tip V (Sülfata dayanıklı Portland çimentosu) çimentolarda, nispeten daha fazla C<sub>2</sub>S bulunmaktadır. Böylece, sülfat saldırısı etkisiyle, daha az miktarda alçıtaşı oluşabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Bilindiği gibi, portland-puzolan tipi çimentolar, çimento üretimi esnasında klinkerle birlikte bir miktar puzolanın da öğütülmesi sonucunda elde edilmektedir. Bu tip çimentoların içerisindeki puzolanlar, bağlayıcılık kazanabilmek için, çimentodaki kalsiyum-silikatlı anabileşenlerin hidrasyonu sonucunda oluşmuş olan kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek yeni kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri üretmektedirler. Böylece, portland-puzolan tipi çimentolarla yapılan betonların içerisinde, puzolan içermeyen çimentolarla yapılan betonun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksitten daha az kalsiyum hidroksit bulunmaktadır. Portland-

puzolan tipi çimentolarla yapılan betonların içerisinde, sonradan sülfat saldırısı ile alçıtaşı oluşması ve genişlemelere yol açan reaksiyonlara devam etmesi imkânı daha düşüktür. (ASTM IP, IS ve Türk çimentolarından katkılı çimento CEM II/A-P 32,5, Portland puzolanlı çimento CEM II/B-P 32,5 R, yüksek fırın cürüflü çimento CEM III/A 32,5 R VE CEM III/A 42,5 R bu tip çimentolardır (Erdoğan, 2003).

Daha önce bahsedildiği gibi, dışarıdan sızan sülfatların betonun içerisinde oluşturduğu alçıtaşı, çimento hamurunun içerisindeki yarı-kararlı durumda mevcut olan kalsiyum-alümina-monosülfohidrat  $C_4A\bar{S}H_{12}$  ile reaksiyona girerek çok büyük genişleme gösteren etrenjit  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  oluşmasına yol açmaktadır. Normal olarak, çimento hamurunun içerisindeki kalsiyum-alümina-sülfohidratlar, çimento anabileşenlerinden  $C_3A$  ile çimentodaki alçıtaşının su ile reaksiyonu sonucunda ortaya çıkmaktadırlar. Çimentonun içerisindeki  $C_3A$  oranı düşük olduğu takdirde, doğal olarak, hidratasyon sonucunda oluşan etrenjit ve kalsiyum-alümina-monosülfohidrat miktarı da az olacaktır. Bir başka deyişle, bu tür bir çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum-alümina-sülfohidrat oranı azdır; dolayısı ile sülfat saldırısı etkisiyle daha az miktarda etrenjit oluşmaktadır. O nedenle, sülfata dayanıklı beton üretiminde,  $C_3A$  miktarı düşük olan çimentolar kullanılmaktadır (ASTM Tip V ve ASTM Tip II'deki maksimum  $C_3A$  miktarı, sırasıyla %5 ve %8 olarak sınırlandırılmıştır.) (Erdoğan, 2003).

#### *2.5.4.3 İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Etkisi*

Öğütülmüş tras, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi, puzolanik katkı maddeleriyle üretilen betonlar, sadece portland çimentosu ile üretilmiş betonlara göre, genel olarak daha az miktarda portland çimentosu içermektedirler. Bir başka deyişle, puzolan katkılı betonlarda, sülfat reaksiyonuna yol açabilecek  $C_3A$  miktarı daha azdır (Erdoğan, 2003).

Ayrıca, puzolan katkılı betonlardaki hidratasyon, önce, portland çimentosu ile su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyon gösterebilmeleri  $C_3S$  ve  $C_2S$



anabileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Yani, puzolan katkılı betonlarda, daha az miktarda kalsiyum hidroksit yer almaktadır. Bu da, sülfat ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon sonucunda oluşabilecek alçıtaşı miktarının az olmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

## **2.6 Puzolanların Sülfat Saldırısına Karşı Kullanımı**

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonda kullanılan çimentonun üretilmesi fazla miktarda enerji gerektirir. Bu üretim sırasında çevreye verilen zarar da göz önünde bulundurulmalıdır. 1 ton çimento üretimi sırasında yaklaşık olarak 1 ton CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkar. Betonun ana bileşenlerinden olan çimento beton maliyetinde önemli bir yer tutar. Günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirilerek hem daha ekonomik, hem de çevreye karşı daha duyarlı bir beton üretimi gündemdeki yerini korumaktadır (Şengül ve diğer., 2003).

### **2.6.1 Puzolan**

Puzolan tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanır. Bu puzolanların kullanımı yalnızca ekonomik değil, teknik olarak da büyük yararlar gösterir ve birçok beton özelliğini etkiler. (Şengül ve diğer., 2003).

Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olarak iki genel gruba ayrılmaktadır.

#### **2.6.1.1 Doğal Puzolanlar**

Doğada bulunan ve ince taneli duruma getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren silisli ve alüminli malzemelere, doğal puzolanlar denilmektedir. Volkanik camlar, volkanik tüfler,

traslar, diatomlu topraklar ve bazı killler ve şeyller doğal puzolanlardır (Erdoğan, 2003).

Volkanik kökenli malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için, çok ince taneli duruma (en az portland çimentosunun inceliğine, getirilmek üzere öğütölmeleri gerekmektedir. Öte yandan, kil, şeyl ve diatomlu toprak, önce ısıt işleme tabi tutulup (pişirilip) daha sonra ince taneli duruma getirildiklerinde (öğütöldüklerinde) puzolanik özellik kazanabilmektedirler (Erdoğan, 2003).

İnce taneli durumdaki doğal puzolanların bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım tarzları mevcuttur:

- (1) Söndürölmüş kireçle ve suyla birleştirilerek, çok eski zamanlarda olduğu gibi, doğrudan kullanılabilirler, veya
- (2) Portland-puzolan tipi çimento üretiminde, portland çimentosunun klinkeriyle birlikte öğütölerek kullanılmaktadırlar, veya
- (3) Beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

Yukarıda ilk sırada yer alan kullanım tarzı, günümüzde pek yaygın değildir. Doğal puzolanlar, genellikle, portland-puzolan tipi çimento üretiminde ve puzolan katkılı beton üretiminde kullanılmaktadırlar (Erdoğan, 2003).

*2.6.1.1.1 Volkanik Kökenli Puzolanlar.* Doğal puzolanların büyük bir bölümü volkanik kökenli malzemelerdir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma, yüzeye lav olarak çıkarak çok çabuk soğuma gösterdiği takdirde, camsı (amorfl) yapıya sahip olmaktadır. Püskürme esnasında gazların da bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamda kalsiyum iyonlarıyla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok hızlı yer alması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller, en çok kullanılan volkanik kökenli puzolanlardır (Erdoğan, 2003).

*2.6.1.1.2 Pişirilmiş Kil ve Şeyl.* Büyük miktarda silis ve alüminen oluşan kil ve şeyl mineralleri kristal yapıya sahiptirler. Doğal yapıları itibariyle puzolanik özellik göstermemektedirler. Ancak, bir-iki saat kadar 700 – 900 °C civarında sıcaklığa tabi tutulduklarında, bu malzemelerin düzenli kristal yapısı bozulmakta ve yarı amorf veya düzensiz alüminosilisi bir yapı elde edilmektedir. Böylece, puzolanik malzeme durumuna gelmektedirler (Erdoğan, 2003).

Geçmiş yıllarda, tuğlanın veya kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli malzeme, puzolanik malzeme olarak yaygın kullanım alanı bulmuştur (Erdoğan, 2003).

Killi malzemenin pişirilmesiyle elde edilen puzolanlar, ABD'de, Brezilya'da ve Hindistan'da birçok baraj inşaatında kullanılmışlardır. Daha sonraki yıllarda bu tür puzolanlar, yerlerini, daha kolay ve ekonomik olarak bulunabilen uçucu küllere bırakmışlardır (Erdoğan, 2003).

*2.6.1.1.3 Diatomlu Topraklar.* Diatomlar, silisli hücelere sahip olan mikroskobik büyüklükteki tek hücreli su bitkileridir. Diatomlu topraklarda, bu organik kalıntılardan kaynaklanan ve amorf yapıda olan büyük miktarda silis bulunabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Bazı diatomlu topraklar öğütülmeden veya öğütüldükten sonra puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu tür toprakların 760 – 1000 °C sıcaklığa kadar pişirildikten sonra ince taneli duruma getirilmeleri, puzolanik aktivitelerini artırmaktadır (Erdoğan, 2003).

### ***2.6.1.2 Yapay Puzolanlar***

Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu yapay puzolanlardır (Erdoğan, 2003).

*2.6.1.2.1 Uçucu Kül.* Uçucu kül termik santrallerde kömürün yakılması sonucu, bacalardan çıkan külün toplanması ile elde edilen bir atık malzemedir. Taneler genellikle küresel olup çapları 1 ile 150 µm arasında değişir. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve özellikleri kullanılan kömürün yapısı ve bileşimine ve külün oluştuğu yakılma işlemine bağlı olarak değişir. Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. Uçucu küller F tipi ve C tipi olarak sınıflandırılabilir. Türkiye’de aktif olarak çalışan 11 adet termik santral vardır ancak bunlardan sadece bir tanesinden, yani Çatalağzı Termik Santrali’nden F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir (Şengül ve diğer., 2003).

Bugün dünyada ortaya çıkabilecek uçucu kül miktarı, yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye’de halen Afşin–Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi, ortalama 16 milyon ton (2006 yılı ortalama veri) kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir (Çavuşoğlu, 2008; TUİK, 2008; Türker ve diğer., 2007).

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılan miktara, gerekli nakliye miktarına ve istenen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidrasyon ısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar kütle betonlarında, silindire sıkıştırılabilen betonlarda, hafif beton üretiminde kullanılabilir (Şengül ve diğer., 2003).

Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. İnceliği arttırmak için uçucu kül elenebilir, hava kullanılarak iri ve ince taneler ayrılabilir veya öğütme yapılabilir. Puzolanik reaksiyon uçucu kül tanesinin yüzeyinde başlar. İncelik arttırılırsa puzolanik aktivite de artar, ayrıca; betonda en zayıf halka olan agrega-çimento hamuru arayüzeyinin özelliklerinin iyileştirilmesi için de uçucu kül inceliği önemlidir (Şengül ve diğer., 2003).

Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'tür. Bunların yanı sıra, bir miktar  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve  $\text{Na}_2\text{O}$ 'da bulunabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60-%90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbondioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1–150  $\mu\text{m}$  arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2,1–2,7 (ortalama 2,4)  $\text{g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir (Erdoğan, 2003).

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-%50'si civarında değişebilmektedir (Erdoğan, 2003).

#### ➤ *Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri*

##### *I. Beton Karışımının Su İhtiyacı:*

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı, genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %20 - 30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacında yaklaşık %7 kadar daha az su kullanıldığı

görülmüştür. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için, daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır (Erdoğan, 2003).

## *II. İşlenebilme:*

Uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır:

(1) Uçucu külün yoğunluğu, portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır (Erdoğan, 2003).

(2) Uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır (Erdoğan, 2003).

Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış ve uçucu kül taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları, taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir. Bazen, betondaki çimentonun azaltılan bölümü yerine kullanılan uçucu küle ek olarak, ince agreganın bir bölümünün yerine de uçucu kül kullanılmaktadır. Bu tür betonların pompalanabilirliği daha da artmaktadır (Erdoğan, 2003).

## *III. Priz Süresi:*

Uçucu kül katkılı betonlarda yer alan portland çimentosu miktarı, katkısız betondakine göre daha azdır. Uçucu kül katkılı betonların priz süreleri katkısız betondakinden genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir (Erdoğan, 2003).

#### IV. *Hidratasyon Isısı:*

Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından, bu tür betonların hidratasyon ısıları, katkısız betondakinden daha az olmaktadır (Erdoğan, 2003).

#### V. *Terleme:*

Beton karışımındaki ince taneli maddelerin artması, katı tanelerin yüzey alanlarının artmasına yol açmaktadır. O durumda, katı taneler, beton karışımının içerisindeki suyu kendilerine daha iyi bağlamakta, terlemeyi azaltmaktadır. İnceliği yüksek olan uçucu küllerde yapılan betonlardaki terleme, katkısız betonlarınkinden daha az olmaktadır (Erdoğan, 2003).

#### VI. *Dayanım:*

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla daha az olmaktadır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. C tipi küllerin ilk zamanlardaki dayanıma katkısı, F tipi küllerinkinden daha fazladır. Ayrıca, incelik arttıkça, ilk zamanlardaki dayanım daha yüksek olmaktadır (Erdoğan, 2003).

#### VII. *Betonun Su Geçirimsizliği:*

Uçucu kül kullanılan betonların su geçirimsizliği, katkısız betondakinden daha azdır (Erdoğan, 2003).

#### VIII. *Sülfatlara Dayanıklılık ve Alkali-Agrega Reaksiyonu:*

Uçucu küllü betonların sülfatlara dayanıklılığı, katkısız betonunkine kıyasla, daha fazladır. Bu tür betonlarda alkali-agrega reaksiyonu da daha az miktarda yer alabilmektedir. Bunun nedeni uçucu küllü betonlarda daha az miktarda portland çimentosu kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Katkısız betondakine göre daha az portland çimentosu bulunması, betonun içerisinde daha az miktarda  $C_3A$ 'nın ve alkalilerin yer almasını sağlamaktadır (Erdoğan, 2003).

## IX. *Betonun Ekonomikliği*

Uçucu küller, portland çimentosuna kıyasla, çok daha ucuz olan atık malzemelerdir. Katkısız betondakine oranla daha az portland çimentosunun yer aldığı uçucu küllü betonlar daha ekonomik olmaktadır. Ayrıca, uçucu küllü betonların işlenebilmesinin daha iyi, pompalanabilirliğinin daha kolay, yüzey düzeltilmesinin daha rahat olması, betona uygulanan işlemleri kolaylaştırmakta ve böylece ekonomikliğe olumlu katkı sağlamaktadır (Erdoğan,2003).

*2.6.1.2.2 Silis Dumanı.* Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işlemi çok büyük miktarı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO<sub>2</sub> durumuna dönüşmektedir (Erdoğan, 2003).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85- %98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir (Erdoğan, 2003).

İngilizce’de olduğu gibi Türkçe’de de bu madde için çeşitli isimler (silis dumanı, silika füme, silis tozu, mikrosilis gibi) kullanılmaktadır. Türk Standartları Enstitüsü de son çıkardığı standartlarda “silis dumanı” deyimini benimsemiştir. İlgili endüstride ise kullanılan isim “baca tozu”dur (Yeğinoğlu, 2005).

Silis dumanı, amorf yapıya sahip, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde hidrolik bağlayıcılık göstermektedir (Erdoğan, 2003).



Silis dumanı, portland çimentosu klinkeriyle ve küçük bir miktardaki alçıyla birlikte öğütülerek “silis dumanı çimento” (çimento-silika füme) üretiminde kullanılabilir. Ancak, asıl kullanımı, beton katkı maddesi tarzındadır (Erdoğan, 2003).

Silis dumanı piyasaya elde edildiği gibi, sulandırılmış olarak, sıkıştırılmış olarak veya toprak halinde sevkedilebilmektedir. Elde edildikten sonra çimento, uçucu kül gibi dökme olarak veya torbalar içinde kullanılması mümkündür. Etibank Antalya tesislerinde zaman zaman 80x80x140 cm boyutlarında bez torbalar kullanılmıştır. Çok ince taneli oluşu ve gevşek birim ağırlığının azlığı nedenleri ile taşıma, depolama ve harmanlama gibi işlemlerde özel itina ister. Ayrıca boşaltma sırasında toz halinde etrafa kolayca yayılır. Bu gibi sakıncaları önlemek için silis dumanı su ile karıştırılarak bir bulamaç halinde de piyasaya sürülebilir. Genellikle ağırlıkça %40–60 oranında suya karıştırılır ve gerekirse akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar da ilave edilir. Bulamaç halindeki silis dumanının varillerle taşınması ve betona katılması daha kolay ve ekonomik olmaktadır. Bu amaçla 200 L’lik variller veya 20 L’lik damacaneler kullanılmaktadır. Silis dumanının sıkıştırılmış hale getirilmesi için silolarda basınçlı hava ile ince tanelerin birbirlerine yapışmaları sağlanır ve daha iri taneli bir malzeme oluşturulur. Bu malzeme 25 kg veya 900 kg’lık torbalarda piyasaya sürülür. İstendiğinde toz halinde kimyasal katkılar katılır (Yeğinoğlu, 2005)

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını artırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında, ayrıca, su-azaltıcı katkı maddesi de kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

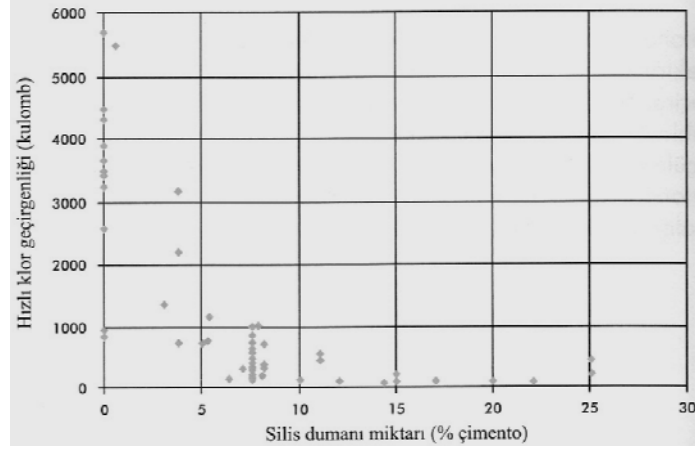
## ➤ *Silis Dumanının Betonun Dayanıklılığına Olan Etkileri*

### *I. Geçirgenlik:*

Betonun zararlı çevre etkilerine karşı dayanıklılığı büyük ölçüde geçirgenliği ile ilişkilidir. Normal betonlarda olduğu gibi silis dumanlı betonlarda da geçirgenlik bileşim, bileşenlerin özellikleri, yerleştirme koşulları ve bakım gibi faktörlere bağlıdır. Ancak, geçirgenliğin azalması bağlayıcı hidrasyonundan etkilendiğinden burada bakım metodu ve süresi daha da önem kazanmaktadır. Silis dumanı hamurlarda gözenek yapısını daha geçirimsiz hale getirmektedir. Arayüzey bölgesinin de sıkılanması sonucu silis dumanı katkılı betonlarda benzer bakım koşullarındaki normal betonlara göre geçirgenlik azalmaktadır. Bu yönden etkinlik faktörü K, basınç dayanımı için bulunan değerlerden daha fazladır. Bu olumlu etki düşük dozlu betonlarda daha belirgindir. Örneğin çimento miktarı  $100 \text{ kg/m}^3$  olan bir betona % 10 silis dumanı ilavesi ile geçirgenlik katsayısı  $1,6 \times 10^{-7} \text{ m/s'}$  den  $4 \times 10^{-10} \text{ m/s'ye}$  (yaklaşık 250 dozlu beton değerine) doğru azalmıştır (Yeğınobalı, 2005).

### *II. Zararlı Kimyasal Maddeler ve Sülfatlara Karşı Direnç:*

Kimyasal maddelerin betonu yıpratıcı etkileri çeşitli yollardan olabilir. Asitler kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek suda çözünen tuzlar meydana getirirler. Betondan ayrılan tuzlar geçirgenliği artırır ve zararlı etkilere karşı direnci azaltırlar. Sülfatlar katyona bağlı olarak alçı ve etrenjit oluşturarak betonda şişme ve çatlamalara yol açarlar veya C-S-H jelini ayrıştırırlar. Bu yıpratıcı reaksiyonların çoğunda çimentodaki  $C_3A$  içeriğinin olumsuz rolü büyüktür. Silis dumanı çimentonun genellikle % 15'ine kadar katıldığı için  $C_3A$  miktarını daha fazla katılan diğer puzolanlar kadar azaltmaz. Ancak geçirgenliği etkin bir şekilde azaltması ve kalsiyum hidroksiti bağlamadaki yüksek aktivitesi dolayısı ile daha başlangıçtan itibaren betonda zararlı etkilere karşı en az diğer puzolanlar kadar direnç sağlar. Çimentoya % 10–30 oranında katılan silis dumanı ile harçların sodyum, magnezyum ve kalsiyum klorürlere karşı direncinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Klorür çözeltileri içinde bekletilen harç numunelerinin çeşitli özelliklerinin incelendiği bir çalışmada da silis dumanı katkısının olumlu etkileri ortaya çıkmıştır. Şekil 2.10'da betonda klor geçirgenliğinin silis dumanı miktarına bağlı olarak azalışı gösterilmiştir (Yeğınobalı, 2005).



Şekil 2.10 Betonlarda silis dumanı miktarı ile geçirgenlik arasındaki bağıntı (Yeğinoğlu, 2005)

Mehta düşük su/bağlayıcı oranlı betonların katkısız, lateksli ve çimentonun % 15'i kadar silis dumanı içeren türlerinin çeşitli asitlere karşı dirençlerini araştırmıştır. Silis dumanlı beton % 1 hidroklorik, %5 asetik ve % 1 sülfürik asit çözeltilerine karşı diğer iki betondan daha iyi direnç göstermiştir. Nitrat ve asitlerle ilgili diğer bazı çalışmaların benzer sonuçları Sellevoid ve Nilsen tarafından özetlenmiştir (Yeğinoğlu, 2005).

Normal portland çimentosuna % 10–15 kadar silis dumanı katıldığında sülfatlara dayanıklı çimento (ASTM Tip V) benzeri bir çimento elde edilebilmektedir. Silis dumanı katkısı özellikle sodyum sülfata karşı etkili olmaktadır (Yeğinoğlu, 2005).

Silis dumanı ve silissi uçucu kül katkılarını içeren harç ve betonların sülfat dirençleri ASTM C 452 ve C 1012 metotlarına ilaveten örnekleri % 10'luk sodyum ve %8,4'lük magnezyum sülfat çözeltileri içinde bekleterek araştırılmıştır. Çimento yerine % 16 oranında katılan silis dumanı ile sodyum sülfata karşı en iyi direnç elde edilmiştir. Katkı maddeleri ve özellikle silis dumanı magnezyum sülfata karşı direnci olumsuz etkilemişlerdir. Silis dumanı katkısının harçların amonyum sülfata karşı olan direncini olumlu etkilediği yolunda bulgular vardır. Ancak etkinin çok belirgin olmadığı da bildirilmektedir (Yeğinoğlu, 2005).

2.6.1.2.3 *Granüle Yüksek Fırın Cürufu*. Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının (YFC) kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

Cürufların çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar ya da yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık, modern teknolojiyle çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC, yüksek fırınlarda daha hafif olmasından dolayı ham demirin üzerinde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'yi meydana getirirler. YFC'nin oluşum sıcaklığı 1400–1600°C'dir. (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

1862 yılında Langens'in YFC'lerin bağlayıcı özelliklere sahip olduğu gözleminin ardından 1865 yılında ilk kez YFC-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlamıştır. YFC'nin çimento hammaddesi olarak kullanımı ise ilk kez 1883 yılındadır. Portland çimentosu klinkerini GYFC ile birlikte öğütterek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

➤ *Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri:*

Cüruf çimentoların hidratasyonunda granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ile portland çimentosu arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Normal inceliklerde (3000 cm<sup>2</sup>/g) öğütülmüş olan cüruf çimentolarda klinker özellikleri, çok ince (6000 cm<sup>2</sup>/g) öğütülmüş olanlardakine göre, daha önemlidir. C<sub>3</sub>S miktarı

yüksek olan klinkerler, cürufun erken yaşlarda aktivasyonu için daha elverişlidir. 28 günün üstündeki yaşlarda ise cürufun inceliği ve reaktivitesi klinker özelliklerinden daha fazla önem kazanmaya başlar. Genel olarak %70'in üstünde cüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içeren çimentolarda ise daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

Cürufllu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince, buna karşılık cürufun daha kaba olmasına yol açar. Ayrı öğütme sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

➤ *Fiziksel Özellikler:*

Portland yüksek fırın cürufllu çimentoları, portland çimentosundan daha açık renklidir. Özgül ağırlığı, portland çimentolarına oranla biraz düşüktür (3,00-3,05). Priz süreleri, rötre, sünme, betonarmede donatı aderansı özellikleri bakımından portland yüksek fırın cürufu çimentolarıyla portland çimentoları arasında önemli farklılıklar yoktur (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

Portland yüksek fırın cürufu çimentolarının hidrasyon ısıları kullanılan klinkerin ve GYFC'nin kompozisyonu ve miktarıyla orantılı olarak değişir ancak, genel olarak, normal portland çimentolarınınkinden daha düşüktür (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

➤ *Dayanım Özellikleri:*

Cürufllu çimentolar hidrasyon mekanizması ve hidrasyon ürünleri bakımından portland çimentolarıyla benzer nitelikler göstermekle birlikte, normal incelikte öğütülmüş durumda dayanım kazanma hızı, özellikle erken yaşlarda, portland çimentolarından daha düşüktür. Aynı 28 günlük dayanımın elde edildiği, birbirine çok yakın inceliklerdeki (3000 cm<sup>2</sup>/g) bir portland çimentosuyla %65 cüruf içeren bir cürufllu çimento karşılaştırıldığında, erken yaşlarda portland çimentosunun, geç yaşlarda ise cürufllu çimentonun daha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir. Durum betonda incelendiğinde, eğilme dayanımlarının %25–45 cüruf içeren

çimentolarla yapılan betonlarda, normal portland çimentosuyla yapılanlara göre, ya eşit ya daha yüksek olduğu saptanmıştır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

➤ *Dayanıklılık Özellikleri:*

Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda cürufu çimentoların zararlı kimyasal etkiler altında performanslarının yüksek olduğu belirlenmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

I. *Sülfat Etkisine Dayanıklılık:*

Genellikle artan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) miktarı nedeniyle, normal portland çimentosundakinden daha az  $C_3A$  miktarı ve cürufta alüminyum oksit miktarının daha az olması ile sülfata olan direnç artar. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun miktarı % 65 veya daha fazla olduğunda sülfata dayanıklı çimentoya eşdeğer veya daha dayanıklı bir çimento oluşumu sağlanır. Ludwig sülfat etkisinin azalmasını sülfat iyonlarının düşük penetrasyonuna ve  $Ca(OH)_2$ 'nin düşüklüğüne bağlamaktadır. Etrenjit oluşumunu engelleyen nedenlerden biri elbette çözünen  $Ca(OH)_2$  miktarının çok azalmasıdır ve bu durum YFC içeren çimentolarda gerçekleşen bir olgudur (Kutlu ve Demiriz, 2007; Ludwig, 1980).

Regourd tarafından yapılmış olan bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış, %50  $C_3S$ +%15  $C_3A$ +%5 alçı+%30 kuartz içeren numuneler %5  $MgSO_4$  eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak, numunelerde genleşme gözlenmiş ve yedinci günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra bu numuneler X-Işınları Difraksiyonu ve Tarayıcı Elektron Mikroskop kullanılarak incelendiğinde,  $Mg(OH)_2$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , etrenjit ve C-M-S-H olduğu saptanmıştır. Aynı çalışmada, ikinci seri numuneler kuartz yerine GYFC kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta, GYFC içeren numunelerde hiçbir bozulma görülmemiştir. X-Işınları Difraksiyonu ve Tarayıcı Elektron Mikroskop analizleri bu numunelerde yoğun bir C-S-H, bir miktar  $Ca(OH)_2$ , monosülfat formu ve çok az etrenjit oluştuğunu göstermiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf içeren çimentolarla yapılan beton numuneler üzerinde de elde edilmiştir. Aynı çalışmadan çıkan bir başka

sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

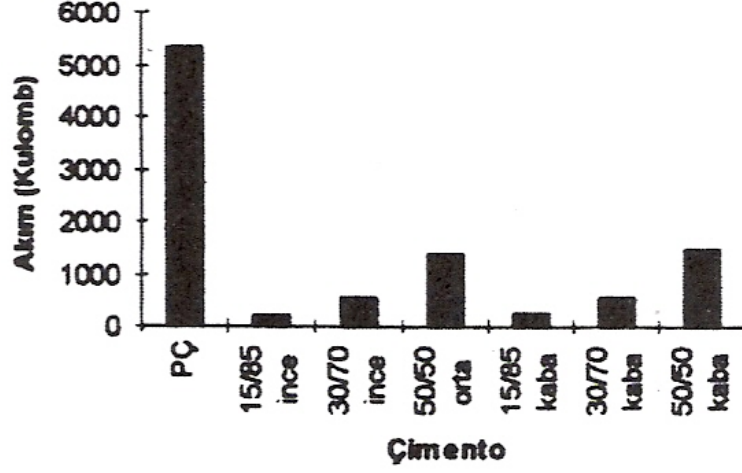
MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka araştırmada da 130 değişik çimento kullanılmış ve yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sülfat direncini artırdığı saptanmıştır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

## II. Klor Etkisine Dayanıklılık:

CEM III/A 42,5N tipi çimento ile üretilmiş betonda portland çimentolu betona göre klorür yayılımı azalmıştır. Bunun birinci nedeni öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun katılımı ile betonun geçirgenliğinin azalması, ikinci olarak sertleşmiş cürufllu çimento hamurunun önemli miktarda klorürü bağlayabilmesi ve böylece yayılma için gerekli konsantrasyon gradyanının oluşumunu engellemesidir. İyon ve özellikle Cl<sup>-</sup> geçirimsizliği betonarme elemanların en tehlikeli hasar nedeni olan donatı korozyonu üzerinde çok etkin zararlı rol oynar. Potasyum iyonlarının(K<sup>+</sup>) difüzyon katsayıları üzerinde Bakker'in yaptığı bir araştırmada 103 günlük salt portland ve YFC katkılı harçlarda bulunan sonuçlar sırasıyla 2,96x10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s ve 0,04x10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s olmuştur, yani YFC içeren harç Portland çimentolu harca göre 100 defa daha fazla geçirimsizdir (Kutlu ve Demiriz, 2007).

Hızlandırılmış Klor Permeabilite deneyi uygulanarak yapılan bir araştırmada değişik inceliklerde ve değişik cüruf miktarı içeren çimentolar kullanılarak 102 mm çap ve 51 mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve 14 günlük standart bakımdan sonra numunelerin bir yüzü sodyum klorür, diğer yüzü sodyum hidroksit eriyiklerine batırılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzden öbürüne geçen elektriksel akım ölçülerek klor permeabilitesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu araştırmalarda kullanılan kontrol çimentosu (portland çimentosu) 0,865 m<sup>2</sup>/g (BET), kaba cürufllu çimentolar 0,866 m<sup>2</sup>/g (BET), orta cürufllu çimentolar 1,083 m<sup>2</sup>/g (BET) ve ince cürufllu çimentolar 1,337 m<sup>2</sup>/g (BET) inceliktedir. İnce cürufllu çimentolarda ağırlıkça %70 ve %85, orta cürufllu çimentoda %50 ve kaba cürufllu çimentolarda

%50,%70 ve %85 cüruf kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 2.11'de gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2005).



Şekil 2.11 Cürufli çimentolarda klor permeabilitesi  
(Tokyay ve Erdoğan, 2005)

Benzer bir araştırma da %8 silis dumanı, %25 uçucu kül, %50 GYFC içeren numuneler üzerinde yapılmış ve cürufun diğer mineral katkılara göre daha etkin olduğu saptanmıştır (Tokyay ve Erdoğan, 2005).

### III. Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık:

Cürufli çimentoların deniz suyu etkisine maruz betonlardaki yüksek performansı yıllardır bilinmektedir. Deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40x40x160 mm harç numunelerle yapılan deneylerde kullanılan cüruf miktarının etkisi araştırılmış ve çimento içindeki GYFC miktarının artmasıyla genişlemenin azaldığı saptanmıştır. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar Tablo 2.8, Tablo 2.9 ve Tablo 2.9a'da özetlenmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 2005).



Tablo 2.8 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde bir yıl sonra meydana gelen boy uzamaları (Doğrusal genişleme) (Tokyay ve Erdoğan, 2005)

Çimento	$\Delta l/l$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
P.Ç.	1000
%75 P.Ç.+25 GYFC	750
%70 P.Ç.+%30 GYFC	690
%20 P.Ç.+%80 GYFC	190

Tablo 2.9 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde cüruf miktarı-Klinker kompozisyonu-Yaş-Dayanım İlişkileri (Tokyay ve Erdoğan, 2005)

Deniz suyunda tutulan numune dayanımı/Standart numune dayanımı (%)											
PÇ			Cüruf<%30			%30<Cüruf<%60			Cüruf>%60		
6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl	6 ay	1 yıl	3 yıl
73*	57	-	66	51	33	68	86	118	99	124	191
64 <sup>□</sup>	33	-	59	41	-	63	63	52	95	140	193
58 <sup>#</sup>	24	-	53	25	-	68	63	-	108	133	160

Tablo 2.9a Kullanılan klinkerlerin ana bileşen kompozisyonu (Tokyay ve Erdoğan, 2005)

Klinker	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
*	46	32	6	16
□	55	22	10	13
#	60	17	10	13

Belçika, Almanya, Norveç, İngiltere ve Fransa'daki çalışmalarda uzun süre denizin içinde kalmış betonların performansı üzerine çimento tiplerinin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalarda cürüflü çimentolar (%25–35 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ihtiva eden) portland çimentolarından daha uygun davranış göstermiştir ve granüle cürufça zengin cürüflü çimento (%50' den yüksek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ihtiva eden) istisnasız daha iyi dayanıklılık göstermiştir. Betonda daha az parçalanma ve betonarmede daha az korozyon olmuştur. Deniz suyunun sülfatları klor miktarının yüksekliği nedeniyle aşırı genişleme oluşturmazlar, çünkü ilk etaptaki alçıtaşı (jips) oluşumu ve ikinci etaptaki etrenjit oluşumu azalır veya su tarafından yıkanarak giderilirler, öte taraftan YFC C<sub>3</sub>A'nın oluşum miktarını

düşürerek de etrenjitin meydana gelmesindeki etkinliğini yok eder. Buna karşılık boşluklar içindeki tuzların kristalleşmesi çatlamalara ve dökülmelere yol açabilir. Geçirimsizliğin azaltılması ve boşlukların  $Mg(OH)_2$  ile tıkanması bu sorunu çözer. YFC ise bu iki niteliği sağlayan bir malzemedir (Kutlu ve Demiriz, 2007).

Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürüflü çimentoyla üretilmiş beton klorür nüfuzuna, normal portland çimentosuyla üretilmiş betondan önemli ölçüde daha mukavim olduğundan klorürlerin etkisi altındaki çevre şartlarında betonarme çeliğine büyük ölçüde artan bir koruma sağlar. Öğütölmüş yüksek fırın cürufunun kullanımı betonun beklenen ömrünü birkaç kat arttırır (Kutlu ve Demiriz, 2007).

## BÖLÜM ÜÇ

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 3.1 Deniz Suyu ve Sülfat Etkisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Betonda yaygın olarak görülen bozulma süreçlerinden olan sülfat etkisi, ileri derecedeki etkilenmelerde betonu tamamen tahrip edebilmektedir. Tosun, Yazıcı, Yiğiter ve Baradan (2003) tarafından yapılan çalışmada, iki tip çimento (PÇ 42,5, SDÇ 32,5) kullanılarak hazırlanan, değişik oranlarda C sınıfı uçucu kül (UK) içeren harçların sodyum sülfat çözeltisinde farklı koşullarda bekletildiklerinde yaptıkları genleşmeler ve dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Bir grup örnek ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde sürekli olarak bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisinde 56 çevrime tabi tutulmuştur. Ayrıca, buhar kürü geçirmiş (60°C'de 9 saat) karışımlar için de deney programı tekrarlanmış ve sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur. PÇ ve SDÇ içeren karışımlarda UK'nin yüksek oranda kullanılması (% 30, % 40) beklendiği üzere erken dayanımları düşürmüştür. Ancak bu etkinin ilerleyen yaşlarda büyük oranda kaybolduğu görülmektedir. PÇ 42,5 ve SDÇ 32,5 içeren karışımların basınç dayanımları kıyaslandığında standart kür koşullarında PÇ içeren karışımların dayanımları yüksektir. İlerleyen yaşlarda bu farkın azaldığı gözlenmiştir. Sülfata maruz kalmış örneklerin basınç dayanımları kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, özellikle ıslanma-kuruma etkisinde basınç dayanımlarında azalma değil aksine artışlar olmuştur. Sülfatta bekletilen tüm karışımlarda 16 hafta sonunda elde edilen genleşme değerleri oldukça düşük mertebededir ve sülfat dayanıklılığı açısından karışımlar arasında anlamlı farklılıklar tespit edilememiştir. Örnekler ASTM 1012'ye uygun olarak 50 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisinde 16 hafta bekletildiğinde, gerek basınç dayanımlarının gerekse genleşme değerlerinin değişimi açısından tüm karışımlar sülfat etkisine dayanıklı olarak tanımlanabilir. Ancak, standardın karışımlar arasındaki farklılıkları belirlemede yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu amaç için çok daha yüksek oranda sülfat içeren çözeltilerin kullanılması veya maruz kalma süresinin arttırılması gerektiği düşünülmektedir (Tosun ve diğer, 2003).

Erdoğdu ve Karataş (2003) tarafından yapılan çalışmada, sülfat iyonu konsantrasyonu düşük deniz suyu ile eşdeğer sülfat iyonu konsantrasyonunda sodyum ve magnezyum sülfat zeltilerine maruz betonun performansı araştırılmış ve buna ilişkin olarak silis dumanı ikamesinin etkinliği değerlendirilmiştir. Gerek sodyum sülfat, gerek magnezyum sülfat zeltilerinin ve gerekse deniz suyunun silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımları üzerinde değişen mertebede kayıplara neden olduğu grlmştir. Neden olduğu kayıp açısından en olumsuz etkiyi deniz suyu yaratmıştır ve yaklaşık 56 haftalık bir dönem sonunda %55 düzeyinde bir kayıp oluşmuştur. Sodyum sülfat zeltisine maruz numunelerin dayanımlarında 90 haftalık bir dönem sonunda gözlemlenen kayıp yaklaşık olarak %40 düzeyindedir. Neden olduğu dayanım kaybı açısından silis dumanı içeren numuneler için de en olumsuz etkiyi deniz suyu yaratmaktadır (Erdoğdu ve Karataş, 2003).

Shannag ve Shaia (2003) tarafından yapılan çalışmada ise P, doğal puzolan ve silika tozu içeren beton örnekleri l Deniz ve Kızıl Deniz sularında bir yıl bekletilmişlerdir. Sülfat zeltisi ve deniz suyunda geçen bir yıllık sreden sonra sülfat etkisine karşı en iyi performansı %15 silika tozu ve %15 doğal puzolan bileşiminden oluşan betonların sağladığı belirtilmiştir. Değişik oranlarda silika tozu ve doğal puzolan içeren yüksek performanslı betonlar, dayanım ve kalıcılık arasında iyi bir denge sağlamaktadır ve beton endüstrisinde kullanımları tavsiye edilmektedir. (Yazıcı ve diğer., 2003; Shannag ve Shaia, 2003).

Santhanam, Cohen ve Olek (2003) tarafından yapılan çalışmada, ASTM Tip I Portland imentosu harcı ve % 98,9 oranında C<sub>3</sub>S içeren harç kullanılarak hazırlanan örnekler, kirece doygun suda geçirdikleri 12 günlük başlangıç kürü sonrasında, kirece doygun suda kr edilen kontrol örnekleri ve kütlece % 4,44 sodyum sülfata maruz kalan örnekler olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılmıştır. Sülfat etkisinin Portland imentosu harcında alçıtaşı ve etrenjit oluşturarak; C<sub>3</sub>S harcında ise sadece alçıtaşı oluşturarak bozulmalara sebep olduğunu belirlemişlerdir. Kırılma ve bozulmalar C<sub>3</sub>S harcıyla kıyaslandığında, P harcında daha fazladır. Çimento hamurunda tomasit oluşumu hem P hem de C<sub>3</sub>S harçlarında gözlenmiştir. Yüzeyde

CO<sub>2</sub> çözümlenmesiyle oluşan karbonatlaşma olayının da tomasit oluşumunu tetiklediği belirtilmiştir (Santhanam ve diğer., 2003).

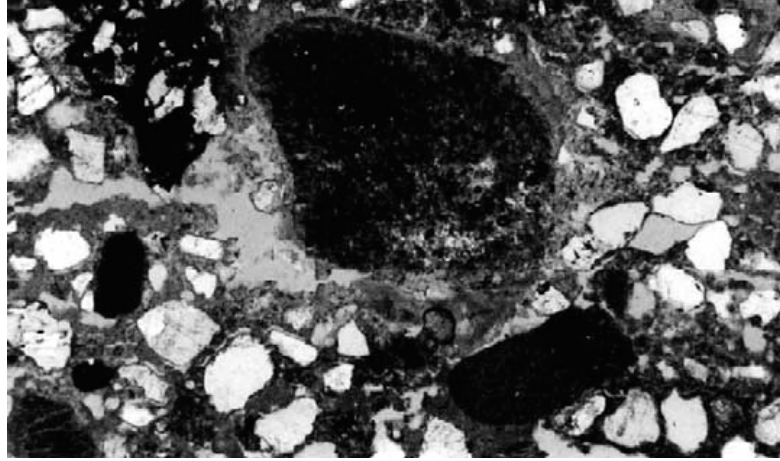
Dongxue ve diğer. tarafından yapılan çalışmada, çalışmacılar tarafından hazırlanmış sentetik deniz suyunda 28 gün bekletilen Portland çimentolu (PÇ) ve yüksek fırın cürufu harçların basınç ve eğilme dayanımlarının değişimi incelenmiştir. Söz konusu çalışmada PÇ ile üretilen harçların basınç dayanımlarında bir değişiklik olmazken, eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Cürufu çimentolar ile üretilen harçların basınç ve özellikle eğilme dayanımında artışlar meydana gelmiştir (Dongxue ve diğer., 1997; Yazıcı ve diğer., 2003).

Lorenzo ve diğer. (2003) tarafından yapılan çalışmada ise değişik oranlarda uçucu kül içeren hamurlar, çalışmacılar tarafından hazırlanmış sentetik deniz suyunda 90 gün boyunca bekletilmişlerdir. Özellikle yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu etkisi ile arttığı yazarlarca ifade edilmektedir. Bu durum klorür, sülfat ve sodyum iyonlarının uçucu külün puzolanik reaksiyonunu aktive etmesiyle açıklanmaktadır (Lorenzo ve diğer.,2003; Yazıcı ve diğer., 2003).

Sibbick, Fenn ve Crammond (2003) tarafından yapılan çalışmada, South Wales (İngiltere) liman duvarı basamaklarının (Şekil 3.1) deniz suyuna maruz kalan harcında meydana gelen hızlı bozulma mekanizması açıklanmıştır. 2 yıl içinde harcın çatlama ve dökülmesine şahit olunmuştur. Bunun sebebi, malzemenin zayıf ve gözenekli yapısı ile deniz suyundan gelen magnezyum iyonu saldırısı olarak düşünülmüştür. Kopan harç parçaları, optik ve elektron mikroskobu ve XRD analizine tabi tutulmuştur. Tomasit, etrenjit, brusit ve hidrate magnezyum silikat gibi reaksiyon ürünleri oluşmuştur (Şekil 3.2). Bozulmanın son ürünü, önceden çimento hamuru tarafından doldurulan alanların geniş, bağımsız kalsit kristallerinin çökeltisi ile işgali olmuştur. Yapıdaki betonun bozulması, tomasitin erken dönemdeki oluşumunun sülfat saldırısına yol açtığını göstermiştir (Sibbick ve diğer., 2003).



Şekil 3.1 Liman duvar basamaklarının genel görünümü. Kireç kaplamanın altından aşınarak sürüklenen sülfata dayanıklı çimento harcı (Sibbick ve diğer., 2003)



Şekil 3.2 Karbonatlı ince agrega tanesi çevresindeki tomasit halesi (Sibbick ve diğer., 2003)

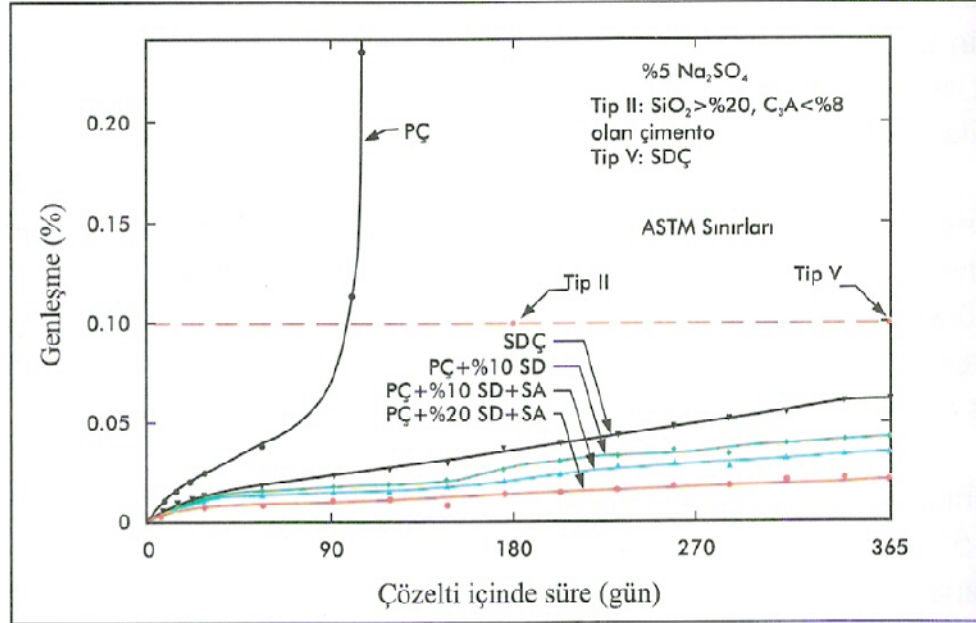
1940'lı yıllarda "USBR" (U. S. Bureau of Reclamation), uzun dönemli, hızlandırılmamış bir laboratuvar deney programına başlamıştır. Bu programın amacı, çeşitli beton karışım değişkenlerinin şiddetli sülfat koşullarına karşı gelişen dayanıklılık üzerindeki etkisini incelemektir. Monteiro ve Kurtis (2003) tarafından yapılan çalışmada hazırlanan beton örneklerinin su/çimento oranı, çimento içeriği ve çimentonun uçucu küllü yer değiştirme yüzdesi seçimlerinin sebep olduğu hasar süreci araştırılmıştır. Analizler, betonun 0,45'ten küçük su/çimento oranlarında ve %8'den az oranda  $C_3A$  (trikalsiyum alüminat) içermesi durumunda, 40 yıllık

saldırıya maruz kalma süresinde hasarın oluşmadığı bir “güvenli bölge”nin varlığını göstermiştir. Umulduğu gibi, yüksek oranda  $C_3A$  içeren beton örnekleri sülfata maruz kaldığı çok kısa bir süre sonrasında göçme durumu sergilemişlerdir.  $C_3A$  içeriğinin %10’dan fazla ve su/çimento oranının 0,45–0,51 aralığında olduğu durumlarda göçmenin 5 yıldan daha az bir sürede ortaya çıktığı gözlenmiştir. Genleşme deneyleri ise yüksek oranda  $C_3S$  içeren çimentoların, orta değerlerde su/çimento oranında hazırlanmış olsa bile, betonda erken göçme durumuna sebep olabildiğini göstermiştir. %25 ve %45 oranlarında çimentoyla yer değiştirilmiş uçucu küllü hazırlanmış beton örnekleri, puzolan içermeyen örneklere kıyasla daha az genleşme sergilemiştir (Monteiro ve Kurtis, 2003).

Boyd ve Mindess (2004) tarafından yapılan çalışmada beton örnekleri hazırlanmış ve bu örnekler 1 yıl içinde değişen zamanlar boyunca sülfat çözeltisine kısmen batırılmıştır. 0,45 ve 0,65 olmak üzere iki su/çimento oranı kullanılmıştır. Normal Portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento ile çalışılmıştır. Beton performansı, gaz basıncının beton silindir örneğinin silindirik yüzeyine uygulanması yönteminin kullanıldığı “Basınç Altında Çekme Testi”ne dayanılarak hesaplanan çekme dayanımı ve basınç dayanımı ile tespit edilmiştir. Test sonuçları, su/çimento oranının betonun sülfat saldırısına dayanıklılığı üzerindeki etkisinin çimento tipinden daha baskın olduğunu ortaya koymuştur. Düşük su/çimento oranı kullanımının, betondaki zararlı sülfat etkisini ötelemede sülfata dayanıklı çimento kullanımından daha etkili olduğu belirlenmiştir. Betondaki erken yaşlardaki içsel hasarının tespitinde kullanılan “Basınç Altında Çekme Testi”nin, basınç dayanımı deneyinden daha duyarlı olduğu görülmüştür. Sülfat etkisi gibi genleştirici mekanizmaya sahip hasar etkenleri, mikroçatlaklara yol açarak betonun çekme dayanımının basınç dayanımından daha hızlı bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, çekme dayanımının çatlaklara aşırı duyarlılığından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, çekme dayanımı, hasar tespiti için daha uygulanabilir olmaktadır (Boyd ve Mindess, 2004).

Şekil 3.3’te görüldüğü gibi ASTM C 1012 metodu uyarınca %5’lik sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harç çubuklarından %10–20 silis dumanı katkısı ile yapılanlar sülfatlara dayanıklı çimento ile yapılanlardan daha az genleşme göstermişlerdir.  $C_3A$

miktarı yüksek çimentolar ve bunların %30 katkılı türleri ile yapılmış harç çubukları sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldığında en az yıpranan silis dumanı katkılı harç olmuştur. Beton boru yapımında kullanılmak üzere hazırlanan %5 silis dumanı katkılı beton örnekler % 10'luk sodyum sülfat çözeltisinde 92 hafta bekletildiklerinde katkısız betondan çok daha az ağırlık kaybına uğramışlardır (Yeğınobalı, 2005).



Şekil 3.3 Sodyum sülfat çözeltisinde harçların genleşmeleri (Yeğınobalı, 2005)

Silis dumanı katkısının magnezyum sülfata karşı olan etkisi ise genellikle olumsuzdur. Bu davranış oluşan puzolanik C-S-H jelinin bağlayıcı özelliği olmayan hidrate magnezyum silikat (M-S-H) jeline dönüşmesi ve koruyucu magnezyum hidroksit (MH) tabakasının azalarak bu reaksiyona yardımcı olması ile açıklanmaktadır. Silis dumanı katkısı normal ve sülfatlara dayanıklı çimentolarla yapılan hamurların %4,5 SO<sub>3</sub> yoğunluğunda magnezyum sülfat çözeltisi içindeki davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Her iki çimento ile de ağırlık ve dayanım kayıpları katkısız örneklere oranla on misline yakın artmıştır (Yeğınobalı, 2005).

Chindapasirt ve diğer. (2004) tarafından yapılan çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanımının sülfat dayanıklılığını arttırdığı, uçucu kül inceliği arttıkça bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kaba uçucu kül (Blaine değeri 1800 cm<sup>2</sup>/g)



kullanımı halinde ise genleşmelerin azalmadığı aksine arttığı ifade edilmektedir (Chindaprasirt ve diğer., 2004; Yazıcı, 2006).

Felekoğlu, Ramyar, Tosun ve Musal (2006) tarafından yapılan çalışmada, 5 farklı Türk Portland çimentosu türünün ASTM C 452 ve ASTM C 1012 standartları kullanılarak bulunan sülfat dirençleri karşılaştırılmıştır. Sülfata dayanıklı çimento hariç tüm çimentolar, aynı klinkerden elde edilmiştir. ASTM C 452 deneyi, harmanlı çimentoların sülfat dirençlerini belirlemede yetersiz kalmıştır. ASTM C 1012 deneyi ASTM C 452'den daha gerçekçidir. ASTM C 452 standardı kullanıldığında tüm çimento tiplerinde 14 günlük genleşme değerleri ASTM C 150 tarafından belirtilen limit olan %0,04 değerinin altında kalmıştır. Aynı klinkerle hazırlanmış çimento tiplerinde çimento inceliğinin artmasıyla, her iki deney yöntemi sonucunda da genleşmeler artmıştır (Felekoğlu ve diğer, 2006).

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı betonların sülfat dayanıklılığı Li ve Zhao (2003) tarafından incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, en iyi performansı yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir (Li ve Zhao, 2003; Yazıcı, 2006).

Sülfat etkisi beton veya betonarme yapıların bozulmasına yol açan önemli kimyasal etkilerden biridir. Yazıcı (2006) tarafından yapılan çalışmada, PÇ 42,5 çimentosu kullanılarak hazırlanan, değişik oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC) içeren harçların sodyum sülfat çözeltisinde farklı koşullarda bekletildiklerinde yaptıkları genleşmeler ve basınç dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Örnekler ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış, bir grup 150 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde 6 ay süre ile bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisine tabi tutulmuştur. Ayrıca, buhar kürü geçirmiş (60 °C'de 9 saat) karışımlar için de deney programı tekrarlanmış ve sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Yüksek fırın cürufu kullanımı harçların sülfat dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir. Çimento yerine YFC kullanımı erken dayanımları düşürmüştür. Ancak bu etkinin ilerleyen yaşlarda büyük oranda kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca, buhar kürü ile erken dayanımlar artmaktadır.

Ancak, bu durumda da nihai dayanımlarda bir miktar düşmeler görülmektedir. Sülfata maruz kalmış örneklerin basınç dayanımları kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında, özellikle ıslanma-kuruma etkisinde tüm karışımlarda basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Sürekli sülfat etkisinde ise yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda bir miktar dayanım artışı söz konusudur. Sülfata ıslanma-kuruma şeklinde maruz bırakılan karışımlarda 26 hafta sonunda elde edilen genişleme değerleri oldukça düşük mertebededir. Bu durum kuruma sırasında oluşan büzülmenin etkisi ile açıklanabilir. Sürekli sülfat çözeltisinde 26 hafta bekletilen, bağlayıcı olarak sadece Portland çimentosu içeren karışımın genişleme mertebesinin ASTM 1157'de tariflenen sınırları aştığı, buhar kürü ile genişleme mertebesinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada standartta belirtilen konsantrasyonun (50 g/l) üzerinde bir çözelti (150 g/l) kullanıldığı da dikkate alınmalıdır. Yüksek fırın cürufu kullanımı ile genişlemelerin azaldığı ve standart limitlerinin sağlandığı görülmüştür. Buhar kürü durumunda YFC içeren karışımların genişlemelerinin bir miktar arttığı da belirlenmiştir. Suda 26 hafta boyunca bekletildiğinde tüm karışımların hacim sabitliklerini korudukları, oluşan genişlemelerin (genellikle <math>< 0.02\%</math>) çok düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür (Yazıcı, 2006).

Santhanam, Cohen ve Olek (2006), yeraltı suyu çözeltisinde bekletilen Portland çimentosu harçlarının deniz suyunda bekletilenlere kıyasla daha fazla bozulma gösterdiğini ifade etmişlerdir. Her iki çözeltide oluşan kütle değişimi benzer iken yeraltı suyuna maruz kalan örneklerde genişleme ve dayanım kayıpları daha fazladır. Yeraltı suyuna maruz kalan harçlarla kıyaslandığında deniz suyuna maruz kalan harçların daha az miktarlarda etrenjit ve alçıtaşı içerdiği bulunmuştur. Etrenjit oluşumu deniz suyunda bekletilen harçlarda da gözlenir, yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu etrenjitin genişleme özelliğini azaltır. Deniz suyundaki harçlarda Friedel Tuzu olarak isimlendirilen kloro-alümina bileşikler gözlenir. Deniz suyunda bekletilen harçlarda brusit tabakasının kalınlığı, yeraltı suyunda bekletilen harçlardan daha fazladır ve sülfat etkisine karşı koyan bariyer konumundadır (Santhanam ve diğer., 2006).

Şahmaran, Erdem ve Yaman (2007), sülfat çevriminin normal portland çimentosunda bozulma sürecini hızlandırdığını ve sülfatlı ortam için normal Portland

çimentosunun uygun olmadığını saptamışlardır. % 4–5 oranında  $C_3A$  içeren sülfata dayanıklı Portland çimentosu (SDÇ), sülfata karşı yüksek koruma sağlamaz. Bu çalışmada, % 3,6 oranında  $C_3A$  içeren SDÇ'nin, orta derecedeki sülfat ortamında kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır.  $C_3S/C_2S$  oranı da SDÇ için ikinci önemli parametre olarak düşünülebilir. Uçucu kül ve doğal puzolan içeren katkıli çimentolar,  $Ca(OH)_2$  ve  $C_3A$  miktarlarını azaltması sayesinde etrenjit oluşumunu da kısıtlar ve böylece harçların sülfata karşı dayanımını geliştirir. Fakat katkıli çimentolar kür çevriminden oldukça fazla etkilenir (Şekil 3.4) (Şahmaran ve diğer., 2007).



CEM IV/B (P-V) 32,5 R

(nispeten yüksek oranda doğal puzolan)

CEM IV/B (P-V) 32,5 R

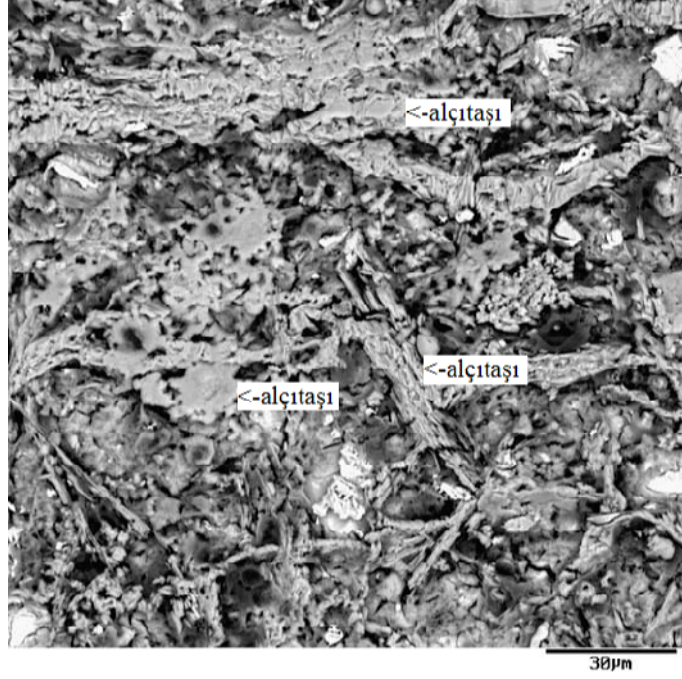
(nispeten yüksek oranda uçucu kül)

Şekil 3.4 Sülfat çevrimine 8 hafta boyunca maruz kalan harmanlı çimentolar (Şahmaran ve diğer., 2007).

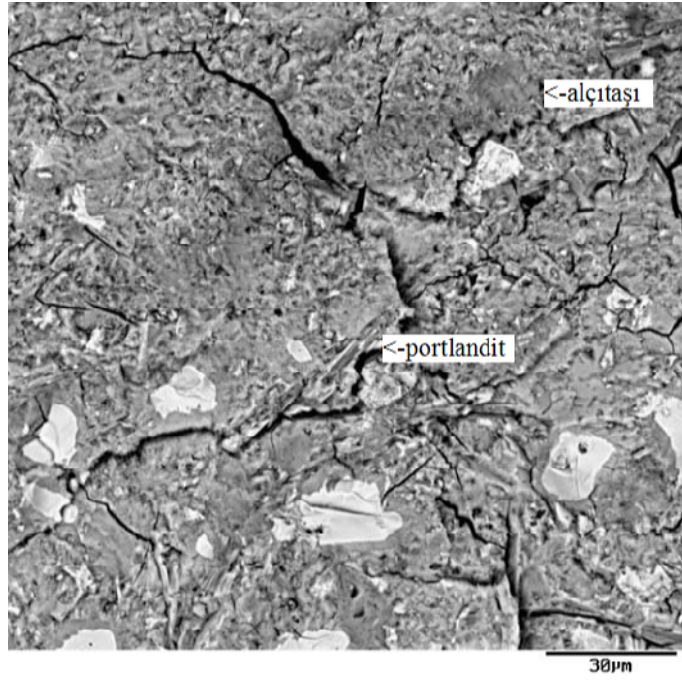
Binici ve Aksoğan (2006) tarafından yapılan çalışmada, Portland çimentosunun yüksek hacimde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve doğal puzolanla (DP) bileşimiyle oluşturulan harmanlı çimentonun sülfata dayanıklılığı üzerinde çalışılmıştır. Sülfata maruz kalma koşulları, %5 magnezyum sülfat çözeltisi ve %5 sodyum sülfat çözeltisi içeren çeşme suyu şeklinde olmuştur. İki çeşit öğütme metodu (ayrı ve beraber öğütme), iki incelik ( $250 \text{ m}^2/\text{kg}$  ve  $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) ve YFC ile DP'nin üç farklı orandaki (ağırlıkça %10, %20, %30) eşit miktarları uygulanmıştır. Referans örnek olarak katkısız portland çimentosu ile hazırlanan örnekler kullanılmıştır. Standart Rilem örnek boyutu olan  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  boyutundaki kalıplar kullanılmıştır. Harmanlı çimentoların sülfat dirençleri hem sodyum sülfat hem de magnezyum sülfata karşı referans çimentodan daha yüksektir. İnceliği

yüksek karışımlar için dayanımda meydana gelen azalmalar sodyum sülfat saldırısında, magnezyum sülfat saldırısında olduğundan daha düşüktür. Diğer yandan, öğütme yöntemleriyle sülfat direnci arasında ilişki bulunamamıştır (Binici ve Aksoğan, 2006).

Bellmann, Möser ve Stark (2006) tarafından yapılan çalışmada, portlanditin alçıtaşına dönüşmesi için gereken sülfat konsantrasyonu termodinamik hesaplardan ve deney sonuçlarından elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sülfat saldırısına maruz kalan betonun performansını ölçmeye yarayan laboratuarda hazırlanan çözeltilerin sülfat içerikleriyle ve saha koşullarında karşılaşılan sülfat içerikleriyle kıyaslanmıştır. Alçıtaşı oluşumunun, deneylerdeki bağlayıcı performansını güçlü bir şekilde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, laboratuarda deneye tabi tutulan beton örneklerindeki hasarın alçıtaşı oluşumu sonrası meydana geldiğini göstermiştir. Alçıtaşı oluşumu saha koşullarında seyrek rastlanan bir oluşumdur ve oluşumun meydana gelmesi için beton gözeneklerinden çok güçlü ve büyük miktarda alkali iyonu kaybı olması gerekmektedir. Deney örneklerinde görülen ve sülfat iyonlarının girişine ortam hazırlayan mikroçatlaklar alçıtaşı oluşumu sebebiyle meydana gelmektedir. Bu sebeple, saha koşullarındaki beton performansı, laboratuvar koşullarındakinden oldukça farklıdır. Yüksek konsantrasyonlu sülfat çözeltisinin betonda sebep olduğu hasar tipi, saha koşullarındakinden farklıdır, çünkü laboratuardaki beton hasarı alçıtaşı ve etrenjit çökmesi sonucu oluşmaktadır. Bu durum ise, etrenjitin tek başına oluşumundan daha saldırgan bir özelliğe sahiptir. Sodyum sülfat çözeltisinin 1500 mg/l, 3000 mg/l ve 30000 mg/l olan sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) içeriğine 12 ay boyunca maruz kalmış olan harç çubuklarının SEM analizleri bu düşünceyi desteklemiştir. Şekil 3.5'te mikroyapının değişimine işaret eden alçıtaşı oluşumları görülmektedir. Şekil 3.6'da bir kısım portlanditin varlığı ile alçıtaşına dönüşmüş halinin bir arada oluşu görülmektedir (Bellmann ve diğer., 2006).

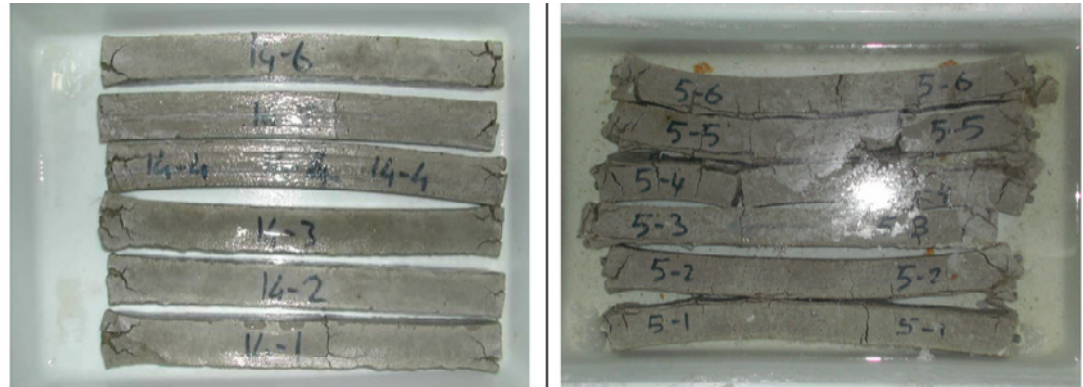


Şekil 3.5 Saldırgan deney çözeltisine ( $\text{Na}_2\text{SO}_4=30000$  mg/l) maruz kalan harç çubuğunda gözlemlenen alçıtaşı damarları (Bellmann ve diğer., 2006)



Şekil 3.6 Kısmen alçıtaşına dönüşmüş büyük miktardaki portlandit tortusunda görülen mikroçatlaklar (Bellmann ve diğer., 2006)

Şahmaran, Kasap, Duru ve Yaman (2007) tarafından yapılan araştırmada, normal Portland çimentosuyla hazırlanan harçlarda su/çimento oranı düştükçe bozulmanın da azaldığı ancak buna rağmen, normal Portland çimentosunun sülfat ortamına dayanıklı çimento olarak tanımlanamadığı saptanmıştır.  $C_3A$  ve  $C_4AF$  bileşiklerinin miktarlarındaki azalma ile etrenjit oluşumunun da önlendiği tespit edilmiştir. Fakat yapılan bu çalışmada, sülfata dayanıklı çimento kullanımının da sülfat etkisine karşı iyi bir performans sergilemediği görülmüştür. Oysaki uçucu kül ve doğal puzolan içeren katkılı çimentoların sülfat saldırısına karşı dayanıklı olduğu gözlenir. Katkılı çimentoların puzolanik reaksiyonları, alçıtaşı oluşumu için gerekli olan CH miktarını azaltır. Böylece, mineral katkıların miktar ve etkinliğine bağlı olarak katkılı çimentoların, orta ve yüksek derecedeki sülfat ortamlarında etkili olduğu düşünülmüştür. Sonuç olarak, sülfata dayanım için su/çimento oranından ziyade çimento kimyasının daha önemli olduğu görülmektedir. (Şekil 3.7). (Şahmaran ve diğer, 2007).



Su/çimento = 0,56 olan PÇ 17 hafta sonra

Su/çimento = 0,485 olan PÇ 38 hafta sonra

Şekil 3.7 %5  $Na_2SO_4$  çözeltisine maruz bırakılmış normal portland çimentosuyla yapılmış harç çubukları (Şahmaran ve diğer., 2007)

Ramyar ve İnan (2007), sodyum sülfata maruz kalan çimentolarda mineral katkı (uçucu kül ve doğal puzolan) kullanımının genişmeleri sınırlandırdığını saptamışlardır. Bu etki, yüksek oranda çimento ile mineral katkı yer değiştirdiğinde ve çimento düşük oranda  $C_3A$  ile düşük  $C_3S/C_2S$  oranına sahip olduğunda daha belirgindir. Çimentonun kompozisyonundan bağımsız olarak, mineral katkıların

etkinliği düşük sülfat konsantrasyonunda daha yüksektir ve genleşmeler kısıtlanır (Ramyar ve İnan, 2007).

Yiğiter, Yazıcı ve Aydın (2007) tarafından yapılan çalışmada, betonun deniz suyuna olan direnci üzerinde çimento tipinin, çimento içeriğinin ve su/çimento oranının etkisi araştırılmıştır. Deney örnekleri deniz suyunda 110 adet ıslanma-kuruma çevrimi uygulanarak bekletilmiştir. Örneklerin 250 günlük bekletilme süresi sonunda yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımı ve klor işleme derinliği ölçülmüştür. Bunun yanında seçilen örneklerin tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri üzerinde (SEM),enerji kırıcı spektrometre (EDS) analizi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında, yüksek fırın cürufunun (YFC) deniz suyuna olan direncinin portland çimentosu karışımlarından daha fazla olduğu ve mekanik özelliklerle klor işleme derinliği sonuçlarının bunu desteklediği gözlemlenmiştir. Deniz suyunda ıslanma-kuruma çevrimi sonrası, portland çimentosu karışımlarının basınç ve yarmada çekme dayanımı düşmüştür. Buna karşın, su/çimento oranı 0,43 ve 0,53 cürüflü örneklerin dayanımlarında artış görülmüştür. Bu durum deniz suyunda bulunan potasyum ve sodyum iyonlarının puzolanik reaksiyonu arttırması ile açıklanabilir. Su/çimento oranı 0,63 olan Portland çimentosu ve cürüflü çimento örneklerinin dayanımında azalma eğiliminden bahsedilebilir. Klor işleme derinlikleri incelendiğinde, karışımlar arasındaki farkın gözlemlenebileceği anlamlı sonuçlara ulaşılmıştır. Sabit çimento dozajı ve su/çimento oranında cürüflü çimento karışımlarının klor girişine, portland çimentosu karışımlarından daha az izin verdiği görülmüştür. Su/çimento oranı arttıkça klor işleme derinlikleri artmıştır (Yiğiter ve diğer., 2007).

Belirli maruz kalma koşulları karşısında kayaçlarda ve taş yapılarda, fiziksel tuz saldırısının göstergelerine rastlanmaktadır. Sodyum sülfat içerikli zemine maruz kalan gözenekli bir normal betonda benzer durumla karşılaşılmıştır. Betonda oluşan bu tip fiziksel sülfat saldırısı, kimyasal sülfat etkisine odaklanmış geçmiş araştırmacılar tarafından gözden kaçırılmıştır. Oysaki fiziksel sülfat saldırısı, kimyasal saldırıdan daha zararlıdır. Haynes ve diğer. (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmada fiziksel saldırı üzerinde durulmuştur. Fiziksel saldırıyı tetiklemek

amacıyla ASTM Tip II Portland çimentosu ve su/çimento=0,65 oranı kullanılarak düşük C<sub>3</sub>A içeriğine sahip beton karışımı hazırlanmıştır. Başlangıç kürü sonrasında, silindirik beton örnekleri %5'lik sodyum sülfat çözeltisi içine kısmen daldırılmış şekilde 3 yıl 1 ay 6 gün boyunca saldırıya maruz bırakılmıştır. Deneyler, çeşitli çevresel etkenleri taklit edecek şekilde 5 farklı sıcaklık ve nem döngüsü dâhilinde uygulanmıştır. Ve bu çevresel etkenlerden bir tanesi “tenardit” (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ile “mirabilit” (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) arası dönüşümü tetiklemiştir. Sonuçlar, beton yüzeyindeki pullanmanın, çözelti seviyesinin üst kısmında kalan buharlaşma yüzeylerinde oluştuğunu göstermiştir. Betonun çok sayıda tenardit-mirabilit dönüşümüne maruz kalması sonucu dikkate değer bir pullanmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Alçıtaşı oluşumu ise, çimento hamurunda kimyasal sülfat saldırısının meydana geldiğinin kanıtıdır. Bu deney programının koşulları altında kalan betonlarda fiziksel hasara neden olan tuz çökeltilerinin, kimyasal sülfat etkisinden daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Haynes ve diğer., 2008).

### **3.2 Kılcal Yolla Su Emme ve Ağırlık Değişimiyle İlgili Yapılan Çalışmalar**

Köksal, Güllü ve Güner (1996) tarafından yapılan çalışmada, su/çimento oranı 0,40, 0,50, 0,60 olan ve %0 katkılı halde referans çökmeleri 25mm±10mm, 100 mm±10 mm ve 175 mm± 10 mm olan ve uçucu kül (UK) ve/veya öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) %0, %50, %100 birleşimlerinden oluşan mineral katkının, Portland çimentosu (PÇ 42,5) yerine kütlece %0, % 10, %20, %30, %40, %60 ve %80 ikamesiyle elde edilen çimentolarla üretilen betonlar incelenmiştir. Referans çökmesi 100mm±10mm olan betonlara 28 ile 119'uncu günlerde ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Taze betonlarda çökme, hava içeriği ve birim kütle, sertleşmiş betonların ıslanma-kuruma hasarını izlemek için ise basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, birim kütle, su emme, kılcal su emme ve büzülmeleri belirlenmiştir. En uygun ikame oranlarının bu araştırmada kullanılan UK için %5-%20, YFC için %20-%50 olabileceği sonucuna varılmıştır. UK ve YFC ikameli çimentolarla üretilen betonların ıslanma-kuruma çevrimlerinden zarar görmedikleri, kılcallık katsayıları (BDN = 1,7-4,0) ve su emmelerinin (BD<sub>s</sub> = 1,2-1,4) PÇ ile



üretilen betonlardan daha dayanıklı olabildikleri görülmüştür (Köksal ve diğer., 1996).

Betonun bağlayıcısı çimento yapısı gereği, bulunduğu ortam ile genellikle reaksiyona girme eğilimi gösteren bir malzemedir. Betona zarar veren aşındırıcı (aggressive) ortamlar sulu çözeltiler olup, bunların başlıcaları, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum ve amonyum gibi katyonların, sülfat, sülfat, klorür halindeki tuzlarını, asitleri ve bazı organik bileşenleri içeren yeraltı suları, yüzey suları, deniz suları, atık sular gibi sulu çözeltilerdir. Bu ortamlarda bulunan çeşitli iyonlar betonun bileşenleri ile reaksiyona girerler. Bu iyonların en önemlileri sodyum sülfat ve magnezyum sülfat halinde bulunan sülfat iyonlarıdır. Bu iyonların sertleşmiş betonda yaptıkları reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin betonun hacimsel stabilitesini bozucu yönde etki yaptığını belirten pek çok araştırmanın yanında aksi görüşü savunan çalışmalar da vardır. Bu ise betonun bileşimi ve özellikleri kadar bulunduğu korozif ortamda mevcut sülfat iyonu konsantrasyonu ve yenilenme durumu ile de yakından ilgilidir. (Biricik, Gündüz, Çakır ve Sarıer, 2003)

Gonzales ve Irassar (1997),  $C_3A$  içeriği düşük ve sıfır olan çimentolar ile üretilen betonun sülfat saldırısına karşı yeterli direnci göstermediğini belirtmişlerdir. Mehta ve diğer. (1979), alit çimentolu harçlarda ASTM C 452'ye göre yapılan sülfat direnci deneyinde önemli bir genişlemenin gözlenmediğini ancak, meydana gelen jips formasyonu nedeni ile %10'luk sülfat solüsyonu içerisinde 5–6 yıl bekletilen numunelerde önemli kabuk atmalar ve dayanım düşmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak; sülfat etkisi süresince jips formasyonunun çimento hamuru üzerinde herhangi bir genişmeye neden olmadığını ifade eden araştırmacılar da vardır. Bu görüşü destekleyen başka bir çalışma da sülfatlı ortamlarda jips oluşumunun beton bünyesinde oluşturduğu genişleme etkisinden ziyade yumuşatıcı etkisi nedeni ile betonda kütle ve dayanım kaybına neden olan etkisinin dikkat çekici olabileceği vurgulanmaktadır (Biricik ve diğer., 2003; Gonzales ve Irassar, 1997; Mehta ve diğer., 1979).

Biricik ve diğeri. (2003), silis dumanı ve kalker filleri katkılı betonların sülfata karşı dayanıklılığını araştırmak için  $SO_4^{-2}$  konsantrasyonu 10000 mg/l ve 40000 mg/l olan sodyum sülfat çözeltileri kullanmıştır. Katkılı ve katkısız olarak üretilen betonlara sülfat etkisi, basınç dayanımı, kılcal su emme ve ağırlık değişimi deneyleri ile belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar şahit grup ile karşılaştırılmıştır. Her üç ortamda da silis dumanı ve kalker filleri içeren betonun basınç dayanımının normal betona göre belirgin biçimde yüksek olduğu görülmüştür. Filler katkılı betonlardaki kılcal su emmenin kontrol numunelerine göre daha düşük olması dikkat çekicidir. Ağırlık değişimleri için tartımlar doymuş yüzey kuru durumdaki numunelerde her 14 gün ara ile tartılması ve sonuçların şahit numunenin değerine oranlanması ile bulunmuştur. Her üç ortamda da numune gruplarının zamanla ağırlık değişimleri pek belirgin olmamakla birlikte bazı gruplarda %0,2 mertebesinde kalmıştır. Bu durumun betonun doluluğundan kaynaklandığı, bu yüzden sülfat iyonlarının beton bünyesine girerek hasar oluşturmadığı şeklinde yorumlanabilir. (Biricik ve diğeri., 2003)

Dış ortam, sertleşmiş betonu fiziksel ve kimyasal yönden hasara uğratar. Fiziksel etkenler donma, çözülme, ardı ardına oluşan ıslanma-kuruma, kum fırtınalarının, deniz, göl ve ırmaklarda meydana gelen dalgaların yaptığı aşınmalardır. Kimyasal etkenler asitli, sülfatlı, klorlu suların hasarlarına yol açar. Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik betonun boşluk yapısı ve oranıdır. Dış ortama açık boşluk oranı yüksek olan betonda suyun, dolayısıyla suda çözülen zararlı kimyasalların beton bünyesine girmesi oldukça kolaylaşır ve betonun dayanıklılığı (kalıcılığı) olumsuz yönde etkilenir (Uyan ve diğeri., 2003).

Su geçirimsizliği nedeniyle betonda oluşacak hasarları önleyebilmek açısından beton içindeki rutubet hareketinin mekanizmasını bilmek gerekir. Betonda 3 farklı şekilde akışkan hareketi vardır. Bunlar; malzemenin boşluklarının tamamının suya doymuş olduğu, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle meydana gelen doymuş akım, betonun boşluklarının kısmen suyla dolu olduğu, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle meydana gelen doymamış akım (kılcallık) ve betonun boşluklarında iki bölge arasındaki mevcut buhar basıncı farkı dolayısıyla meydana gelen su buharı akımıdır. Betonun geçirimsizliği boşluk oranının yanında, boşlukların boyutuna,

dağılımına, şekline ve sürekliliğine bağlıdır. Bunun yanında hidrasyon gelişimi, çimentonun özellikleri ve su/çimento oranı da betonun geçirimsizliğini etkileyen faktörlerdir. Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli faktör betonun geçirimsiz olmasıdır. Uyan, Pekmezci ve Yıldırım (2003) tarafından yapılan çalışmada akışkanlaştırıcı katkıların ve değişik koşulların betonun su emmesi, kılcal su emmesi ve basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. 260, 280, 300 ve 340 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlı katkısız ve katkılı betonlar hava ve suda olmak üzere iki farklı ortamda bekletilmiş, 7 ve 28. günlerde kılcal su emme, su emme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda, havada beklemiş betonlardaki su emme ve kılcal su emme miktarlarının suda kür edilenlere göre daha fazla olduğu ve akışkanlaştırıcı kullanılarak su/çimento oranı düşürülen betonların benzer koşullarda su emme ve kılcal su emme miktarlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı kullanılmasıyla su/çimento oranını düşürmek, basınç dayanımını arttırmak yanında dayanıklılığı da büyük oranda geliştirmektedir. Katkılı betonlarda su/çimento oranı azaldığından ve katkının dispersiyon etkisinden su emme ve kılcal su emme miktarları katkısız betonlardan daha düşüktür. Kılcal olarak emilen su en fazla havada bekletilmiş betonda, en az suda kür edilmiş katkılı betonda olmuştur. Aradaki fark düşük dozajlı betonlarda daha yüksektir. Betona akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile su/çimento oranının indirgenmesi halinde, geçirimsizlikler havada saklama konumunda dahi katkısız betonun suda saklama konumundaki geçirimsizliklerden az olabilmektedir. Ancak kalıcılık açısından daha başarılı bir sonuç sağlanması için katkılı betonların da suda kür edilmesi zorunludur (Uyan ve diğer., 2003).

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik, betonun boşluk yapısı ve oranıdır. Bu durum betonun geçirimsizliği ile doğrudan bağlantılıdır. Dış ortama açık boşluk oranı yüksek olan betonda suyun ve bunun yanı sıra betonda çözülen zararlı gazların ve sıvıların betonun bünyesine girmesi kolay olur. Böylece betonun dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenir. Betonun geçirimsizliği, boşlukların boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Boşlukların boyutu ve dağılımı ise, su/çimento oranı, çimento miktarı, çimento inceliği, çimento tipi, çimentoya ilave veya ikame olarak katılan mineraller, kimyasal katkıları, betonun yerleşmesi, ortam koşulları, kür

koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Ayrıca, hidratasyonun gelişimi ve çimentonun özellikleri de beton geçirimsizliğini etkileyen diğer faktörlerdir. Ertün, Türker ve Başkoca (2005) tarafından yapılan çalışmada, farklı tiplerdeki çimentolardan hazırlanan harçların, farklı su emme koşullarındaki geçirimsizliği ve 28 günlük basınç dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Ayrıca, yine farklı çimentolardan hazırlanan çimento hamurlarının da mikro yapıları incelenmiştir. Çimentolara uygulanan “Basınç altında yüzeysel su emme” ve “Su emme hızı” tayini için kullanılan farklı geçirimsizlik deney metotlarının sonucunda, BS 1881 ile ASTM C 1403’e göre yapılan analizler birbiriyle aynı; buna karşılık TS 4045 Kapiler su emme ve Karsten metotlarının da (Test düzeneği çapı 8 mm, numune ile temas eden alt bölümünde ise 30 mm olan cam tüplerden oluşmaktadır.) birbirine yakın sonuç verdiği tespit edilmiştir. Buna göre, BS 1881 ile ASTM C 1403’e göre yapılan deneylerde geçirimsizlik Portland Çimentosu, kalkerli çimento, sülfata dayanıklı çimento ve beyaz portland çimentosu sırasıyla artmaktadır. TS 4045 Kapiler su emme ve Karsten metotlarına göre ise en geçirimsiz harç kalkerli çimento, geçirimsizliği en yüksek harç ise sülfata dayanıklı çimento ile yapılan harç olmuştur. Çimentoların mikro yapı incelemeleri sonucunda, kalkerli çimentoda diğer çimentolara kıyasla daha yoğun yapı meydana geldiği görülmüştür. Zaten, geçirimsizlik deneyleri sonucunda da en geçirimsiz harcın kalkerli çimento harcı olduğu saptanmıştır. Kalkerli çimentoda en fazla 0,5–1 mikron mertebesinde kılcal boşluklar bulunduğu; buna karşılık, özellikle sülfata dayanıklı çimentoda boşluk boyutlarının 0,5–4 mikron arasında değiştiği tespit edilmiştir. Kalkerli çimentoda, böyle yoğun yapı meydana gelmesinin kalkerin dolgu etkisi nedeniyle olduğu düşünülmüştür (Ertün ve diğer., 2005).

### **3.3 Klor İyon Geçirgenliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

Şengül, Taşdemir ve Sönmez (2003) tarafından yapılan çalışmada ince öğütülmüş (Blaine özgül yüzeyi 604 m<sup>2</sup>/kg) uçucu kül miktarının betonun basınç dayanımına ve hızlı klor geçirimsizliğine etkisi incelenmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0,35 değerinde sabit tutulduğu betonlar üretilmiştir. Her üretimdeki toplam bağlayıcı madde miktarı sabit tutulmuş ve uçucu kül çimento ile %0'dan %70'e kadar yer değiştirilerek

kullanılmıştır. Uçucu külün çimentoyla yer değiştirmesi bire bir ağırlık esasına göre ve %10'luk artımlarla yapılmıştır. Üretilen betonların bir yıllık basınç dayanımları ve ASTM C 1202–97 standardına göre hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları elde edilmiştir. Uçucu külün öğütülmesi sonucu yoğunluk ve incelik gibi fiziksel özellikler değişmektedir. Öğütülme sırasında uçucu kül tanelerindeki boşlukların azalmasıyla uçucu külün yoğunluğunda büyük oranda artış olmaktadır. Uçucu külün yüzey alanının artmasıyla puzolanik aktivite önemli oranda artmaktadır. Yüksek oranlarda uçucu küllü çimento hamurlarında priz süreleri uzamaktadır. 1 yıllık numuneler üzerinde yapılan basınç deneylerinde uçucu külün %40'a kadar kullanılmasıyla elde edilen dayanım, kontrol betonun dayanımından yüksektir. Bu orandan sonra dayanımlarda azalma olmaktadır, ancak %70 oranında uçucu külün kullanıldığı betonlarda dahi bir yıllık dayanım 80 MPa'dır. Bu çalışmada kullanılan numuneler 1 yıl boyunca su içinde tutulmuş örneklerdir. Yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonların hızlı klor geçirimsizliği sonuçları çok düşüktür ve ASTM C 1202'nin belirttiği “klor geçirimsizliği ihmal edilebilir beton” sınırına çok yakındır (Şengül, Taşdemir ve Sönmez, 2003).

Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu (2003) tarafından sunulan çalışmanın amacı, çok ince öğütülmüş uçucu kül ve yine çok ince öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonun klor geçirimsizliği ve basınç dayanımına olan etkilerini incelemektir. Yapılan çalışmada 0,38 ve 0,6 su/bağlayıcı oranlarında iki seri beton üretilmiştir. Her bir su/bağlayıcı oranında çimentonun ağırlıkça % 50'si, i) çok ince öğütülmüş uçucu kül, ii) çok ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve iii) ince öğütülmüş kül-cüruf karışımı ile yer değiştirilmiştir. Ayrıca, mineral katkı içermeyen kontrol karışımları da hazırlanmış; böylece toplam 8 farklı beton karışımı elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir: Çimentonun ağırlıkça % 50 oranında ince öğütülmüş uçucu kül veya yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesiyle 0,6 su/bağlayıcı oranında 34 MPa'nın üzerinde basınç dayanımına ulaşan betonlar elde edilmiştir. 0,6 su/bağlayıcı oranında, sadece Portland çimentosu ile yapılmış betonun basınç dayanımı, çimentonun % 50 oranında ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilen betonun dayanımları aynıdır. % 50 oranında ince öğütülmüş uçucu kül kullanılması durumunda bile dayanım 72

MPa'nın üzerindedir. Mineral katkı kullanımı betonun klor geçirimsizliğini büyük ölçüde etkilemektedir. 0,6 su/bağlayıcı oranında, mineral katkı kullanılan betonların klor geçirimsizlikleri arasındaki fark, deney gününe bağlı olarak yaklaşık 7 ila 34 kat daha azdır. Bu durum 0,38 su/bağlayıcı oranı için de söz konusudur. Sadece Portland çimentosu kullanılarak üretilmiş 0,38 su/çimento oranına sahip betonun klor geçirimsizliği, 0,6 su/bağlayıcı oranına sahip ince öğütülmüş uçucu kül veya yüksek fırın cürufu ile üretilmiş betonların klor geçirimsizliğinden en az iki kat daha yüksektir. Dayanımı yüksek betonu yüksek performanslı beton olarak sınıflandırmanın doğru olmadığı anlaşılmaktadır. Klor geçirimsizlikleri zamanla azalmaktadır (Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu, 2003).

Şengül ve Gjörv (2005) tarafından sunulan bu çalışmanın temel amacı ince öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonda klor yayılımına etkisini incelemektir. Yapılan deneysel çalışmada; aynı su/çimento oranına sahip betonlarda çimento ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile %40, %60 ve %80 oranlarında yer değiştirilmiştir. Blaine özgül yüzeyi 5000 cm<sup>2</sup>/gr olan cürufun çimentoyla yer değiştirmesi bire bir ağırlık esasına göre yapılmıştır. Üretilen betonlarda klor iyonu yayılımı ve elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar cüruf ilave edilmesinin betonların klor iyonu geçirimsizliklerinin önemli oranda azalttığını ortaya koymuştur. Cüruf içeren betonların elektriksel özdirençleri de, sadece portland çimentosu ile üretilen betonlara göre büyük oranlarda artmıştır. Çimentonun öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi betonda hızlandırılmış klor yayılımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma, 7 gün gibi erken yaştaki betonlarda da gözlenmiştir. Klor yayılımındaki düşüş 28 günlük betonlarda çok daha belirgindir. Klor yayılımındaki azalma cüruf yer değiştirme oranıyla yakından ilgilidir. Çimentonun cürufu ile yer değiştirme oranı arttıkça klor yayılımı azalmaktadır. Cüruf içeren betonların elektriksel özdirenci 7 gün ve sonraki yaşlarda çok daha yüksektir. Cüruf oranının artmasıyla birlikte özdirenç de artmaktadır. Betonda klor yayılımı ile özdirenç arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Elektriksel özdirenç ölçümlerinin, yapı inşa sürecinde, elde edilen beton klor geçirimsizliklerinin izlenmesi ve kalite kontrolü için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır (Şengül ve Gjörv, 2005).

Dışarıdan gelen saldırılara karşı çimento içerikli malzemelerin kalıcılığı, inşaat mühendisliğinde önde gelen konulardan biridir. Örneğin, tuzlu ortamla (köprülerdeki deniz suyu, yollardaki buz-çözücü tuzlar, vb.) temas halinde olan beton yapılarındaki hasar oldukça büyük önem teşkil eder. Tuzlu suya maruz kalmanın da ötesinde, Cl<sup>-</sup> iyonları yapının içine sızarak donatı korozyonuna sebep olur. Klor saldırısı, sıcaklık veya diğer iyonların girişi gibi etkenlerle birleşir. Bu sebeple, Barberon ve diğer. (2005) tarafından yapılan çalışmada, (NaCl)'nin, çimento kimyası üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Klor iyonları sebebiyle oluşan donatı korozyonu hakkında var olan çalışmalar, Cl<sup>-</sup> iyonlarının girişi ve serbest iyonlarla bağlı iyonlar arasındaki kıyaslama (yerleşme mekanizması) üzerine odaklanmıştır. Fakat çimento matrisinin içinde Cl<sup>-</sup> iyonlarının yerleşmesi ve çimento hamurunun hidrate fazındaki Cl<sup>-</sup> ile silikat ve alüminat arasındaki yapısal etkileşim hakkında çok az bilgiye sahip bulunmaktadır. Bu çalışmada, klor iyonu yerleşme mekanizması ve yeni fazların oluşması üzerine yapılan çok çekirdeksel nükleer manyetik rezonans deneyi sonuçları sunulmuştur. Nükleer manyetik rezonans, klor iyonları ile çimento hidratları arasındaki etkileşimi araştırmak için güçlü bir alettir. <sup>29</sup>Si, <sup>27</sup>Al, <sup>35</sup>Cl atom çekirdekleriyle, kinetik ve spektroskopi deneyleri yapılmıştır. Sodyum, hidrasyondan etkilenmez görünürken; klor iyonları, çimento bileşenleriyle yaptığı kimyasal reaksiyonlar sonucu çok hızlıca yok olmaktadır. <sup>27</sup>Al ve <sup>29</sup>Si spektroskopisi, sadece alüminyumun klor iyonlarıyla etkileşim halinde olduğunu ve NaCl'ye maruz kalan betonun artan çimentosunun da C-S-H ürününün etkilemeden tekrar hidrasyona uğradığını kanıtlamıştır. <sup>35</sup>Cl spektroskopisi, malzeme kurduğunda klor iyonlarının yokluğunu göstermiştir. Klora maruz kalan beton malzemedeki, sadece katı ve yüzeyde biriken klor gözlemlenebilmiştir (Barberon ve diğer., 2005)

Deniz altında bulunan beton yapılar için klor difüzyon katsayısının tahminine yarayan klor konsantrasyonu, deniz suyundaki klor konsantrasyonu olarak tanımlanabilir. Fakat deniz suyuyla direk temas halinde olmayan, deniz kıyısında yer alan beton yapılar için arayüz klor içeriğini belirlemek hassas bir uğraştır. Ayrıca beton yapılar, havadan gelen deniz tuzlarının saldırısından çok fazla etkilenir, bu saldırı donatı korozyonu şeklinde gözlemlenebilir. Lee ve Moon (2006) tarafından

yapılan çalışma, yapının kıyıda olan uzaklığına bağılı olarak havadan saldıran deniz tuzlarının Güney Kore sahillerinde bulunan 73 nokta ve 27 bölgede olmak üzere 1 yıllık ölçümlerini göstermektedir. Sonuçlar, kıyı bölgelerdeki tuzluluk değişimlerini, mevsim rüzgârlarının sebep olduğu belirgin etkilerle beraber ortaya çıkarmaktadır. Tuzluluk, mevsim rüzgârlarının estiği veya geniş bir dağla kesişen alanlarda dönemlere ve yönere göre değişen eğilimler sergilemektedir. Özellikle, mevsim boyunca rüzgârın denizden karaya esmesi ile yüksek tuzluluk oranı gözlemlenmiştir. Denizden olan uzaklığa göre tuzluluk oranı, uzaklık arttıkça  $y=ax^{-b}$  fonksiyonu ile orantılı olarak azalma eğilimindedir. Denizden olan uzaklık 100–150 m aralığında iken tuzluluğun ani bir azalma gösterdiği görülmüştür (Lee ve Moon, 2006).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ihtiva eden çimentolar dünyada yaygın biçimde mevcuttur. Kalıcılığı yüksek beton elde etmek için yüksek mukavemetle birlikte düşük geçirimlilik özelliği önem arz etmektedir. Kutlu ve Demiriz (2007) tarafından yapılan çalışmada, CEM III/A 42,5N tipi çimento ile üretilmiş betonların CEM I 42,5R ve CEM II/B-S 42,5R tipi çimentolarla üretilmiş betonlara göre su ihtiyaçları, 2–7–28 günlük dayanımları, ASTM C 1202'ye göre klor geçirimlilikleri ve TS EN 12390-8'e göre su işleme derinliklerinin tayini karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca CEM I 42,5 R ve CEM III/A 42,5N tipi çimentolarla üretilmiş Kendiliğinden Yerleşen ve Sıkışan Betonların (KYB) 2–7–28 günlük dayanımları, ASTM C 1202'ye göre klor geçirimlilikleri ve TS EN 12390-8'e göre su işleme derinliklerinin tayini karşılaştırmaları yapılmıştır. Hızlı klor geçirimliliği ve basınçlı su geçirimliliği deneylerinde çimento cinsinin etkili olduğu ve CEM III tipi çimentolu örneklerin CEM I ve CEM II'li örneklere göre çok daha düşük geçirimliliğe sahip olduğu sonucu görülmektedir. Kalıcılığın vazgeçilmez şartlarından biri olan geçirimsizlik açısından cürufu çimentoyla yapılan betonların çelik donatıyı korumada çok önemli bir görev üstlendiği söylenebilir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ihtiva eden CEM III tipi çimentolarla yapılan örneklerin basınç mukavemetleri incelendiğinde 2. ve 7. gündeki değerlerin diğer çimento tipleriyle yapılan örneklere göre bir miktar daha düşük, fakat 28.gün değerlerinin ise denk ve/veya daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 28 gün sonra elde edilen basınç mukavemet değerlerine göre yapılan birim maliyet çalışmasında CEM III tipi



çimentoyla yapılan örneklerin CEM I tipi çimentoyla yapılan örneklere göre % 11 daha ekonomik olduğu, KYB örneklerinde ise bu farkın %21'e kadar yükseldiği görülmektedir. Küresel ısınmanın dünyamızı tehdit ettiği günümüzde 1 ton klinker üretiminin atmosfere 1 ton karbondioksit gazı vermek anlamına geldiği düşünülürse demir-çelik sanayinin atık malzemesi olan cürufra yapılacak çimentolar hava kirliliğinin ve emisyon değerlerinin azalmasında önemli bir katkı sağlayacak, çimento üretiminde tasarruf edilen klinker miktarı kadar karbondioksit çıkışı azalacaktır (Kutlu ve Demiriz, 2007).

Chindapasirt, Chotithanorm, Cao ve Sirivivatnanon (2007) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli inceliklerde uçucu kül içeren betonların klor iyon geçirgenlikleri ölçülmüştür. Blaine incelikleri sırasıyla 270, 390, 450 m<sup>2</sup>/kg olan; kaba, orta ve ince olarak sınıflandırılan üç farklı uçucu kül inceliği kullanılmıştır. %3 NaCl çözeltisine tamamen batırılmış ve kısmen batırılmış örnekler farklı kür periyotları sonrası ASTM C1202 standardına göre klor iyon geçirgenliği testine tabi tutulmuştur. Çıkan sonuçlardan, betonların klor geçirgenliğine karşı direncinin uçucu kül inceliğine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği deneyi, 28 günlük betonun Coulomb değerinin uçucu kül eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Ve bu değer, uçucu kül inceliği arttıkça daha da azalmaktadır. Geçirgenlik direncindeki artış, azalan su/bağlayıcı oranı, ortalama gözenek boyutundaki azalma ve ara-yüz bölgesinin gelişimi ile doğru orantılıdır. Kesilmiş silindir örneklerinin %3'lük NaCl çözeltisinde 3 ve 6 ay boyunca bekletilmesi sonrası çıkan sonuç, betonun klor iyon geçirgenliğine karşı direncinin uçucu külün inceliğinin arttırılmasıyla yükseldiğini pekiştirmiştir (Chindapasirt ve diğer., 2007).

Han (2007) tarafından yapılan çalışmada, klor iyonu bağlayıcılığı ve buharlaşabilen suyun difüzyon katsayısı üzerindeki etkilerini hesaba katan bir uyarlanmış difüzyon katsayısı önerilmiştir. "Uyarlanmış difüzyon katsayısı"na bağlı "sonlu elemanlar metodu" programı, beton derinliği ile iç ve dış koşullara göre klor iyonu konsantrasyonunu tahmin eder. Tahmin edilen klor iyonu konsantrasyonu, deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş program, serbest klor iyonu konsantrasyonunun deneysel profilini tahmin eder. Tahmin edilen klor

konsantrasyonu, deneysel değerlerden daha yüksektir. Klor bağlayıcılığının, buharlaşabilen su miktarının ve difüzyon katsayısının fonksiyonu olan uyarlanmış difüzyon katsayısı, su/imento oranına göre değişir. Ayrıca, klor bağlayıcılığı üzerinde etkisi olan  $C_3A$  içeriği uyarlanmış difüzyon katsayısını değiştirir. İ ve dış koşulların nümerik analizi, klor iyonu geçirgenliğini azaltmanın en etkili yolunun su/imento oranını düşürmek olduğunu gösterir. Kr sıcaklığı ve  $C_3A$  içeriği klor iyon geçirgenliğini değiştirmesine rağmen, su/imento oranından daha az etkilidir (Han, 2007).

Hossain (2008) tarafından yapılan çalışmada, ASTM Tip I,II ve V imentoları ve %30'a kadar farklı oranlarda ince öğütülmüş pomza içeren harmanlı çimentolar 1 yıl süresince deniz suyunda bekletilmiştir. Yerinde döküm koşullarının benzeri olacak şekilde farklı karışım suyu kombinasyonları ve başlangıç kr koşulları ile önceden döküm koşulları üzerinde çalışılmıştır. %10 ile %20 oranları arasında olacak şekilde pomzayla ğtlmş Tip I ve Tip II imentoları deniz suyu saldırısına karşı, düşük  $C_3A$  içeriğine sahip Tip V çimentosundan daha iyi direnç sağlamıştır. Pomza içerikli beton karışımlarının performansı, dayanım azaltma ölçütüne göre değerlendirilmiştir ve hızlı klor geçirgenliği, porozite, diferansiyel tarama kalorimetre testi sonuçlarıyla desteklenmiştir. %10 ila %20 pomza içeriğine sahip Tip I imentosunun deniz suyuna dayanıklılık amaçlı iyi bir seçim olduğu sonucuna varılmıştır. Önceden döküm koşullarının, deniz suyunun zararlı etkisini yerinde döküm koşullarından daha çok hafiflettiği sonucuna ulaşılmıştır. Kontrol rnekleriyle kıyaslandığında, deniz suyunun beton basınç dayanımını azalttığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında görülen Friedel Tuzu'ndan çıkarım yapıldığı üzere, yüksek  $C_3A$  içerikli Tip I imentosunun yüksek klor bağlama kapasitesi, Tip I imentosunun %10-20 pomzayla modifiye edilmiş halinin denizel etkiye karşı koyabileceği konusunda yararlı bir yaklaşım olmuştur (Hossain, 2008).

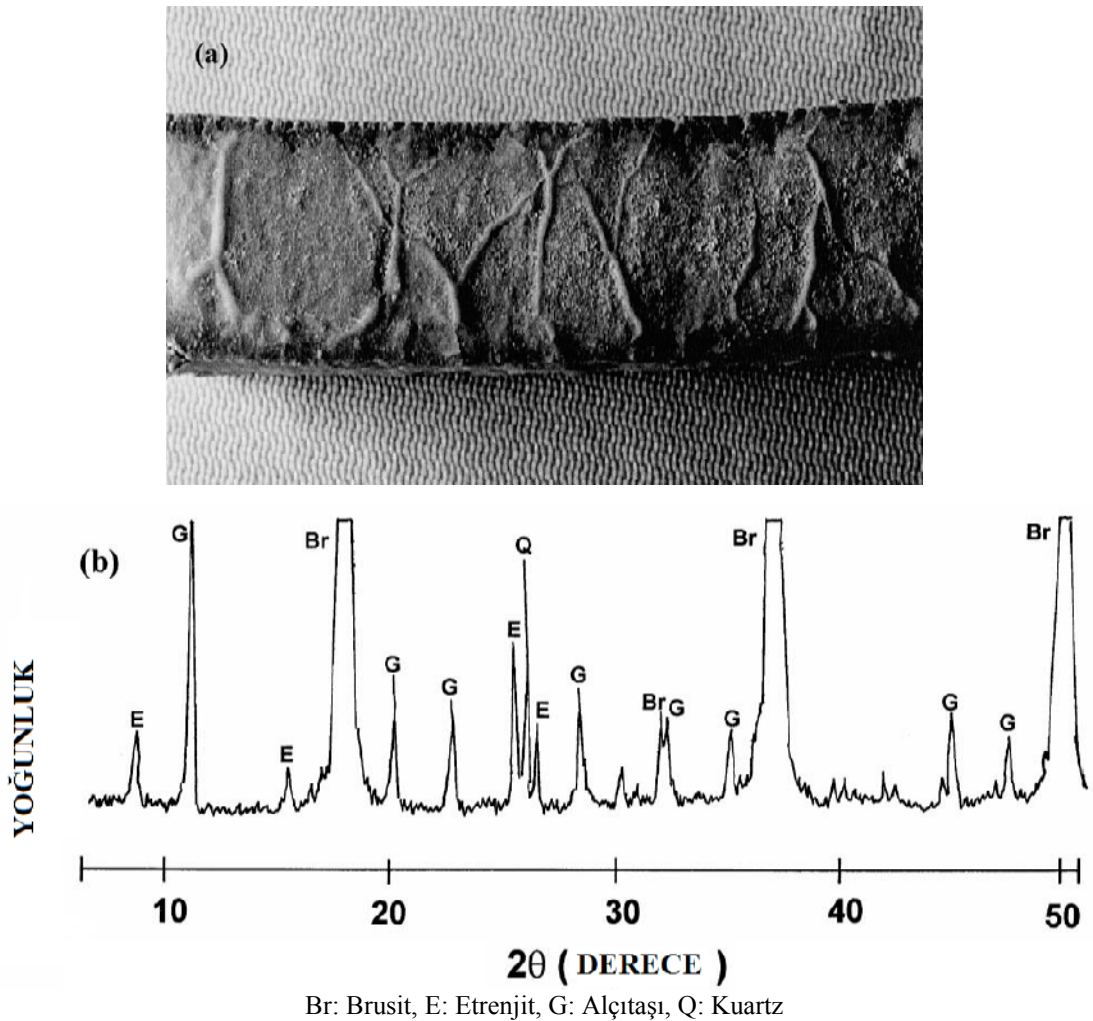
### **3.4 Klor İşleme Derinliği ve Mekanik zelliklerin ölçümü ile İlgili Yapılan alışmalar**

Kumar (2000) tarafından yapılan çalışmada, karışım suyunun ve başlangıç kr koşullarının deniz suyu saldırısına maruz kalan betonun dayanımı üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Denizel ortamda yerinde döküm ve önceden döküm koşullarının benzeri olan karışım suyu ve başlangıç kür yöntemlerinin kombinasyonu oluşturulmuştur. Karışım suyu ve başlangıç kürünün denizel ortamdaki betonun dayanımı üzerindeki etkileri, farklı uçucu kül değişim oranları ve çimento tipi kullanılarak incelenmiştir. Sade çimento, Tip I, II, V çimentoları ve uçucu külle harmanlanmış çimento ile hazırlanan beton örnekleri 1 yıl boyunca denizel etkiye maruz bırakılmıştır. Betondaki çimentoların performansı, basınç dayanımındaki azalma ile değerlendirilmiştir. Denizel etki, betonun basınç dayanımını yaşla ters orantılı olarak azaltmıştır. Tip I ve Tip II çimentolarının %10 ve %20 oranlarında uçucu külle harmanlanması bu çimentoların deniz suyu saldırısına dirençlerini arttırmıştır. Uçucu külün kullanıldığı, düşük  $C_3A$  içeriğine sahip Tip V çimentosu, Tip I ve Tip II portland çimentoları ile karşılaştırıldığında denizel etkiye diğerlerinden daha dirençli olmadığı görülmüştür. Çalışmanın sonucunda, beton örneklerinin önceden döküm ile hazırlanmasının beton örnekleri üzerindeki denizel etkiyi azalttığı görülmüştür. Yüksek  $C_3A$  içeriği sayesinde yüksek klor bağlama kapasitesine sahip olan Tip I çimentosunun, uygun bir puzolanla harmanlandığında denizel ortamlar için yararlı olacağı düşünülmüştür (Kumar, 2000).

O'Farrell, Wild ve Sabır (2000) tarafından yapılan çalışmada, öğütülmüş tuğla ile harmanlanmış yüksek  $C_3A$  içerikli çimentonun kısmi yer değişimi araştırılmış ve öğütülmüş tuğla harcının yapay deniz suyuna karşı direnci ile dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Yapay deniz suyunun bileşimi, sodyum klorür 30 g/l, magnezyum klorür 6 g/l, magnezyum sülfat 5 g/l, kalsiyum sülfat 1,5 g/l, potasyum hidrojen karbonat 0,2 g/l şeklindedir. Genleşmeye karşı harç direncinin genellikle arttığı ve çimento ile %30 oranında yer değiştiren öğütülmüş tuğla miktarının ise dayanım kayıplarını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Fakat çimento ile değişik yüzdelerle kısmen yer değiştiren öğütülmüş tuğla tiplerinin, deniz suyuna karşı dirençlerinin farklı oranlarda olduğu sonucuna varılmıştır. Bu farklılıklar, kimyasal çeşitliliğe ve öğütülmüş tuğlanın faz bileşimlerine atfedilmiştir. Sülfat içeriği, cam içeriği ve oksit kimyası, genleşmeye karşı direnç sağlayan öğütülmüş tuğlanın etkinliğinin belirlenmesinde en önemli faktördür. Yüksek oranda CaO içeriğine, düşük oranda cam içeriğine ve düşük oranda sülfat içeriğine sahip olan öğütülmüş tuğla, harcın

deniz suyuna olan direncini azaltmış ve genişleme değerini arttırmıştır. Deniz suyuna maruz kalan harcın üzerinde brusit tabakası oluşmuş ve bunun da altında alçıtaşı tabakası meydana gelmiştir. Şekil 3.8’de tabakalaşma görülmektedir. Bu tabakalar sülfat saldırısına engel olarak genişlemeyi geciktirmiştir. Bu yüzey tabakalarının oluşumu, çimentonun öğütülmüş tuğla ile kısmi yer değişimi sonucu azaltılmıştır. Öğütülmüş tuğlanın içindeki az miktardaki sülfat oranı, öğütülmüş tuğla harcında herhangi bir zararlı etkiye sebep olmamıştır ve hatta yararlı olduğu söylenebilir (O’Farrell ve diğer., 2000).



Şekil 3.8 (a) Kontrol harcının 462 günlük kürü sonucu üzerinde görülen kristal tortu, (b) bu tortunun XRD (X-Ray Diffraction) analizi (O’Farrell ve diğer., 2000)

Memon, Radin, Zain ve Trottier (2002) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı olarak adlandırılan

mineral ve kimyasal katkıların gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı ve yüksek dayanımlı betonun deniz suyu koşullarında ölçülen basınç dayanımı araştırılmıştır. Bu çalışmada, ağırlıkça %0, %30 ve %70 oranında üç farklı çimento değişim kademesi kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı  $420 \text{ kg/m}^3$ 'tür. 28 günlük basınç dayanımı 54 ve 63 MPa aralığında olacak şekilde, 0,4 su/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. 364. günde, örneklerin basınç dayanımı 59–74 MPa aralığında sıralanmıştır. Yüksek dayanımlı betonun 6. ayda gözenek boyutu dağılımı incelenmiş ve ortalama gözenek yarıçapının normal portland betonuna kıyasla 3 kat azaldığı görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, gelgit bölgesindeki deniz suyuna maruz bırakılan %30 ve %70 oranındaki beton karışımlarının normal portland çimentosundan daha iyi performans gösterdiğini sergilemiştir. Bu nedenle, üretilen her iki yüksek dayanımlı betonun da sert deniz suyu koşullarına ciddi bir bozulma göstermeden karşı koyduğu düşünülmüştür (Memon ve diğer., 2002).

Beton teknolojisinde son çeyrek asırda önemli gelişmeler olmuştur. Örneğin, günümüzde genellikle geçmişe kıyasla daha fazla  $\text{C}_3\text{S}$  içeren, daha ince öğütülmüş, dolayısıyla erken dayanımı yüksek çimentolar kullanılmaktadır. Ayrıca, kimyasal katkılar beton üretiminin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu durum, inşaat hızlarında önemli artışlara yol açmış ve istenen beton dayanımının daha az çimento kullanarak elde edilmesine olanak tanımıştır. Bu olgu ilk bakışta zaman ve malzeme tasarrufu ile doğal kaynakların daha verimli kullanıldığı izlenimini doğursa da, yetmişli yıllarda üretilen betonarme yapıların otuzlu yıllarda üretilenlerden bile daha dayanıksız oldukları gerçeği de gözden kaçırılmamalıdır (Yazıcı ve diğer., 2003).

Betonarme yapıların kalıcılığı büyük ölçüde geçirimsizlik özelliklerine bağlıdır. Geçirimsizliğin belli mertebelerin altında tutulabilmesi için su/çimento oranının ve kullanılacak en az bağlayıcı miktarının- istenen beton dayanımını sağlamak için gerekli olmasa bile- sınırlandırılması gereklidir. Aslında, beton sınıfının kalıcılık ön planda tutularak seçilmesi ve istenen beton dayanımı elde edilirken minimum bağlayıcı miktardan taviz verilmemesi en doğru yaklaşımdır (Yazıcı ve diğer., 2003).

Yazıcı, Türkel, Yiğiter ve Aydın (2003) tarafından yapılan çalışmada iki farklı tipte çimento (PÇ 42,5, CÇ 42,5) ile üç değişik su/çimento oranı (0,43, 0,53, 0,63) ve üç farklı çimento dozajı ( $250 \text{ kg/m}^3$ ,  $350 \text{ kg/m}^3$ ,  $450 \text{ kg/m}^3$ ) kullanılarak beton örnekleri hazırlanmış ve örnekler 60 gün boyunca deniz suyuna tekrarlı ıslanma-kuruma şeklinde maruz bırakılmıştır. Böylece 30 ıslanma-kuruma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları belirlenen örnekler, su/çimento oranlarına ve içerdikleri çimento miktarlarına göre deniz suyuna maruz kalmamış kontrol örnekleri ile kıyaslanmıştır. Sabit su/çimento oranlarında çimento dozajı basınç ve yarmada çekme dayanımlarını büyük oranda etkilemektedir. Örneğin, çimento dozajının  $250 \text{ kg/m}^3$ 'e düşmesi özellikle Portland çimentosu içeren karışımlarda dayanımlarda düşüslere yol açmıştır. Bu bulgu çimentonun agrega tanelerini sarmada yetersiz kalması ile açıklanabilir. Karışımlarda su/çimento oranının artması, beklendiği üzere basınç ve yarmada çekme dayanımlarını azaltmıştır. Bu bulgu ile çelişen tek sonuç su/çimento oranı 0,43 olan ve  $250 \text{ kg/m}^3$  PÇ içeren seriden elde edilmiştir. Bu durum, bu karışımda işlenebilirliğin çok kötü olmasına bağlanabilir. Karışımda kullanılan çimento miktarının aşırı azalması işlenebilirliği kötüleştirmektedir. Bu sorun aşırı miktarda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile çözülememekte, aksine oluşan stabilite problemleri (su kusma v.b.) basınç ve yarma dayanımlarında önemli düşüslere yol açmaktadır. Cürüflu çimento içeren karışımlar Portland çimentosu içeren karışımlarla kıyaslandığında, CÇ'nin işlenebilirliği iyileştirdiği, hemen her yaşta yarmada çekme ve basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum CÇ'nin daha ince olması ile açıklanabilir. Ayrıca PÇ içeren karışımlar 28 günün ötesinde önemli oranda dayanım kazanmazken, CÇ içeren karışımlar puzolanik reaksiyon sayesinde dayanım kazanmaya devam etmiştir. Tüm karışımların deniz suyu etkisi sonrası elde edilen yarmada çekme ve basınç dayanımları 28 günlük dayanımlarından daha yüksektir. Bu çalışmada kullanılan  $100 \times 200 \text{ mm}$  boyutlu beton örneklerinin yüzey alanlarının hacimlerine göre düşük olması deniz suyunun örneklere etkisinin yüzeysel kalmasına yol açmıştır. Dolayısıyla, daha kesin yargılara varabilmek için ıslanma-kuruma tekrar sayısının artırılmasının veya örnek boyutlarının küçültülmesinin gerektiği düşünülmektedir. CÇ içeren karışımlarda deniz suyu etkisi ile dayanımlarda genellikle artışlar elde edilmiştir. Bu durum deniz suyunda bulunan

klorür ve sodyum iyonlarının puzolanik reaksiyonu arttırması ile açıklanabilir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Bai, Wild ve Sabır (2003) tarafından yapılan çalışmada, Portland çimentosu (PC)-toz yakıt külü (PFA)-metakaolin (MK) bağlayıcılarının bileşiminin, yapay deniz suyuna maruz kalan PC-PFA-MK betonun klor geçirgenliği ve dayanım gecikmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapay deniz suyunun bileşimi 30 g/l NaCl, 6 g/l MgCl<sub>2</sub>, 5 g/l MgSO<sub>4</sub>, 1,5 g/l CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O ve 0,2 g/l KHCO<sub>3</sub> şeklindedir. %10, %20, %30 ve %40 değişim oranlarında çimento içeren ve değişik MK:PFA oranlarına sahip olan PC-PFA-MK betonu 1,5 yıl boyunca yapay deniz suyuna maruz kalmıştır. Klor konsantrasyonu – işleme derinliği profilleri ve bir dizi bağlayıcı kompozisyonu ile değişik kür zamanları için basınç dayanımı değişimi, kontrol betonlarıyla kıyaslanmıştır. PC betonuna ve PC-PFA betonuna, MK ile birlikte öğütülmüş bağlayıcı dâhil etmek, betonun basınç dayanımının hasar faktörünün azalmasını ve deniz suyuna maruz kaldığı andaki klor geçirimliliği direncinin artmasını sağlamıştır. Klor işleme derinliğindeki azalmalar, PC'nin PFA ve MK ile yer değişiminin miktarındaki artışla ve kür süresinin uzatılmasıyla azalmıştır. Bu durum, gerçek difüzyondaki bağıl değişimlerine ve değişik bağlayıcı içeriklerindeki yaşla değişen klor bağlama kapasitesine atfedilmiştir. Üçlü halde PC-PFA-MK öğütülmesi durumunda, MK'nın klor konsantrasyonu ve işleme derinliği üzerinde olumlu etkiye yol açtığı gözlemlenmiştir. 2 ve 4 ay gibi kısa kür sürelerinde, artan MK miktarının azalan klor içeriği ve işleme derinliğiyle sonuçlandığı gözlemlenmiştir. PFA ile PC'nin %30 oranında yer değişiminin, hem klor konsantrasyonu hem de işleme derinliğini uzun kür sürelerinde azalttığı gözlemlenmiştir. MK miktarındaki artış ve PFA miktarındaki azalış sonucunda, suda kür edilen örneklerde erken basınç dayanımında (28 gün) artış gözlemlenmiştir. 18 ay gibi uzun kür sürelerinde ise hem MK hem de PFA miktarlarının dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir. İkili (PC-PFA) ve üçlü (PC-PFA-MK) kompozisyonların, deniz suyunda bekletilen betonun basınç dayanımında kontrol betonu ile kıyaslandığında önemli gelişmelere olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Deniz suyunda bekletilen betonun basınç dayanımındaki gecikmeler, kontrol betonunun ve PC-PFA betonunun MK ile birlikte öğütülmesi sonucunda azalma kaydetmiştir (Bai ve diğer., 2003).

Bader (2003) tarafından yapılan çalışmada, sahil şeridinde yeraltı koşullarına maruz kalan betonun performansı değerlendirilmiştir. Çeşitli su/çimento oranları, çimento içerikleri, polimer/epoksi katkıları ve çeşitli konsolidasyon yöntemleri ile hazırlanan beton örnekleri sahil şeridinde 4,5 yıl boyunca yeraltı koşullarına maruz bırakılmıştır. Ortamdaki yüksek klor ve sülfat içeriğine maruz kalan örnekler, klor difüzyonu ve sülfat saldırısı sonucu basınç dayanımında meydana gelen azalma açısından incelenmiştir. Sonuçlar, su/çimento oranı ve çimento içeriği gibi karışım parametrelerinin klor difüzyonu ve sülfat direncini etkilediğini ortaya koymuştur. Azalan su/çimento oranında ve zengin karışımda, klor difüzyonu azalmıştır. Benzer şekilde, konsolidasyon seviyesi ve kür periyodu saldırgan ortamda betonun performansını etkilemiştir. Klor difüzyonu, konsolidasyon seviyesi ve kür periyoduyla ters orantılıdır. Lateks ve epoksi ile modifiye edilmiş betonun performansı, polimer emdirilmiş betondan daha iyi olmuştur. Sahildeki zeminde gömülü olarak bekletilmiş latex ve epoksi ile modifiye edilmiş beton örneklerinin basınç dayanımı, laboratuarda bekletilen benzer örneklerin dayanımından düşük olmuştur. Bu durum, bu katkıların suda değil havada daha etkili şekilde polimerize olduklarını göstermiştir. Yeraltında gömülü olarak bekletilen diğer beton örneklerinin basınç dayanımı ise laboratuarda bekletilenlere oranla artış sergilemiştir. Bunun nedeni, hızlanan çimento hidratasyonu olarak düşünülmüştür. En yüksek dayanımı, 0,4 su/çimento oranına sahip beton örnekleri vermiştir. Yüksek su/çimento oranına sahip beton örneklerinde sülfat saldırısı daha şiddetli hissedilmiştir (Bader, 2003).

Mohammed, Hamada ve Yamaji (2004) tarafından yapılan çalışma, gelgit ortamında uzun süre bekletilen, deniz suyuyla ve çeşme suyuyla yapılan betonda yer alan çelik donatının basınç dayanımı, mineral özellikleri, klor girişi ve korozyonu incelenmiştir. Deniz suyuyla hazırlanan beton, erken dayanım gelişimi göstermiştir. 20 yıllık süre sonrasında deniz suyuyla ve çeşme suyuyla hazırlanan betonların basınç dayanımları arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Karışımlarda deniz suyu kullanılması, çeşme suyu kullanımıyla kıyaslandığında daha derin korozyona sebep olmuştur (Mohammed ve diğer., 2004).



Thomas ve Matthews (2004) tarafından yapılan çalışmada, çelik donatılı 100x100x300 mm boyutunda ve C25, C35, C45 dayanım derecesine ve farklı uçucu kül oranlarına (0-%50) sahip beton prizmalar, Yapı Araştırma Kurumu'nun gelgit bölgesinde bekletilmeden önceki ilk 28 gün boyunca çeşitli kür davranışlarına maruz bırakılmıştır. Klor içeriği profilleri ve çelik donatı ağırlık kayıpları, 1, 2 ve 4 yıllık kür süresine tabi tutulmuş örnekler için ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, 10 yıllık kür süresi sonunda alınan benzer ölçümler de sunulmuştur. Klor profilleri, laboratuvar koşullarındaki deniz suyunda bekletilmiş 1 ve 28 günlük örnekler için de ölçülmüştür. Uçucu küllü betonlar, Portland çimentosu içeren kontrol betonlarıyla kıyaslandığında, klor iyonlarının girişine yeteri kadar çok direnç göstermiştir. Uçucu küllü betonun klor geçirimsizliğe karşı gelişen direnci beton içindeki donatının korozyonunu azaltmıştır. Uçucu kül miktarının artırılması, klor işleme miktarının daha da azalmasını sağlamıştır. Deniz suyunda bekletilen örneklerin 28 gün sonra ölçülen klor içerik profilleri, suya doymun olmayan beton örneğine kapiler emme yoluyla klor girişi olduğunu göstermiştir. Deniz suyundaki 10 yıllık süre sonrasındaki sonuçlar, 2 yıllık sonuçlarla kıyaslandığında normal portland çimentosu örneklerinin ve %15 uçucu kül içeren örneklerin basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. %30 ile %50 arasında uçucu kül içeren betonlarda ise dayanım kaybı ölçülmemiştir. %30 veya daha fazla oranda uçucu kül içeren betonun denizel etkiye maruz kalma durumlarında üstün performans sağladığı görülmüştür. Beton sınıfının yükseltilmesi, uçucu kül eklenmesine oranla klor işleme seviyelerini daha az etkiler (Thomas ve Matthews, 2004).

Yazıcı (2008) tarafından yapılan çalışmada, çimento ile C tipi uçucu kül %30 ve %60 oranlarında yer değiştirmiştir. Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun çeşitli karışımlarının donma-çözülme ve klor işleme derinliği yanında mekanik özellikleri araştırılmıştır. Aynı testler, aynı beton karışımlarına %10 silis dumanı eklenerek tekrarlanmıştır. Test sonuçları, kendiliğinden yerleşen betonun yüksek hacimde uçucu kül kullanımıyla elde edilebileceğini göstermiştir. Sisteme %10 silis dumanı eklenmesi, taze ve sertleşmiş “yüksek performanslı, yüksek hacimli uçucu küllü kendiliğinden yerleşen beton”un özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Hazırlanan karışımlar az bir çimento içeriğine sahip olmasına rağmen, mekanik

özellikleri, donma-çözülme ve klor geçirimsizlik direnci iyidir. Bu karışımların hidrasyon ısı ve büzülme, yüksek hacimde portland çimentosuyla yapılmış kendiliğinden yerleşen betondan düşük değerdedir. %10 silis dumanı kullanımı esnasında %50 uçucu kül değişimine kadar elastisite modülü etkilenmemiştir. %50'den daha yüksek oranlarda uçucu kül eklenmesi, elastisite modülünde azalmaya sebep olmuştur (Yazıcı, 2008).

Denizel etkiye sahip ortamlar klor kaynaklı donatı korozyonu nedeniyle betonarme yapılar için saldırgan ortamlardır. Lindvall (2007) tarafından yapılan çalışmada, bir adet beton kompozisyonu ile hazırlanmış örnekler Şekil 3.9'da görüldüğü gibi dünyanın 12 ayrı noktasında deniz suyuna maruz bırakılmıştır ve bu örneklerin eşleniği olan örnekler de laboratuvar koşullarında kür edilmiştir. Çalışma 2000 yılında başlayıp 2001 yılı sonunda bitmiştir ve 12 ayrı noktada deniz suyuna maruz bırakılan örneklerin maruz kalma süreleri birbirinden farklı olmuştur. Kür koşullarının doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için örnekler deniz altında sabitlenmiştir. Çalışmanın amacı, deniz suyuna maruz kalma koşullarının (tuzluluk, sıcaklık) betonarme üzerindeki etkisini klor girişi sayesinde nicelik bakımından belirlemektir. Denizde bekletilen örneklere klor girişi üzerindeki başlıca etken deniz suyunun sıcaklığıdır, ikinci etken ise tuzluluk oranıdır. Laboratuvar örnekleri için ise başlıca etken tuzluluk oranı olmuştur. Bu farklılığın sebebi tam olarak bilinmemekle birlikte, maruz kalma koşullarının (örneğin pH) farklılaşması olarak tahmin edilmiştir (Lindvall, 2007).



1. Banyuls sur Mer (Fransa)
2. Cascais (Portekiz)
3. Dubai\* (Birleşik Arap Emirlikleri)
4. Eastern Scheldt (Almanya)
5. Hirtshals (Danimarka)
6. Hvalfjördur (İzlanda)
7. Isle of the Dead\* (Tazmanya,Avustralya)
8. Kjøpsvik (Norveç)
9. Källahamn (İsveç)
10. La Rochelle (Fransa)
11. Skanör (İsveç)
12. Träslövsläge (İsveç)

\* : Harita dışında

Şekil 3.9 Örneklerin deniz suyuna maruz bırakıldığı 12 nokta (Lindvall, 2007)

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 4.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, farklı çimento tipleriyle hazırlanan harçların deniz suyu ve sodyum sülfat çözeltisi etkisinde mekanik ve kalıcılık özelliklerinin incelenmesidir. Mineral katkıli çimentolarla hazırlanan harçların kirece doymun suda 28 gün boyunca kür edilerek harçlara ön dayanım kazandırılmasından sonra harçların ıslanma-kuruma çevrimiyle deniz suyunda ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeleri sonucu meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Bu çalışmada (**Çalışma 1**) beş farklı çimento tipi (CEM I 42,5 R, CEM II/A-M(P-W) 42,5 R, CEM II/B-M(P-W) 32,5 R, CEM II/A-W 52,5 N, CEM III/A 42,5 N) kullanılarak su/çimento oranı 0,485, 0,6 ve 0,7; ince agrega/çimento oranı 2,75 olan örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler kirece doymun 20°C suda kür edilmiş, 50 g/l (50000 ppm) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde, tekrarlı ıslanma kuruma metoduyla deniz suyunda ve havada bekletilmişlerdir. 25x25x285 mm, 40x40x160 mm boyutlu prizmatik ve 100x50 mm boyutlu silindir kalıplar kullanılmıştır. Örneklerin eğilme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımı, klorür miktarı tayini, klor geçirimsizlik, genleşme, ağırlık değişimi, kılcallık ve su emme değerleri ölçülmüştür. Her bir deney tipi için hazırlanan karışımlar ve örnek sayıları Tablo 4.1, 4.2, 4.3, 4.3a ve 4.4'te verilmektedir.

Bu çalışmadan önceki deneysel çalışmada (**Çalışma 2**) üç farklı (CEM I 42,5 R, CEM IV/B (P) 32,5 N ve SDC 32,5) çimento, doğal kum, şehir şebeke suyu kullanılarak su/çimento oranı 0,485, ince agrega/çimento oranı 2,75 olan numuneler hazırlanmış ve bu numuneler kirece doymun suda (KDS), ASTM C 1012 standardına uygun olarak 50 g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ve deniz suyunda tekrarlı ıslanma kuruma (DSIK) şeklinde bekletilmişlerdir. Eğilme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımı, klorür miktarı tayini ve komparatörle boy değişimlerinin okunmasıyla genleşme

değerleri ölçülmüştür. Her bir deney tipi için hazırlanan karışımlar ve örnek sayıları Tablo 4.5 ve 4.6'da verilmektedir.

Tablo 4.1 Çalışma 1'de (Tez Çalışması) mekanik özelliklerin saptanması ve klorür miktarı tayininde kullanılan örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (40x40x160 mm boyutlu)		Çimento Tipi					Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM II/A-M (P-W) 42,5 R	CEM II/B-M (P-W) 32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N	
Su/Çimento Oranı	0,485	21	21	21	21	21	105
	0,6	6	6	6	6	6	30
	0,7	21	21	21	21	21	105

Tablo 4.2 Çalışma 1'de (Tez Çalışması) kılcal yolla su emme ve toplam su emme deneyleri için üretilen örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (40x40x160 mm boyutlu)		Çimento Tipi					Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM II/A-M (P-W) 42,5 R	CEM II/B-M (P-W) 32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N	
Su/Çimento Oranı	0,485	9	9	9	9	9	45
	0,6	9	9	9	9	9	45
	0,7	9	9	9	9	9	45

Tablo 4.3 Çalışma 1'de (Tez Çalışması) sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının boy değişimleri için üretilen örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (25x25x285 mm boyutlu)		Çimento Tipi					Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM II/A-M (P-W) 42,5 R	CEM II/B-M (P-W) 32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N	
Su/Çimento Oranı	0,485	8	8	8	8	8	40
	0,7	8	8	8	8	8	40

Tablo 4.3a Çalışma 1’de (Tez Çalışması) sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için üretilen örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (40x40x160 mm boyutlu)		Çimento Tipi					Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM II/A-M (P-W) 42,5 R	CEM II/B-M (P-W) 32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N	
Su/Çimento Oranı	0,485	3	3	3	3	3	15
	0,7	3	3	3	3	3	15

Tablo 4.4 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) klor iyonu geçirgenliğinin elektrik akımı ile tayini için üretilen örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (100/50 mm boyutlu)		Çimento Tipi					Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM II/A-M (P-W) 42,5 R	CEM II/B-M (P-W) 32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N	
Su/Çimento Oranı	0,485	6	6	6	6	6	30
	0,6	6	6	6	6	6	30
	0,7	6	6	6	6	6	30

Tablo 4.5 Çalışma 2’de (Önceki Deneysel Çalışma) mekanik özelliklerin saptanması ve klorür miktarı tayininde kullanılan örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (40x40x160 mm boyutlu)		Çimento Tipi			Toplam	
		CEM I 42,5 R	CEM IV/B (P) 32,5 N	SDÇ 32,5		
Su/Çimento Oranı		0,485	13	13	13	39

Tablo 4.6 Çalışma 2’de (Önceki Deneysel Çalışma) sülfat çözültisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının boy değişimleri için üretilen örnek sayısı

ÖRNEK SAYISI (25x25x285 mm boyutlu)		Çimento Tipi			Toplam
		CEM I 42,5 R	CEM IV/B (P) 32,5 N	SDÇ 32,5	
Su/Çimento Oranı	0,485	8	8	8	<b>24</b>

## 4.2 Malzeme Özellikleri

Çalışmalarda kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri aşağıda verilmektedir.

### 4.2.1 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) kullanılan malzemelerin özellikleri

#### 4.2.1.1 Çimento

CEM I 42,5 R, CEM II/A-M(P-W) 42,5 R, CEM II/B-M(P-W) 32,5 R, CEM II/A-W 52,5 N, Çimentaş A.Ş. - İzmir’den temin edilmiştir. Bu çimentolar, aynı klinkerden elde edilmiştir. CEM III/A 42,5 N ise Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. - Karabük’ten temin edilmiştir. Çimentoların klinker analizleri Tablo 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Kimyasal özellikleri ise Tablo 4.9’da verilmiştir. Tablo 4.9’da yer alan çimento anabileşen yüzdelerinin hesabı, Tablo 4.7 ve 4.8’de yer alan klinker analizlerinin çimento klinker yüzdeleriyle çarpılması yoluyla bulunmuştur. CEM III/A 42,5 N çimentosunda yer alan yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi Tablo 4.10’da sunulmuştur. Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.7 Çimentaş A.Ş- İzmir'den temin edilen çimentoların klinker analizi

Klinker Anabileşenleri	Değer (%)
C <sub>3</sub> S	62
C <sub>2</sub> S	13
C <sub>3</sub> A	8
C <sub>4</sub> AF	11

Tablo 4.8 Karçimsa A.Ş. - Karabük'ten temin edilen CEM III/A 42,5 N çimentosunun klinker analizi

Klinker Anabileşenleri	Değer (%)
C <sub>3</sub> S	54,72
C <sub>2</sub> S	19,73
C <sub>3</sub> A	7,75
C <sub>4</sub> AF	10,41

Tablo 4.9'da görülen çimento karma bileşenlerinin hesap yöntemi şöyledir:

Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de yer alan klinker analizleri, çimentoların klinker yüzdeleriyle çarpılarak anabileşen oranlarına ulaşılmıştır.



Tablo 4.9 Çimentoların kimyasal özellikleri

Bileşen (%)	CEM I 42,5 R	CEM II/A-M(PW)42,5 R	CEM II/B-M(PW)32,5 R	CEM II/A-W 52,5 N	CEM III/A 42,5 N
SiO <sub>2</sub>	18,86	24,06	30,89	20,03	27,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,84	6,50	7,25	6,43	6,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,56	3,68	3,53	3,53	2,46
CaO	64,68	58,09	47,31	60,02	53,14
MgO	0,92	1,14	1,21	2,00	4,28
Na <sub>2</sub> O	0,24	0,2	0,2	0,25	-
K <sub>2</sub> O	0,83	1,02	1,5	0,87	-
SO <sub>3</sub>	2,84	2,76	2,54	2,73	2,24
Kızdırma Kaybı	2,88	1,86	4,83	3,00	2,64
Çözünmeyen kalıntı	0,20	-	-	3,21	1,00
Serbest CaO	1,49	1,68	1,17	1,76	1,54
Cl <sup>-</sup>	0,011	0,011	0,011	0,011	0,0112
Toplam katkı miktarı	4,85	11,47	29,91	9,38	45,36
Katkı miktarları (%)	-	6 uçucu kül+5 tras	20 tras+5 kalker+5 uçucu kül	6 uçucu kül+4 kalker	36,56yüksek fırın cürufu+3alçı+3kalker
C <sub>3</sub> S	58,9	54,89	43,45	56,18	29,9
C <sub>2</sub> S	12,37	11,5	9,11	11,78	10,78
C <sub>3</sub> A	7,61	7,08	5,61	7,25	4,23
C <sub>4</sub> AF	10,46	9,74	7,71	9,97	5,69
C <sub>3</sub> S/ C <sub>2</sub> S	4,76	4,77	4,77	4,77	2,77

Tablo 4.10 Karçimsa A.Ş. – Karabük'te kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi

Kimyasal Analiz	Değer (%)
Rutubet	7
SiO <sub>2</sub>	39,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50
MgO	7,60
CaO	33,28
S	0,64
Kızdırma Kaybı	0,90
Hidrolik indeks (CaO+1,40*MgO+0,56*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/SiO <sub>2</sub>	1,27
(CaO+MgO) /SiO <sub>2</sub>	1,03
(CaO) /SiO <sub>2</sub>	0,84

Tablo 4.11 Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri

		<b>CEM I 42,5 R</b>	<b>CEM II/A-M(P- W)42,5R</b>	<b>CEM II/B- M(P- W)32,5R</b>	<b>CEM II/A-W 52,5 N</b>	<b>CEM III/A 42,5 N</b>
Basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )	2	28,1	27,3	16,7	30,3	14,60
	7	43	42,9	27,5	-	26,8
	28	51,5	52,5	37,8	56,1	46,3
Özgül ağırlık		3,11	2,97	2,86	3,00	-
Birim hacim ağırlık (g/lt)		990	942	898	898	-
İncelik %	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3690	3930	4320	4310	4436
	0.090 mm elek üstü	0,5	0,4	0,3	0,1	0,0
	0.032 mm elek üstü	19,1	14,1	12,8	9,9	1,1
Hacim sabitliği (mm)		0,0	1,5	1,5	0,5	-
Priz süresi (saat:dakika)	Başlangı ç	2:15	3:30	3:00	2:25	03:30
	Son	3:30	4:15	5:00	4:10	04:30
% Vicat Suyu		28,0	27,4	31,8	29,0	30,2

#### 4.2.1.2 Doğal Kum

4 mm elekten elenen doğal kum 80°C'deki etüvde kurutularak kullanılmıştır. Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 4.12'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri

Elek Açıklığı (mm)	Kümülatif Geçen (%)	Fiziksel Özellikler	
8	100	Doygun Yüzey Kuru-Özgül ağırlık	2,57
4	89		
2	63		
1	43	Su emme (%)	2,3
0.5	27		
0.25	13		

TS 3732 standardına uyularak klorür miktarı tayiniyle belirlenen klorür içeriği %0,03'tür.

#### 4.2.1.3 Su

Hazırlanan harçlarda karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Suyun kimyasal analizi Tablo 4.13'te sunulmaktadır.

Tablo 4.13 DEÜ Tınaztepe Yerleşkesi şebeke suyunun pH, iletkenlik, iyon konsantrasyonu ve sertliği

pH	7,6
İletkenlik	400 $\mu$ s/cm
Kalsiyum ( $Ca^{+}$ )	56,11 mg/L
Magnezyum ( $Mg^{+2}$ )	19,45 mg/L
Klorür ( $Cl^{-}$ )	50 mg/L
Tuzluluk	<%01
Toplam Sertlik	22 F.S° = 220 mg/L $CaCO_3$

#### 4.2.1.4 Deniz Suyu

Deniz suyunda bekletilen örnekler için Ege Denizi'nden (Narlidere/İzmir) alınan deniz suyunun pH'ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği Tablo 4.12'de verilmektedir. Deneyler DEÜ - Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır.

Tablo 4.14 Ege Denizi'nin pH'ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği

pH	8,20
İletkenlik	53000 $\mu\text{s/cm}$
Sodyum ( $\text{Na}^+$ )	12236 mg/L
Potasyum (K)	432 mg/L
Kalsiyum ( $\text{Ca}^+$ )	502 mg/L
Magnezyum ( $\text{Mg}^{+2}$ )	1342 mg/L
Klorür ( $\text{Cl}^-$ )	22740 mg/L
Sülfat ( $\text{SO}_4^{-2}$ )	2980 mg/L
Toplam Sertlik	684,5 F.S° = 6845 mg/L CaCO <sub>3</sub>

Tablo 2.5'te sunulan ACI 201 standardına göre deniz suyunda bulunan 2980 mg/L  $\text{SO}_4^{-2}$  "şiddetli" sınıfına girmektedir. TS 3440'a göre ise "kuvvetli" etkinlik derecesine dahil olmaktadır (Baradan ve diğer., 2002).

#### 4.2.2 Çalışma 2'de (Önceki Deneysel Çalışma) kullanılan malzemelerin özellikleri

##### 4.2.2.1. Çimento

Portland Çimentosu (CEM I 42,5 R) Batı Anadolu Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Bu çimentonun kimyasal ve fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.15 ve 4.16 ve 4.17'de görölmektedir.

Tablo 4.15 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2)

Kimyasal Analizi (%)	Analiz Değerleri	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
Kızdırma Kaybı	2,72	Max. % 5
Çözünmeyen Kalıntı	0,58	Max. % 5
Klorür ( $\text{Cl}^-$ )	0,0070	Max. 0,1
SO <sub>3</sub>	2,62	Max. % 4

Tablo 4.16 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2)

Fiziksel Özellikler	Değerler	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
Spesifik Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3395	Min. 2800
Priz Başlama Süresi (dk)	160	Min. 60
Priz Bitiş Süresi (dk)	220	-
Hacim Genleşmesi (mm)	1	Max. 10

Tablo 4.17 CEM I 42,5 R çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2)

Mekanik Özellikler		Değerler	Standart Değerleri
			Türk Standart No: TS EN 197-1
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2 Günlük (Erken Dayanım)	24.3	Min. 20,00
	28 Günlük	-	Min. 42,5 - Max. 62,5

Puzolanik Çimento (CEM IV/B (P) 32,5 N) Denizli Çimento Fabrikası'ndan alınmıştır. Bu çimentonun kimyasal ve fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.18 ve 4.19 ve 4.20'de görülmektedir.

Tablo 4.18 CEM IV/B (P) 32,5 N çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2)

Kimyasal Analizi (%)	Analiz Değerleri	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
SiO <sub>2</sub>	34,08	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,14	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,31	
CaO	37,53	
MgO	1,98	
SO <sub>3</sub>	1,42	Max. % 3,5
Kızdırma Kaybı	5,59	
Na <sub>2</sub> O	1,35	
K <sub>2</sub> O	2,34	
Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	2,89	
Klorür (Cl <sup>-</sup> )	0,05	Max. 0,100
Toplam Katkı	47,97	Min. 36,0-Max.55,0
Klinker	53,03	Min. 45,0-Max. 64,0

Tablo 4.19 CEM IV/B (P) 32,5 N çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2)

Fiziksel Özellikler	Değerler	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
Spesifik Gravite (gr/cm <sup>3</sup> )	2,81	
Spesifik Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	4754	
Priz Zamanı	Başlama (Dakika)	282
Hacim Genleşmesi (mm)	0	Max. 10

Tablo 4.20 CEM IV/B (P) 32,5 N çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2)

Mekanik Özellikler		Değerler	Standart Değerleri
			Türk Standart No: TS EN 197-1
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2 Günlük	8,6	
	7 Günlük	19,0	Min. 16,0
	28 Günlük		Min. 32,5- Max. 52,5

Sülfatlara dayanıklı çimento (SDÇ 32.5) Batisöke Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Bu çimentonun kimyasal ve fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.21 ve 4.22 ve 4.23'te görülmektedir.

Tablo 4.21 SDÇ 32,5 çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2)

Kimyasal Analizi (%)	Analiz Değerleri	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
Kızdırma Kaybı	1,65	Max. % 5
Çözünmeyen Kalıntı	0,62	Max. % 1,5
MgO	1,97	Max. % 5
SO <sub>3</sub>	2	Max. % 3,5
Klorür (Cl)	0,0088	Max. 0,1
C <sub>3</sub> A	2,8	Max. % 5
2C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF	22,05	Max. % 25

Tablo 4.22 SDÇ 32,5 çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2)

Fiziksel Özellikler	Değerler	Standart Değerleri
		Türk Standart No: TS EN 197-1
Spesifik Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3127	Min. 2800
Priz Başlangıcı (h:m)	03:55	Min. 01:00
Priz Sonu (h:m)	04:45	Max. 10:00
Hacim Genleşmesi (mm)	1	Max. 10

Tablo 4.23 SDÇ 32,5 çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2)

Mekanik Özellikler		Değerler	Standart Değerleri
			Türk Standart No: TS EN 197-1
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2 Günlük	16,5	Min. 10,00
	7 Günlük	31,7	Min. 21,0
	28 Günlük	45,4	Min. 32,5

#### 4.2.2.2 Doğal Kum

4 mm elekten elenen doğal kum 80°C'deki etüvde kurutularak kullanılmıştır. Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 4.24'te gösterilmiştir.

Tablo 4.24 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri

Elek Açıklığı (mm)	Kümülatif Geçen (%)	Fiziksel Özellikler	
8	100	Doygun Yüzey Kuru-Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,57
4	89		
2	63		
1	43	Su emme (%)	2,3
0,5	27		
0,25	13		

#### 4.2.2.3 Su

Hazırlanan harçlarda karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

#### 4.2.2.4 Deniz Suyu

Ege Denizi'nden (Narlidere/İzmir) alınan deniz suyunun pH'ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği Tablo 4.25'te verilmektedir.



Tablo 4.25 Ege Denizi'nin pH'ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği

pH	8,20
İletkenlik	53000
Sodyum (Na <sup>+</sup> )	12236 mg/L
Potasyum (K)	432 mg/L
Kalsiyum (Ca <sup>+</sup> )	502 mg/L
Magnezyum (Mg <sup>+2</sup> )	1342 mg/L
Klorür (Cl <sup>-</sup> )	22740 mg/L
Sülfat (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	2980 mg/L
Toplam Sertlik	684,5 F.S° = 6845 mg/L CaCO <sub>3</sub>

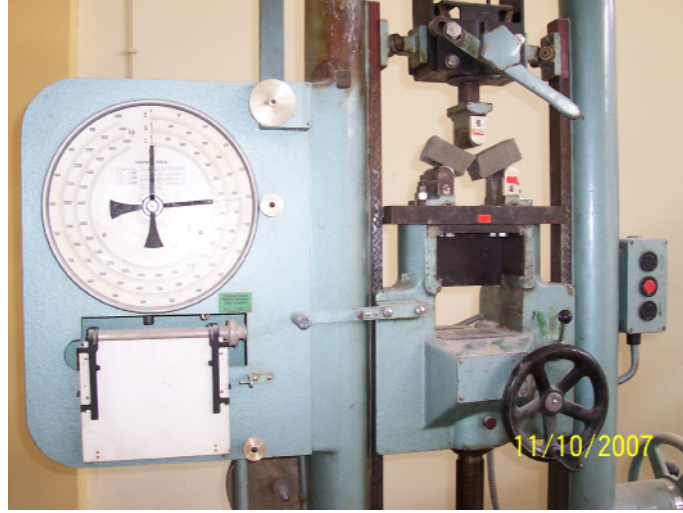
Tablo 2.5'te sunulan ACI 201 standardına göre deniz suyunda bulunan 2980 mg/L SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> "çok etkili" sınıfına girmektedir. TS 3440'a göre ise "kuvvetli" etkinlik derecesine dahil olmaktadır (Baradan ve diğer., 2002).

### 4.3 Standart Deney Yöntemleri

#### 4.3.1 Prizmatik Harç Örneklerinin Eğilmede Çekme Dayanımının ve Basınç Dayanımının Elde Edilmesi (ASTM C 348; ASTM C349)

Bu deneyler için sırasıyla ASTM C 348 ve ASTM C349 standartlarından yararlanılmıştır.

Çimento harcının eğilme dayanımının bulunabilmesi için ASTM C 348 standardına uygun olarak 4x4x16 cm boyutunda prizmatik numuneler hazırlanmış ve Şekil 4.1'de görülen makine ile eğilme yükü altında kırılmaya tabi tutulmuştur.



Şekil 4.1 Eğilmede çekme deneyi için kullanılan makine

Prizmatik deney örneğinde kırılmaya neden olan yük, deney presinin göstergesinde okunduktan sonra eğilme dayanımı hesaplanmıştır.

Çimento harçlarında basınç dayanımının belirlenmesi, ASTM C 349 standardına göre yapılmıştır. Örnekler, Şekil 4.2’de görülen preste üniform basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulmuştur.



Şekil 4.2 Deney Presi

#### **4.3.2 Sülfat Çözeltisine Maruz Kalan Hidrolik Çimento Harçlarının Boy Değişimleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1012)**

Bu deney yöntemi, sülfat çözeltisinde bekletilen 25x25x285 mm boyutundaki harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmeye yarar. Harç çubukları ASTM C 109'a uygun olarak hazırlanır. Kum/çimento oranı 2,75, su/çimento oranı 0,485 olmalıdır. Bu standarda göre çubuklar, sülfat çözeltisine konulmadan önce en az  $20 \pm 1$  MPa dayanıma ulaşmalıdırlar.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi %5'lik olarak hazırlanır. Bunun için her litre çözelti, 900 ml saf suda çözülmüş 50 g Sodyum Sülfat içermelidir. Çözelti kullanılacağı gün içinde hazırlanır ve pH'ı ölçülür. Eğer  $6 < \text{pH} < 8$  koşulu sağlanmıyorsa çözelti kullanılmaz. Uygun çözelti pH'ında bekletilen çubukların uzunluğu Şekil 4.3'te görülen, kadran aralığı 0,002 olan komparatör ile 1,2,3,4,8,13 ve 15. haftalarda ölçülür. Eğer uzunluklarda düzenli bir artış gözlemlenirse ölçüme 4., 6., 9. ve 12. aylarda da devam edilir (ASTM C 1012).



Şekil 4.3 Harç çubuklarının boy ölçümleri için kullanılan komparatör

#### **4.3.3 Hidrolik Çimento Harçlarında Kılcal Yolla Su Emme Hızının Hesaplanması için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1585) ve Geçirimsizlik**

Sertleşmiş betonun yüzeyi ile temas eden sıvılar ve gazlar, betonun içerisine girerek akış gösterebilmektedirler. Betonun içerisindeki sıvıların akış göstermeleri değişik nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bunlar, hava veya su basıncının yarattığı farklılıklar, nemlilik farklılıkları, betonun içerisindeki sıvıların farklı

konsantrasyonlarından doğan osmosis olayıdır. “Geçirimsizlik”, sıvıların ve gazların, betonun içerisinde akış gösterebilmelerine imkân tanıyan bir özelliktir. Sıvıların ve gazların betonun içerisinde akış gösterebilmeleri, betonda yer alan boşlukların birbiriyle bağlantılı olması nedeniyle gerçekleşebilmektedir (Erdoğan, 2003).

ASTM C 1585 deney yöntemi, hidrolik çimento betonunun yalnızca bir yüzünün suyla temas halinde olması durumunda zamanla oluşan su emme gücü sonucu ağırlıkta meydana gelen artış yardımıyla su emme hızını hesaplamak için kullanılır. Beton örneğinin suyla temas halinde olan yüzeyinden su girişi kapiler emme yoluyla oluşur. Bu deney yöntemi, beton örneğinin hem yüzeyinde hem de içinde oluşan su emme hızının ölçümüne yarar. Beton örneğini 50°C’deki etüvde 3 gün bekletmekle deneye başlanır. Etüvden çıkarılan örnek, kapalı bir kaptaki soğumaya bırakılır ve daha sonra ağırlığı ölçülür. Ölçülen ağırlık başlangıç ağırlığıdır. Suyla temas edecek yüzey hariç diğer tüm yüzeyler yalıtım malzemesiyle kaplanır. Su emme deneyi, şehir şebeke suyuyla yapılır. Deney kabına destek malzemeleri döşenerek örnek bunların üstüne yerleştirilir ve suyla temas edecek yüzeyin 1 ila 3 mm su yüksekliği içinde kalması sağlanır. Ve belirli aralıklarla örneğin emdiği su miktarı tartım sonucuyla gözlemlenir.

#### ***4.3.4 Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu (TS 3624)***

Sertleşmiş betonun içerisindeki boşlukların tümü suyla dolu durumda değil ise, ıslak ortamda, betonun içerisindeki boşluklara dışarıdan su girebilmektedir. Bu işlem, betonun suya doygun duruma gelmesine kadar devam edebilmektedir. Beton tarafından, içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekilmesi işlemine “su emme” denilmektedir. Sertleşmiş betonun su emme işleminde, önce büyük boyutlu kapiler boşluklar ve daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar suyla dolu duruma gelmektedirler. O nedenle, betondaki “su emme”, ilk zamanlarda büyük bir hızla, zaman ilerledikçe ise, giderek daha düşük bir hızla yer almaktadır. Su emme hızı ve emilen suyun miktarı, betonun ne ölçüde kuru olmasıyla da ilgilidir. Lea tarafından belirtilen sonuçlara göre, 100 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra su içerisinde 30

dakika bırakılan örneklerin su emme miktarı %3,2- %12,3 arasında değişmektedir. 100 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra su içerisinde 24 saat bırakılan beton örneklerin su emme miktarı %6,9- %12,9 arasında yer almaktadır. 100 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra su içerisinde 48 saat bırakılan beton örneklerin su emme miktarı ise %7- %13,1 arasında değişmektedir (Erdoğan, 2003).

Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmi ile ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise, betonda kullanılan su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, karbonatlaşma, beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Erdoğan, 2003).

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır. Ayrıca, betonun dayanıklılığı da, betondaki su emme özelliği tarafından etkilenmektedir. Örneğin, kapiler boşluklar suya doymun durumda iken bu boşluklardaki suyun donması, betonun içerisinde büyük gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Sülfat, asit, klor ve benzeri zararlı maddeleri içeren suların beton tarafından emilmesi, betonda hasar yaratacak kimyasal olayların başlamasına neden olmaktadır. Betonun geçirimliliği beton içerisinden su akışını gösterdiği için, geçirimlilik ve su emme farklı özelliklerdir. Ancak, su emme, betonun geçirimliliğini de etkileyen önemli bir özellik durumundadır. Sertleşmiş betonun “su emme” miktarının tayini ile ilgili Türk standardı TS 3624'tür. ASTM standartları tarafından belirtilmiş bir yöntem yoktur (Erdoğan, 2003).

Betonun su emme miktarı genellikle aşağıda açıklanan tarzda belirlenmektedir. Sertleşmiş beton örneği, önce, 100 °C sıcaklıktaki ortamda bırakılarak kuru duruma getirilmekte ve örneğin bu durumdaki ağırlığı ölçülmektedir. Daha sonra da kuru örnek, su dolu bir kap içerisinde 24 saat tutulmakta ve bu sürenin sonunda örneğin suya doymun durumdaki ağırlığı ölçülmektedir. Örneğin sudan çıkartıldıktan sonra suya doymun durumdaki ağırlığı ile kuru ağırlığı arasındaki fark, beton tarafından emilen suyun miktarını göstermektedir. Su emme kapasitesi, betona giren su miktarının, betonun kuru ağırlığına bölünmesiyle bulunmakta ve % olarak ifade edilmektedir (Erdoğan, 2003).

#### **4.3.5 Klorür İyonu Geçirgenliğinin Elektrik Akımı ile Tayini için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1202)**

Yurdumuzda yaşanan son deprem felaketiyle birlikte yapılarımızın kalıcılık problemleri de belirgin hale gelmiştir. Donatı korozyonu gibi kalıcılık kaynaklı çatlama veya kapak atmalar yapılar da daha açık görülmektedir. Donatı korozyonu çevremizde yaygın olarak görülen bir sorundur. Betondaki donatı korozyonu nedeniyle donatı hacmi artar ve beton pas payını çatlatır. Zararlı kimyasalların çatlama betondan donatıya ulaşması ise daha kolay olur (Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu, 2003).

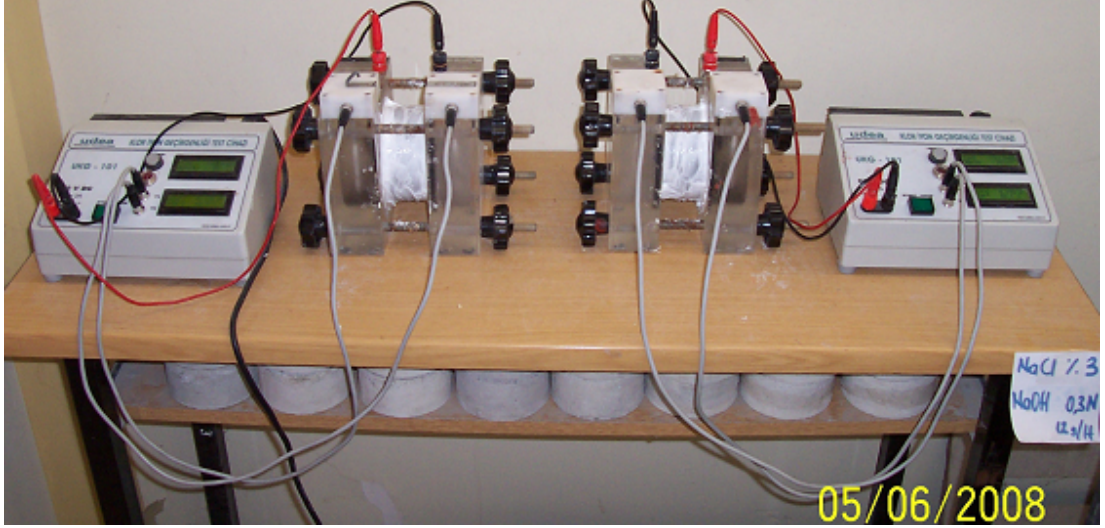
Çimentonun suyla olan hidrasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ , betonun pH'ının 13 civarında olmasını sağlar ve bu durum donatının korozyona karşı korunması için iyi bir ortam sağlar. Ancak çeşitli etkilerle betonun pH değeri azalırsa donatıyı koruyan pasivasyon tabakası da kaybolur ve donatı korozyon etkisine açık hale gelir. Ortamda su ve oksijen bulunması durumunda da korozyon başlar. Betonun pH'ını düşüren etkenlerden bir tanesi karbonatlaşma, diğeri ise klor etkisidir. Klor, betona çeşitli şekillerde etkiyebilir. Bunlar:

- i) kullanılan agrega veya katkı maddelerinden,
- ii) yapının bulunduğu çevreden (örneğin deniz suyu etkisiyle ya da kışın kullanılan buz çözücü tuzların etkisiyle) (Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu, 2003).

Betonda ASTM C 1202 metoduna göre klor iyonu geçirgenliğinin elektrik akımı ile hızlı bir şekilde tayini sık kullanılan ve diğeri geçirgenlik ölçen metotlarla uyum içinde olan bir yöntemdir (Yeğinoğlu, 2005).

Bu deney metodu, betonun klor geçirimsizlik direncini belirlemeye yarayan elektrik iletkenliğinin tahminini kapsamaktadır. Deney için 100x50 mm boyutunda silindir kalıplar kullanılır. Deney düzeneğinin bir hücre sine 30 g/l NaCl, diğeri hücre sine ise 12 g/l NaOH çözeltileri doldurulur ve silindir örneğ in karşılıklı iki yüzü bu sıvılarla temas eder. Hücrelerin örneğ i örtmeyen kısımları silikon ile kaplanır. Örneğ in iki yüzü arasından 60 V değerinde akım geçirilir. Ayarlanan

deney süresine göre, örnekten geçen toplam yük, örneğin klor iyon geçirgenliğine olan direnci ile bağıntılıdır. “Coulomb” cinsinden ortaya çıkan yük değeri ne kadar yüksekse, örneğin klor iyon geçirgenliğine olan direnci o kadar düşüktür. Deney düzeneği Şekil 4.4’te görülmektedir.



Şekil 4.4 Klor iyon geçirgenliği deney düzeneği

Tablo 4.26' da bu metotla çeşitli betonlarda -silis dumanlılar dâhil- ölçülen tipik klor geçirgenlik değerleri verilmektedir. (Yeğinobalı, 2005).

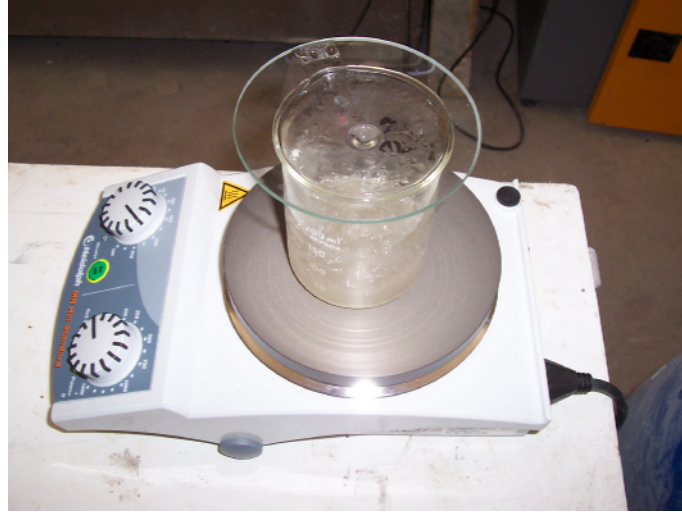
Tablo 4.26 Betonlarda klor geçirgenliği (Yeğinobalı, 2005)

Beton türü	Klor geçirgenliği	Geçen elektrik yükü (Coulomb)
Normal beton (s/ç>0,6)	Fazla	4000 den fazla
Normal beton (s/ç=0,4-0,5)	Orta	2000 – 4000
Normal beton (s/ç<0,4)	Az	1000 – 2000
% 5–15 silis dumanlı, düşük s/b oranlı beton, lateksli beton	Çok az	100 – 1000
% 15–20 silis dumanlı, düşük s/b oranlı beton, polimerli betonlar	İhmal edilebilir	100 den az

#### 4.3.6 Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu (TS 3732)

Bilindiği gibi klor kaynaklı çelik donatı korozyonu, birçok beton yapıda ciddi hasara neden olur. Betonun klor geçirgenliğini değerlendiren birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan biri betonun klor işleme derinliğini ölçen basit bir metot olan  $\text{AgNO}_3$  (gümüş nitrat) çözeltisi spreylenerek betonun renk değişimini gözlemlemeye yardımcı olan yöntemdir (Yazıcı, 2008).

Bir diğer yöntem ise, harç örneğinden alınan 1 g'lık tozun  $\text{AgNO}_3$  (gümüş nitrat) ve  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (potasyum kromat) yardımıyla titrasyonunun yapılmasıyla klorür miktarının belirlenmesidir. Öncelikle numune toz haline gelinceye dek öğütülür. Toz zerreciklerinin 100  $\mu\text{m}$  boyutundan küçük olması yeterlidir. 1 g toz malzeme yaklaşık 100 ml distile su ile beherde karıştırılır, üzerine saat camı kapatılır. Hazırlanan örnek 1 saat kaynatılır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Örnek kaynatma amaçlı kullanılan elektrikli ocak

Ocaktan alınan beher soğutulur. 100 ml hacme tamamlanır, çökmesi beklenir ve filtre edilir. Sıvıdan 25 ml bir mezüre alınır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi üzerine 1 ml  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (potasyum kromat) eklenir, bu durumda safran sarısı bir renge sahip olunur.





Şekil 4.6 Örneğe  $K_2CrO_4$  (potasyum kromat) eklenmiş hali

Daha sonra bir beherde molaritesi 0,0141 N olan  $AgNO_3$  ile titrasyon yapılır. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi renk değişip kahverengi oluncaya kadar karıştırılarak gümüş nitrat damlatılır. Renk kahverengiye dönüşünceye kadar harcanan gümüş nitrat miktarı belirlenir.



Şekil 4.7 Titrasyon sonrası

Klorür miktarını hesaplama yöntemi aşağıda görüldüğü gibidir:

(Sarfiyat\*Normalite\*Molekül ağırlığı)/Kullanılan örnek hacmi

$[S(\text{mL}) * N(\text{eşdeğer g/L}) * MA(\text{g/eşdeğer gram})] / V(\text{mL}) = \text{g/L}$

Normalite (eşdeğer g/L) = 0,0141 eşdeğer g/L

Molekül ağırl. (g/eşdeğer g) = 35,45 g/eşdeğer g

Kullanılan hacim (mL) = 25 mL

AgNO<sub>3</sub> miktarı (mg/L)

Klor miktarı (mg/L) = (ppm)

Klorür iyonları, çimento kütlelerinin yüzdesi olarak ifade edildiğinde, betonun klorür içeriği, seçilen sınıf için Tablo 4.27’de verilen değeri geçmemelidir.

Tablo 4.27 Betonun en fazla klorür içeriği (TS-EN 206-1)

Kullanılan beton	Klorür içeriği sınıfı <sup>a</sup>	Çimento <sup>b</sup> kütlelerine göre en fazla Cl <sup>-</sup>
Korozyona dayanıklı kaldırma (tutma) parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen	Cl 1,0	% 1,0
Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden	Cl 0,20	% 0,20
	Cl 0,40	% 0,40
Çelik öngerilme donatısı ihtiva eden	Cl 0,10	% 0,10
	Cl 0,20	% 0,20

a Belirli kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli kurallara bağlıdır.

b Tip II mineral katkıların kullanıldığı ve mineral katkının çimento miktarına dahil olarak kabul edildiği yerlerde klorür muhtevası, klorür iyonlarının, çimento+hesaba katılan katkı miktarlarına oranlanmasıyla bulunur.

Kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıları, çelik donatı, öngerilmeli çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden betonlarda kullanılmamalıdır. Betonun klorür içeriğini belirlemek için, bileşen malzemelerden gelen klorür toplamı, aşağıda verilen metotlardan birisi veya her ikisi birlikte kullanılarak tayin edilmelidir:

—Her bileşen malzeme için imalâtçı tarafından beyan edilen veya ilgili standartta bileşen malzemesi için izin verilen en fazla klorür içeriğini esas alan hesaplama.

—Her bileşen malzemesine ait en az 25 adet klorür içeriği tayini deney sonucu ortalaması ile 1,64 x bileşen malzemenin klorür içeriği değerlerinin standart sapması toplamı olarak her ay, her bileşen malzeme için belirlenen klorür içeriği değerlerinin toplamını esas alan hesaplama.

İkinci olarak verilen metot, özellikle denizden elde edilen agregalara ve beyan edilmiş veya standart değer olarak verilmiş en fazla klorür içeriğinin bulunmaması halinde uygulanır (TS-EN 206–1).

ACI 222R ise, çimento kütlelerine göre betonda bulunabilen en fazla klorür içeriğini Tablo 4.28’de verildiği gibi belirtmiştir.

Tablo 4.28 Betonun en fazla klorür içeriği (ACI 222R)

ACI 222R	Çimento kütlelerine göre	
	Asitte çözünen klorür (%)	Suda çözünen klorür (%)
Öngerilmeli beton	0,08	0,06
Betonarme betonu (Nemli ortam)	0,10	0,08
Betonarme betonu (Kuru ortam)	0,20	0,15

### **4.3.7 Hidrolik Çimentoların Performans Özellikleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1157)**

Bu standart, hidrolik çimentoların genel ve özel uygulamalarını kapsamaktadır. Ve performans gereksinimleri sunulmaktadır. Çimentolar ve bunların bileşenleri için

hiçbir kısıtlama bulunmamaktadır. Bu standartta, çimentolar yüksek erken dayanım, sülfata direnç ve hidrasyon ısı gibi genel kullanım özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Sülfata direnç sağlanması amacıyla verilen kıstaslar, ASTM C 1012 standardından elde edilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır.

Orta dereceli sülfat direnci sağlamak için kabul edilen 180 gün genişleme sınırı % 0,1'dir.

Yüksek dereceli sülfat direnci sağlamak için kabul edilen sınır değerler ise; 180 günde %0,05, 1 yılda %0,1'dir.

Yüksek dereceli sülfat direnci için 180 gün sınır değeri sağlandığı takdirde 1 yıllık deney sonucu istenmemektedir. Ancak 180 gün sınır değeri sağlanmazsa, 1 yıllık deney sonucuna bakılır. Ve her iki sonuç da olumsuz ise çimento sülfata karşı dirençsiz olarak kabul edilir.

## **4.4 Deney Yöntemlerinin Çalışmaya Uyarlanması**

### ***4.4.1 Prizmatik Harç Örneklerinin Eğilmede Çekme Dayanımının (ASTM C 348) ve Basınç Dayanımının (ASTM C 349) Elde Edilmesi***

Bu deney yöntemleri için 4x4x16 cm boyutundaki prizmatik örnekler kullanılmıştır.

Eğilmede çekme deneyi için Şekil 4.1'de görülen makinede A skalasındaki değerler dikkate alınmıştır.

3 nokta eğilme deneyi 12 cm açıklıkta uygulanmış ve kırılma yükü okunduktan sonra;

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P \times L}{4}}{\frac{b \times h^2}{6}}$$

formülünden eğilme dayanımı hesaplanmıştır.

$\sigma$ : Eğilme dayanımı (MPa),

M: Maksimum moment, W: Mukavemet momenti (cm<sup>3</sup>)

P: Kırılma yükü (kgf), b: Örnek genişliği (cm), h: Örnek yüksekliği (cm)

Not: Kg/cm<sup>2</sup> olarak elde edilen eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinin birimleri MPa'ya çevrilerek verilmiştir.

Eğilme deneyiyle ikiye ayrılan numunenin her bir parçası basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç deneyi için makine ayarlarında, yükleme hızı olarak 240 kgf/s ve örnek boyutu olarak 4x4x4 cm kullanılmıştır.

#### ***4.4.2 Sülfat Çözeltisine Maruz Kalan Hidrolik Çimento Harçlarının Boy Değişimleri için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1012)***

Bu deneyde, Kimetsan markalı Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. Molaritesi 142,04 g/mol'dür. Boy değişimlerini komparatörle ölçebilmek için kalıpların başlarına korozyona dayanıklı vidalar yerleştirilmiştir. Örnekler kapların içerisine üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Aralarına, yeterli boşluğu sağlamak amacıyla, plastik destekler konmuştur. Her 30 günde bir defa çözelti pH'ı ölçülmüş ve çözelti yenilenmiştir. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinin pH'ı 30 gün sonunda 9'dan 12,50'ye yükselmiştir.

#### ***4.4.3 Hidrolik Çimento Harçlarında Kılcal Yolla Su Emme Hızının Hesaplanması için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1585)***

Deney için, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, 4x4x16 cm boyutlu prizmatik örnekler kullanılmıştır. Bunun haricinde standarda uyulmuştur.



Şekil 4.8 Kılcal yolla su emme deneyinde kullanılan 4x4x16 cm boyutundaki prizmatik örnekler

#### **4.4.4 Sertleşmiş Betonun “Su Emme” Miktarının Tayini (TS 3624)**

“Kılcal Yolla Su Emme Hızının Hesaplanması” için kullanılan deney yöntemi sonrası örnekler 1 gün boyunca kirece doygun suda bekletilerek tam doygun hale getirilmiştir ve daha sonra aynı örneklerle “Su Emme” miktarının bulunmasıyla ilgili deneye geçilmiştir. Sudan çıkarılan örnekler 100°C’deki etüvde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak tartılmış ve soğuduktan sonra suya tamamıyla daldırılmıştır. 24 saat sonra sudan çıkarılarak tekrar tartılıp gerekli hesaplar yapılmıştır. Su emme kapasitesi, betona giren su miktarının, betonun kuru ağırlığına bölünmesiyle bulunmakta ve % olarak ifade edilmektedir.

#### **4.4.5 Klor İyonu Geçirgenliğinin Elektrik Akımı ile Tayini için Standart Deney Yöntemi (ASTM C 1202)**

Örnekler doygun, yüzey kuru durumdayken deneye tabi tutulmuştur. Deneyde, Merck markalı NaOH ve NaCl kullanılmıştır. NaOH’nin molaritesi 40 g/mol, NaCl’nin molaritesi ise 58,44 g/mol’dür.

#### 4.4.6 Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu (TS 3732)

Bu standart 24.04.2000 tarihinde yürürlükten kaldırılmış, yerine TS EN 1744-1:2000 standardı gelmiştir. Ancak, deniz suyuna maruz bırakılan örneklerde klor işleme derinliği ölçümü gözlenemediği için TS 3732 standardına başvurulmuş ve örneklerin çekirdeğinden alınan tozun klorür miktarı hesapları yapılmıştır. Bu standarda göre, çeliğe zarar veren maddelerden olan “suda çözünen klorürler” klor olarak saptandığında, maksimum %0,2 olmalıdır.

Çimento A.Ş.’den alınan çimentoların Cl<sup>-</sup> oranları 0,005 ile 0,020 arasında değişmekte olup ortalama 0,0125 alınabilir. TS-EN 197-1 standardına göre bu rakam <0,1 % olmalıdır.

#### 4.5 Karışımların Hazırlanması ve Örneklerin Kürü

##### 4.5.1 Çalışma 1’de karışımların hazırlanması ve örneklerin kürü

Beş farklı çimento tipi ile (CEM I 42,5 R, CEM II/A-M(P-W) 42,5 R, CEM II/B-M(P-W) 32,5 R, CEM II/A-W 52,5 N, CEM III/A 42,5 N) TS-EN 196-1 standardına uygun olarak karışımlar hazırlanmıştır. 25x25x285 mm, 40x40x160 mm boyutlu prizmatik ve 100/50 mm boyutlu silindir kalıplar sırasıyla Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 25x25x285 mm, 40x40x160 mm, 100/50 mm boyutlu kalıplar

Karıştırma işlemi Hobart mikserin manuel programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak mikser kabına kum konur, kumun üzerine çimento eklenir. Ardından kum ve çimento 30 sn karıştırılır. Karışıma eklenecek su miktarı da tartılarak ilave edilir. Tüm karışım 30 sn daha karıştırılır. Mikser durdurulup kabın dibine ve kenarlarına yapışan kum kaşıkla sıyrılarak karışıma geri dönüşümü sağlanır ve çırpıcı 60 sn

boyunca çalıştırılır. Yayılma tablası, harcın işlenebilirliğini tespit etmek için kullanılmıştır ve ölçülen değerlerin 105–115 mm arasında kalması istenir. Şekil 4.10 ve 4.11’de yayılma tablası ve kumpas yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda harcın yayılma çapının ölçümü görülmektedir.



Şekil 4.10 Yayılma tablası



Şekil 4.11 Kumpasla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçümü (su/çim.=0,7)

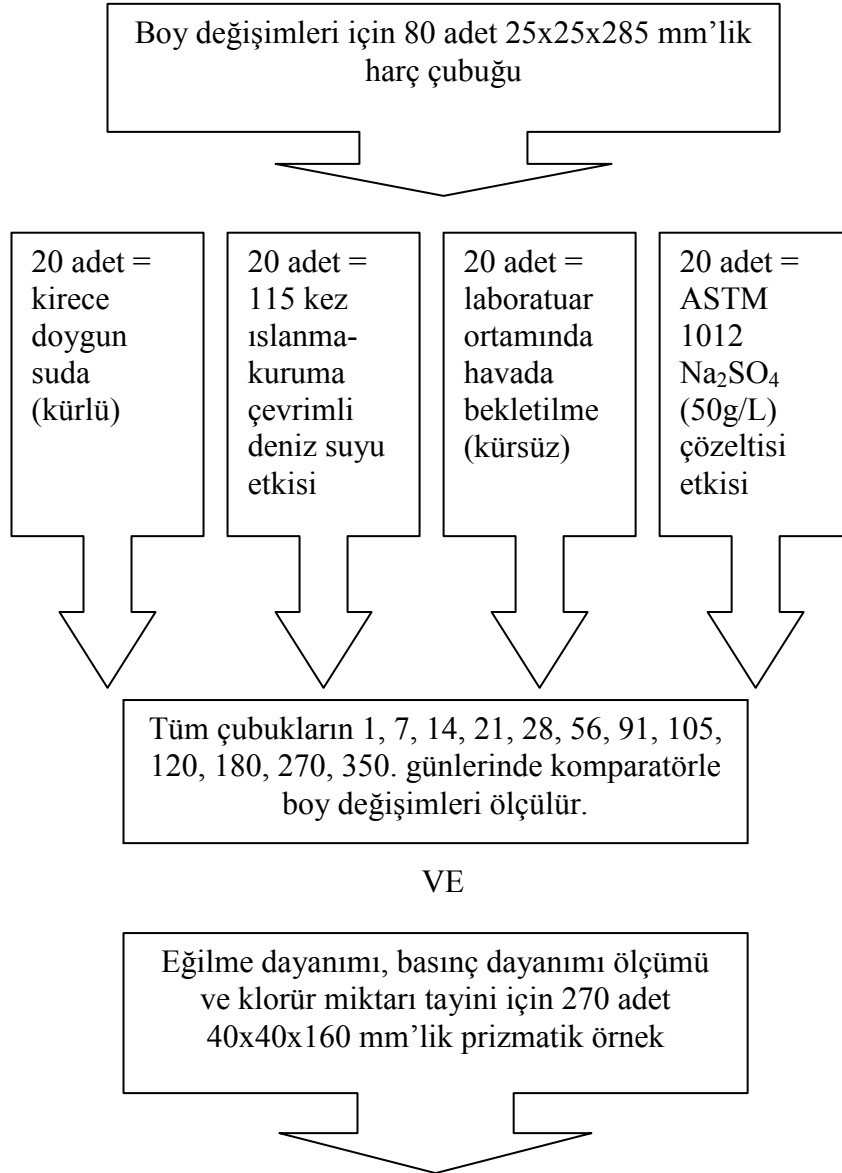
Hazırlanan harç, kalıba iki kademedede yerleştirilerek tokmaklanmıştır. Her tokmaklama sonrası sarsma tablası kullanılmıştır. Kalıpların sarsma tablası üzerinde tutulma süreleri, 0,485, 0,6 ve 0,7 su/çimento oranları için sırasıyla 30, 20 ve 10 sn’dir. Sarsma sürelerinin farklı olmasının sebebi, niteliksiz ve segregasyonla sonuçlanan harç oluşumunu önlemektir. Bu sayede, 0,7 su/çimento oranının beklenenden daha da kötü performans sergilemesi az da olsa engellenmiştir. Kalıplara yerleştirilmiş olan harç, ertesi gün kalıptan çıkarılmak üzere beklemeye alınmıştır (Şekil 4.12).

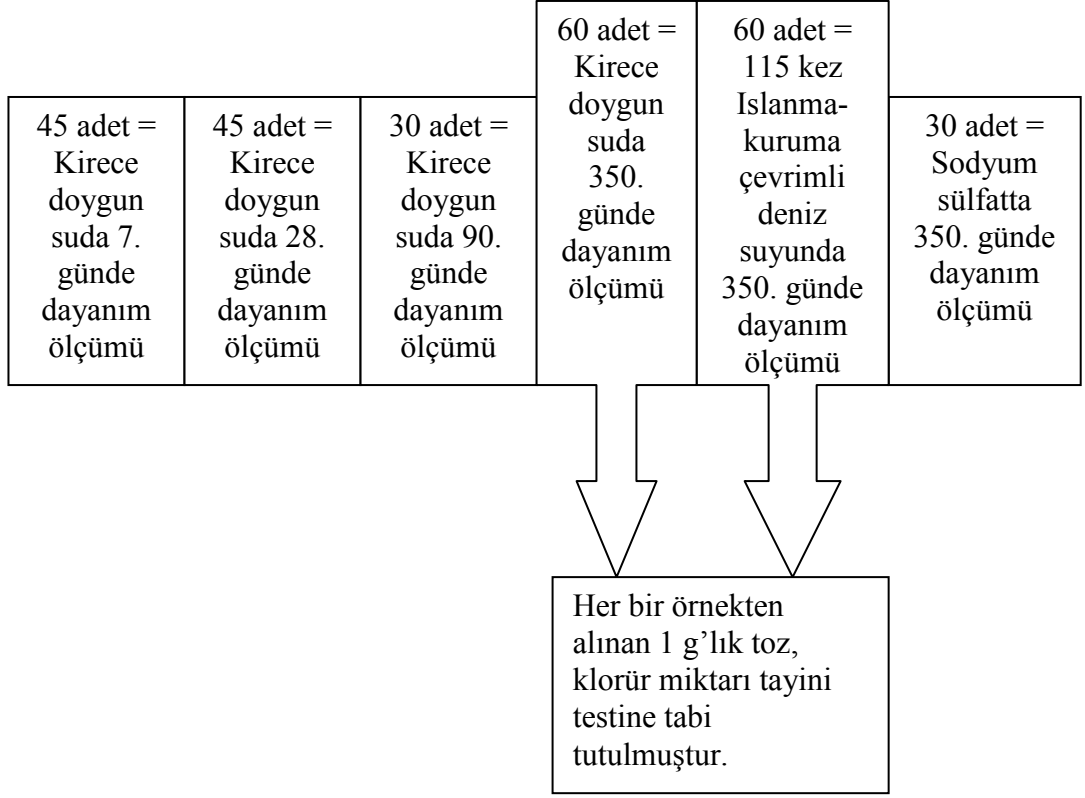




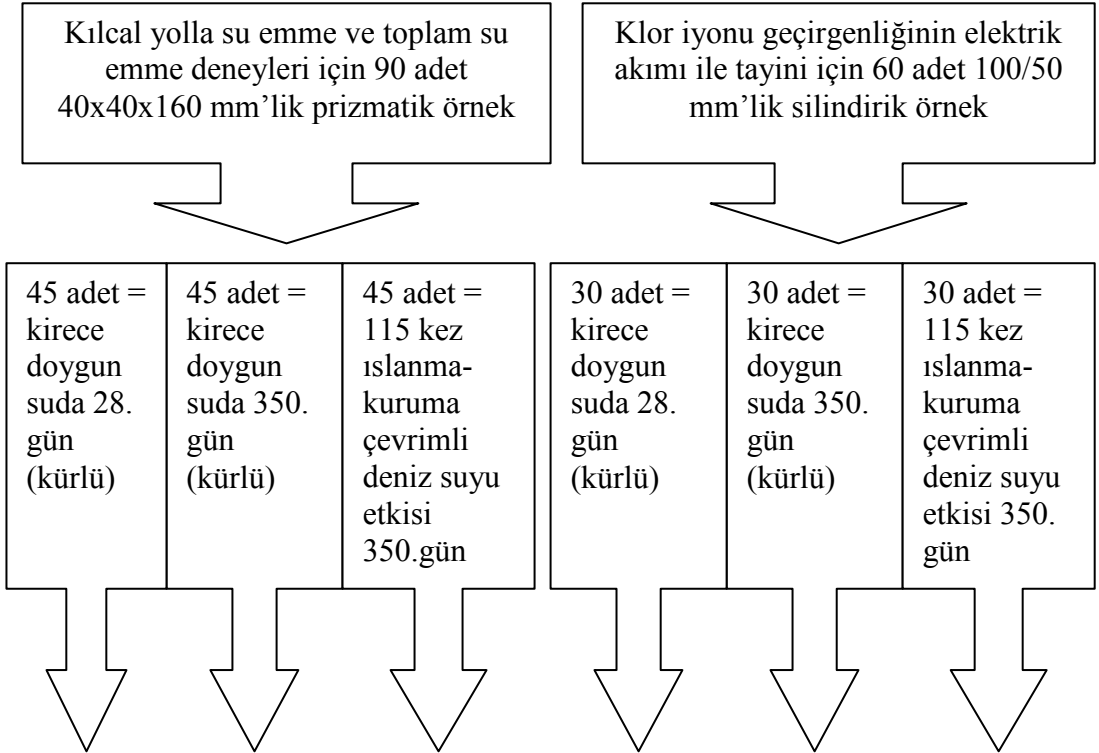
Şekil 4.12 Harcın kalıplara yerleştirilmesi

Tüm örnekler kalıplarından çıkarıldıktan sonra 28 gün boyunca kirece doymun suda kür edilmiştir. Başlangıç kürü sonrasında tüm örneklerin dâhil oldukları kür yöntemi için akış çizelgesi aşağıdaki gibidir. Akış çizelgesi toplam örnek sayısı üzerine kuruludur.





VE



Her 30 günde bir defa çözelti pH'ları ölçülmüş ve çözeltiler yenilenmiştir. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinin pH'ı 30 gün sonunda 9'dan 12,50'ye; deniz suyunun pH'ı ise 30 gün sonunda 8,2'den 9,18'e yükselmiştir.

Islanma-kuruma çevrimleri dahilinde örnekler, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi 16-34°C sıcaklık değerleri arasında değişen atmosfer koşullarında 12 saat ıslanma, 12 saat kuruma şeklinde bekletilmiştir. Bu şekilde 115 çevrim sayısına ulaşılmıştır.



Şekil 4.13 Islanma kuruma çevrimi için örneklerin deniz suyundan çıkarılarak atmosfer koşullarında kurumaya alınması

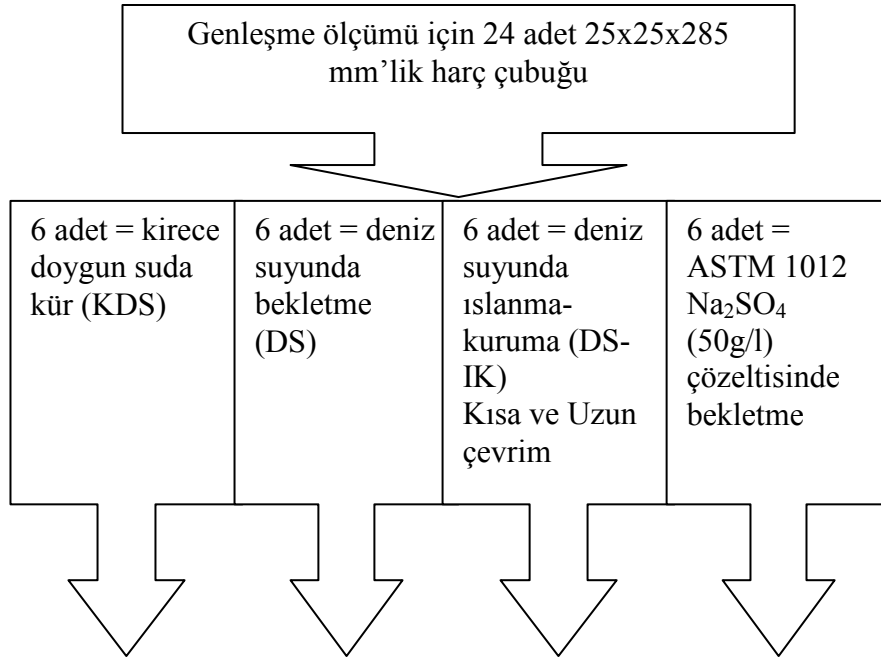
#### **4.5.2 Çalışma 2'de karışımların hazırlanması ve örneklerin kürü**

Üç farklı çimento (CEM I 42.5 R, CEM IV/B (P) 32.5 N, SDÇ 32.5) kullanılarak ASTM 1012 standardına uygun olarak 25x25x285 mm'lik harç çubukları hazırlanmıştır. Her çimento tipinden 8 adet olmak üzere toplam 24 adet harç çubuğu için harç hazırlanmış ve kalıplara yerleştirilmiştir. Ayrıca TS-EN 196-1 standardına uygun olarak, Şekil 4.14'te görüldüğü gibi 40x40x160 mm'lik prizmatik numuneler hazırlanmıştır ve her çimento tipinden 13 adet olmak üzere toplam 39 adet prizmatik numuneye ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 4.14 Prizmatik numuneler ve harç çubukları. Soldan sağa SDÇ 32,5, CEM I 42,5 R, CEM IV/B (P) 32,5 N çimento tipleriyle hazırlanan örnekler

Bu çalışmada tüm numuneler kalıplarından çıkarıldıktan sonra 7 gün boyunca kirece doymun suda kür edilmiştir. Kirece doymun suda kür edilecek numuneler hariç olmak üzere diğer tüm numunelerin 7 gün boyunca havada bekletildikten sonra dâhil oldukları kür yöntemi için akış çizelgesi aşağıdaki gibidir. Her çimento tipi, aynı kür uygulamasına tabi tutulmuştur, bu sebeple akış çizelgesi toplam numune üzerine kuruludur.



Tüm çubukların 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 56. ve 300. günlerinde komparatörle boy değişimleri ölçülür.

VE

Eğilme dayanımı -basınç dayanımı ölçümler için 39 adet 40x40x160 mm'lik prizmatik numune

6 adet = (7 gün KDS+7 Hava) kürü sonrası dayanım ölçümü	6 adet = 28 gün KDS kürü sonrası dayanım ölçümü	6 adet = 56 gün KDS kürü sonrası dayanım ölçümü	3 adet = Kısa çevrimli KDS kürü sonrası dayanım ölçümü	6 adet = Uzun çevrimli KDS kürü sonrası dayanım ölçümü	6 adet = Kısa çevrimli DSIK sonrası ölçüm	6 adet = Uzun çevrimli DSIK sonrası ölçüm
--	---	---	---	---	--	--

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi prizmatik örneklerin deniz suyunda bekletilme sonrası 312. günde üzerlerine %0,2 gümüş nitrat çözeltisi püskürtülmesi yöntemiyle oluşabilecek renk değişimleri gözlemlenememiştir. Bu sebeple örnekler için Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görülen "klorür miktarı tayini" metodu uygulanmıştır.



Şekil 4.15 Örneklere %0,2 AgNO<sub>3</sub> çözeltisi püskürtülmesi sonrası

## BÖLÜM BEŞ

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 5.1 “Çalışma 1”in (Tez Çalışması) Bulguları

Tablo 5.1’de hazırlanan harçların her bir çimento tipi ve su/çimento oranına ait olan yayılma çapları görülmektedir.

Tablo 5.1 Hazırlanan harçların, su/çimento oranları ve çimento tiplerine göre değişen ortalama yayılma çapları

Harçların Ortalama Yayılma Çapları (mm)		Çimento Tipi				
		CEMI 42,5 R	CEMII/A- M(P-W) 42,5 R	CEMII/B- M (P-W) 32,5 R	CEMII/A- W 52,5 N	CEMIII/A 42,5 N
Su/Çimento Oranı	0,485	113	108	108	108	112
	0,6	130	144	147	158	146
	0,7	180	177	170	175	178

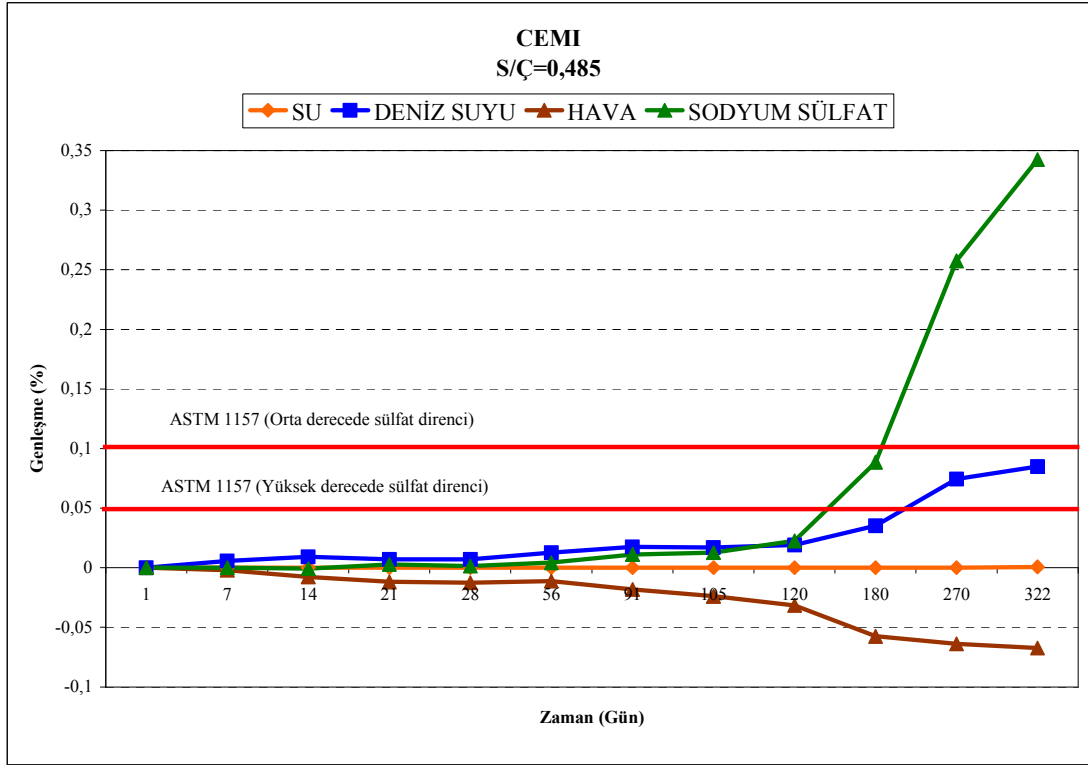
ASTM 1157’de, tüm çimento tipleriyle hazırlanan harçlarda orta derecede sülfat direnci sağlamak amacıyla 180 günlük genişleme değerlerinin %0,1 değerinin altında kalması gerektiği belirtilmiştir. Şekil 5.1, 5.3, 5.5, 5.7, 5.9’da yer alan grafikler incelendiğinde bu koşulun sağlandığı görülmektedir. Ancak, sülfata karşı yüksek direnç için ASTM 1157’nin verdiği 180 günlük sınır değer %0,05’tir. Şekil 5.1 ve 5.2’de görüldüğü gibi sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş CEMI 42,5 R ile hazırlanmış harç örneklerinin 1 yıllık sınırı aştığı görülmektedir. S/Ç=0,485 için CEM I 42,5 R çimentosu sadece orta derecede sülfat direnci sağlamaktadır. Diğer çimento tiplerinin Tablo 4.7’de sunulduğu gibi değişik oranlarda mineral katkı içermesi, 0,485 su/çimento oranında sodyum sülfat çözeltisine olan direnci arttırmıştır. Tosun ve diğer. (2006) tarafından belirtildiği gibi puzolanlar, Ca(OH)<sub>2</sub>’yi bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)<sub>2</sub> ve C<sub>3</sub>A oranının azaltılmasını sağlar.

Fakat Şekil 5.2, 5.4 ve 5.8’de yer alan grafikler incelendiğinde 0,7 su/çimento oranı ile hazırlanmış ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş CEM I, CEM II/A-M, CEM II/A-W çimentolarını içeren örneklerin ASTM 1157’de belirtilen orta derecede sülfat direnci için gereken 180 günlük sınır değer olan %0,1’i aştığı görülmektedir. Bunun sebebinin özellikle C<sub>3</sub>A miktarının ve su/çimento oranının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Örneklerin deniz suyunda bekletilmeleri sonucu bu sınır değer aşılmamıştır.

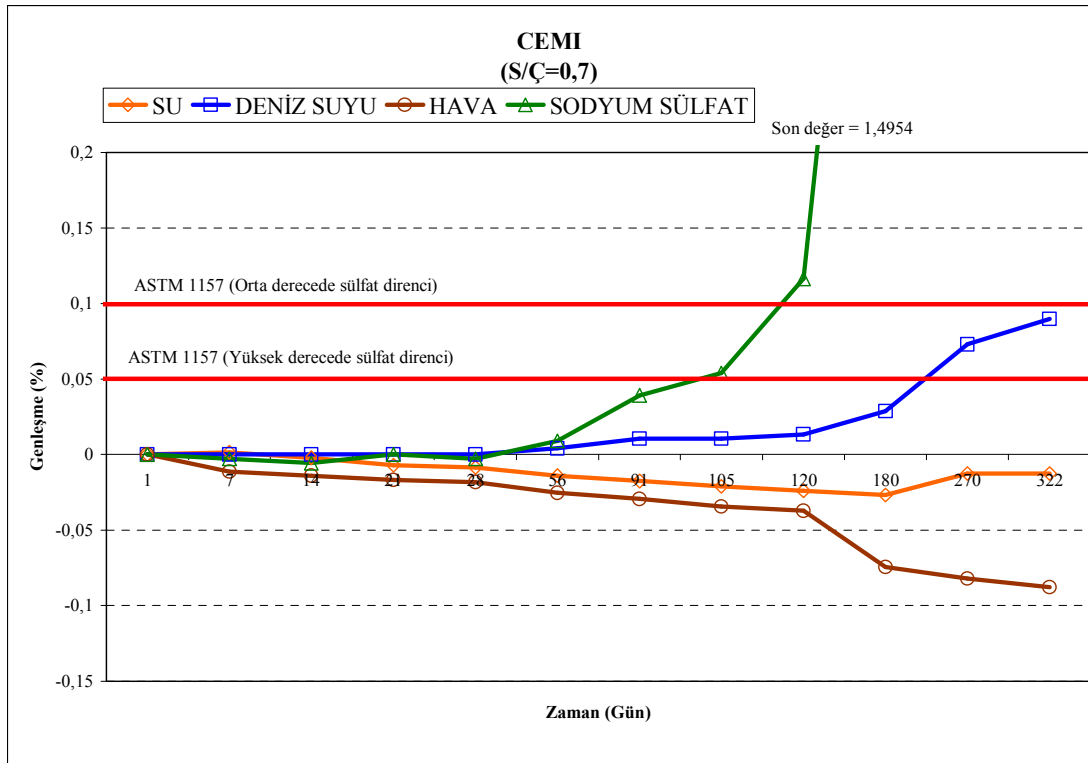
Ayrıca, sodyum sülfat çözeltisinde 322 gün bekletilme süresi sonunda yüksek sülfat direnci için standartta kabul gören sınır değer olan %0,1 değerini, CEMI 42,5 R tip çimentoyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örnekler aşmıştır. Bunun sebebi Tablo 4.7’de görüldüğü gibi, bu iki tip çimentonun C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A miktarlarının diğer çimento tiplerine kıyasla daha yüksek oluşudur. Mineral katkı yüzdeleri nispeten düşük olan çimentolar da bunlardır. Mineral katkı miktarının azlığı, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin genleşmelerinin artmasına yol açmıştır. 0,7 su/çimento oranıyla hazırlanan harçlar ise 322 gün bekletilme süresi sonunda, 0,485 su/çimento oranına göre daha olumsuz sonuçlar sergilemiştir. Su/çimento oranının artışı, örneklerde boşluklu bir yapı oluşturarak hem dayanımın hem de dayanıklılığın azalmasına yol açmıştır.

Deney örneklerinin kirece doygun suda kür edilmesi sonucunda bu kür yönteminin genleşme yaratıcı etkisinin olmadığı ve herhangi bir hasara yol açmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Hava koşullarında bekletilen örnekler ise büzülme sergilemiştir. Bunun sebebi, çimento hamurunun kapiler boşluklarındaki suyun bir bölümünün buharlaşması ve suyun bir miktarının da hidrasyon için kullanılarak azalmasıdır (Erdoğan, 2003).

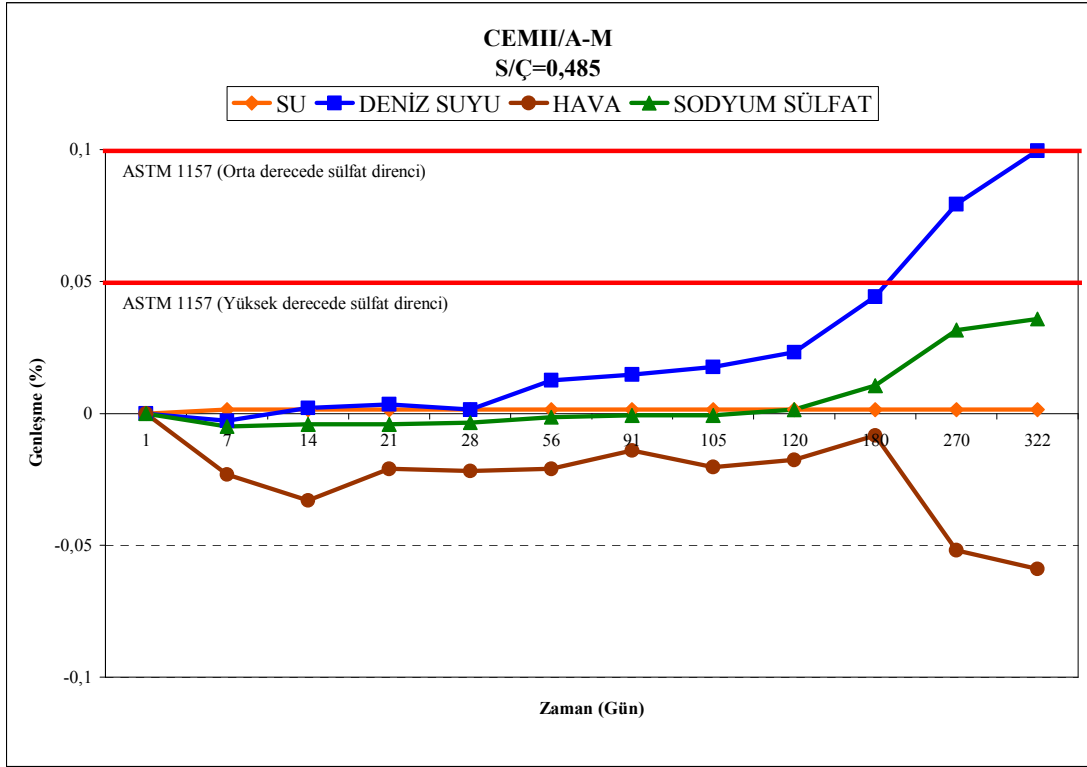




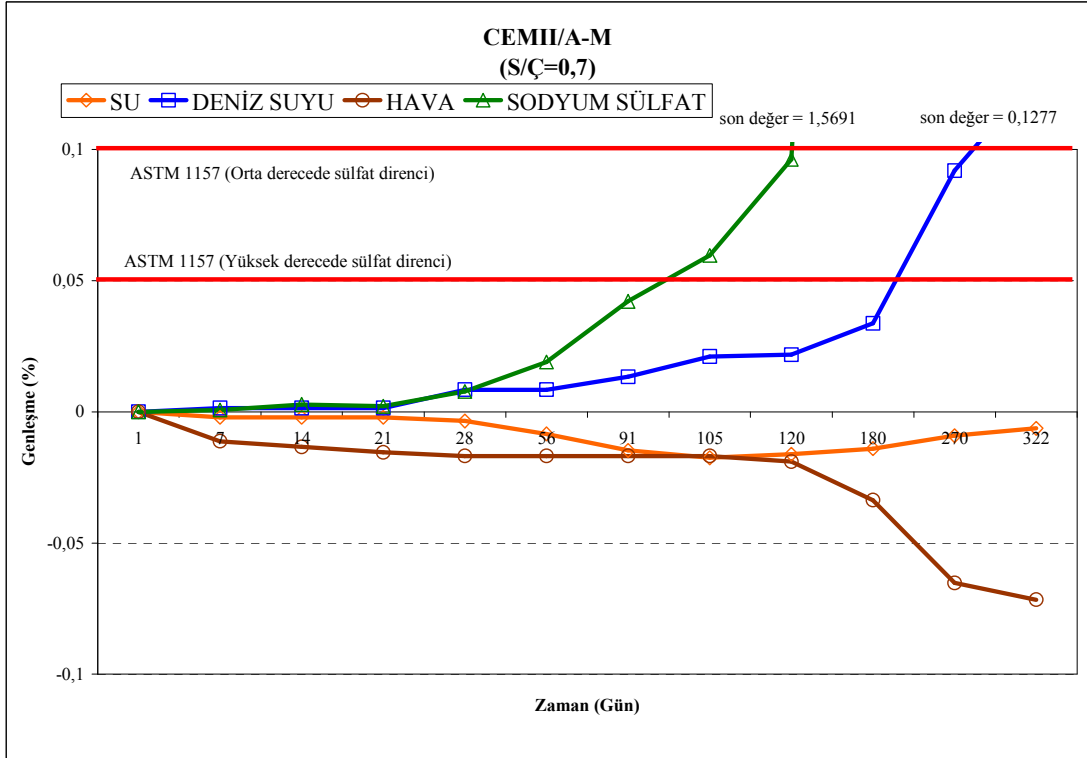
Şekil 5.1 CEMI 42,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri



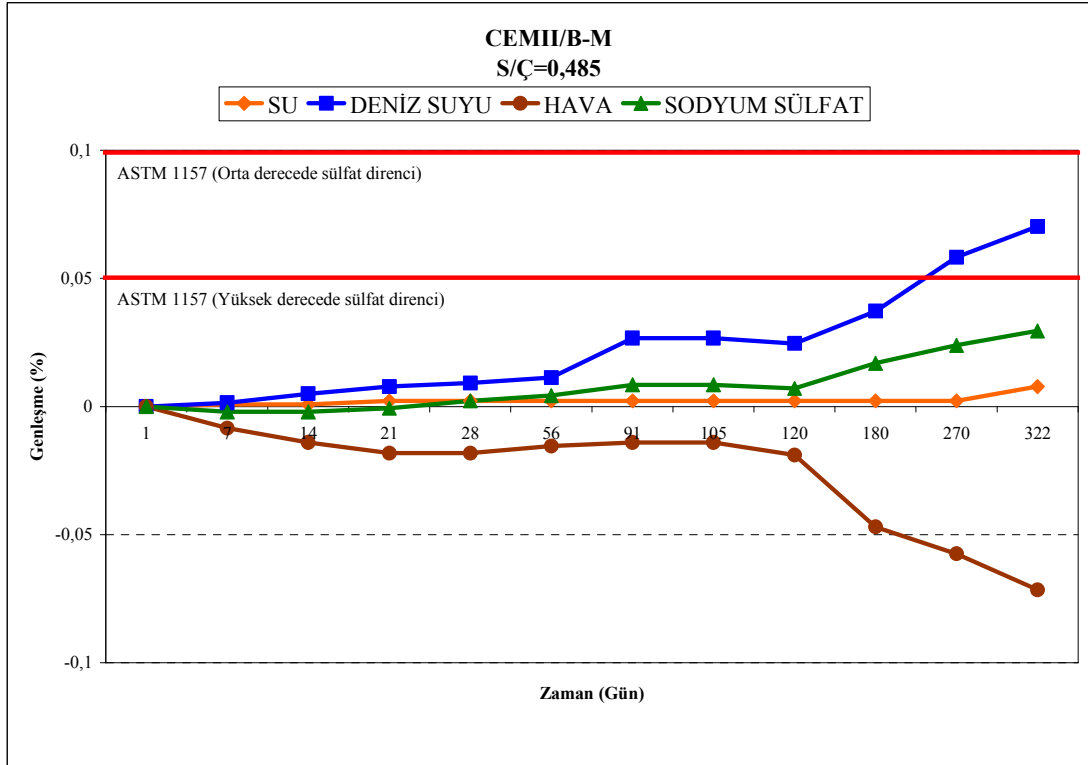
Şekil 5.2 CEMI 42,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri



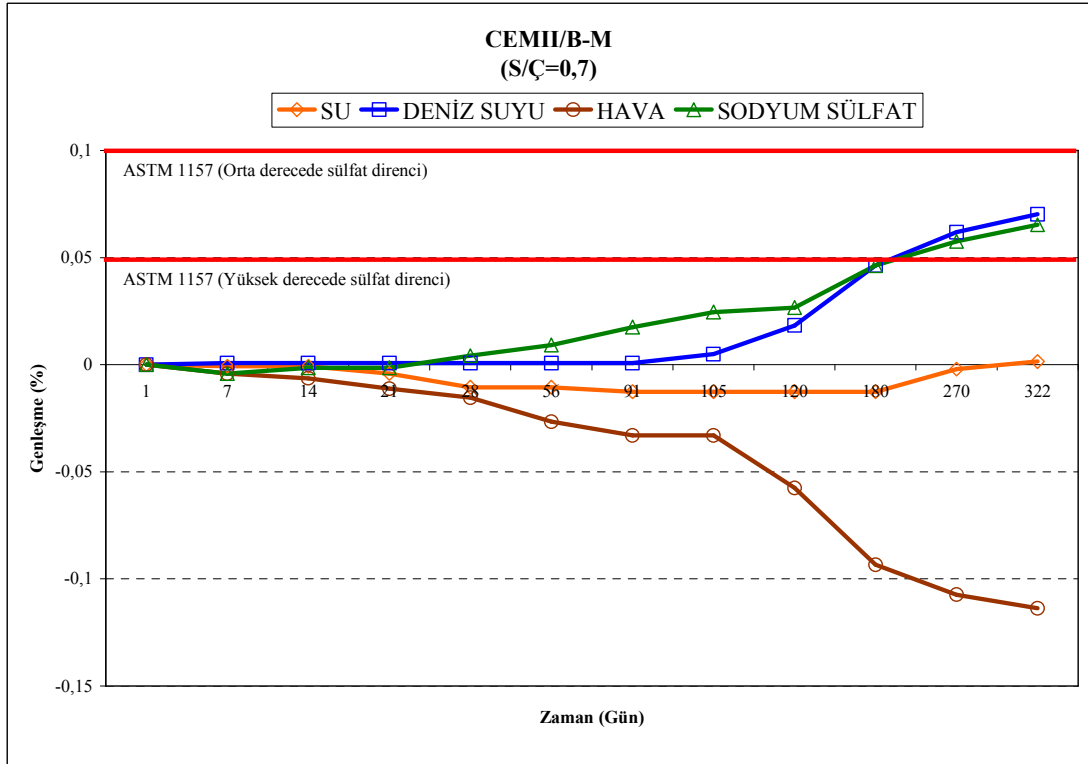
Şekil 5.3 CEMII/A-M(P-W)42,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri



Şekil 5.4 CEMII/A-M(P-W)42,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

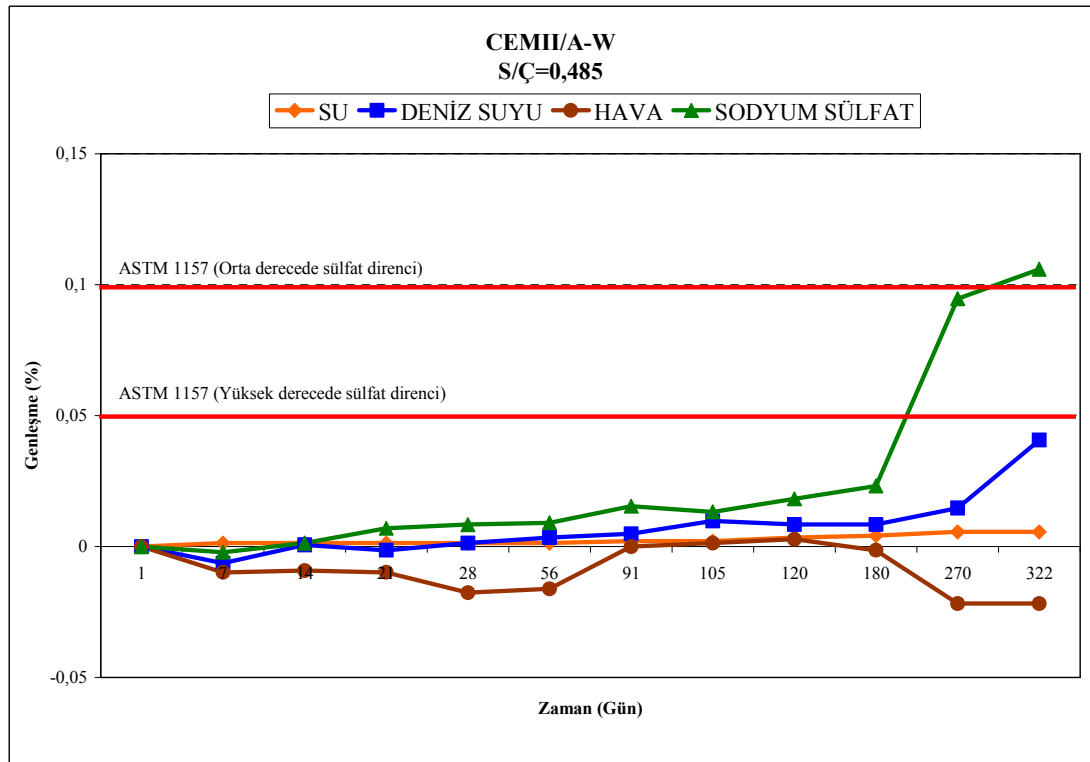


Şekil 5.5 CEM II/B-M (P-W) 32,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

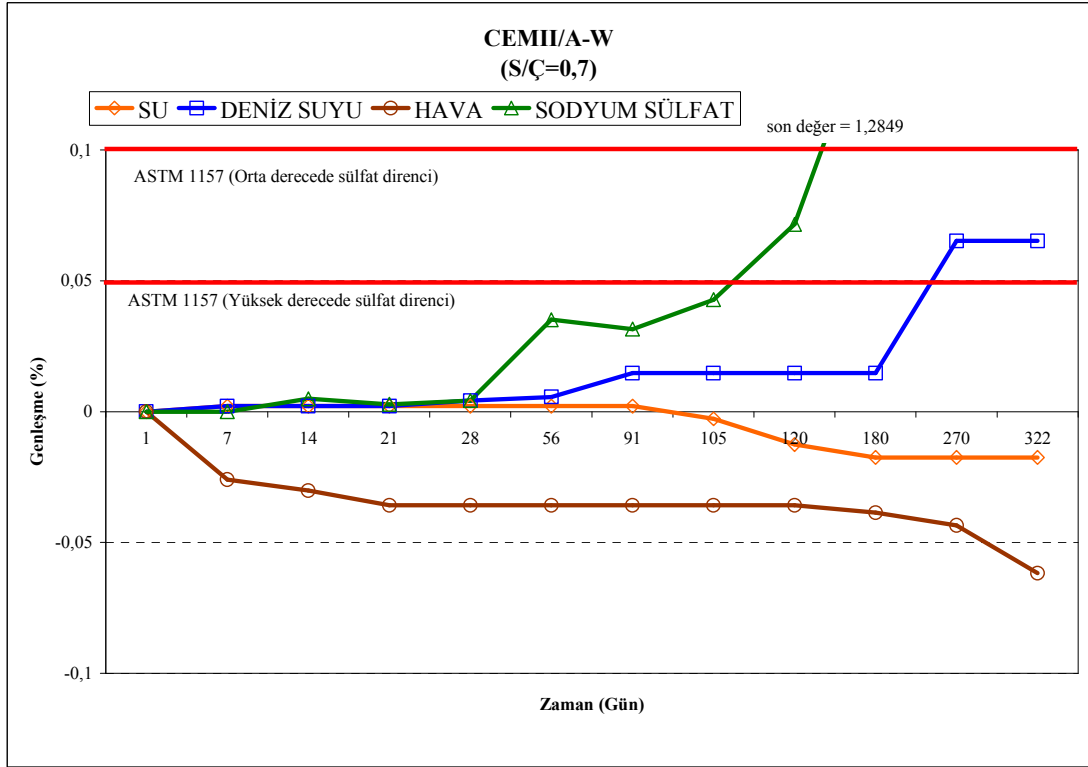


Şekil 5.6 CEM II/B-M (P-W) 32,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

Deniz sularının içerisinde klorür iyonunun bulunuyor olması, sülfat reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ürünlerin daha az genleşme yaratmasına neden olmaktadır. Zira klorür, sülfat saldırısı sonunda betonun içerisinde oluşan alçıtaşının ve etrenjitin bir miktarının çözünerek betonun yüzeyine çıkmasına yol açmaktadır. Böylece, alçıtaşının ve etrenjitin, sertleşmiş betonun içerisinde genleşme-yaratıcı etkileri birazcık azalmış olmaktadır (Erdoğan, 2003). Beton, klorür iyonlarının bir kısmını fiziksel ve kimyasal olarak bağlayabilmektedir. Bu nedenle, beton içindeki klorür iyonları bağlı ve serbest klorür olarak ikiye ayrılır. Kimyasal bağlama sırasında çimento bileşenlerinden ve  $C_3A$  ile klorürler arasındaki reaksiyondan “Friedel Tuzu” adı verilen yeni bir ürün meydana gelir. Fiziksel bağlama jel boşluklarında klorür iyonlarının adsorbe edilmesiyle gerçekleşir (Baradan ve diğer., 2002). Bu bilgiler ışığında, Şekil 5.7 ve 5.8’de görülen grafiklerde, CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla hazırlanan örneklerin deniz suyunda bekletilme süresince, sodyum sülfattaki durumundan daha az genleşme göstermelerinin sebebinin, Erdoğan (2003) tarafından belirtildiği gibi, deniz suyundaki sülfat saldırısı sonunda betonun içerisinde oluşan alçıtaşının ve etrenjitin bir miktarının çözünerek betonun yüzeyine çıkmasına yol açan klorür iyonlarının, genleşme yaratıcı etkileri kısıtlaması olduğu düşünülmüştür.

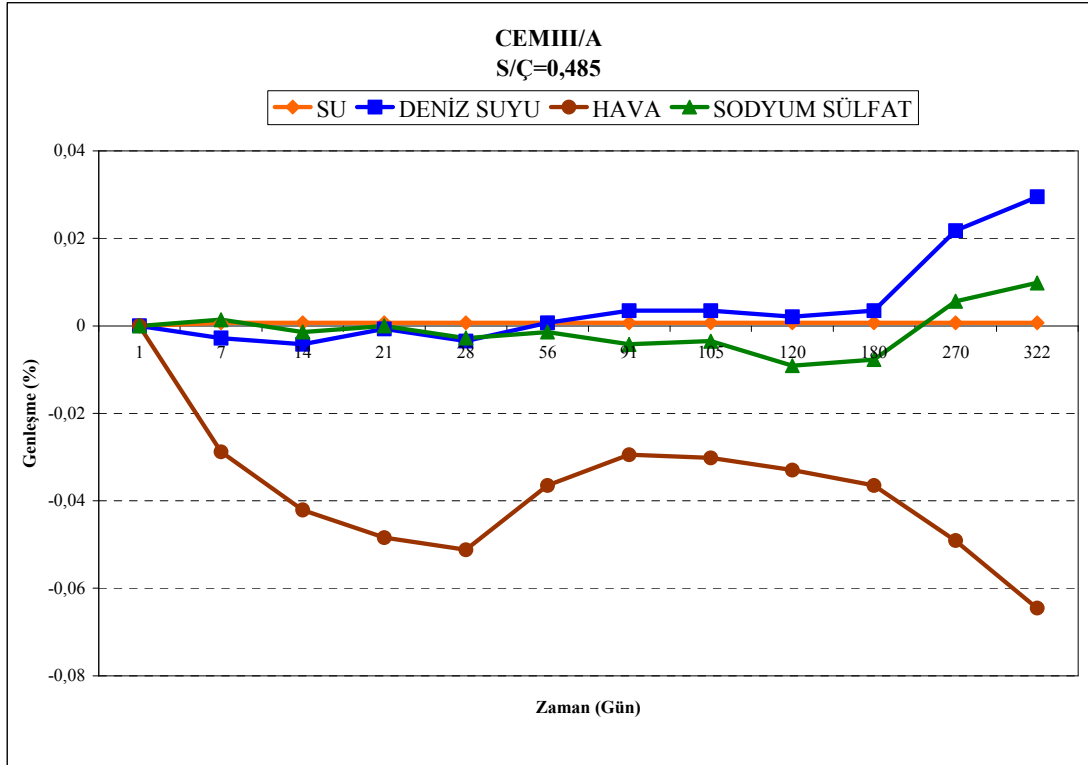


Şekil 5.7 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri



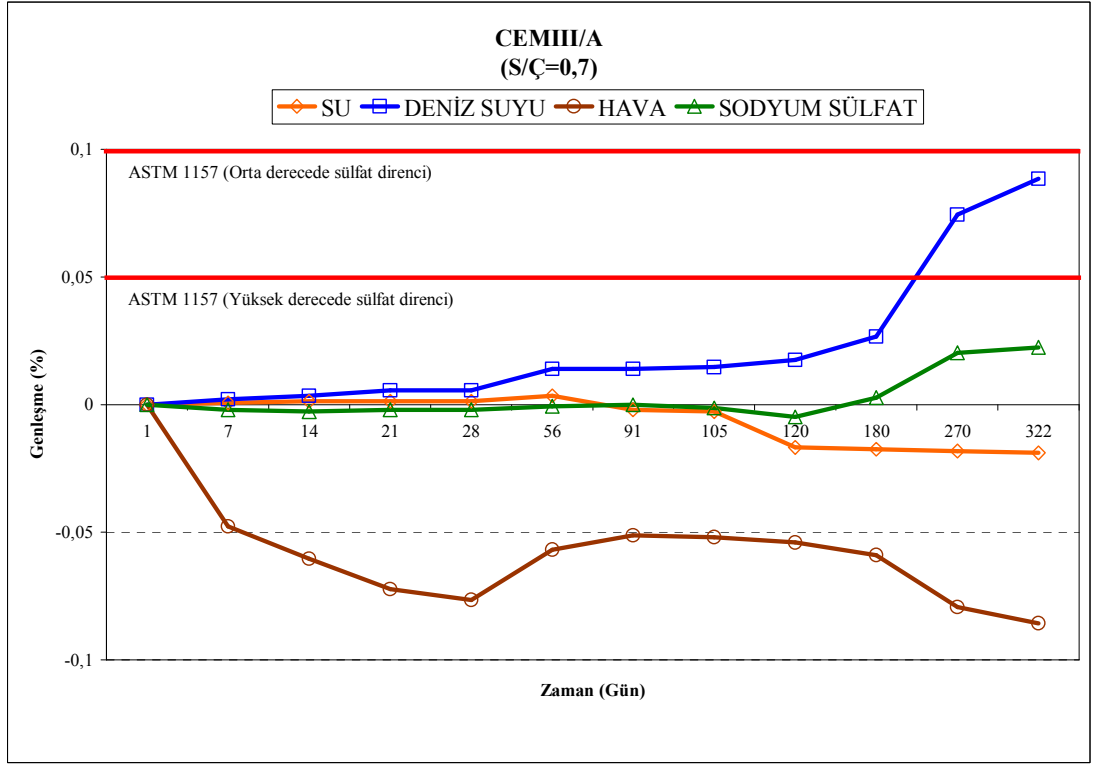
Şekil 5.8 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.9'da görülen grafikten, CEM III/A çimentosuyla üretilen örneklerin su/çim.=0,485 olduğu durumda sülfatlı ortamlarda zarar görmediği, genleşmelerin kısıtlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu çimentonun katkı türü ve miktarının, su/çimento oranının düşük olmasının bu sonucu ortaya çıkardığı söylenebilmektedir.



Şekil 5.9 CEM III/A 42,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

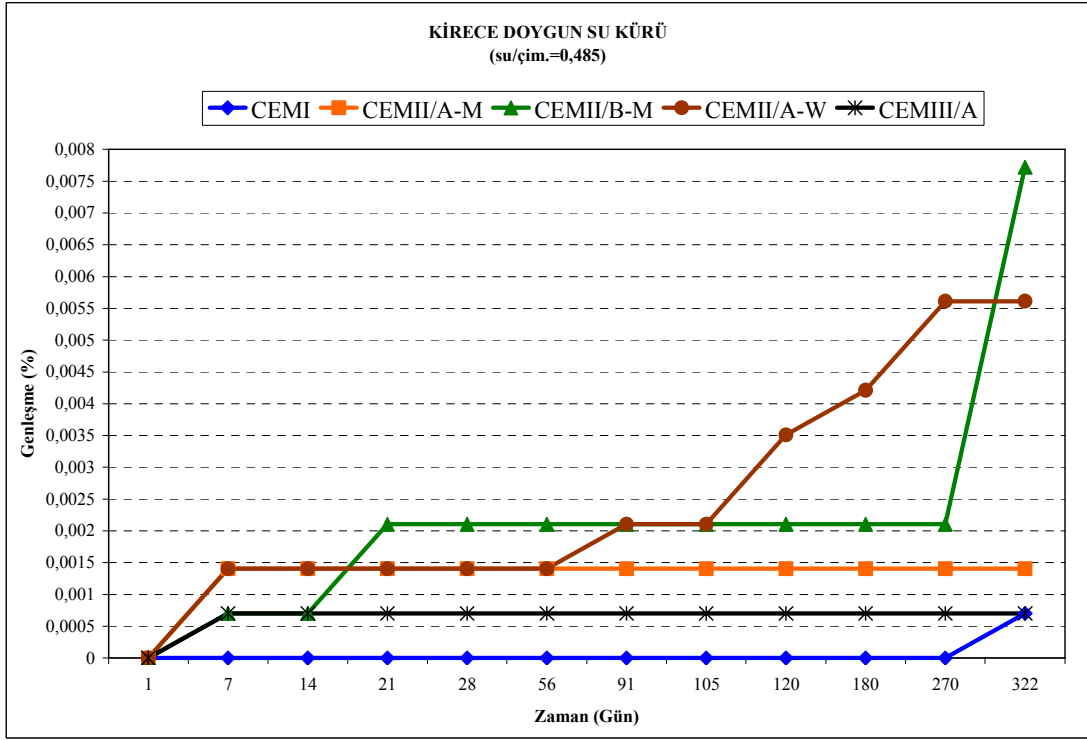
Kutlu ve Demiriz (2007) tarafından belirtildiği gibi, deniz suyunun sülfatları klor miktarının yüksekliği nedeniyle aşırı genleşme oluşturmazlar. Çünkü ilk etapta alçıtaşı (jips) oluşumu ve ikinci etapta etrenjit oluşumu azalır veya deniz suyu tarafından yıkanarak giderilirler. Öte taraftan YFC,  $C_3A$ 'nın miktarını düşürerek de etrenjitin meydana gelmesindeki etkinliğini yok eder. Buna karşılık boşluklar içindeki tuzların kristalleşmesi çatlamalara ve dökülmelere yol açabilir. Geçirimsizliğin azaltılması ve boşlukların  $Mg(OH)_2$  ile tıkanması bu sorunu çözer. YFC ise bu iki niteliği sağlayan bir malzemedir. Şekil 5.10'da yer alan grafikte, su/çimento oranı 0,7 olan, CEM III/A çimentosuyla üretilen örneklerin ASTM C 1157'de belirtilen sınır değerleri aşmadığı görülmektedir. Bu sonucu destekleyen, Kutlu ve Demiriz (2007) tarafından yapılan çalışmada deniz suyunda bekletilen örneklerden cürufu çimentolar (%25–35 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren) ile üretilenler, portland çimentolarıyla üretilenlerden daha uygun davranış göstermiştir. Granüle cürufça zengin cürufu çimento (%50' den yüksek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren) istisnasız daha iyi dayanıklılık göstermiştir. Betonda daha az parçalanma ve betonarmede daha az korozyon olmuştur.



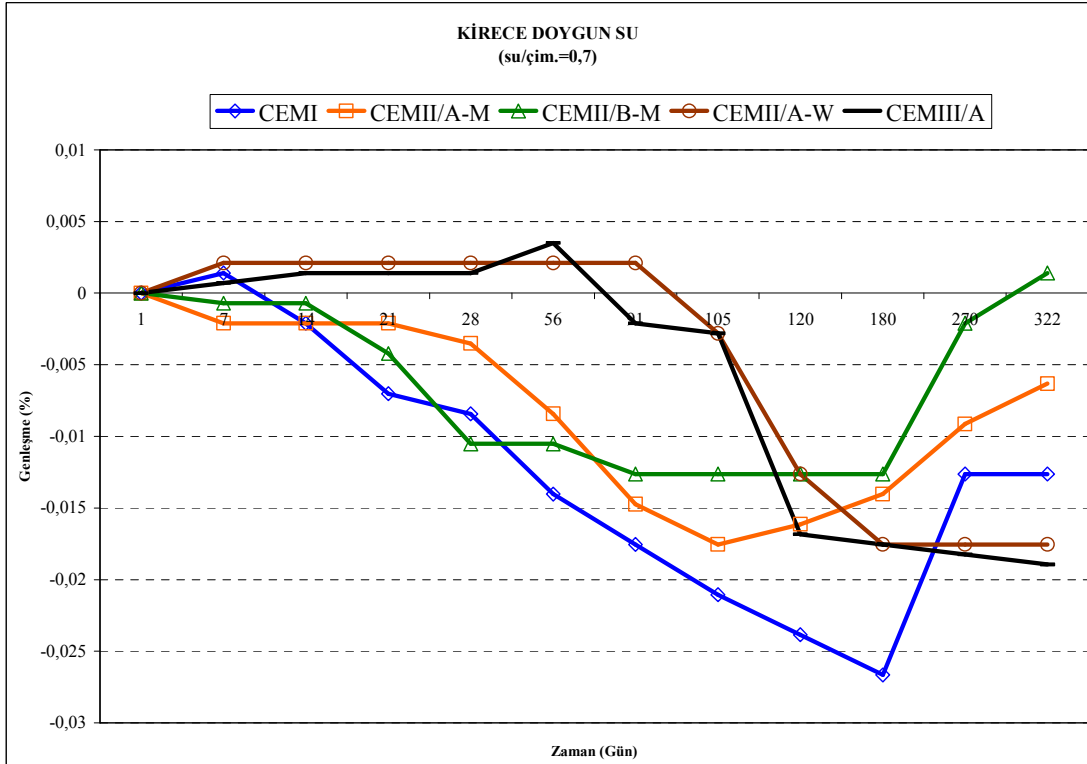
Şekil 5.10 CEM III/A 42,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.11, 5.12, 5.14, 5.15, 5.19, 5.20’de gösterilen grafiklerde tüm çimento tipleriyle hazırlanan örneklerin başlangıç küründen sonra 322 gün boyunca bekletildikleri koşullarda zamanla meydana gelen boy değişimleri yer almaktadır.

Şekil 5.11 ve 5.12’de sunulan grafiklerde kirece doymun suyun tehlike yaratan genleşmeye sebep olmadığı görülmektedir. 0,7 su/çimento oranında üretilen örnekler su içinde bekletildikleri süre boyunca içeriklerindeki fazla suyu atarak denge sağlamaya çalışmıştır. Bu nedenle önce büzülme, sonra genleşme sergilemişlerdir.



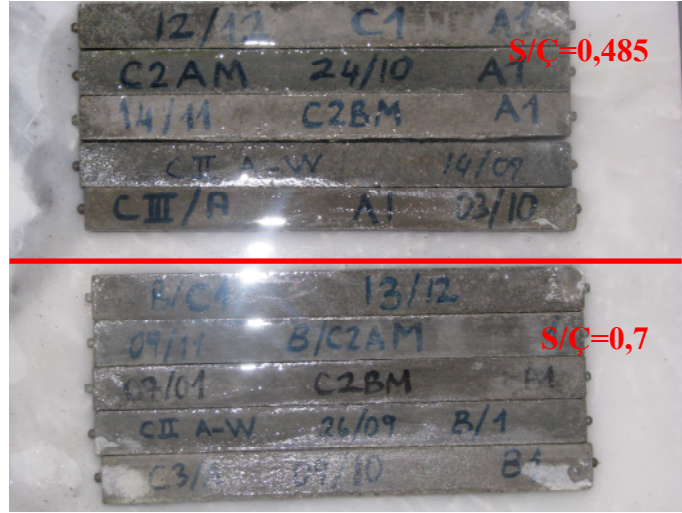
Şekil 5.11 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin kirece doygun su küründe zamana bağlı boy değişimleri



Şekil 5.12 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin kirece doygun su küründe zamana bağlı boy değişimleri

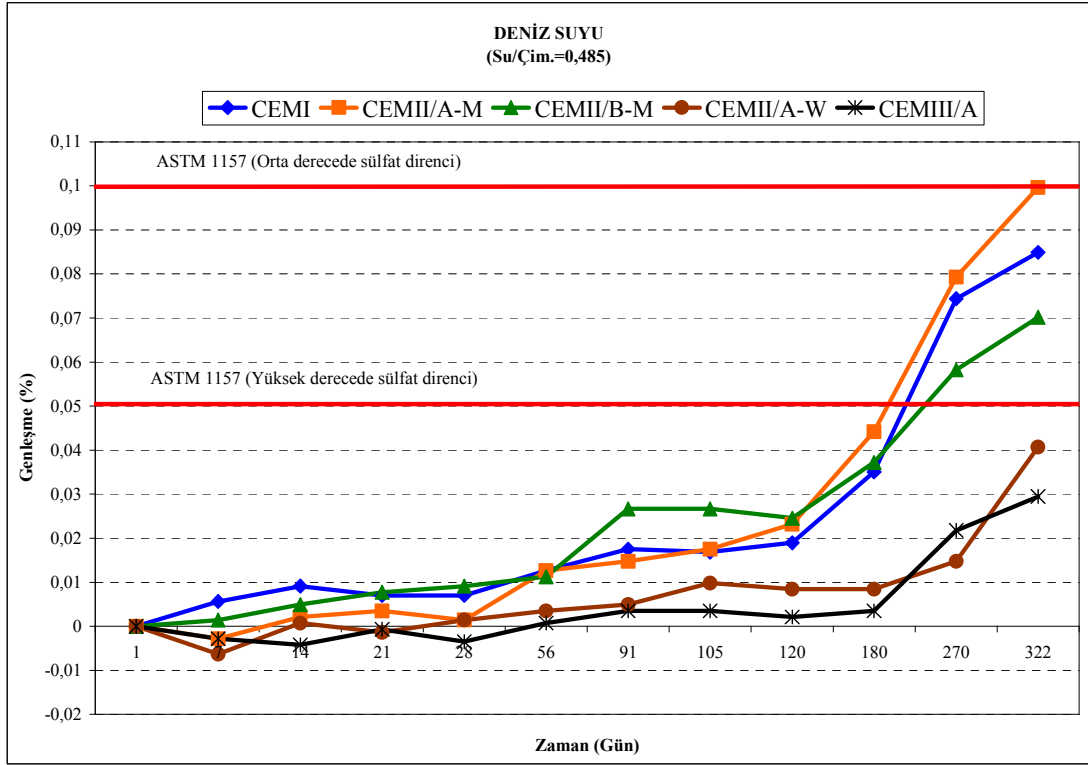


Şekil 5.13'te görülen fotoğrafta kirece doymun suyun örnekler üzerinde herhangi bir zararlı etkisinin olmadığı görülmektedir. Örneklerde hasara yol açan genleşme olmamaktadır.



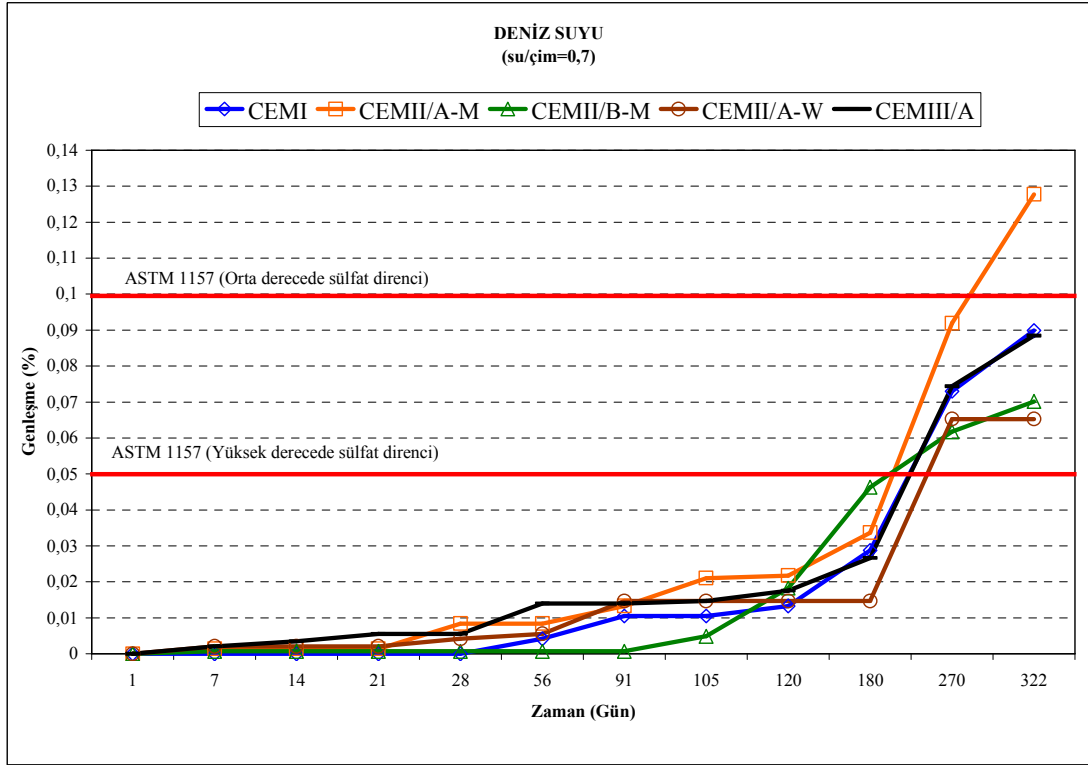
Şekil 5.13 Üstten alta sırayla su/çimento oranı 0,485 ve 0,7 olan örneklerin kirece doymun suda 350 gün bekletildikten sonraki görünüşleri

0,485 su/çimento oranında tüm çimento tipleriyle üretilen harçlar, Şekil 5.14'te gösterildiği gibi deniz suyunda bekletildikleri 322 gün sonunda ASTM 1157'de belirtilen sınır değerlerin altında kalmıştır. En az boy değişimi gösteren çimento tipi CEM III/A 42,5 N ve CEM II/A-W olmuştur. CEM III/A çimentosunun içeriğindeki yüksek fırın cürufu ve CEM II/A-W çimentosunun dayanım sınıfının yüksek olması deniz suyundaki sülfat konsantrasyonuna olan direnci arttırmıştır. Santhanam ve diğer. (2006) tarafından ifade edildiği gibi, etrenjit oluşumu deniz suyunda bekletilen harçlarda da gözlenir, yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu etrenjitin genleşme özelliğini azaltır. Deniz suyundaki harçlarda Friedel Tuzu olarak isimlendirilen kloro-alümina bileşikler gözlenir. Deniz suyunda bekletilen harçlarda brusit tabakasının kalınlığı, yeraltı suyunda bekletilen harçlardan daha fazladır ve sülfat etkisine karşı koyan bariyer konumundadır.



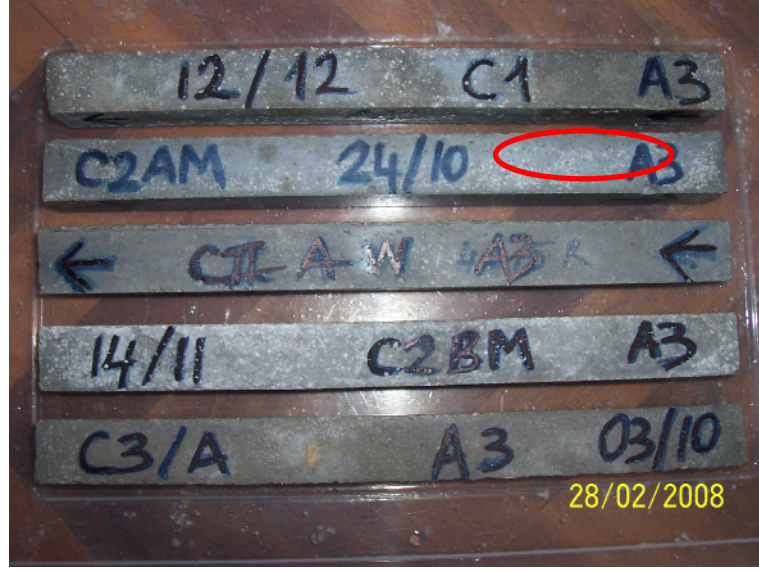
Şekil 5.14 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin deniz suyunda bekletilmesi sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.15'te görüldüğü gibi, tüm çimento tipleriyle üretilen harçlar ASTM 1157'ye göre sülfata yüksek derecede dayanıklı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 5.15 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin deniz suyunda bekletilmesi sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.16 ve 5.17’de işaretli olan gözle görülür kabuk atma farkı ise CEM II/A-M çimentosunun su/çimento oranına göre davranışını desteklemektedir.

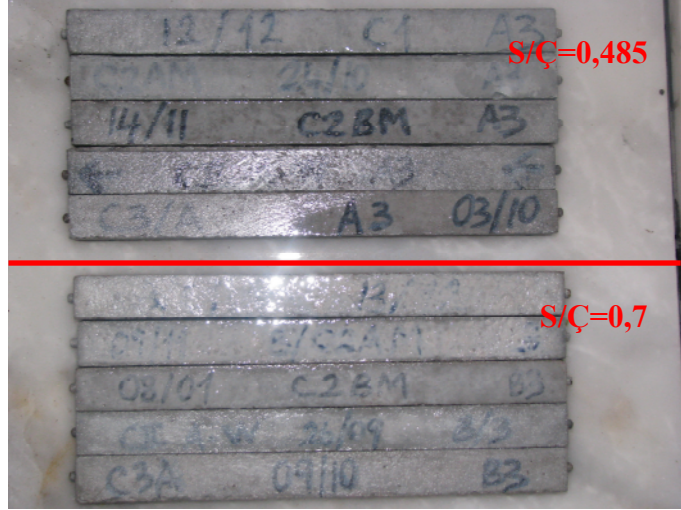


Şekil 5.16 CEM II/A-M(P-W) 42,5R ile hazırlanan, su/çim.=0,485 olan örneğin, deniz suyundaki tuz oranı etkisiyle 127. gündeki durumu. Yukarıdan aşağıya sırayla CEM I, CEM II/A-M, CEM II/A-W, CEM II/B-M, CEM III/A çimentoları



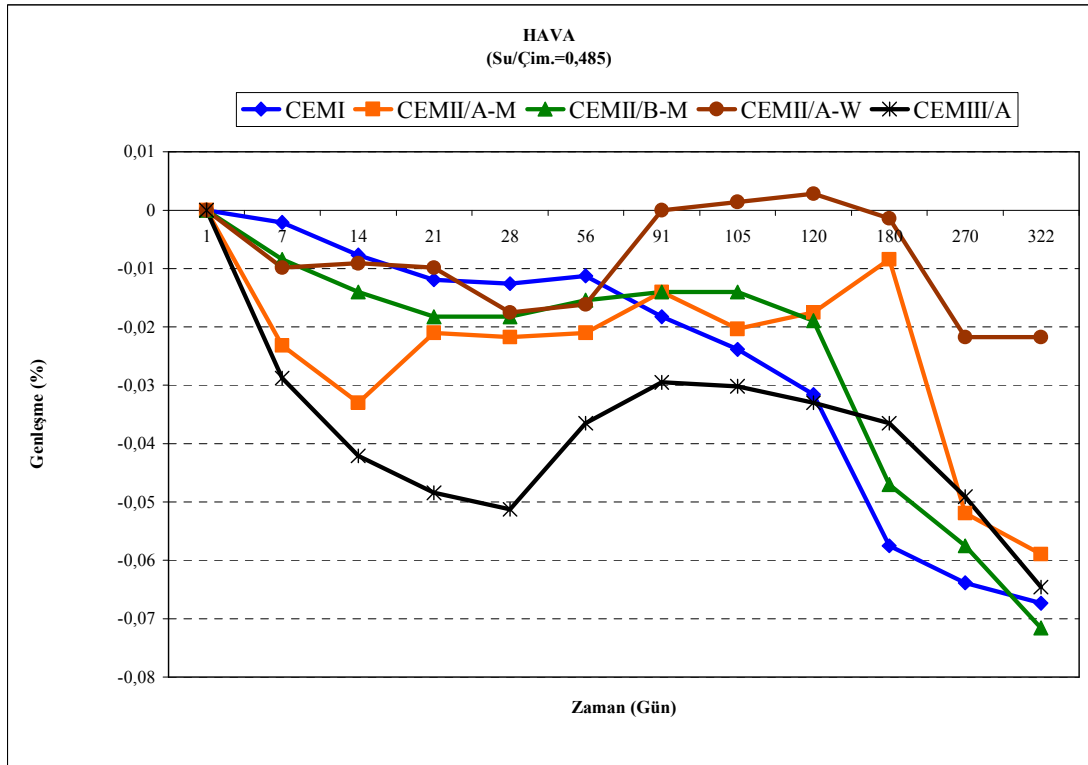
Şekil 5.17 CEM II/A-M(P-W) 42,5R ile hazırlanan, su/çim.=0,7 olan örnekte, deniz suyundaki tuz oranı etkisiyle 111. günde oluşan kabuk atma. Yukarıdan aşağıya sırayla CEM I, CEM II/A-M, CEM II/A-W, CEM II/B-M, CEM III/A çimentoları

Şekil 5.18'de tüm örnek tiplerinin deniz suyunda bekletilmeleri sonucunda görünümünde meydana gelen değişim görülmektedir. 0,485 ve 0,7 su/çimento oranında hazırlanmış olan tüm örneklerin yüzeyi tamamen tuzla kaplı hale gelmiştir.



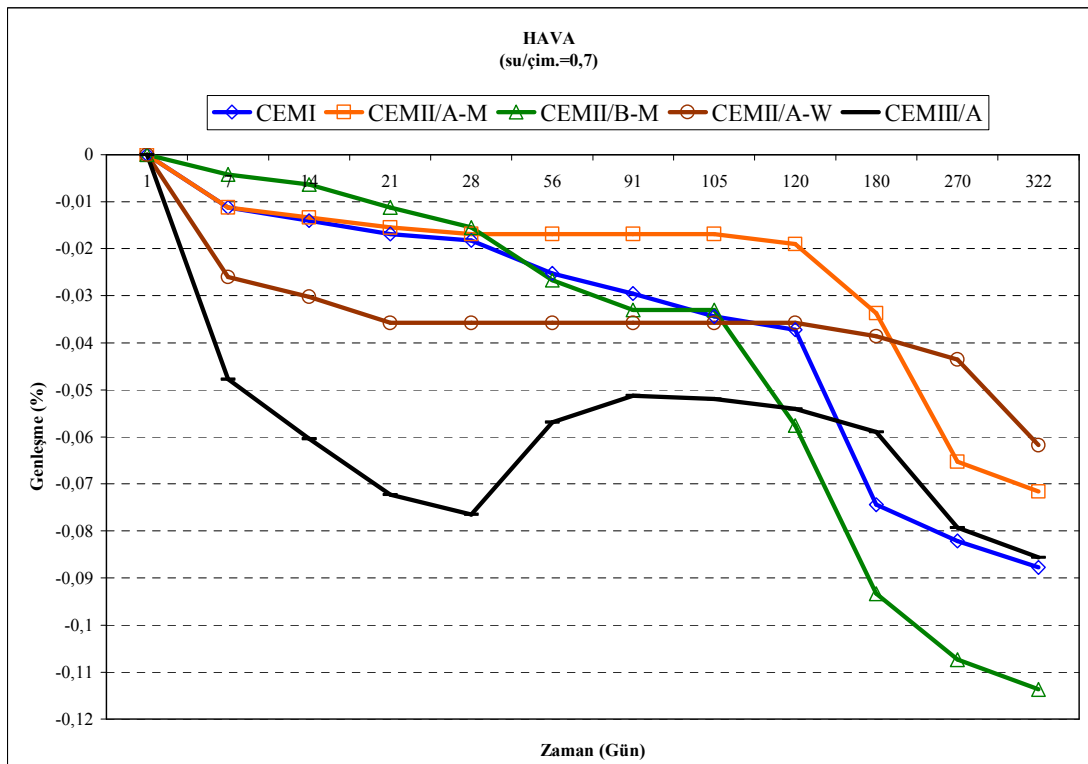
Şekil 5.18 Üstten alta su/çimento oranı 0,485 ve 0,7 olan örneklerin 350 gün sonunda tamamen tuzla kaplanmış hali

Şekil 5.19'da gösterilen grafikte havada bekletilen örnekler arasında 322 gün sonunda en az büzülme değerine CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla hazırlanan örneklerin sahip olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi, dayanım sınıfının ve 350. gün basınç dayanımlarının diğerlerinden yüksek oluşudur.



Şekil 5.19 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin havada bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

CEM II/B-M 32,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örnekler Şekil 5.20'de görüldüğü gibi daha fazla büzülme sergilemiştir. Bunun sebebi, Erdoğan (2003) tarafından belirtildiği gibi, artan su/çimento oranı, örneklerin dayanımını düşürmesinin yanında büzülmelerini de artırır. Dayanım sınıfı ve 350. gün basınç dayanımları diğerlerine göre düşük değerde olan CEM II/B-M çimentosu bu sebeplerle başlangıç küründen sonraki 322 günlük süre sonunda daha fazla büzülme değerine sahip olmuştur. Ayrıca, artan su/çimento oranı tüm örneklerin nihai büzülmelerini arttırmıştır.

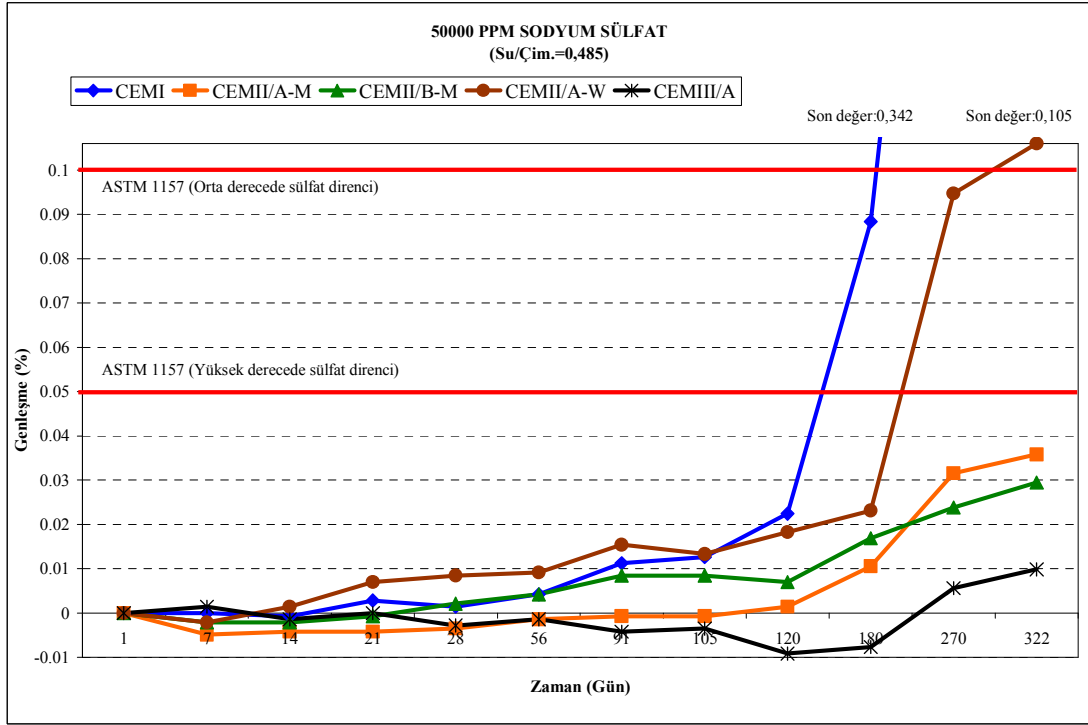


Şekil 5.20 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin havada bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

Alçıtaşı oluşumu saha koşullarında seyrek rastlanan bir oluşumdur ve oluşumun meydana gelmesi için beton gözeneklerinden çok güçlü ve büyük miktarda alkali iyonu kaybı olması gerekmektedir. Bu sebeple, saha koşullarındaki beton performansı, laboratuvar koşullarındakinden oldukça farklıdır. Yüksek konsantrasyonlu sülfat çözeltisinin betonda sebep olduğu hasar tipi, saha koşullarındakinden farklıdır, çünkü laboratuvardaki beton hasarı alçıtaşı ve etrenjit

çökmesi sonucu oluşmaktadır. Bu durum ise, etrenjitin tek başına oluşumundan daha saldırgan bir özelliğe sahiptir (Bellmann ve diğer., 2006).

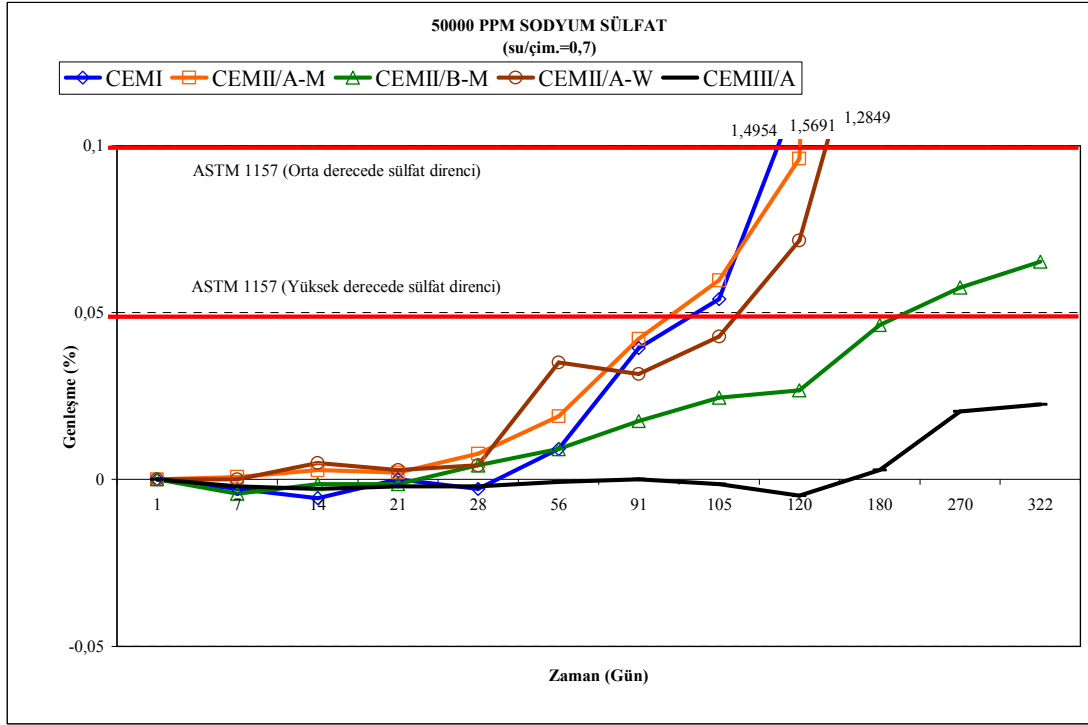
Kimyasal tepkimeler sonucu meydana gelen etrenjit, bünyesinde mevcut yüksek oranda su nedeniyle çimento hamurunun genişmesine ve dolayısıyla betonun çatlamasına neden olur. Öte yandan alçıtaşı, sertleşmiş betonda kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jeli civarında birikmesi sonucu sülfat iyonlarının çimento hamuruna nüfuz etmesini kolaylaştırmakta ve çimento hamurunun zayıflamasına neden olmaktadır. Bu nedenle,  $C_3A$  miktarı az olan çimentoların  $C_3S$  miktarlarının fazla olması durumunda açığa çıkan  $Ca(OH)_2$  miktarı fazla olacağı için sülfat saldırısı etkin olmaktadır. Bu durumda etkileşim genişmeyi takiben çatlama biçiminde değil, kısmen çimento hamurunun yumuşaması sonucu rijitlik kaybı şeklinde oluşmaktadır (Erdoğan ve Karataş, 2003). Ramyar ve İnan (2007), sodyum sülfata maruz kalan çimentolarda mineral katkı (uçucu kül ve doğal puzolan) kullanımının genişmeleri sınırlandırdığını saptamışlardır. Bu etki, yüksek oranda çimento ile mineral katkı yer değiştirdiğinde ve çimento düşük oranda  $C_3A$  ile düşük  $C_3S/C_2S$  oranına sahip olduğunda daha belirgindir. Çimentonun kompozisyonundan bağımsız olarak, mineral katkıların etkinliği düşük sülfat konsantrasyonunda daha yüksektir ve genişmeler kısıtlanır (Ramyar ve İnan, 2007). Bu bakımdan, sülfatların yoğun olarak bulunduğu ortamlara maruz betonların üretiminde  $C_3A$  miktarı düşük çimento kullanımı tek başına çözüm olmayabilir, aynı zamanda çimentonun  $C_3S$  miktarının da düşük olması gerekir (Erdoğan ve Karataş, 2003). Bu bilgi, Şekil 5.21'de gösterilen sonucu desteklemektedir.  $C_3A$  ve  $C_3S$  miktarlarının büyükten küçüğe sıralanışı CEM I>CEM II/A-W>CEM II/A-M>CEMII/B-M>CEM III şeklindedir. Bu nedenle, CEM I çimentosuyla hazırlanan harçların 1 yıllık sınır değeri aşmış olabileceği düşünülmektedir. Yazıcı (2006) tarafından yapılan çalışmada, sürekli sülfat çözeltisinde 26 hafta bekletilen, bağlayıcı olarak sadece Portland çimentosu içeren karışımın genişleme mertebesinin ASTM 1157'de tariflenen sınırları aştığı, buhar kürü ile genişleme mertebesinin azaldığı belirtilmiştir.



Şekil 5.21 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.22’de ise 0,7 su/çimento oranında hazırlanan harçlar arasında CEM II/B-M 32,5 R ve CEM III/A 42,5 N çimentolarıyla hazırlanan örneklerin standart sınır değerleri altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu çimentoların diğerlerinden fazla miktarda mineral katkı içermeleri ve yüksek inceliğe sahip olmaları sodyum sülfata karşı yüksek koruma sağlamıştır. Tüm çimento tipleri arasında en düşük  $C_3A$  ve  $C_3S$  oranına sahip olan çimento tipleri de bunlardır.





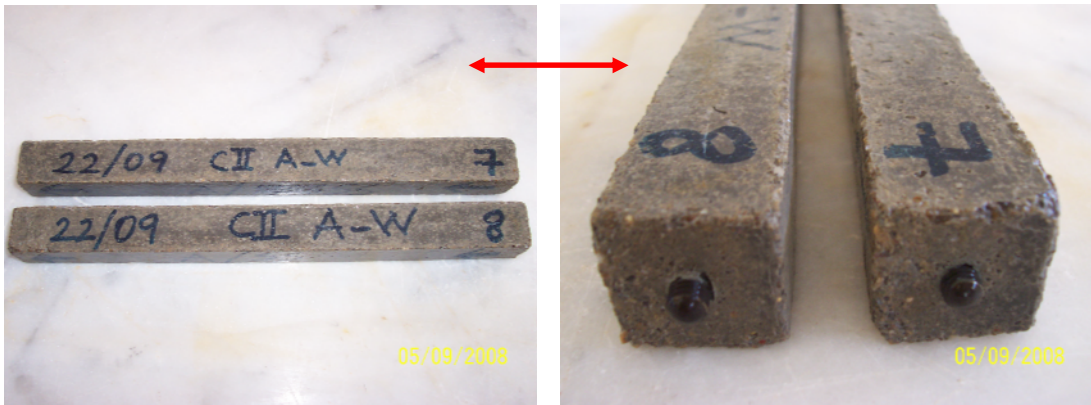
Şekil 5.22 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.23'teki fotoğrafta görülen 0,7 su/çimento oranında, CEM II/A-M (P-W 42,5 R çimentosuyla hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu harç örneği, 50000 ppm sodyum sülfatta beklediği 322 gün sonunda çatlaklar sergilemiştir.

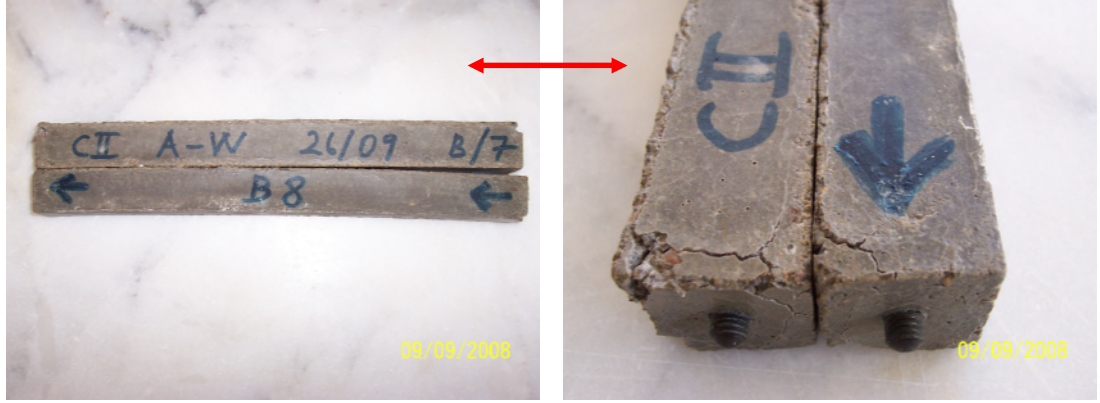


Şekil 5.23 Su/çimento=0,7 olan 40x40x160 mm boyutlu, CEM II/A-M (P-W)42,5R çimentosu içeren prizmatik örneğin 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 322. günü

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te görüldüğü gibi, 0,485 su/çimento oranına sahip örneklerde gözle görülür fazla bir değişiklik bulunmamaktadır. Buna karşın, 0,7 su/çimento oranında, CEM II/A-W 52,5 N çimentosu kullanılarak üretilen harç çubuklarının 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 322 gün sonunda derin çatlaklara sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.24 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan harçların 322 gün sonraki durumları



Şekil 5.25 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan harçların 322 gün sonraki durumları

Şekil 5.26'da, 0,7 su/çimento oranında CEM II/A-M (P-W) 42,5 R çimentosuyla hazırlanan harç çubuğunun kıvrılarak hasarın boyutunu sergilediği görülmektedir. 0,485 su/çimento oranında hazırlanmış olan çubuklarda gözle görülür bir değişim olmamıştır.



Şekil 5.26 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 322. gün. Yukarıdan aşağıya CEM I, CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM II/A-W, CEM III çimentoları.

Tablo 5.2'de örneklerin 0,485, 0,6 ve 0,7 su/çimento oranlarına ilişkin eğilme dayanımı değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre eğilme dayanımı değerleri (MPa)

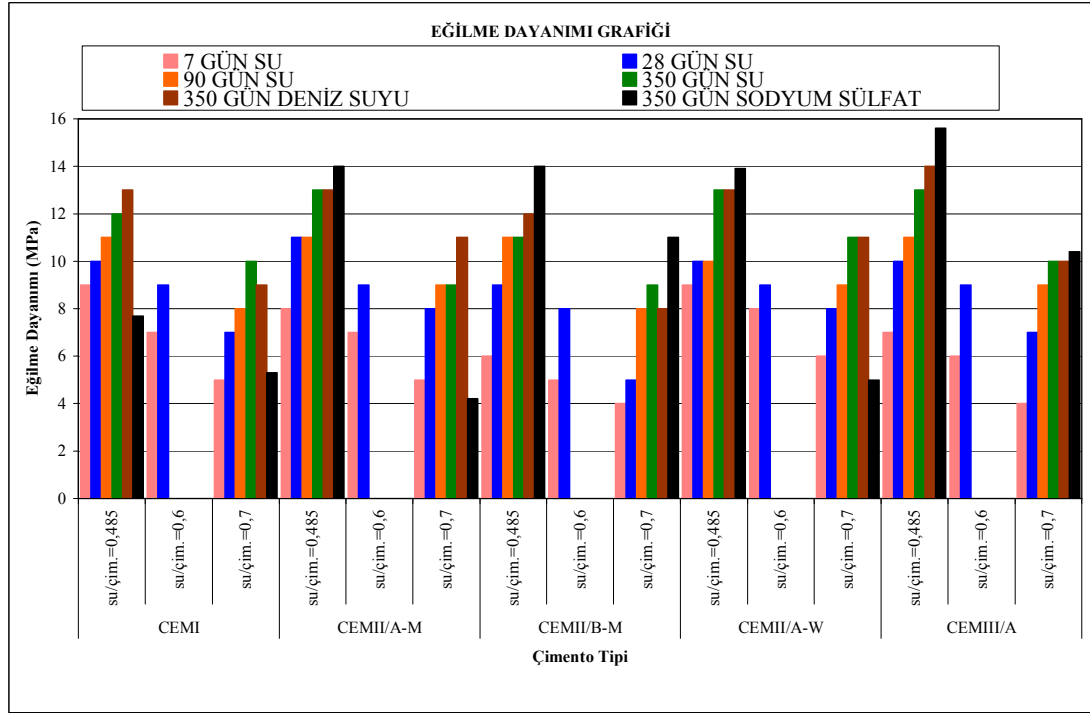
Su/çim.=0,485		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	9	8	6	9	7
28	SU	10	7	9	10	10
90	SU	11	11	11	10	11
350	SU	12	13	11	13	13
350	DENİZ SUYU	13	13	12	13	14
350	SODYUM SÜLFAT	8	14	14	14	16
Su/çim.=0,6		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	7	7	5	8	6
28	SU	9	9	8	9	9
Su/çim.=0,7		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	5	5	4	6	4
28	SU	7	8	5	8	7
90	SU	8	9	8	9	9
350	SU	10	9	9	11	10
350	DENİZ SUYU	9	11	8	11	10
350	SODYUM SÜLFAT	5	4	11	5	10

Tablo 5.3'te örneklerin 0,485, 0,6 ve 0,7 su/çimento oranlarına göre değişen basınç dayanımı değerleri sıralanmıştır.

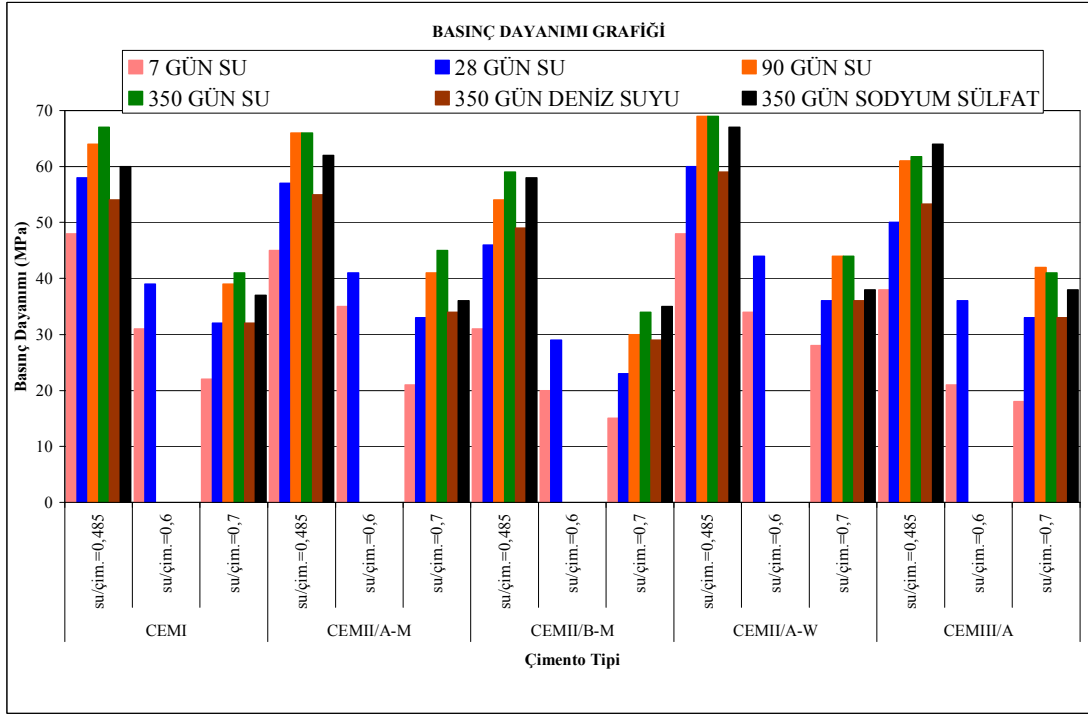
Tablo 5.3 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre basınç dayanımı değerleri (MPa)

Su/çim.=0,485		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	48	45	31	48	38
28	SU	58	57	46	60	50
90	SU	64	66	54	69	61
350	SU	67	66	59	69	62
350	DENİZ SUYU	54	55	49	59	53
350	SODYUM SÜLFAT	60	62	58	67	64
Su/çim.=0,6		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	31	35	20	34	21
28	SU	39	41	29	44	36
Su/çim.=0,7		Çimento Tipi				
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
7	SU	22	21	15	28	18
28	SU	32	33	23	36	33
90	SU	39	41	30	44	42
350	SU	41	45	34	44	41
350	DENİZ SUYU	32	34	29	36	33
350	SODYUM SÜLFAT	37	36	35	38	38

Şekil 5.27 ve 5.28’da, Tablo 5.2 ve 5.3’ün grafiksel ifade edilişleri gösterilmektedir. Grafiklerde, su/çimento oranının artışıyla tüm koşullarda eğilme ve basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Artan su/çimento oranı, örneklerin yapısında daha büyük boşluklara neden olmaktadır. Oluşan boşluklar dayanımı düşürmektedir.



Şekil 5.27 Tüm örneklerin eğilme dayanımı değerlerine ait grafik



Şekil 5.28 Tüm örneklerin basınç dayanımı değerlerine ait grafik

Şekil 5.29’da, su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin eğilme dayanımı verileri “MPa” birimiyle ifade edilmektedir. Şekil 5.30’da su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin eğilme dayanımlarının, her bir çimentonun kendine ait olan, 28 gün boyunca suda kür edilen örneklerine göre bağlı verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar tüm örneklerde artış sergilemiştir. Sodyum sülfatta ise CEM I çimentosu içeren örnekler hariç tüm örneklerin eğilme dayanımları artış göstermiştir. CEM I çimentosuyla üretilen ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler yüksek sülfat konsantrasyonunda daha fazla hasara uğramaktadır.

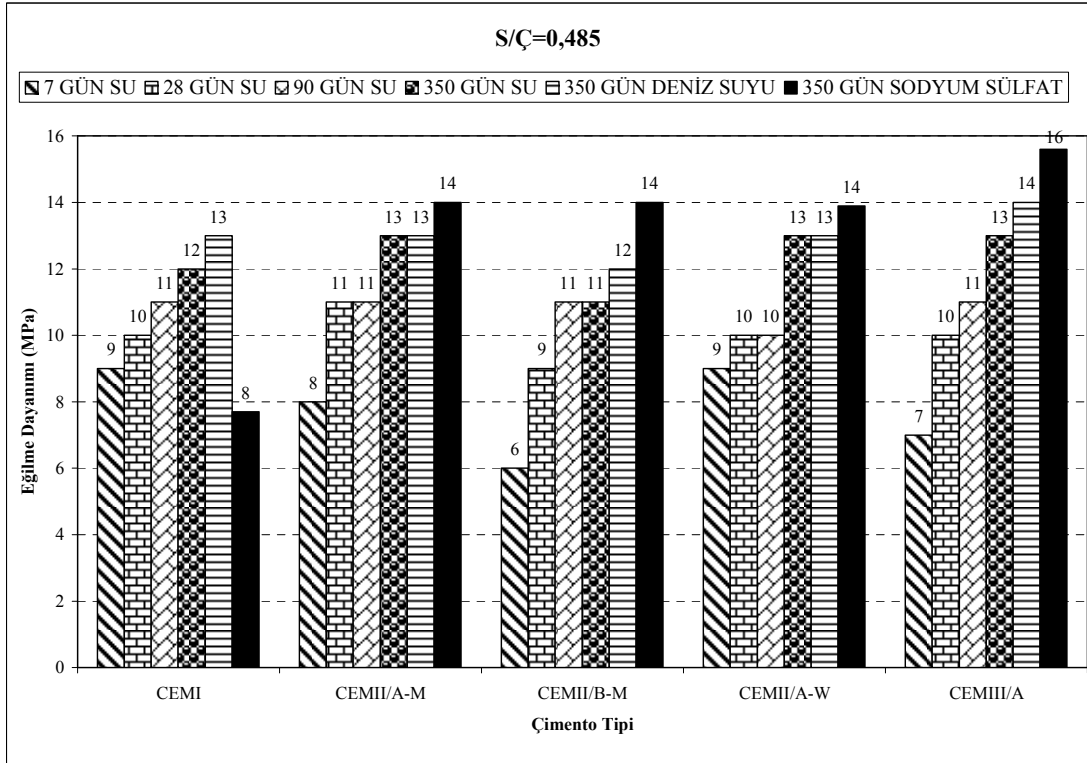
Deniz suyunda bekletilen örnekler arasında eğilme dayanımı en çok artan örnek tipi CEM III/A çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bu durumun CEM III/A çimento tipinin %45,36 oranında yüksek fırın cürufu içermesi sebebiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. CEM II/A-M çimentosu ile üretilen örnekler ise tüm örnekler arasında en az dayanım artışına sahip olanlardır. Lorenzo ve diğer. (2003), Yazıcı ve diğer. (2003) tarafından ifade edildiği gibi, özellikle yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu etkisi ile arttığı görülmektedir. Bu durum klorür, sülfat ve sodyum iyonlarının uçucu külün pozolanik reaksiyonunu

aktive etmesiyle açıklanmaktadır. Bu çalışmada ise, yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivitesinin de deniz suyu etkisiyle artış gösterdiği görülmüştür.

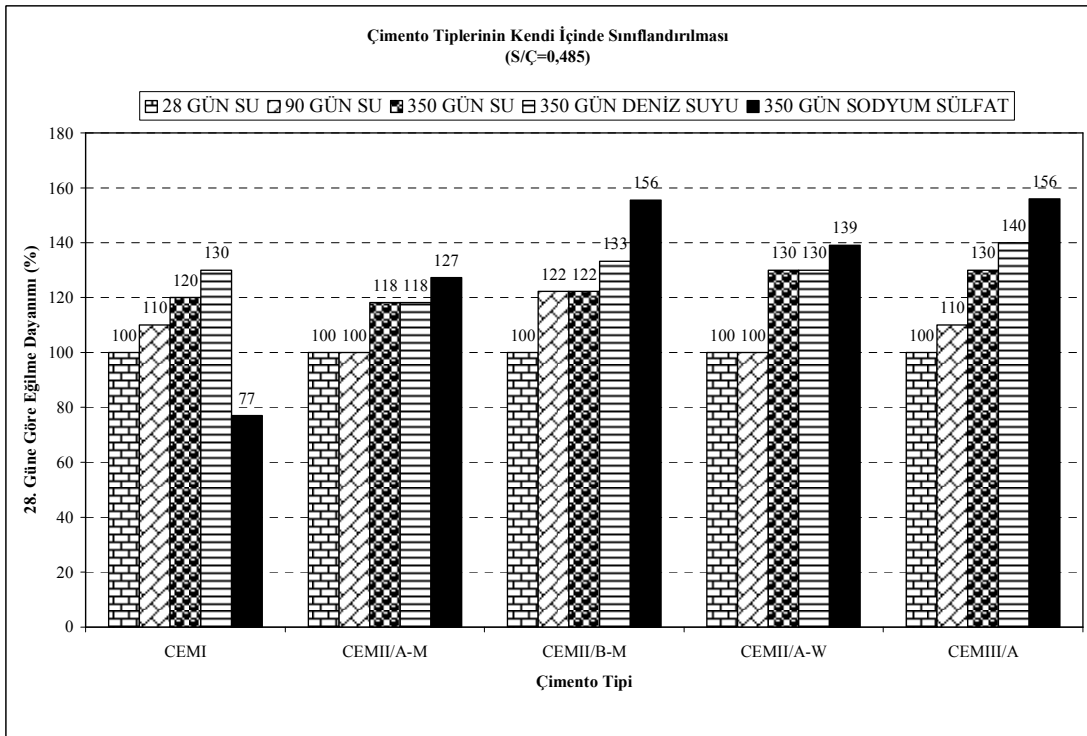
Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler arasında eğilme dayanımı en fazla artanlar ise CEM II/B-M ve CEM III/A çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bu artış, 28 günlük dayanımlarına göre %56 civarındadır. Bu iki çimento tipinin mineral katkı miktarlarının diğerlerine göre fazla olması ve  $C_3A$  miktarlarının az olması bu duruma yol açmıştır. 28 günlük dayanımıyla kıyaslandığında %23 dayanım kaybeden örnek tipi ise CEM I çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bunun sebebi, bu çimento tipinin mineral katkı içermemesi nedeniyle yüksek sülfat konsantrasyonuna olan direncinin düşük olmasıdır.

Şekil 5.31'de yer alan grafikte su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin eğilme dayanımlarının, her bir çimentonun kendine ait olan, 350 gün boyunca suda kür edilen örneklerine göre bağıl verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar tüm örneklerde artış sergilemiştir. Dayanımı en fazla artış gösteren örnekler, CEM II/B-M ve CEM III/A çimentolarıyla üretilenler olmaya devam etmiştir. Sodyum sülfat çözeltisinde ise CEM I çimentosu içeren örnekler hariç tüm örneklerin eğilme dayanımları artış göstermiştir. Şekil 5.31'e göre, sodyum sülfat çözeltisinde eğilme dayanımları en fazla artış gösteren örnek CEM II/B-M ve CEM III/A çimentosuyla üretilen örnek tipleri olmuştur.

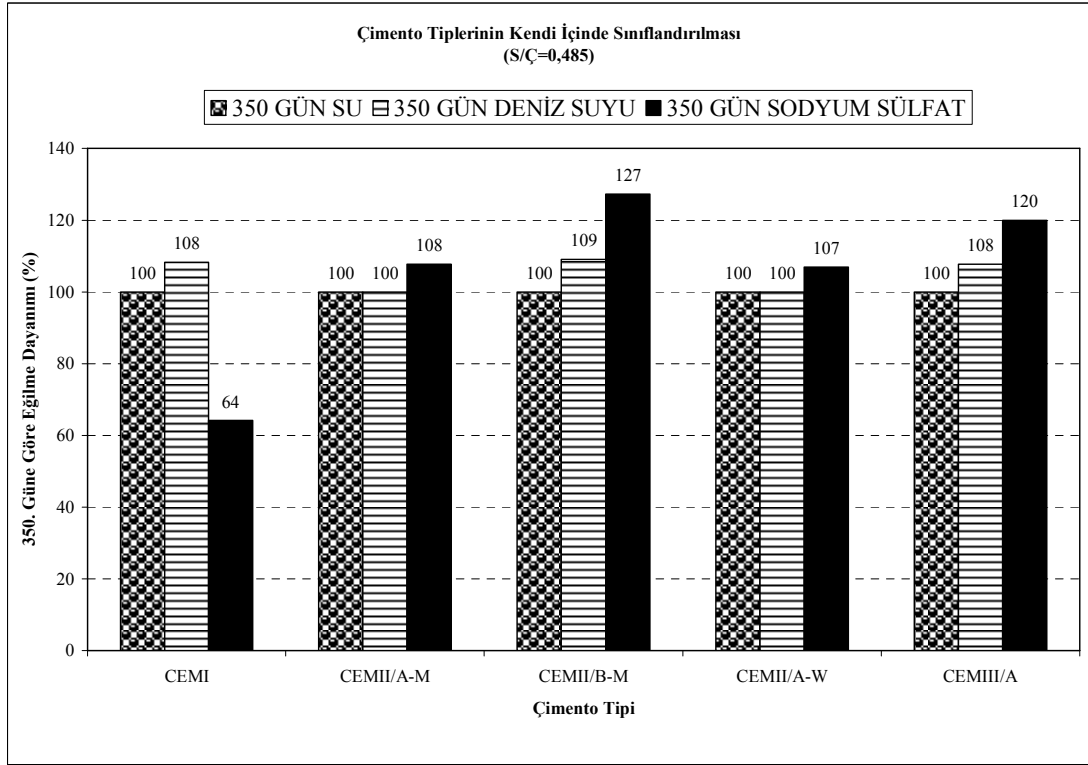




Şekil 5.29 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin eğilme dayanımı grafiği

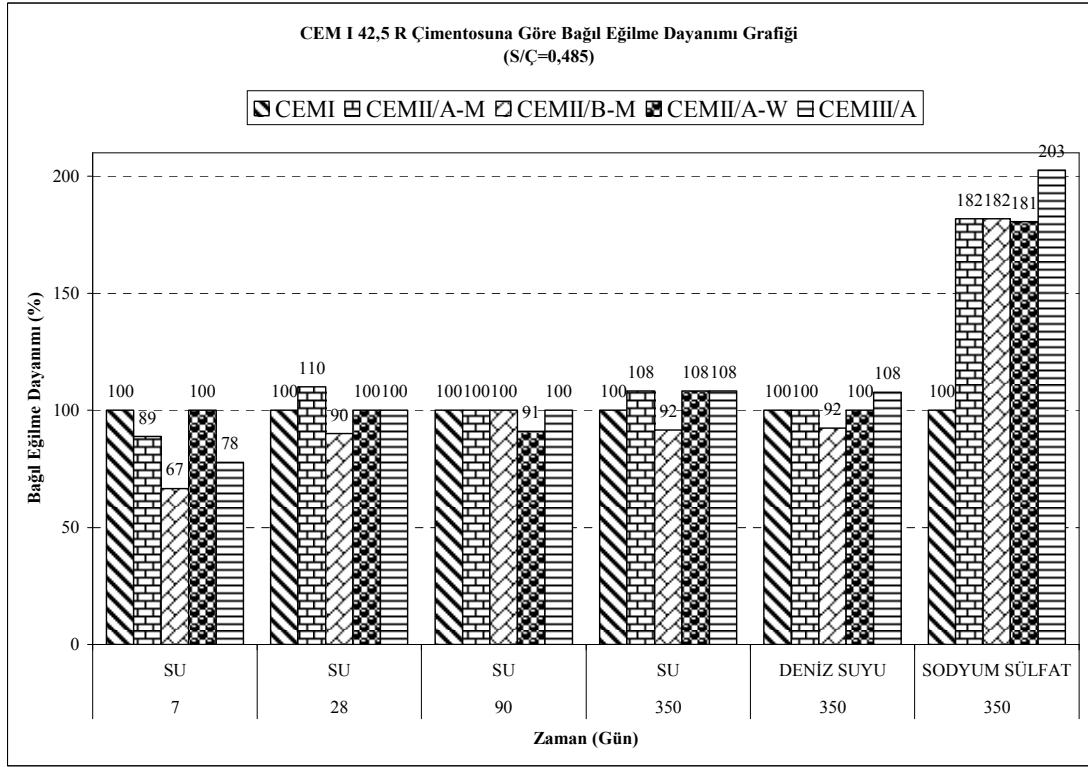


Şekil 5.30 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağıl eğilme dayanımı grafiği



Şekil 5.31 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 350. gün- kirece doymun su verilerine göre bağıl eğilme dayanımı grafiğı

Şekil 5.32’de her bir çimento tipiyle hazırlanan örnek verilerinin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre kıyaslanması gösterilmektedir. Bu grafikte CEM I 42,5 R çimentosunun tüm verileri %100 olarak ifade edilmiş ve diğer veriler bu değere göre hesaplanmıştır. Sodyum sülfat çözeltisine ve deniz suyuna en dayanıklı örnek tipinin CEM III/A çimentosuyla hazırlananlar olduğu görülmektedir. Bu çimentonun inceliğinin yüksek olması, düşük C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S içeriğı ve içeriğindeki yüksek fırın cürufu sülfata ve deniz suyundaki diğer bileşenlere karşı direnç sağlamaktadır.



Şekil 5.32 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği

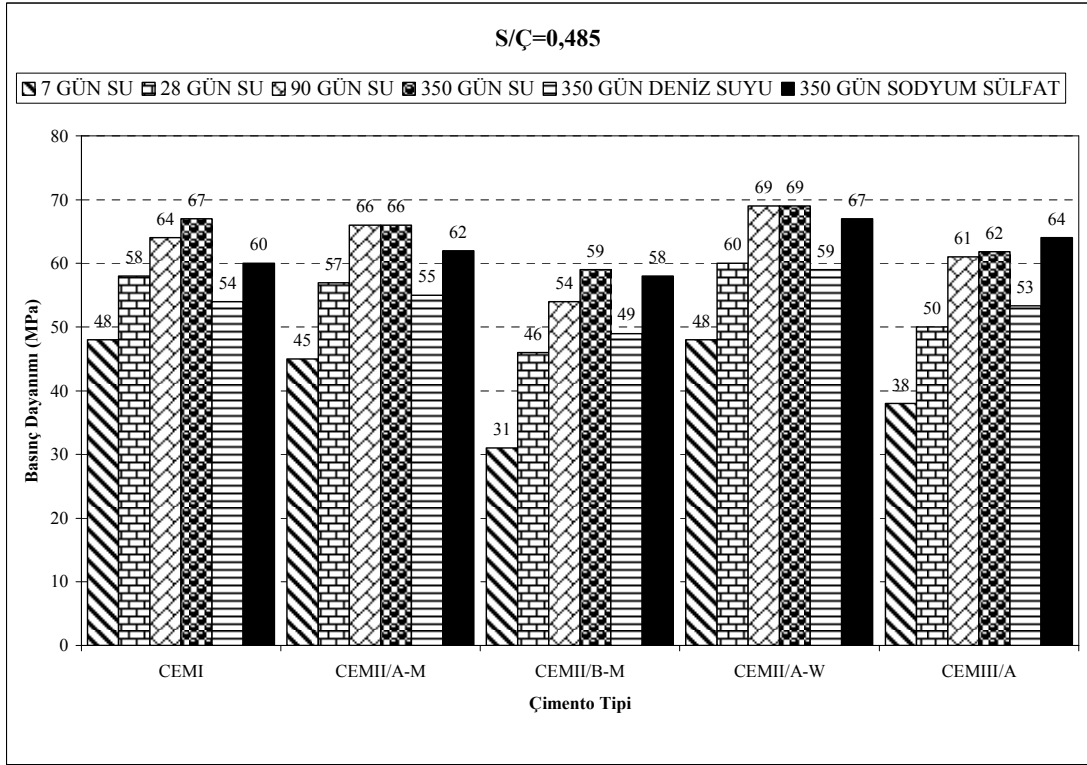
Yazıcı ve diğer. (2003) tarafından ifade edildiği gibi, cürufli çimento içeren karışımlarda deniz suyu etkisi ile dayanımlarda genellikle artışlar elde edilmiştir. Bu durum deniz suyunda bulunan klorür ve sodyum iyonlarının puzolanik reaksiyonu arttırması ile açıklanabilir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Şekil 5.33'te, su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin basınç dayanımı verileri "MPa" birimiyle ifade edilmektedir. Şekil 5.34'te su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin basınç dayanımlarının 28 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağlı verileri görülmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar CEM III/A ve CEM II/B-M çimentosuyla hazırlananlar hariç diğer tüm örneklerde azalma sergilemiştir. Sodyum sülfatta ise tüm örneklerin basınç dayanımları artış göstermiştir. Her iki koşulda da dayanımı en fazla artan örnekler, CEM III/A ve CEM II/B-M ile üretilenler olmuştur. Her iki koşulda da dayanım performansı 28 günlük dayanıma göre düşük olan örnek, CEM I çimentosuyla üretilen olmuştur.

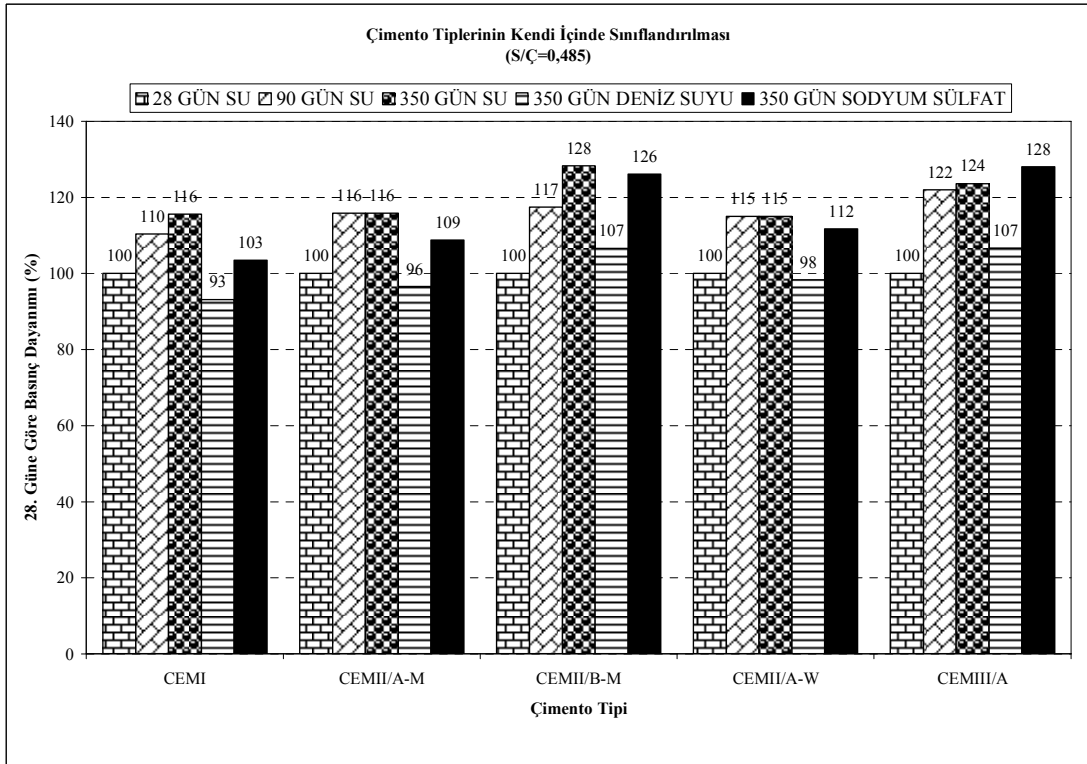
Şekil 5.35'te yer alan grafikte su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin basınç dayanımlarının 350 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağıl verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar tüm örneklerde azalma sergilemiştir. Sodyum sülfatta ise CEM III/A çimentosu içeren örnekler hariç tüm örneklerin basınç dayanımları azalma göstermiştir. Her iki bekletilme koşulunda da dayanımı en fazla azalan örnek, CEM I çimentosuyla üretilenler olmuştur. Kumar (2000) tarafından yapılan çalışmada, denizel etki, betonun basınç dayanımını yaşla ters orantılı olarak azaltmıştır.

Neville (2004) tarafından ifade edildiği gibi, sülfat saldırısını tespit edebilmek için kullanılan yöntemlerden biri basınç dayanımındaki değişimi gözlemlemektir. Dayanımda değişiklik olmaması ise ortamdan herhangi bir saldırı olmadığını gösterir. Sülfat saldırısı söz konusu olduğunda, erken yaşlar hariç, basınç dayanımında artış olmaz. Sülfat etkisindeki laboratuvar örnekleri genellikle gerilme altında olmayan örneklerdir ve deneyler bunlarla yapılmaktadır. Oysa yapı yerindeki beton örneklerinde gerilme ile sülfat saldırısı birlikte etkilmektedir. Gerilmeye maruz beton örneklerinin sonuçları sülfat saldırısına uğrayan betonda kalıcılığın, yapı yerindeki gerilme seviyesine bağlı olduğunu göstermektedir. Laboratuvar örneklerinin gerilme-dayanım oranı genellikle pratikteki örneklerden daha yüksektir.

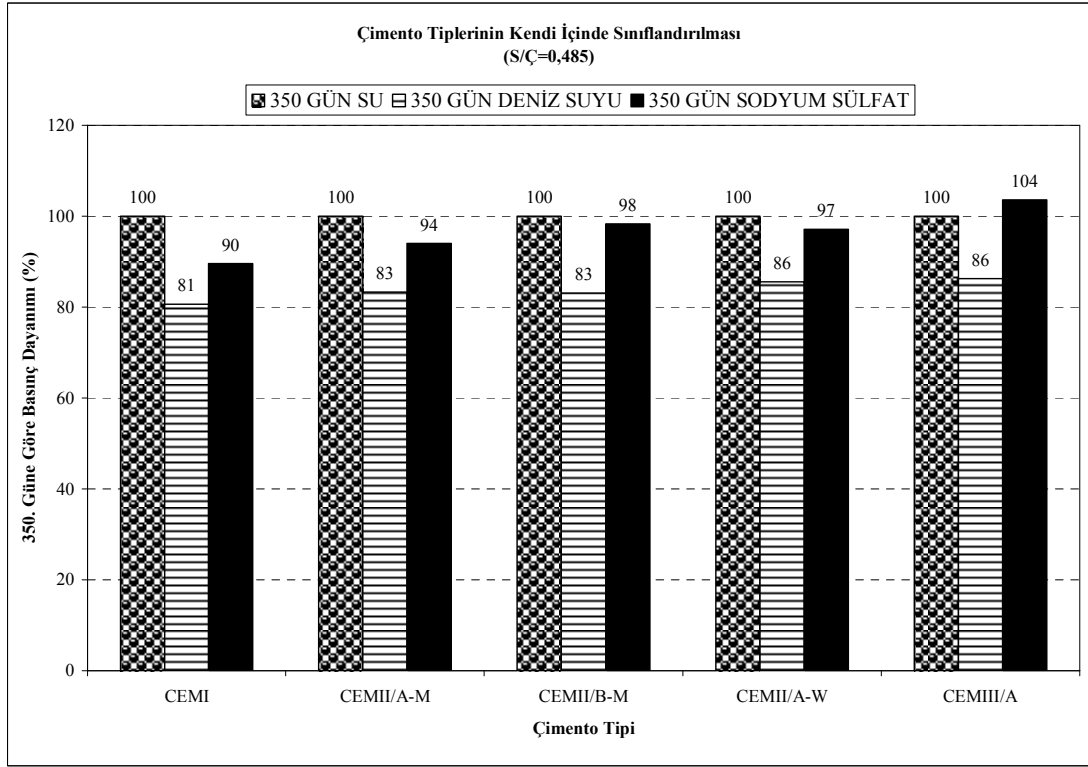
Yazıcı (2006) tarafından ifade edildiği gibi, yüksek fırın cürufu içeren örneklerin basınç dayanımında kayıp değil aksine dayanım artışı görülmüştür. Bu durum, örneklere sızmış sülfat tuzlarının ıslanıp kurumaması nedeniyle oluşan fiziksel yıpratıcı etkinin, kimyasal etkiden daha baskın faktör olduğunu ve kimyasal bozulma sürecini hızlandırdığını göstermektedir.



Şekil 5.33 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin basınç dayanımı grafiği

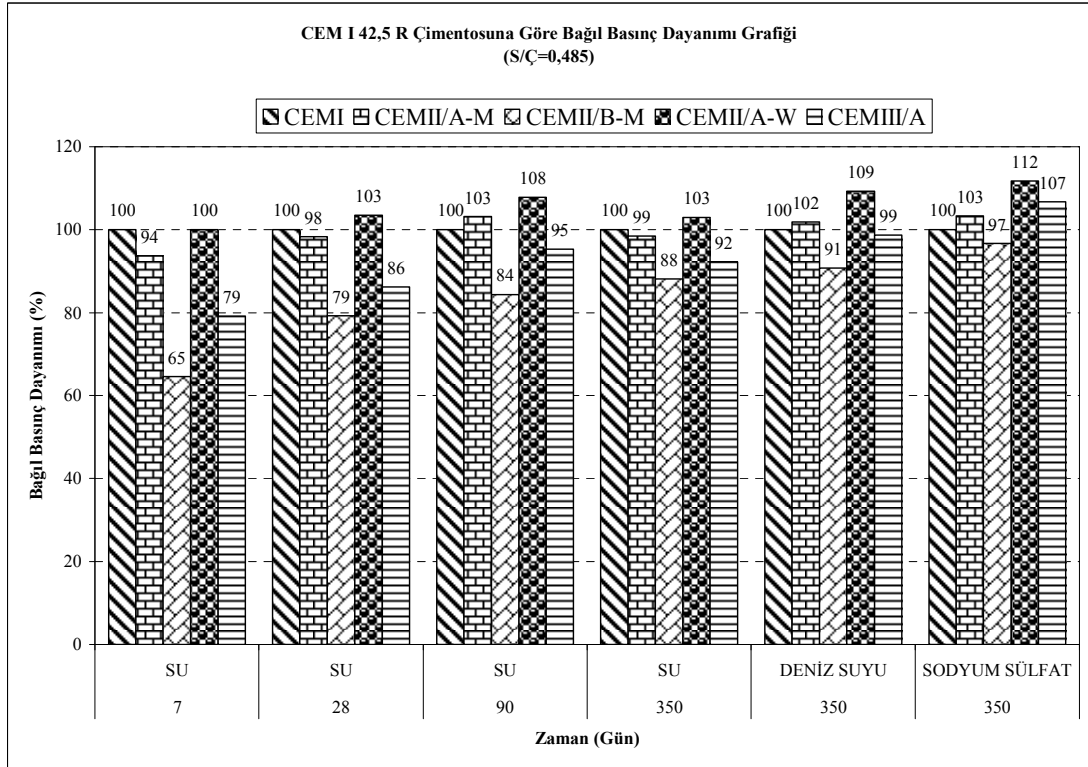


Şekil 5.34 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağıl basınç dayanımı grafiği



Şekil 5.35 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 350. gün-kirece doymuş su verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği

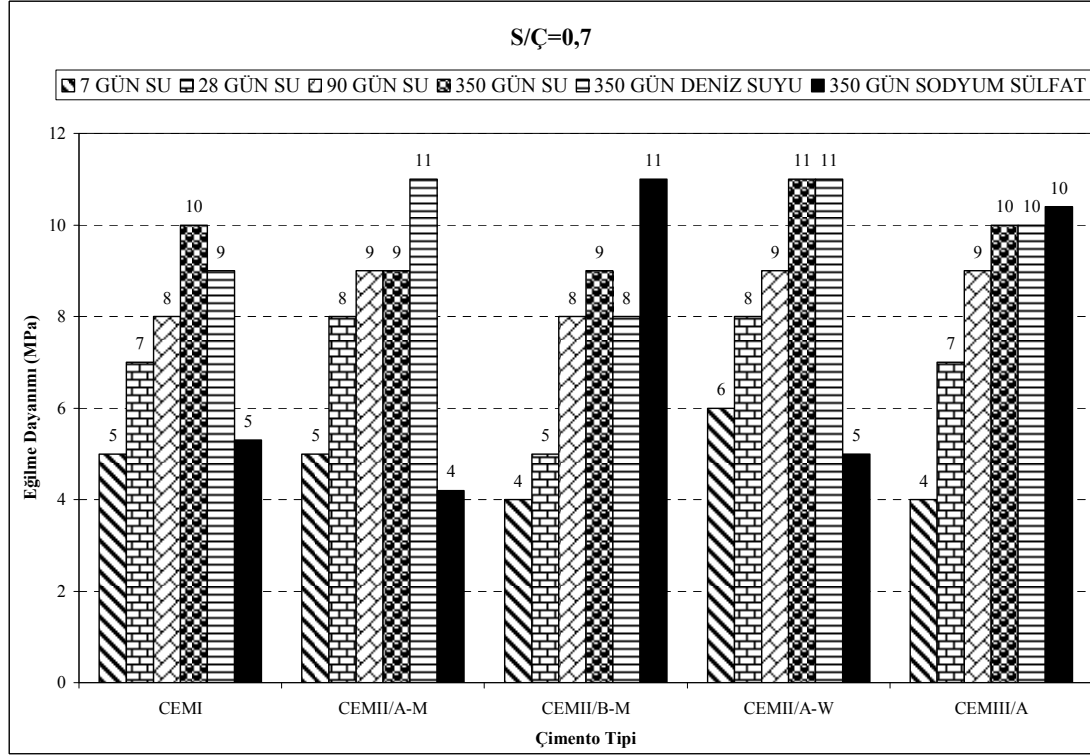
Şekil 5.36'da her bir çimento tipiyle hazırlanan örneklerin basınç dayanımı verilerinin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre kıyaslanması gösterilmektedir. Bu grafikte, CEM I 42,5 R çimentosunun tüm verileri %100 olarak ifade edilmiş ve diğer veriler bu değere göre hesaplanmıştır. Deniz suyunda ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler arasında, basınç dayanımı CEM I ile üretilen örneklere kıyasla en fazla artan, CEM II/A-W çimentosu ile üretilenler olmuştur. Çimentoların dayanım sınıfının bu sonuç üzerinde etkisi vardır. CEM II/B-M çimentosu ile üretilen örneklerin 350 gün dayanımlarının her koşulda CEM I çimentosuna göre düşük değerde kalması bu sebeptir. Bunun yanı sıra CEM I ile aynı dayanım sınıfından olan çimentolar olan CEM II/A-M ve CEM III/A çimentolarının 0,485 su/çimento oranında kullanışlı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.36 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği

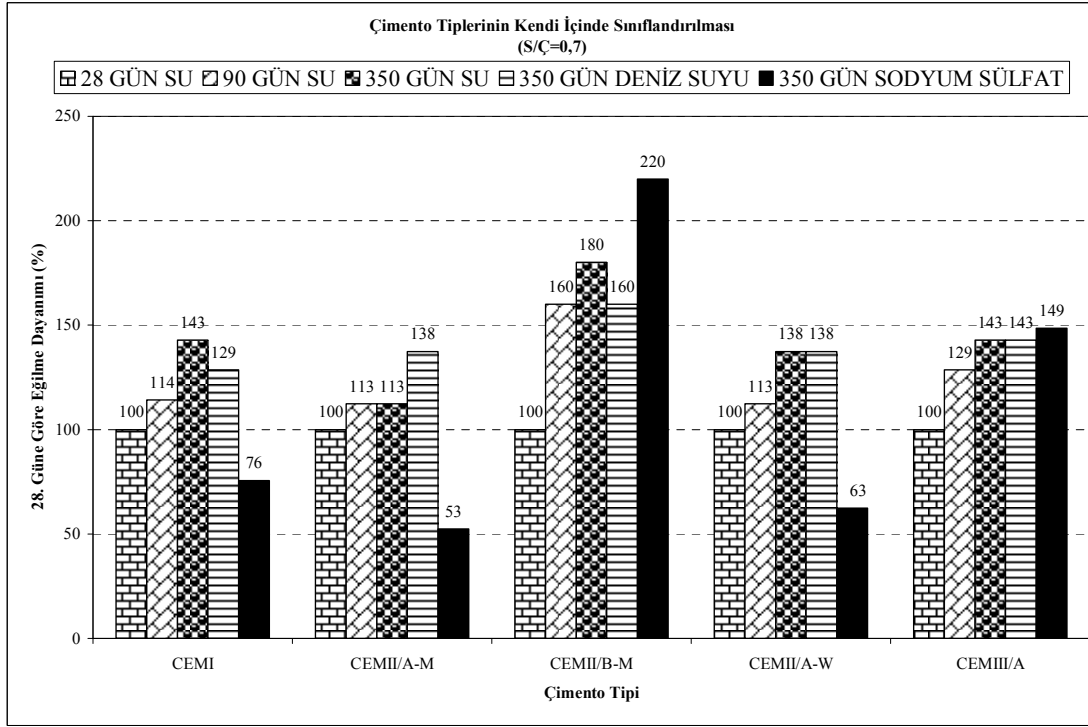
Şekil 5.37’de, su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımı verileri “MPa” birimiyle ifade edilmektedir. Şekil 5.38’de su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımlarının 28 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağlı verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar tüm örneklerde artış göstermiştir. Sodyum sülfatta ise CEM III/A ve CEM II/B-M çimentolarını içeren örnekler hariç diğer örneklerin eğilme dayanımları azalmıştır. Her iki koşulda da eğilme dayanımı 28 günlük dayanımına göre en fazla artan, CEM II/B-M ile üretilenler olmuştur. Sodyum sülfat çözeltisinde dayanımı en çok azalan örnek, CEM II/A-M ile üretilenler olmuştur. Şekil 5.39’da yer alan grafikte su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımlarının 350 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağlı verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar, CEM I ve CEM II/B-M çimentosuyla üretilen örneklerde azalma sergilemiştir. Deniz suyunda en çok dayanım artışı gösteren örnek tipi CEM II/A-M ile üretilenler olmuştur. Buna karşılık, sodyum sülfat çözeltisinde CEM II/A-M ve CEM II/A-W çimentolarıyla üretilenlerin dayanımı ortalama %54 azalmıştır. Mineral katkı yüzdelerinin düşük

olması ve fazla miktarda C<sub>3</sub>A içermeleri bu örnekleri sülfat içerikli ortamlara karşı dayanıksız hale getirmiştir.

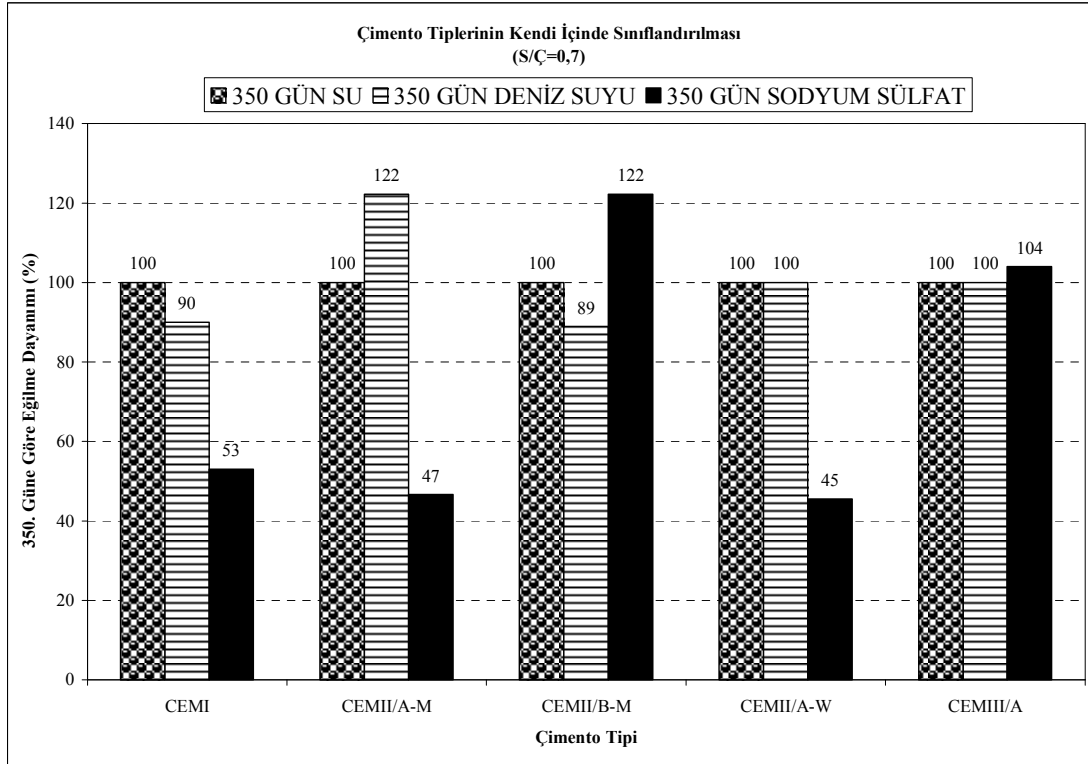


Şekil 5.37 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımı grafiği



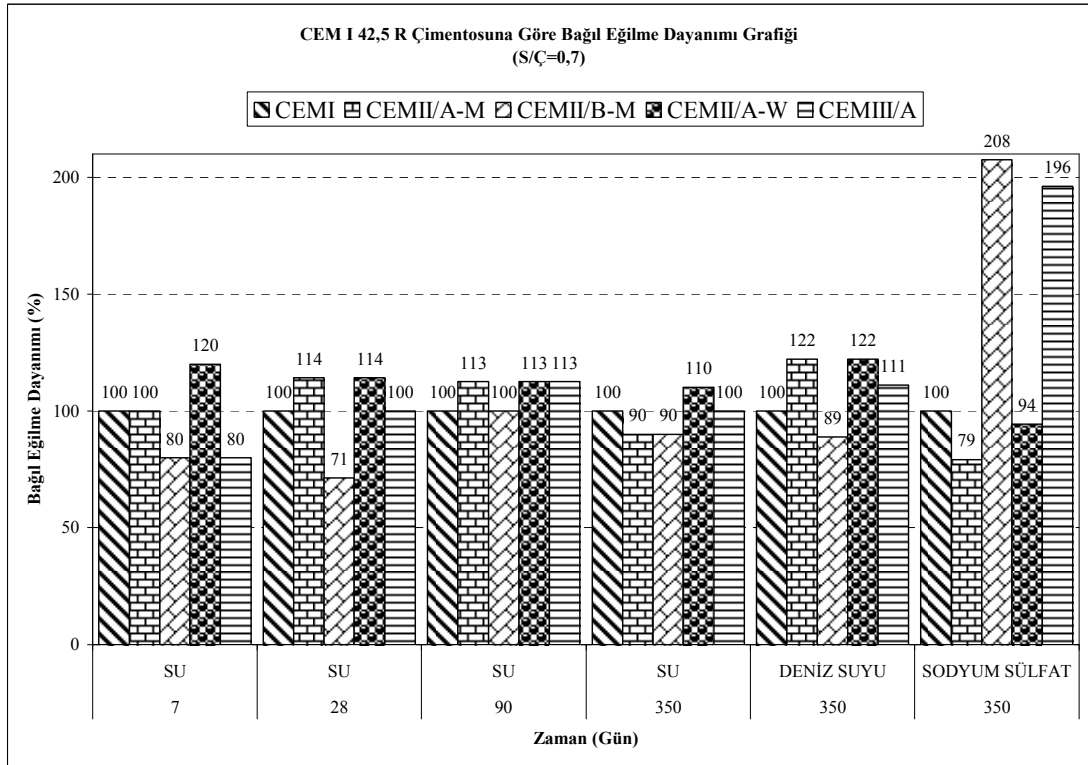


Şekil 5.38 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği



Şekil 5.39 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği

Şekil 5.40'ta su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımı verilerinin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre kıyaslanması gösterilmektedir. Bu grafikte CEM I 42,5 R çimentosunun tüm verileri %100 olarak ifade edilmiş ve diğer veriler bu değere göre hesaplanmıştır. Sodyum sülfatta eğilme dayanımı en fazla artış gösteren örnekler, CEM II/B-M ve CEM III/A çimentolarını içerenlerdir. Bunun sebebi, bu çimento tiplerinin yüksek oranda mineral katkı içermesi ve çimento inceliğinin diğer tiplerden daha fazla oluşudur. Ayrıca, bu çimentoların C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A içeriği diğerlerinden daha azdır. Bu özellikler örneklerin sülfata olan direncini arttırmaktadır.



Şekil 5.40 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin eğilme dayanımı verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği

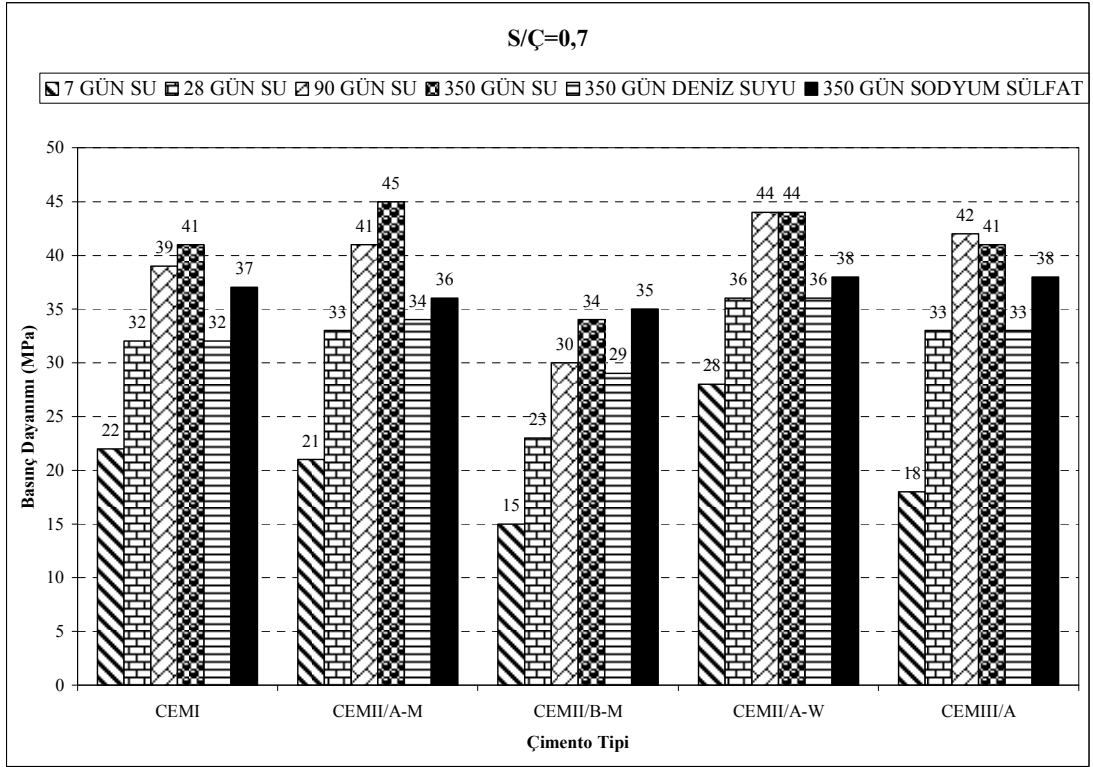
Şekil 5.41'de, su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin basınç dayanımı verileri "MPa" birimiyle ifade edilmektedir. Şekil 5.42'de su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin basınç dayanımlarının 28 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağlı verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda dayanımlar çok büyük değişimler sergilememiş ve hatta aynı kalmıştır. Sodyum sülfatta ise tüm örneklerin

basınç dayanımları artış göstermiştir. Kutlu ve Demiriz (2007) tarafından ifade edildiği gibi, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren CEM III tipi çimentolarla yapılan örneklerin basınç mukavemetleri incelendiğinde 2. ve 7. gündeki değerlerin diğer çimento tipleriyle yapılan örneklere göre bir miktar daha düşük, fakat 28.gün değerlerinin ise denk ve/veya daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

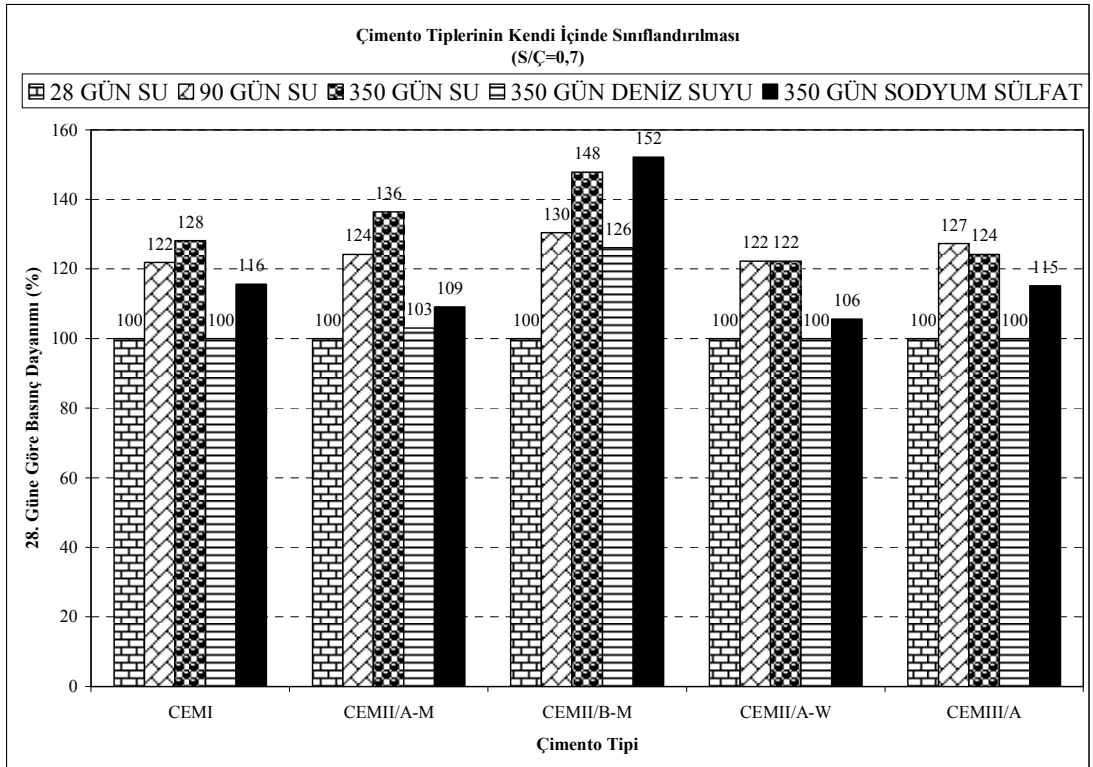
Şekil 5.43'te yer alan grafikte su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin basınç dayanımlarının 350 gün boyunca suda kür edilen örneklere göre bağlı verileri gösterilmektedir. Buna göre, deniz suyunda bekletilen örneklerin dayanımı 350. gün kirece doymun su kürüne kıyasla azalmıştır. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin basınç dayanımları, CEM II/B-M çimentosuyla hazırlananlar hariç tüm örneklerde azalma yönündedir. CEM II/B-M çimentosu yüksek sülfat konsantrasyonu ve su/çimento oranından etkilenmemiş ve bu çimento tipini içeren örneklerin basınç dayanımları aynı kalmıştır. Bunun sebebi, diğerlerinden farklı olarak, %20 tras, %5 kalker ve %5 uçucu kül bileşiminden oluşan mineral katkı içermesi olduğu düşünülmektedir.

Thomas ve Matthews (2004) tarafından ifade edildiği gibi, deniz suyundaki 10 yıllık kür süresi sonuçları, 2 yıllık sonuçlarla kıyaslandığında normal portland çimentosu örneklerinin ve %15 uçucu kül içeren örneklerin basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. %30 ile %50 arasında uçucu kül içeren betonlarda ise dayanım kaybı ölçülmemiştir. %30 veya daha fazla oranda uçucu kül içeren betonun denizel etkiye maruz kalma durumlarında üstün performans sağladığı görülmüştür.

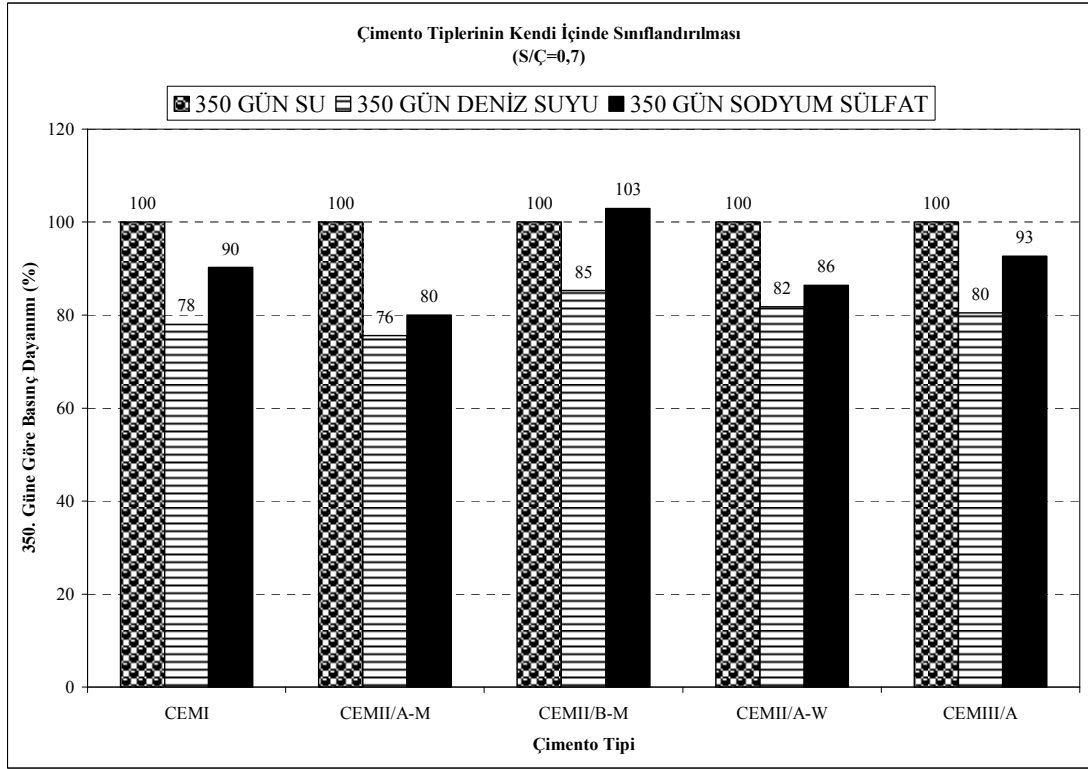
Boyd ve Mindess (2004) tarafından yapılan çalışmada test sonuçları, su/çimento oranının betonun sülfat saldırısına dayanıklılığı üzerindeki etkisinin çimento tipinden daha baskın olduğunu ortaya koymuştur. Sülfat etkisi gibi genleştirici mekanizmaya sahip hasar etkenleri, mikroçatlaklara yol açarak betonun çekme dayanımının basınç dayanımından daha hızlı bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, çekme dayanımının çatlaklara aşırı duyarlılığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.41 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin basınç dayanımı grafiği



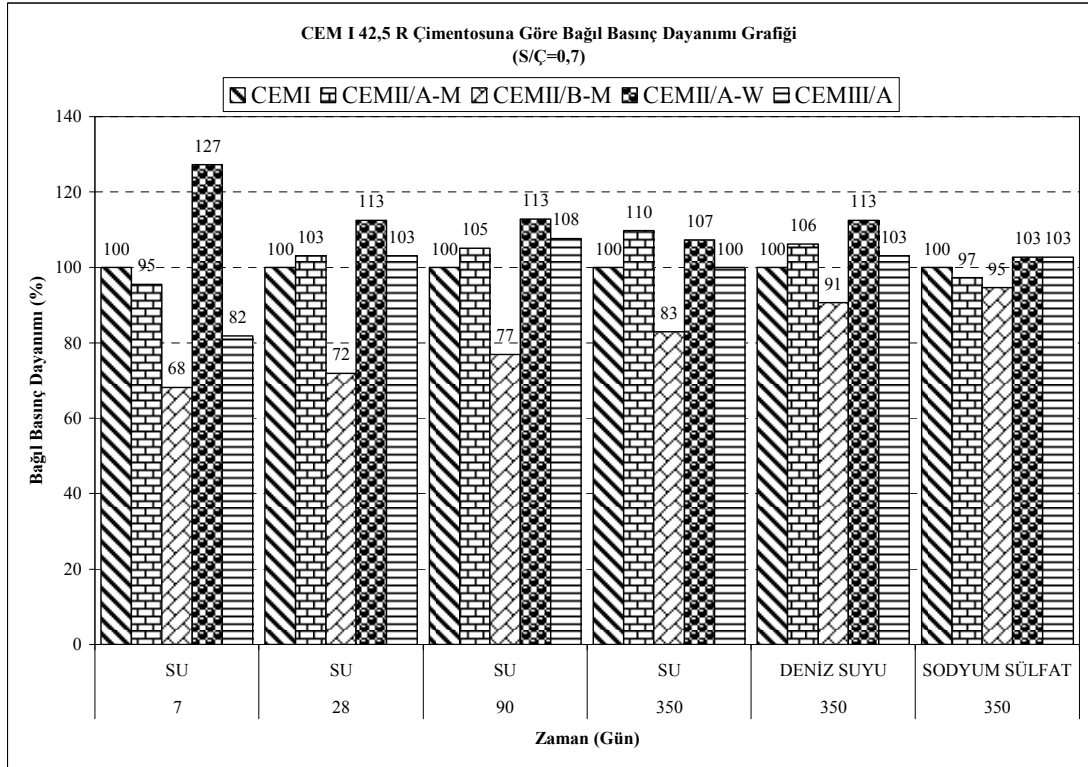
Şekil 5.42 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağıl basınç dayanımı grafiği



Şekil 5.43 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağıl basınç dayanımı grafiği

Şekil 5.44'te CEM II/A-M 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin kirece doygun suda 350. gün dayanımlarının CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilenlerden yüksek olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranının artışı CEM II/A-M 42,5 R çimentosuyla üretilen örnekleri sodyum sülfat çözeltisinde bekletildiği süre boyunca olumsuz yönde etkilemiştir. Bu sonuç, CEM II/A-M 42,5 R çimentosunun su/çimento oranı değişikliklerine karşı oldukça hassas olduğunun göstergesidir. Bu hassasiyetin sebebi, kalker fillerinin eksikliği olarak düşünülmektedir. Biricik ve diğer. (2003) tarafından belirtildiği gibi, kalker fillerinin çimento bileşeni olan  $C_3A$  ile reaksiyona girerek kalsiyum karboalüminatları oluşturduğu, yüksek  $C_3A$  içeren çimentolarla birlikte kullanılması halinde fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin olumlu olduğu ileri sürülmektedir. Kalker fillerinin portland çimentosunun hidratasyonunu hızlandırarak dayanımda iyileşme sağladığı ifade edilmektedir.



Şekil 5.44 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin basınç dayanımı verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği

Tablo 5.4 ve Tablo 5.6’da kılcal yolla su emme miktarı için uygulanan deneyin sonuçları verilmiştir. Örneklerin bekletildikleri koşulların zamanla ve su/çimento oranlarıyla bağlantılı kılcal yolla su emme miktarları “gram” ve “g/cm<sup>2</sup>” olarak ifade edilmektedir.

Tablo 5.4 Örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı, bekleme koşulu ve zamana göre “gram” cinsinden ifade edilişi

Bekleme Koşulu-Zaman	Su/Çimento	CEMI	CEMII/A-M	CEMII/B-M	CEMII/A-W	CEMIII
		Kılcal Yolla Su Emme Miktarı (g)				
Kirece Doygun Su= 28 Gün	0,485	14,07	12,33	13,27	12,13	16,00
	0,6	20,33	19,93	21,93	18,07	20,73
	0,7	28,20	36,87	27,27	20,27	24,13
Kirece Doygun Su= 350 Gün	0,485	30,13	14,80	26,93	15,67	18,60
	0,6	26,67	22,00	24,87	29,27	18,33
	0,7	34,20	39,81	39,73	31,13	24,22
Deniz Suyu= 350 Gün	0,485	18,93	4,60	13,07	6,80	9,53
	0,6	12,40	6,13	9,13	6,67	3,73
	0,7	30,60	14,43	26,80	9,27	12,93

Tablo 5.5’te, Tablo 5.4’teki verilerle  $M = \frac{c}{100} \times F \times \sqrt{t}$  şeklindeki deneye dayalı formül kullanılarak elde edilen “Kapilarite (Kılcallık) Katsayısı” verileri sunulmaktadır. Bu formülde yer alan M= Kılcal yolla emilen su miktarı (g), c= Kapilarite (kılcallık) katsayısı, F= Cismin su ile temas eden alanı (cm<sup>2</sup>), t= zaman (dk) olarak ifade edilmektedir (Baradan, 2003).

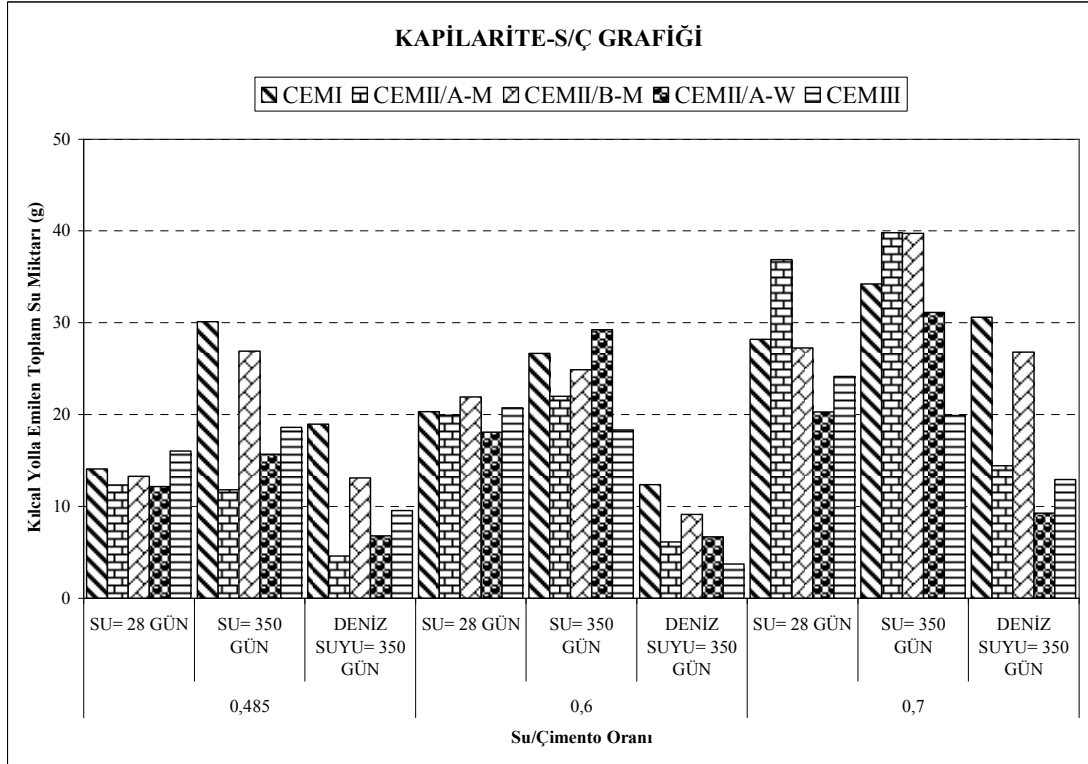
Tablo 5.5 Üretilen örneklerin kılcal yolla su emme deneyi ile elde edilen kapilarite (kılcallık) katsayıları

Bekleme Koşulu- Zaman	S/Ç	CEMI	CEMII/A- M	CEMII/B- M	CEMII/A- W	CEMIII
		Kapilarite (Kılcallık) Katsayısı				
Kirece Doygun Su= 28 Gün	0,485	0,8	0,7	0,8	0,7	0,9
	0,6	1,2	1,2	1,3	1,1	1,2
	0,7	1,6	2,1	1,6	1,2	1,4
Kirece Doygun Su= 350 Gün	0,485	1,8	0,9	1,6	0,9	1,1
	0,6	1,6	1,3	1,4	1,7	1,1
	0,7	2,0	2,7	2,3	1,8	1,4
Deniz Suyu= 350 Gün	0,485	1,1	0,3	0,8	0,4	0,6
	0,6	0,7	0,4	0,5	0,4	0,2
	0,7	1,8	1,0	1,6	0,5	0,8

Tablo 5.6 Örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre “gram/cm<sup>2</sup>” olarak ifade edilişi

Bekleme Koşulu- Zaman	S/Ç	CEMI	CEMII/A- M	CEMII/B- M	CEMII/A- W	CEMIII
		Kılcal Yolla Su Emme Miktarı (g/cm <sup>2</sup> )				
Kirece Doygun Su= 28 Gün	0,485	0,9	0,8	0,8	0,8	1,0
	0,6	1,3	1,2	1,4	1,1	1,3
	0,7	1,8	2,3	1,7	1,3	1,5
Kirece Doygun Su= 350 Gün	0,485	1,9	0,9	1,7	1,0	1,2
	0,6	1,7	1,4	1,6	1,8	1,1
	0,7	2,1	2,9	2,5	1,9	1,5
Deniz Suyu= 350 Gün	0,485	1,2	0,3	0,8	0,4	0,6
	0,6	0,8	0,4	0,6	0,4	0,2
	0,7	1,9	1,1	1,7	0,6	0,8

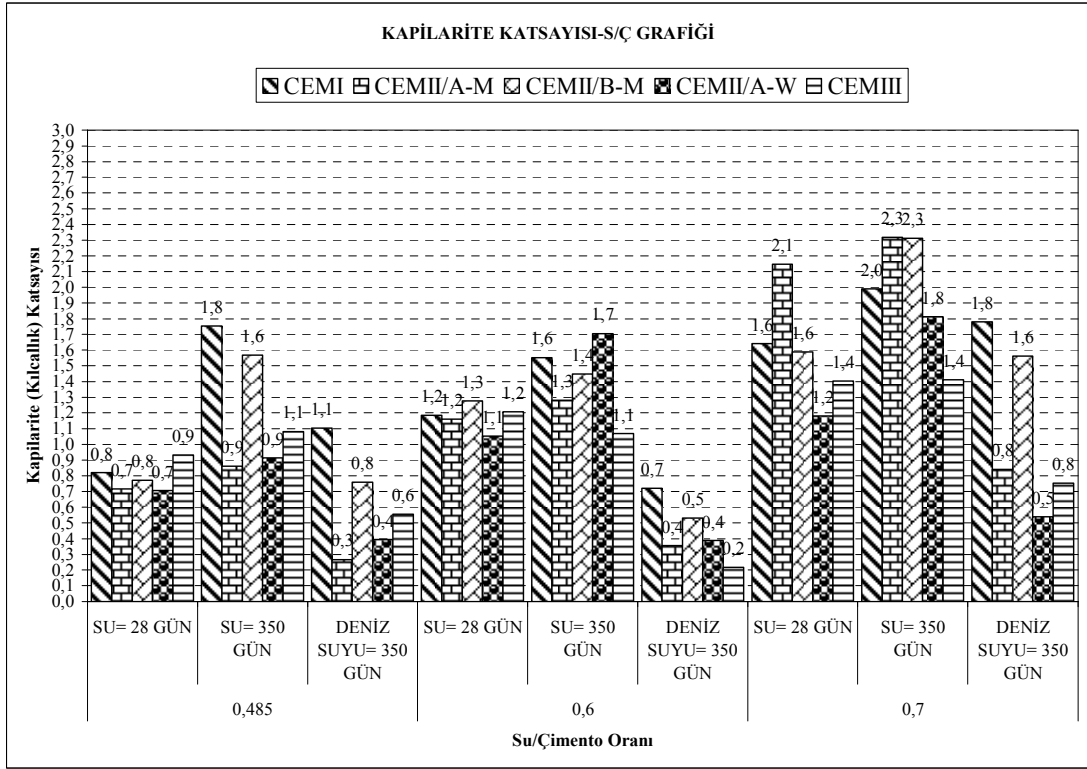
Şekil 5.45 ve 5.47, Tablo 5.4 ve 5.6'nın grafik şeklinde ifade edilişi gösterilmiştir. Genel olarak, beklenildiği gibi kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı arttıkça artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi, artan su/çimento oranıyla örnek yapısındaki kılcal boşlukların da artış göstermesidir.



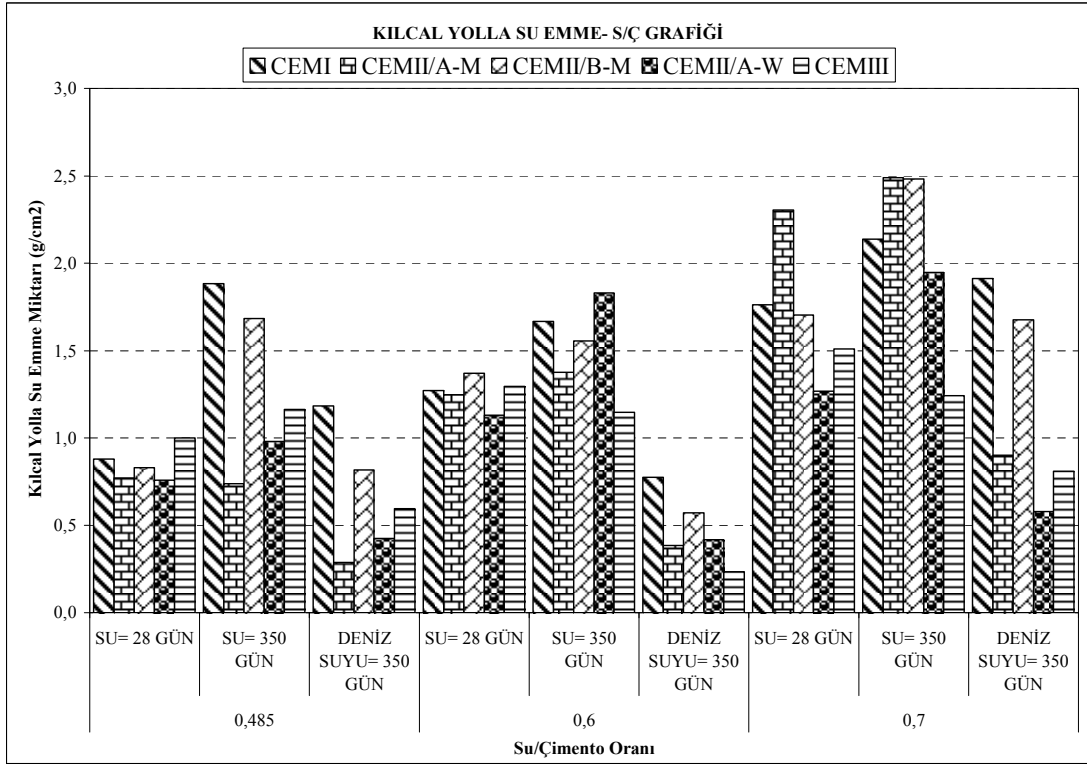
Şekil 5.45 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının gram cinsinden ifade edilmesi

Şekil 5.46'da, Tablo 5.5'in grafik şeklinde ifade edilişi gösterilmektedir. Kapilarite (Kılcallık) katsayısı büyük olan örneğin kılcal yolla su emme miktarı da fazla olacaktır. Buna göre, deniz suyunda kılcallık katsayısı her su/çimento oranında da yüksek değerde olan örnekler, CEM I çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bu çimento tipi puzolan içermediği için geçirimsizlik sağlayamamaktadır. Mineral katkı içeren çimentolar  $Ca(OH)_2$ 'yi bağlayarak geçirimsizliği artırır.



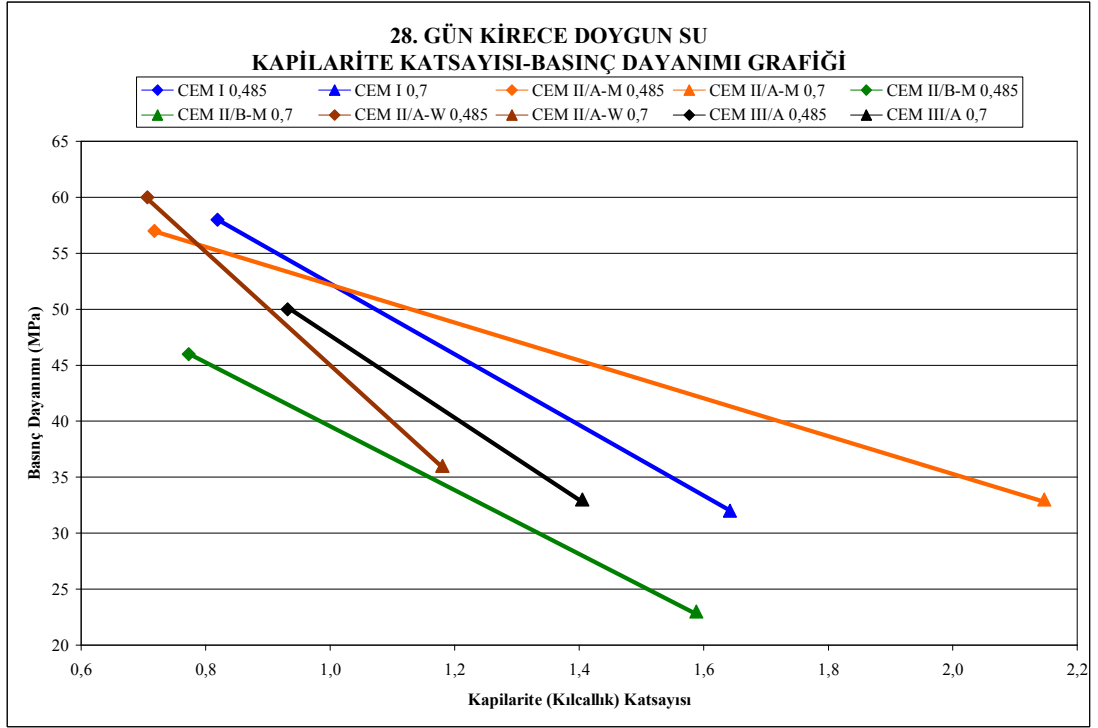


Şekil 5.46 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme deneyi ile elde edilen kapilarite (kılcalılık) katsayıları



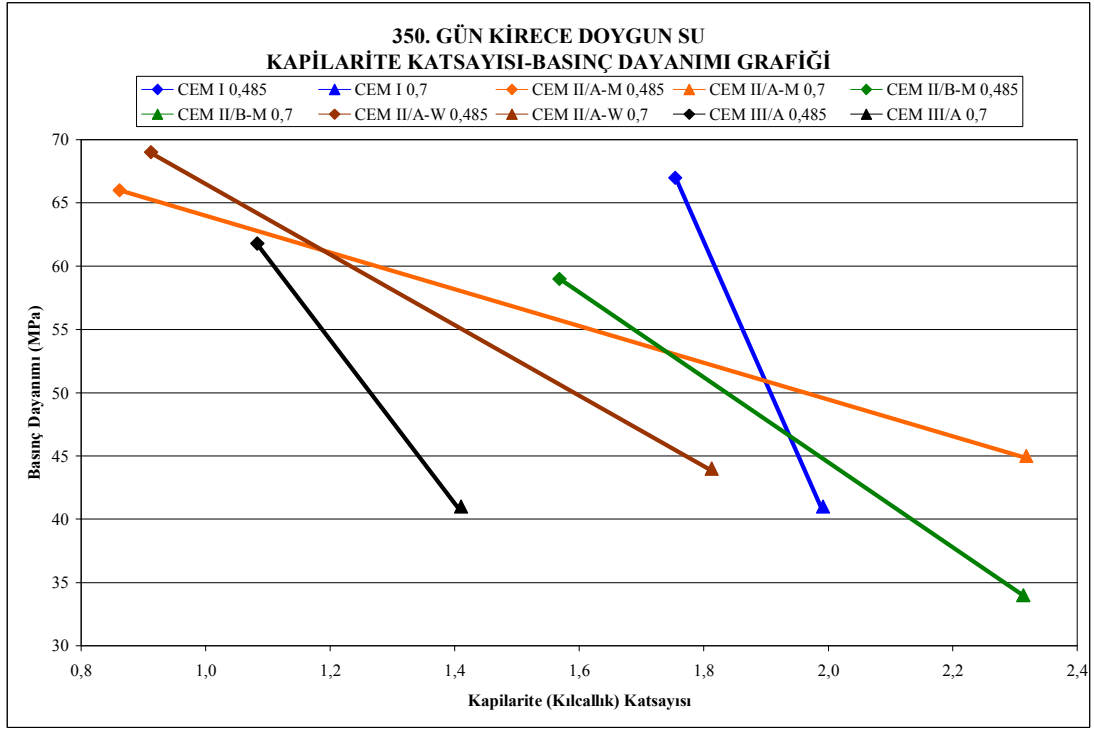
Şekil 5.47 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının gram/cm<sup>2</sup> olarak ifade edilmesi

Şekil 5.48’de, 28. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması görülmektedir. Örneklerin su/çimento oranı arttıkça kapilarite katsayısı artmıştır ve basınç dayanımları azalmıştır. Bu durumda, kapilarite katsayısı ile basınç dayanımları arasında ters orantı bulunmaktadır. Artan su/çimento oranıyla örneklerin bünyesinde oluşan kılcal boşluk sayıları da artış göstermiştir. Bu nedenle basınç dayanımları azalmıştır.



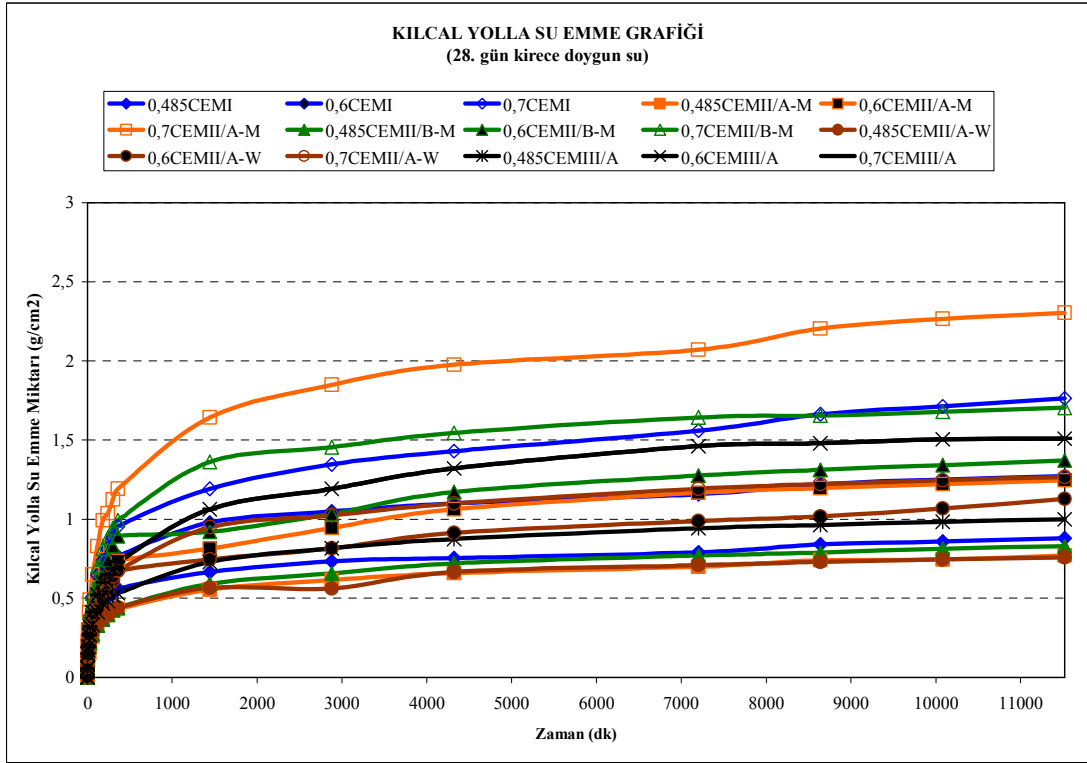
Şekil 5.48 Örneklerin 28. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması

Şekil 5.49’da, 350. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre karşılaştırılması görülmektedir.



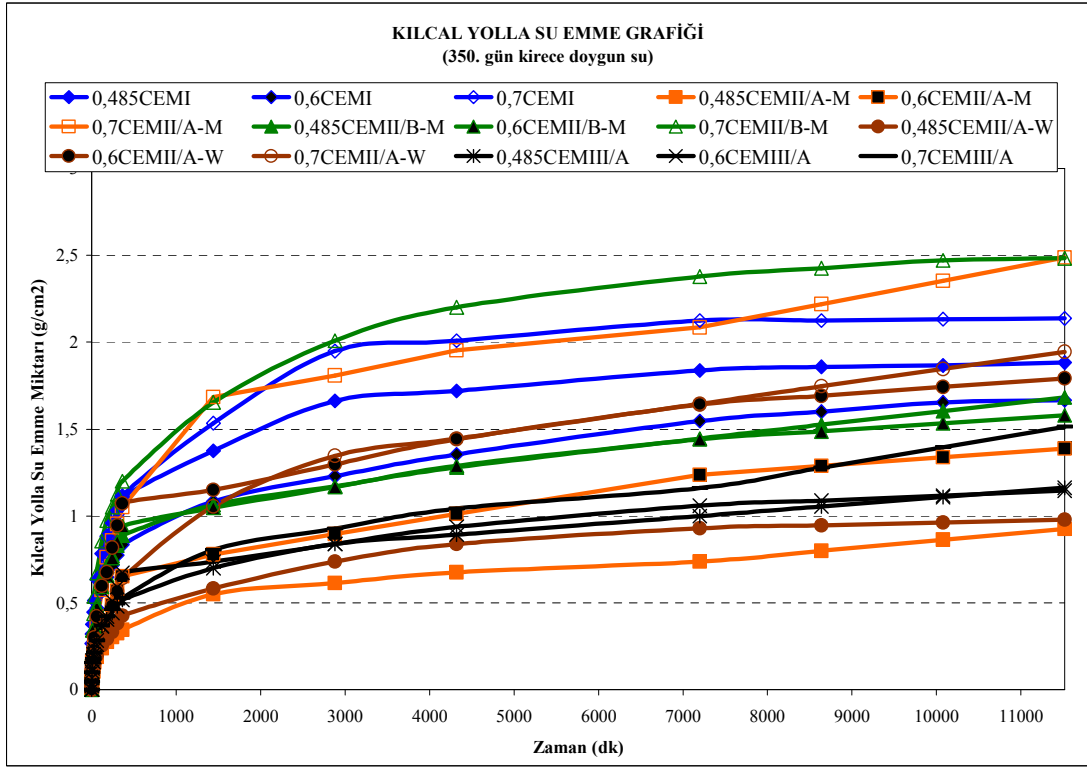
Şekil 5.49 Örneklerin 350. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması

Şekil 5.50’de, 28 gün suda bekleyen örneklerin su/çimento oranı arttıkça, kılcal su emme miktarlarının da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, yükselen su/çimento oranının erken yaştaki örneklerde daha fazla boşluklu yapıya neden olmasıdır.



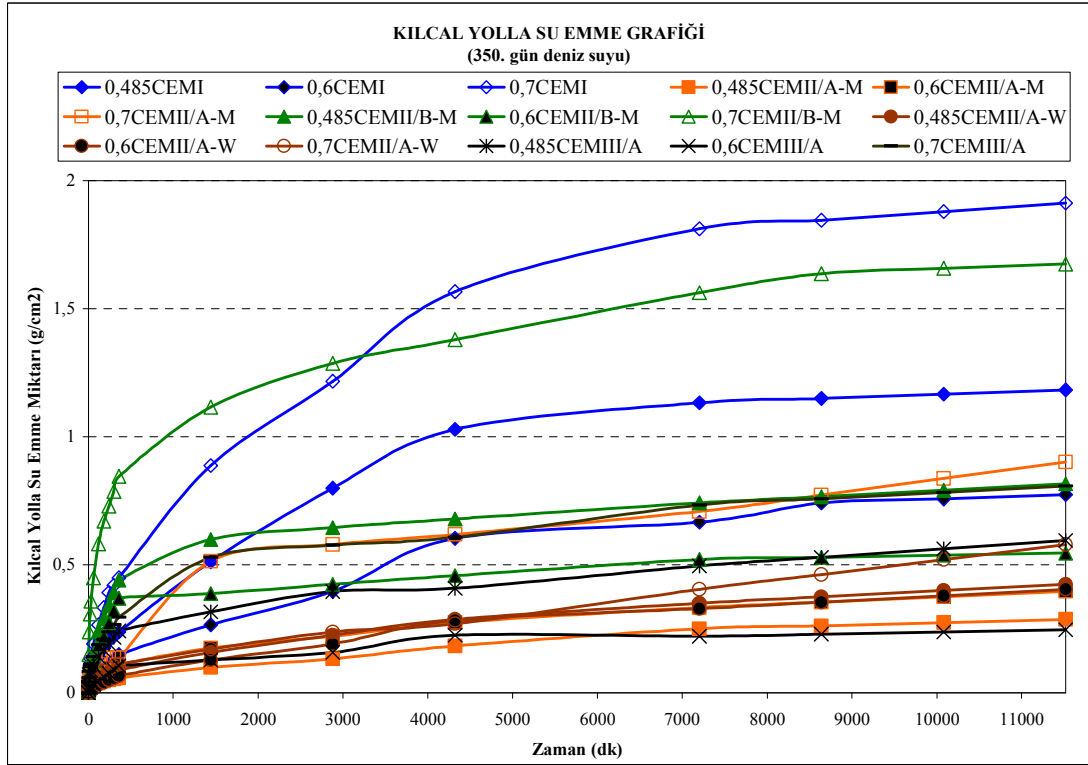
Şekil 5.50 Tüm örnek tiplerinin 28 gün kirece doymun suda beklemesi sonrası kılcal yolla su emme miktarlarının ölçüm sonuçları

Şekil 5.51’de, üç farklı su/çimento oranında hazırlanan tüm örneklerin kirece doymun suda kür edildikleri 350 günlük sürenin sonunda uygulanan kılcal yolla su emme deneyinin sonuçları görülmektedir. Bu grafikte, cürufu çimentonun su/çimento oranı değişikliğinde dahi iyi bir performans sergileyerek, örneğin kılcal yolla su emme miktarını alt seviyelerde tuttuğu görülmektedir. 350 günlük kürde yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonunun daha iyi gelişme gösterdiği söylenebilir.



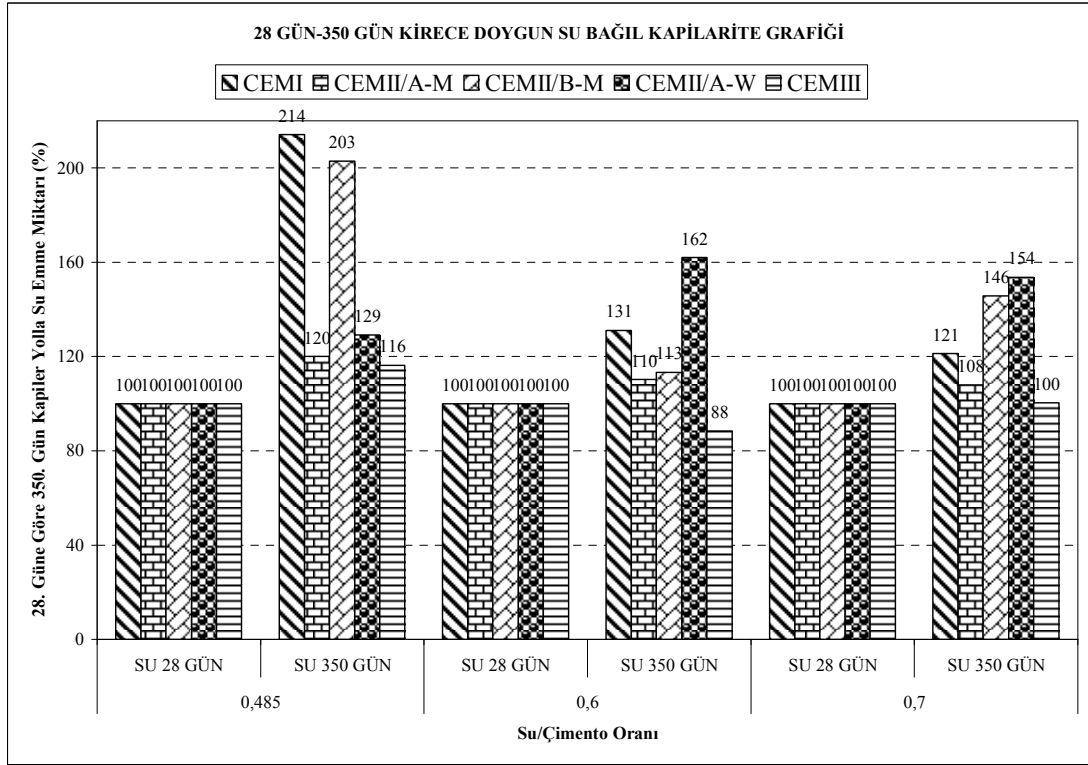
Şekil 5.51 Tüm örneklerin kirece doymun suda 350 günlük kür sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği

Tüm örneklerin 350 gün deniz suyunda bekletildikten sonra kılcal yolla su emme miktarları Şekil 5.52’de görüldüğü gibidir. Artan su/çimento oranıyla birlikte kılcal su emme miktarlarının da arttığı görülmektedir. CEM I 42,5 R çimentosu içeren örneklerin deniz suyunda kılcal yolla su emme miktarlarının diğerlerinden fazla olmasının sebebi, su geçirimsizliğini azaltacak mineral katkı içermemesi ve  $C_3S$ ,  $C_2S$  karma bileşen miktarlarının fazla olması nedeniyle suda çözünebilir  $Ca(OH)_2$  ürününün diğer çimento türlerinden daha fazla oluşmasıdır.



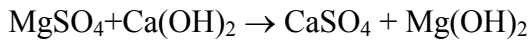
Şekil 5.52 Tüm örneklerin deniz suyu bekletilmeleri sonunda 350. gün kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği

Şekil 5.53'te, kirece doygun suda bekletilen örneklerin 28. günde ve 350. günde ölçülmüş kılcal yolla su emme miktarlarının karşılaştırılması verilmektedir. 350. gün verileri, 28. güne göre genellikle artış göstermektedir. Uyan ve diğer. (2003) tarafından yapılan çalışmada aynı numunelerde 7 gündeki kılcal su emme, 28. gündeki değerlere göre daha düşük olmuştur. Bu sonuç 28. günde boşluk çaplarının hidrasyon ürünlerinin artışıyla küçülmesiyle ve buna bağlı olarak kılcal su emme miktarlarının artmasıyla açıklanabilir. Buna benzer olarak, bu çalışmada 350. günde kılcal boşluk çapları 28. güne kıyasla küçüldüğü için suyun örnek boyunca yükselişi daha hızlı olmuştur. Baradan ve diğer. (2002) tarafından belirtildiği gibi, hidrasyon katı ürünlerinin hacminin artmasıyla, betonun gözenek hacmi daralabilir. Belirli çaptaki boşluklarda anlamlı daralmalar meydana gelir. İnce kılcal boşluklar ve betonun kılcallık katsayısı artar. Kılcal yolla su emme deneyine tabi tutulan örnekler bu sebeple 350. günde daha çok su emmiştir. 0,485 su/çimento oranında 350. günde, 28. güne göre kılcal yolla en çok su emen örnek CEM I çimentosunu içeren, en az su emen örnek ise CEM III/A çimentosunu içeren örnek olmuştur. 0,6 ve 0,7 su/çimento oranlarında da durum benzerdir.



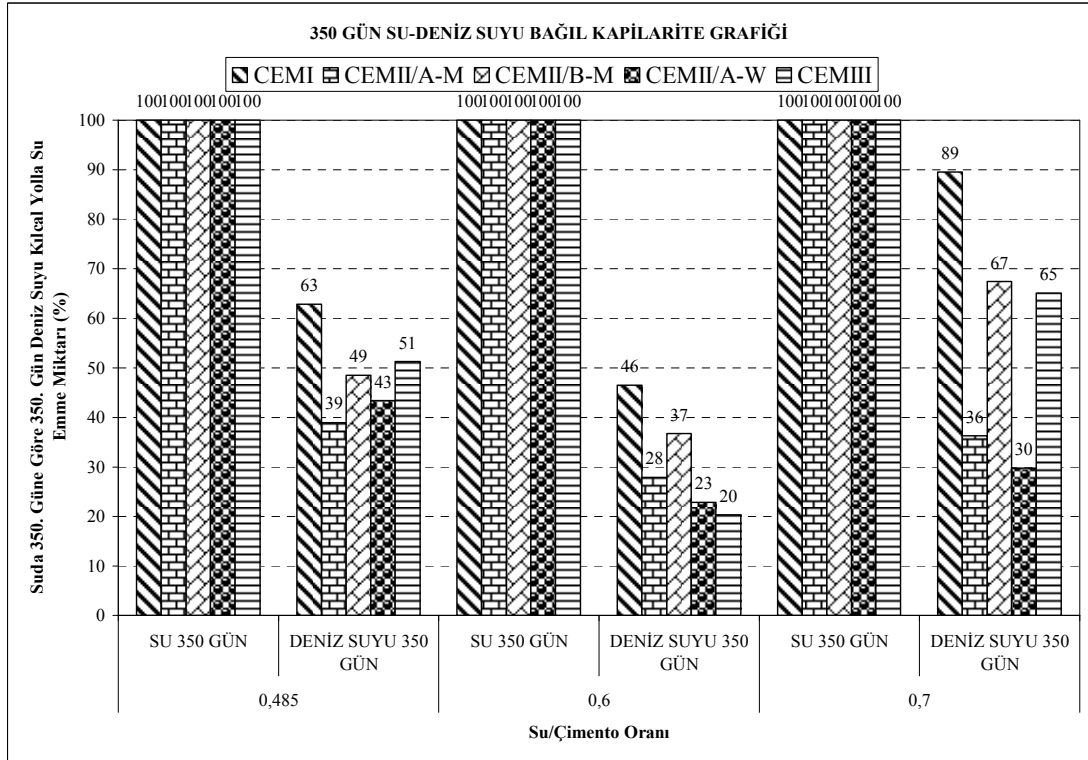
Şekil 5.53 Kirece doygun suda kür edilen örneklerin 350. gün kılcal yolla su emme deneyi sonuçlarının, 28. gün deney sonuçlarına göre elde edilen grafik

Şekil 5.54'te, kirece doygun suda ve deniz suyunda bekleyen örneklerin 350. günde ölçülmüş kılcal yolla su emme miktarlarının karşılaştırılması verilmektedir. Deniz suyunda bekletilen örneklerin kılcal yolla su emme hızları daha düşüktür. Bunun sebebi, Yazıcı ve diğer. (2003) tarafından belirtildiği gibi magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı aşağıda gösterilen yer değiştirme reaksiyonudur:



Oluşan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  brüst adıyla da bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin  $\text{CO}_2$  ile reaksiyonundan aragonit formundaki  $\text{CaCO}_3$  oluşur ve çöker. Kısa sürede oluşan bu koruyucu tabakaların kalınlığı 20–50  $\mu\text{m}$  civarındadır ve yapının suya tamamen gömülü kısımlarında görülürler.

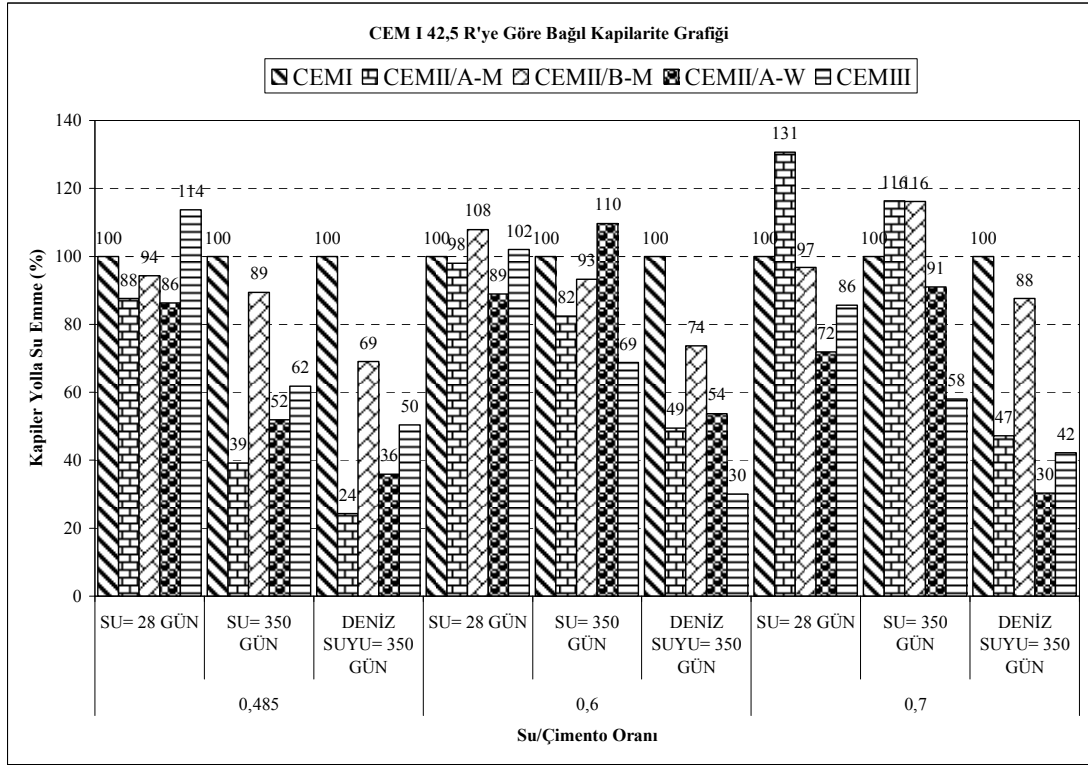
Bu çalışmada, tıkanan gözeneklerden içeriye su girişi azalmıştır. Bu nedenle kılcal yolla emilen su miktarı da düşmüştür.



Şekil 5.54 Deniz suyunda bekletilen örneklerin 350. gün kılcal yolla su emme deneyi sonuçlarının, kirece doymuş suda bekleyen örneklerin 350. gün deney sonuçlarına göre elde edilen grafik

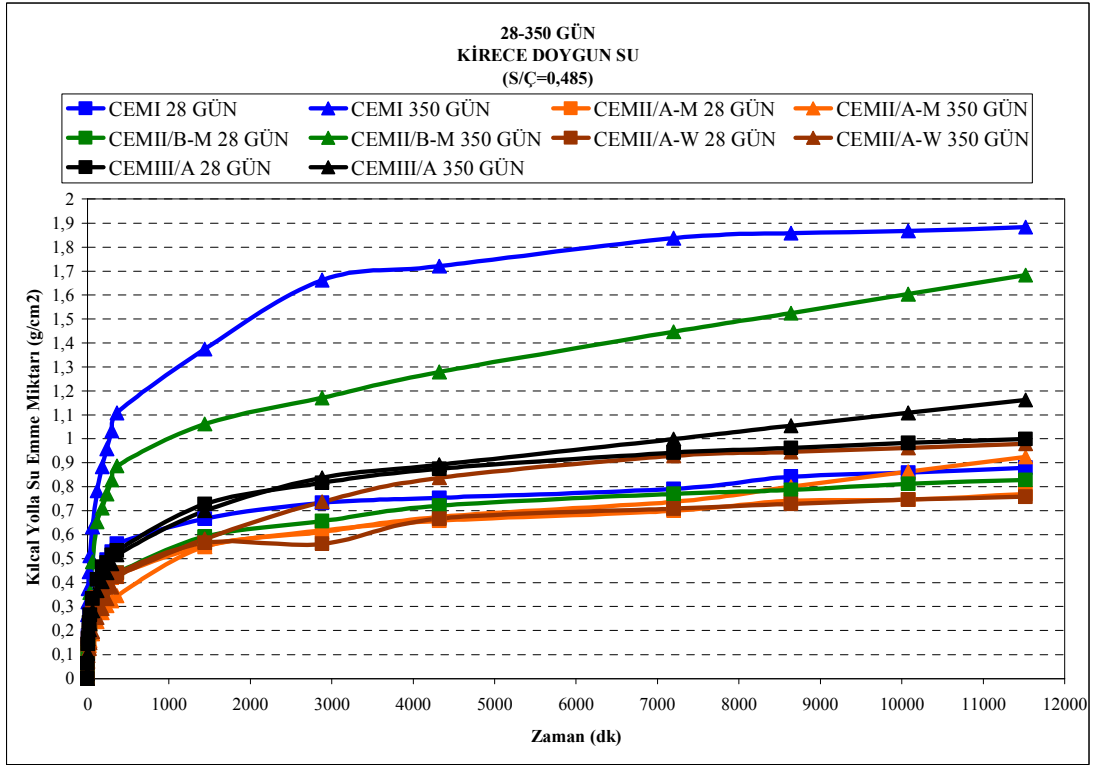
Şekil 5.55'te tüm örneklerin kılcal yolla su emme verilerinin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre kıyaslanması gösterilmektedir. Bu grafikte CEM I 42,5 R çimentosunun tüm verileri %100 olarak ifade edilmiş ve diğer veriler bu değere göre hesaplanmıştır. 0,485 su/çimento oranında üretilen ve 28 gün suda kür edilen örnekler arasında CEM III/A ile üretilenlerin erken yaşta kılcal yolla su emme miktarları diğerlerinden fazladır. Bunun sebebi, çimentonun mineral katkı yüzdesinin diğerlerinden yüksek olması nedeniyle hidrasyon gelişiminin yavaş seyretmesi ve kılcal boşlukların hidrasyon ürünleriyle henüz yeterince dolmamış olmasıdır. İlerleyen yaşta (350 gün), 0,485 su/çimento oranında tüm örneklerin kılcal yolla su emme değerleri CEM I çimentosu ile üretilenlerden az olmuştur.





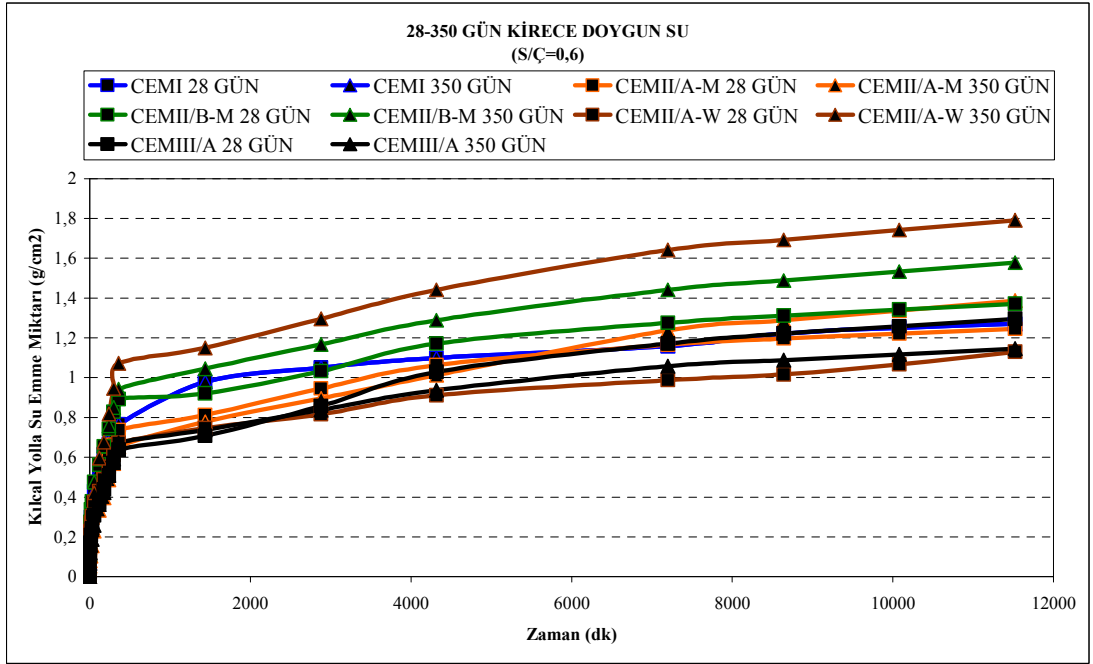
Şekil 5.55 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin kılcal yolla su emme verilerine göre bağlı kapilarite grafiği

Şekil 5.56'da görülen grafikte, örneklerin 350 günlük kılcal su emme miktarları beklendiği gibi, 28 günlük değerlerinden daha fazladır. Bu durum, Uyan ve diğer. (2003) tarafından belirtildiği gibi, 350. günde boşluk çaplarının hidrasyon ürünlerinin artışıyla küçülmesi ve buna bağlı olarak kılcal su emme miktarlarının artmasıyla açıklanabilir.

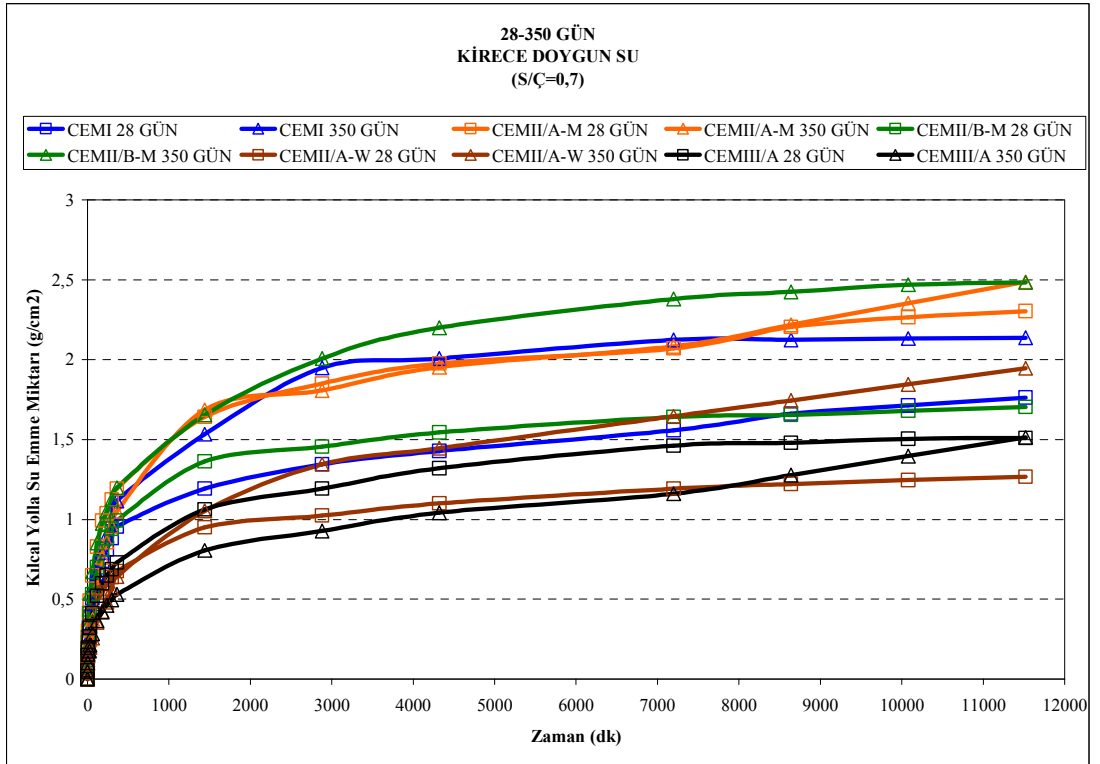


Şekil 5.56 Su/Çimento oranı 0,485 olan örneklerin kirece doygun su kürü sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği

Şekil 5.57 ve 5.58’de görüldüğü gibi, su/çimento artışıyla dahi CEM III/A çimentosuyla hazırlanan örneklerin 350. günde 28. günden daha az su emdiği görülmektedir. Bunun sebebi, bu tip çimento kullanımının kılcal boşlukları doldurmada oldukça verimli olduğudur.

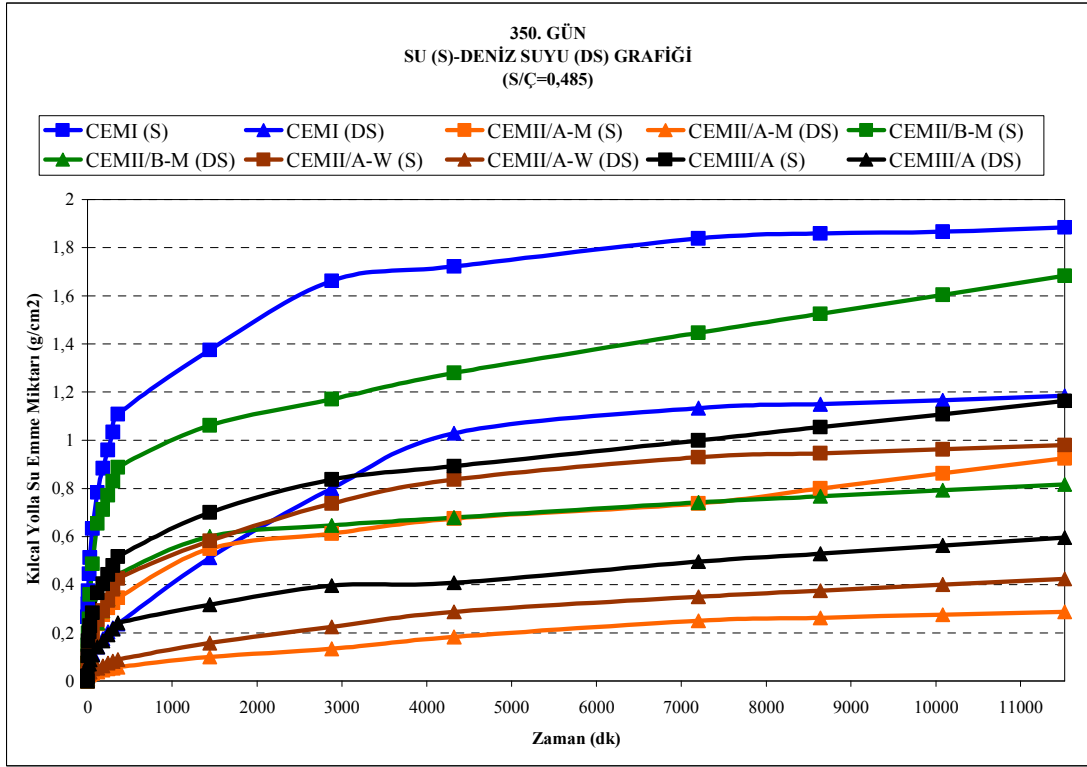


Şekil 5.57 Su/Çimento oranı 0,6 olan örneklerin kirece doygün su kürü sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği

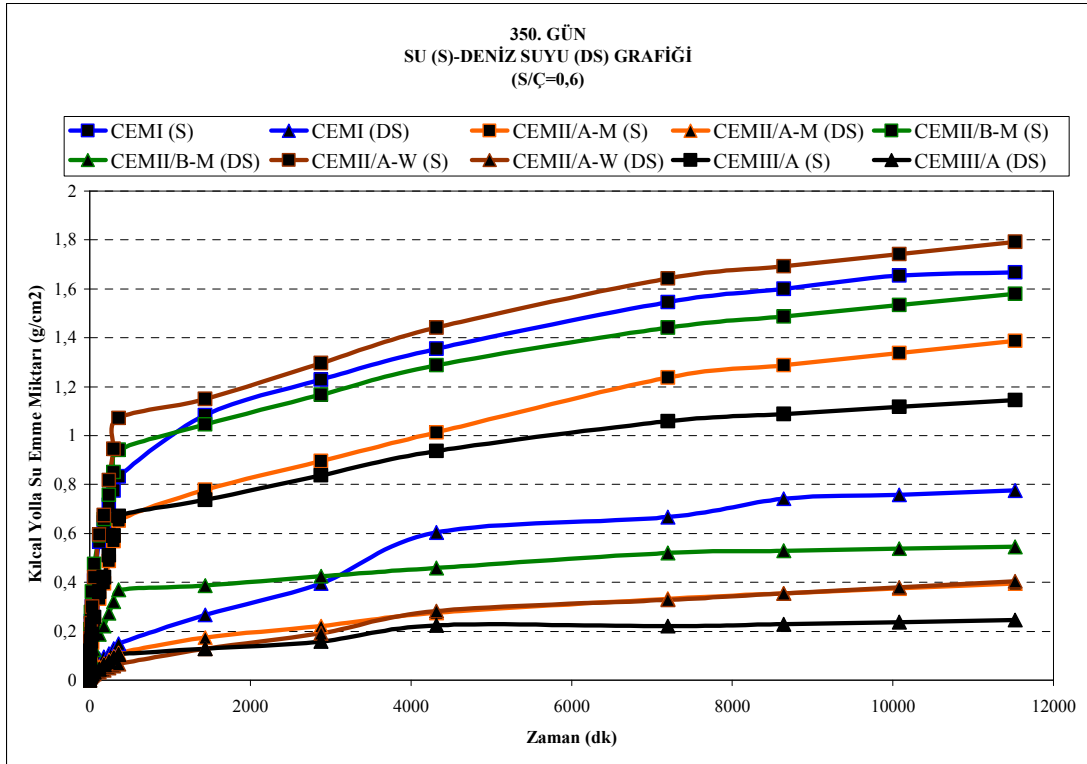


Şekil 5.58 Su/Çimento oranı 0,7 olan örneklerin kirece doygün su kürü sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği

Deniz suyu etkisine maruz kalan betonlar, sülfat saldırısının yanı sıra, gözeneklerinde çökelen (biriken) tuz kristallerinin yarattığı basınç nedeniyle de genişip, yıpranabilmektedirler. Sertleşmiş betonun gözeneklerinde tuz birikmesi, betonun içerisine giren deniz suyunun kapiler hareketle yukarı çıkması ve buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu olay, betonun, su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmektedir. Deniz sularının gel-git hareketiyle yükselip alçalması sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma-kuruma devirlerinin etkisinde kalmaktadır. Bu tür ıslanma-kuruma durumu ile karşı karşıya kalan beton devamlı olarak su içerisinde bulunan betona göre daha çok hasar görmektedir. Öte yandan, deniz suyunun içerisinde bulunan magnezyum sülfat, betondaki bağlayıcı özellikteki kalsiyum-silika-hidrat jelinin çözünmesine neden olmakla birlikte, bu çözünme oldukça yavaş tempoda yer almaktadır. O nedenle, gözeneklerde biriken magnezyum sülfat kristalleri, gözeneklerin bir ölçüde tıkanmasına ve böylece dışarıdan daha az su sızabilmesine yol açmaktadır (Erdoğan, 2003). Şekil 5.59 ve 5.60'ta görüldüğü gibi, deniz suyunda bekletilen örneklerin 350 gün sonrasında, kirece doymun suda bekleyenlerden daha az su emdiği görülmektedir. Bunun sebebi, Erdoğan (2003) tarafından açıklandığı gibi, gözeneklerde biriken magnezyum sülfat kristallerinin gözenekleri tıkayarak dışarıdan prizmatik harç örneğine su girişini azaltmasıdır. CEMI 42,5 R çimentosunu içeren, kirece doymun suda ve deniz suyunda bekletilen örnekler 350. günde diğer örneklerden kılcal yolla daha fazla miktarda su emmiştir. Bunun sebebi, bu çimentoda dolgu etkisi yapacak herhangi bir mineral katkının bulunmamasıdır. Ayrıca daha önce de belirtildiği gibi, CEM I çimentosunun  $C_3S$  ve  $C_2S$  miktarları daha fazla olduğundan oluşan  $Ca(OH)_2$  ürününün çözünmesi sonucu örneklerin kılcal boşluk sayısında artış meydana gelmiştir.

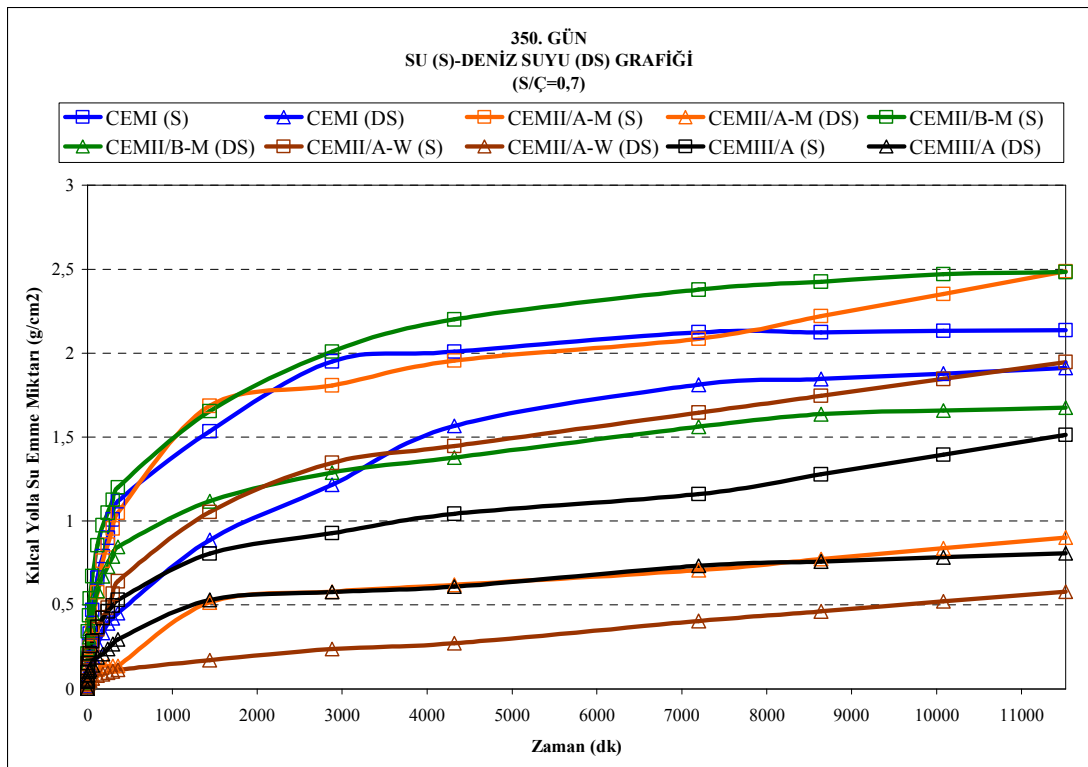


Şekil 5.59 Su/çimento oranı 0,485 olan, suda ve deniz suyu bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda uygulanan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları



Şekil 5.60 Su/çimento oranı 0,6 olan, suda ve deniz suyu bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda uygulanan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları

Köksal ve diğer. (1996) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli çimentolarla üretilen betonların ıslanma-kuruma çevrimlerinden zarar görmedikleri, kılcallık katsayıları ve su emmeleri bakımından Portland çimentosu ile üretilen betonlardan daha dayanıklı olabildikleri görülmüştür. Şekil 5.61’de, hem suda hem de deniz suyunda bekletilme sonucunda kılcallık deneyi sonuçlarında en az su emme miktarına sahip olan örnekler, CEM III/A çimentosuyla hazırlananlar olmuştur. Bu çimentonun içerdiği yüksek miktarda cüruf, kılcal yolla su emmeyi kısıtlamaktadır.



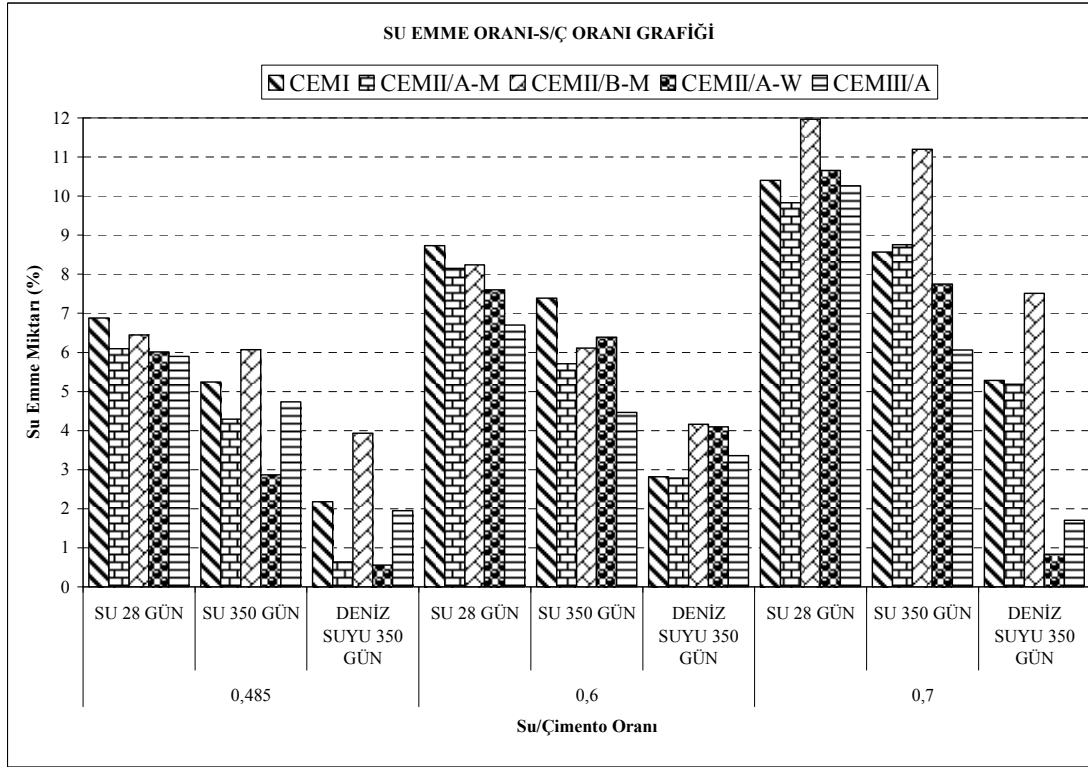
Şekil 5.61 Su/çimento oranı 0,7 olan, suda ve deniz suyunda bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda uygulanan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları

Tablo 5.7’de toplam su emme miktarı için uygulanan deneyin sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.7 Örneklerin su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre toplam su emme miktarları

Bekleme Koşulu	S/Ç	CEMI	CEMIIAM	CEMIIBM	CEMIIAW	CEMIIII
		Su Emme Miktarı (%)				
Su 28 Gün	0,485	6,88	6,09	6,45	6,01	5,9
Su 350 Gün		5,25	4,29	6,07	2,87	4,73
Deniz Suyu 350 Gün		2,18	0,64	3,93	0,56	1,95
Su 28 Gün	0,6	8,73	8,15	8,24	7,6	6,7
Su 350 Gün		7,39	5,71	6,11	6,39	4,47
Deniz Suyu 350 Gün		2,82	2,78	4,16	4,1	3,36
Su 28 Gün	0,7	10,4	9,83	11,96	10,66	10,26
Su 350 Gün		8,56	8,76	11,19	7,75	6,06
Deniz Suyu 350 Gün		5,28	5,18	7,51	0,84	1,71

Şekil 5.62’de, Tablo 5.7’nin grafik gösterimi yer almaktadır. Genel olarak, beklendiği gibi toplam su emme miktarlarının su/çimento oranı arttıkça artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi, artan su/çimento oranıyla örnek yapısındaki boşlukların da artış göstermesidir.



Şekil 5.62 Tüm çimento tipleriyle hazırlanan örneklerin toplam su emme oranlarına genel bakış

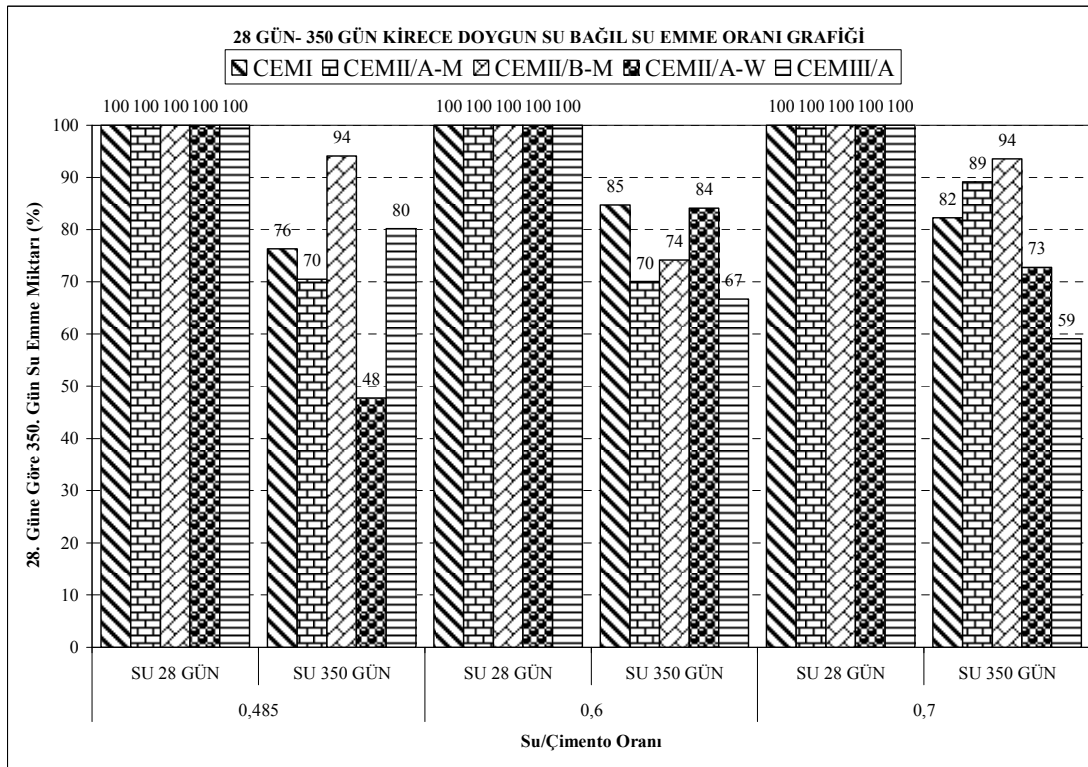
Şekil 5.63'te, 350 gün kirece doymun suda bekleyen örneklerin 28. günde ölçülmüş verilerine göre toplam su emme miktarlarının karşılaştırılması verilmektedir. 350. günde örnekler, 28. güne oranla daha az su emme miktarları sergilemişlerdir. Bunun sebebi, zamanla hidrasyon ürünlerinin artması sonucu boşlukların dolmasıdır. 0,7 su/çimento oranında en az su emme miktarı sergileyen örnek, CEM III/A çimentosuyla üretilendir. Bu çimentoda bulunan yüksek fırın cürufu, ileri yaşlarda dayanımı arttırmakta ve kılcal boşlukların yeterince dolmasını sağlamaktadır. Su/çimento oranı 0,485 olan örnekler içinde CEM III/A çimentosunu içeren örneklerin fazla miktarda su emenler arasında olmasının nedeni, harcın kalıba yerleştirilmesi sırasında oluşan sıkıştırma yetersizliğidir. İnceliği yüksek olan bu çimento tipi yeterli işlenebilirlik için gereken su ihtiyacını arttırmıştır.

S/Ç=0,485 için 350 gün verileri değerlendirildiğinde, 28 gün verilerine kıyasla en az su emen örnek tipi CEM II/A-W ile üretilenler olmuştur. Bu örnekler, %52 daha az su emme miktarı ile en az su emen örnek olmuşlardır. Bunun sebebi, dayanım sınıfı yüksek olan çimento tipi içermeleri olarak düşünülmektedir. 0,485 su/çimento



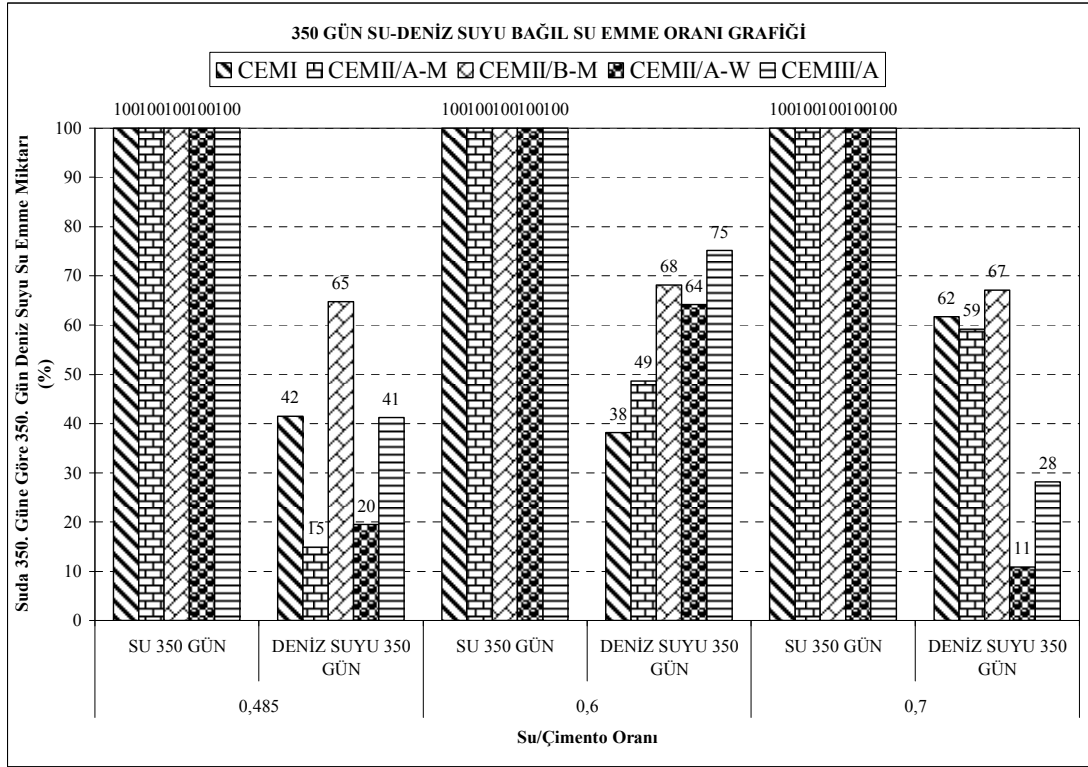
oranında harcın sıkıştırılmasında zorluk olduğundan örnek bünyesinde bulunan boşluklar daha fazla olmaktadır ve örneklerin su emme miktarları yanıltıcı olabilmektedir.

0,6 ve 0,7 su/çimento oranlarında ise sırasıyla %33 ve %41 daha az su emme değerleriyle en az su emme miktarına sahip olan örnekler CEM III/A çimentosuyla üretilenlerdir. Yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivitesinin dayanımı arttırması ve çimento inceliğinin fazla olması sayesinde örnek bünyesindeki boşluklar hidrasyon ürünleriyle dolmuştur.



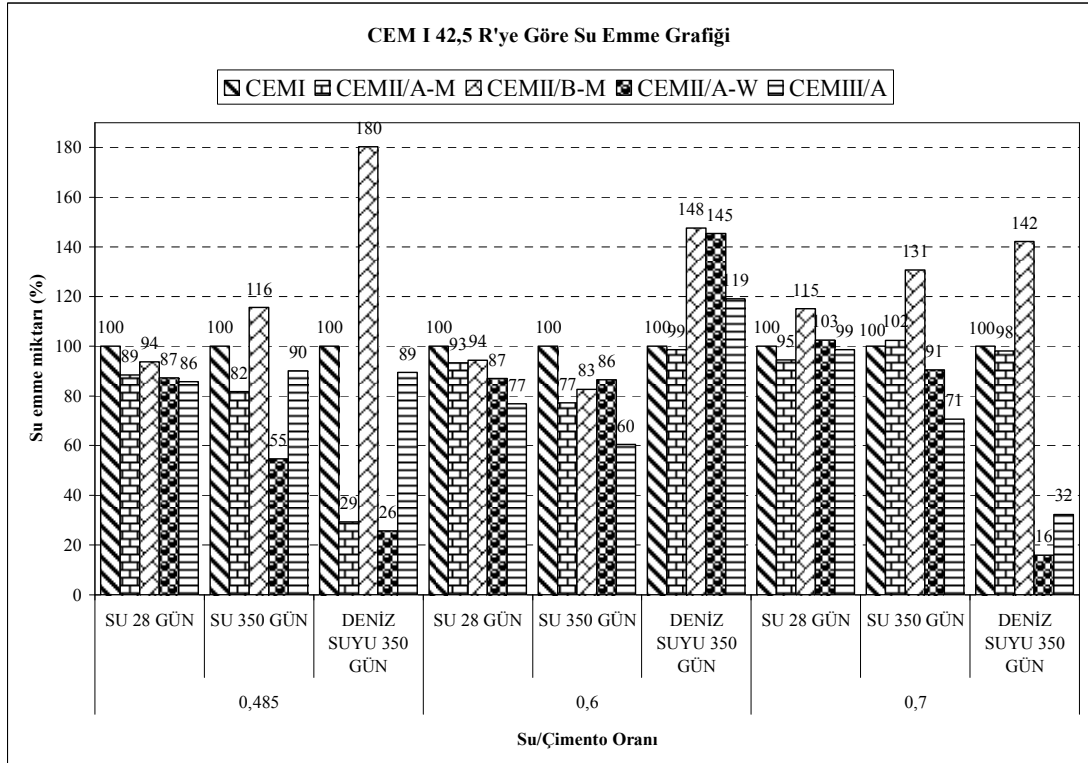
Şekil 5.63 Kirece doygun suda kür edilen tüm örneklerin, 350. gün toplam su emme deneyi sonuçlarının 28 günlük sonuçlarına göre değişimi

Şekil 5.64'te, deniz suyunda bekleyen örneklerin 350. günde ölçülmüş toplam su emme miktarlarının, kirece doygun suda bekletilmiş örneklerle karşılaştırılması verilmektedir. Deniz suyunda bekleyen örneklerin eşleniklerinden daha az su emmelerinin nedeni, deniz suyundaki tuz kristallerinin örnek gözeneklerinde birikerek tıkanıklığa yol açmasına bağlanabilir.



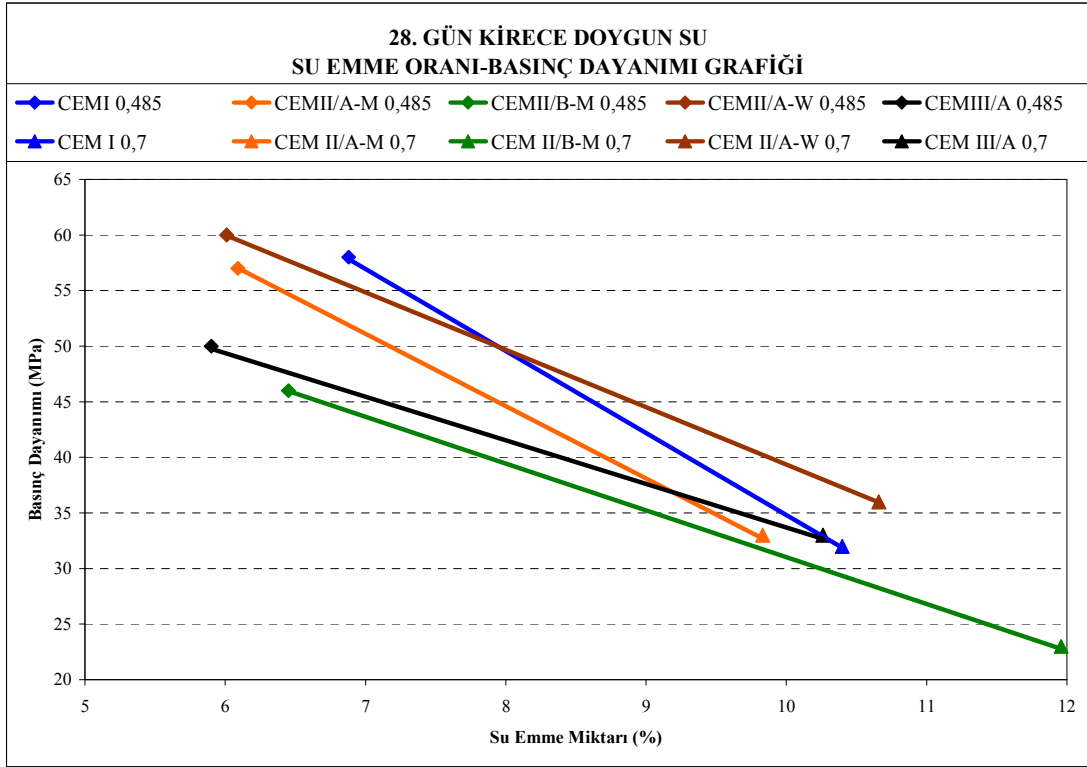
Şekil 5.64 Deniz suyunda bekletilen örneklerin toplam su emme deneyi sonuçlarının, kirece doygun suda bekleyen eşleniklerine göre toplam su emme miktarları

Şekil 5.65'te tüm örneklerin toplam su emme miktarı değerlerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre kıyaslanması verilmektedir. CEM II/B-M 32,5 R çimentosunun dayanım sınıfı diğer çimento tiplerinden düşük olduğu için tüm su/çimento oranlarında su emme miktarı fazla çıkmıştır. CEM II/A-M ve CEM II/A-W çimento tiplerini içeren örnekler, Şekil 5.52'de gösterilmiş olan 350. gün deniz suyu kılcal yolla su emme grafiğinde çıkan sonuca benzer olarak 0,485 su/çimento oranında diğer örnek tiplerinden daha az su emme miktarına sahiptir. Bunun sebebi, harç örneklerinin yapısına nüfuz eden deniz suyunda bulunan tuzların çökelerek boşlukları tıkamış olmasıdır.

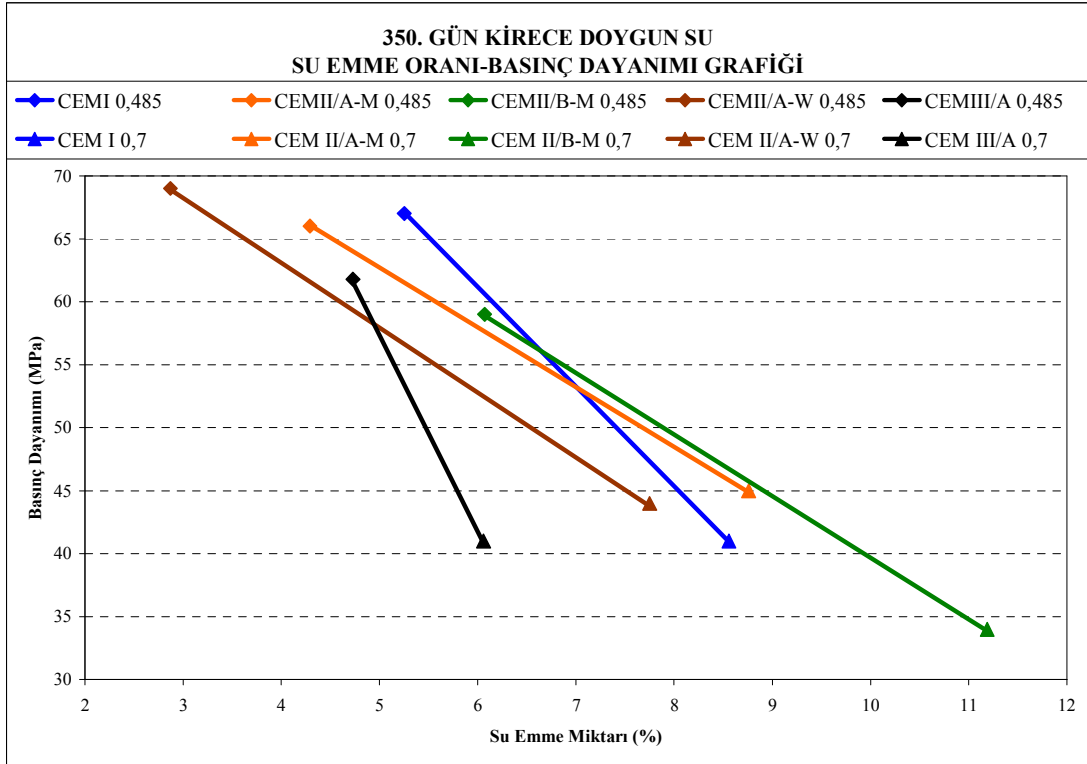


Şekil 5.65 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin toplam su emme verilerine göre bağıl su emme oranı grafiği

Su emme deney sonuçları, betonun dışa açık olan tüm boşluklarının miktarı hakkında fikir vermektedir. Bu sonuçlar kılcallık deneyi sonuçlarında olduğu gibi hidrasyon sürecinin gelişimine ve ince malzeme miktarına yani çimento dozajına bağlıdır. Betonun basınç dayanımının, içerisindeki boşluklarla ilişkisinin olduğu ve boşluk miktarı arttıkça basınç dayanımının düştüğü yaygın olarak bilinmektedir. (Uyan ve diğer., 2003). Şekil 5.66 ve 5.67'de yer alan su emme miktarı-basınç dayanımı grafiklerinde bu çalışmada ulaşılan sonuç görülmektedir. Kirece doymun suda bekletilen örneklerde, boşluk miktarı ve su emme miktarı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. Bu ilişkiye, deniz suyunda bekletilmiş 350 günlük örneklerde rastlamak mümkün olmamaktadır. Çünkü deniz suyunda bekletilen örneklerin su emme miktarları, örnek yüzeyinde biriken ve boşluklarda çökelen tuz zerreciklerinin gözenekleri tıkanması nedeniyle azalma sergilemiştir. Bu sebeple, deniz suyunda bekletilen örneklerin şahit örneklere göre 350. günde dayanımlarında azalma meydana gelmiş olması, şahit örneklerden daha çok su emdiği anlamına gelmemektedir.



Şekil 5.66 Örneklerin 28. günde elde edilen toplam su emme oranı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması



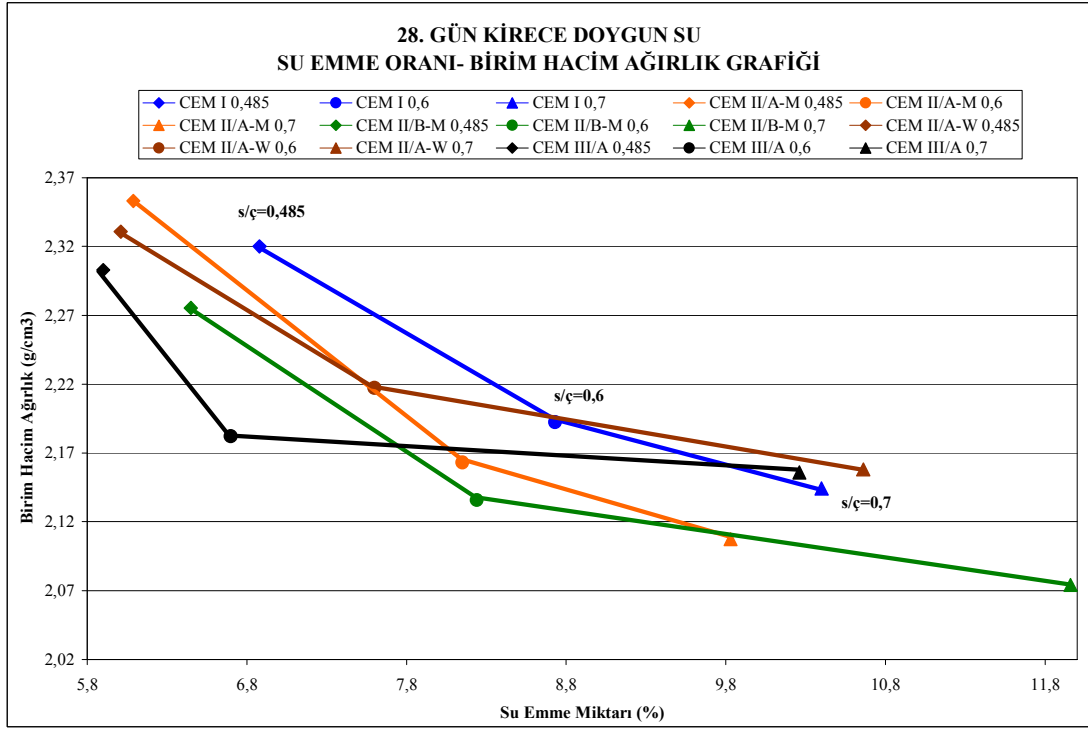
Şekil 5.67 Örneklerin 350. günde elde edilen toplam su emme oranı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması

Tablo 5.8’de, 28 ve 350 gün boyunca kirece doymun suda ve 350 gün boyunca deniz suyunda bekletilmiş olan örneklerin birim hacim ağırlıkları görülmektedir.

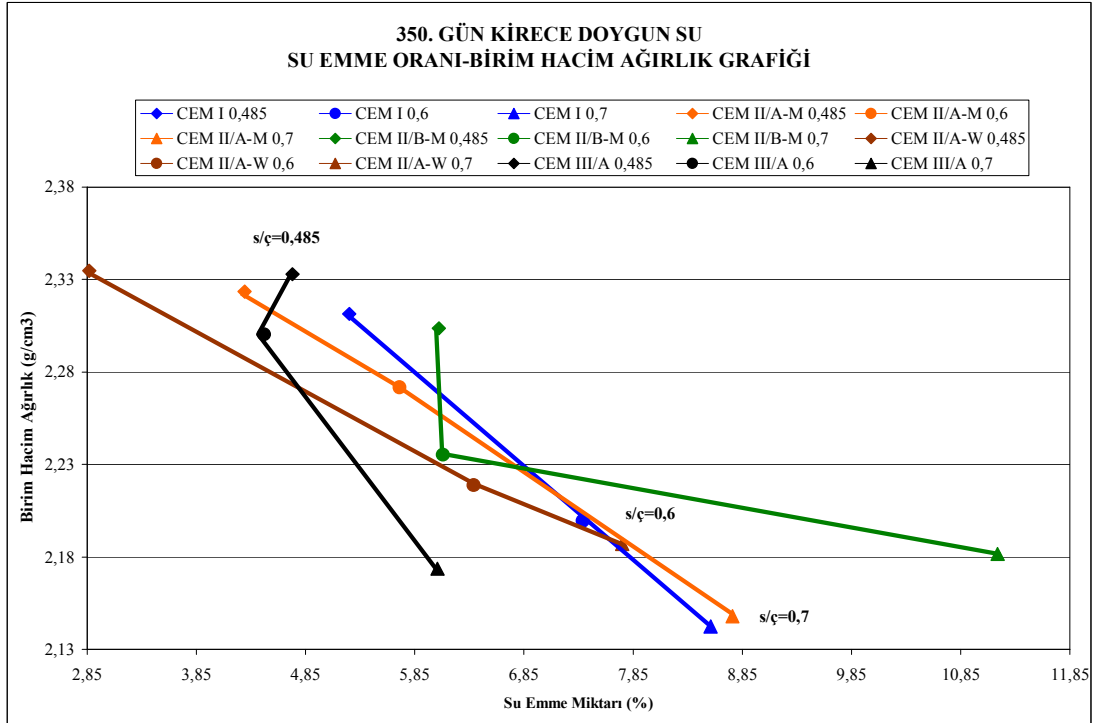
Tablo 5.8 4x4x16 cm boyutlu prizmatik örneklerin su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre birim hacim ağırlıkları

Bekleme Koşulu	S/Ç	CEMI	CEMII/A-M	CEMII/B-M	CEMII/A-W	CEMIII/A
		Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )				
SU 28 GÜN	0,485	2,32	2,35	2,28	2,33	2,30
SU 350 GÜN		2,31	2,32	2,30	2,33	2,33
DENİZ SUYU 350 GÜN		2,41	2,39	2,30	2,39	2,43
SU 28 GÜN	0,6	2,19	2,16	2,14	2,22	2,18
SU 350 GÜN		2,20	2,27	2,24	2,22	2,30
DENİZ SUYU 350 GÜN		2,29	2,35	2,27	2,28	2,32
SU 28 GÜN	0,7	2,14	2,11	2,07	2,16	2,16
SU 350 GÜN		2,14	2,15	2,18	2,19	2,17
DENİZ SUYU 350 GÜN		2,19	2,25	2,13	2,25	2,23

Şekil 5.68 ve 5.69’da, kirece doymun suda kür edilen tüm deney örneklerinden 28. ve 350. günde elde edilen toplam su emme ve birim hacim ağırlık verilerinin grafik şeklinde ifade edilişi görülmektedir. Bilindiği gibi, örneklerin birim hacim ağırlığı arttıkça toplam su emme değerleri düşer. Su/çimento oranı arttıkça elde edilen birim hacim ağırlık değeri azalmaktadır ve su emme değeri artmaktadır. Bunun sebebi, su miktarının artışıyla oluşan boşluk miktarının da artmasıdır. Baradan (2004) tarafından ifade edildiği gibi, hidratasyon ve jel yapısı için gerekli suyun üstündeki fazla su, harç sertleştikten sonra buharlaşarak, beton içinde çoğunluğu kılcal olan boşlukların oluşmasına neden olur.



Şekil 5.68 Kirece doygun su küründe 28. gün toplam su emme değerlerinin birim hacim ağırlık değerleriyle kıyaslanması



Şekil 5.69 Kirece doygun su küründe 350. gün toplam su emme değerlerinin birim hacim ağırlık değerleriyle kıyaslanması

Tablo 5.9’da tüm örneklerin yaşla ve kür koşullarına bağlı olan klor geçirimsizlik verileri sunulmuştur. ASTM 1202 standardına göre klor geçirimsizlik değerlendirme ölçütleri ise Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.9 Tüm örneklerin yaş ve kür koşullarına bağlı klor geçirimsizlik verileri

Değişkenler			Çimento Tipi				
Zaman (Gün)	Koşullar	Su/çimento	CEM I	CEM II/A-M	CEM II/B-M	CEM II/A-W	CEM III/A
28	SU	0,485	7303	5909	3943	5883	2844
		0,6	8366	8472	2940	8461	2507
		0,7	10197	7516	2515	6841	2334
350	SU	0,485	2907	1040	358	1618	878
		0,6	4096	1621	456	1866	535
		0,7	5725	2264	616	3380	723
350	DENİZ SUYU	0,485	2993	2420	688	2090	1013
		0,6	5909	2286	825	2187	782
		0,7	5826	4891	783	4310	1268

Tablo 5.10 Deney düzeneğinden geçen yük miktarına göre klorür iyonu penetrasyonu (ASTM 1202)

Geçen Yük Miktarı (Coulomb)	Klorür İyonu Penetrasyonu
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Şekil 5.70’te, Tablo 5.9’da bulunan değerlerin grafik şeklinde ifade edildiği görülmektedir. Kirece doymun suda 350. günde klor geçirimsizlik direnci en yüksek olan örnek tipleri sırasıyla CEM II/B-M 32,5 ve CEM III/A 42,5 çimentosuyla üretilenler olmuştur. Tablo 5.10’da görülen ASTM 1202 standardı değerlendirmesine göre CEM II/B-M 32,5 ve CEM III/A 42,5 çimentosu ile üretilen örneklerin 350. günde klor geçirimsizliği çok düşük seviyededir. Kirece doymun suda 28. günde dahi bu iki çimento tipinin diğer tiplerinden daha geçirimsiz bir yapı oluşturduğu söylenebilir. Bunun sebebi, bu çimento tiplerinin %29,91 tras, kalker, uçucu kül, %36,56 oranında yüksek fırın cürufu içermesi ve inceliğinin yüksek olmasıdır. Şengül, Taşdemir ve Sönmez (2003) tarafından ifade edildiği gibi, 1 yıl boyunca su

içinde tutulmuş örnekler için yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonların hızlı klor geçirimsizliği sonuçları çok düşüktür ve ASTM C 1202'nin belirttiği “klor geçirimsizliği ihmal edilebilir beton” sınırına çok yakındır.

Şengül, Taşdemir, Yüceer ve Erenoğlu (2003) tarafından ifade edildiği gibi, mineral katkı kullanımı betonun klor geçirimsizliğini büyük ölçüde etkilemiştir. Tüm su/bağlayıcı oranlarında, mineral katkı kullanılan betonların klor geçirimsizlikleri arasındaki fark, deney gününe bağlı olarak yaklaşık 7 ila 34 kat daha az olmuştur. Dayanımı yüksek betonu yüksek performanslı beton olarak sınıflandırmanın doğru olmadığı anlaşılmaktadır. Klor geçirimsizlikleri zamanla azalmıştır.

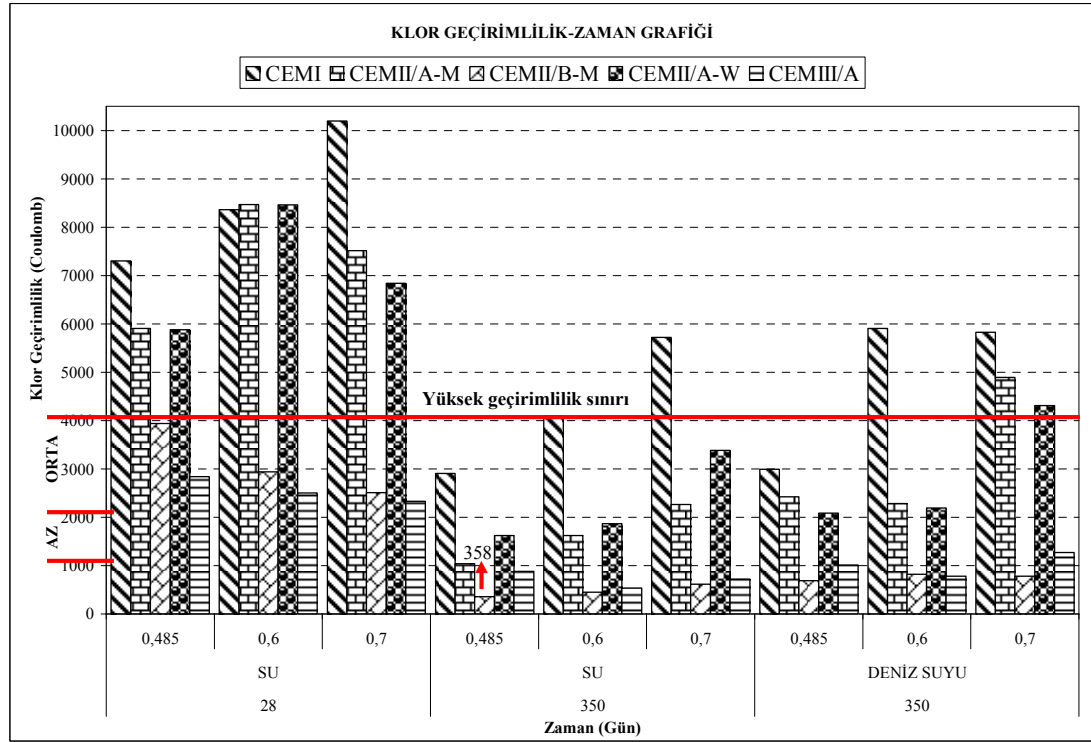
Şengül ve Gjörv (2005) tarafından ifade edildiği gibi, cüruf ilave edilmesinin betonların klor iyonu geçirimsizliklerini önemli oranda azalttığını ortaya koymuştur. Çimentonun öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi, betonda hızlandırılmış klor yayılımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma, 7 gün gibi erken yaştaki betonlarda da gözlenmiştir. Klor yayılımındaki düşüş 28 günlük betonlarda çok daha belirgindir. Klor yayılımındaki azalma cüruf yer değiştirme oranıyla yakından ilgilidir. Çimentonun cürufu ile yer değiştirme oranı arttıkça klor yayılımını azalmaktadır.

Kutlu ve Demiriz (2007) tarafından ifade edildiği gibi, hızlı klor geçirimsizliği ve basınçlı su geçirimsizliği deneylerinde çimento cinsinin etkili olduğu ve CEM III tipi çimento içeren örneklerin CEM I ve CEM II'li örneklere göre çok daha düşük geçirimsizliğe sahip olduğu sonucu görülmektedir. Kalıcılığın vazgeçilmez şartlarından biri olan geçirimsizlik açısından cürufu çimento ile yapılan betonların çelik donatıyı korumada çok önemli bir görev üstlendiği söylenebilir.

Chindaprasirt ve diğer. (2007) tarafından ifade edildiği gibi, hızlandırılmış klor iyon geçirimsizliği deneyi, 28 günlük betonun “Coulomb” değerinin uçucu kül eklenmesiyle azaldığını göstermiştir. Geçirimsizlik direncindeki artış, azalan su/bağlayıcı oranı, ortalama gözenek boyutundaki azalma ve ara-yüz bölgesinin gelişimi ile doğru orantılıdır.



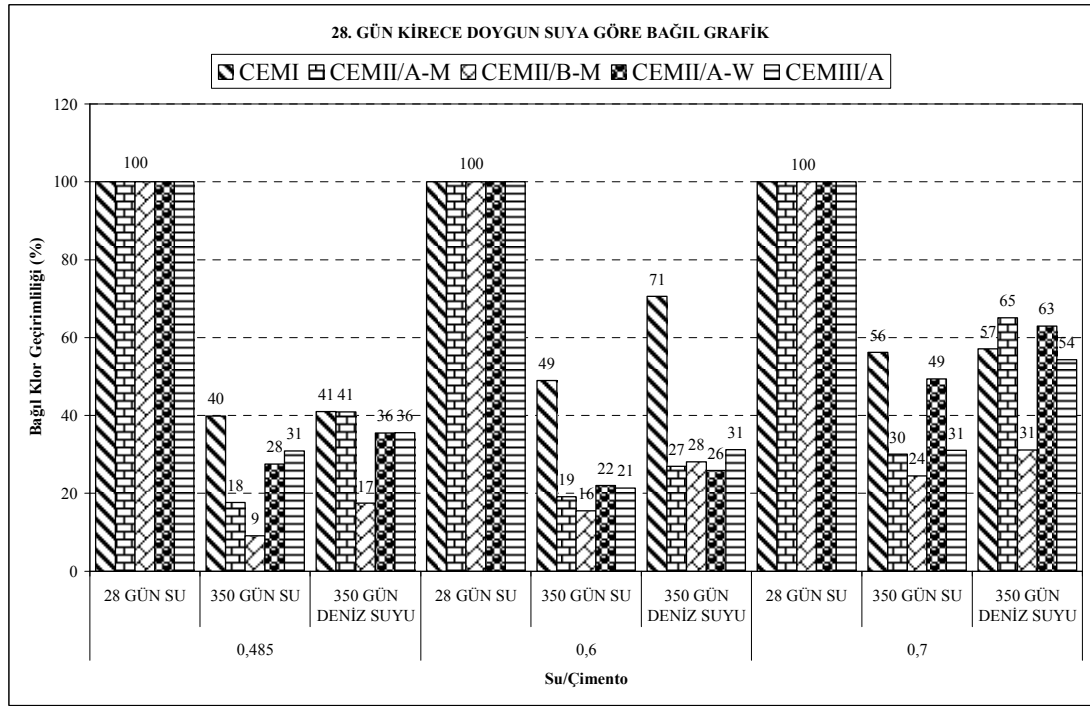
Han (2007) tarafından belirtildiği gibi, çimentonun  $C_3A$  oranı arttıkça klor iyonu bağlama yoluyla Friedel Tuzu oluşturma kapasitesi de artacaktır ve böylece örnek yüzeyinde oluşan bağlı klor iyonları serbest iyonların geçişine izin vermeyecektir. Bu açıklamanın tersine, Şekil 5.70’te CEM II/B-M ve CEM III/A çimentolarıyla üretilen örneklerin tüm su/çimento oranlarında ve bekletilme koşullarında diğer örnek tiplerinden daha düşük “Coulomb” değerine sahip oldukları görülmektedir. Düşük  $C_3A$  içeriğine sahip olmalarına rağmen klor geçirimsizlik dirençlerinin yüksek olması, incelik ve mineral katkı yüzdelerinin yüksek oluşuyla artan hidrasyon gelişimi ve puzolanik aktiviteyle açıklanabilir.



Şekil 5.70 Tüm örneklerin yaş ve kür koşuluyla değişen klor geçirimsizlik grafiği

Şekil 5.71’de, tüm örneklerin kirece doymuş suda ve deniz suyunda bekletildikleri süre sonunda sahip oldukları klor geçirimsizlik verilerininin 28. gün verilerine göre elde edilen bağlı grafiği gösterilmiştir. Örneklerin hidrasyon gelişimi sonucu, 350 günlük verilerinde azalma meydana gelmiştir. Çünkü hidrasyon gelişimiyle birlikte örneklerin yapısında yer alan boşluklar hidrasyonun katı ürünleriyle dolmaktadır. 350 gün kirece doymuş suda bekletilen, 0,485 su/çimento oranında CEM II/B-M çimentosuyla üretilen örnekler 28. gün verilerine göre %91 daha dirençli olmuştur.

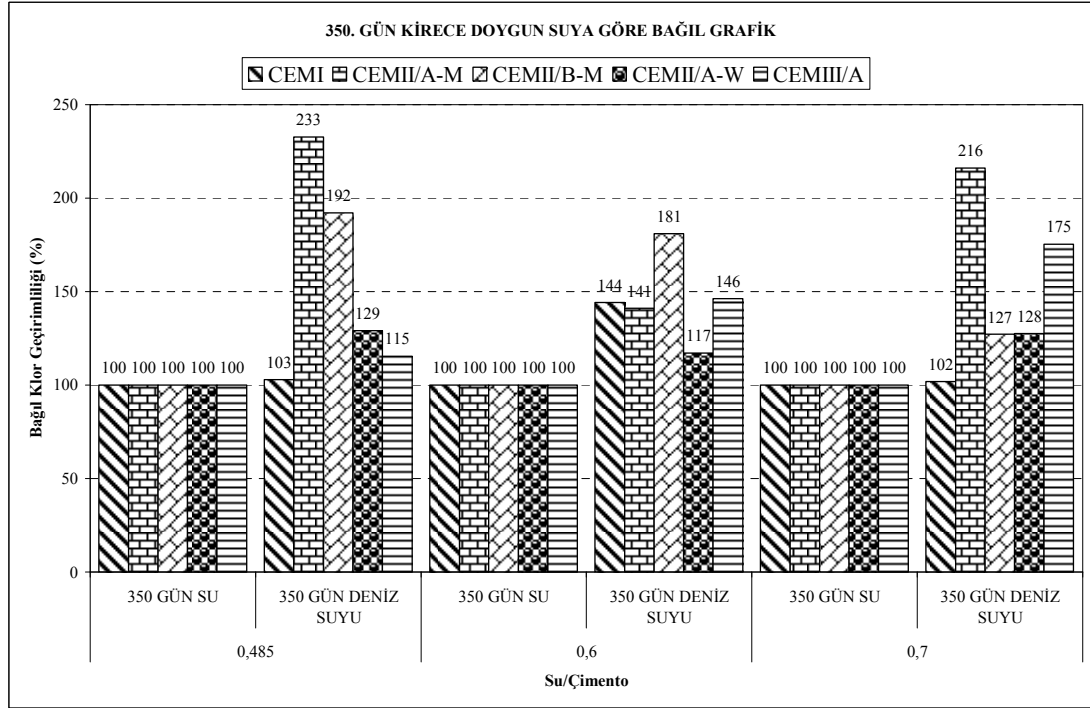
Çimento içeriğindeki %20 tras+%5 kalker miktarıyla gelişen hidrasyon seviyesinin zararlı iyon geçişini kısıtladığı düşünülmektedir. Biricik ve diğer. (2003) tarafından belirtildiği gibi, kalker fillerinin çimento bileşeni olan  $C_3A$  ile reaksiyona girerek kalsiyum karboalüminatları oluşturduğu, yüksek  $C_3A$  içeren çimentolarla birlikte kullanılması halinde fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin olumlu olduğu ileri sürülmektedir.



Şekil 5.71 Tüm örneklerin 28. gün kirece doygun su verilerine göre bağıl klor geçirirlik grafiği

Şekil 5.72’de, 350 gün deniz suyunda bekletilen örneklerin klor geçirirlik verilerinin, 350 gün kirece doygun suda kür edilen örneklerin verilerine göre elde edilen bağıl grafiği gösterilmektedir. 350 gün deniz suyu verileri, 350 gün kirece doygun su verilerinden bir miktar fazladır. Deniz suyu etkisiyle örneklerin bünyesine işlemiş olan klorür iyonlarının, deney esnasında oluşan klor iyonu geçişinde köprü görevi gördüğü düşünülmüştür. 0,485 ve 0,7 su/çimento oranlarında en fazla klor iyonu geçiren örnek tipi CEM II/A-M çimentosuyla üretilenler olmuştur. 350. gün şahit örneklerine göre en az klor geçirirlik artışı gösteren örnekler ise CEM I tipi,  $C_3A$  oranı en yüksek olan çimentoyla üretilenler olmuştur. Bu durumda, Han (2007) tarafından belirtilen “Çimentonun  $C_3A$  oranı arttıkça klor iyonu bağlama yoluyla

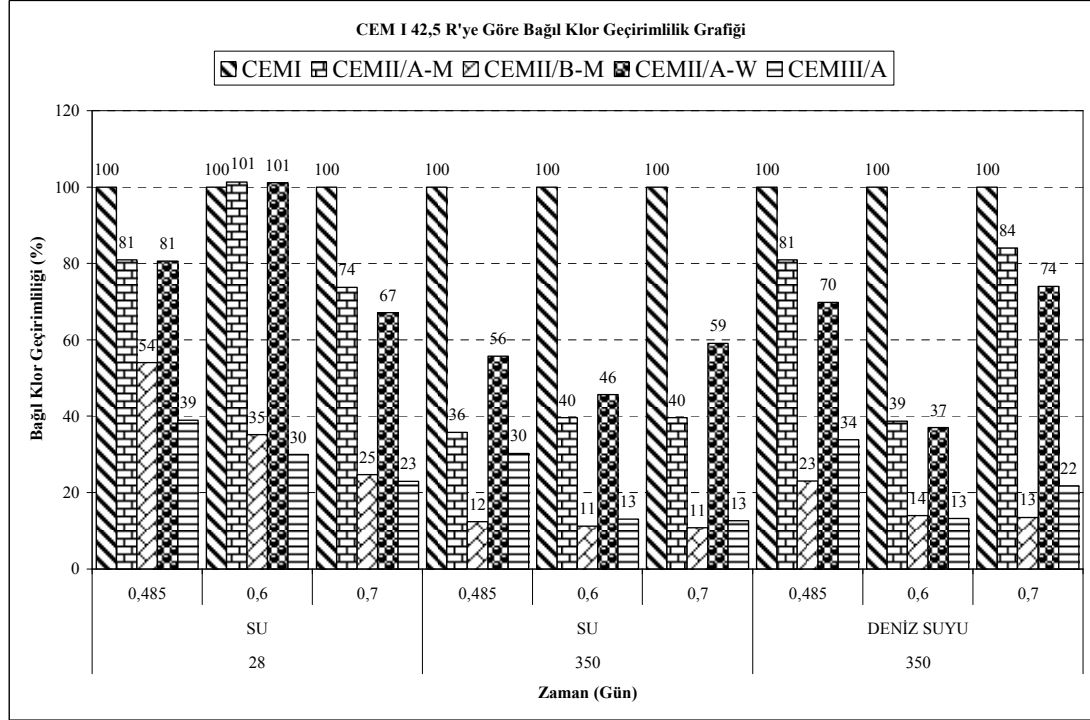
Friedel Tuzu oluşturma kapasitesi de artacaktır ve böylece örnek yüzeyinde oluşan bağlı klor iyonları serbest iyonların geçişine izin vermeyecektir” ifadesi destekleyici olmaktadır.



Şekil 5.72 Tüm örneklerin 350. gün kirece doygun su verilerine göre bağlı klor geçirirlik grafiği

Şekil 5.73'te, tüm örneklerin klor geçirirlik deneyi verilerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre kıyaslanarak elde edilen bağlı klor geçirirlik grafiği görülmektedir. CEM II/B-M ve CEM III/A çimento tipleriyle üretilen örnekler her su/çimento oranında ve her koşulda diğerlerinden daha az klor geçirirlik değeri vermişlerdir. Bu çimentolarda bulunan mineral katkı oranının yüksek olması, inceliklerinin fazla olması, en az  $C_3S$  ve  $C_3A$  oranına sahip olmaları geçirirlik değeri azaltan en önemli faktörlerdir. Bader (2003) tarafından ifade edildiği gibi, azalan su/çimento oranında ve zengin karışımda, klor difüzyonu azalmıştır. Thomas ve Matthews (2004) tarafından ifade edildiği gibi, uçucu küllü betonlar, Portland çimentosu içeren kontrol betonlarıyla kıyaslandığında, klor iyonlarının girişine yeteri kadar çok direnç göstermiştir.

Yiğiter ve diğer. (2007) tarafından ifade edildiği gibi, sabit çimento dozajı ve su/çimento oranında cüruflu çimento karışımlarının klor girişine, portland çimentosu karışımlarından daha az izin verdiği görülmüştür.



Şekil 5.73 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin klor geçirimsizlik verilerine göre bağlı klor geçirimsizlik grafiği

Betonda ıslanma-kuruma çevriminin (İKÇ'nin) şiddeti ile genliği artan tekrarlı gerilme ve şekil değiştirmeler etkir. Ayrıca betona dışarıdan su ile gelen ve yapısında da bulunan çözünür tuzlar ve kireç, su ile taşınarak buharlaşmanın olduğu dış katmanlarda ve yüzeyde birikir. Kururken kristalleşme ve ıslanma sırasında ozmos nedeniyle iç basınç ve şişme etkisi oluşabilir. Bu nedenle sürekli kuruma etkisinde kalmış betonun büzülmesi İKÇ görmüş betonunkinden büyük olabilir; hatta İKÇ gören betonda, toplam su içerikleri aynı olsa dahi, büzülme değil şişme görülebilir. Özellikle doğal ortamda bir yüzeyi zeminle temasta, diğeri atmosfere açık olan kanal kaplama betonlarında, kanalda su bulunmadığı kuruma sürelerinde zeminden gelen tuzlar özellikle kuruma etkisindeki yüzey katmanlarında birikerek tekrar ıslanma sırasında şişmeyi ve sülfat etkisinin şiddetini arttırabilir. Kuruma sırasında yüzey katmanlarına taşınan tuz ve kirecin bir bölümü ıslanma sırasında yıkanarak uzaklaşır.

Islanma kirece doygun su ile olursa yıkanma etkisi azalabilir (Köksal, Güllü ve Güner, 1996).

Şekil 5.74'te yukarıdan aşağıya sırasıyla kirece doygun suda, 115 ıslanma-kuruma çevrimli deniz suyunda ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin görünüm farkları görülmektedir. Tablo 5.11'de deniz suyunda ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin ağırlıklarında meydana gelen değişim ifade edilmektedir. Ağırlık değişimi, Biricik ve diğer. (2003) tarafından yapılan çalışmada uygulanan yöntemle benzer olarak, örneklerin deniz suyuna ve sülfat ortamına konulmadan önceki (28. gün) suya doygun-yüzey kuru haldeki ağırlıkları ile ortamdan çıkarıldıklarındaki (350. gün) ağırlıkları arasındaki farkın ilk ağırlığa oranı ile belirlenmiştir. Deniz suyunda bekletilen örneklerin yüzeyinde ve boşluklarında tuz birikmesi sonucu ağırlığında artış meydana gelmektedir. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örnekler arasında en az değişim sergileyenler CEM III/A 42,5 N çimentosuyla üretilenler olmuştur. Ağırlık kaybının sabit kalması, bu çimento tipiyle hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinden etkilenmediğini göstermektedir. Şekil 5.23'te gösterildiği gibi, 0,7 su/çimento oranında CEM II/A-M çimentosuyla hazırlanan örnekler sodyum sülfat çözeltisinde çatlaklarla sonuçlanan hasara uğramışlardır. Tablo 5.10'da CEM II/A-M çimentosu için 0,7 su/çimento oranında görülen ağırlık değişim değeri de bunu kanıtlamaktadır. Tablo 5.11'de sunulan ağırlık değişimleri (son ağırlık-ilk ağırlık)/ilk ağırlık\*100 yöntemiyle elde edilen 28 gün ile 350 gün arasındaki ağırlık farklarını temsil etmektedir.

Erdoğdu ve Karataş (2003) tarafından ifade edildiği gibi, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin ağırlıklarında ciddi bir artış meydana gelmemiştir. Deniz suyunda bekletilen örneklerin ağırlıklarında meydana gelen artışın deniz suyunda bulunan klor sayesinde oluşan kloro-alüminatlar ve magnezyum sayesinde oluşan brusit dolayısıyla oluşabileceği düşünülmektedir.



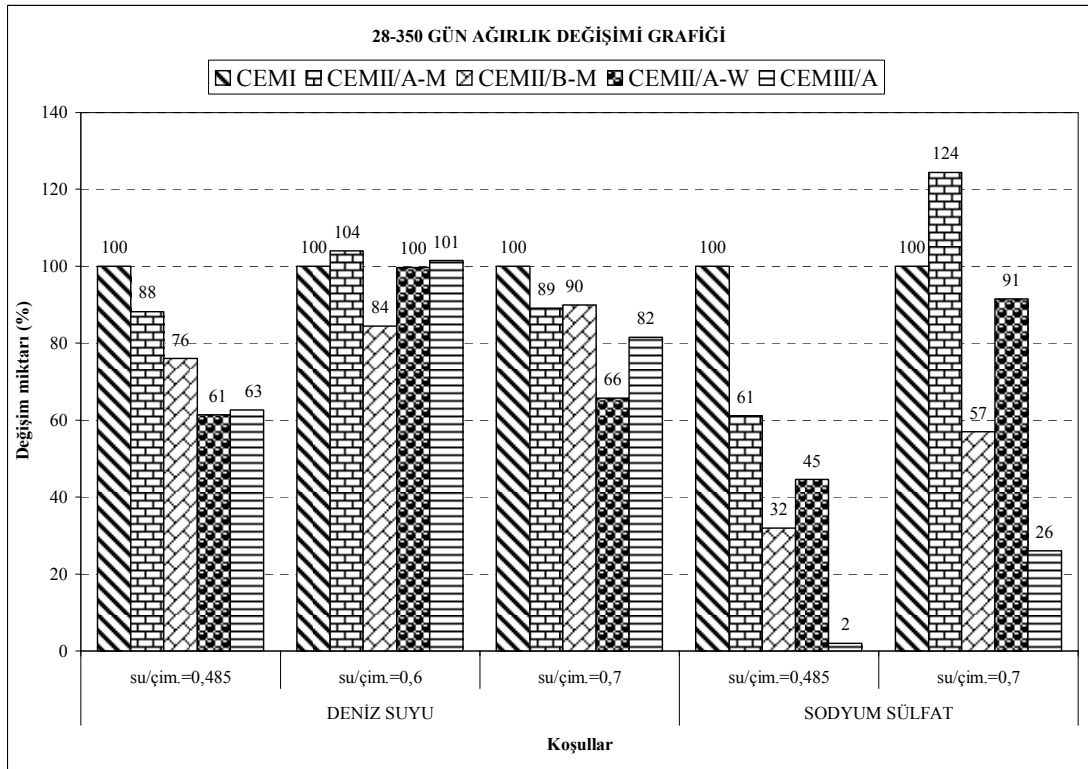
Şekil 5.74 Yukarıdan aşağıya kirece doymun su, ıslanma-kuruma çevrimli deniz suyu ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin görünüm farklılıkları

Tablo 5.11 Deniz suyunda ve sodyum sülfatta bekletilen tüm örneklerin ağırlık değişimleri

Ağırlık Değişimleri (%)		Çimento Tipleri				
Koşullar	Su/çimento	CEMI	CEMII/A-M	CEMII/A-W	CEMII/B-M	CEMIII
DENİZ SUYU	0,485	2,682	2,367	1,647	2,038	1,681
	0,6	2,543	2,646	2,535	2,147	2,581
	0,7	2,374	2,115	1,562	2,133	1,936
SÜLFAT	0,485	1,080	0,661	0,482	0,345	0,021
	0,7	1,770	2,202	1,619	1,008	0,460

Şekil 5.75'teki grafik, Tablo 5.11'deki değerlerin CEM I 42,5 R çimentosunu içeren şahit örneklerin değerlerine oranlanması ile bulunmuştur. 0,485 su/çimento oranında, sodyum sülfatta %2 ağırlık değişimi gösteren örnek tipi CEM III/A çimentosunu içerenler olmuştur. En az miktarda değişim göstermesinin sebebinin, CEM III/A çimentosunun inceliğinin yüksek oluşu, yüksek fırın cürufu içermesi

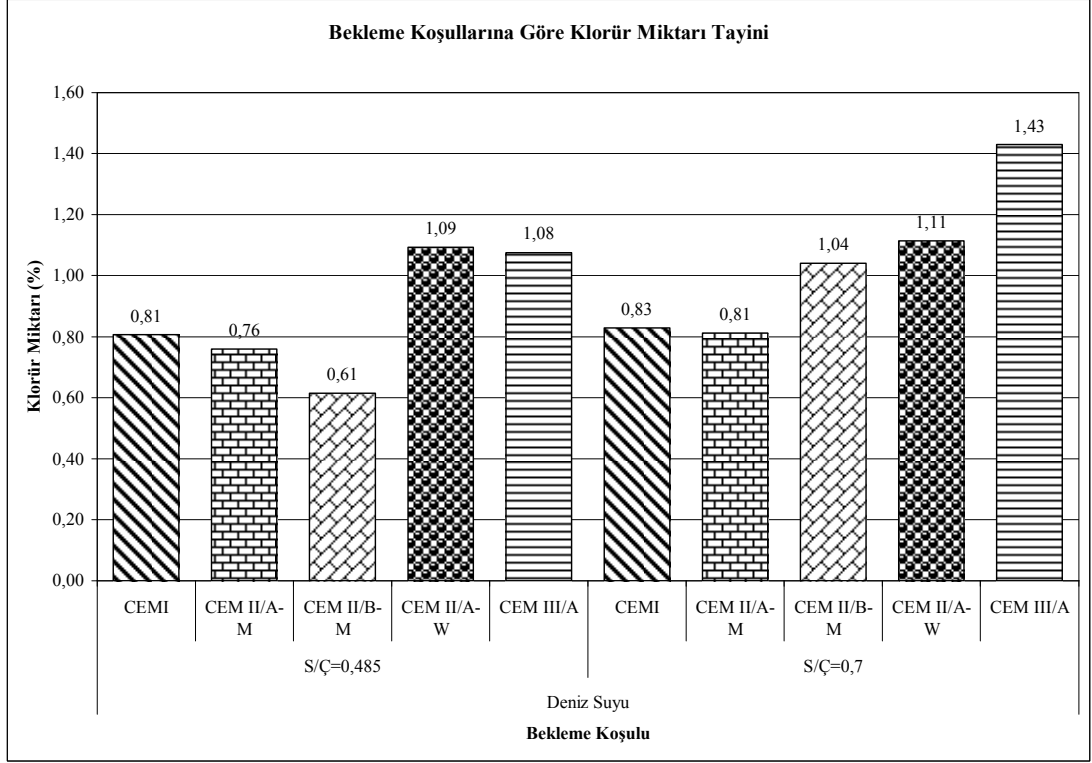
sebebiyle örnek doluluğunun yüksek oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu çimentonun  $C_3A$  ve  $C_3S$  oranlarının düşük oluşu, sülfat iyonlarıyla bu bileşenler arasında meydana gelebilecek reaksiyonları en alt düzeye indirmiştir. 0,7 su/çimento oranında da CEM III/A ile üretilen örnekler %74 daha az değişim göstererek bu çimento tipinin yüksek sülfat konsantrasyonuna dayanıklılığını kanıtlamıştır.



Şekil 5.75 Tüm örneklerin 28- 350 gün arasında ölçülen ağırlık farklarının CEM I 42,5 R çimentosuna göre değişim oranları

Şekil 5.76’da görülen grafikte örneklerin bünyelerine giren klorür miktarları yer almaktadır. TS 3732 standardına göre, çeliğe zarar veren maddelerden olan “suda çözünen klorürler” klor olarak saptandığında, çimento kütlesine göre maksimum %0,2 olmalıdır. Bu grafikte, tüm örneklerin bu sınırı aştığı görülmektedir. Deniz suyunda bekletilen örnekler arasında  $C_3A$  oranı en yüksek olan çimento tipi CEM I 42,5 R’dir. Bu çimento tipiyle üretilen örneklerin bünyelerine deniz suyundan daha az klorür iyonu sızmıştır. Bu durumda, Han (2007) tarafından belirtilen “Çimentonun  $C_3A$  oranı arttıkça klor iyonu bağlama yoluyla Friedel Tuzu oluşturma kapasitesi de

artacaktır ve böylece örnek yüzeyinde oluşan bağlı klor iyonları serbest iyonların geçişine izin vermeyecektir” ifadesi destekleyici olmaktadır.



Şekil 5.76 Örneklerin deniz suyunda bekleme süresince bünyelerine sızan klorür miktarı

## 5.2 “Çalışma 2”nin (Önceki Deneysel Çalışma) Bulguları

Tablo 5.12’de hazırlanan harçların her bir çimento tipi ve 0,485 su/çimento oranına ait olan yayılma çapları görülmektedir.

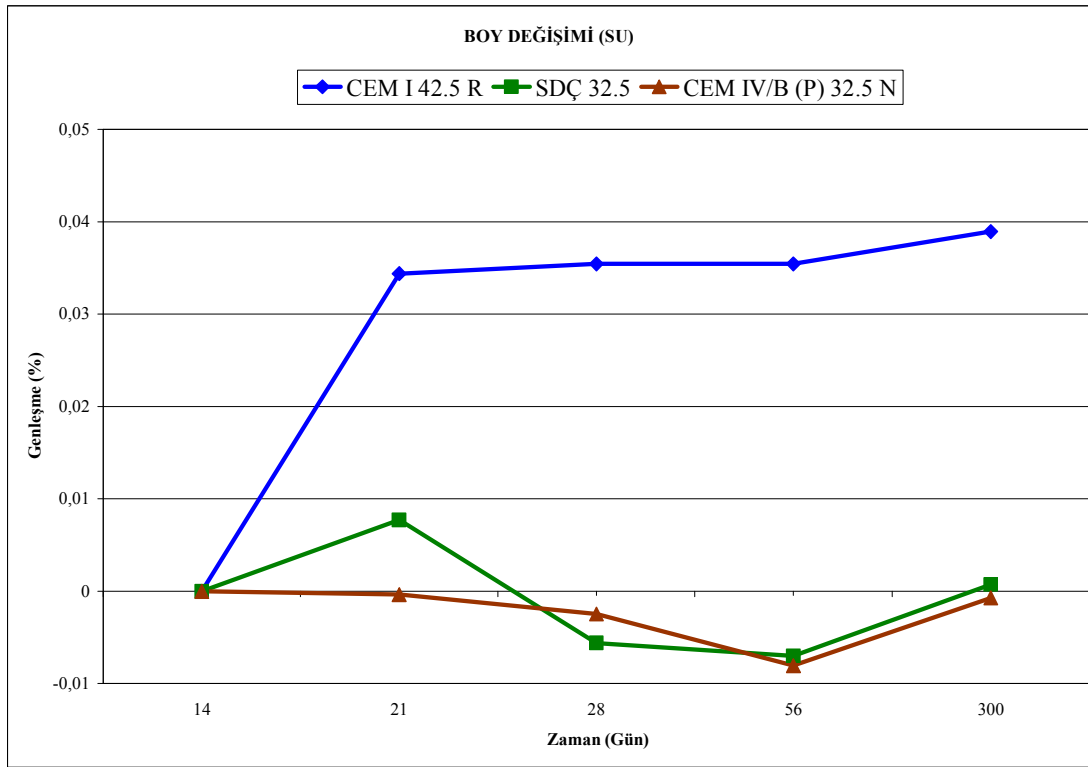
Tablo 5.12 Hazırlanan harçların, 0,485 su/çimento oranında, çimento tiplerine göre değişen yayılma çapları

Harçların Yayılma Çapları (mm)		Çimento Tipi		
		CEM I 42,5 R	SDÇ 32,5	CEM IV/B (P) 32,5 N
S/Ç	0,485	109	108	108

Tüm çimento tipleriyle hazırlanan ve kirece doygun suda, deniz suyunda, sodyum sülfatta bekletilen örneklerin boy değişimi grafikleri Şekil 5.77, 5.78, 5.79 ve 5.80’de

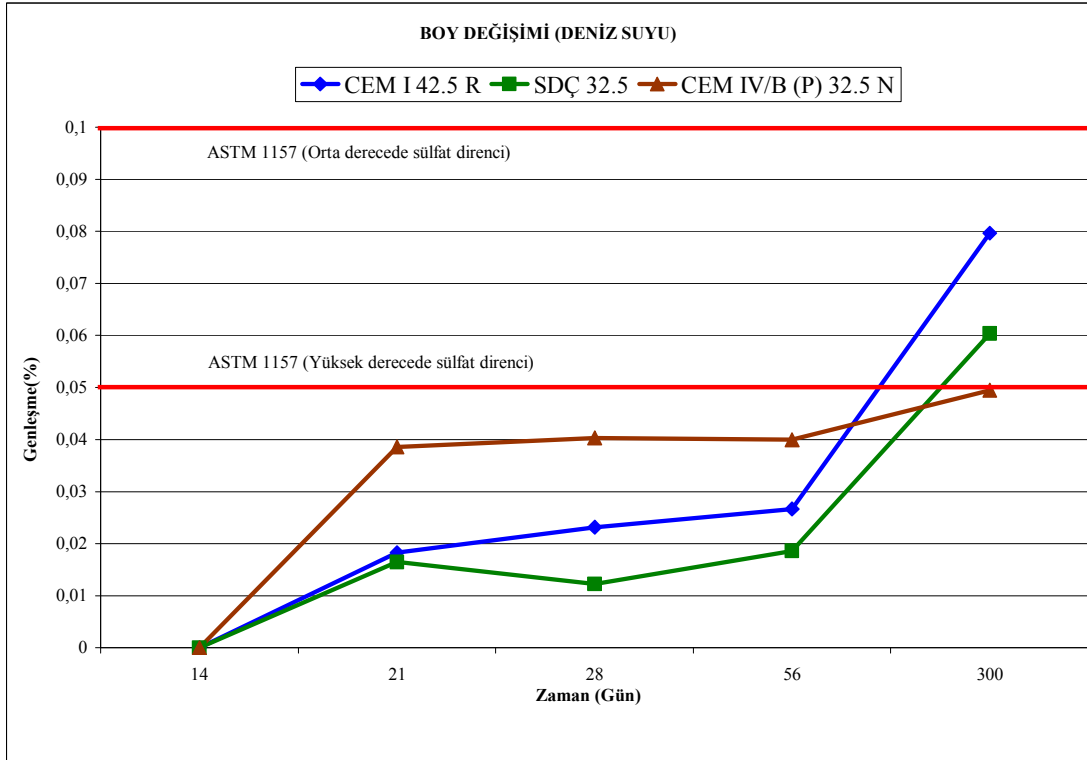


verilmiştir. Şekil 5.79'daki boy değişim grafikleri incelendiğinde, deniz suyundaki ıslanma-kuruma çevriminden en fazla etkilenen örneklerin CEM I 42,5 R çimento tipiyle üretilenler olduğu görülmektedir. Islanma-kurumaya maruz kalan CEMI 42,5 R tip çimentoyla hazırlanan örneklerin ASTM 1157'de belirtilen %0,1 genişleme limitini aştığı görülmektedir. Deniz suyu etkisine en dayanıklı çimento CEM IV/B (P) 32,5 N olmuştur. Şekil 5.80'de görüldüğü gibi, sodyum sülfatta bekleyen örneklerden puzolanik çimentoyla hazırlananlar %0,1 genişleme limitinin çok altında kalmışlardır.

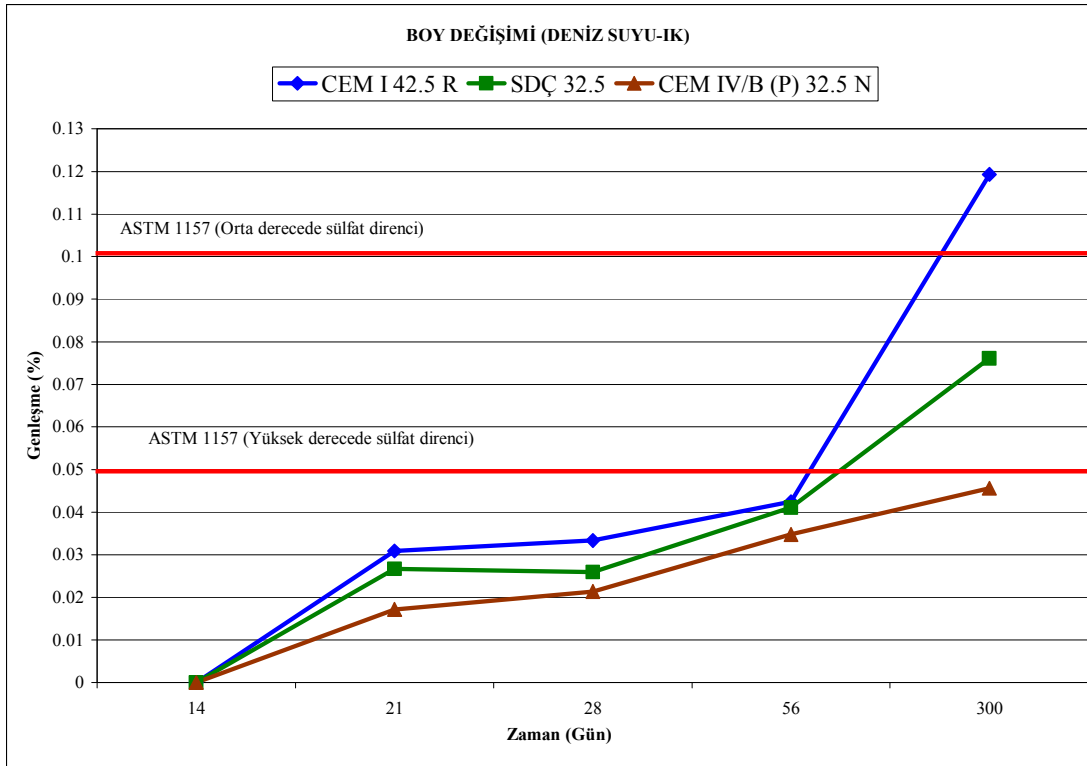


Şekil 5.77 Kirece doygun suda 300 gün boyunca kür edilen örneklerin zamana bağlı boy değişimi yüzdeleri

Deniz suyunun pH'ı 8,2>6,5 olduğu için kimyasal saldırı çok yavaş gelişmiş ve sonuçlar bu sebeple ihmal edilebilir mertebede çıkmıştır.



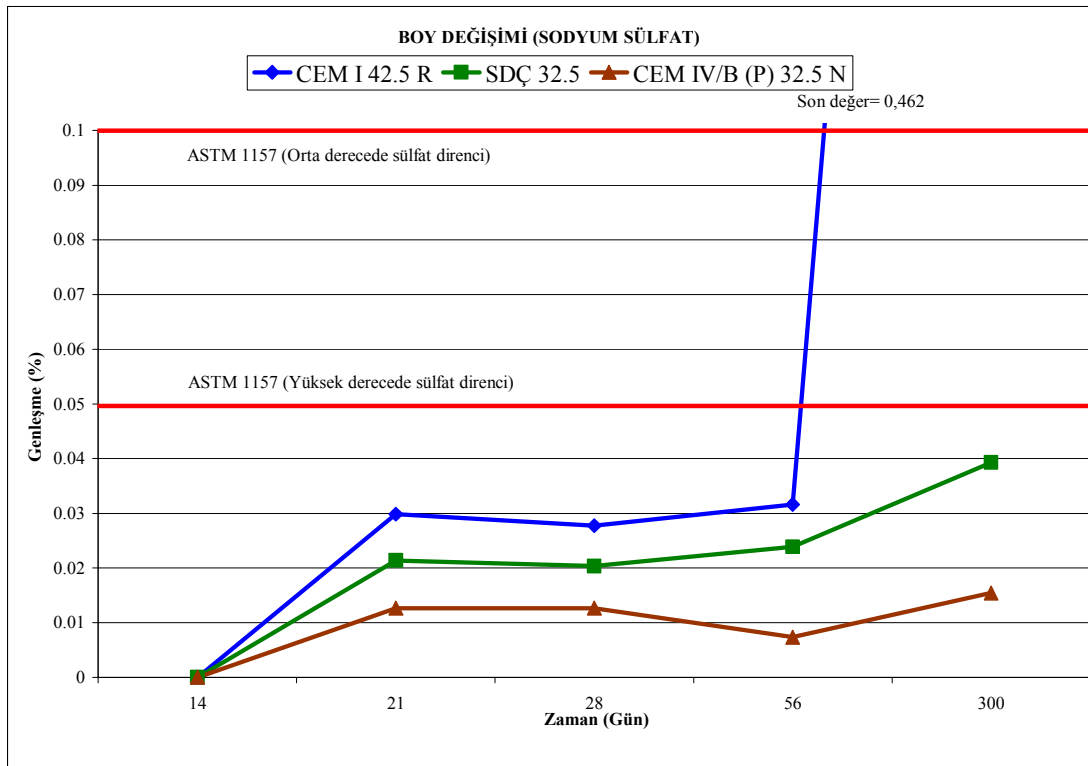
Şekil 5.78 Deniz suyunda 300 gün devamlı bekletilen örneklerin zamana bağlı boy değişimi yüzdeleri



Şekil 5.79 Deniz suyunda 56 çevrim geçiren örneklerin zamana bağlı boy değişimi yüzdeleri

Şahmaran, Erdem ve Yaman (2007) tarafından yapılan çalışmada, sülfat çevriminin normal portland çimentosunda bozulma sürecini hızlandırdığı ve sülfatlı ortam için normal Portland çimentosunun uygun olmadığı saptanmıştır. % 4–5 oranında C<sub>3</sub>A içeren sülfata dayanıklı Portland çimentosu (SDÇ), sülfata karşı yüksek koruma sağlamadığı, % 3,6 oranında C<sub>3</sub>A içeren SDÇ'nin ise, orta derecedeki sülfat ortamında kullanışlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ise, %2,8 oranında C<sub>3</sub>A içeren SDÇ 32,5 çimentosu kullanıldığı için genleşmeler büyük oranda kısıtlanmıştır. SDÇ 32,5 ve CEM IV/B (P) 32,5 N çimentolarının yüksek derecede sülfat direnci için kullanışlı olduğu düşünülmektedir.

Uçucu kül ve doğal puzolan içeren katkıli çimentolar, Ca(OH)<sub>2</sub> ve C<sub>3</sub>A miktarlarını azaltması sayesinde etrenjit oluşumunu da kısıtlar ve böylece harçların sülfata karşı dayanıklılığını geliştirir (Şahmaran ve diğer., 2007). Toplam %48 oranında uçucu kül ve doğal puzolan içeren CEMIV/B (P) 32,5 N çimentosunun bu olumlu özelliğe sahip olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.80 Sodyum sülfat çözeltisinde 300 gün devamlı bekletilen örneklerin zamana bağlı boy değişim yüzdeleri

CEMI 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinde 330. günde uğradıkları hasar Şekil 5.81’de görülmektedir. Hasar, yüksek boyutta olmuştur.



Şekil 5.81 CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan harçların 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330. günde uğradığı hasar

Buna karşın, SDÇ 32,5 ve CEMIV/B(P) 32,5 N çimentolarıyla hazırlanan örneklerin 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330. günde belirgin bir hasara uğramadıkları gözlemlenmiştir. Şekil 5.82 ve 5.83’te hasarsızlık durumu görülmektedir.



Şekil 5.82 SDÇ 32,5 ile hazırlanan örneklerin 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330 gün bekletildikten sonraki görünüşleri



Şekil 5.83 CEM IV/B (P) 32,5 N ile hazırlanan harçların 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330 gün bekletildikten sonraki görünüşleri

Tablo 5.13'te örneklerin 0,485 su/çimento oranına ilişkin eğilme dayanımı değerleri sıralanmıştır.

Tablo 5.13 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen eğilme dayanımı değerleri

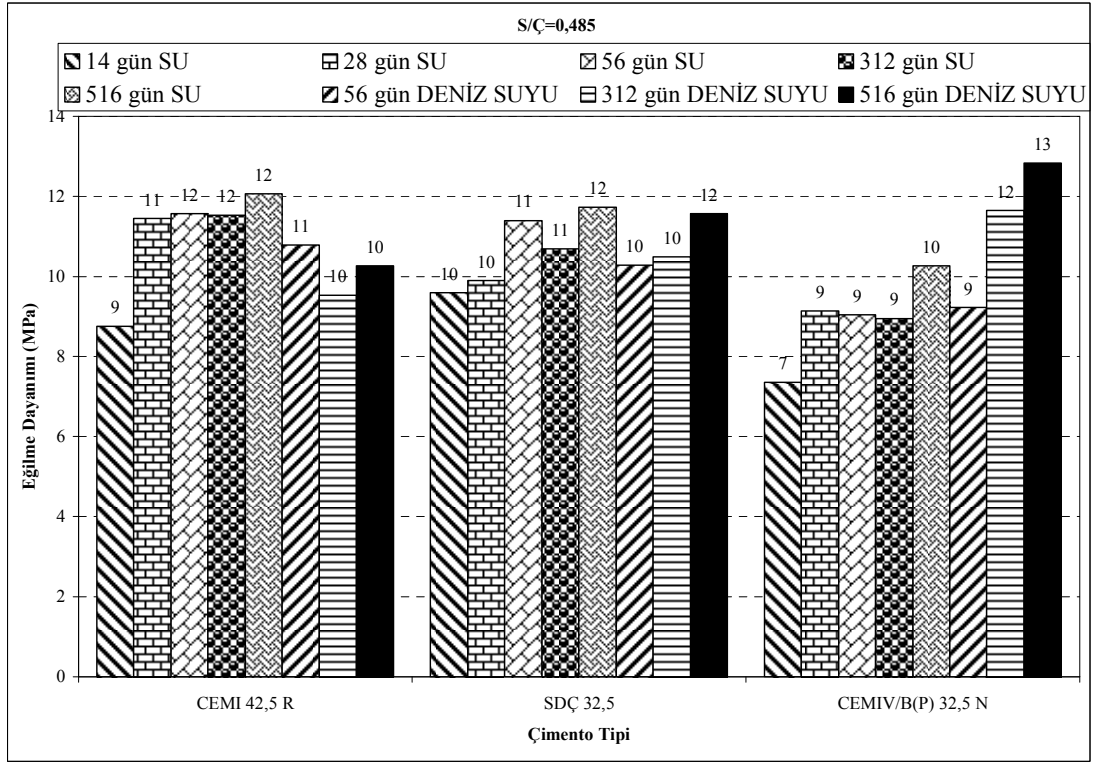
Su/çim.=0,485		Çimento Tipi		
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I	SDÇ 32,5	CEM IV/B (P) 32,5 N
14	KİRECE DOYGUN SU	9	10	7
28		11	10	9
56		12	11	9
312		12	11	9
516		12	12	10
56	DENİZ SUYU	11	10	9
312		10	10	12
516		10	12	13

Tablo 5.14'te örneklerin 0,485 su/çimento oranına ilişkin basınç dayanımı değerleri sıralanmıştır.

Tablo 5.14 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen basınç dayanımı değerleri

Su/çim.=0,485		Çimento Tipi		
Zaman (gün)	Koşullar	CEM I 42,5 R	SDÇ 32,5	CEM IV/B (P) 32,5 N
14	KİRECE DOYGUN SU	57	51	36
28		57	55	45
56		58	60	46
312		58	61	50
516		61	62	55
56	DENİZ SUYU	52	56	44
312		50	55	47
516		46	44	47

Şekil 5.84'te görülen eğilme dayanımı grafikleri özetlenirse CEM I 42,5 R ve SDÇ 32,5 tipi çimentolarla hazırlanan, deniz suyunda bekletilen örneklerin dayanım değerlerinin uzun dönemde bir miktar düştüğü görülmektedir. Buna karşılık, CEM IV/B (P) 32,5 N tipi çimentonun dayanım değerlerinin ise bir miktar yükseldiği görülmüştür. Bunun sebebi, bu çimentonun %48 oranında içerdiği doğal puzolan ve uçucu kül katkılarının puzolanik aktiviteleri yardımıyla harcın nihai dayanımını yükseltmesidir.

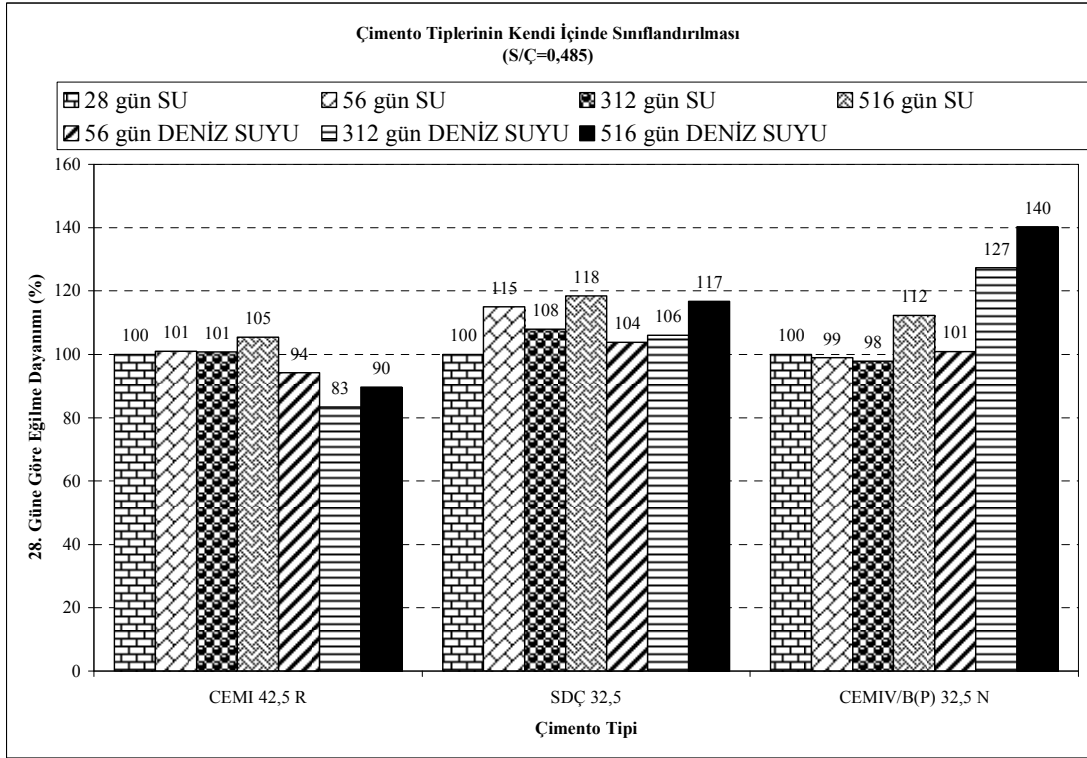


Şekil 5.84 Tüm örneklerin eğilme dayanımı verilerine ait grafik

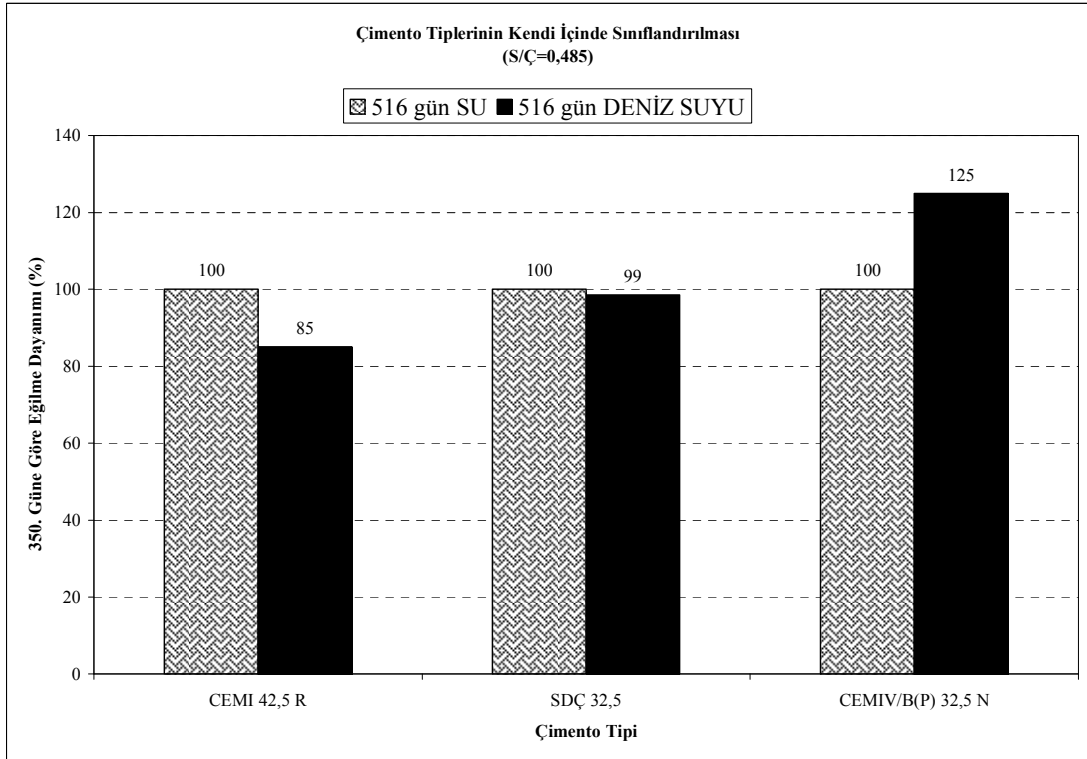
Şekil 5.85'te görülen grafiğe göre, kirece doymun sudaki 28. gün dayanımına göre deniz suyundaki 516. gün dayanımı %10 azalarak en fazla etkilenen örnek tipi CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilendir. SDC 32,5 ile üretilen örnekte %17 artış, CEM IV/B içeren örnekte ise %40 artış görülmüştür.

Şekil 5.86'da ise, CEM I ve SDC çimentoları sırasıyla %15 ve %1 dayanım azalması gösterirken CEM IV/B çimentosunun dayanımı 516. günde şahit örneklere göre %25 artarak bu çimentonun kullanımının deniz suyuna dayanıklılık sağladığı sonucunu vermiştir.

Şekil 5.87'de, çimento tiplerinin CEM I çimentosu ile eğilme dayanımları açısından karşılaştırılması verilmektedir. 516. günde deniz suyunda eğilme dayanımlarının CEM I çimentosuyla üretilen örneklere göre bir miktar arttığı görülmektedir. SDC ve CEM IV/B ile üretilen örnekler, CEM I çimentosuyla üretilenlere göre deniz suyunda daha iyi performans göstermiştir.

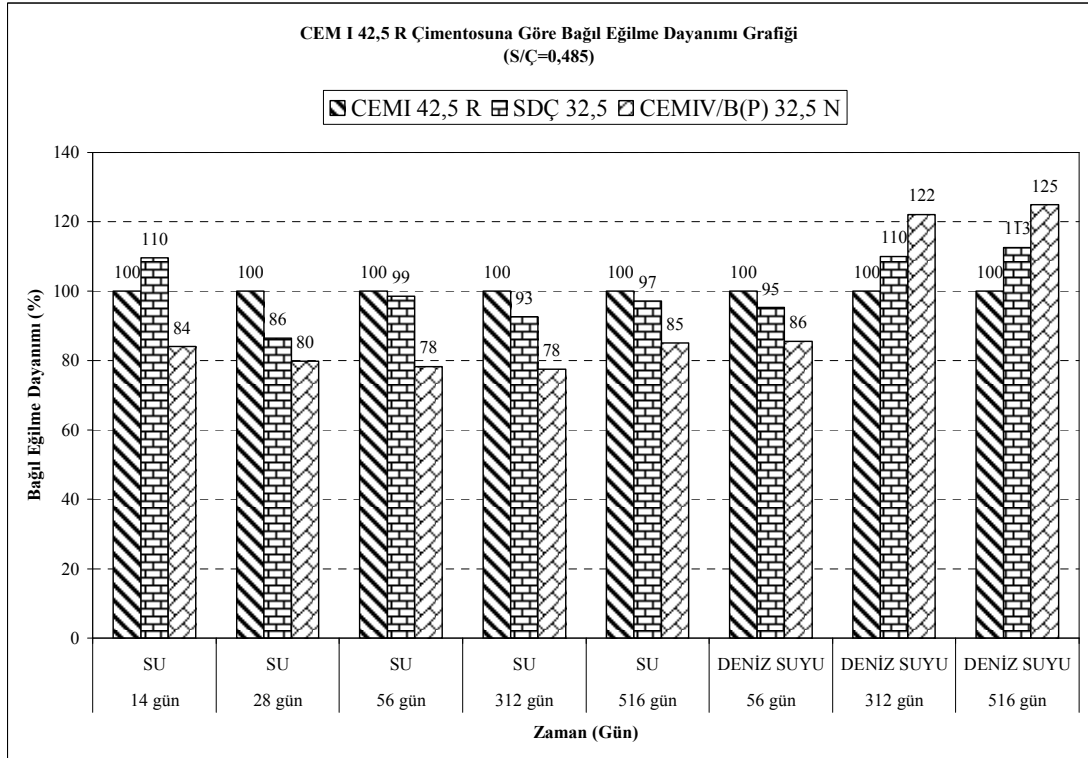


Şekil 5.85 Eğilme dayanımı verilerinin 28. gün verilerine göre değerlendirilmesi



Şekil 5.86 Eğilme dayanımı verilerinin 350. gün verilerine göre değerlendirilmesi



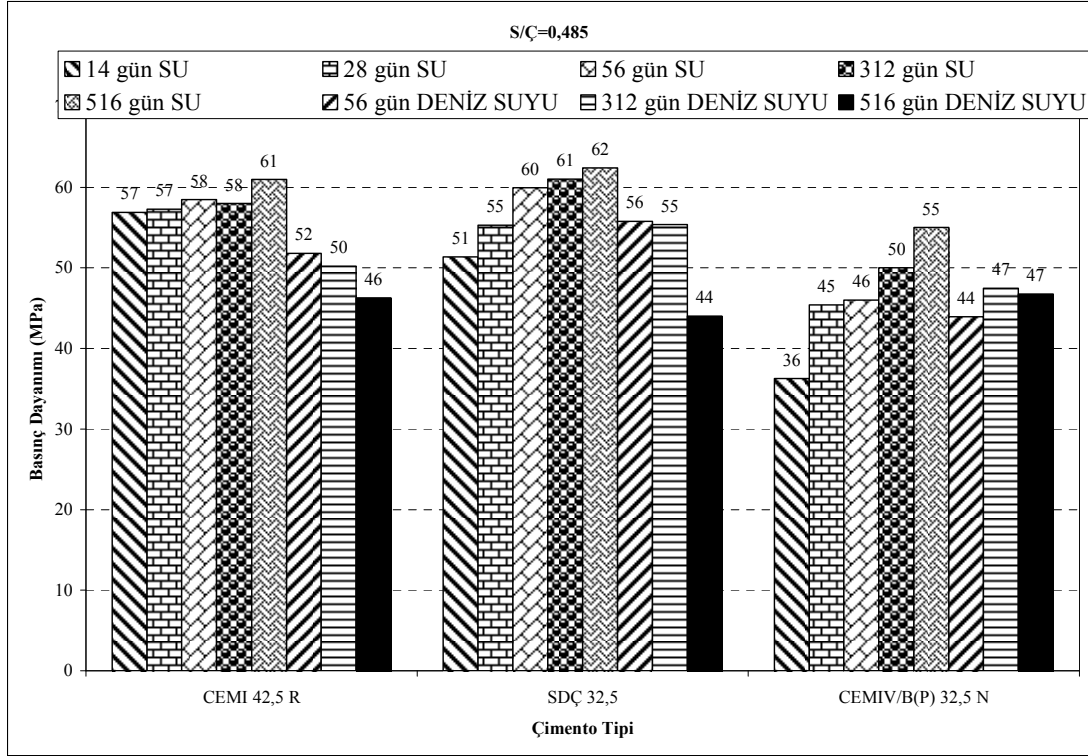


Şekil 5.87 Eğilme dayanımı verilerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre değerlendirilmesi

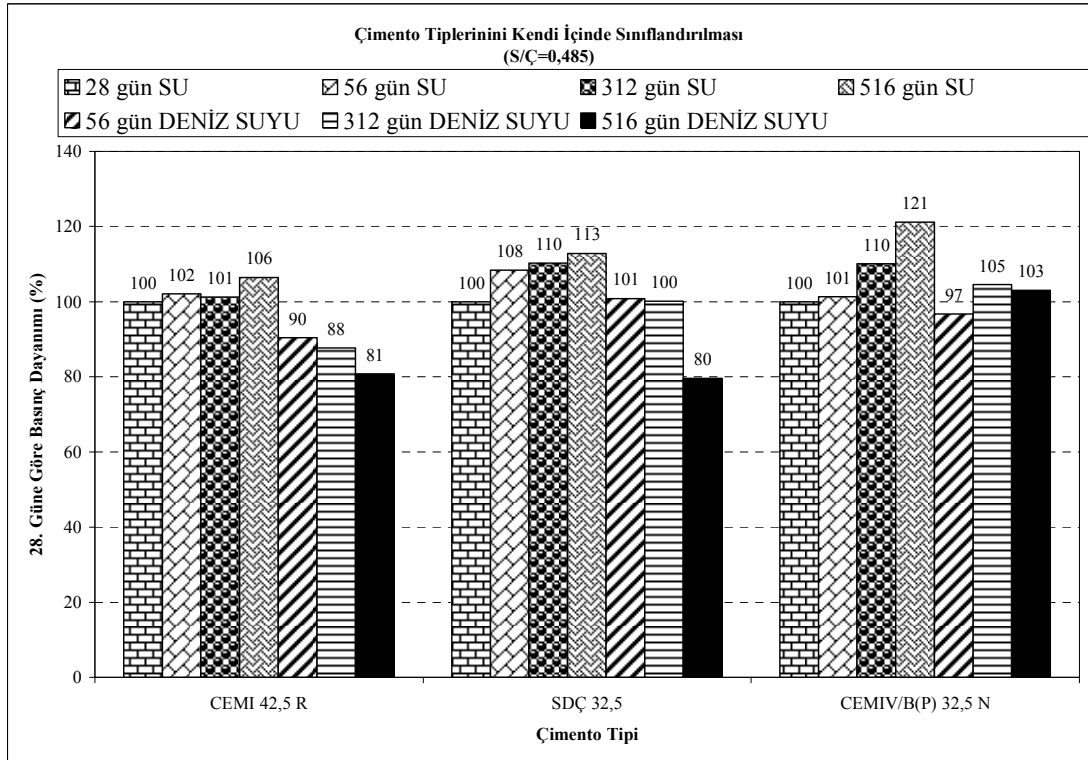
Şekil 5.88’de görülen basınç dayanımı grafiğinden, 516. günde her bir çimento tipi ile hazırlanan ve deniz suyunda bekletilen harçların basınç dayanımlarında eşleniklerine kıyasla bir miktar düşüş olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, Cl<sup>-</sup> iyonlarının oluşan alçıtaşını ve etrenjiti çözmesi ve deniz suyunda ıslanma kuruma rejiminin numunelerde çatlaklara ve zayıf kesitlere yol açması olduğu düşünülmüştür.

Şekil 5.89’da, CEM I ve SDÇ çimentolarıyla üretilen örnekler 28. güne göre sırasıyla %19 ve %20 basınç dayanımı kaybına uğramışlardır. Buna karşın, CEM IV/B ile üretilen örnekler deniz suyunda 516. günde %3 dayanım artışı sağlamışlardır. Şekil 5.90’da, tüm çimento tipleriyle üretilen ve deniz suyunda bekletilen örneklerin 516. gün dayanımlarının şahit örneklere göre azaldığı görülmektedir. Ancak %15 azalma miktarıyla en dayanıklı çimento tipi CEM IV/B (P) 32,5 N olmuştur. Şekil 5.91’de, 516. gün deniz suyu dayanımlarında görülen

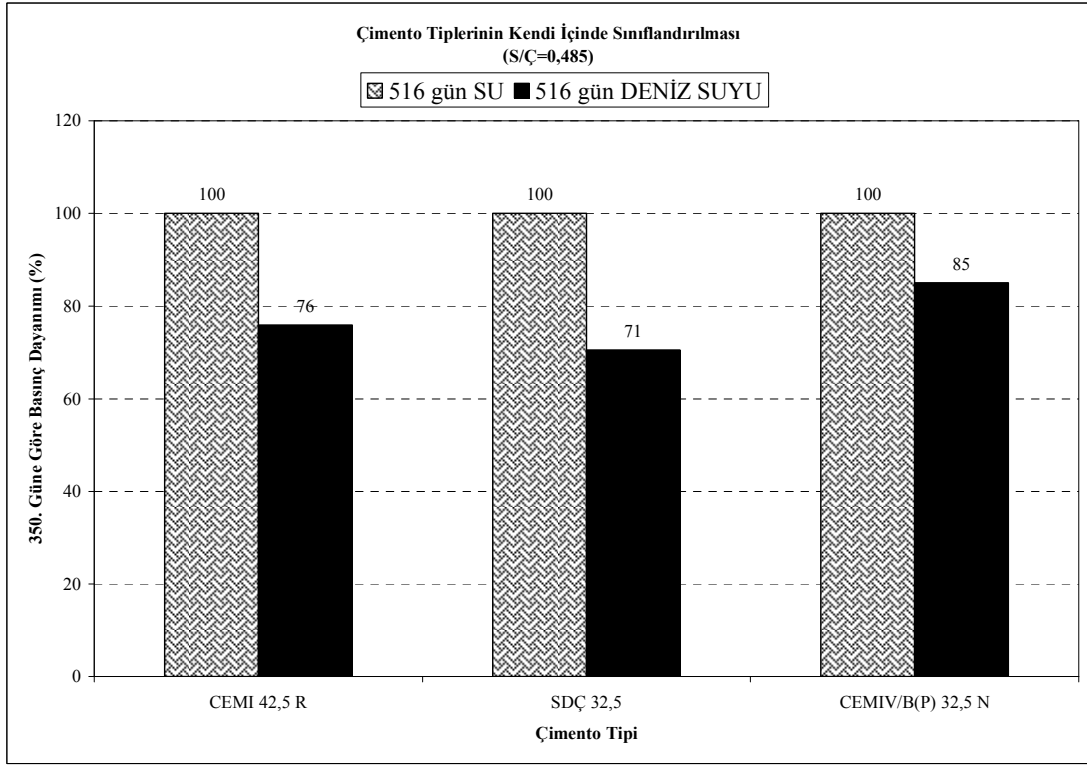
CEM I çimentosuna göre kıyaslama da CEM IV/B çimento tipinin daha dayanıklı olduğunu ve puzolanik aktivite ile dayanım gelişimi sağlandığı desteklemektedir.



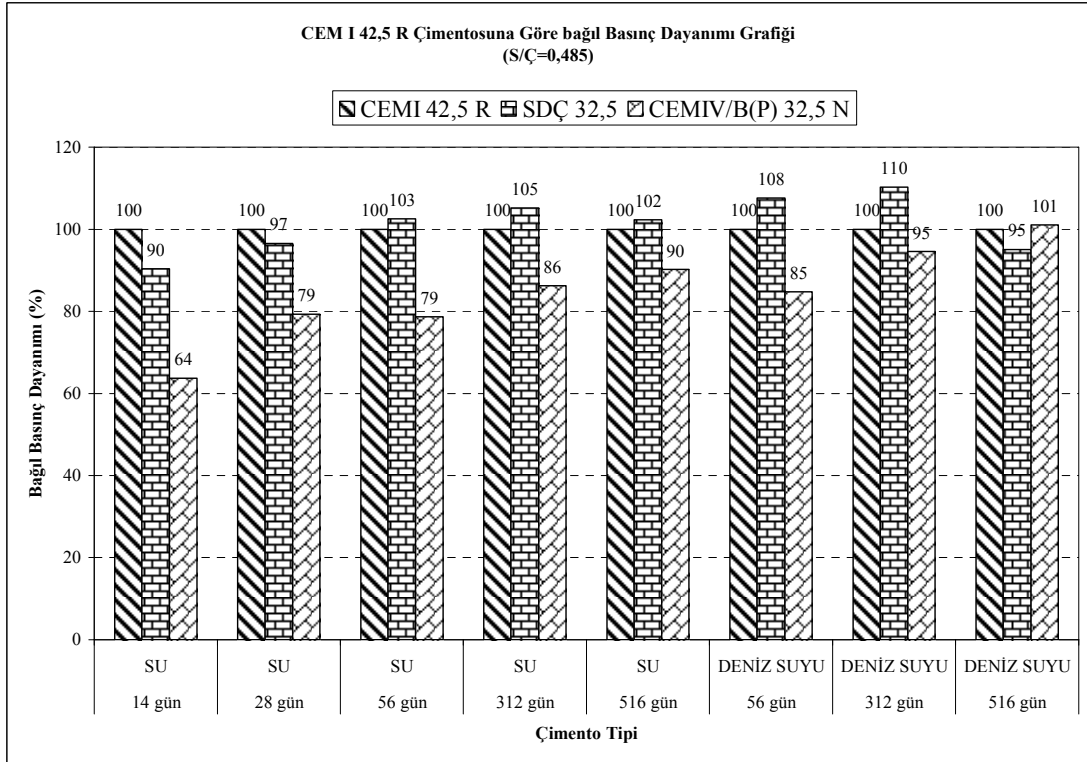
Şekil 5.88 Tüm örneklerin basınç dayanımı verilerine ait grafik



Şekil 5.89 Basınç dayanımı verilerinin 28. gün verilerine göre değerlendirilmesi

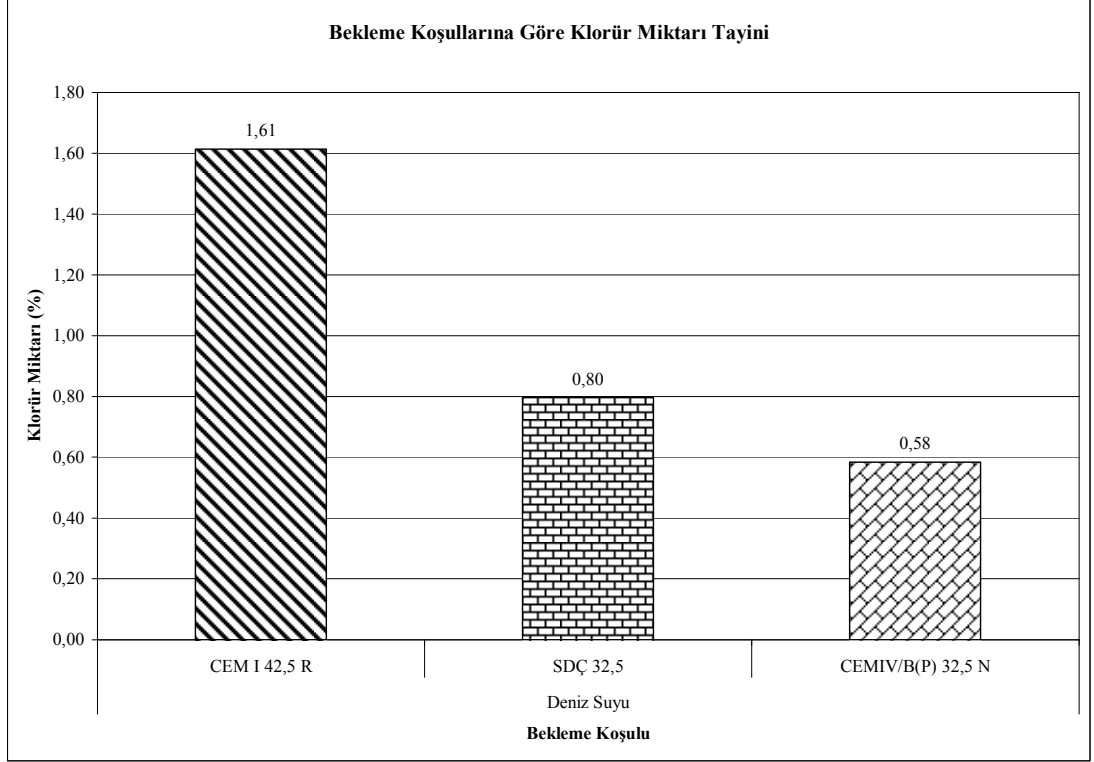


Şekil 5.90 Basınç dayanımı verilerinin 350. gün verilerine göre değerlendirilmesi



Şekil 5.91 Basınç dayanımı verilerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre değerlendirilmesi

Şekil 5.92’de, örneklerin bekleme koşuluna göre bünyelerinde bulunan klorür miktarları görülmektedir. 516 gün deniz suyunda bekletilme sonrası CEM IV/B çimentosunda en az miktarda klorür bulunduğu görülmektedir. Bu durumda, deniz suyunda CEM IV/B çimentosunun SDÇ çimento tipinden daha iyi performans gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.92 Tüm örneklerin bekleme koşullarına göre değişen klorür miktarları

Bu çalışmalardan anlaşılacağı gibi, deniz suyundaki sülfat iyonları ile sodyum sülfat çözeltisinin harç örnekleri üzerindeki etkisi çimento tipine göre farklılık göstermektedir. Belirlenen bu farklılıklar sayesinde deniz suyu ve sülfat etkisi gibi zararlı ortamlara maruz kalan yapıların dayanım ve dayanıklılığının en üst seviyede tutulması için gereken önlemler alınmalıdır.

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

0,485 su/çimento oranında, genleşme-zaman grafiklerinden elde edilen 322. gün sonuçlarına göre:

- Deneş örneklerinin kirece doşgun suda kür edilmesinin hasara yol açan genleşme yaratıcı etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Genleşmeler %0,008 değerinin altında kalmıştır.
- Deniz suyundaki yüksek klorür konsantrasyonu etrenjitin genleşme özelliğini azalttığından, genleşme açısından ASTM 1157'nin belirttiğı sınır değerler aşılmamıştır. Deniz suyunda en az genleşme değerine CEM III/A çimentosuyla üretilen örnekler sahiptir.
- Hava koşullarında bekletilen örnekler ise büzülmüştür. Bunun sebebi, çimento hamurunun kapiler boşluklarındaki suşun bir bölümünün buharlaşması ve suşun bir miktarının da hidrasyon için kullanılarak azalmasıdır. Büzülme oranı, CEM II/B-M çimentosuyla üretilen örneklerde %0,07 mertebesine kadar çıkmıştır.
- Sodyum sülfat çözeltilisinde bekletilen örnekler arasında ASTM 1157 standardının belirttiğı sınır değerleri aşan ve sadece orta derecede sülfat direncine sahip olanlar CEM I 42,5 çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bu çimento tipinin C<sub>3</sub>A miktarının ve C<sub>3</sub>S/C<sub>2</sub>S oranının yüksek oluşu genleşmeleri tetiklemiştir. CEM III/A 42,5 çimentosuyla üretilen örneklerin yüksek sülfat konsantrasyonunda en az genleşme oranına sahip olduğu görülmüştür. Bu çimento tipinin mineral katkı miktarının (%36,56 yüksek fırın cürufu), inceliğinin diğere tiplerden yüksek oluşu ve C<sub>3</sub>A miktarının diğere tiplerden az oluşu etrenjitin meydana gelmesindeki etkinliğı yok ederek genleşmeleri kısıtlamıştır.

0,7 su/çimento oranında, genişleme-zaman grafiklerinden elde edilen 322. gün sonuçlarına göre:

- Deney örneklerinin kirece doygun suda kür edilmesinin hasara yol açan genişleme yaratıcı etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ancak CEM II/B-M 32,5 çimentosuyla üretilenler hariç diğer örnekler deney süresinin sonunda %0,005 - %0,02 değerleri arasında değişen büzülme oranlarına sahip olmuşlardır.

- Harç çubuklarının deniz suyunda bekletilmesi sonucunda, tüm çimento tipleriyle üretilen örnekler ASTM 1157'nin belirttiği sınırların altında kalmıştır. Tüm örnekler deniz suyundaki sülfat konsantrasyonuna yüksek derecede dayanıklı olarak tanımlanabilir.

- Havada bekletilen örneklerde meydana gelen büzülmeler 0,485 su/çimento oranında oluşan büzülmelerden daha fazladır. Bunun sebebi, Erdoğan (2003) tarafından belirtildiği gibi, artan su/çimento oranının, örneklerin dayanımını düşürmesinin yanında büzülmelerini de arttırmış olmasıdır.

- Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerde artan su/çimento oranı genişlemelerin artmasına sebep olmuştur. ASTM 1157'nin belirttiği orta dereceli sülfat direnci sınırını dahi ihlal eden çimento tipleri CEM I 42,5, CEM II/A-M 42,5 ve CEM II/A-W 52,5 çimentoları olmuştur. CEM II/B-M 32,5 ve CEM III/A 42,5 çimentosu yüksek derecede sülfat direnci sağlamıştır. Bu iki çimento tipinin mineral katkı miktarlarının (sırasıyla %29,91 tras+kalker+uçucu kül ve %36,56 yüksek fırın cürufu), inceliğinin diğer tiplerden yüksek oluşu ve C<sub>3</sub>A miktarının diğer tiplerden az oluşu etrenjitin meydana gelmesindeki etkinliği yok ederek yüksek su/çimento oranında dahi genişmeleri kısıtlamıştır.

- Beklenildiği gibi, artan su/çimento oranı, örnek yapısında oluşan boşlukların artmasına neden olarak eğilme ve basınç dayanımlarını düşürmüştür.

- CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin standart kürde meydana gelen dayanım artışları 7. günde diğer çimento tipleriyle üretilenlerden daha yüksektir. Diğer çimento tipleriyle üretilen örneklerde puzolanik aktivite gelişimi sonucu bu farkın ilerleyen yaşlarda azaldığı gözlenmiştir.

0,485 su/çimento oranında, eğilme dayanımı grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre:

- Deniz suyunda 350. gün eğilme dayanımları, 28 günlük dayanımlara kıyasla tüm örneklerde artış göstermiştir. 28 günlük dayanımına göre en fazla dayanım artışı gösteren örnek tipi CEM III/A 42,5 R çimentosuyla üretilendir. Deniz suyunda 350. gün eğilme dayanımları, kirece doygun suda 350. gün dayanımlarına göre genellikle bir miktar artış göstermiştir.

- Deniz suyunda, CEM I 42,5 çimentosuyla üretilen örneklere kıyasla bağlı eğilme dayanımları 350. günde genellikle tüm örneklerde artış göstermiştir.

- Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün dayanımları, 28 günlük dayanımlara göre CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örnek hariç diğerlerinde artış göstermiştir. Dayanımı en çok artan örnek tipleri CEM III/A 42,5 N ve CEM II/B-M 32,5 R çimentosuyla üretilenler olmuştur. Bu çimento tiplerinin mineral katkı miktarlarının (sırasıyla %36,56 yüksek fırın cürufu ve %29,91 tras+kalker+uçucu kül), inceliğinin diğer tiplerden yüksek oluşu 350. günde dayanım artışı sağlamıştır. CEM I 42,5 R çimentosunu içeren örneğin eğilme dayanımı %23 azalmıştır. Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün eğilme dayanımları, kirece doygun suda 350. gün dayanımlarına göre genellikle artmıştır ancak CEM I 42,5 R çimentosunu içeren örneğin eğilme dayanımı %36 azalmıştır.

- Sodyum sülfat çözeltisinde, CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklere kıyasla bağlı eğilme dayanımları 350. günde genellikle tüm örneklerde artmıştır.

0,485 su/çimento oranında, basınç dayanımı grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre:

- Deniz suyunda 350. gün basınç dayanımları, 28 günlük dayanımlara kıyasla CEM III/A ve CEM II/B-M çimentosunu içeren örneklerde artış göstermiştir. Diğer örneklerde ortalama %4 dayanım kaybı görülmüştür. Tüm örneklerin deniz suyunda 350. gün basınç dayanımları, kirece doygun suda 350. gün dayanımlarına göre ortalama %16 azalma göstermiştir.

- Deniz suyunda, CEM I 42,5 çimentosuyla üretilen örneklere kıyasla bağıl basınç dayanımları 350. günde genellikle tüm örneklerde artış göstermiştir.

- Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün dayanımları, 28 günlük dayanımlara göre tüm örneklerde artış göstermiştir. Dayanımı en çok artan örnek tipi CEM III/A 42,5 çimentosuyla üretilen olmuştur. Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün basınç dayanımları, kirece doygun suda 350. gün dayanımlarına göre, CEM III/A çimentosuyla üretilenler hariç, genellikle azalmıştır. CEM III/A çimentosunu içeren örneklerin dayanımı %4 artmıştır. Bu çimento tipinin mineral katkı miktarının (%36,56 yüksek fırın cürufu), inceliğinin diğer tiplerden yüksek oluşu ve C<sub>3</sub>A miktarının diğer tiplerden az oluşu etrenjitin meydana gelmesindeki etkinliğini azaltmıştır.

- Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin 350. günde bağıl basınç dayanımları, CEM I 42,5 çimentosuna göre genellikle artış göstermiştir.

0,7 su/çimento oranında, eğilme dayanımı grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre:

- Deniz suyunda 350. gün eğilme dayanımları, 28 günlük dayanımlara kıyasla tüm örneklerde artış göstermiştir. 28 günlük dayanımına göre en fazla dayanım artışı gösteren örnek tipi CEM II/B-M 32,5 çimentosuyla üretilendir. Deniz suyunda 350. gün eğilme dayanımları, kirece doygun suda 350. gün dayanımlarına göre, CEM I



42,5 ve CEM II/B-M 32,5 hariç, diğer çimentolarla üretilenlerde bir miktar artış göstermiştir.

- Deniz suyunda, CEM I 42,5 çimentosuna göre bağıl eğilme dayanımları, CEM II/B-M 32,5 ile üretilenler hariç, 350. günde artış göstermiştir. Bunun sebebi, CEM II/B-M 32,5 R çimentosunun dayanım sınıfının diğerlerinden düşük olması olabilir.

- Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün dayanımları, 28 günlük dayanımlara göre CEM II/B-M 32,5 ve CEM III 42,5 çimentosuyla üretilen örnekler hariç diğerlerinde azalmıştır. Dayanımı en çok artan örnek tipi CEM II/B-M 32,5 çimentosuyla üretilen olmuştur. Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün eğilme dayanımları, kirece doymun suda 350. gün dayanımlarına göre CEM II/B-M 32,5 ve CEM III 42,5 çimentosuyla üretilen örnekler hariç diğerlerinde azalmıştır.

- Sodyum sülfat çözeltisinde, CEM I 42,5 çimentosuna göre bağıl eğilme dayanımı 350. günde en fazla artan örnek tipleri CEM III/A 42,5 N ve CEM II/B-M 32,5 R ile üretilenler olmuştur.

0,7 su/çimento oranında, basınç dayanımı grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre:

- Deniz suyunda 350. gün basınç dayanımları, 28 günlük dayanımlara kıyasla tüm örneklerde artış göstermiştir. Deniz suyunda 350. gün basınç dayanımları ise, kirece doymun suda 350. gün dayanımlarına göre tüm örneklerde ortalama %20 azalma göstermiştir.

- Deniz suyunda, CEM I 42,5 R çimentosuna göre bağıl basınç dayanımları 350. günde genellikle artış göstermiştir.

- Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün dayanımları, 28 günlük dayanımlara göre tüm örneklerde artış göstermiştir. Dayanımı en çok artan örnek tipi CEM II/B-M 32,5 çimentosuyla üretilen olmuştur. Sodyum sülfat çözeltisinde 350. gün basınç dayanımları, kirece doymun suda 350. gün dayanımlarına göre, CEM II/B-M 32,5

çimentosuyla üretilenler hariç, genellikle azalmıştır. CEM II/B-M çimentosunu içeren örneklerin dayanımı %3 artmıştır. Bu çimento tipi yüksek su/çimento oranından fazla etkilenmemiştir.

- Sodyum sülfat çözeltisinde, CEM I 42,5 çimentosuna göre bağıl basınç dayanımları, CEM II/A-W 52,5 ve CEM III/A 42,5 ile üretilenler hariç, diğer örneklerde 350. günde azalmıştır. CEM II/A-W ve CEM III/A çimentoları, CEM I çimentosuna kıyasla örneklere %3 dayanım artışı sağlamıştır.

- Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarla üretilen harçların ıslanma-kuruma çevrimlerinden zarar görmedikleri, kılcallık katsayıları ve su emmeleri bakımından Portland çimentosu ile üretilen harçlardan daha dayanıklı olabildikleri görülmüştür.

- Genel olarak, beklenildiği gibi kılcal yolla su emme miktarları su/çimento oranı arttıkça artış göstermiştir. Kapilarite (kılcallık) katsayısı büyük olan örneğin kılcal yolla su emme miktarı da fazladır. Deniz suyunda kılcallık katsayısı tüm su/çimento oranlarında yüksek değerlerde olan örnekler, CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilenlerdir.

- Artan su/çimento oranıyla birlikte kapilarite (kılcallık) katsayısı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.

- CEM III/A 42,5 çimentosuyla üretilmiş, kirece doymun suda ve deniz suyunda bekletilmiş örneklerin 28 günde ve 350 günde kılcal yolla su emme miktarlarının diğer örnek tiplerinden daha az olduğu görülmüştür. CEM I 42,5 çimentosu ile üretilen örnekler her koşulda fazla su emenler arasındadır. Özellikle puzolanik aktivitesi olan mineral katkıların kılcal boşlukları doldurmadaki işlevi daha iyi anlaşılmıştır.

- Kirece doymun suda bekletilmiş tüm örneklerde 350 gün kılcal yolla su emme miktarları 28. gün miktarlarından fazladır. Bunun sebebi, kılcal boşluk çaplarının hidratasyon ürünlerinin artışıyla daralmış olmasıdır.

- Deniz suyunda ise,  $Ca^{+}$  -  $Mg^{+}$  iyonlarının yer değiştirme reaksiyonu sonucu oluşan “brusit”in ve  $Ca(OH)_2$ 'nin  $CO_2$  ile reaksiyonu sonucu oluşan “aragonit”in çökerek gözenekleri tıkamasıyla örnek içerisine su girişi azalmaktadır. Bu sebeple, deniz suyunda 350 gün kılcal yolla su emme oranları 350 günlük şahit örneklere göre azalmıştır.

- Deniz suyunda bekletilen 0,485 ve 0,7 su/imento oranına sahip olan örnekler 350. günde, CEM I 42,5 çimentosuyla üretilenlerden daha az su emmiştir. Bu örnek tiplerinin arasında sadece CEM II/B-M 32,5 R ile üretilenler CEM I 42,5 R içeren örneklerden daha fazla su emmiştir. Bunun sebebi, CEM II/B-M 32,5 R imentosunun dayanım gelişiminin diğerlerinden daha az oluşudur.

- Beklenildiği gibi, toplam su emme miktarları, su/imento oranı arttıka artış göstermiştir.

- Kirece doğun suda kür edilen örnekler 350. günde, 28. güne kıyasla daha az miktarda toplam su emmeye sahiptir. Bunun sebebi, hidratasyon ürünlerinin artışıyla boşluk çaplarının ve sayılarının azalmış olmasıdır. 0,6 ve 0,7 su/imento oranlarında en az su emme miktarına sahip olan örnek CEM III/A çimentosuyla üretilendir. Çimento inceliğinin yüksek değerde olması ve yüksek fırın cürufunun bağlayıcı-puzolanik özelliğinin olması sayesinde boşluklar hidratasyon ürünleriyle yeterince dolmuştur.

- Deniz suyundaki tuz kristallerinin örnek gözeneklerini tıkaması sonucu örnekler şahit harçlardan daha az su emme miktarına sahiptir.

- Beton basınç dayanımının, içerisindeki boşluklarla ilişkili olması ve artan su/imento oranı ile birlikte boşluk miktarı arttıka basınç dayanımının düşmesi mantığına benzer olarak örneklerin basınç dayanımları azaldıkça toplam su emme miktarları artmıştır.

- Su/çimento oranı artışıyla birlikte örneklerin birim hacim ağırlığı azaldıkça toplam su emme miktarları artmıştır.
- Klor geçirimsizlik deneyinden elde edilen sonuçlara göre, CEM III/A 42,5 ve CEM II/B-M 32,5 çimentolarıyla üretilen örneklerin tüm koşullarda diğer örnek tiplerinden daha düşük "Coulomb" değerine ve daha yüksek klor geçirimsizlik direncine sahip oldukları görülmektedir. Bu çimento tiplerinin incelik ve mineral katkı oranlarının yüksek oluşuyla artan hidrasyon gelişimi ve puzolanik aktiviteleri sayesinde bu sonuca ulaşıldığı düşünülmektedir.
- Kirece doygun suda hidrasyon gelişiminin yaşla doğru orantılı olması, 350. gün klor geçirimsizlik direncinin 28 gün verilerinden yüksek olmasına yardımcı olmuştur.
- Deniz suyunda bekletilen örneklerin 350. gün klor geçirimsizlik dirençlerinin 350. gün şahit örneklerine göre azaldığı görülmüştür. Deniz suyunda yüksek Coulomb değerlerine rastlanmasının sebebi, örneklerin bünyesine işlemiş klorürlerin deney sırasında oluşan klorür geçişine destek olmalarıdır. CEM I 42,5 R çimentosunun 350. günde en az klor geçirimsizlik artışı verdiği görülmüştür. Bu çimentonun  $C_3A$  miktarının fazla oluşu sayesinde Friedel Tuzu oluşturma kapasitesi artarak serbest iyonların geçişine izin verilmemiştir.
- Mineral katkılı tüm örnekler genellikle her koşulda CEM I 42,5 ile üretilenlerden daha az klor geçirimsizlik değerine sahiptir.
- 0,485 su/çimento oranında, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin ağırlıklarında CEM I 42,5 çimentosuyla üretilen örneklerle kıyasla meydana gelen artış diğer koşullara ve su/çimento oranlarına göre en az değerdedir. Ağırlığı en az değişen örnek tipi CEM III/A çimentosuyla üretilen olmuştur. Bu çimentonun  $C_3A$  ve  $C_3S$  oranlarının düşük oluşu, sülfat iyonlarıyla bu bileşenler arasında meydana gelebilecek reaksiyonları en alt düzeye indirmiştir. Deniz suyunda bekletilen örneklerin ağırlık artışlarının daha belirgin oluşunun sebebi, deniz suyunda bulunan

klorür sayesinde oluşan “Kloro-alüminatlar” ve magnezyum sayesinde oluşan “Brusit”in çökelerek ağırlığı arttırmasıdır.

- 0,7 su/çimento oranında, ağırlık artışları 0,485 su/çimento oranına göre daha belirgindir. Bunun sebebi, artan boşluk oranının oluşabilecek kimyasal reaksiyonların önünü açarak boşluklarda ve gözeneklerde yerlerini alan ürünlerin ağırlık artışına sebep olmasıdır. Sodyum sülfat çözeltisinde ağırlığı en az değişen örnek tipi CEM III/A çimentosuyla üretilen olmuştur. Deniz suyunda ise, CEM II/A-W çimentosunu içeren örnek tipi en az değişim göstermiştir.

- Su/çimento oranı arttıkça deniz suyunda bekletilme sonucunda klor işleme durumlarını tespit için bulunan klorür miktarları artmıştır.

Bu deney sonuçlarının daha sağlıklı olabilmesi için örnek sayısının arttırılması, deniz suyu ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilme süreleriyle çevrim sayısının arttırılması, daha değişik çimento tipleri ile çalışılması veya ikame mineral katkı çimentolar hazırlanarak en uygun oranların bulunması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

ACI 201.1R-08: "Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service", USA.

ACI 222R-01: "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion", USA.

Aïtcin, P.-C. (2004). *High Performance Concrete*, E&FN SPON, New York.

ASTM C 150-07: "Standard Specification for Portland Cement", USA.

ASTM C 595-08: "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements", USA.

ASTM C 348-02: "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars", USA.

ASTM C 349-02: "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)", USA.

ASTM C 1012-04: "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", USA.

ASTM 1157-08: "Standard Performance Specification for Hydraulic Cement", USA.

ASTM C 1202-07: "Standard Test Method For Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". USA.

ASTM C 1585-04e1: "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes". USA.

- Aytaç, A. H. (2006). *Portland çimentosu kompozisyonunun akışkanlaştırıcı katkı performansına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 209 s.
- Bader, M. A. (2003). Performance of concrete in a coastal environment. *Cement and Concrete Composites*, 25, 539–548.
- Bai, J., Wild, S. ve Sabır, B.B. (2003). Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, 353–362.
- Baradan, B. (2003). *İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 307, 394 s.
- Baradan, B. (2004). *Yapı Malzemesi II.* . D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 207, 221 s.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 298, 282 s.
- Barberon, F., Baroghel-Bouny, V., Zanni, H., Bresson, B., d’Espinoze de la Caillerie, J.-B., Malosse, L. ve Gan, Z. (2005). Interactions between chloride and cement-paste materials. *Magnetic Resonance Imaging*, 23, 267-272.
- Bellmann, F., Möser, B. ve Stark, J. (2006). Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. *Cement and Concrete Research*, 36, 358–363.
- Binici, H. ve Aksoğan, O. (2006). Sulfate resistance of plain and blended cement. *Cement and Concrete Composites*, 28, 39–46.

- Biricik, H., Gündüz, A. S., Çakır, Ö. ve Sarier, N. (2003). Doksan gün sülfat etkisinde kaldıktan sonra kalker ve silis dumanı katkılı betonların bazı özellikleri. *5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.
- Bonen, D. ve Sarkar, S. L. (1995). The Superplasticizer Adsorption Capacity of Cement Pastes, Pore Solution Composition, and Parameters Affecting Flow Loss, *Cement and Concrete Research*, 25, 1423–1434.
- Boyd, A.,J. ve Mindess, S. (2004). The use of tension testing to investigate the effect of w/c ratio and cement type on the resistance of concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 34, 373–377.
- Chindapasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H. T. ve Sirivivatnanon, V. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 356–361.
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S. ve Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34, 1087–1092.
- Claisse, P. A., Lorimer, P. ve Al Omari, M. (2001). *Workability of Cement Pastes*, ACI Materials Journal, 98, 476–482.
- Çavuşoğlu, İ. (2008). Uçucu küllerin dolgu malzemesi olarak kullanılması: örnek bir uygulama (Çayırhan). *Madencilik*, 47(3), 3–13. <http://www.maden.org.tr/yayinlar>
- Dodson, V. H. ve Hayden, T. D. (1989). *Another Look at the Portland Cement/Chemical Admixture Incompatibility Problem*, Cement, Concrete and Aggregates, 11, 52–56.
- Dongxue, L., Xinhua, F., Xuequan, W. ve Mingshu, T. (1997). Durability study of steel slag cement. *Cement and Concrete Research*, 27(7), 983-987.



- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim Yayınları, Ankara.
- Erdoğdu, Ő. ve Karataş, E. (2003). Sulfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun durabilitesinin karőılaőtırmalı olarak incelenmesi. 5. *Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.
- Ertün, T., Türker, P. ve Başkoca, A. (2005). Farklı çimento tipleriyle hazırlanan yüksek performanslı harçların geçirimsizliği. 6. *Ulusal Beton Kongresi. Yüksek Performanslı Betonlar. Bildiriler Kitabı*. Göksu Matbaası.
- Felekoğlu, B., Ramyar, K., Tosun, K. ve Musal, B. (2006). Sulfate resistances of different types of Turkish Portland cements by selecting the appropriate test methods. *Construction and Building Materials*, 20, 819–823.
- Gonzales, M. A. ve Irassar, E. F. (1997). Ettrengite formation in low C<sub>3</sub>A portland cement to sodium solution. *Cement and Concrete Research*, 27, 1061- 1072.
- Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*, Thesis of Doctor of Philosophy, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- Grzeszczyk, S. (1994). *Distribution of Potassium in Clinker Phases*, Silicate Industries, 61, 241–246.
- Grzeszczyk, S. ve Kucharska, L. (1991). *The Influence of Chemical Composition of Cement on the Rheological Properties*, Rheology of Fresh Cement and Concrete, 27–36.
- Han, S.-H. (2007). Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure. *Construction and Building Materials*, 21, 370–378.

- Haynes, H., O'Neill, R., Neff, M. ve Mehta, P., K. (2008). Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulfate environment. *ACI Materials Journal. Technical Paper*, 105(1), 35–43.
- Hossain, K. M. A. (2008). *Cement and Concrete Composites*, 30, 97–105.
- Jawed, I. ve Skalny, J. (1978). *Alkalies in Cement: A Review II. Effects of Alkalies on Hydration and Performance of Portland Cement*, *Cement and Concrete Research*, 8, 37–51.
- Jiang, S., Kim, B.-G. ve Aïtcin, P.-C. (1999). *Importance of Adequate Soluble Alkali Content to Ensure Cement/Superplasticizer Compatibility*, *Cement and Concrete Research*, 29, 71–78.
- Köksal, F., Güllü, H. ve Güner, A. (1996). Islanma-kuruma etkisindeki betonlarda en uygun uçucu kül ve yüksek fırın cürufu oranları. 4. *Ulusal Beton Kongresi. Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar. Bildiriler Kitabı*. Maya Basın Yayın.
- Kumar, S. (2000). Influence of water quality on the strength of plain and blended cement concretes in marine environments. *Cement and Concrete Research*, 30, 345-350.
- Kutlu, O. ve Demiriz, M. (2007). Cem III tipi çimentoların betonda kullanımının teknik ve ekonomik yönlerinin değerlendirilmesi. 7. *Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Maya Basın Yayın.
- Lee, J.-S. ve Moon, H.-Y. (2006). Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea. *Building and Environment*, 41, 1447–1453.
- Li, G. ve Zhao, X. (2003). Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 25, 293–299.

- Lindvall, A. (2007). Chloride ingress data from field and laboratory exposure- Influence of salinity and temperature. *Cement and Concrete Composites*, 29, 88–93.
- Locher, F. W. (1982). *Erstarren von Zement. Teil III: Einfluss der Klinkerherstellung*, *Zement-Kalk-Gips*, 35, (12), 669–676.
- Lorenzo, M. P., Goni, S. ve Guerrero, A. (2003). Role of aluminous component of fly ash on the durability of portland cement-fly ash pastes in marine environment. *Waste Management*.
- Ludwig, U. (1980). *Durability of cement mortars and concrete*, *Durability of Building Materials and Components*, ASTM STP 691, 269–281
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2005). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. <http://site.ebrary.com/lib/deulibrary>.
- Mehta, P. K., Pirtz, D. ve Polivka, M. (1979). Properties of alite cements. *Cement and Concrete Research*, 9, 439–450.
- Memon, A. H., Radin, S. S., Zain, M. F. M., Trottier, J.-F. (2002). Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater. *Cement and Concrete Research*, 32, 373-377.
- Miller, F. M. ve Tang, F. J. (1996). *The Distribution of Sulfur in Present-Dry Clinkers of Variable Sulfur Content*. *Cement and Concrete Research*, 26, 1821–1829.
- Mohammed, T. U., Hamada, H. ve Yamaji, T. (2004). Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment. *Cement and Concrete Research*, 34, 593-601.

- Monteiro, J., M. ve Kurtis, K., E. (2003). Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 33, 987-993.
- Mork, H. J. (1994). *Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in the Cement on the Rheological Properties of Fresh Concrete*, Norwegian University of Science and Technology, Dr Ing Dissertation.
- Mork, H. J. ve Gjoerv, E. O. (1997). *Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in Cement on Rheological Properties of Fresh Concrete*, ACI Materials Journal, 142-146.
- Nawa, T. ve Eguchi, H. (1992). *Effect of Cement Characteristics on the Fluidity of Cement Pastes Containing an Organic Admixtures*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, IV, 597-603.
- Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 1275-1296.
- Odler, I. ve Wonnemann, R. (1983). *Effect of Alkalis on Portland Cement Hydration: I. Alkali Oxides Incorporated into the Crystalline Lattice of Clinker Minerals*, Cement and Concrete Research, 13, 477-482.
- O'Farrell, M., Wild, S. ve Sabır B. B. (2000). Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar Part II. Synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 30, 757-765.
- Ramachandran, V.S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, New Jersey.
- Ramyar, K. ve İnan, G. (2007). Sodium sulfate attack on plain and blended cements. *Building and Environment*, 42, 1368-1372.

- Regourd, M. (1978). *Cristallisation et Reactivite de l'Aluminate Tricalcique dans les Ciments Portland*, II. *Cemento*, 3, 323–335.
- Santhanam, M., Cohen, M. D. ve Olek, J. (2003). Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 33, 325–332.
- Santhanam, M., Cohen, M. ve Olek, J. (2006). Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 36, 2132–2137.
- Sarkar, S. L. ve Aimin, X. (1992). *Preliminary Study of Very Early Hydration of Superplasticized C3A+Gypsum by Environmental SEM*, *Cement and Concrete Research*, 22, 605–608.
- Shannag, M. J. ve Shaia, H. A. (2003). Sulfate resistance of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25, 363–369.
- Sibbick, T., Fenn, D. ve Crammond, N. (2003). The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack. *Cement and Concrete Composites*, 25, 1059–1066.
- Şahmaran, M., Erdem, T. K. ve Yaman, I. O. (2007). Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting–drying and heating–cooling environments. *Construction and Building Materials*, 21, 1771–1778.
- Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K. ve Yaman, I. O. (2007). Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29, 159–167.
- Şengül, Ö. ve Gjörv, O. E. (2005). Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonda klor iyonu yayınına etkisi. 6. *Ulusal Beton Kongresi. Yüksek Performanslı Betonlar. Bildiriler Kitabı*. Göksu Matbaası.

Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Yüceer, Z. ve Erenoğlu, T. (2003). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betonun klor geçirimsizliğine ve basınç dayanımına etkisi. *5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

Şengül, Ö., Taşdemir, M. A. ve Sönmez, R. (2003). Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği. *5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

Tagnit-Hamou, A. ve Aïtcin, P.-C. (1993). *Cement and Superplasticizer Compatibility*, World Cement, May, 38–42.

Tagnit-Hamou, A., Baalbaki, M. ve Aïtcin, P.-C. (1992). *Calcium Optimization in Low Water/Cement Ratio Concretes for Rheological Purposes*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, V, 21–25.

Tanaka, I., Suzuki, N., Ono, Y. ve Koishi, M. (1998). Fluidity of Spherical Cement and Mechanism for Creating High Fluidity, *Cement and Concrete Research*, 28, 63–74.

Thomas, M. D. A. ve Matthews, J. D. (2004). Performance of pfa concrete in a marine environment- 10 year results. *Cement and Concrete Composites*, 26, 5–20.

Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (2005). Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar. *TÇMB/AR-GE/Y 97.2*

Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H. ve Baradan, B. (2003). Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi. *5. Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

TS EN 196–1/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım

TS EN 196–2/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi

TS EN 196–21/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Çimentoda Klorür, Karbon Dioksit ve Alkali Muhtevası Tayini

TS EN 206–1/Nisan 2002. Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalât ve uygunluk.

TS EN 1008/Nisan 2003. Beton - Karma Suyu - Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dâhil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları.

TS 3624 / Temmuz 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu.

TS 3732/ Nisan 1982. Beton Agregalarında Klorür Miktarı Tayini Metodu.

TUIK, (2008). Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri, 2000–2006. <http://www.tuik.gov.tr>

Türker, P., Erdoğan, B., Katnas, F., ve Yeğınobalı, A., (2007). Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ankara, 1–102.

Uyan, M., Pekmezci, B. Y. ve Yıldırım, H. (2003). Su/çimento oranı ve kür koşullarının betonun su geçirimsizliğine etkileri. 5. *Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

Vernet, C. ve Noworyta, G. (1992). *Reactivity Test For Fine Silicas and Pozzolonıc Mineral Additives*, Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of cement, New delhi, Vol III, 79–85.

Yazıcı, H., Türkel, S., Yiğiter, H. ve Aydın, S. (2003). Beton içindeki bağlayıcı miktarının betonun deniz suyuna dayanıklılığına etkisi. 5. *Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

Yazıcı, H. (2006). Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8, (1) 51–58. [www.eng.deu.edu.tr/fenmuh/s22/22-04.pdf](http://www.eng.deu.edu.tr/fenmuh/s22/22-04.pdf).

Yazıcı, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 456–462.

Yeğınobalı, A. (2005). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. *TÇMB/AR-GE/Y 01.01*

Yiğiter, H., Yazıcı, H. ve Aydın, S. (2007). Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete. *Building and Environment*, 42, 1770–1776.



## EKLER

### TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Karma suyunun azami klorür muhtevası (TS EN 1008).....	7
Tablo 2.2 Deniz sularındaki iyonlar, g/lit (Erdoğan, 2003).....	9
Tablo 2.3 Deniz sularındaki tuzlar, g/lit (Erdoğan, 2003).....	9
Tablo 2.4 Ege denizinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları (Yazıcı ve diğer., 2003).....	13
Tablo 2.5 Betonun sülfat saldırısına maruz kalacağı ortamların sınıflandırılması (ACI 201).....	33
Tablo 2.6 Doğal zeminler ve yer altı sularından kaynaklanan kimyasal etkiler için etki sınıflarının sınır değerleri (TS-EN 206-1).....	34
Tablo 2.6a Etki sınıfları (TS EN 206-1).....	35
Tablo 2.7 Çimentonun ana bileşenleri.....	37
Tablo 2.8 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde bir yıl sonra meydana gelen boy uzamaları (Doğrusal genişleme) (Tokyay ve Erdoğan, 2005).....	62
Tablo 2.9 Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde cüruf miktarı-Klinker kompozisyonu-Yaş-Dayanım İlişkileri (Tokyay ve Erdoğan, 2005).....	62
Tablo 2.9a Kullanılan klinkerlerin ana bileşen kompozisyonu (Tokyay ve Erdoğan, 2005).....	62
Tablo 4.1 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) mekanik özelliklerin saptanması ve klorür miktarı tayininde kullanılan örnek sayısı .....	98
Tablo 4.2 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) kılcal yolla su emme ve toplam su emme deneyleri için üretilen örnek sayısı .....	98
Tablo 4.3 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının boy değişimleri için üretilen örnek sayısı.....	98
Tablo 4.3a Çalışma 1’de (Tez Çalışması) sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için üretilen örnek sayısı .....	99

Tablo 4.4 Çalışma 1’de (Tez Çalışması) klor iyonu geçirgenliğinin elektrik akımı ile tayini için üretilen örnek sayısı .....	99
Tablo 4.5 Çalışma 2’de (Önceki Deneysel Çalışma) mekanik özelliklerin saptanması ve klorür miktarı tayininde kullanılan örnek sayısı .....	99
Tablo 4.6 Çalışma 2’de (Önceki Deneysel Çalışma) sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçlarının boy değişimleri için üretilen örnek sayısı .....	100
Tablo 4.7 Çimentaş A.Ş- İzmir’den temin edilen çimentoların klinker analizi.....	101
Tablo 4.8 Karçimsa A.Ş. - Karabük’ten temin edilen CEM III/A 42,5 N çimentosunun klinker analizi .....	101
Tablo 4.9 Çimentoların kimyasal özellikleri.....	102
Tablo 4.10 Karçimsa A.Ş. – Karabük’te kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi.....	102
Tablo 4.11 Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	103
Tablo 4.12 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri.....	104
Tablo 4.13 DEÜ Tınaztepe Yerleşkesi şebeke suyunun pH, iletkenlik, iyon konsantrasyonu ve sertliği.....	104
Tablo 4.14 Ege Denizi’nin pH’ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği.....	105
Tablo 4.15 CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2).....	105
Tablo 4.16 CEM I 42.5 R çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2).....	106
Tablo 4.17 CEM I 42.5 R çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2).....	106
Tablo 4.18 CEM IV/B (P) 32.5 N çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2).....	107
Tablo 4.19 CEM IV/B (P) 32.5 N çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2).....	107
Tablo 4.20 CEM IV/B (P) 32.5 N çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2).....	108
Tablo 4.21 SDÇ 32.5 çimentosunun kimyasal özellikleri (Çalışma 2).....	108
Tablo 4.22 SDÇ 32.5 çimentosunun fiziksel özellikleri (Çalışma 2).....	108
Tablo 4.23 SDÇ 32.5 çimentosunun mekanik özellikleri (Çalışma 2).....	109
Tablo 4.24 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri.....	109
Tablo 4.25 Ege Denizi’nin pH’ı, iletkenliği, iyon konsantrasyonu ve sertliği.....	110
Tablo 4.26 Betonlarda klor geçirgenliği (Yeğinobalı, 2005).....	116
Tablo 4.27 Betonun en fazla klorür içeriği (TS-EN 206-1).....	119
Tablo 4.28 Betonun en fazla klorür içeriği (ACI 222R).....	120

Tablo 5.1 Hazırlanan harçların, su/çimento oranları ve çimento tiplerine göre değişen ortalama yayılma çapları.....	132
Tablo 5.2 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen eğilme dayanımı değerleri (MPa).....	153
Tablo 5.3 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen basınç dayanımı değerleri (MPa).....	154
Tablo 5.4 Örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı, bekleme koşulu ve zamana göre “gram” cinsinden ifade edilişi .....	171
Tablo 5.5 Üretilen örneklerin kılcal yolla su emme deneyi ile elde edilen kapilarite (kılcallık) katsayıları.....	172
Tablo 5.6 Örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre “gram/cm <sup>2</sup> ” olarak ifade edilişi.....	172
Tablo 5.7 Örneklerin su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre toplam su emme miktarları.....	188
Tablo 5.8 4x4x16 cm boyutlu prizmatik örneklerin su/çimento oranı, kür koşulu ve zamana göre birim hacim ağırlıkları.....	194
Tablo 5.9 Tüm örneklerin yaş ve kür koşullarına bağlı klor geçirimsizlik verileri...	196
Tablo 5.10 Deney düzeneğinden geçen yük miktarına göre klorür iyonu penetrasyonu (ASTM 1202).....	196
Tablo 5.11 Deniz suyunda ve sodyum sülfatta bekletilen tüm örneklerin ağırlık değişimleri.....	203
Tablo 5.12 Hazırlanan harçların, 0,485 su/çimento oranında, çimento tiplerine göre değişen yayılma çapları.....	205
Tablo 5.13 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen eğilme dayanımı değerleri.....	210
Tablo 5.14 Tüm örneklerin bekletildikleri koşullara göre değişen basınç dayanımı değerleri.....	211

## SEKİL LİSTESİ

### Sekil

### Sayfa

Şekil 2.1 Betonun ve çimento harcının fiziksel nedenlerle bozulması (Baradan ve diğer., 2002).....	4
Şekil 2.2 Betonun ve çimento harcının bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyon türleri (Baradan ve diğer., 2002).....	6
Şekil 2.3 Deniz ortamında bulunan yapıların maruz kalabilecekleri yıpratıcı etkiler (Baradan ve diğer., 2002).....	11
Şekil 2.4 Klor iyonlarının betona girişi (Baradan ve diğer., 2002).....	12
Şekil 2.5 Deniz suyuna maruz kalan betonarme silindirin gösterimi (Mehta ve Monteiro, 2005).....	18
Şekil 2.6 Betonarme donatısında klorür iyonlarının yol açtığı oyulma tarzı korozyon (Baradan ve diğer, 2002).....	21
Şekil 2.7 Sülfatlı bir zeminin genel görünüşü (Çiğli-İzmir) (Baradan ve diğer., 2002).....	25
Şekil 2.8 Yüksek oranda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) içeren harç örneklerinin havada ve su içinde bekletilmeleri halinde 84 gün sonundaki durumları. Soldaki ağır hasarlı örnek su içinde, sağdaki örnek ise havada bekletilmiştir (Baradan ve diğer.,2002).....	26
Şekil 2.9 Sülfatlı toprak.....	32
Şekil 2.10 Betonlarda silis dumanı miktarı ile geçirgenlik arasındaki bağıntı (Yeğinoğlu, 2005).....	56
Şekil 2.11 Cürufli çimentolarda klor permeabilitesi (Tokyay ve Erdoğan, 2005)....	61
Şekil 3.1 Liman duvar basamaklarının genel görünümü. Kireç kaplamanın altından aşınarak sürüklenen sülfata dayanıklı çimento harcı (Sibbick ve diğer., 2003).....	67
Şekil 3.2 Karbonatlı ince agrega tanesi çevresindeki tomasit halesi (Sibbick ve diğer., 2003).....	67
Şekil 3.3 Sodyum sülfat çözeltisinde harçların genleşmeleri (Yeğinoğlu, 2005)....	69
Şekil 3.4 Sülfat çevrimine 8 hafta boyunca maruz kalan harmanlı çimentolar (Şahmaran ve diğer., 2006).....	72

Şekil 3.5 Saldırgan deney çözeltisine ( $\text{Na}_2\text{SO}_4=30000$ mg/l) maruz kalan harç çubuğunda gözlemlenen alçıtaşı damarları (Bellmann ve diğer., 2006).....	74
Şekil 3.6 Kısmen alçıtaşına dönüşmüş büyük miktardaki portlandit tortusunda görülen mikroçatlaklar (Bellmann ve diğer., 2006).....	74
Şekil 3.7 %5 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ çözeltisine maruz bırakılmış normal portland çimentosuyla yapılmış harç çubukları (Şahmaran ve diğer., 2007).....	75
Şekil 3.8 (a) Kontrol harcının 462 günlük kuru sonucu üzerinde görülen kristal tortu, (b) bu tortunun XRD (X-Ray Diffraction) analizi (O'Farrell ve diğer., 2000).....	89
Şekil 3.9 Örneklerin deniz suyuna maruz bırakıldığı 12 nokta (Lindvall, 2007).....	96
Şekil 4.1 Eğilmede çekme deneyi için kullanılan makine.....	111
Şekil 4.2 Deney Presi.....	111
Şekil 4.3 Harç çubuklarının boy ölçümleri için kullanılan komparatör.....	112
Şekil 4.4 Klor iyon geçirgenliği deney düzeneği.....	116
Şekil 4.5 Örnek kaynatma amaçlı kullanılan elektrikli ocak.....	117
Şekil 4.6 Örneğe $\text{K}_2\text{CrO}_4$ (potasyum kromat) eklenmiş hali.....	118
Şekil 4.7 Titrasyon sonrası.....	118
Şekil 4.8 Kılcal yolla su emme deneyinde kullanılan 4x4x16 cm boyutundaki prizmatik örnekler.....	123
Şekil 4.9 25x25x285 mm, 40x40x160 mm, 100x50 mm boyutlu kalıplar.....	124
Şekil 4.10 Yayılma tablası.....	125
Şekil 4.11 Kumpasla birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçümü (su/çim.=0,7).....	125
Şekil 4.12 Harcın kalıplara yerleştirilmesi.....	126
Şekil 4.13 Islanma-kuruma çevrimi için örneklerin deniz suyundan çıkarılarak atmosfer koşullarında kurumaya bırakılması.....	128
Şekil 4.14 Prizmatik numuneler ve harç çubukları. Soldan sağa SDC 32,5, CEM I 42,5 R, CEM IV/B (P) 32,5 N çimento tipleriyle hazırlanan örnekler.....	129
Şekil 4.15 Örneklerle %0,2 $\text{AgNO}_3$ çözeltisi püskürtülmesi sonrası.....	131
Şekil 5.1 CEMI 42,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri.....	134
Şekil 5.2 CEMI 42,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri .....	134

Şekil 5.3 CEMII/A-M(P-W)42,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri .....	135
Şekil 5.4 CEMII/A-M(P-W)42,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri .....	135
Şekil 5.5 CEM II/B-M (P-W) 32,5 R çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri.....	136
Şekil 5.6 CEM II/B-M (P-W) 32,5 R çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri .....	136
Şekil 5.7 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri .....	137
Şekil 5.8 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri.....	138
Şekil 5.9 CEM III/A 42,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri.....	139
Şekil 5.10 CEM III/A 42,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin zamana bağlı boy değişimleri.....	140
Şekil 5.11 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin kirece doygun su küründe zamana bağlı boy değişimleri.....	141
Şekil 5.12 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin kirece doygun su küründe zamana bağlı boy değişimleri.....	141
Şekil 5.13 Üstten alta sırayla su/çimento oranı 0,485 ve 0,7 olan örneklerin kirece doygun suda 350 gün bekletildikten sonraki görüntüleri.....	142
Şekil 5.14 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin deniz suyunda bekletilmesi sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	143
Şekil 5.15 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin deniz suyunda bekletilmesi sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	144
Şekil 5.16 CEM II/A-M(P-W) 42,5R ile hazırlanan, su/çim.=0,485 olan örneğin, deniz suyundaki tuz oranı etkisiyle 127. gündeki durumu. Yukarıdan aşağıya sırayla CEM I, CEM II/A-M, CEM II/A-W, CEM II/B-M, CEM III/A çimentoları.....	145

Şekil 5.17 CEM II/A-M(P-W) 42,5R ile hazırlanan, su/çim.=0,7 olan örnekte, deniz suyundaki tuz oranı etkisiyle 111. günde oluşan kabuk atma. Yukarıdan aşağıya sırayla CEM I, CEM II/A-M, CEM II/A-W, CEM II/B-M, CEM III/A çimentoları.....	145
Şekil 5.18 Üstten alta su/çimento oranı 0,485 ve 0,7 olan örneklerin 350 gün sonunda tamamen tuzla kaplanmış hali.....	146
Şekil 5.19 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin havada bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	146
Şekil 5.20 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin havada bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	147
Şekil 5.21 Tüm çimento tipleriyle 0,485 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	149
Şekil 5.22 Tüm çimento tipleriyle 0,7 su/çimento oranında hazırlanan örneklerin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeleri sonucu meydana gelen zamana bağlı boy değişimleri.....	150
Şekil 5.23 Su/çimento=0,7 olan 40x40x160 mm boyutlu, CII/A-M(P-W)42,5R çimentosu içeren prizmatik örneğin 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 322. günü.....	151
Şekil 5.24 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,485 su/çimento oranında hazırlanan harçların 322 gün sonraki durumları.....	151
Şekil 5.25 CEM II/A-W 52,5 N çimentosuyla 0,7 su/çimento oranında hazırlanan harçların 322 gün sonraki durumları.....	152
Şekil 5.26 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 322. gün. Yukarıdan aşağıya CEM I, CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM II/A-W, CEM III çimentoları.....	152
Şekil 5.27 Tüm örneklerin eğilme dayanımı değerlerine ait grafik.....	155
Şekil 5.28 Tüm örneklerin basınç dayanımı değerlerine ait grafik.....	156
Şekil 5.29 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin eğilme dayanımı grafiği.....	158
Şekil 5.30 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	158
Şekil 5.31 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	159

Şekil 5.32 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	160
Şekil 5.33 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin basınç dayanımı grafiği.....	162
Şekil 5.34 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	162
Şekil 5.35 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	163
Şekil 5.36 Su/çimento oranı 0,485 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	164
Şekil 5.37 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin eğilme dayanımı grafiği.....	165
Şekil 5.38 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	166
Şekil 5.39 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	166
Şekil 5.40 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin eğilme dayanımı verilerine göre bağlı eğilme dayanımı grafiği.....	167
Şekil 5.41 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin basınç dayanımı grafiği.....	169
Şekil 5.42 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 28. gün verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	169
Şekil 5.43 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, 350. gün verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	170
Şekil 5.44 Su/çimento oranı 0,7 olan örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin basınç dayanımı verilerine göre bağlı basınç dayanımı grafiği.....	171
Şekil 5.45 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının gram cinsinden ifade edilmesi.....	173
Şekil 5.46 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme deneyi ile elde edilen kapilarite (kılcallık) katsayıları.....	174
Şekil 5.47 Tüm örneklerin kılcal yolla su emme miktarlarının gram/cm <sup>2</sup> olarak ifade edilmesi.....	174



Şekil 5.48 Örneklerin 28. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması .....	175
Şekil 5.49 Örneklerin 350. günde elde edilen kapilarite katsayısı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması .....	176
Şekil 5.50 Tüm örnek tiplerinin 28 gün kirece doygun suda beklemesi sonrası kılcal yolla su emme miktarlarının ölçüm sonuçları.....	177
Şekil 5.51 Tüm örneklerin kirece doygun suda 350 günlük kür sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği.....	178
Şekil 5.52 Tüm örneklerin deniz suyunda bekletilmeleri sonunda 350. gün kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği.....	179
Şekil 5.53 Kirece doygun suda kür edilen örneklerin 350. gün kılcal yolla su emme deneyi sonuçlarının, 28. gün deney sonuçlarına göre elde edilen grafik.....	180
Şekil 5.54 Deniz suyunda bekletilen örneklerin 350. gün kılcal yolla su emme deneyi sonuçlarının, kirece doygun suda bekleyen örneklerin 350. gün deney sonuçlarına göre elde edilen grafik.....	181
Şekil 5.55 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin kılcal yolla su emme verilerine göre bağlı kapilarite grafiği.....	182
Şekil 5.56 Su/Çimento oranı 0,485 olan örneklerin kirece doygun suda 28 günlük kür sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği.....	183
Şekil 5.57 Su/Çimento oranı 0,6 olan örneklerin kirece doygun suda 28 günlük kür sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği.....	184
Şekil 5.58 Su/Çimento oranı 0,7 olan örneklerin kirece doygun suda 28 günlük kür sonrası kılcal yolla su emme miktarının zamanla değişim grafiği.....	184
Şekil 5.59 Su/çimento oranı 0,485 olan, suda ve deniz suyunda bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda yapılan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları.....	186
Şekil 5.60 Su/çimento oranı 0,6 olan, suda ve deniz suyunda bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda yapılan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları.....	186
Şekil 5.61 Su/çimento oranı 0,7 olan, suda ve deniz suyunda bekletilmiş olan örneklerin 350 gün sonunda yapılan kılcal yolla su emme deneyi sonuçları.....	187
Şekil 5.62 Tüm çimento tipleriyle hazırlanan örneklerin toplam su emme oranlarına genel bakış.....	189

Şekil 5.63 Kirece doymun suda kür edilen tüm örneklerin, 350. gün toplam su emme deneyi sonuçlarının 28 günlük sonuçlarına göre değişimi.....	190
Şekil 5.64 Deniz suyunda bekletilen örneklerin toplam su emme deneyi sonuçlarının, kirece doymun suda bekleyen eşleniklerine göre toplam su emme miktarları.....	191
Şekil 5.65 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin toplam su emme verilerine göre bağıl su emme oranı grafiği.....	192
Şekil 5.66 Örneklerin 28. günde elde edilen toplam su emme oranı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması .....	193
Şekil 5.67 Örneklerin 350. günde elde edilen toplam su emme oranı ve basınç dayanımı verilerinin su/çimento oranlarına göre kıyaslanması .....	193
Şekil 5.68 Kirece doymun su küründe 28. gün toplam su emme değerlerinin birim hacim ağırlık değerleriyle kıyaslanması .....	195
Şekil 5.69 Kirece doymun su küründe 350. gün toplam su emme değerlerinin birim hacim ağırlık değerleriyle kıyaslanması .....	195
Şekil 5.70 Tüm örneklerin yaş ve kür koşuluyla değişen klor geçirimsizlik grafiği..	198
Şekil 5.71 Tüm örneklerin 28. gün kirece doymun su verilerine göre bağıl klor geçirimsizlik grafiği.....	199
Şekil 5.72 Tüm örneklerin 350. gün kirece doymun su verilerine göre bağıl klor geçirimsizlik grafiği.....	200
Şekil 5.73 Tüm örneklerin, CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan örneklerin klor geçirimsizlik verilerine göre bağıl klor geçirimsizlik grafiği.....	201
Şekil 5.74 Yukarıdan aşağıya kirece doymun su, ıslanma-kuruma çevrimli deniz suyu ve sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen örneklerin görünüm farklılıkları.....	203
Şekil 5.75 Tüm örneklerin 28- 350 gün arasında ölçülen ağırlık farklarının CEM I 42,5 R çimentosuna göre değişim oranları.....	204
Şekil 5.76 Örneklerin bekleme koşullarına göre bünyelerinde yer alan klorür miktarı tayini.....	205
Şekil 5.77 Kirece doymun suda 300 gün boyunca kür edilen örneklerin zamana bağıl boy değişimi yüzdeleri.....	206
Şekil 5.78 Deniz suyunda 300 gün devamlı bekletilen örneklerin zamana bağıl boy değişimi yüzdeleri.....	207

Şekil 5.79 Deniz suyunda 56 çevrim geçiren örneklerin zamana bağlı boy değişimi yüzdeleri.....	207
Şekil 5.80 Sodyum sülfat çözeltisinde 300 gün devamlı bekletilen örneklerin zamana bağlı boy değişim yüzdeleri.....	208
Şekil 5.81 CEM I 42,5 R çimentosuyla hazırlanan harçların 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330. günde uğradığı hasar.....	209
Şekil 5.82 SDÇ 32,5 ile hazırlanan örneklerin 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330 gün bekletildikten sonraki görünüşleri.....	209
Şekil 5.83 CEM IV/B (P) 32,5 N ile hazırlanan harçların 50000 ppm sodyum sülfat çözeltisinde 330 gün bekletildikten sonraki görünüşleri.....	210
Şekil 5.84 Tüm örneklerin eğilme dayanımı verilerine ait grafik.....	212
Şekil 5.85 Eğilme dayanımı verilerinin 28. gün verilerine göre değerlendirilmesi.....	213
Şekil 5.86 Eğilme dayanımı verilerinin 350. gün verilerine göre değerlendirilmesi.....	213
Şekil 5.87 Eğilme dayanımı verilerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre değerlendirilmesi.....	214
Şekil 5.88 Tüm örneklerin basınç dayanımı verilerine ait grafik.....	215
Şekil 5.89 Basınç dayanımı verilerinin 28. gün verilerine göre değerlendirilmesi..	215
Şekil 5.90 Basınç dayanımı verilerinin 350. gün verilerine göre değerlendirilmesi .....	216
Şekil 5.91 Basınç dayanımı verilerinin CEM I 42,5 R çimentosuyla üretilen örneklerin verilerine göre değerlendirilmesi.....	216
Şekil 5.92 Tüm örneklerin bekleme koşullarına göre değişen klorür miktarları.....	217