

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN
BETONLARDA SÜLFAT ETKİSİ VE KLORÜR
GEÇİRİMLİLİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Tolga ILICA**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**FARKLI ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN BETONLARDA
SÜLFAT ETKİSİ VE KLORÜR GEÇİRİMLİLİĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Tolga ILICA
(501051120)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Haziran 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Günümüzün en önemli yapı malzemesi olan betonun başta basınç dayanımı olmak üzere, boşluk yapısı, geçirimsizlik özellikleri, kullanılan bağlayıcı miktarı, bağlayıcı türü, kimyasal ve mineral katkıları, su-çimento oranı ve agrega özellikleri betonun dış etmenlere karşı dayanıklılığı için önemli parametrelerdir.

Sunulan bu çalışmada yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkıların betonun klor iyonu geçirimsizliğine etkisinin yanı sıra, deniz suyu ortamına ve sülfat saldırısına karşı davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda deniz yapılarında kullanılan bir çimento türü olan sülfata dayanıklı çimentonun yine deniz ortamında maruz kalacağı klor etkisi altındaki davranışı da incelenmiş ve diğer serilerle karşılaştırılmıştır.

İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen bu çalışmada yardım ve desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren hocam Sayın Yar. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı öğretim üyeleri Sayın Yar. Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN, Yar. Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL ve Yar. Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ'ye, araştırma görevlileri Sayın Cengiz ŞENGÜL, Ünal Anıl DOĞAN, Özgür EKİNCİOĞLU, sevgili dostum Arda KİREMITÇİ'ye ve tüm laboratuvar personeline teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana destek olan, yardımlarını ve en önemlisi dostluklarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım İnş. Müh. Mehmet GÖKTEPE, İnş. Müh. Cihan DİKBAŞ, İnş. Müh. İlhan ÇAKMAK, İnş. Müh. Özkan KALE, İnş. Müh. İhsan Öden, Kim. Müh. Çağlar BAHADIR, Kim. Müh. Yunus Muhtar, Kimyager Özlem DEMİREL, Orman Müh. Hasan Hemşindereli ve Elektrik-Elektronik Müh. Ali YURTÇU'ya teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük hak sahibi sevgili babam Arif ILICA'ya, annem Sayın Perihan ILICA'ya ve sevgili kardeşim Mehmet Burak ILICA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların, konuyla ilgili yapılacak diğer çalışmalara yardımcı olmasını dilerim.

Haziran 2008

Tolga ILICA

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xii

1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Çimento Türleri	3
2.1.1 Portlant Çimentosu	3
2.1.1.1 Portlant Silika Füme Çimento	3
2.1.1.2 Portlant Kalkerli Çimento	4
2.1.1.3 Portlant Kompoze Çimento	4
2.1.1.4 Beyaz Portlant Çimentolar	4
2.1.2 Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar	4
2.1.2.1 Cürufun Camsı Yapısı ve Kristalitesinin Etkisi	5
2.1.2.2 Çimentoda YFC İçeriğinin Mekanik Dayanımlara Etkisi	6
2.1.2.3 Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri	7
2.1.2.4 GYFC'nin Fiziksel Özellikleri	7
2.1.3 Harç Çimentosu	8
2.1.4 Uçucu Küllü Çimento	8
2.1.5 Sülfata Dayanıklı Çimento	8
2.1.6 Erken Dayanımlı Yüksek Çimento	8
2.1.7 Katkılı Çimento	9
2.2 Mineral Katkılar	9
2.2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması	9
2.2.1.1 Puzolanik Reaksiyon	11
2.2.2 Uçucu Kül	13
2.2.2.1 Uçucu Külün Tanımı	13
2.2.2.2 Uçucu Külün Oluşumu ve Toplanması	16
2.2.2.3 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal özellikleri	20

2.2.2.4	Uçucu Kül İçeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Yöntemleri	24
2.2.2.5	k Etkinlik Faktörünün Bağlı Olduğu Faktörler	29
2.2.2.6	Uçucu Külün Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	30
2.2.2.7	Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri	32
2.2.2.8	Uçucu Külün Bulunduğu Ortam Koşullarına Dayanıklılık Özellikleri	34
2.2.2.9	Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanılması	42
2.2.3	Yüksek Fırın Cürufu	42
2.2.3.1	Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı	42
2.2.3.2	Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Yapısı	44
2.2.3.3	GYFC'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	44
2.2.3.4	Yüksek Fırın Cürufunun Aktivitesi	45
2.2.3.5	Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu	46
2.2.3.6	k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar	46
2.2.3.7	Yüksek Fırın Cürufunun Taze Beton Özelliklerine Etkisi	49
2.2.3.8	Yüksek Fırın Cürufunun Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi	49
2.2.3.9	GYFC'nin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	50
2.3	Betonun Durabilitesi	54
2.3.1	Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri	54
2.3.1.1	Sertleşmiş Betonda Yer Alan Boşluklar	55
2.3.1.2	Sertleşmiş Betonda Su Emme	55
2.3.1.3	Sertleşmiş Betonda Geçirimsizlik	56
2.3.1.4	Geçirimsiz Beton Üretmek İçin Gereken Kurallar	56
2.3.2	Sülfat Etkisi	57
2.3.2.1	Sülfatların Betonda Oluşturdukları Zararlı Reaksiyonlar	60
2.3.2.2	Reaksiyonun Gelişimine Etkileyen Faktörler	63
2.3.2.3	Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler	67
2.3.2.4	Sülfata Dayanıklılık Deneyleri	68
2.3.2.5	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF)	69
2.3.3	Deniz Ortamında Beton ve Betonarme	71
2.3.3.1	Kimyasal Saldırı	75
2.3.3.2	Donatı Korozyonu	77
2.3.3.3	Çimento Kimyasal Yapısının Dayanıklılığa Etkisi	79

2.3.4	Korozyon	80
2.3.4.1	Atmosferik Korozyon	82
2.3.4.2	Betonarme Donatısında Korozyon	83
2.3.4.3	Çelik Donatının Elektro Kimyasal Korozyonu	84
2.3.4.4	Betonarme Donatısında Klorür Korozyonu	87
2.3.4.5	Klorür Kaynakları	88
2.3.4.6	Çatlaklı Betonda Korozyon	94
2.3.4.7	Korozyonun Betonarme Yapılarda Meydana Getirdiği Hasarlar	95
2.3.4.8	Alınacak Önlemler	98
3.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	99
3.1	Malzemeler	99
3.1.1	Agrega	99
3.1.2	Çimento	101
3.1.3	Su	102
3.1.4	Akışkanlaştırıcı	102
3.1.5	Mineral Katkılar	102
3.1.6	Sodyum-Sülfat Çözeltisi	103
3.1.7	Deniz Suyu	103
3.2	Beton Karışım Hesabı	103
3.3	Beton Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması	105
3.3.1	Numune Boyutları ve Sayıları	106
3.4	DENEY YÖNTEMLERİ	106
3.4.1	Taze Beton Deneyleri	106
3.4.2	Sertleşmiş Beton Deneyleri	106
3.4.2.1	Basınç Dayanımı Deneyleri	107
3.4.2.2	Geçirimlilik	107
3.4.2.3	Sülfat Etkisi	109
4.	DENEY SONUÇLARI	111
4.1	Taze Beton Özellikleri	111
4.2	Basınç Dayanımı	111
4.3	Geçirimlilik	113
4.3.1	Kılcal Su Emme Deneyi	113

4.3.2	Ağırlıkça Su Emme Deneyi	115
4.3.3	Hızlı Klor Geçirirnililiği Deneyi	116
4.3.4	Sülfat Etkisi	118
4.3.4.1	Ağırlık Değişimi	118
4.3.4.2	Boy Değişimi	119
4.3.4.3	Ultrases Hızı Değişimi	120
5.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	122
5.1	Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	122
5.2	Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	122
5.3	Geçirirnililik Deney Sonuçları Değerlendirilmesi	123
5.3.1	Kılcal Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	123
5.3.2	Ağırlıkça Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	123
5.3.3	Hızlı Klor Geçirirnililiği Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	124
5.4	Sülfat Etkisi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	125
5.4.1	Ağırlık Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	125
5.4.2	Boy Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	127
5.4.3	Ultra Ses Hızı Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	128
6.	GENEL SONUÇLAR	129
7.	KAYNAKLAR	131
8.	EK A	138

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1: Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri	10
Tablo 2.2: Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri.....	11
Tablo 2.3: Puzolanik aktivite deney sonuçları	14
Tablo 2.4: TS 639 'da Belirtilen Uçucu Kül Özellikleri.....	15
Tablo 2.5: Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve TS EN 450, TS 639 ile ASTM C 618 limit değerleri.....	22
Tablo 2.6: Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları	23
Tablo 2.7: Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri	24
Tablo 2.8: Betonların hesap değerleri	48
Tablo 2.9: Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi.....	60
Tablo 2.10: TS 3340'a göre Sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri	60
Tablo 2.11: Ülkemiz denizlerinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları.....	73
Tablo 2.12: Yapının maruz kaldığı deniz ortamına göre görülme olasılığı olan yıpratıcı etkiler.....	74
Tablo 2.13: ACI 222R'e göre betonun klorür içeriğinin sınıflandırılması (çimento ağırlığınca).....	92
Tablo 2.14: TS EN 206-1 standardına göre betonun klorür içeriğinin sınıflanması.....	92
Tablo 2.15: Korozyon gelişimini etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler [66].....	98
Tablo 3.1: Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları	99

Tablo 3.2: Elek analizi deney sonuçları	100
Tablo 3.3: Seçilen karışım için elekten geçen malzeme yüzdeleri	100
Tablo 3.4: Çimento Deney Sonuçları	102
Tablo 3.5: Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi	103
Tablo 3.6: Beton karışım oranları (kg/m^3)	105
Tablo 3.7: Hızlı Klor İyon Geçirimsilik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimsiliği yönünden değerlendirilmesi.....	108
Tablo 4.1: Taze Beton Deney Sonuçları	111
Tablo 4.2: Kılcallık Katsayıları	114
Tablo 4.3: Ağırlıkça su emme değerleri.....	116

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1: Bir hidrate portlant-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi	12
Şekil 2.2: Uçucu Külün Oluşum Safhaları	17
Şekil 2.3: Bir Kömür Taneciğinin yanması ve yanma ürünleri	18
Şekil 2.4: Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması	19
Şekil 2.5: Siklon ile uçucu küllerin tutulması.....	20
Şekil 2.6: Sülfat Etkisiyle Ağır Hasar Görmüş Beton Eleman.....	58
Şekil 2.7: Sülfatlı bir zeminin genel görünüşü (Çiğli-İzmir).....	58
Şekil 2.8: Sülfat etkisiyle betonun bozulması.....	61
Şekil 2.9: Sülfat etkisiyle beton elemanların hasara uğraması A) Betonarme bir elemanın bozulması B) Sülfatlı bir zemine bırakılan beton boruların bozulması.....	62
Şekil 2.10: Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimsizliği arasındaki ilişki	64
Şekil 2.11: Farklı tip çimentolarla değişik çimento içeriklerinde üretilmiş betonların sülfat etkisiyle bozulma hızları.....	66
Şekil 2.12: 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.....	66
Şekil 2.13: Prefabrik betonarme bir elemanda DEF hasarı	70
Şekil 2.14: Deniz ortamında bulunan yapıların maruz kalabilecekleri yıpratıcı etkiler	72

Şekil 2.15: Yapının bulunduğu konuma göre maruz kalabileceği değişik deniz ortamları ve betonarme bir elemanda deniz suyu etkisiyle oluşabilen bozulma mekanizmaları.....	75
Şekil 2.16: Yarımca Pektim İskelesi'nde 1999 Marmara Depremi sonrası korozyon ve deprem hasarı (Solda) aynı yerde deniz altında kalan betonarme elemanlar (Sağda)	78
Şekil 2.17: Değişik korozyon hasarları a) Korozyon ürünlerinin genleşme etkisi ile pas payı tabakasını azaltması b) Donatının korozyon nedeniyle parçalanması c) Korozyon nedeniyle etriyelerin kopması	81
Şekil 2.18: Karbonatlaşma veya klorür iyonları nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması	84
Şekil 2.19: Beton içinde gömülü çeliğin elektro-kimyasal korozyonu.....	85
Şekil 2.20: Betonun karbonatlaşmasının ve betonarme donatısının korozyon hızının bağıl hava nemi ile değişimi.....	87
Şekil 2.21: Klorür bulunan ortamda korozyonun gelişimi	88
Şekil 2.22: Betonarme donatısında klorür iyonlarının yol açtığı oyulma tarzı korozyon	88
Şekil 2.23: Beton içine sonradan giren klorürlerin yüzeyden derine doğru miktarlarının değişimi.....	89
Şekil 2.24: Betonun klorür içeriğinin ortam şartlarına göre sınıflandırılması.....	91
Şekil 2.25: Betonun klorür geçirimliliğine S/Ç oranının etkisi	93
Şekil 2.26: Betonun klorür geçirimliliğine S/Ç oranının ve pas payı tabakasının kalınlığının etkisi	94
Şekil 2.27: Çatlak bölgesinde korozyonun gelişimi	95
Şekil 2.28: İzmir'de korozyon hasarına uğramış elektrik direkleri	96
Şekil 2.29: Donatının korozyonu sonucu kesit kaybı ve parçalanması	96
Şekil 2.30: Korozyon ürünlerinin hacimlerinin demire kıyasla gösterimi ve korozyon sonucu betonda görülen hasar çeşitleri.....	97
Şekil 3.1: Beton agregası karışımının granülometri	101

Şekil 3.2: Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği.....	108
Şekil 3.3: Numunelerde Boy Değişimi Ölçümü	110
Şekil 4.1: 28 Günlük Basınç Dayanımları	112
Şekil 4.2: 40 günlük basınç dayanımları.....	113
Şekil 4.3: Havada kür süresince dayanım artışı (%).....	113
Şekil 4.4: Kılcal Su Emme.....	115
Şekil 4.5: Ağırlıkça Su Emme	116
Şekil 4.9: Farklı çimento türlerinin klor iyonu geçirimliliğine etkisi.....	117
Şekil 4.10: Klor iyonu geçirimliliğinin S/Ç oranına göre değişimi.....	118
Şekil 4.6: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Ağırlık Değişimi.....	119
Şekil 4.7: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Boy Değişimi.....	120
Şekil 4.8: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Ultra Ses Hızı Değişimi.....	121
Şekil 5.1: Sülfat Etkisinde Zarar Görmüş CÇ42.5-C25 Numuneleri	127

FARKLI ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN BETONLARDA SÜLFAT ETKİSİ VE KLOR GEÇİRİMLİLİĞİ

ÖZET

Bu çalışmada farklı çimento türlerinin betonun klor iyonu geçirimsizliğine, sülfat ve deniz suyu ortamında betonun dayanıklılığına etkisi incelenmiştir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan C25, C30, C35 ve C40 dayanım sınıflarında farklı çimentolar ile üretimler yapılmıştır. Bu üretimlerde betonların kıvam değeri sabit tutulmuş ve bu amaç doğrultusunda su/bağlayıcı oranları değiştirilmiştir. Aynı dayanım ve kıvamda betonlar farklı çimento, dozaj ve su/bağlayıcı oranlarıyla üretilerek, piyasada kullanılan dayanım sınıflarının beton durabilitesi açısından incelenmiştir.

CEM III 32.5N ve CEM III 42.5N olmak üzere iki çeşit cürufu çimento, uçucu kül ile ikame edilmiş CEM I 42.5R, SDÇ 32.5N ve şahit beton olarak da CEM I 42.5R olmak üzere beş farklı bağlayıcı ile beton üretilmiştir. Her bağlayıcı türü için dört farklı dayanım sınıfında olmak üzere toplam 20 farklı karışımda hazırlanmıştır. Agregat türü, granülometrisi ve betonların işlenebilirlikleri sabit tutulmuştur.

Numuneler 28 gün su içinde daha sonra 40. güne dek laboratuvar ortamında bekletilmiş 28. ve 40. günlerde basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Kılcal su emme, ağırlıkça su emme ve klor geçirimsizliği deneyleri 40. günde yapılmıştır. Sülfat ve deniz ortamında bekletilen numunelerde ultrases hızı tayini, ağırlık değişimi ve boy değişimi ölçümlerine 40. günden başlayarak aylık periyotlar ile 7. aya kadar devam edilmiştir.

ASTM C 1202 standardına uygun olarak klor geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca betonların ağırlıkça su emme ve kılcallık değerleri de ölçülmüştür. Deney sonuçları, cüruf içeren serilerin klor geçirimsizliğine karşı en yüksek dirence sahip olduğunu, bununla beraber portland çimentosu ile üretilen serilerin klor geçirimsizliğine karşı direncinin çok düşük olduğunu göstermiştir. Sülfata dayanıklı çimento ile üretilen numunelerin ise ağırlıkça su emme ve kılcallık değerlerine paralel olarak klor iyonu geçirimsizliği de yüksek değerlerdedir.

Deneylerin sürdürüldüğü 7 aylık sürecin numuneler üzerindeki sülfat etkisini gözlemlemede yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber CÇ42.5-C25 serisinin 7 ay sonunda parçalanma göstererek en yüksek ağırlık kaybı, en yüksek boy değişimi ve en yüksek ultra ses hızı kaybına ulaştığı görülmüştür.

SDÇ ile üretilen numunelerin sülfat etkisindeki performanslarının, cürufu çimentolara kıyasla beklenildiği kadar iyi olmadığı sonucuna varılmıştır. PÇ numunelerinin ise düşük klor geçirimsizliği performansının uçucu kül kullanımı ile iyileştirilebildiği görülmüştür.

Deniz ve kıyı yapılarında sülfat etkisinden korunmak için kullanılan sülfata dayanıklı çimentonun klor geçirimsizlik performansının düşük olmasından dolayı deniz yapılarında çok karşılaşılan bir sorun olan donatı korozyonu sorunu ile karşılaşmamak için yapıda kullanılacak betonda SDÇ'nin bu olumsuz özelliğinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Piyasada kullanıldığı gibi sadece dayanım sınıfı ve kıvam değerlerinin betonun dayanıklılık özellikleri açısından tanımlayıcı olmadığı, su/bağlayıcı oranı ve bağlayıcı türünün daha ön planda olduğu görülmüştür.

EFFECTS OF CEMENT TYPE ON THE SULFATE ATTACK AND CHLORIDE PENETRATION

SUMMARY

The primary objective of this experimental study was to investigate the effect of different types of cement on the resistance of concrete against chloride penetration, sulfate effect and sea water effect. Concrete specimens were produced at the most common strength classes as C25, C30, C35 and C40 by using different types of cement. The mixtures produced with variable water/binder ratios for to get the same slump values. As a result, the same strength classes were produced by different cements types, different w/b ratios and different dosages of cement.

These cements included CEM III/A 32.5N, CEM III/A 42.5N, SRC 32.5N and CEM I 42.5R blended with fly ash, all compared to CEM I 42.5R. For each cement type, four concretes at different strength classes were produced and as a result 20 mixtures were obtained. Workability, maximum size of the aggregate and aggregate grading was kept constant in all mixtures.

The specimens were kept into lime saturated water until the 28th day of the production and then they were kept under the laboratory conditions till the 40th day of the production. The specimens were subjected to the compressive strength tests at the 28th and 40th days. The other tests, such as the capillarity, water absorption and the rapid chloride ion penetration tests were applied at the 40th day. The ultrasonic pulse velocity, weight change and the length change tests were conducted periodically.

Rapid chloride ion penetration tests according to ASTM C 1202 and capillary water absorption tests were conducted. The test results demonstrated that the blast furnace slag cements gave the highest resistance against chloride penetration, while the portland cements gave the lowest resistance. SRC 32.5N also had a low resistance against chloride penetration. Concrete produced using the SRC 32.5N had higher capillary sorption compared to others.

It's observed that the 7 months of test period is insufficient for the sulfate attack tests. On the other hand, the specimens of blast furnace slag cement-C25 series has the greatest length change, weight lost and ultrasonic pulse velocity change values due to the damage caused by the sulfate attack. Usage of fly ash with Portland cement gives better results for the chloride ion penetration tests.

The test results show that performance of SRC series under sulfate attack is worse than that of slag cements. It's usual to use SRC for to protect the marine structures from the effects of sulfate attack but the bad performance of chloride ion penetration of SRC causes corrosion damages at reinforcement. This negative performance of SRC must be considered at marine structures.

The strength and workability values are not sufficient to describe the durability properties of concrete. The w/b ratios and cement type are more effective parameters on the concrete's durability properties.

1. GİRİŞ

Betonun dayanıklılığına etki eden ve bozulmasına neden olan başlıca olayları sülfat etkisi, donatı korozyonu, alkali-agrega reaksiyonları ve karbonatlaşma olarak sıralamak mümkündür.

Sülfat etkisi, çimentodan kalsiyum alüminat hidrat ve kalsiyum hidroksit ile sülfat iyonları arasında betonda genleşme yaratan ürünler meydana getirmesi ile sonuçlanan reaksiyondur. Bu ürünler etrenjit ve jips olup, betonda genleşme, çatlak oluşumu yüzeyin pul pul dökülmesi şeklinde hasara dolayısıyla dayanım kaybına sebep olmaktadır. Betonda sülfat etkisi ile dayanım kaybına sadece genleşme oluşumu yol açmamaktadır. Aynı zamanda sülfat etkisiyle hidrate portlant çimentosunda başlıca fazlar olan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidratının bozulması da yapıdaki adezyon kuvvetlerinin zayıflaması ve buna bağlı olarak dayanım kaybına neden olmaktadır.

Çimento yapısında bulunan ana bileşenlerden C_3A ve C_4AF çimentonun sülfata karşı göstereceği performansı etkileyen en önemli bileşenlerdir. Çünkü sülfat hücumu sonunda meydana gelen ve sertleşmiş çimento ve betonun yapısında genleşmelere sebep olan etrenjit ve monosülfoaluminatların oluşumunda bu ana bileşenler doğrudan rol oynamaktadır. Çimentonun yapısında bulunan C_3A miktarı, beton taze haldeyken meydana gelecek monosülfoaluminat miktarını belirlemekte, monosülfoaluminatlar ise sertleşmiş betonda zararlı genleşmelere sebep olan etrenjit oluşumuna sebep olmaktadır.

Yapılan araştırmalar çimento kimyasalının betonda sülfat hücumunu önleyici tek faktör olmadığını göstermektedir. Çimentoda bulunan düşük miktardaki C_3A bileşeninin yanı sıra üretilen betonun geçirimsizliğinin düşük olması, sülfat hücumunu engelleyici ve azaltıcı faktörler arasında sayılmaktadır. Bilindiği gibi toprakta ve yer altı sularındaki sülfatlar, betonun içerisine sızan sularla birlikte girebilmektedir. Bu nedenle betonun geçirimsizliğinin az olması betona girecek sülfat miktarının az olmasını sağlayacaktır. Sülfat hücumunu önleyecek önlemlerden bir diğeri ise beton üretiminde mineral katkıların kullanılmasıdır. Mineral katkıları, özelliklerine göre

betonu sülfat hücumuna karşı daha dayanıklı hale getirebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda mineral katkı kullanımının çimentonun sülfata karşı direncini artırmada etkili olduğu bildirilmektedir.

Betonarme yapıların kullanım ömürlerini belirleyici en önemli etkenlerden bir diğeri ise çelik donatı korozyonudur. Çimentonun suyla olan hidrasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 betonun pH'ının 13 civarında olmasını ve bu durum da 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. Betondaki donatı korozyonu nedeniyle donatı hacmi artar ve beton paspayını çatlatır, zararlı kimyasalların çatlamış betondan donatıya ulaşması ise daha kolay olur.

Betonda korozyona yol açan en önemli etken klor etkisidir. Klor betona kullanılan agrega, katkı maddelerinden veya yapının bulunduğu çevreden (örneğin deniz suyu etkisiyle ya da kışın kullanılan buz çözücü tuzların etkisiyle) etkiyebilir. Tıpkı sülfat etkisinde olduğu gibi betonun geçirimsizliğinin az olması klora dolayısı ile donatı korozyonuna karşı alınabilecek önlemlerden ilk akla gelenidir. Beton üretimi esnasında kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları betonda geçirimsizliği sağlayarak, betonun donatı korozyonuna karşı daha dayanıklı hale getirilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, sülfata dayanıklı çimento, cürufu çimento ve normal portlant çimentosu klinkeri ile üretilen ve çeşitli oranlarda uçucu kül katılan katkılı çimentolar ile üretilen betonların sülfat etkisine ve klor etkisine karşı gösterdikleri performansı belirlemektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento Türleri

Çimento çeşitleri, kullanılan hammaddelerin miktarına ve seçilen üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Ülkemizde, çimento çeşitleri için geliştirilen standartlardan yola çıkılarak aşağıdaki sınıflandırma yapılmaktadır:

- Portland çimentoları
- Yüksek fırın cürufu çimentolar
- Beyaz portlant çimentosu
- Harç çimentosu
- Traslı çimento
- Uçucu küllü çimento
- Süper sülfat çimentosu
- Erken dayanımı yüksek çimento
- Katkılı çimento

2.1.1 Portland Çimentosu

Portland çimento klinkerinin alçı taşı ile %10'a kadar herhangi bir doğal ya da yapay puzolanik madde ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır [1].

Portland çimentoları klinkerle az miktarda (yaklaşık %5) alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen katkısız çimentolardır. Bu çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre başlıca 3 tiptir. Bunlar; PÇ 32.5, PÇ 42.5 ve PÇ 52.5'tir. [1]

2.1.1.1 Portland Silika Füme Çimento

Portland silika füme çimento, klinkerle kütlece en fazla %10 oranında silis dumanı ve az miktarda alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir. Tek bir sınıfı vardır, Portland Silika Füme Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre PSFÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir.[1]

2.1.1.2 Portlant Kalkerli Çimento

Portlant kalkerli çimento, klinkerle kalkerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri kalker miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6–20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, kütlece %21–35 arasında kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. 28 günlük basınç dayanımlarına göre PLÇ 32.5, PLÇ 32.5R, PLÇ 42.5, PLÇ 42.5R, PLÇ 52.5, PLÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir. [1]

2.1.1.3 Portlant Kompoze Çimento

Klinkerle puzolanik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentodur. İçerdikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6–20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, %21–35 arası kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. 28 günlük basınç dayanımlarına göre PKÇ 32.5, PKÇ 32.5R, PKÇ 42.5, PKÇ 42.5R, PKÇ 52.5, PKÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir. [1]

2.1.1.4 Beyaz Portlant Çimentolar

TS 21 BPÇ 52.5N çimentosu, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile performans özellikleri açısından standart değerlerinin çok üstünde ve süper beyaz portlant çimentosu niteliğindedir. Beyazlığı ortalama %85.5'tir. Türkiye'nin bu kadar yüksek beyazlıkta üretilen ilk ve tek beyaz çimentosudur. Dünyanın da sayılı beyaz çimentoları arasındadır. Türkiye'de piyasada satılmakta olan beyaz ve gri portlant çimentoları arasında dayanımı en yüksek olan çimentodur. İki günlük dayanımı 37 MPa, 28 günlük dayanımı 59 MPa civarındadır. Hidrolik olarak çok aktiftir. Bu özelliği ile kullanıldığı yerlerde üretim hızını ve kalitesini artırır. Prefabrik beton elemanları üretiminde buhar kürü gerektirmez. Düşük alkalili çimento sınıfı içindedir. Alkali-agrega reaksiyonlarına karşı dirençlidir. Her türlü mimari, estetik ve sanatsal ürünlerde, yapı malzemelerinde sağlamlık ve görünüş güzelliği sağlar. [2]

2.1.2 Yüksek Fırın Cürufllu Çimentolar

Cürufllu çimentolar granüle yüksek fırın cürufunun portlant çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Cüruf içinde bulunan bileşikler aşağıda sıralanmıştır:

Gelenit: $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (mono kalsiyum silikat)

Volostonit: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (mono kalsiyum silikat)

Dikalsiyum silikat: $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Çiftli Silikatlar:

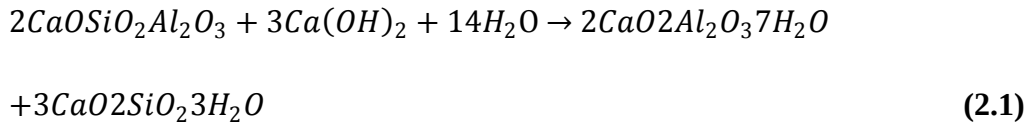
Montisenit: $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$

Akermonit: $2 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$

Mervinit: $3 \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$

Cüruf içindeki en önemli bileşik "gelenit" tir. Bu silikatlar cüruf içinde pasiftir. Az miktarda katılan klinkerin hidrasyonundan meydana gelen Ca(OH)_2 aktivatör rolü oynar. Silikatlar hidrate olarak yeniden çift silikatlar oluşturup çimentonun dayanım kazanmasını sağlar.

Aşağıda belirtilen reaksiyon cüruf hidrasyonunu göstermektedir:



Ortamda yeterli miktarda alçı taşı (%12) katılmış bulunduğunda kalsiyum alüminat hidratlar, kireç ve alçı taşı birleşerek mekanik dayanıma sahip kalsiyum sülfat alüminat hidratları (etrenjit kristalleri) oluştururlar:

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} = \text{Etrenjit}$ (Çözünmüş fazla meydana gelmiştir). Cürufsuz çimentoda az miktarda etrenjit hekzagonal sistemde kristalleşir. Cürufli çimentoda ise kristalleşme iğnecikler şeklinde olup bunlar bağlayıcı rol oynadıklarından dayanımı yükseltirler. Sonuç olarak Portlant çimentosu hidrasyonunda meydana gelen Ca(OH)_2 cürufli çimentoda bulunmamakta veya çok az bulunmaktadır [3].

2.1.2.1 Cürufun Camsı Yapısı ve Kristalitesinin Etkisi

Aynı portlant çimentosu ve yedi değişik granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen cürufli çimentolar üzerine yapılan bir mikro yapı araştırmasında cürufun hidrasyon hızıyla, rekristalize hale getirildikten sonra, içerdiği akermanit (C_2MS_2) miktarı arasında 0,98 korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı saptanmıştır. Buna göre, rekristalize cüruf içindeki akermanit miktarı ne kadar yüksekse cüruf o kadar yavaş hidrate olmaktadır [4].

2.1.2.2 Çimentoda YFC İçeriğinin Mekanik Dayanımlara Etkisi

Cürufların hidratasyon reaksiyonu yavaştır. Bu yüzden cürufllu çimentolarda erken yaşlardaki dayanım daha düşüktür. Güner'in değişik oranlarda (%0-20-40-60-80-90-100) YFC içeren bağlayıcı karışımları kullanarak standart çimento harcı numuneleri üzerinde yaptığı çalışmasında 3 ve 7 günlük dayanımların YFC içeriği arttıkça sürekli olarak azaldığı, 28 günlük dayanımlarda %60 cüruf içeriğine kadar dikkate değer bir artış olduğu, 90 günlük dayanımlarda yine %60'a kadar cüruf içeren bağlayıcı karışımlarında bir azalma, olmadığı görülmektedir. Su/(Cüruf+Çimento) oranının düşürülmesi, yüksek sıcaklık uygulaması veya cürufun daha ince öğütülmesi ile cürufllu çimentoların erken yaşlardaki dayanımı yükseltilebilmektedir [6,7].

V.Sivasundaram ve V.M. Malhatra'nın yapmış olduğu çalışmada süper akışkanlaştırıcı kullanılmış ve hava sürüklenmiş düşük miktarlarda ASTM tip I çimento ve yüksek dozajda yüksek fırın cürufu içeren betonlar anlatılmıştır. Cüruf, kuzey Ontarioda ki bir kaynaktan elde edilmiştir. Üç seri beton karışımı değişik dozajlarda çimentoyla (100, 125 ve 150 kg/m³) yapılmıştır. Betondaki cüruf oranı toplam bağlayıcı madde miktarına göre %50 ile %75 arasında değişmektedir. Karışımlardaki su oranı 115 kg/m³ de sabit tutulmuş ve süper akışkanlaştırıcı sayesinde yüksek çökme değerlerine ulaşılmıştır. Taze beton özellikleri hesaplanmış ve beton numunelerin basınç ve eğilme mukavemetleri, elastisite modülleri, kuru rötreleri, klor iyonu penetrasyon dayanıklılıkları ve sülfat dayanıklılıkları hesaplanmıştır.

Cüruf miktarının artmasıyla işlenebilirliğin düştüğü gözlenmiş, ayrıca su/çimento oranının 0,30'un altına düşmesiyle işlenebilirlik aniden azalmıştır. Betonlardaki otojen ısıнын düşmesinin de yüksek dozajda cüruf içeriğiyle ilgili olduğu düşünülmüştür. Maksimum sıcaklık düşüşü 5,5°C'dir.

7 günden sonra ilerleyen zamanlarda da bütün yüksek cüruf dozajlı betonlarda kontrol betonlarıyla karşılaştırılacak kadar birbirine yakın basınç dayanımları elde edilmiştir.

91 günlük, 300 kg/m³ bağlayıcı oranına sahip betonlardan birisi 50 MPa değeri aşarak en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Ayrıca yüksek dozajda cüruf içeren betonların daha geç yaşlarda kontrol betonuna göre daha iyi mukavemet değerleri

verdiği tespit edilmiştir. 250 kg/m³ bağlayıcı oranına sahip cürüflu betonların dayanım değerleri düşük çıkmıştır.

14 günlük cürüflu betonların eğilme dayanımları çoğunlukla 8 MPa gibi bir değer vermiştir ve bu da kontrol betonunun değerlerinden yüksektir. Ayrıca 28 günlük cürüflu betonların elastisite modülü yaklaşık olarak 42 MPa gibi yüksek bir değer almıştır. Klor iyon penetrasyon direnci genel olarak cürüflu betonlarda normal betonlara göre yüksek çıkmıştır.

2.1.2.3 Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri

Cürüflu çimentoların hidrasyonunda granüle yüksek fırın cürufuyla portlant çimentosu arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Normal inceliklerde (3000 cm²/g) öğütülmüş olan cürüflu çimentolarda klinker özellikleri, çok ince (6000 cm²/g) öğütülmüş olanlardakine göre, daha önemlidir. C₃S 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 klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır. Cürüflu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Aynı öğütme sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur [5].

VVang Fu - sheng, Sun Rui-lian, Cui Ying Jing'in yapmış olduğu çalışmada cüruf tozunun inceliğinin etkisi, aktivatör miktarları, kuru rötredeki değişikliğin tipi ve içeriği ve yüksek dayanımlı cüruf çimento malzemesinin dayanımı incelendi. Deneysel verilere göre %9 Na₂SiO₃ aktivatörü ve %10 portlant çimentosu eklemek yüksek basınç dayanımlı cürüflu çimentonun kuru rötre değerlerini portlant çimentosunun değerlerine yakın çıkarmıştır. Basınç dayanım değerleri de cürüflu çimentonun, portlant çimentosuna göre daha fazla çıkmıştır[8].

2.1.2.4 GYFC'nin Fiziksel Özellikleri

Yüksek Fırın Cürüflu Çimentolar Portlant Çimentosundan daha açık renklidir. Özgül ağırlığı, Portlant çimentolarına oranla biraz düşüktür. Priz süreleri, rötre, sünme, betonarmede donatı aderansı özellikleri bakımından portlant yüksek fırın cürufu çimentolarıyla portlant çimentoları arasında önemli farklılıklar yoktur [5].

Portlant Yüksek Fırın Cürufu çimentolarının hidratasyon ısıları kullanılan klinkerin ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu'nun kompozisyonu ve miktarlarıyla orantılı olarak değişir ancak, genel olarak, normal portlant çimentolarinkinden daha düşüktür.

2.1.3 Harç Çimentosu

En az %40 portlant çimentosu klinkeri ile çözünmeyen kalıntı miktarı en çok %50 olacak şekilde doğal puzolanlar ve uçucu kül gibi çeşitli maddelerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu ile elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. [7]

2.1.4 Uçucu Küllü Çimento

Klinkerle kütlece %10-30 arasında uçucu külün az miktarda alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre UKÇ 32,5 olarak tek tiptir. [9]

Ülkemizde artan enerji ihtiyacından dolayı kömürün yakıt olarak kullanıldığı çok sayıda termik santral kurulmuştur. Puzolanik özelliği olan uçucu küllerin atık malzeme olarak betonda kullanılması ekonomik ve çevresel yönden yararlar sağlarken betonun özelliklerini de geliştirmektedir. Uçucu küllerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri yoktur, ancak kireçle birleştikleri zaman bağlayıcılık özelliği kazanırlar.

2.1.5 Sülfata Dayanıklı Çimento

Bu çimento sülfatlı suların ve sülfatı zeminlerin olduğu ortamlarda sülfat etkisine karşı C_3A oranının %5'in altında olması nedeniyle dayanıklı olmakta ve bu çimentodan üretilen betonlar sülfat saldırısından zarar görmemektedir. Bu çimentolardan üretilen betonlar etrenjit oluşmaması nedeniyle uzun ömürlüdür. Yine C_3A oranının düşük olması sebebiyle hidratasyon ısıları portlant çimentolarına göre düşük ve priz süreleri daha uzundur. Deniz suyu etkisinin olduğu yerlerde, yeraltı sularında, istinat duvarlarında, kanalizasyon borularında, endüstriyel atıkların etkisinde olan yerlerde SDÇ kullanımı son derece uygundur. [10]

2.1.6 Erken Dayanımlı Yüksek Çimento

Özel olarak üretilmiş klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre EYÇ 52.5 olmak üzere tek tiptir. [1]

2.1.7 Katkılı Çimento

Katkılı çimento, klinkerle en fazla %19 oranında puzolanik maddenin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. 28 günlük basınç dayanımına göre KÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir. [1]

2.2 Mineral Katkılar

2.2.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Yalnız başına kullanıldıkları zaman bağlayıcı olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon sonucu bağlayıcı madde özelliği kazanan maddelere puzolan denilmektedir [11]. Puzolanların içinde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddeler kireç ile yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır [12].

Mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özelliklerine; terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ederler [13].

Sertleşmiş betonda da puzolanlar mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etkiler yapar. Dayanım ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı kullanımından etkilenirler. Geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma çözülme tekrarlarına dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi tüm durabilite özellikleri de bu katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerin özelliklere olan etkilerinin yönü ve şiddeti çoğu zaman katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır [13].

Puzolanların portlant çimentolu betonda kullanılması, su geçirimsizliğinin artması, hidrasyon ısısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, alkali-agrega reaksiyonu ile oluşan çatlamalara karşı dayanımın artması, işlenebilirliğin artması ve sülfat ve asit ortamlarında durabilitenin artması gibi amaçlara yönelik olarak yerine getirilir [11].

Puzolanlar, portlant çimentosuna ilave edildiklerinde çimentonun hidrasyon sonucu meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasındaki reaksiyon sonucunda puzolan

yine bağlayıcılık özelliğine sahip olurlar. Puzolanlar silisli veya silisli ve daha az miktarda alüminli malzemelerdir. Kendi başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur ya da çok azdır; ancak, çok ince taneli olduklarından, söndürülmüş kireçle birlikte su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcı özelliği kazanan malzemelerdir [14].

Temel puzolanik reaksiyon; puzolan içeren betonlarda puzolandaki silika ile portlant çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç arasında, sulu ortamda gerçekleşmektedir. Puzolanik reaksiyon sonucu portlant çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ya da alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırabilmektedir.

Puzolanlar elde edilişlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her bir gruba giren puzolan türleri aşağıdaki **Tablo 2.1**'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri

Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diatome Toprağı	Yüksek Fırın Cürufu
Ponza Taşı	Silis Dumanı
Volkanik Tüfler	Demirli Olmayan Cüruf
Traslar	Pirinç Kabuğu Külü
Opalin Silika	

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanların türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı portlant çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Puzolanlarla belirli oranda puzolan içeren katkılı portlant çimentosu kullanımıyla betona dahil edilirler veya betona karıştırma esnasında çimentoya ilave veya ikameli olarak katılır. Aşağıdaki **Tablo 2.2**'de çeşitli puzolanların kimyasal bileşimleri verilmektedir. [14]

Tablo 2.2: Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri

	Ren Trası	Santorin	Napoli	Mecitözü	Kayseri	Uçucu Kül	Pişirilmiş Kıl
SiO₂	%54,6	% 63,2	%55,7	%64,47	%63,08	%42-50	%50,2
Fe₂O₃	%3,8	%4,9	%4,6	%1,50	%5,58	%5-10	%7,6
Al₂O₃	%16,4	%13,2	%19,0	%14,38	% 18,63	%16-30	%17,0
CaO	%3,8	%4,0	%5,0	%4,73	%5,07	%2-4	%5,1
MgO	%1,9	%2,1	%1,3	%1,38	%1,55	%0:5-9	%3,5
Diğer Maddeler	%12,5	%12,6	%14,4	% 13,54	%6,09	%4-10	%16,4

2.2.1.1 Puzolanik Reaksiyon

ASTM C 618 portlant çimentosu kullanımında doğal puzolanların kullanımı için kimyasal bileşimlerindeki SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ yüzdelerinin toplamı en az %70 (S+F+A=0,70) olması istenmektedir. Portlant çimentosunun puzolan ve su ile karışımı sonucu, puzolanda SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ amorf ya da zayıf bir kristal yapıda mevcut olduğunda, bu oksitlerin kimyasal olarak normal sıcaklıkta, portlant çimentosundaki kalsiyum silikatların hidratasyonu neticesinde oluşan kalsiyum hidroksit ile bağlayıcılık özelliği olan bileşikler oluşturmak için tepkimeye gireceği kabulü yapılır. Puzolanlar genellikle % 60 ila % 85 arasında SiO₂ içerirler. Bu yüzden ana puzolanik reaksiyon, portlant çimentosunun temel kalsiyum silikat reaksiyonuna benzer kalsiyum silikat hidrate oluşumunu kapsar.

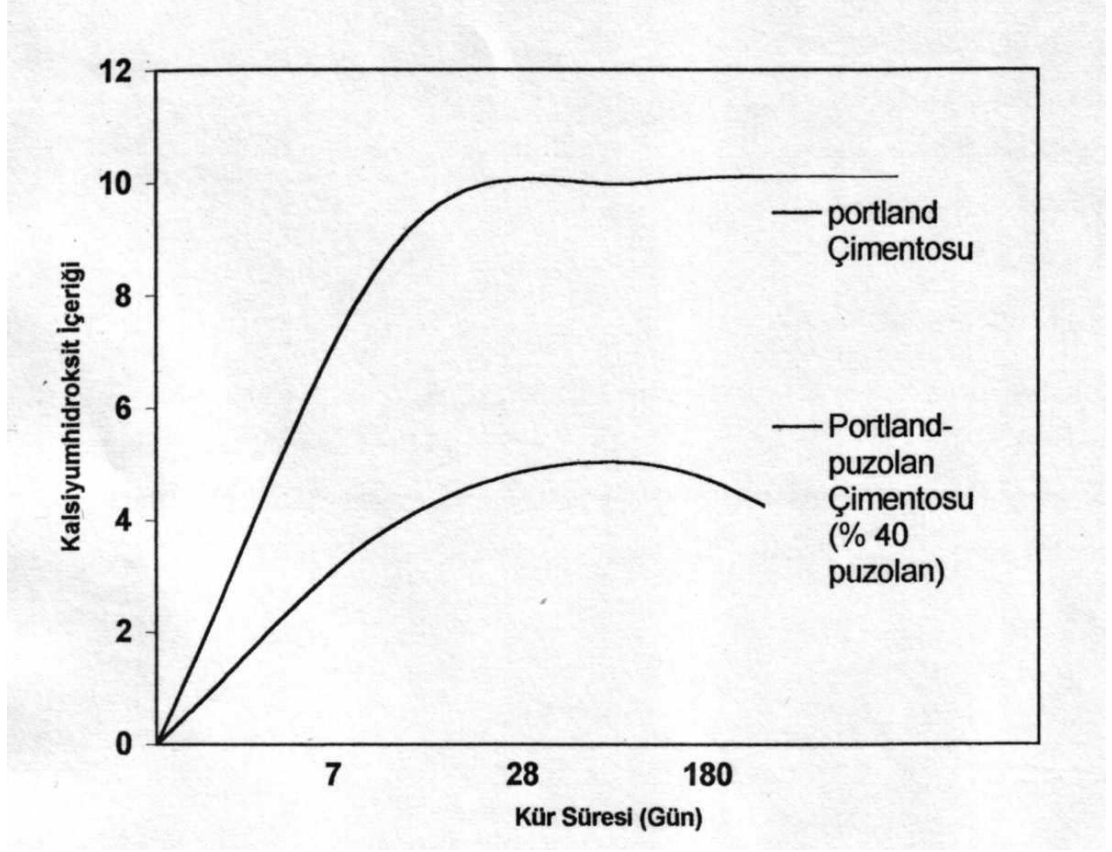


(Puzolanik Reaksiyon)



(Portlant Çimentosu Hidratasyonu)

Sadece portlant çimentosu ve portlant-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin zamanla değişimi aşağıdaki **Şekil 2.1**'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Bir hidrate portlant-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi

Puzolanik reaksiyon yavaştır; bunun neticesinde bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidrasyon ısısı düşüktür. Öte yandan, portlant çimentosundaki C_3S hidrasyonu hızlıdır. Bu nedenle bu reaksiyon ile birlikte dayanım kazanma hızı ve hidrasyon hızı yüksektir. Aynı zamanda belirtilmelidir ki, puzolanik reaksiyon kireç tüketen, portlant çimentosu reaksiyonu ise kireç üreten reaksiyondur. Puzolanik reaksiyon, sıcaklık, alkaliler ve sülfatlar gibi kimyasal katkılarla hız kazanabilir. [12]

Portlant çimentosunun bir puzolan ile karışımı hidrate olduğunda, puzolanik reaksiyonun ilerlemesi sonucu zamanla serbest kalsiyum hidroksitte $Ca(OH)_2$ azalma oluşur.

Puzolanik reaksiyonun serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanmada yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması, alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddeleri reaksiyonu hızlandırır [15].

Puzolan ve portlant çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı ham ürünlerdeki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Belli bir süre sonunda puzolan içeren betonların serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi de geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı artırır. Puzolanik reaksiyonun portlant çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi mukavemet kazanma hızlarını etkiler. İlk yaşlarda mukavemetler daha düşük olur ancak puzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir [15].

2.2.2 Uçucu Kül

2.2.2.1 Uçucu Külün Tanımı

En önemli yapay puzolanlardan biri olan uçucu kül, enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde toz halinde veya pulverize (öğütülmüş) taşkömürü ya da linyitin yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazlarıyla sürüklenen elektrofiltre ve siklonlarla havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik niteliğe sahip silisli ve alümin silisli atık maddesidir. Uçucu kül termik santrallerin yan ürünü olup kömürün içindeki inorganik maddeler fırın ortamında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak genellikle küresel tanecikler halinde oluşmaktadır. [16]

TS EN 450 'ye göre uçucu küller, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine TS EN 450'ye göre uçucu kül, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [17].

Bugün dünyada ortaya çıkan 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 göstermekte olup bu santrallerden yılda 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir[18].

Uçucu küllerin beton içindeki etkisi mikrofiller etkisi ve puzolanik etki olarak ikiye ayrılabilir. Puzolanik etki, mikrofiller etkisinin yanında azdır ve uçucu külün inceliğine göre puzolanik aktivite değişim gösterir. Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli derecede etkiler. Şengül ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Blaine Yüzeyi ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi **Tablo 2.3'de** göstermiştir. Blaine Özgül Yüzeyinin 222 m²/kg'den 604 m²/kg'ye çıkartmak 7 günlük basınç dayanımını %79,7 arttırmıştır.[19]

Tablo 2.3: Puzolanik aktivite deney sonuçları

	Uçucu kül	
	Öğütme öncesi, Blaine Ö.Y.: 222 m ² /kg	Öğütme sonrası, Blaine Ö.Y.: 604 m ² /kg
7 günlük basınç dayanımı, MPa	7.9	14.2
ASTM C618-85 standardı F türü için minimum basınç dayanımı, MPa	5.5	5.5

Uçucu küller ASTM C 618, TS 639 ve TS EN 197-1 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır. TS 639 'da belirtilen uçucu kül özellikleri **Tablo 2.4'te** gösterilmiştir. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küllerde SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %70'den fazladır ve CaO %10'nun altındadır. C sınıfı uçucu küllerde ise SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi %50'den fazladır ve CaO %10'nun üzerindedir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. TS EN 197-1'e göre uçucu küller Silissi (V) ve Kalkersi (W) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [19].

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksitten (Al₂O₃) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25' den fazla olması gerekmektedir [26].

Türkiye’de aktif olarak çalışan 11 adet termik santral vardır. Bunlardan sadece Çatalağzı Termik Santrali’nden F tipi uçucu kül elde edilmektedir. Diğer termik santrallerden elde edilen uçucu küller ise C tipidir. Dünyadaki uçucu kül üretimi yaklaşık 600 milyon tondur ve bu miktarın %6’sı çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi 13 milyon ton civarındadır. Üretilen uçucu külün endüstride kullanımı oldukça düşüktür. Bunun iki sebebi vardır: 1) Uçucu kül hakkında yetersiz bilgi. 2) Uçucu kül özelliklerinin her zaman üniform olmaması [19].

Tablo 2.4: TS 639 'da Belirtilen Uçucu Kül Özellikleri

Özellik	Standart Sınırları
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %5
Rutubet	En çok %3
Kızdırma kaybı	En çok %10
İncelik (Blaine)	En az 3000 cm^2/g
P.A.İ.	En az kontrolün %70

Çimento inceliğinde olan bu malzemenin genel olarak puzolanik özelliği vardır. Bu konuda ilk araştırmalara 1930'da ABD'de başlanmış ve 1938 senesinde de ilk defa Chicago'da bir yolun yapımında çimentoya karıştırılarak kütle betonu üretiminde kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, malzeme kıtlığı nedeniyle bu malzemenin kullanımı gerek Amerika'da ve gerek Avrupa'da oldukça artmıştır. Fransa'da birçok barajın inşaatında uçucu kül %15-30 oranında çimentoya karıştırılarak kullanılmış ve bu suretle bağlayıcı madde tüketimini azaltma yoluna gidilip bunun sonucunda da önemli ölçüde enerji ekonomisi sağlanmıştır. Fransa'da senede üretilen 4 milyon ton civarında uçucu külün %25'i çimento üretiminde kullanılmaktadır. Birçok faydalı kullanma alanı olan ve daha önceki zamanlarda termik santraller için, fabrikadan uzaklaştırma bakımından, sorun olan uçucu kül günümüzde Avrupa ülkelerinde bir ticari mal gibi satılır hale gelmiştir.

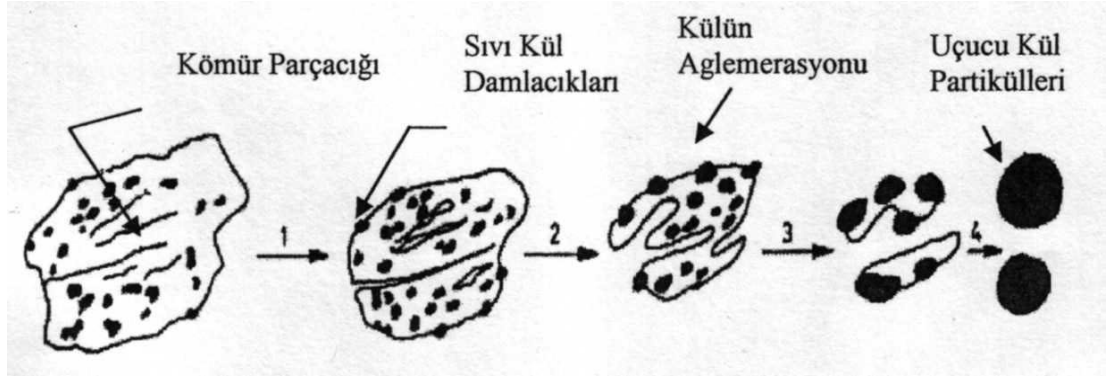
Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi sebebiyle puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve

küresel taneleri nedeniyle taze betonda işlenilmeyi artırır, ayrıca hidratasyon ısını azaltır. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda bağlayıcılık özelliği gösterir. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir [18].

2.2.2.2 Uçucu Külün Oluşumu ve Toplanması

Yanma, yakıtların genellikle havadan sağlanan oksijen ile hızlı oksidasyonu sonucu ısı ve sıcak yanma ürünlerinin açığa çıktığı kimyasal reaksiyondur. Fosil yakıtlar esas olarak karbon, hidrojen ve oksijenden oluşur. Bunlara ilave olarak daha az oranlarda kükürt, azot, klor ve diğer elementleri içerir. Normal şartlarda ve yeterli oksijen ortamında yakıtlar çoğunlukla CO_2 ve H_2O 'ya dönüşür. Ayrıca az miktarda bulunan kükürt, azot ve diğer elementlerin oksitleri oluşur. Eğer yanma tam olarak gerçekleşmezse ürün gazları içerisinde CO , O_2 , metan, kurum ve katran oluşur. [20]

Yanma süresince kömür yapısında organik matris veya organik bileşik (organometalik yapı) içinde bulunan elementler sıcaklığın etkisiyle buharlaşarak gaz faza geçerler. Zamanla uçucu organik maddeler tükenir. Son olarak inorganik yapı içerisinde bulunan uçucu kül matris elemanları (aluminosilikat, SiO_2 , vb.) küresel uçucu kül partikülleri oluşturmak üzere erirler. Uçucu külün oluşumunun safhalarını açıklamak üzere en çok kullanılan mekanizma **Şekil 2.2**'de özetlenmiştir.

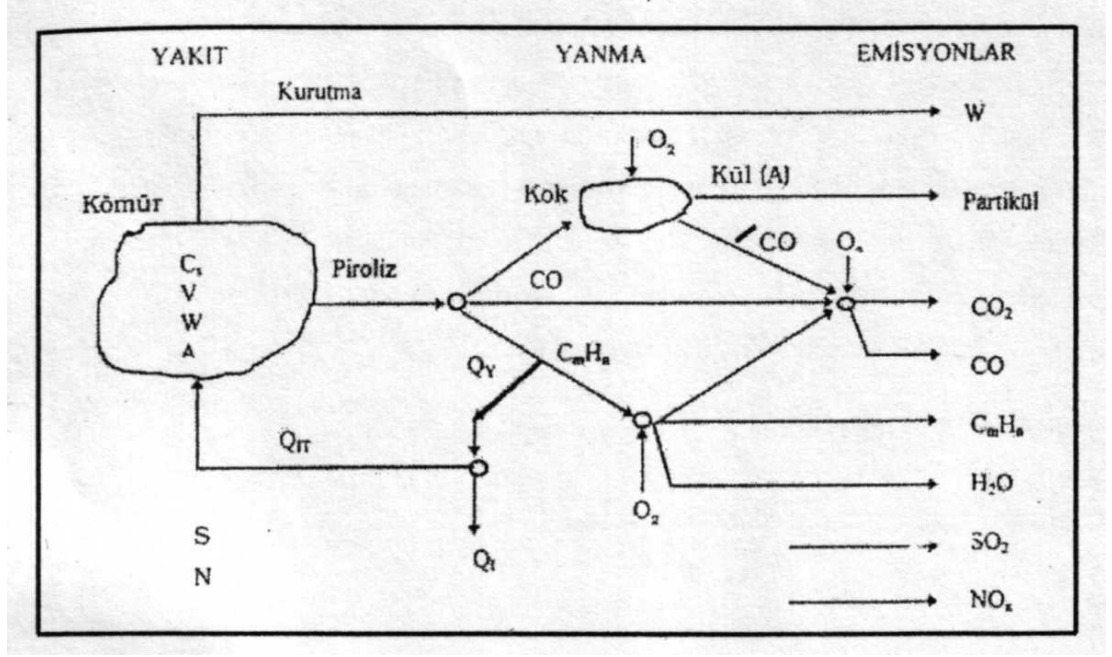


Şekil 2.2: Uçucu Külün Oluşum Safhaları

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi kömür kül içermez ancak yandığı zaman, içerdiği mineral maddelerin şu temel değişikliklere uğraması sonucu kül oluşur[21].

- Hidrat suyu kaybı,
- Karbonatların parçalanması,
- Sülfürlerin Parçalanması,
- Kömürün yanması sonucu oluşan metal oksitlerin, organik ve piritik kükürdün bir kısmını kükürt trioksit halinde tutması,
- Eğer sıcaklık yeterince yüksek ise, oksitler, silikatlar ve serbest silikanın tepkimeye girerek yeni bileşikler oluşması.

Külün kökeni kömürün içerdiği mineral maddeler olduğundan, özellikleri mineral maddenin bileşimine ve oksidasyonun gerçekleştirdiği şartlara bağlıdır. [22]



Şekil 2.3: Bir Kömür Taneciğinin yanması ve yanma ürünleri

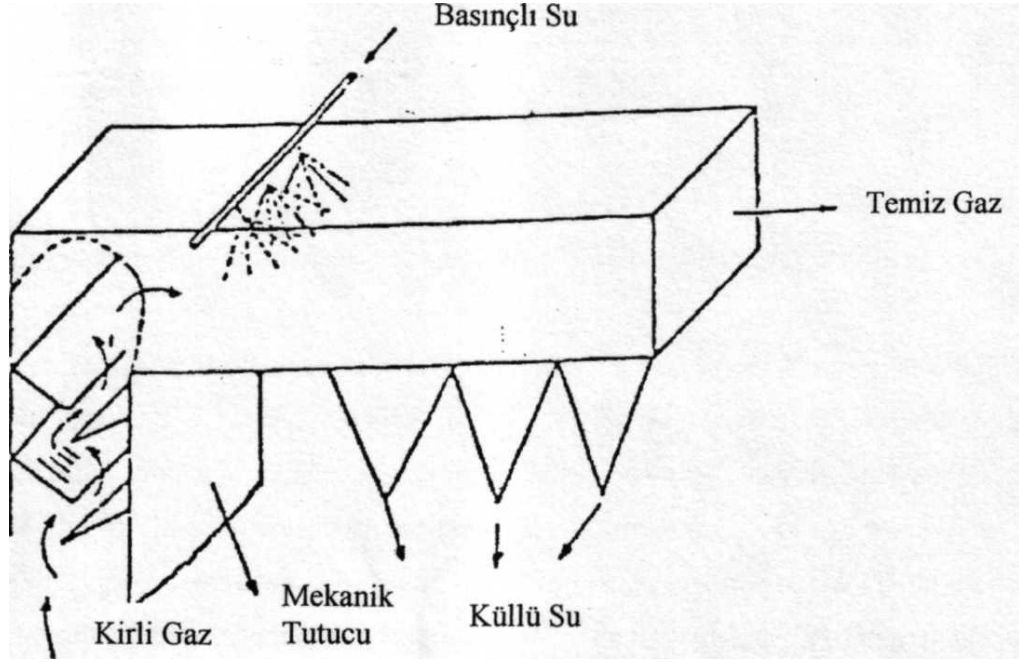
Kömürün bıraktığı kül miktarı saptanırken içerdiği pirit ve karbonat minerallerinin miktarları göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer kömürün pirit ve karbonat mineral içerikleri yüksek ise, kömür düşük sıcaklıkta yakılarak piritin, karbonat minerallerinin parçalanma sıcaklığının altında ayrışması sağlanmalıdır. Böylece, kömürde kalan ve yüksek sıcaklıkta oluşan bazlarla tepkimeye girebilecek olan kükürt miktarı azalmış olur. Bu amaçla, ASTM D 3174 standardına göre, soğuk fırına konulan kömür numunesi bir saat içinde 500°C'ye ve iki saat içinde ise 750°C'ye ısıtılır ve ağırlığı sabit kalana kadar fırında bekletilir. Kömürün ince tabaka halinde külleştirilmesi de külde kalan kükürt miktarını azaltmaktadır. [20]

Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır:

- Elektro filtrelerde Toplama
- Nemlendirme (Şekil 2.4)
- Siklonlarda Toplama (Şekil 2.5)
- Filtrelerde Toplama
- Ultrasonik Çöktürme
- Kontrol Prosesleri

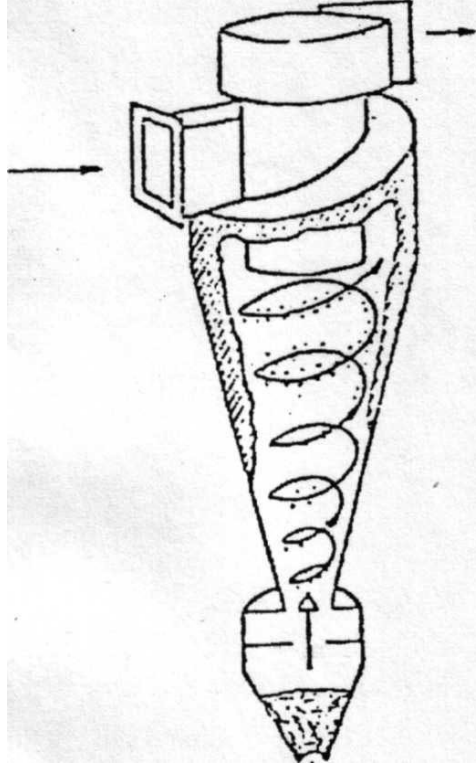
Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri, elektro filtre ve siklonlarda toplamadır. Uçucu küllerin tane boyutunun büyük olduğu durumlarda

siklon gibi mekanik tutucular, küçük olduğu durumlarda ise elektro filtreler kullanılır.



Şekil 2.4: Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması

Uçucu küllerin su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanan nemlendirme yöntemi çok su tüketmekte olup, toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyeti sebebiyle pek kullanılmamaktadır. [24]



Şekil 2.5: Siklon ile uçucu küllerin tutulması

2.2.2.3 Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal özellikleri

Elde edilen atık malzemenin %75 ila 80'ni oluşturan uçucu kül genel olarak gri veya kiremit kırmızısı rengindedir; içlerinde yanmamış karbon (yanmamış kömür parçacıkları) miktarı fazla olduğu takdirde renkleri daha koyudur. Tipik olarak küresel şekle sahip olan uçucu kül parçacıklarının çapları 0,5- 150 mm arasında değişim göstermektedir; bu parçacıkların %75'inin veya daha fazlasının çapı 45mm'den daha küçüktür. Kül parçacıklarının içi dolu veya boş olabilmektedir. İçleri boş olan kül parçacıklarının miktarı toplam külün ağırlık olarak yaklaşık %5'i, hacim olarak %20'si kadardır. Uçucu küllerin yoğunluğu 2.2-2.7 g/cm³ aralığında değişmektedir [11]. İçerdiği maddeler bakımından incelendiğinde uçucu küllerin puzolanik özelliğe sahip olması beklenir [25].

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik kökeni ve süreç koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz kaplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler silisyum (SiO₂), alüminyum (Al₂O₃), demir (Fe₂O₃) ve kalsiyum (CaO) olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Magnezyum (MgO), sülfür (SiO₃) ve alkali oksitlerde minör bileşen olarak bulunmaktadır. Temel oksitler olan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO'nin miktarları,

uçucu külün silisli veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıklarda değişmektedir. Buna göre SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 genellikle %2-2,5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10'a kadar yükselmektedir. Ancak TS EN 450 standardı SO_3 değerini en fazla %3 olarak sınırlamaktadır [18,19].

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. TS EN 450 standardı kızdırma kaybını %5 olarak sınırlamıştır [18,19].

Uçucu külden reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az %25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise, düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir [19,27].

Ülkemizde üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları ile TS EN 450, TS 639 ve ASTM C 618 standartlarına göre limit değerleri **Tablo 2.5**'de verilmiştir[18].

Tablo 2.5: Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve TS EN 450, TS 639 ile ASTM C 618 limit değerleri

Uçucu kül	Orhaneli	Seyitömer	Yatağan	Soma	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
oksit %'si							F	C
SiO ₂	47.48	54.49	51.50	43.39	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	24.17	20.58	23.08	21.71		-	-	-
Fe ₂ O ₃	8.03	9.27	6.07	4.07		-	-	-
S+A+F	79.68	84.34	80.65	70.76	-	>70.00	>70.00	>50.00
CaO	11.38	4.26	10.53	22.23		-	-	-
MgO	2.27	4.48	2.42	1.65	-	<5.00	-	-
SO ₃	2.49	0.52	1.32	2.07	<3.00	<5.00	<5.00	<5.00
K ₂ O	2.47	2.01	2.54	1.09			-	
Na ₂ O	0.35	0.65	0.77	0.30	-		-	
K.K	1.11	3.01	1.06	2.64	<5.00	<10.00	<6.00	<6.00

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve proses koşullarına bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı (kristalsız) ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır. Uçucu külün mineralojik bileşimi (camı fazın durumu, kristal yapılan), külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO₂ açısından zengin, oldukça polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silisli veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanısıra aktif kristalize fazlardır. Burada, saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır[18].

Türkiye'de üretilen bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları **Tablo 2.6'**da verilmiştir [27].

Tablo 2.6: Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları

Mineral %	Uçucu Kil					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuartz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Magnetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4.0	0.1	6.0	2.0	3.0	7.0
Serbest CaO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1.0
Anhidrit	12.2		9.3	7.4		
Plagioclase	28		15	20	-	25
Camsı ve amorf faz	30	70	50	50	70	35

Tanecik şekli ve büyüklük dağılımında, kömürün kökeni ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, büyüklükleri $0.5 \mu m$ - $150 \mu m$ arasında değişen hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [18].

Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır. Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun $40 \mu m$ 'nin altında olması (10 - $20 \mu m$) ve şeklinin de genelde küresel olması pozitif aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır [18].

Uçucu külün özgül ağırlıkları 1,97 ile 3,02 g/cm³ arasında değişmekle birlikte beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları 2,2 ile 2,8 g/cm³ arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarlarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlığı daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha düşüktür [12]. **Tablo 2.7**'da bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel sonuçları verilmiştir [18].

Tablo 2.7: Bazı Türkiye uçucu küllerinin fiziksel özellikleri

Uçucu Kül	özgül Ağırlık g/cm ³	90 μ m Elek Bakiyesi %	45 μ m Elek Bakiyesi %
Orhaneli	2.18	2.6	7
Yatağan	2.12	24.7	50.1
Kemerköy	2.83	26.4	47.8
Seyitömer	2.13	3.2	47
Çatalağzı	2.00	21.4	38.7
Çayırhan	2.36	6.7	24.5

2.2.2.4 Uçucu Kül İçeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Yöntemleri

Yapılan uygulamalarda betonda uçucu kül kullanımı aşağıdaki amaçları sağlamak için kullanılmaktadır[28]:

- Çimento miktarını azaltarak, maliyeti düşürmek
- Hidratasyon ısını düşürmek
- İşlenebilirliği artırmak
- 90 gün ve sonrasında betonda istenilen mukavemeti sağlamak

Uygulamada uçucu külün beton içerisinde kullanılması iki şekilde olmaktadır:

1. Uçucu küllü çimentoyu portlant çimentosu yerine kullanmak,
2. Uçucu kül ilave bir bileşen olarak beton üretim sırasında betonun içine karıştırarak,

İlk uygulama ikinci uygulamaya göre daha basit ve daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmiş olur ve karışım oranlarındaki değişimin belirli bir sınır aralığında kalması sağlanır. İkinci uygulama olan uçucu külün ilave olarak betona katılmasında, karışım oranlarının farklı olması nedeniyle uçucu külün özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Bu uygulama ile uçucu kül özelliklerinin beton içinde tam olarak oluşmasına olanak sağlanır. [29]

Taze ve sertleşmiş betonda uçucu kül birçok görevi yerine getirir. Taze betonda uçucu kül genelde ince agrega olarak görev yapar aynı zamanda su ihtiyacını da azaltabilir. Sertleşmiş beton halinde ise, puzolanik özelliğinden dolayı uçucu kül bağlayıcı matrisin bir bileşeni halini alır ve mukavemet ile durabiliteyi artırır.

Uçucu küllü betonun karışım hesabıyla ilgili yaklaşımın seçiminde iki yaygın kabul yapılır:

- Uçucu kül genellikle erken yaşlarda beton dayanımını düşürür.
- Eşit işlenebilirlik için uçucu küllü beton sadece portlant çimentosu içeren betondan daha fazla su gerektirir.

Her iki kabul de uçucu kül kullanılan beton karışım oranları problemine yaklaşım tarzını önemli ölçüde etkilemiştir.

Son zamanlarda, uçucu küllü betonun bileşenlerini bir bütün olarak ele alma ve de uçucu küllü betonu bir denk referans betonla karşılaştırmadan tek bir malzeme olarak inceleme eğilimi vardır. Bu farklı görüşlerin sonucunda, uçucu külün betona katılımında üç temel karışım oranı metodu geliştirilmiştir[28].

1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması

(Basit yer değiştirme yöntemi)

2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması

(İlave yöntemi)

3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması (Kısmi yer değiştirme yöntemi) bu yöntem ikiye ayrılır:

a) Modifiye edilmiş yer değiştirme yöntemi

b) Rasyonel oranlama yöntemi

1. Basit Yer Değiştirme Yöntemi

Basit ikame metodu, uçucu külün portlant çimentosunun bir kısmı ile belirli bir oranda doğrudan yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Yapılan araştırmaların çoğunluğu göstermektedir ki, portlant çimentosunun hangi yüzdeyle olursa olsun ister hacimce ister ağırlıkça bire bir uçucu küle yer değiştirmesi halinde betonun basınç, eğilme dayanımının üç aya kadar olan nem kürü durumunda düşmekte olduğunu, altı aydan daha fazla sürede ise daha fazla dayanım artışı olduğunu

göstermiştir. 3-6 ay sonrasında , %20 'ye kadar uçucu kül ikamesi portlant çimentosu betonuna göre bu yöntem dayanım artışına neden olmaktadır. Uçucu kül ilk defa kullanıma girdiği kütle beton uygulamalarında, bu erken yaş dayanım azalmaları arzu edilen ısı yükselişi azalmasına nazaran daha az yapısal öneme sahiptir. Çoğunlukla bu tip uygulamalarda bu metot kullanılmıştır. [30]

2. İlave Yöntemi

Bu yöntemi, karışımda kullanılan çimento miktarında bir azaltma yapılmadan uçucu kül eklenir. Beton içerisindeki efektif bağlayıcı miktarı bu yöntem sayesinde artırılır. Diğer karışım ayarlamaları agrega bileşiminin değiştirilmesiyle yapılır.

Bu yöntemin bir uygulaması Price tarafından yapılan Güney Saskatchewan baraj inşaatı için beton malzeme araştırması sonucunda oluşmuştur. Sülfatın mukavemetinden dolayı minimum bir çimento faktörü ve çimentodan çok ince agrega yerine bir puzolan kullanmanın önemli olduğu düşünülmüştür. İlave yapılan uçucu külün tüm yaşlarda genellikle dayanım artışına sebep olduğu bulunmuştur. Artışların yedi güne kadar az olduğu fakat üç aylık ve bir yıllık periyotta 6.9 MPa. düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir. Uçucu kül ilavesi ile elde edilen artışların aynı miktarda çimento ilave edilmesiyle edilen artışlara eşit veya bu artışlardan fazla olduğu gözlenmiştir.

3. Kısmi Yerdeğiştirme Yöntemi

Uçucu külün kullanılması için geliştirilen üçüncü yöntem, ince agregada ve su içeriğinde bir ayarlama yaparak, ağırlıkça bir miktar fazla uçucu külle yer değiştirilecek bir miktar çimento gerektirir. Çimento, su ve ince agrega yerine kısmi yer değiştirme yapılarak, çimento+uçucu kül miktarının arttığı durumlarda, dayanım gelişimi ve ekonomi için karışım optimizasyonu kavramı ortaya çıkar. Metodun iki değişik hali vardır. Orjinal şeklinde buna modifiye yer değiştirme denilmektedir. Son zamanlardaki uygulamada meydana gelen gelişmelerle rasyonel karışım yöntemi denilen yöntem ortaya çıkmıştır.

a. Modifiye Yerdeğiştirme Yöntemi

Bu yöntemde karışım oranlarının modifikasyonu ile ilk yaşlarda kontrol betonu ile kıyaslanabilir dayanıma sahip uçucu küllü beton üretilebileceğini göstermiş olan Lovevvel ve Washa'nın 1958 yılında yaptıkları çalışmaya dayanmaktadır. Bu çalışmanın temel esasları şu şekilde özetlenebilir[28]:

Uçucu kül ile yapılan, 3 ve 28. günler arasındaki yaşlarda, yaklaşık olarak aynı basınç dayanımını sağlayabilmek için uçucu kül ve çimento ağırlığı kıyaslanabilir dayanımlı portlant çimentolu karışımındaki çimento ağırlığından fazla olmasının gerekliliğidir.

1960'lı yılların başlarından itibaren yapılan çalışmalar sonucunda anlaşıldığı üzere, uçucu küllü betonun işlenebilirlik ve dayanım açısından istenilen koşullara uyması için, gerek dayanıma ve gerekse işlenebilirliğe etki eden uçucu külün özelliklerinin, karışım oranının belirlenmesi sırasında her yönüyle ele alınması gerekmektedir. Bu anlayış Abrams'ın dayanım ve su-çimento oranı arasındaki ilişkisinden yola çıkmış ve ilk karışım oranlama yöntemlerinin gelişimi sırasında oluşmuştur.

b. Rasyonel Oranlama Yöntemi

Bu yöntem uçucu kül içeren betonlar için ilk kez Smith (1967) tarafından teklif edildiği kabul edilmektedir. Smith, kullanılan uçucu külün bağlayıcılık özeliğine göre değişen bir "etkinlik faktörü" (k) ileri sürerek karışımında kullanılması gereken çimento miktarı ve su/çimento oranı değerlerini elde edebilmek için çoktan beri süregelen karışım oranlama prosedüründe değişiklik yapmıştır. Bu etkinlik faktörü her uçucu kül için farklılık göstermektedir. Faktör uçucu kül içeren beton karışımlarının göstereceği performanstan ya da başlangıç test programlarından saptanır.

Bu yöntem İngiltere'de uygulanmış ve oranlama prosedürlerim basitleştirmek için bir takım tablolar hazırlanmıştır. Buna karşın Munday (1983) ise bu yöntemin uygulamadaki bazı görünen zayıflıklarına dikkat çekmiştir:

1. k değeri aynı yerden temin edilen uçucu küller için bile sabit değildir. Bu değer kullanılan çimentoya, kür koşullarına ve oranlaması yapılan betonun öngörülen dayanımına bağlı olarak değişir.
2. Arzu edilen işlenebilirliğe ulaşabilmek için, beton için gerekli su miktarı kullanılan uçucu küle göre değişecektir. Bir kül su ihtiyacını arttırmayabilirken bir diğeri artırabilir. Bu değişkenlik agrega miktarı uygun şekilde ayarlanarak dengelenebilir ancak bu pratik bir yaklaşım olarak görülmemektedir. Uygulamada su miktarı ile ayarlama yapıldığından hedef dayanımda sapmalar da yüksek olmaktadır.
3. Bu metot birçok amaç için komplekstir ve belki de pratik olarak uygulanabilir değildir denilebilir.

Amerikan Beton Enstitüsü (1981) "Normal, ağır ve kütle betonların karışım oranlarının seçimi için standart uygulama " adı altında puzolanlı beton karışımların oranlanmasını da kapsayan kılavuzu revize edilmiş olarak yayınlanmıştır. Yayınlanan bu çalışmada ağırlıkça eşit miktarda malzeme kullanma ve mutlak hacimce eşit malzeme kullanma şeklinde iki ayrı yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımlardan hangisi kullanılırsa kullanılsın sonuçta elde edilen karışım fiilen basit yer değiştirme ile oranlanmış olmaktadır [28].

Kanada'da ilave bağlayıcı malzemeler ve beton uygulamalarında kullanımları ile ilgili bir ulusal standart yayınlanmıştır(1982). Standart uçucu külün betonda kullanımına ek olarak aynı zamanda uçucu küllü beton karışımlarını oranlamak için bir de kılavuz sunmuştur. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım da Ghosh tarafından geliştirilmiş olan yöntem dayandırılmıştı.

İngiltere'de Munday ve arkadaşları (1983), 28. Günde yada daha erken yaşlarda hedeflenen herhangi bir mukavemeti elde etmek üzere uçucu küllü beton karışımları oranlamak için bir prosedür teklif ettiler. Bu yöntem ile karışım hesaplarını belirlerken, kullanılacak uçucu kül kaynağı için geçerli aşağıda birbirini takip eden ve altı adımda sıralanan dataların toplanması gerekmektedir [28].

- Su/çimento oranının belirlenmesi
- Serbest su miktarının seçilmesi
- Uçucu kül/çimento oranının belirlenmesi
- Çimento ve uçucu kül miktarının belirlenmesi
- Toplam agrega miktarının belirlenmesi
- Deneme karışımlarının yapılarak incelenmesi

Karışım oranlama için son zamanlarda ortaya çıkarılan yöntemleri, uçucu küllü betonları istenilen herhangi bir yaştaki dayanımlarının karşılaştırılabilir beton mukavemetinin daha da üstünde olacak şekilde oranlamanın mümkün olduğunu kanıtlamak üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlarla birlikte bu yaklaşımlar uygulamada kullanıldığında birkaç faktörün göz önüne alınması gerekir. Normal bir karışım oranlama prosedüründe olduğu gibi deneme karışımları yapılmalı ve beton bileşimleri düzenlenmelidir. Ayrıca, her uçucu kül farklı özeliğe sahip olduğundan deneme karışımının sağlıklı bir şekilde oluşturulması için kullanılan uçucu kül hakkında edinilen bilgilerden yararlanılması gerekir. Uçucu kül ile üretilmiş betonlar

kür boyunca sıcaklık ve nem koşullarına sıradan bir betondan daha hassas olduğundan herhangi bir yapının beton karışımını oranlamak için deneme karışımlarından elde edilen datalar kullanılırken bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

2.2.2.5 k Etkinlik Faktörünün Bağlı Olduğu Faktörler

Bolomey Dayanım Formülü :

$$F_c = K. \left(\left(\frac{C}{W} \right) - 0,5 \right) \quad (2.5)$$

Yukarıdaki formülde yer alan K katsayısının bağlı olduğu faktörler:

- Çimento dayanımı,
- Agreg granülometrisi
- Agreg geometrisi,
- Sıkıştırma yöntemi,
- Ortam koşulları,
- Numune boyut ve geometrisi [31]

Bolomey formülünden etkinlik katsayısı k hesap edildiğinde, doğal olarak yukarıda sıralanan faktörlere de bağlı olmaktadır. Aynı zamanda diğer bağlı olan etkenlerde şu şekilde sıralanabilir:

1. Uçucu külün cinsi ve kullanım miktarı
2. Çimentonun cinsi
3. Çimentonun dozajı
4. Öngörülen dayanım
5. Kür Koşulları
6. Agreg Boyutu
7. İşlenebilme (çökme miktarı)
8. Akışkanlaştırıcı katılırsa, akışkanlaştırıcının cinsi

k etkinlik faktörü aynı sınıf uçucu küller için dahi sabit olmadığından her bir uçucu küle ait k değerini belirlemek için gerekli olan testler yapılmalı ve sonuçta uçucu külün pozolanik özelliği belirlenmelidir. Çimentonun içerisinde bulunan kireç

miktarı da k faktörünü etkilemekte ve dozajın 350 kg/m^3 'ün üzerinde olması halinde bu etki önem kazanmaktadır. Sadece dayanım parametrelerine göre etkinlik faktörünün belirlenmesiyle uçucu külün kullanılabilirliğine karar verilmesi yeterli değildir. Dayanım ile birlikte kılcallık, su emme ve zararlı kimyasallara karşı dayanıklılık ve klor geçirimsizliği deneyleri de yapılmalıdır [28].

Uygulamalar sonucunda %30'un üzerindeki uçucu kül eklenmesi dayanımı düşürmekte, maksimum etkinlik %10 ile %20 arasındaki yer değiştirme oranlarında ortaya çıkmakta ve bu aralıkta dayanım fazla etkilenmemektedir, k etkinlik faktörünün değeri %30 'dan daha az uçucu kül kullanıldığında 0.5 değerinin civarında, oran %30'u geçtiği zaman ise k değerinin 0.2'ye yaklaştığı görülmektedir.

2.2.2.6 Uçucu Külün Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

Çimento su ile karışınca beton kütlesini neticede birleştiren bağlayıcı oluşturacak reaksiyonlar başlar; yeni tanecikler oluşur ve ilk tanecikler çözünür veya bağlayıcı ürünler ile kaplanır.

Reaksiyonlar sırasında düşük kalsiyumlu küller, büyük oranda küresel formlu ince agrega olarak rol oynarken yüksek karbonlu uçucu küller erken bağlayıcı reaksiyonlara katkıda bulunabilirler [28].

İşlenebilirliğin kontrol edilmesi karışım hesabının amaçlarından bir tanesidir. Bundan dolayı uçucu külün optimum kullanımı gerçekleştirilecekse, taze beton jeolojisindeki rolünün anlaşılması esastır.

- İşlenebilirlik, Su İhtiyacı ve Terleme Üzerine Etkisi

Çimento ve uçucu kül içeren betonun mutlak hacmi, benzer uçucu külsüz betonunkini geçer. Bunun nedeni, çimento yerine ikame edilen uçucu kül kütlesinin genellikle eşit veya fazla olmasından ve de uçucu külün düşük özgül ağırlığa sahip olmasından ileri gelir. Kullanılan oranlara bağlı olmakla birlikte, hamur yapısındaki hacim artışı, geliştirilmiş plastisiteli ve daha iyi kohezyonlu beton meydana getirir. Ayrıca, CaO üzerine SiO_2 konsantrisindeki artış ve yüksek alkalın taze beton içindeki çimento ve uçucu kül tanecikleri dağılımının stabilitesini artırır.

Uçucu kül çimento akış davranışını değiştirir, üstelik genellikle küresel olan uçucu kül tanecikleri belirli çökme değeri için çoğunlukla karışım suyunun azalmasına imkân verir. Uçucu kül, su azalmasına ilave olarak katı-sıvı oranını artırır. C sınıfı

küller genellikle, beton işlenebilirliğini önemli ölçüde etkileyecek 10 µm'den ufak taneciklere yüksek oranda sahiptir.

Hindistan uçucu külü ile yapılan birçok deneylerde, betonun su ihtiyacının bütün deneylerde arttığı ortaya çıkmıştır. Çoğunlukla, zayıf su isteği karakteristikleri, fazla karbonlu ve kalın taneciklerin yaygın olarak bulunduğu eski santrallerde ortaya çıkmaktadır. İnce uçucu külün işlenebilirliğin gelişiminde daha kalın uçucu külden daha etkin olduğu bulunmuştur. [28]

1981 yılında Johnson, Cape Town'da yapılan çoğu betonda bölgesel olarak mevcut kum kaynaklarında yeterince ince malzeme olmamasına bağlı olarak aşırı terleme problemlerinin yaşandığını saptamış, bu betonlarda uçucu kül kullanarak toplam hamur hacminin artırılması ile terleme probleminin üstesinden gelinebileceğini belirtmiştir [32].

Okada ve arkadaşları kendi kendine yerleşebilen su altı betonlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmasını araştırmışlar ve üretilen betonlarda uçucu kül ve cüruf oranının yükseltilmesiyle akıcılığın arttığı gözlenmiştir. Carles-Gibergues ve Husson desülfirizasyon işlemi sonucu uçucu külün özgül yüzeyinin arttığını ve sabit işlenebilme için daha fazla su gerektiğini gözlemişlerdir [13].

Ukita ve arkadaşları değişik tane gruplarına ayrılmış uçucu kül kullanarak betonlar üretmişler, maksimum tane boyutu 10 mikron ve özgül yüzeyi 7670 cm²/g olan uçucu külün işlenebilmeyi iyileştirdiği, betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemlemişlerdir [33].

Kim ve arkadaşları yüksek mukavemetli beton üretiminde %30'a varan ikame oranlarında uçucu külün işlenebilmeyi azalttığını ve sabit çökme değeri için gerekli su miktarının arttığını gözlemlemişler ve kullandıkları uçucu kül tanelerinin pürüzlü yüzeyi ve boşluklu yapısının buna neden olduğunu ileri sürmüşlerdir [33].

Schiepi ve Hardtl, uçucu küllü betonlarda taze betonun işlenebilirliğinin artmasının uçucu küllerin inceliğinin artması sonucu olduğunu söylemişlerdir [34].

Mora ve arkadaşlarını, değişik tane gruplarına ayrılmış uçucu kül ile ürettikleri ıslak kıvamlı harçlarda uçucu kül miktarının artışıyla yayılma değerinin arttığını ve uçucu külün ortalama tane boyutunun azalmasıyla da harcın akıcılığı arttığını saptamışlardır [33].

Akman ve Erdiñ F sınıfı uçucu kül kullanarak yaptığı çalışmada yüksek oranda uçucu kül katılımı ile klor geçirimsizliğinin büyük oranda (%50-100) azaldığını saptamışlardır. Uçucu külün klor geçirimsizliğini azaltan etkisinin ileriki yaşlarda daha fazla olduğunu saptamışlardır. Bu çalışmadan çıkan başka bir sonuç ise uçucu kül miktarı çok düşük olursa, örneğin %20'nin altında, geçirimsizlikte beklenen yarar elde edilememektedir [35].

2.2.2.7 Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri

- Dayanım Gelişimi

Uçucu kül içeren betonlarda, basınç ve eğilme mukavemetlerinin kazanımı birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan bazıları uçucu külün, betona yerleştirilme şekli (çimentoya ilave edilmesi veya çimentodan bir miktar azaltarak çeşitli miktarlarda kür eklenmesi), puzolanik aktivitesi, kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu, ortam sıcaklığı ve diğer kür koşullarını sayabiliriz [13].

Uçucu külün inceliği çeşitli metotlarla arttırılarak, beton mukavemet gelişimini etkileyebilmektedir. 1992 yılında Tazawa ve arkadaşları, inceliği 200000-1300000 cm²/g olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok fazla arttığını gözlemlemişlerdir [13].

Joaquin ve arkadaşları F-tipi uçucu külle yaptıkları betonlarda ilk mukavemetlerinin kür şartlarından çok etkilendiğini gözlemişlerdir [13].

C sınıfı küller çoğu zaman erken yaşlarda F sınıfı küllerden daha yüksek reaksiyon hızı gösterirler. F sınıfı küller ile yapılan bir çalışmada, pek çok durumda, 45 μ m elekten geçen malzeme yüzdesi ile orantılı olarak tüm yaşlarda puzolanik aktivitenin arttığı neticesi çıkmıştır. Diğer bir çalışmada, eşit ağırlık esasına göre C sınıfı bazı uçucu küllerin portlant çimentosu kadar etkili olduğu ortaya çıkmıştır [36].

Yapılan bir çalışmada, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiği ve bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiği belirtilmiştir [37].

Diğer bir çalışmada, C tipi uçucu külün % 20, 30 ve 35 kullanım oranlarında 7 günde kontrol betonundan daha düşük mukavemetler elde edilmiş, % 20 ve 35 oranlarında 28 günde kontrol betonun mukavemetine erişilirken, 80 günde % 20 kül içeren

karışımın mukavemeti kontrol betonunu geçmekte, % 50 kül içeren beton ise daha düşük mukavemette kalmaktadır [37].

Azaltılan çimento miktarından daha fazla kül kullanıldığı zaman basınç dayanımı katkısız betonunkine eşit ve hatta daha yüksek bir seviyeye getirilebilmektedir. Bu sonuçlar, beton karışımının tipine, kullanılan malzeme cinsine ve fazladan katılan kül miktarına göre değişmektedir [38].

- Elastisite Modülü

Uçucu kül içeren betonların elastisite modülleri, betonların basınç dayanımlarına benzer nitelikte özellikler gösterir. Erken yaşlarda biraz düşük, ilerleyen yaşlarda ise daha büyüktür. Genelde uçucu kül, uçucu küllü ve külsüz aynı dayanımdaki betonlar kıyaslandığı zaman elastisite modülünü artırır. Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de arttırmaktadır [28].

Betonun elastisite modülü, büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile beton dayanımından (su/çimento oranı ve kür koşulları) etkilenir. Genel olarak dayanım azaldığı zaman elastisite modülü de azalır. Mineral katkı ilavesinden doğrudan etkilenmez.

Bilodeau ve Malhotra %58 oranında F tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bunun da hidrate olmayan uçucu kül tanelerinin agrega niteliğinde etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir [32].

Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de etkiler. Elastisite modülü, basınç dayanımı gibi, uçucu külsüz beton ile kıyaslandığında erken dayanımlarda düşüktür ve son dayanım değerinde de yüksektir [39].

C sınıfı küller üzerinde yapılan bir çalışmada uçucu küllü betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı ilk yaşlarda biraz küçüktür ve daha sonraki yaşlarda ise uçucu külsüz betonlara nazaran bir miktar yükselir. Uçucu külün elastisite modülü üzerine olan etkisi, uçucu külün basınç dayanımı üzerine olan etkisi kadar belirgin değildir. Yine aynı çalışma neticesinde, uçucu kül kullanımından çok, çimento ve agrega karakteristiklerinin elastisite modülü üzerine etkisi olacağı belirtilmektedir [36].

- Sünme ve Rötire

Yapılan çalışmalara dayanarak, erken yaşlarda uçucu kül içeren betonlar kontrol betonlar ile kıyaslandığı zaman daha büyük, ilerleyen yaşlarda ise daha küçük sünme şekil değiştirmeleri yaptığı ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, uçucu külün betonun sünmesi üzerinde yaptığı etkinin öncelikle basınç dayanımını etkileme miktarı ile sınırlı olduğu ile ortak bir fikir vardır [40].

İçerisinde mineral katkı bulunan betonların rötire davranışı genelde sünme davranışına benzerlik göstermektedir. Yapılmış çalışmalarda, %25 oranına kadar yer değiştirilerek uçucu kül kullanılmış ve iyi şekilde kür görmüş betonlarda önemli bir fark görülmemiştir. Bir başka çalışmada ise, pek çok uçucu küllü beton ile kontrol betonu arasında rötire yönünden çok az miktarda fark görülmüştür [13].

Tecrübelerden, erken yaşlarda uçucu küllü betonların uçucu külsüz şahit beton ile kıyaslandığında daha büyük, ileri yaşlarda ise daha küçük sünme şekil değiştirmeleri yaptığı bulunmuştur. Ayrıca, uçucu külün betonun sünmesi üzerindeki etkisinin öncelikle basınç dayanımını etkileme miktarı ile sınırlı olduğu konusunda ortak bir fikir vardır [39].

Yüksek kireçli uçucu küller ile yapılan bir çalışmada, kontrol betonu ile % 20 uçucu kül içeren betonların sünme şekil değiştirmeleri arasında çok az fark bulunmuştur. Yüksek oranda ağırlıkça uçucu kül ilavesi ise (% 30-50) önemli derecede sünme şekil değiştirmelerine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, düşük dayanıma ek olarak mineral katkının düşük yoğunluğundan dolayı çimento hamurunun hacminin artmasıdır [39].

2.2.2.8 Uçucu Külün Bulunduğu Ortam Koşullarına Dayanıklılık Özellikleri

- Kılcal Geçirimsizlik

Betonun sahip olduğu birbirleriyle temas halindeki boşluk hacmi miktarı ölçüsünde, su geçirimsizliği vardır. Betonun geçirimsizliği bağlayıcı malzeme miktarı, su içeriği, agrega dane dağılımı, koruma ve kürün etkinliği gibi değişkenlere bağlıdır. Hidrate çimento tarafından salıverilen kalsiyum hidrat suda çözünür ve boşlukları suyun girişi için terk ederek sertleşmiş betonun dışına çıkar. Uçucu kül, puzolanik özellikleri ile kimyasal olarak kalsiyum, potasyum ve sodyum hidroksit ile birleşerek C-S-H oluşturur ve kalsiyum hidroksitin dışarı çıkma riskini azaltır. Sonuçta

geçirimsizlik azalır. Ayrıca uçucu kül birikintisinin azalan geçirimsizliği, su giriş hızını, korozyon kimyasallarının ve oksijenin girişini azaltır [36].

Çimento ve agreganın belli bir kompozisyonunda, genellikle beton ne kadar az geçirgen olursa aynı betonun su veya başka zararlı çözeltilere karşı dayanımının fazla olduğu söylenebilir [41].

Uçucu kül sadece su geçirimsizliğini sağlamakla kalmaz, ayrıca betonun gaz geçirimsizliği (O_2 , CO_2 , Cl^-) özelliğini de iyileştirir. Mineral katkı maddelerinin betonda dayanıklılığı arttıran fonksiyonlarının en başında betonun boşluk yapısının iyileştirmesi bunun sonucunda da geçirimsizliği azaltmaları gelmektedir. Dunstan ve arkadaşları yüksek oranda uçucu kül kullanarak orta ve düşük geçirimsizlik katsayısına sahip betonlar üretilbildiğini belirtmişlerdir [13].

Beton kütlelerinin içine zararlı çözeltilerin hareket etmesi veya çözünmüş reaksiyon ürünlerinin betonun dışına çıkması kimyasal etkilerin sebep olduğu betondaki zararın gelişim hızının belirlenmesinde önemli rol oynar. Beton kütlelerinin geçirimsizliği, bu sebeple zararlı kimyasal olayla ilgili kütle taşınımının belirlenmesinde temel oluşturur.

Torii ve Kawamura, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirimsizliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarına bağlı olmadan mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemlemişlerdir [13].

Yapılan bir çalışmada, açıkça anlaşılmaktadır ki betonun belli bir yaşta geçirimsizliği hidrate olmuş bağlayıcı malzeme miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Biraz puzolanik aktivitenin oluşabileceği 28 günlük kür sonrası, uçucu küllü betonlar kontrol betonundan daha geçirgen olmaktadır. 6 ay sonrası bu tersine çevrilmekte önemli miktarda su geçirimsizliği ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi muhtemelen puzolanik aktivitedir [41].

- Zararlı Kimyasallara Karşı Dayanıklılık

Sertleşmiş beton üzerindeki çevrenin oluşturduğu dış etkiler genellikle betonla temasta bulunan zemin, ırmak ve deniz sularının ve endüstri gazları ile kirlenmiş havanın etkileri şeklinde ortaya çıkar [42].

Zararlı kimyasallar serbest kireç ile reaksiyona girip su içerisinde çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve böylece zararlı kimyasalların beton içine girişi hızlanmaktadır. Sülfatlarda aynı tip reaksiyon sonucu genleşen ve betonda çatlaklar oluşturan etrenjit üretirler [14].

Biledeau ve Malhotra yüksek oranda uçucu kül içeren hava sürüklenmiş ve süper akışkanlaştırıcı içeren betonlarda buz çözücü tuzlara dayanıklılığın iyi derecede olmadığını gözlemlemişlerdir [28].

Beton gruplar kullanım sırasında değişik şekillerde sülfatlı ortamlarla karşılaşabilmektedir. Özellikle temel betonlarının bulunduğu doğal zeminler yanında yeraltı suları da sülfat tuzlarını taşıyabilir. Deniz suları değişik oranlarda sülfat içerirken asit yağmurları da bir başka sülfat etkisi oluşum şeklidir. Bunların dışında sanayi atıklarının uzaklaştırılması ve gübre uygulamalarında sülfat etkisi ortaya çıkabilir. Betonu sülfat etkisinden korumak için geçirimsizliği azaltmak fiziksel bir önlem olarak düşünülebilir. Bunu sağlamak için daha iyi yerleştirme, doluluk oranını yükseltme, su/çimento oranını azaltma (akışkanlaştırıcı ile) gibi yöntemler düşünülebilir. Öte yandan yüksek sıcaklıkta kür uygulamasının da sülfata dayanıklılığı artırdığı belirtilmiştir [43]. Uçucu küllerinde puzolanik reaksiyon sonucu serbest kireci bağlaması ve geçirimsizliği artırması nedeniyle zararlı kimyasallara dayanıklılığı artırdığı söylenebilir.

Erdoğan ve arkadaşları 3 değişik yüksek kireçli uçucu kül ile ürettikleri harç numunelerinde uçucu kül miktarının artması ile boy uzamaları lineer olarak artmaktadır. Yazarlar sülfata dayanıklılığı ölçmek için $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının sülfat rezidans faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmüşlerdir [33].

Tikalsky ve Carrasquillo %25, %35 ve %45 oranlarında uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada yüksek kireçli uçucu küllerin sülfata dayanıklılığı azalttığını, düşük kireçli küllerinde sülfata karşı dayanıklılığı artırdığını söylemişlerdir [44]. Fijestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı

incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını gözlemlemişlerdir[45].

- Alkali - Agrega Reaksiyonu

Ohga ve Nagataki uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğunu gözlemişler ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğunu saptamışlardır [14].

Yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin daha yüksek ikame oranları ile genişleme azalabilmektedir. Yüksek kalsiyumlu uçucu küller fazla miktarda alkali sülfatlar içerdiğinde, betondaki suda çözünebilir alkali miktarını artırma eğilimi gösterebilirler. Kökeni ne olursa olsun suda çözünen toplam alkali miktarı 2.5 kg/m^3 aştığında zararlı alkali - agrega reaksiyonu olacağına inanılmaktadır [39].

Çoğu zaman, alkali - agrega reaksiyonu neticesi oluşacak zararı önlemek için gerekli uçucu kül miktarı, betonun dayanım ve işlenebilirliği için gerekli olan optimum miktardan daha fazla olmaktadır [36].

- Donma - Çözülme Dayanıklılığı

Donma- çözülme ortamlarında, mineral katkı içeren betonları korumak için özel hava sürükleyici katkı maddesi gerekmektedir. Mineral katkı maddesi içeren ve içermeyen betonların don dayanımları ile ilgili bir çalışmada, hava sürükleyici olmayan, uçucu kül içeren betonların, portlant çimentolu kontrol betonuna göre daha düşük sonuçlar gösterdiği bulunmuştur [14].

Nasser ve Lai hava sürüklenmiş betonlarda hızlı donma-çözülme tekrarları yapmışlar ve %20 uçucu kül içeren betonların yeterli dayanım gösterdiğini ancak uçucu kül oranının artmasıyla durabilite faktörünün de azaldığını gözlemlemişlerdir [14].

- Deniz Ortamına Karşı Dayanıklılık

Beton yapı temellerinin sahil alanlarda tuzlu yeraltı suyu seviyesinin altında yapılması, kılcal su emme ve buharlaşma nedeniyle toprak altındaki betonda kristalleşmelere sebep olarak çimento hamurunda kimyasal hasara ve çeliğin korozyonuna sebep olur. Geçirimsiz bir beton, korozyonun durdurulması veya zararsız bir düzeyde bırakılması için gereklidir. Bu açıdan geçirimsizlik deniz suyundaki betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktördür.

Deniz ortamındaki betonlarda deniz suyunun meydana getireceği korozyona karşı alınması gereken önlemlerin başında ortama uygun çimento seçimi gelmektedir. Sülfata dayanıklılık açısından ele aldığımızda hidratasyon sırasında açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek boşluk yapısını azaltan puzolanik özeliği sahip uçucu kül gibi maddelerin kullanımının fayda sağlayacağı görülmektedir.

Dunstan ve arkadaşları yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olaylarına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir [33].

Paillere ve arkadaşları uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harç numunelerini yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların cürufu harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemişlerdir [33].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının, sürekli gel-git olayına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini belirtmektedir [37].

Mineral katkı ilavesi vasıtasıyla, çeliğin korozyonu ile oluşan betonun çatlama ve genişmesi üzerinde önemli etki oluşturmak mümkündür. Azalan önem sırası ile betondaki çeliğin korozyon derecesini kontrol eden anahtar faktörler geçirimsizlik, direnç ve karbonatlaşma olarak ortaya çıkmaktadır. Betonun geçirimsizliği, sadece karbonatlaşma hızını veya korozyon hadisesinin başlangıcı için değil, aynı zamanda korozyon olayının gelişimini etkileyen oksijen oranı ve rutubet akışı için de önemlidir. Betona mineral katkı ilavesi, geçiş bölgesindeki mikro çatlaklar beton geçirimsizliğinin temel kaynağı olduğundan, geçiş bölgesini güçlendirerek daha iyi sonuçlar elde edilmesine sebep olur [39].

Yapılan bir çalışmada, eşit ağırlık esasına göre % 30 uçucu kül ikame edilmiş betonlar, uçucu kül içermeyen betondan daha fazla karbonatlaşma yapmıştır. Uçucu küllü betonların 4 yıllık basınç dayanımları, uçucu kül içermeyen betondan % 18 daha düşük bulunmuştur [46].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılmış deniz yapılarında, 10 yıl sonra yapılan incelemelerde, donatının iyi korunmuş olduğunu gözlemişlerdir [37].

- Donatı Korozyonu ve Klorür Geçirirliiliği

Betonda kullanılan çeliğin korozyonuna sebep olan nedenler geçirirliilik, direnç ve karbonatlaşma sayılabilir. Betona mineral katkı ilavesi, beton geçirirliiliğinin temel kaynağı olan mikro çatlakların azalmasına ve dolu bir beton yani direnç yönünden iyi bir beton üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Korozyona karşı alınacak önlemler olarak, betonun çelik donatının üzerini yeterli bir kalınlıkta pas payı ile örtmesi ve geçirimsiz olması gerekmektedir [28].

Nagataki ve Ohga uçucu kül içeren ve içermeyen harçlarda klor iyonu ve karbonatlaşmanın donatı korozyonuna ortak etkilerini incelemişler ve su/çimento oranı 0,5 ve uçucu kül oranı %30 olan betonlarda NaCl kürünün karbonatlaşmayı azaltıcı etki yaptığını gözlemişlerdir [33].

Son zamanlarda buz çözücü tuzlar ve deniz suyundan kaynaklanan klor iyonları nedeniyle donatı korozyonuna maruz yapılarda uçucu küllü beton kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Betonun, fiziksel ve kimyasal açıdan donatı için üç yönden koruyucu görevi vardır:

- Donatı yüzeyinin etrafında alkalın bir ortam meydana getirir.
- Rutubet, oksijen, karbondioksit, klor iyonları ve diğer agresif maddelere karşı fiziksel ve kimyasal örtü görevi görür.
- Çelik donatı elemanları etrafında elektriksel etkilere karşı nispeten dirençli bir ortam sağlar.

Yapılmış olan çalışmalar sonucunda uçucu külün donatı korozyonuna karşı olumlu etki yaptığını söylenebilir.

Sirivivatnanon ve arkadaşları toplam bağlayıcı oranının % 40 'inin uçucu kül ile yer değiştirdiği hamurları su/bağlayıcı oranının 0.6 değerinde salt çimento hamurlarınıninkinden daha düşük korozyon oranına sahip olduğunu, su/bağlayıcı oranının 0.8 olması durumunda sağlanan yararın azaldığını gösterdiler [47].

Berry ve Malhotra çimento hamurları içindeki klor difüzyonunu sınırlamada uçucu küllü ve yüksek fırın cürufllu çimentoları normal ve sülfata dayanıklı çimentolardan daha etkili olduğunu gösterdiler [48].

Sonuç olarak dış klorürlerin girişine maruz ve klorun neden olduğu korozyonun görüldüğü yapılarda uçucu külün yüksek oranlarının kullanıldığı uçucu küllü betonların yeterli ve uygun olacağı kanıtlanmıştır [49,50].

Uçucu küllü betonlarda uçucu kül miktarına göre difüzyon katsayısı azalmaktadır. Ayrıca agregaların maksimum tane boyutu arttıkça, sadece portlant çimentolu karışımlarda klorür difüzyon katsayısı artmakta, uçucu küllü karışımlarda ise neredeyse sabit kalmaktadır. Bunun sebebi çimento hamuru ile agrega yüzeyindeki geçiş bölgesinden kaynaklanır. Bu yüzeyin özellikleri agrega boyutuna göre değişim gösterdiği gibi uçucu küllerin bu bölgeleri daha iyi doldurması ve uçucu külün puzolanik reaksiyonları ile de ilgisi vardır [51].

- Karbonatlaşma

İyi kür edilmiş düşük su/çimento oranına sahip betonlar ilk birkaç milimetrenin ötesinde karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar yeterince geçirimsiz olacaktır. Bir beton kütesinin içerisinde karbonatlaşma ilerlerse, geçirimsizlik artması, rötre meydana gelmesi, ortamdaki donatının korozyona karşı direncinin azalması gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir [28].

Branca ve arkadaşları su/çimento oranı 0.35, 0.50 ve 0.65 olan uçucu küllü betonlarda uçucu kül ilavesi ile karbonatlaşmanın azaldığını gözlemişlerdir. Fakat uçucu kül çimento yerine kullanıldığında karbonatlaşmayı ve korozyon riskini arttırmaktadır [14].

Gebauer 100cm x 50cm x 7cm boyutlarındaki betonarme plakları incelemiştir. Plakalara 7 gün 20°C'de ve %95 bağıl nemli ortamda kür uygulanmıştır. Ardından her karışıma ait bir plak dış havada test edileceği ortamda, kontrolü olan plakta rutubetli kür koşulları altında saklanmıştır. 28. ve 365. günlerde aynı betonların prizmaları üzerinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Gebauer karbonatlaşma derinliğinin[28];

- Dayanım azaldıkça
- Su/çimento oranı arttıkça
- Çimento içeriği azaldıkça
- Uçucu kül içeriği arttıkça arttığını belirtmiştir.

Sonuç olarak, iyi kür uygulanmamış ve çimento faktörünün düşük olduğu betonların karbonatlaşma ve diğer etkilere karşı dayanıksız olması muhtemeldir. Uçucu kül içeren bir beton normal bir betonla kıyaslanabilecek karbonatlaşmaya karşı etkisini göstermektedir.

- Sülfat Etkisi

Zararlı kimyasallar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girip su içerisinde çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve bu sayede zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hız kazanmaktadır. Sülfatlarda aynı tip reaksiyon sonucunda, genleşen ve betonda çatlaklara sebep olan etrenjit üretirler [14].

Erdoğan ve arkadaşları sülfata dayanıklılığı ölçmek için $\text{CaO/Fe}_2\text{O}_3$ oranının sülfat dayanımı faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmektedirler [40].

Genellikle dış kaynaklı olan sülfatlar ile kalsiyum sülfaloüminatları oluşturan reaktif fazlar arasında, Lea tarafından tanımlandığı gibi bir reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon nedeniyle meydana gelen hasar, betondaki C_3A miktarını minimize ederek azaltılabilir. Dikeou ve Pierce, ıslanma ve kuruma koşullarına maruz betonlarda kullanılan belli uçucu küllerin farklı tipteki bütün çimentolarla üretilmiş betonların sülfat dayanımını büyük oranda arttırdığını kanıtlamışlardır [36].

Freeman ve Carrasquillo, uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külü betona karıştırma sırasında katmaktan daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir [37].

Yapılan deneysel bir çalışma sonucu, yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) ve amorf kalsiyum alüminat içeren uçucu küllerin, betonun sülfat etkisine karşı hassasiyetini arttırdığı, düşük miktarda kalsiyum içeren uçucu küllerin ise betonun sülfat dayanımını geliştirdiği ortaya çıkmıştır [52].

- Aşınma

Liu, su altında aşınma testini kullanarak betonun aşınma erozyon direncini incelemiştir. Liu portlant çimentosu yerine hacimce %25 oranında uçucu kül ikame edilmiş betonlar ile normal betonları kıyaslamıştır. 90 gün kür edilmiş, ortalama basınç dayanımı 49 MPa olan uçucu küllü betonun aşınmaya karşı dayanıklılığı, benzer karışım oranlarına sahip, 28 gün kür edilmiş, aşınmaya karşı dayanıklılığı ile

karşılaştırılmıştır. 36 saatlik test periyodu sonunda iki betonun aşınma dirençleri arasında önemsenmeyecek farklılıklar gözlenmiştir. 72 saatin ötesindeki daha uzun periyotlu testlerde uçucu küllü beton normal betonla karıştırıldığında, uçucu küllü betonun aşınma ve erozyona bağlı olarak yaklaşık %25 nispetinde daha fazla kütle kaybına uğradığı tespit edilmiştir. [32]

Ukita ve arkadaşları toplam çimentonun %0-30'u oranında düşük uçucu kül kullanarak betonun aşınma direncini araştırmışlardır. Deney sonuçları göstermiştir ki; betonun aşınma direnci uçucu kül inceliğiyle birlikte yükselmektedir. %30 uçucu kül içeren betonun aşınma dayanımı, uçucu külsüz portlant çimentosu betonundan yüksek olduğu bulunmuştur[32].

2.2.2.9 Uçucu Külün Çeşitli Alanlarda Kullanılması

- Hafif Agrega ve Hafif Beton Üretimi
- Yüksek Mukavemetli Beton
- Katkılı Çimento Üretimi
- Rolkrit (Silindirle Sıkıştırılmış) Beton
- Hazır Beton

Diğer Kullanım Alanları

Belirttiğimiz alanların dışında uçucu külün kullanıldığı diğer alanları da şu şekilde sıralayabiliriz[14]:

- Tuğla Üretiminde
- Gaz beton üretiminde
- Harç Yapımında
- Yalıtım malzemesi olarak
- Püskürtme beton uygulamalarında
- İlaç sanayisinde ham madde olarak kullanılmaktadır.

2.2.3 Yüksek Fırın Cürufu

2.2.3.1 Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı

Demir elde edebilmek için demir cevheri yaklaşık 100-1600°C sıcaklığındaki fırınlarda kok kömürü yakılarak ısıtılırlar. Bu ham demir üretimi sırasında elde dilden artık maddelere yüksek fırın cürufları denir. Demir filizi gangi, kok ve kireç

taşının yanması sonucunda oluşan atıklar yüksek fırın cüruflarını meydana getirirler [55]. Yüksek fırın cürufları havada yavaş soğutulduklarında kristal yapıya sahip olurlar. Eğer hızlı bir soğutma işlemine tabi tutulurlarsa irili ufaklı tanelerden oluşan, camsı bir yapıya sahip olurlar. Bu oluşan yapının camsı olmasının temel nedeni hızlı şekilde soğutulan cürufun akışkanlığındaki ani azalmadan dolayı kristal yapının oluşumunun engellenmesidir. Bu tür cüruflara granüle yüksek fırın cürufları denilir. Bu hızlı soğutma işlemleri sırasında esas olarak su kullanılmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufları ince olarak öğütüldüklerinde uçucu küllere ve doğal puzolanlara örnek özellikler gösterirler (havada yavaş olarak soğutulan yüksek fırın cürufları puzolanik özelliğe sahip değildir). Ayrıca yapılarında CaO bulundurmalarından dolayı bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. Yüksek fırın cürufları beton katkı maddesi olarak kullanılabilirler gibi cürufu çimento üretiminde de kullanılmaktadırlar. Cürufu çimentolar, granüle yüksek fırın cürufunun klinker ve alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları beton içinde katkı maddesi olarak kullanıldıklarında, bağlayıcı özelliğe sahip olduklarından su ile reaksiyona girerler fakat bu reaksiyon sonucunda güçlü bir bağ elde edilemez. Portland çimentosu ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri ve kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Cürufun asıl güçlü reaksiyonları alkali ortamda bu kalsiyum hidroksit ile olur. Ortam sıcaklığı arttıkça bu reaksiyonlar daha erken yer alabilir. Sıcaklığın dışında öğütülmüş yüksek fırın cürufunun aktivitesini ve bağlayıcılığını, cürufun kimyasal kompozisyonu, cürufun yapısının ne kadar amorf olduğu ve cürufun inceliği etkiler [56].

Yüksek fırın cürufu, demir çelik üretimi sırasında kireç, kok külü ve demirin indirgenerek ayrılmasından sonra kalan silis ve alümin füzyonu sonucu oluşur. Sıcak yüksek fırın cürufu su ile soğutularak küçük parçalar halinde katılaşması sağlanır. Su ile soğutma yöntemine granülasyon yöntemi denir. Bu işlem sonucu cürufun içerdiği su miktarı %30 civarındadır. Bu yöntemde, erimiş haldeki cüruf önce suyla soğutulur daha sonra dakikada 300 tur dönen bir tambur vasıtasıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde kullanılan su miktarı 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m^3 tür. Cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'un altındadır. Paletleme yöntemi sonucunda birkaç değişik boyda malzeme üretilir. Büyük boyutlu (4-15 mm) olanlar Çok gözenekli ve kısmen kristal bir yapıya sahiptir. Daha çok hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. 4 mikrometreden küçük boyutlu olanlar ise camsı bir yapıya sahiptirler ve çimento

üretiminde katkı maddesi olarak kullanılırlar. Bu yöntemle üretilen cürufa hafif cüruf denir [56,54]

2.2.3.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Yapısı

Cüruf tanelerini şöyle sınıflandırmak mümkündür; saf cam tanecikleri, bir miktar kristal içeren camsı tanecikler ve kristal tanecikler. Bir miktar kristal (mervinit) içeren camsı taneciklerin, saf cam taneciklerinden daha iyi reaktivite gösterdiği yapılan araştırmalardan anlaşılmaktadır. Cürufta kristal içeriğinin %0'dan %5'e çıkması halinde harç mukavemetlerinde bir artış, kristal içeriğinin %5'in üzerine çıkması halinde harç mukavemetlerinde azalma gözlenmektedir [8,9]. Camsı faz miktarı Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliklerini belirleyeceği en önemli unsurlardan birisidir. Lea'nın belirttiğine göre, camsı faz miktarıyla dayanım arasında, kabaca da olsa doğrusal bir ilişki söz konusudur [53].

2.2.3.3 GYFC'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır. Cürufun alkalinitesi ne kadar yüksekse hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir. Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO₂ oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarının artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler, %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz [53].

Cürufların kimyasal bileşimi demir cevherinin bileşimine bağlı olarak değişir; genel olarak normal portlant çimentosuna oranla daha az CaO ve daha fazla SiO₂ ve Al₂O₃ içerir.

Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşiminden itibaren hesaplanan kalite indeksleri aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$I = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1 \quad (2.6)$$

Keil İndeksi

$$I_k = \frac{CaO + CaS + 0,5MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO} \quad (2.7)$$

$I_k > 1,5$ ise kullanılabilir.

$1,5 < I_k < 1,9$ ise iyi

$I_k > 1,9$ ise çok iyi

Bu indeksler cüruf kalitesinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılır. Cüruf kalitesinin ve kullanılabilirliğinin veya uygunluğunun en güvenilir ölçüsü birlikte kullanılacağı aktif bağlayıcı veya uyarıcı madde ile yapılmış deney sonuçlarıdır [57,58].

2.2.3.4 Yüksek Fırın Cürufunun Aktivitesi

İnce öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu su ile karıştırıldığında genel olarak bağlayıcı özellik göstermez. Ancak aktivatör (uyarıcı) adı verilen katkıları kullanıldığında gizli bağlayıcı özelliği ortaya çıkar. Cürufların aktifleştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

- Sülfatla aktifleştirme (alçı katılarak yapılmaktadır.)
- Sodyum hidroksit (NaOH) ile aktifleştirme
- Kireçle aktifleştirme

NaOH çözeltisi ile yapılan aktivite deneylerinde oldukça kısa sürede sonuç alınabilmektedir [59].

Genel olarak kabul edilen bir anlayışa göre düşük hidrolik modül değerleri düşük hidrolik reaktiviteyi göstermektedir. Ancak, her zaman, hidrolik modüllerin yüksek olması dayanımlarında yüksek olmasını sağlamamaktadır.

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik modülleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda daha karmaşık başka modüllerde önerilmiştir. Bu önerilerde, toplam kimyasal analiz sonuçlarının ve kristal faz miktarının cürufun hidrolik özelliklerinin tespiti açısından birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, optimal reaktivite için cürufun tamamıyla camsı yapıya sahip olması zorunluluğunun bulunmadığı saptanmıştır [53].

2.2.3.5 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

Granüle yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portlant çimentolarının hidratasyonu ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate aluminatlar ve hidrate siliko aluminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da aluminat konsantrasyonunda, hidrate aluminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ dörtlü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve C_4AH , 13-19 bileşenlerinin oluşturduğu saptanmıştır [53].

2.2.3.6 k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

İlk defa Smith tarafından kullanılan k etkinlik faktörü ile ilgili bugüne kadar birçok çalışma yapılmış, değişik yöntemler denenmiş fakat bu konuda tam bir fikir birliğine varılamamıştır.

V.G.Papadakis ve S.Tsimas'ın yapmış oldukları çalışmaya göre Silisyum ve Alüminyumlu malzeme olarak birçok katı sanayi ürünü (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu) ve bazı doğal puzolanik malzemeler (Volkanik Tüfler, Opalin Silika gibi) Çimento katkı malzemeleri olarak bağlayıcı ve puzolanik özelliklerine göre çeşitlendirilebilir. Bu malzemeler çok geniş bir fiziksel ve kimyasal çeşitlilikte olup, betonda kullanımları için genel bir dizayn düzenlenmiştir. Bu çalışmada etkinlik katsayısının konsepti, portlant çimentosuyla karşılaştırılınca çimento katkı malzemelerinin performansının göreceli olarak ölçüsüdür.

Yapılan çalışmaların neticesinde çimento katkı malzemeleri agrega yerine konulunca basınç dayanımları kontrol betonundan yüksek çıkmıştır. Çimento katkı malzemeleri çimento yerine kısmi yerleştirilince de başlangıçta (erken zamanda) basınç dayanımı daha düşük çıktı ama zaman ilerledikçe karışımdaki daha yüksek aktif silika içeriğiyle çimento ile beraber kontrol betonunun basınç dayanımını aşmıştır. Öğütülmüş uçucu külün etkinlik katsayısı yaklaşık 1 gibi çıkmıştır. Diğer doğal çimento katkı malzemelerinin ise daha düşük etkinlik katsayıları çıkmıştır. ($k=0,2-0,3$) [60].

Çimento katkı maddelerinin faydası, beton kompozitlerdeki birçok ilerleme ve tamamen ekonomi nedeniyle iyi kabul edilmiştir. K.Ganesh Babu ve V. Sree Rama Kumar'ın yapmış olduğu çalışmayı içeren makale çeşitli dozajlarda yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kullanılarak 28 günlük etkinliklerini belirlemek için yazılmıştır. Toplam dayanım etkinliği genel etkinlik faktörünün bir kombinasyonudur. Bu da yaşa ve daha önce de söylendiği gibi silis dumanı ve uçucu kül gibi diğer katkı maddelerinde de geçerli olan katkı oranına dayanan yüzde oranı etkinlik faktörüdür. Bu değerlendirme, GYFC betonlarını her hangi bir verilmiş katkı yüzdesinde istenen dayanımda dizayn etmeyi mümkün kılar [61].

ASTM C 989, Cüruf aktivite indeksini belirli bir yaştaki cürufu çimento harç küplerinin ortalama basınç dayanımını referans çimento harç küplerinin ortalama basınç dayanımına yüzde oram olarak tanımlar. Bu cüruf 80, 100 ve 120 derece olarak basınç dayanımına bağlı olarak 3 derecede gruplandırılmıştır. Hooton ve Emery'nin gözlemlerine göre GYFC'nin özellikleri (cam içeriği, kimyasal bileşimi, mineralojik bileşimi, öğütme inceliği ve aktivasyon tipi) reaktiviteyi etkiler. Her nasılsa Mantel, literatürdeki GYFC için olan hidrolik formülün cürufun dayanım performansını yeterince tahmin etmediği sonucunu ortaya koymuştur.

Çimentonun veya cürufun kimyasal bileşimiyle aynı çimento ve cürufun karışımının hidrolik aktivitesi arasında bir bağlantı olmadığı iddia etmiştir. Aynı zamanda ASTM'ye göre test edilmiş cüruf aktivitesinin cürufun ve kullanılan çimentonun parça boyutu dağılımına (incelik) bağlı olduğunu ve bunun 28 günde %62' den %115' e kadar sınıflandığını göstermiştir. Yüksek alkali içeren çimentonun, cürufun hidrolik özelliğini etkilemediğini gözlenmiştir. Buna karşın Hoogen ve Rose yüksek alkali çimento karışımlarının, düşük alkali çimento karışımlarına göre daha büyük cüruf aktivite indeksi değeri verdiğini söylemişlerdir. Şu da söylenmelidir ki, yukarıdaki cüruf aktivite indeksiyle ilgili bütün testler sadece harç küplerine uygulanmıştır. Aynı zamanda harcın davranışı betondakine göre değişiktir ve aynı zamanda GYFC'nin harç içinde reaksiyonunu direkt olarak betonun içindeki performansıyla bağdaştırılmamalıdır. Cürufun reaksiyonuna bağlı beton karışım oranı birçok araştırmacı tarafından araştırılmamıştır. Yukarıdaki tartışma GYFC'nin betondaki reaksiyonuna bağlı karışım oranlama ihtimalinin araştırılması gerektiğini gösterir [61].

Bu makale, su/çimento oranına bağlı dayanım çeşitliliğine göre bir etkinlik faktörü kurmak için 28 günlük GYFC'li betonlarla normal betonları karşılaştırarak GYFC'nin beton içinde değişik dozajlardaki etkinliğini tayin eder. Prensipde bu su/çimento oranının ($w/(c+g)$) kontrol betonunun su/çimento oranına (w/co) herhangi bir dayanımdaki GYFC'nin etkinlik katsayısını ekleyerek yaklaştıran A w faktörü kullanılarak yapılmıştır. Etkinlik katsayısıyla (genel etkinlik faktörü k_e) su/çimento oranını dayanım ilişkilerine getirmek amacıyla yapılan ilk denemelerde bütün katkı yüzdelерinde iyi korelasyon sağlanmadı. Bu aşamada farklılık yüzde etkinlik faktörü (k_p) ile doğrulanmıştır. Toplam etkinlik faktörü k , genel etkinlik faktörü k_e ve yüzde etkinlik faktörü k_p 'nin toplamıdır. Bu metot da dayanım ilişkileri açısından normal betonun su/çimento oranı GYFC betonları için geçerli olacaktır.

$$(w/co) = [w/(c+kg)] = [w/(c+k_e g + k_p g)]$$

$$k = k_e + k_p$$

(2.8)

Etkinlik faktörünün bu eşitliği için, daha önceden yapılan araştırmaların sonuçlarından elde edilen data (bilgi) **Tablo 2.8'**de özetlenmiştir. Şuna değinilmelidir ki bu tablodaki araştırmaların sonuçları, şimdiki üretilen çimento ve cüruflar içinde geçerlilik sağlar. Bunlar, GYFC'nin beton içerisindeki davranışını etkileyen başlıca parametreleri içeren oldukça geçerli bir grup oluşturur. Değerlendirme sırasında, görülmüştür ki karışımlardan bazıları, hava boşluğu, değişik kütleme şartları, çok ince cüruflar gibi sebeplerden ki bu sebepler değerlendirmeye katılmadı, normal betonların formunu tutmamıştır [61].

Tablo 2.8: Betonların hesap değerleri

Cüruf Kodu	Katkı Yüzdesi	w/(c+g) değer aralığı	Çökme miktar (mm)	28 günlük basma dayanımı değer aralığı (Mpa)	28 günlük ortalama etkinlik değerleri
1	0	0.23-0.83	40-170	19.7-106	-
2	10	0.26-0.38	150	58.5-105	1.29
3	30	0.26-0.55	100-150	49.1-105	1.02
4	50	0.30-0.80	35-90	21.2-89.3	0.84
5	60	0.26-0.50	150	43.5-80	0.78
6	65	0.46-0.75	100	23.0-57.5	0.75
7	70	0.41-0.61	45-65	32.5-62.5	0.73
8	80	0.5	-	29.5-32.5	0.70

2.2.3.7 Yüksek Fırın Cürufunun Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Aşağıda cürufllu çimentolar kullanılarak üretilmiş betonların taze haldeki özellikleri genel hatlarıyla özetlenmiştir.

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cürufllu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez [53].

Cürufllu çimentoların priz sürelerinin portlant çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının daha az olduğu yönündeki genel kanıya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portlant çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır. Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürufllu çimentolarla portlant çimentosu arasında önemli fark bulunmamaktadır [53].

Yapılan deneysel çalışmalarda cürufllu çimento kullanılarak üretilmiş betonların hem terleme tozlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır [53].

Cürufllu çimento kullanımı hidrasyon ısısının azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır.

2.2.3.8 Yüksek Fırın Cürufunun Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi

- Dayanımlar

Eşit çimento miktarı ve eşit su/çimento oranları söz konusu olduğunda cürufu çimentolar normal portlant çimentolarına göre, erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Buradan anlaşılacağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cürufu çimento miktarı normal portlant çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda, geç yaşlardaki dayanımlar cürufu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmaktadır [53].

- Elastisite Modülü

Dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar için, cürufu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır [53].

- Sünme ve Rötire

Betonun sürtme davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir [53].

Cürufu çimentolarla üretilmiş betonların rötireleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, cürufu çimento kullanımı rötreyi portlant çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir [53].

- Isıl genleşme ve ısı iletkenlik

Betonun bu özellikleri büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir [53].

2.2.3.9 GYFC'nin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

- Sülfat etkisine dayanıklılık

Regourd tarafından yapılmış olan bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış, %50 C₃S + %15 C₃A + %5 alçı + %30 kuartz içeren numuneler %5 MgSO₄ eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak numunelerde genleşme gözlenmiş ve 7. günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra, bu numuneler X ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde, Mg(OH)₂, CaSO₄.2H₂O etrenjit ve C-M-S-H oluştuğu saptanmıştır. Aynı araştırmada, ikinci seri numuneler

kuartz yerine Granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta, GYFC içeren numunelerde hiç bir bozulma görülmemiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf içeren çimentolarla yapılan beton numuneleri üzerinde de elde edilmiştir. Aynı araştırmadan çıkan bir başka sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir.

MgSO₄, CaSO₄ ve Na₂SO₄ eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka araştırmada da 13 değişik çimento kullanılmış ve Yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sülfat direncini arttırdığı saptanmıştır [53].

P.S. Mangat ve J.M Khatib'in yaptığı araştırma, değişik dozajlarda yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu içeren betonların sülfat dayanımını incelemiştir. Toplam bağlayıcı içeriği 350 ve 450 kg/m³, ve su/çimento oranı 0,45'tir. Numunelerin birim hacimdeki poroziteleri ve gözenek yapısı cıva sızma porozimetresi ve karbonatlaşma miktarı hesaplanarak ölçüldü. Örnekler, öncelikle 14 gün boyunca 20 ila 45°C arasında değişen sıcaklıklarda, nem oranı (yaklaşık olarak % 25,55) kür edilmiştir. Daha sonra kürlenmiş bu örnekler sülfat eriyiğine batırılmışlardır.

Sonuçlara göre %22 ila %32 arasında değişen uçucu kül katkısıyla üretilmiş betonlar en fazla sülfat dayanıklılığını gösterdi. Bu arada sülfat direnci kuru hava kürü yapılmış numunelerde, ıslak nemli hava kürü yapılmış numunelerle karşılaştırıldığında kuru havada kür yapılmış numunelerin sülfat dayanıklılığı daha iyi çıktığı görülmüştür. %5 ila %15 arasında silis dumanı içeren numunelerdeki sülfat direncinde de çok büyük gelişmeler olduğu görülmüş, bununla beraber istenmeyen gözenek hacmi ve çapı 0,177 m'den büyük gözeneklerin miktarı silis dumanının kullanılmasıyla artmıştır. %80 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da sülfat dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Ama %40 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da bunun ters etkisi gözlemlenmiştir. %40 yüksek fırın cürufu katkılı 45°C'de %25 nem oranında ıslak hava kürü yapılmış betonda daha az gözenek yüzdesi ve daha ince gözenek yapısı gözlemlenmiş olup kontrol betonuyla karşılaştırıldığında daha az sülfat direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir [62].

Yapılan bir çalışmada sülfata maruz bırakılan beton numunelerin basınç dayanımları şahit numuneler ile karşılaştırıldığında özellikle ıslanma kuruma etkisinde ki

numuneler de basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Sürekli sülfat etkisinde kalan yüksek fırın cürufu karışımlarda ise bir miktar dayanım artışı olmuştur. Bu çalışmaya göre yüksek fırın cürufu kullanımı ile sülfat etkisinden kaynaklanan genleşmelerin azaldığı ve standart limitlerin sağlandığı görülmüştür.

- Klor etkisine dayanıklılık

Cürufu çimentoların klor geçirimliliği konusunda değişik yöntemler uygulanmıştır. Bunlardan bir tanesi özetlenmiştir.

Hızlandırılmış Klor Permeabilite deneyi uygulanarak yapılan bir araştırmada değişik inceliklerde ve değişik cüruf miktarları içeren çimentolar kullanılarak 102 mm çap ve 51 mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve 14 günlük Standard 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 araştırmada kullanılan kontrol çimentosu (portlant çimentosu) $0.865 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET) kaba cürufu çimentolar $0.866 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET), orta cürufu çimentolar $1.083 \text{ cm}^2/\text{g}$ (BET) ve ince cürufu çimentolar $1.337 \text{ cm}^2/\text{g}$ (BET) inceliktedir. İnce cürufu çimentolarda ağırlıkça %70 ve %85, orta cürufu çimentoda %50 ve kaba cürufu çimentolarda %50 , %70 ve %85 cüruf kullanılmıştır. Benzer bir araştırmada %8 silis dumanı, %25 uçucu kül, % 50 GYFC içeren numuneler üzerinde yapılmış ve cürufun diğer mineral katkılara göre daha etkin olduğu saptanmıştır [53].

- Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık

Cürufu çimentoların deniz suyu etkisine maruz betonlardaki yüksek performansı yıllardır bilinmektedir. Deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40*40*160 mm harç numunelerle yapılan deneylerde kullanılan cüruf miktarının etkisi araştırılmış ve çimento içindeki GYFC miktarının artmasıyla genleşmenin azaldığı saptanmıştır.

- Karbonatlaşmaya Dayanıklılık

Betonda karbonatlaşma açısından, beton yeterince yoğun ve ortamda yeterli rutubet var olduğu sürece, portlant çimentosuyla cürufllu çimento arasında bir fark yoktur. Longuet tarafından yapılan bir araştırmada % 80'in üstünde cüruf içeren çimentoların, karbonatlaşmanın neden olduğu depasivasyon sonucunda betonarme donatıların paslanmasını portlant çimentoları kadar etkin bir şekilde önlediği saptanmıştır. Öte yandan, bir başka araştırmada daha kısa sürelerle bakımı yapılan (1, 3 ve 7 gün) harç numunelerde yukarıda belirtilenin tam tersi sonuçlar alınmıştır. Sözü edilen bu araştırmada, karbonatlaşma direncinin arttırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiği belirtilmiştir.

- Alkali-Agrega Reaksiyonu

Amorf yapıdaki silisli agregaların çimentonun içerdiği alkali oksitlerle yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan ve alkali-silika jeli adı verilen ürünün rutubet alarak aşın genleşme göstermesi betonda çatlamlar ve bozulmalara neden olur. Cürufllu çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin azaldığını göstermiştir [53].

Young-Jin Kwan tarafından yapılan bir araştırmada yüksek basınç dayanımlı betonlarda alkali-agrega reaksiyonu ve yüksek fırın cürufunun etkinliği incelenmiştir. Bu çalışmaların neticesinde şu sonuçlar çıkarılabilir:

Yüksek dayanımlı betonda, yüksek alkali içeriğinden dolayı alkali-agrega reaksiyonu olma olasılığı sıradan betona göre daha yüksektir. Yüksek genleşmeyi önleyebilmek için reaktif olmayan agregalar kullanılabilir. Çimento dozajına göre %30 yüksek fırın cürufu ilave etmek ve düşük alkali oranlı çimento kullanmak, yüksek dayanımlı betonlarda yüksek genleşmeyi önleyebilir [63].

- Donma-Çözülme Direnci

Yüksek Fırın Cürufllu çimentoların betonların donma-çözülme direncine etkileri, dayanım ve betonun hava miktarı sabit tutulduğu sürece, portlant çimentolarınıninkinden farklı değildir. Ancak, cüruf miktarı çok yüksek olduğu takdirde, az bir miktar düşüş görülebilir.

Öte yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının beton içindeki gözenek boyutlarında, gerek fiziksel gerekse hidratasyon sonucunda, azalmaya neden olması betonun donma çözülme direncini yükselttiği görüşü de öne sürülmektedir. Yapılan tüm

araştırmalarda hemfikir olunan sonuç cüruflu çimentoların, betonda sabit bir hava miktarı sağlamak için, portlant çimentolarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç gösterdikleri hususudur [53].

2.3 Betonun Durabilitesi

2.3.1 Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri

Betonun geçirimsizlik özelliği, geçirimsizlik katsayısı denilen bir karakteristik vasıtasıyla belirtilir. (e) kalınlığında bir beton numunesinin bir yüzü p basıncında suyun etkisi altındadır. Böyle bir durumda, betonun bir yüzünden karşı yüzüne su, hidrolik biliminde DARCY kanunu diye bilinen bir kanuna göre geçer. Bu kanun şu denklem ile ifade edilmektedir;

$$q = K * (p / e) \quad (2.9)$$

Burada q, betondan saniyede cm² başından geçen su miktarını kg cinsinden, p suyun kg/cm² cinsinden basıncını, e cm olarak beton kalınlığını göstermektedir. K betonun geçirimsizlik katsayısıdır. Yukarıdaki boyutlara göre K'nın birimi cm/sn'dir. Bu katsayı ne kadar küçükse betonun geçirimsizliği o kadar büyüktür.

Çeşitli nedenlerle belirtildiği gibi, betonda değişik tip boşluklar bulunmaktadır. Çimento hamuru içinde boyutları en küçük olan jel boşlukları ve daha büyük boşluklara sahip kapiler boşluklar bulunmaktadır. Bunların dışında imento hamuru ile agrega taneleri arasında boşluklar olduğu gibi agrega tanelerinde de boşluklar bulunmaktadır. Bu suretle geçirimsizlik suyun çeşitli boşlukları barındıran bir cismin içinden geçmesi ile meydana gelmektedir. Ancak, beton içerisindeki boşluk geçirimsizliği etkileyen tek faktör değildir. Geçirimsizlik boşluk miktarından başka boşluk boyutlarına, bunların dağılma şekline ve birbirleri ile bağlantı halinde bulunmasına bağlıdır. Porozimetre denilen alet ile kılcal boşlukların çapları ölçölmekte ve dağılma şekli saptanmaktadır.

Sertleşmiş betonun su emme kabiliyeti, betonun hizmet süresi boyunca karşılaşılabileceği yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylara dayanıklılığını ve dayanımını etkilemektedir.

Gerek betonun su emme özelliği ve gerekse geçirimsizliği, sertleşmiş betonun içerisinde yer alan boşlukların toplam miktarına ve bu boşlukların aralarında bağıntı olup olmamasına bağlıdır.

2.3.1.1 Sertleşmiş Betonda Yer Alan Boşluklar

- Çimento hidratasyonu ile ilgili olarak sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan jel boşlukları ve kapiler boşluklar.
- Hava sürüklenmiş betonlardaki sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan hava kabarcıkları.
- Taze betondaki terleme nedeniyle betondaki suyun yüzeye çıkma eğilimi sonucunda setleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan boşluklar, ayrıca üst kısımlara hareket eden suyun iri agrega tanelerinin ve betonarme demirlerinin altlarında birikmesi nedeniyle oluşan boşluklar.
- Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeni ile çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşabilecek boşluklar.
- Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi işlemleri esnasında betonun içerisinde oluşan hapsolmuş hava boşlukları.
- Agrega tanelerinin yapısında bulunan boşluklar.

2.3.1.2 Sertleşmiş Betonda Su Emme

Sertleşmiş betonun içindeki boşlukların tümü suyla dolu değil ise, ıslak ortamda, betonun içerisindeki boşluklara dışarıdan su girebilmektedir. Bu işlem, betonun suya doygun duruma gelebilmesine kadar devam edebilmektedir.

Beton tarafından içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekilmesi işlemine su emme denir.

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 elemanının boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir.

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır. Ayrıca, betonun dayanıklılığı da betondaki su emme özelliği tarafından etkilenmektedir.

2.3.1.3 Sertleşmiş Betonda Geçirimsizlik

Sertleşmiş betonun yüzeyi ile temas eden sıvılar ve gazlar, betonun içerisine girerek akış gösterebilmektedirler.

Nedenleri:

- Hava ve su basıncının yarattığı farklılıklar
- Nemlilik farklılıkları
- Betonun içerisindeki sıvıların farklı konsantrasyonlarından doğan osmosis yapısıdır.

Geçirimsiz betonların içerisine sızan sular ve bu sulardaki yabancı maddeler betonda bazı kimyasal ve fiziksel olaylara yol açmaktadır. Betonun boşluklu olması, sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan su girmesine, bu suyun akış göstererek daha iç bölgelere ulaşmasına ve sonuç olarak betonun hasar görmesine neden olmaktadır.

Beton depolar ve barajların yapımında kullanılan betonlar başta olmak üzere, içerisinde su veya başka bir sıvı bulunduran bütün betonların mümkün olabildiğince geçirimsiz olmaları gerekmektedir.

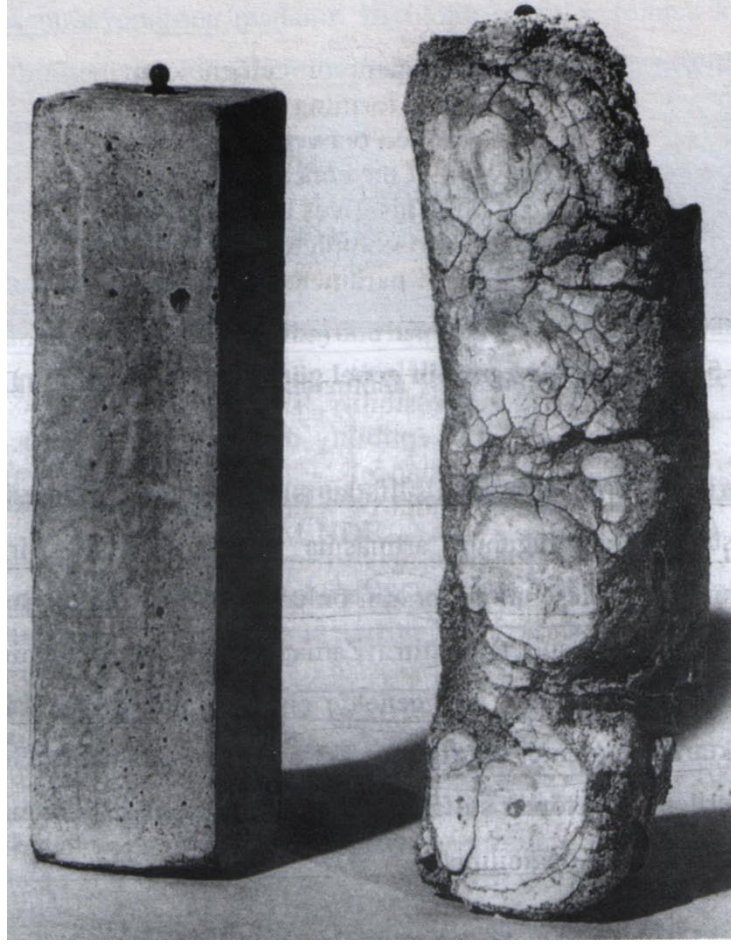
2.3.1.4 Geçirimsiz Beton Üretmek İçin Gereken Kurallar

- Beton üretiminde kullanılacak çimento standartlara uygun olmalıdır.
- Kütle betonlarının üretiminde hidrasyon ısısı yüksek olan çimento kullanılmamalıdır.
- Karma suyu, betona zarar verecek miktarlarda yabancı maddeler içermemelidir.
- Geçirimsizliği düşük olan agregalar kullanılmalıdır.
- Su/çimento oranı düşük tutulmalıdır.
- Kimyasal katkı kullanılmalıdır.
- Uçucu kül, öğütülmüş tras gibi ince taneli mineral katkıları kullanılmalıdır.
- Beton segregasyona uğramamalıdır.
- Betonun sıkıştırılmasına önem verilmelidir.
- Beton dökümünün bitirilmesinden hemen sonra kür uygulanmalıdır. [64]

2.3.2 Sülfat Etkisi

Sülfat, imentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertlemi betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taı oluşturması ile gerçekleşir. **ekil 2.6**'da görüldüğü gibi, Reaksiyon rnleri betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-imento aderansının etkilenmesiyle betonun mukavemeti der. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle ke ve kenarlardan balayarak tüm kütleye yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dklmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuadığı görülür.

Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çalılık dışında, bitki, ağa yetimeyen, yüzeyinde beyaz lekeler tuz birikintileri görülen çorak topraklarda, sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. **ekil 2.7**'de görülen bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanı sıra, yer altı suyu ve topraktan örnekler alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır.



Şekil 2.6: Sülfat Etkisiyle Ağır Hasar Görmüş Beton Eleman



Şekil 2.7: Sülfatlı bir zeminin genel görünüşü (Çiğli-İzmir)

Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Bir diğer kaynak ise çimentodur. Çimentonun C_3A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genleşmenin ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemek için genelde çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlamıştır.

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcı ile reaksiyona girerler. Bazı killer alkali, magnezyum ve kalsiyum sülfatlar gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yeraltı suyu ile birleşince olumsuz etki ortaya çıkar. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri, çoğunlukla sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Ancak magnezyum sülfata ($MgSO_4$) da birçok bölgede rastlanır. Bu tür birikimlerin, nispeten kuru iklimlerde fazla buharlaşma sonucu, yeraltında bulunan tuz tabakalarındaki çözünebilir sülfatların yukarıya emilip, tırmanması sonucu oluştuğu sanılmaktadır.

Doğal alçı taşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) tabakalarındaki sülfat konsantrasyonu oldukça yüksektir. $CaSO_4$ 'ların düşük çözünürlükleri olduğundan etki lokal olarak kalır. Buna karşılık uzun süre açıkta kalmaları halinde bu yataklar, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi daha kolay eriyebilen tuzlara dönüşebilirler.

Kömürün uzun süre stok edildiği bölgelerde, prit gibi sülfür içeren şeyl yataklarında yüksek oranlarda sülfat konsantrasyonlarına rastlanır. Biyolojik işlemler sonucu kanalizasyon suyu veya atık maddeler biriken tesislerin betonlarında ve deniz yapılarında da sülfat etkisiyle bozulmalar görülebilir.

Beton açısından sülfat etkisinin şiddeti toprak veya suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Zemindeki SO_4^{2-} veya SO_3^{2-} yoğunlukları % veya mg/kg olarak verilir. Yer altı suyundaki sülfat konsantrasyonu ise ppm veya mg/l olarak gösterilir. **Tablo 2.9'**de ACI 201 standardında sülfat etkisi açısından yapılmış sınıflama gösterilmiştir.

Tablo 2.9: Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi

Etki Derecesi	Zeminde Suda Çözünen Sülfat SO_4^{-2}	Suda SO_4^{-2} mg/lt
İhmal Edilebilir	0,00-0,10	0-150
Orta	0,10-0,20	150-1500
Şiddetli	0,20-2,00	1500-10000
Çok Şiddetli	2,00 ve üstü	10000 ve üstü

TS 3340 “Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar için Yapım Kuralları” standardına göre ise Sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri **Tablo 2.10**’deki gibi sınıflandırılmıştır. Sülfat iyonu konsantrasyonunu zaman zaman SO_4^{-2} olarak, bazen ise SO_3^{-2} olarak ifade edilmektedir. SO_3^{-2} konsantrasyonunu 1.2 ile çarparak SO_4^{-2} konsantrasyonuna geçmek mümkündür.

Tablo 2.10: TS 3340’a göre Sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri

Etkinlik Derecesi	Suda SO_4^{-2} mg/lt	Suda SO_4^{-2} mg/kg
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	5000’den büyük
Çok Kuvvetli	3000’den büyük	-

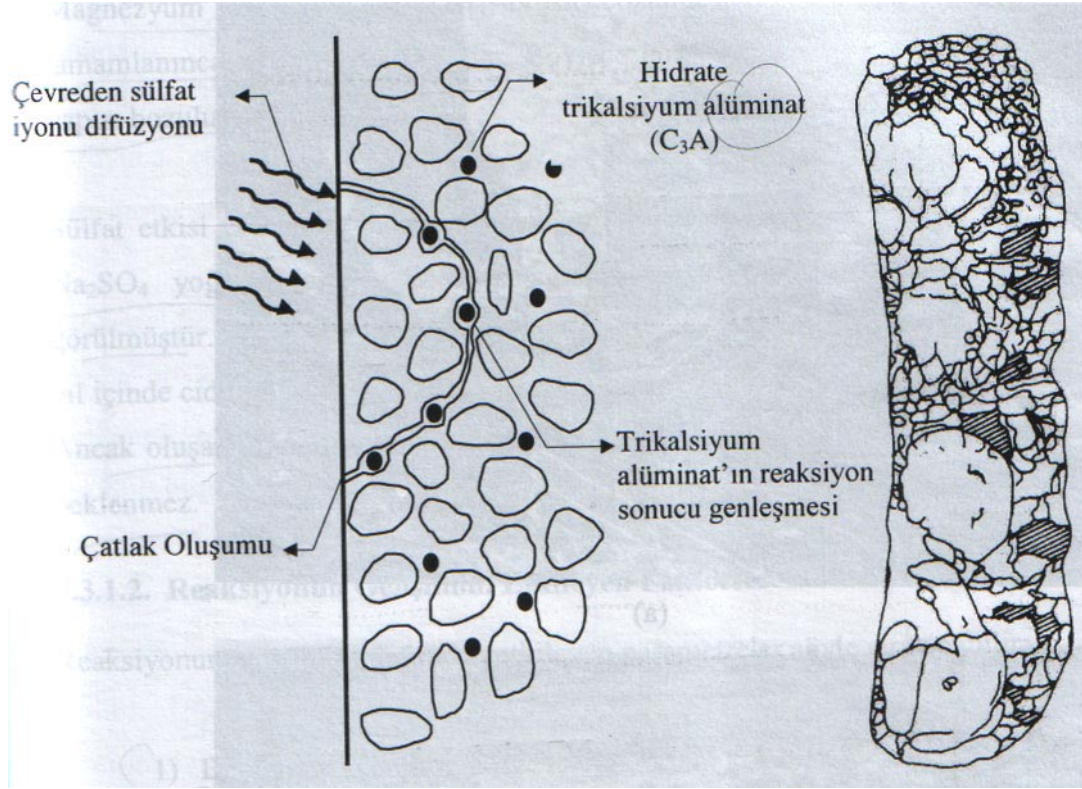
Standartlarda yapılan sınıflamalar beton ile sürekli temas eden durgun sular için geçerlidir. Suyun basıncının ve sıcaklığının artması, ıslanma-kuruma olayları, çarpma, sürtünme gibi mekanik etkiler etkinlik derecesini artırır. Betonun özellikle doygun hale gelip ardından kuruması ve bu olayın sürekli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

2.3.2.1 Sülfatların Betonda Oluşturdukları Zararlı Reaksiyonlar

Sülfatların hidrate çimento bileşenleriyle, özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Trikalsiyum alüminat (C_3A) ile yaptıkları aşağıda açıklanan reaksiyonlar sonucunda ürünler alçı taşı ve kalsiyum sülfat alüminattır. Bu tuzlar yerlerini aldıkları bileşenlerden çok daha fazla hacim işgal ederler. Oluşan genleşme betonda hasara yol açar.

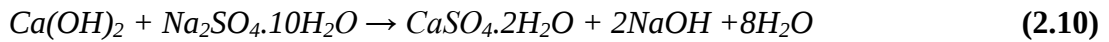
Betonda sülfat etkisi kendini önce yüzeyde oluşan beyazımsı lekelerle gösterir. Hasar daha çok köşelerde, sivri noktalarda, birleşim yerlerinde başlar. Daha sonra ilerleyen çatlaklar ve dökülmeler meydana gelir. İleri düzeyde hasar durumunda ise betonun kırılganlaştığı ve yumuşadığı, dayanımını ve rijitliğini kaybedip dağıldığı görülür. Betonda sülfat saldırısının gelişimi **Şekil 2.8**’de şematik olarak gösterilmiştir. Her ne

kadar bu çizimde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile sülfatların yaptığı reaksiyon –genleşme açısından ikinci planda kaldığı için- gösterilmemiş olsa da, tıpkı çimento C_3A bileşeni gibi, beton içindeki kirecin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de sülfatlarla reaksiyona girdiğini tekrar vurgulamak gerekir.



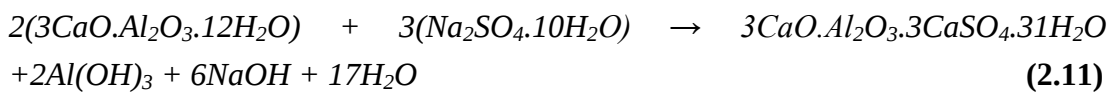
Şekil 2.8: Sülfat etkisiyle betonun bozulması

Sodyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yaptığı reaksiyonlar aşağıdaki gibi yazılabilir:



Bu reaksiyon sonucu katın fazın hacmi %124 artmaktadır. Suyun sürekli yıkaması sonucu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tamamen bünyeden uzaklaşabilir. NaOH 'in birikimi sonucu reaksiyon dengeye ulaştınca, yalnızca SO_3 'ün bir kısmı alçıtaşına dönüşür.

Hidrate C_3A 'nın sodyum sülfatla yaptığı reaksiyon ise aşağıdaki gibidir:

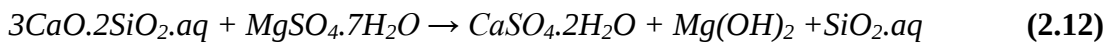


Kalsiyum sülfat ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer ve Kalsiyum sülföalüminat ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucu katı fazın hacmi %227 artmaktadır. Candlot tuzu veya etrenjit (ettringite) adı verilen hidrate tuz çok miktarda hidrat suyu içermesi nedeniyle büyük bir hacim kaplar. **Şekil 2.9**'da görüldüğü gibi sertleşmiş betonda genleşen tuz betonu patlatarak parçalar.



Şekil 2.9: Sülfat etkisiyle beton elemanların hasara uğraması A) Betonarme bir elemanın bozulması B) Sülfatlı bir zemine bırakılan beton boruların bozulması

Diğer taraftan deniz suyunda da bulunabilen Magnezyum sülfat, $Ca(OH)_2$ ve C_3A 'nın yanı sıra Kalsiyum silikat hidratelere de saldırır. Reaksiyon aşağıdaki şekilde gelişir:



Magnezyum hidroksitin ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ -brusit) çözünürlüğü çok düşük olduğundan, bu reaksiyon tamamlanıncaya kadar devam eder. Böylece çimento hamurunun taşıyıcı iskeleti olan CSH yapısı bozulur.

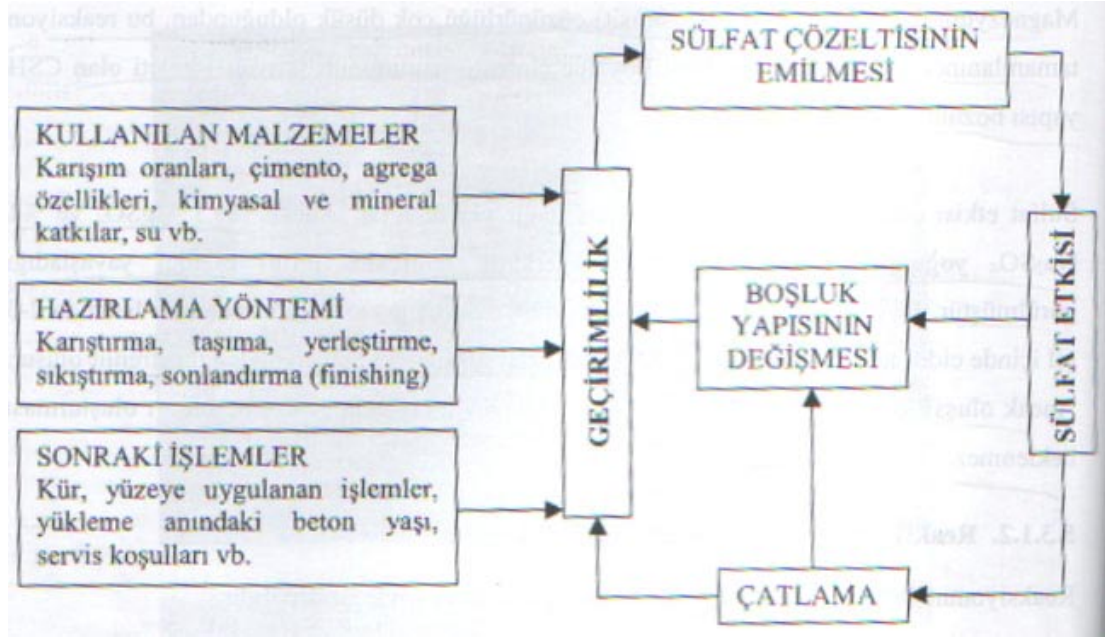
Sülfat etkisi çözeltinin yoğunluğuna bağlı olarak artar. Ancak %0.5 MgSO_4 ve %1 Na_2SO_4 yoğunlukları üzerindeki değerlerde tahribatın artım hızının yavaşladığı görülmüştür. Doygun MgSO_4 çözeltisinde, düşük su/çimento oranlarında bile betonda 2-3 yıl içinde ciddi tahribat gözlenir. C_4AF ve sülfatlar arasındaki reaksiyondan da etrenjit oluşur. Ancak oluşan etrenjitin amorf yapıda olması sebebiyle genleşme hasarı oluşturmaması beklenemez [66].

2.3.2.2 Reaksiyonun Gelişimine Etkileyen Faktörler

Reaksiyonun gelişimini doğrudan etkileyen parametreler şöyle sıralanabilir:

- 1) Etkilenme koşulları (SO_4^{-2} içeriği, ortam koşulları)
- 2) Betonun geçirimliliği (zararlı madde taşınımı)
- 3) Betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı)
- 4) Suyun varlığı

Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata dayanıklılığı da büyük oranda geçirimliliğe bağlıdır. Betonun geçirimliliğini etkileyen malzeme özellikleri, karışım oranları, çatlak durumu, taze betonun sıkıştırılması, kürü, vb. tüm parametreler aslında sülfata dayanıklılığını da dolaylı olarak etkilemektedir. **Şekil 2.10'da** dikkat edilecek en önemli nokta sülfat etkisi ile betonun geçirimliliği arasındaki döngünün varlığıdır. Bir başka deyişle, sülfat etkisine maruz kalan betonun boşluk yapısı değişmekte, gözenekliliği artmakta, çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu durum, betonun geçirimliliğinin artmasını dolayısıyla yıpranma sürecinin kendi kendini hızlandırma özelliğini göstermektedir.



Şekil 2.10: Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimsizliği arasındaki ilişki

Çimentonun kimyasal yapısı, özellikle C_3A içeriği betonun sülfata dayanıklılığında önemli bir parametredir. Bu nedenle, ASTM standartları C_3A içeriği %8 ve altında olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, %5 ve altında olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Avrupa’da ise %3 C_3A içeriği birçok ülke tarafından üst sınır kabul edilmektedir. Normal portlant çimentolarında C_3A oranı %8–11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir.

Cürufli çimentoların hidrasyonu sonucu oluşan C_3A yalnızca portlant çimentosu klinkerinden geldiği için miktarı çok azdır. Bu nedenle cürufli çimentolar sülfata çok dayanıklıdır. Bazı standartlarda en az %65 oranında cüruf içeren çimentolar sülfata dayanıklı tip olarak kabul edilmektedir.

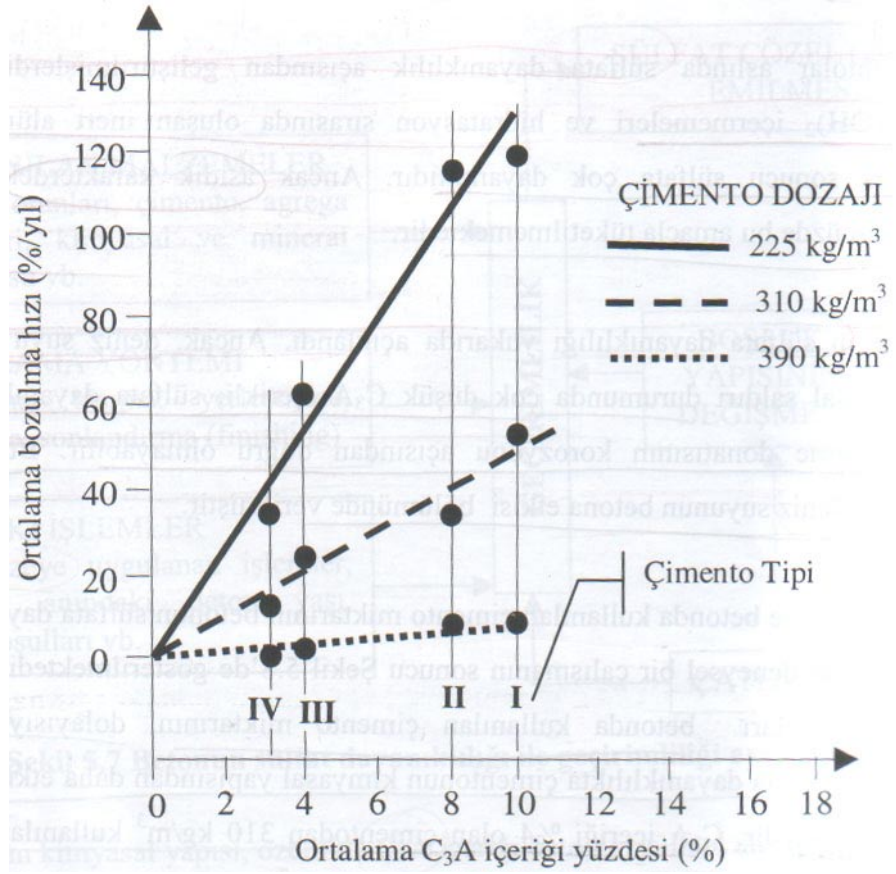
Son yıllarda yapılan araştırmalar katkı çimentoların sülfata dayanıklılık konusunda portlant çimentolarına kıyasla üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Uçucu kül, silika tozu veya doğal puzolan gibi mineral katkıların da bu konuda önemli yararları vardır. Çimento harcındaki serbest kirecin puzolanlarla reaksiyona girip bağlanması dayanıklılığı arttıran bir unsurdur. Bu süreç içinde beton sülfatlarla temas etmemelidir. Ayrıca katkı çimentoların kür süresinin de daha uzun olduğu unutulmamalıdır.

Alüminli çimentolar aslında sülfata dayanıklılık açısından geliştirilmişlerdir. Bu tip çimentolar Ca(OH)_2 içermemeleri ve hidratasyon sırasında oluşan inert alümin jelinin koruyucu etkisi sonucu sülfata çok dayanıklıdır. Ancak asidik karakterdeki alüminli çimentolar günümüzde bu amaçla tüketilmemektedir.

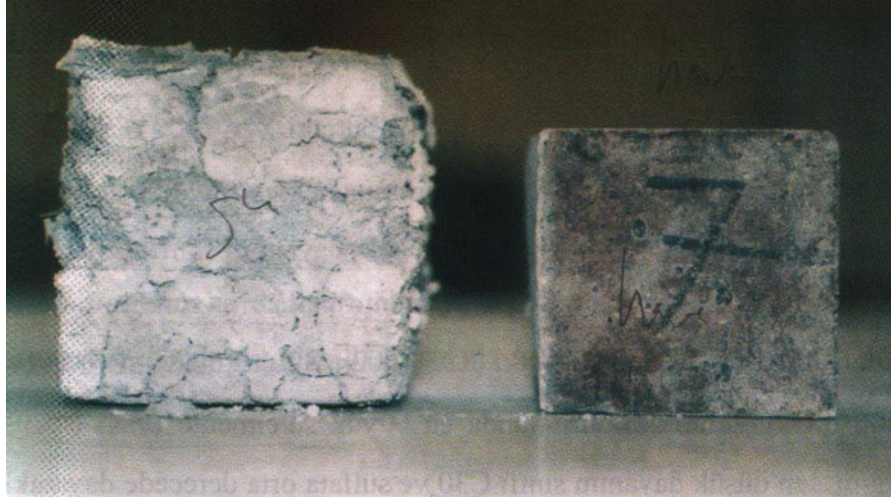
Çimento tiplerinin sülfata dayanıklılığı yukarıda açıklanmıştır. Ancak, deniz suyu etkisi gibi karma bir kimyasal saldırı durumunda çok düşük C_3A içerikli, sülfata dayanıklı çimento kullanımı betonarme donatısının korozyonu açısından doğru olmayabilir.

Çimento C_3A içeriği ve betonda kullanılan çimento miktarının betonun sülfata dayanıklılığına etkisinin incelendiği deneysel bir çalışmanın sonucu **Şekil 2.11’de** gösterilmektedir (Verbeck, 1968). Deney sonuçları betonda kullanılan çimento miktarının, dolayısıyla betonun geçirimsizliğinin, sülfata dayanıklılıkta çimentonun kimyasal yapısından daha etkili bir faktör olduğunu göstermektedir. C_3A içeriği %4 olan çimentodan 310 kg/m^3 kullanılarak üretilen betonların, C_3A içeriği %10 olan çimentodan 390 kg/m^3 kullanılarak üretilen betonlara kıyasla iki-üç kat daha hızlı bozuldukları görülmektedir. Ancak burada, çimento dozajının tek başına betonun kalitesi ve geçirimsizliği hakkında fikir veremeyeceğini, ancak S/Ç oranıyla birlikte tanımlandığında anlam kazanacağını belirtmekte fayda vardır. Örneğin 350 kg/m^3 çimento dozajı ile S/Ç oranına bağlı olarak 28 günlük silindirik basınç dayanımı 14 MPa olan bir beton üretilebileceği gibi 40 MPa olan bir beton da üretilir. Doğaldır ki bu iki beton arasında dayanıklılık açısından da büyük farklar olması beklenir.

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 önlemek için etkili bir önlemdir. **Şekil 2.12’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 2.12**, reaksiyonun gelişiminin suyun varlığına bağlı olduğunu ve gerekli ortamın oluşması halinde sülfat saldırısının bağlayıcı matrisi tamamen harap edebileceğini vurgulamaktadır [66].



Şekil 2.11: Farklı tip çimentolarla değişik çimento içeriklerinde üretilmiş betonların sülfat etkisiyle bozulma hızları



Şekil 2.12: 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

2.3.2.3 Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler

Betonun sülfata dayanımını sağlamak için alınacak önlemleri, betonun geçirimsizliğinin sağlanması, çimento C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriğinin sınıflandırılması, puzolanik katkı maddeleri kullanılması, gereğinde betonun kaplamalarla dıştan sülfatlara karşı izole edilmesi şeklinde özetlemek mümkündür. Bu önlemlerden hangilerinin ne zaman uygulanacağını kararı çevresel etkinin şiddetine göre verilir. Bir fikir vermesi amacıyla Amerikan ve Avrupa Standartlarının konu ile ilgili önerileri aşağıda kısaca özetlenmiştir. Ancak standartlarda etki şiddetinin genellikle sülfat konsantrasyonları dikkate alınarak belirlendiğini, tekrarlı ıslanma-kurumaya maruz elemanların ise çok daha şiddetli bir etkiyle karşılaşabileceklerini bir kez daha hatırlamakta yarar vardır.

ACI 318 yapı şartnamesi, orta şiddette sülfat etkisinde ($150-1500 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $\%0.1-0.2 \text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%8$ 'den az olan (ASTM Tip II) bir çimento kullanımını ve betonun su/çimento oranının 0.5 değerinin altında kalmasını, şiddetli etki durumunda ($1500-10\ 000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $\%0.2-2 \text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%5$ veya altında olan bir çimento (ASTM Tip V) kullanımını ve betonun su/çimento oranının 0.45 değerinin altında kalmasını, çok şiddetli bir etki durumunda ise ($> 10\ 000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $>\%2 \text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%5$ ve altında olan bir çimento ile puzolanik katkı maddelerinin birlikte betonun su/çimento oranı 0.5 değerinin altında olacak şekilde kullanımını önermektedir.

TS EN 206–1 Standardına göre ise, az zararlı kimyasal etki XA_1 ($200 \leq \text{SO}_4^{-2} \leq 600 \text{ mg/l}$ suda veya $2000 \leq \text{SO}_4^{-2} \leq 3000 \text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda, en büyük su/çimento oranı olarak 0.55, en az çimento oranı 300 kg/m^3 , en küçük dayanım sınıfı C30'un kullanımı şart koşulmaktadır. Bu ortamda sülfata dayanıklı çimento kullanımı zorunlu tutulmamakta ancak önerilmektedir. Orta zararlı kimyasal etki XA_2 ($600 < \text{SO}_4^{-2} \leq 3000 \text{ mg/l}$ suda veya $3000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 12\ 000 \text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda en büyük su/çimento oranı 0.5, en az çimento dozajı 320 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı C30 ve sülfata orta derecede dayanıklı ($C_3A < \%8$) çimento kullanımı zorunlu kılınmaktadır. Çok zararlı kimyasal ortam XA_3 ($3000 < \text{SO}_4^{-2} < 6000 \text{ mg/l}$ suda veya $12\ 000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 24\ 000 \text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda en büyük su/çimento oranı 0.45, en az çimento dozajı 360 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı C35 ve sülfata yüksek derecede dayanıklı ($C_3A < \%5$) çimento kullanımı zorunlu tutulmaktadır.

Şiddetli etki durumunda C_3A içeriğini sınırlamak yetersiz bir önlem olabilir. Bu durumda sülfata dayanıklı bir çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkılarında kullanımı tavsiye edilir. Sülfatların C_3A 'nın yanı sıra $Ca(OH)_2$ ve CSH ile de reaksiyona girdikleri yukarıdaki reaksiyon mekanizması açıklanırken ifade edilmişti. Puzolan kullanmanın iki etkisinden bahsedilebilir. Puzolanlar $Ca(OH)_2$ 'yi bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler. Sadece portlant çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki $Ca(OH)_2$ ve C_3A oranının düşürülmesini sağlarlar. Hidrate çimentonun $Ca(OH)_2$ içeriği büyük oranda C_3S miktarına bağlı olduğu için, çimentonun C_3S içeriğinin de dayanıklılıkta önemli bir faktör olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Ayrıca, puzolan olarak kullanılan maddenin düşük CaO içerikli olması gereklidir. Bu açıdan C sınıfı uçucu küller yüksek oranda serbest kireç içerebilmeleri nedeniyle sülfata dayanıklılığı arttırmak yerine azaltabilirler.

Çok şiddetli sülfat saldırısında ise, yukarıda sözü edilen önlemler yeterli olmaz. Bu durumda yapıyı dıştan sülfata dayanıklı izolasyon malzemeleri ile izole etmek gerekir. Bu amaçla bitüm veya polimer esaslı kaplamaların kullanımı mümkündür. Ayrıca drenaj önlemleri ile suyun yapıya ulaşması engellenmelidir [66]..

2.3.2.4 Sülfata Dayanıklılık Deneyleri

Sülfata dayanıklılık deneyleri, örnekleri sodyum sülfat, magnezyum sülfat veya ikisinin karışımından oluşan çözeltilerde saklama esasına dayanır. Dönüşümlü ıslatma ve kurutma boşluklardaki tuzların kristalleşip, genleşmesini sağlar ve hasarı hızlandırır. Dayanım, elastisite modülü veya ağırlık kayıplarının ölçülmesi ile hasarın şiddeti belirlenir. Gözlemsel olarak da hasarın gelişimi takip edilebilir. Aşağıda konu ile ilgili üç deney yönteminden kısaca bahsedilmiştir.

ASTM C 1012 Standardı sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harç çubuğu numunelerinin boy değişimlerinin tespiti esasına dayanır. Değişik bağlayıcı maddelerin, sülfat dayanıklılığına etkisinin incelenmesinde de kullanılabilir. Standarda göre hazırlanan harç karışımlarının, 20 MPa basınç değerine ulaştıktan sonra sülfat çözeltisine konulmaları gerekmektedir. Bu amaçla 5 cm ayrıtlı küpler kullanılarak karışımların basınç dayanımlarının gelişimi takip edilir. Bu aşamadan sonra istenen dayanımı sağlayan 25x25x285 mm boyutlu harç çubuğu örnekler 50000 mg/l sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeye başlanır ve boy değişimleri

ölçülür. Ancak, beton yerine harçlarla çalışılması nedeniyle iri agrega-çimento ara yüzeyinin olmaması, silika tozu, fiber gibi betonda kullanılan malzemelerin fiziksel etkisini göstermemesi, ıslanma-kuruma etkisini dikkate almaması ve sonucun uzun sürede elde edilmesi deney yönteminin dezavantajları olarak sıralanabilir.

Bir diğer deney yöntemi ASTM C 452 standardında tarif edilmiştir. Deney, belli oranlarda alçı eklenerek hazırlanan 25x25x285 mm boyutlu prizmatik harç çubuğu örneklerinin 14 gün sonunda yaptıkları genleşmelerin tespiti esasına dayanır. Karışımda kullanılacak alçı miktarı, çimentonun ve alçının SO_3 miktarı dikkate alınarak %7 SO_3 içeriği elde edilecek şekilde ayarlanır. Örnekler kalıptan çıkartıldıktan sonra ($23 \pm 1.7^\circ C$) su içinde gömülü olarak bekletilmektedir. Katkılı çimentolarda bu yöntemin kullanımı uygun değildir. Çünkü karışıma daha başlangıçta alçı katılması henüz puzolanik reaksiyon gelişmeden sülfata maruz kalmaya yol açmaktadır.

ASTM C 1038 deney yöntemi ile çimentoların zararlı mertebelerde sülfat içerip içermediklerinin tespiti, hazırlanan harçların yaptıkları genleşmelere dayanarak belirlenebilmektedir. Su içinde bekletilen harç çubuklarının 14 günlük genleşme değerlerinin %0.02'nin altında kalması istenmektedir [66].

2.3.2.5 Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF)

Uzun süreli olarak nemli ortamlarda kalan bazı prefabrik elemanlarda sülfat etkisine benzer şekilde yıllar sonra çatlak ve hasarlar görülmüştür. Yapılan araştırmalar hasarın nedeninin gecikmiş etrenjit oluşumu olduğunu ortaya koymuştur. Bu olaya ilk olarak 1980'li yıllarda Avrupa'da prefabrik beton traverslerde rastlanılmış, daha sonra Amerika ve diğer ülkelerde de farklı betonarme elemanların DEF nedeniyle hasar gördüğü rapor edilmiştir. Gecikmiş etrenjit oluşumunu aslında içten gelen sülfat etkisi olarak tanımlamak mümkündür. Sülfat etkisiyle genleşen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp, parçalamaktadır. Ancak burada oluşan etrenjit normal hidratasyon sonucu oluşan etrenjit ile karıştırılmamalıdır. Beton taze iken, kristalleşen tuzun genleşmesine izin verecek ortam mevcuttur.

DEF'in oluşum nedeni, prefabrik sektöründe elemanların hızlı priz alması ve dayanım kazanması için uygulanan yüksek sıcaklığa bağlanmaktadır. 60-70°C kür sıcaklıklarının bile DEF'e yol açabildiği bilinmektedir. Bu sıcaklıklarda etrenjitin ($C_3A.3CaSO_4.31H_2O$) normalde hidratasyonun ilk dakikalarında görülen oluşumu

engellenir. 60°C civarında hidratasyon sırasında oluşan etrenjit dağılır. 70°C'den sonra ise etrenjit oluşumu durur. Etrenjit oluşumunun stabilitesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Ardında yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar görülür (**Şekil 2.13**).



Şekil 2.13: Prefabrik betonarme bir elemanda DEF hasarı

Olayın nedenlerinde biri de çimentoda aşırı miktarda SO_3 bulunmasıdır. Eskiden klinkerdeki sülfat seviyeleri %1'in altında iken yeni teknoloji ile çalışan çimento fabrikalarında üretilen klinkerlerde bu oran %2–5 dolaylarına çıkabilmektedir. Bu sülfatın bir kısmı da suda çok az ve yavaş çözündüğünden, etrenjit oluşumu beton sertleştikten sonra gerçekleşebilmektedir.

Oluşan etrenjit çok ince olup, alkali-silika jeline benzer. DEF agrega-çimento harcı ara yüzeylerinde boşluk yaratıp, bu boşluklarda gelişir. Ayrıca çatlak oluşumları da **Şekil 2.13'de** görüldüğü gibi ASR'de görülene çok benzer. Bu nedenle ASR ile karıştırılabilir.

DEF oluşumunu engellemek için aşağıdaki önlemlerin alınmasında yarar vardır.

1. Özellikle suda yavaş çözünebilen SO_3 içeren çimento klinkerinde sülfat içeriğinin mümkün mertebede düşük olmasına dikkat edilmelidir. %1.5 SO_3 oranının bile reaksiyona yol açtığı belirlenmiştir. Bu nedenle çimentoda SO_3 oranının en alt düzeyde olması tercih edilir.

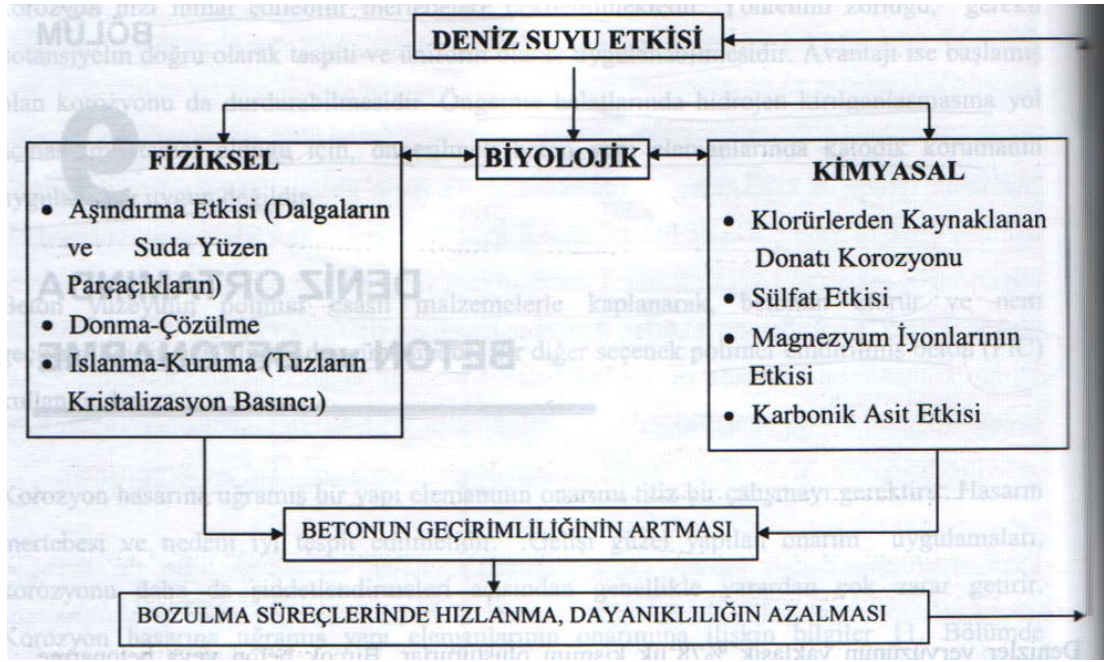
2. Kür sıcaklığının çok yüksek olmamasına dikkat edilmelidir. 60°C'lik kür sıcaklıkları bile bazı tür çimentolarda reaksiyona yol açabilmektedir.
3. Kullanılacak olan çimentonun düşük hidratasyon ısısı çıkaran türde olmasında yarar vardır. Örneğin, hızlı dayanım kazanan ince çimentolar yüksek sıcaklıkta (70-75°C) kür edilirse DEF açısından daha büyük bir riskten söz edilebilir.
4. Önemli miktarda uçucu kül gibi puzolan içeren çimentoların kullanımı sülfat miktarını azaltacaktır. Ancak bazı puzolanik maddelerin de sülfat içerebildiği unutulmamalıdır.
5. Yapı elemanlarının su ile teması kesilmelidir.
6. Hava sürükleyici katkı kullanımının, kristal genleşmesinin oluşturduğu iç gerilmeleri azaltacağı için yararlı olması beklenir.

Reaksiyonun oluşup oluşmayacağını önceden belirlemek üzere, değişik araştırmacılar tarafından uygulanan farklı deney yöntemleri vardır. Ancak henüz bu konuda kabul edilmiş standart deney yöntemi geliştirilememiştir [66].

2.3.3 Deniz Ortamında Beton ve Betonarme

Denizler yeryüzünün yaklaşık %78'lik kısmını oluştururlar. Birçok beton veya betonarme yapı denizlerle doğrudan temas halindedir veya dolaylı olarak deniz ortamından etkilenmektedir.

Deniz ortamında bulunan betonarme elemanlar değişik fiziksel ve kimyasal etkilere maruzdur. Bunlar arasında, sülfat etkisi, magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonları ile yer değiştirme reaksiyonları, karbonik asit etkisi, beton içindeki kirecin yıkanarak uzaklaşması, klorür korozyonu, donma-çözülme, tuz kristalizasyonu, dalgaların ve yüzen parçacıkların aşındırıcı etkileri sayılabilir. 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 elemanlara olduğu söylenebilir. **Şekil 2.14'de** deniz ortamında bulunan betonarme yapıların maruz kalmaları muhtemel yıpratıcı etkiler gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Deniz ortamında bulunan yapıların maruz kalabilecekleri yıpratıcı etkiler

Deniz suyunun beton üzerindeki yıpratıcı etkisi çözünmüş bazı tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır. Denizlere ve okyanuslara göre farklılıklar olsa da, tipik tuzluluk oranı %3.5 civarındadır. Örneğin, Baltık denizinde tuzluluk oranı %0.7, Atlantik okyanusunda %3.6 iken Akdeniz’de %3.9 olmaktadır. Buharlaştırmanın yüksek olduğu sıcak iklimlerde tuzluluk oranları artmaktadır. İsrail’deki Ölü Deniz bu açıdan %31.5 tuzlulukla en uç örnektir. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), magnezyum sülfat (MgSO_4), kalsiyum sülfat (CaSO_4), potasyum klorür (KCl) ve potasyum sülfat (K_2SO_4) olarak sıralanabilir. Deniz suyunun tipik iyon konsantrasyonuna bakıldığında 11 000 mg/l Na^+ , 20 000 mg/l Cl^- , 1400 mg/l Mg^{+2} , 2700 mg/l SO_4^{-2} , 500 mg/l kalsiyum, 400 mg/l potasyum içerdiği görülmektedir. Çimento hidratasyon ürünlerine kimyasal saldırı açısından bakıldığında ise deniz suyunun yüksek miktarda sülfat ve magnezyum içerdiği söylenebilir. Ayrıca, deniz suyunun yüksek miktarda çözünmüş oksijen ve karbondioksit içerebildiği ve bu gazların yoğunluğunun lokal şartlara göre çok değişken olduğunu ilave etmek gerekir. **Tablo 2.11**’de ülkemiz denizlerinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları gösterilmiştir. Karadeniz ve Marmara’nın tuzluluk oranı dünya ortalaması olarak kabul edilen %3.5 değerinin altındadır ve bu durum yapılar açısından olumludur. Ege ve Akdeniz’in çok daha tuzlu olduğu dikkate alındığında, bu bölgelere inşa edilecek yapıların daha şiddetli bir kimyasal ve fiziksel etkiyle karşı karşıya olmaları beklenir.

Tablo 2.11: Ülkemiz denizlerinin tuzluluk oranları ve iyon konsantrasyonları

Deniz	Yöre	Toplam Tuzluluk (%)	Mg ⁺² (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ⁺ (mg/l)
Karadeniz	Zonguldak	1,7	630	1270	8400	5260	250
Marmara	Erdek	2,6	960	1940	12840	8050	380
Ege	Ayvalık	3,8	1400	2830	18770	11770	560
Akdeniz	Bodrum	3,9	1440	2900	19270	12080	580

Deniz suyunun pH değeri 7.5 ile 8.4 arasında değişmektedir. Atmosferdeki CO₂ ile denge halinde ortalama pH değeri 8.2'dir. Deniz suyunun yüksek miktarda çözünmüş CO₂ içermesi halinde 7.5'in altındaki pH değerlerine de rastlanabilir ki bu durumda, betonun daha şiddetli bir etki altında olacağı açıktır.

Kendine ait özellikleri ve zararlı etkileri olan değişik deniz ortamlarından bahsedilebilir. Bu ortamları;

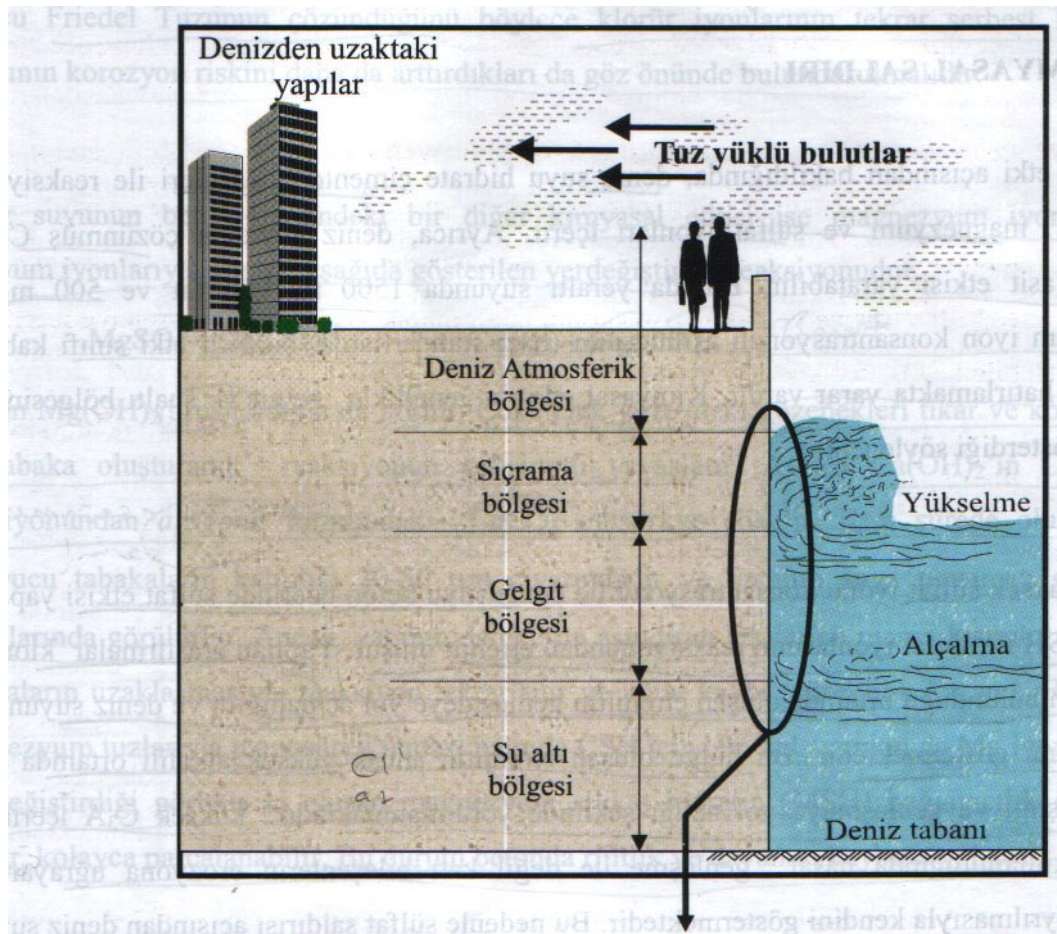
- Betonun hiçbir zaman doğrudan deniz suyu ile temas halinde olmadığı, tuz yüklü damlacıkların rüzgarlarla taşınarak yapıya ulaşabildiği atmosferik deniz ortamı. Kıyıdan uzaklaştıkça bu etki bölgesi dışına çıkılır. Ancak yerel şartlara, kıyının coğrafi yapısına ve hakim rüzgarlara bağlı olarak kıyıdan kilometrelerce içerilerde bile bu etkisinden söz edilebilir.
- Gelgit seviyesi üzerinde kalan fakat dalgalar ve sıçrama nedeniyle deniz suyuyla direkt temasın olduğu sıçrama bölgesi.
- Betonun günün belli zamanlarında suya tamamen gömülü olduğu kabarma ve alçalma seviyelerini içeren gelgit bölgesi.
- Alçalma seviyesinin altında kalan ve betonun devamlı suya gömülü olduğu *sualtı bölgesi*.
- Deniz tabanı bölgesi.

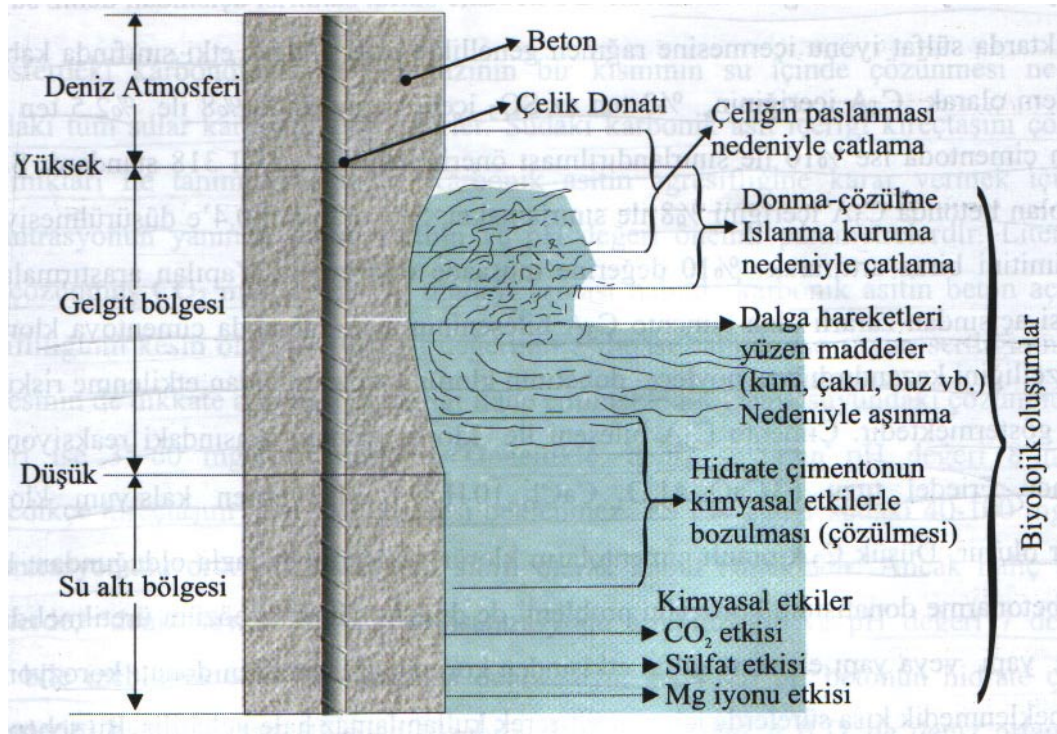
şeklinde ayırmak mümkündür. Tüm bu bölgeler **Şekil 2.15'de** şematik olarak gösterilmiştir.

Betonarme bir yapıda deniz ortamının farklı bölgelerinde ortaya çıkma olasılığı bulunan bozulma mekanizmaları da **Şekil 2.15'de** gösterilmiş ve **Tablo 2.12'da** bu etkiler görülme sıklıkları bakımından ayrılmıştır [66].

Tablo 2.12: Yapının maruz kaldığı deniz ortamına göre görülme olasılığı olan yıpratıcı etkiler

Fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmaları	Deniz ortamına göre oluşma riski			
	Deniz Atmosferi	Sıçrama Bölgesi	Gelgit Bölgesi	Sualtı Bölgesi
Donatıda klorür korozyonu	Çok	Çok	Çok	Az
Aşınma (dalgalar, yüzen cisimler)	Yok	Çok	Çok	Az
Islanma-kuruma (tuz kristalizasyonu)	Az	Çok	Çok	Yok
Donma-çözünme	Az	Çok	Çok	Az
Kimyasal etkilenme	Az	Az	Çok	Çok
Biyolojik etkilenme	Yok	Çok	Çok	Çok





Şekil 2.15: Yapının bulunduğu konuma göre maruz kalabileceği değişik deniz ortamları ve betonarme bir elemanda deniz suyu etkisiyle oluşabilen bozulma mekanizmaları

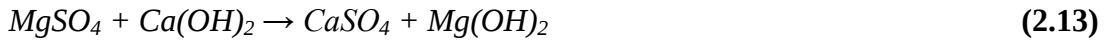
2.3.3.1 Kimyasal Saldırı

Kimyasal etki açısından bakıldığında, deniz suyu hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyon yapabilen magnezyum sülfat ve sülfat iyonları içerir. Ayrıca, deniz suyunda çözünmüş CO_2 karbonik asit etkisi yaratabilir. Burada yer altı suyunda 1500 mg/l sülfat ve 500 mg/l magnezyum iyon konsantrasyonunun aşılmasının (bazı standartlarda) şiddetli etki sınıfı kabul edildiğini hatırlatmakta yarar vardır. Kimyasal etkinin genellikle gelgit ve sualtı bölgesinde kendini gösterdiği söylenebilir.

İçerdiği yüksek sülfat iyonu konsantrasyonu ile deniz suyu beton üzerinde sülfat etkisi yapar. C_3A vs CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur. Yapılan araştırmalar klorür iyonlarının bulunduğu ortamda oluşan etrenjitin genleşmeye yol açmadığını ve deniz suyunda çözüldüğünü göstermektedir. Bu oluşan etrenjitin ancak yüksek alkalili ortamda su emerek şiştiği ve genleşmeye yol açtığı şeklinde yorumlanmaktadır. Yüksek C_3A içerikli çimento kullanıldığında hasar genleşme ile değil katı bileşenlerin erozyona uğrayarak kütleden ayrılmasıyla kendini göstermektedir. Bu nedenle sülfat saldırısı bakımında deniz suyu yüksek oranda sülfat iyonu içermesine rağmen genellikle orta şiddete etki sınıfında kabul edilir.

Önlem olarak C₃A içeriğinin, %3'ten az SO₃ içeren çimentoda %8 ile, %2.5'ten az SO₃ içeren çimentoda ise %10 ile sınırlandırılması önerilmektedir. ACI 318 standardı S/Ç oranı 0.5 olan betonda C₃A içeriğini %8 ile sınırlamakta, S/Ç oranının 0.4'e düşürülmesiyle C₃A üst limitini biraz arttırarak %10 değerine müsaade etmektedir. Yapılan araştırmalar, sülfat etkisi açısından zararlı olan çimento C₃A bileşeninin aynı zamanda çimentoya klorür bağlama özelliği kazandırdığını, böylece donatının klorür korozyonundan etkilenme riskini azalttığını göstermektedir. Çimento C₃A bileşeni ile klorür iyonları arasındaki reaksiyonla beton içindeki Friedel Tuzu (3 CaO.Al₂O₃.CaCl₂.10H₂O) adı verilen kalsiyum kloro alüminatlar oluşur. Düşük C₃A içerikli sülfata dayanıklı çimentoların deniz ortamında kullanımı tercih edilmemekte ve standartlarda bu yönde zorlamalar bulunmamaktadır. Ayrıca karbonatlaşma sonucu Friedel Tuzunun çözündüğünü ve böylece klorür iyonlarının tekrar serbest kalarak korozyon riskini daha da arttırdıkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

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



Oluşan Mg(OH)₂ brusit adıyla da bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca Ca(OH)₂'nin CO₂ ile reaksiyonundan aragonit formundaki CaCO₃ oluşur ve çöker. 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 süre teması halinde CSH içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar.

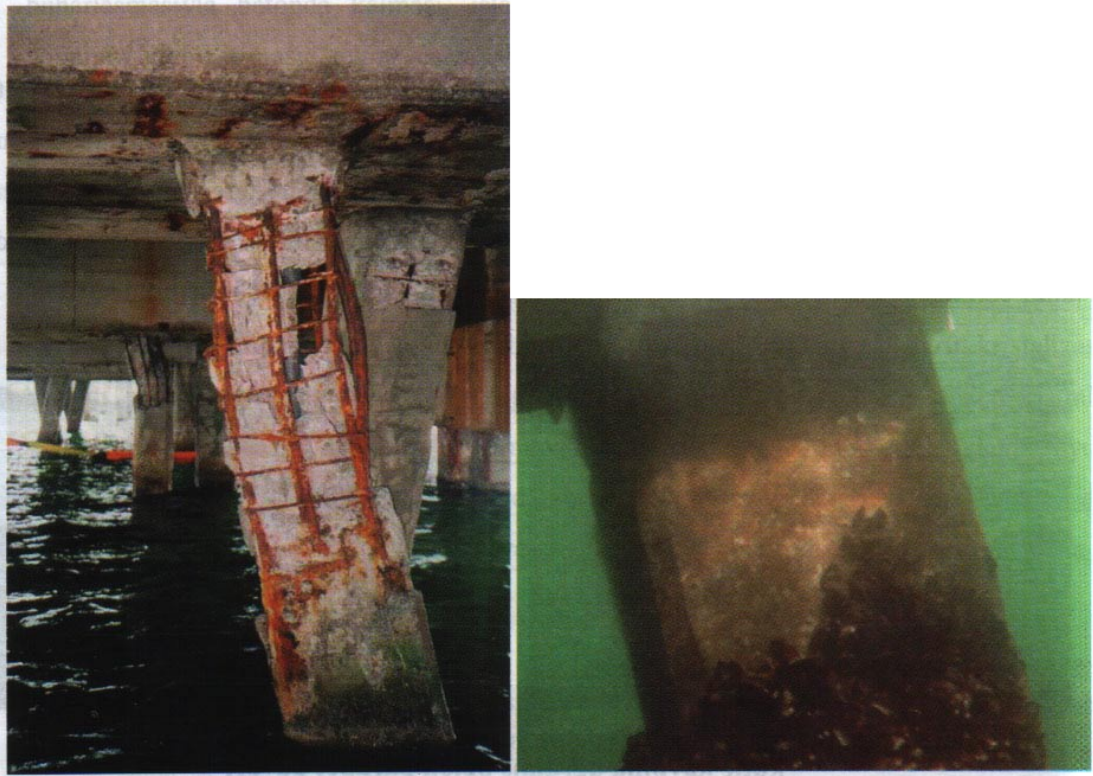
Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) gazının bir kısmının su içinde çözünmesi nedeniyle doğadaki tüm sular karbonik asit içerirler. Sudaki karbonik asit içeriği kireçtaşını çözebilen CO₂ miktarı ile tanımlanmaktadır. Karbonik asitin agresifliğine karar vermek için CO₂ konsantrasyonunun yanında suyun sertliği ve pH değeri önemli parametrelerdir. Literatürde, suda çözünmüş CO₂ miktarının 90 mg/l'yi aşması halinde karbonik asitin beton açısından agresifliğinin kesin olduğu, 10 mg/l

değerinin aşılması halinde ise suyun sertliğinin ve pH derecesinin de dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir. Deniz suyundaki çözünmüş CO_2 miktarı ise 35–60 mg/l civarındadır. Genellikle, deniz suyunun pH değeri 8'in altına düşmedikçe kireçtaşı (CaCO_3) çözmesi beklenmez. TS EN 206–1 sudaki 40–100 mg/l CO_2 konsantrasyonunu orta şiddetteki etki sınıfı olarak kabul etmektedir. Ancak Haliç benzeri bölgelerde, deniz suyundaki CO_2 konsantrasyonu artabilmekte ve pH değeri 7 değerinin altına bile inebilmektedir. Bu durumda deniz suyu, geçirimli bir betonun hidrate çimento bileşenlerini karbonik asit etkisiyle çözebilmektedir. Örneğin ABD'de deniz ortamındaki beton kazıkların sudaki yüksek CO_2 konsantrasyonuna bağlı karbonik asit etkisiyle 25 yıllık servis süresinden sonra 550 mm olan orijinal çaplarının kütle kaybıyla 300 mm ye düştüğü görülmüştür.

Endüstri ve kanalizasyon kirliliği olmadıkça deniz suyunda amonyum, nitrat ve sülfat iyonlarına rastlanmaz. Ancak günümüzde kıyı bölgelerimizin çoğunda yoğun ve düzensiz kentleşme sonucunda deniz kirliliği olduğu bilinmektedir. Kirletilmiş deniz suyunun içerebildiği bu tür zararlı iyonlar açısından da betonarme yapılarda etkisinin değerlendirilmesi gerekmektedir [66].

2.3.3.2 Donatı Korozyonu

Deniz ortamında bulunan, özellikle deniz atmosferi, sıçrama ve gelgit bölgesindeki betonarme yapı elemanlarında en yaygın görülen hasar nedeninin deniz suyu içindeki klorürlerin yol açtığı donatı korozyonu olduğunu söylemek mümkündür (**Şekil 2.16**). Su içindeki oksijen konsantrasyonunun azalması ve suya doygun betona oksijen difüzyonunun çok yavaş olması nedeniyle korozyon riski gelgit bölgesinden derinlere gidildikçe azalmaktadır. Beton içine gömülü çelik donatının korozyona uğraması halinde oluşan pas ürünlerinin hacimlerinin yaklaşık altı kat artışı nedeniyle önce betonun yüzey bölgesinin çatladığı, reaksiyonun ilerlemesiyle ise bu bölgenin tamamen döküldüğü görülür. Bu durumda hem taşıyıcı donatının açığa çıkarak tamamen donatısız kaldığı ve zamanla yok olduğu, hem de hasarlı betonun geçirimliliğinin çok artması nedeniyle yapının deniz suyundan kaynaklanan yukarıda anlatılan diğer etkiler altında hızla bozulduğu, kullanılamaz hale geldiği sıklıkla görülmektedir. Yapının servis ömrünün büyük oranda geçirimsiz, kaliteli ve yeterli kalınlıkta pas payı kullanımına bağlı olduğu göz ardı edilmemelidir.



Şekil 2.16: Yarmca Pektim İskelesi'nde 1999 Marmara Depremi sonrası korozyon ve deprem hasarı (Solda) aynı yerde deniz altında kalan betonarme elemanlar (Sağda)

Deneyimler, deniz suyu ile temas halindeki veya buz çözücü tuzlara maruz betonarme yapılarda, kaliteli bir betondan 50-70 mm kalınlığında pas payı tabakası kullanılması halinde bile klorürlerin donatıya ulaşmasının sadece zaman meselesi olduğunu göstermektedir.

Böyle bir ortamda inşa edilecek özel önem arz eden yapılarda betonun, klorürlerin girişini engelleyen koruyucu bir tabaka ile kaplanması tavsiye edilir.

Norveç'te yetmişli yıllarda yapılmış olan, Kuzey Denizi'nin sert ve yıpratıcı etkilerine maruz deniz içindeki betonarme platformların servis performansları ile deniz kıyısında inşa edilen betonarme yapıların servis performansları kıyaslandığında, kıyıda açıkta deniz içindeki platformların çok daha dayanıklı oldukları, kıyı yapılarının birçoğunda ise kısa sürede (5–10 yıl içinde) korozyon probleminin ortaya çıktığı görülmüştür. Betonarme platformlar, özel itina ile hazırlanmış kaliteli betonun, pas payı tabakasının artırılarak kullanılmasının, çok iyi bir kalite kontrol ve güvence sisteminin ürünüdür ve çok şiddetli etkiler altında bile betonarme yapıların

performansının istenen düzeyde sağlanabileceğinin güzel bir örneği olarak gösterilmektedirler [66].

2.3.3.3 Çimento Kimyasal Yapısının Dayanıklılığa Etkisi

Üç farklı çimento ile üretilmiş 40 cm ayrıtlı küp formundaki harç örnekler 1904–1908 yılları arasında Güney Fransa’da deniz suyu içine bırakıldılar. Örnekler 300, 450 ve 600 kg/m³ olacak şekilde üç farklı çimento dozajında üretilmişlerdi. 66 yıl deniz suyuna maruz kaldıktan sonra örnekler incelendiğinde çok çarpıcı bulgular elde edilmiştir. Yüksek C₃A (%14) içeren örnekler de dahil olmak üzere 600 kg/m³ dozajlı tüm örnekler mükemmel durumdaydılar. 300 kg/m³ dozajlı, daha geçirimli örneklerin kimyasal etkilene nedeniyle büyük oranda kütle kaybettikleri, puzolan ve cüruf içeren örneklerin genellikle daha iyi durumda oldukları belirlenmiştir. Hasar görmüş örneklerin elektron mikroskobu ile yapılan incelemesinde, aragonit, brusit, etrenjit, magnezyum silikat hidrat ve thaumasite (kalsiyum silika karbonat) içerdikleri tespit edildi. Diğer bir deneyde, 18 adet 1.75x1.75x1.07 m boyutlarında beton bloklar bir kısmı su altında kalacak şekilde 1905 yılında Los Angeles’da denize bırakıldılar. Beton bloklar altı değişik Portlant çimentosu kullanılarak üç farklı karışım oranında hazırlanmışlardı. 67 yıl deniz suyuna maruz kalan örnekler incelendiğinde; yüksek dozajlı yoğun beton blokların -yüksek C₃A (%14) içeren örnekler de dahil- mükemmel durumda oldukları, düşük dozajlı blokların kütle kaybettikleri ve yumuşadıkları görüldü. Hasar görmüş elemanlarda yapılan X-ray taraması sonunda brusit, alçıtaşı ve etrenjit belirlenirken, CSH ve Ca(OH)₂ gibi bağlayıcı bileşenlerin kalmadığı görülmüştür.

Bu deneyimlerden aslında iyi bilinen şu iki sonuca ulaşmak mümkündür. (1) geçirimsizliği yüksek betonun kimyasal yapısı deniz suyuna dayanıklılığında çok önemli bir faktördür. (2) ancak, genel olarak bakıldığında deniz ortamındaki yapılarda betonun geçirimsizliği çimento kimyasal yapısından çok daha önemli ve baskın faktördür. Çünkü yeterli geçirimsizliğe sahip betonda deniz suyu beton içine ilerleyemez ve bu durumda çimento hidrate bileşenleri ile zararlı reaksiyonlar gerçekleşmez. Ayrıca fiziksel yıpranma da benzer nedenle çok azalır ve yapı beklenen servis ömrünü sağlayabilir. Beton içinde kullanılan bağlayıcı maddenin (çimento + puzolanik maddeler) tipinden çok miktarının önem kazandığı görülmektedir. Bu nedenle deniz ortamında inşa edilecek betonarme yapılarda yeterli miktarda bağlayıcı madde kullanımına ayrı bir önem verilmelidir [66].

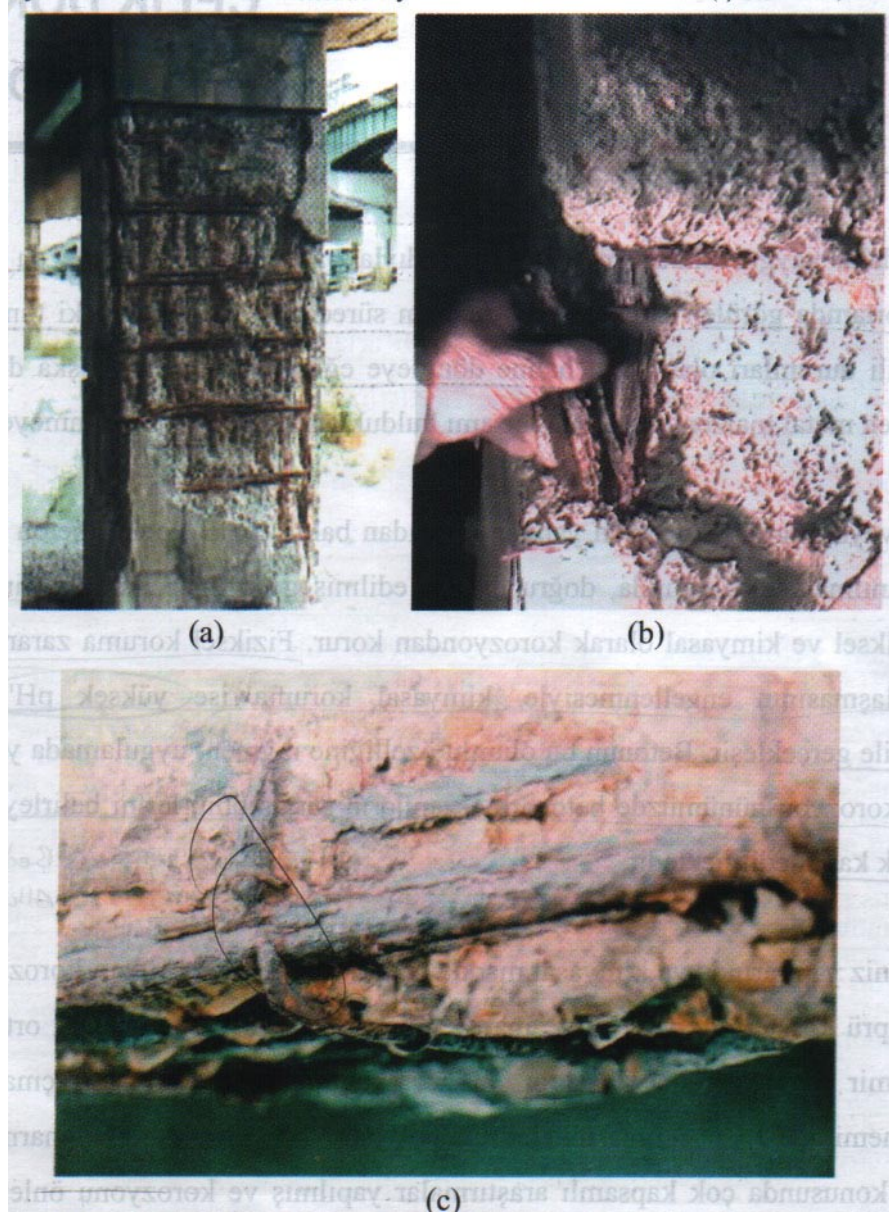
2.3.4 Korozyon

Korozyon, daha yaygın olarak bilinen diğer adıyla paslanma, metallerde su ve oksijenin bulunduğu ortamda görülen kimyasal bir değişim sürecidir. Altın dışındaki tüm metaller en düşük enerjili durumları olan oksit haline dönmeye eğilimlidirler. Bir başka deyişle, yapay olarak üretilen metal malzemeler uygun ortamı bulduklarında asıllarına dönmeye çalışırlar.

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılar açısından bakıldığında; çelik, beton içine gömülü olarak kullanılmaktadır. Aslında, doğru dizayn edilmiş geçirimsiz, kaliteli bir beton, çelik donatıyı fiziksel ve kimyasal olarak korozyondan korur. Fiziksel koruma zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesiyle, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam yaratılması ile gerçekleşir. Betonun bu olumlu özelliğine rağmen, uygulamada yapılan hatalar nedeniyle korozyon günümüzde betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli faktör olarak kabul edilmektedir.

Önceleri deniz yapılarında ve kimyasal madde üreten tesislerde görülen korozyon problemi, zamanla köprü kirişlerinde ve klorüre maruz diğer yapılara yaygın olarak ortaya çıkmıştır. Gereken tamir ve bakım masraflarının büyük ekonomik kayıplara yol açmasından sonra, konunun önemi ABD ve Avrupa ülkelerinde çok daha iyi anlaşılmış, betonarme donatısının korozyonu konusunda çok kapsamlı araştırmalar yapılmış ve korozyonu önlemek amacıyla standartlara oldukça sıkı hükümler eklenmiştir. Ancak ne yazık ki konunun önemi henüz ülkemizde yeterince kavranamamıştır. Bu nedenle, oldukça karmaşık elektro-kimyasal bir reaksiyonla gelişen betonarme donatısının korozyonu konusunun alınması gerekli önlemlerin daha iyi kavranabilmesi açısından ayrıntılı olarak incelenmesi uygun görülmüştür.

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılarda oluşan donatı korozyonu yapının stabilitesi açısından çok önemli sonuçlar doğurur. Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve duktilite kaybına uğrara. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genleşme etkisi önceleri pas payı tabakasının çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine yol açar. Bu durumda, hiçbir fiziksel ve kimyasal koruması kalmayan donatının çok daha hızlı şekilde kesit kaybetmesi, zamanla tamamen yok olması mümkündür (**Şekil 2.17**).



Şekil 2.17: Değişik korozyon hasarları a) Korozyon ürünlerinin genleşme etkisi ile pas payı tabakasını azaltması b) Donatının korozyon nedeniyle parçalanması c) Korozyon nedeniyle etriyelerin kopması

Donatı-beton aderansı da korozyondan olumsuz etkilenir, ilerlemiş hasar durumunda aderans tamamen yok olur. Az miktardaki kesit kaybının bile öngerilmeli beton elemanlarda kullanılan öngerme halatlarının kopmasına yol açabilmesi, bu tür yapıların korozyona karşı çok daha hassas olduklarını gösterir. Bu tür yapılarda korozyonun oluşması yapının kısa sürede yıkılmasına yol açabilir. Bu yüzden, öngerilmeli beton yapı elemanlarının korozyondan korunmaları için standartlarda genellikle daha sıkı hükümler mevcuttur.

Betonarme donatısı farklı şekillerde korozyona uğrayabilir. Açıkta bırakılan veya pas payı tabakasının dökülmesi ile tamamen açıkta kalan çelik donatıda atmosferik korozyon görülür. Beton içinde gömülü çelik donatıda ise karbonatlaşma cephesinin klorür gibi zararlı maddelerin donatıya ulaşması halinde korozyon elektro-kimyasal reaksiyonla gerçekleşir. Beton içinde farklı metallerin donatı olarak kullanılması veya korozyondan korunmak amacıyla epoksi vb. maddelerle kaplanmış ve kaplanmamış çeliğin aynı anda kullanımı temas korozyonuna yol açabilir. Öngerilme çeliklerinin kanallarında, oksijenin az olduğu ortamda, hidrojen iyonlarının hidrojen gazına indirgenmesi nedeniyle oluşan bir diğer korozyon türü de mevcuttur [66].

2.3.4.1 Atmosferik Korozyon

Açıkta bırakılan donatının korozyonu bu türde bir paslanma olayıdır. Reaksiyon, çelik donatının yüzeyinde üniform olarak gelişir.



Daha sonra $Fe(OH)_2$ de aşağıda gösterildiği şekilde ayrışır.



Korozyonun oluşabilmesi için oksijen ve su gereklidir. Hava kirliliği ve atmosferik koşullar reaksiyonun hızını büyük ölçüde belirler. Bağıl hava neminin düşük olduğu hallerde demirin üst yüzeyi kuru kalır ve reaksiyon gelişemez. Nemli ortamda ise demirin üst yüzeyinde ince bir su filmi oluşur. Tuzlar nem tutma özellikleri (higroskopik) nedeniyle demir yüzeyinde su filminin oluşumunu kolaylaştırırlar. Ayrıca tuzlar su filmi içinde oksijen ile birlikte eriyerek donatı yüzeyinde elektrolitik ortam oluşmasını sağlarlar. Bu nedenle tuzların donatı yüzeyinde birikmesine yol açan kirli atmosfer koşullarında korozyon çok daha hızlı gelişir.

Açıkta kalan çelik donatının zamanla üzerinde bakıra çalan renkte bir oksit tabakası oluştuğu görülür. Bu oksit tabakası bir süre donatının oksijenle temasını keser ve paslanmayı durdurur. Bu aşamada donatının betonarmede kullanılmasında bir sakınca yoktur. Hatta bu durumdaki donatının beton ile aderansı daha iyidir. Ancak bu tabaka bakır, alüminyum gibi metallere olduğu gibi atmosfer koşullarında kararlı değildir. Bir süre sonra paslanma sonucu oluşan tabakanın gevşediği, pul pul döküldüğü ve korozyonun süreklilik kazandığı görülür. Bu yüzden uzun süre açıkta kalan donatıların temizlenmeden inşaatlarda kullanımı uygun değildir. Donatının

kesit kayının büyük mertebelerde olup olmadığı çap ölçümü ile belirlenmeli, çelik donatıdan örnekler alınarak çekme dayanımı ve deformasyon özelliklerinin korozyondan ne şekilde etkilendiği deneylerle tespit edilmelidir.

Korozyonun ilerleme hızı temiz atmosfer koşullarının bulunduğu bölgelerde bağlı hava nemi değerine bağlı olarak, 4–60 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ mertebelerinde iken, zararlı atmosfer etkisinin bulunduğu endüstriyel bölgelerde bu değer 100–1000 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ seviyelerine kadar çıkabilmektedir [66].

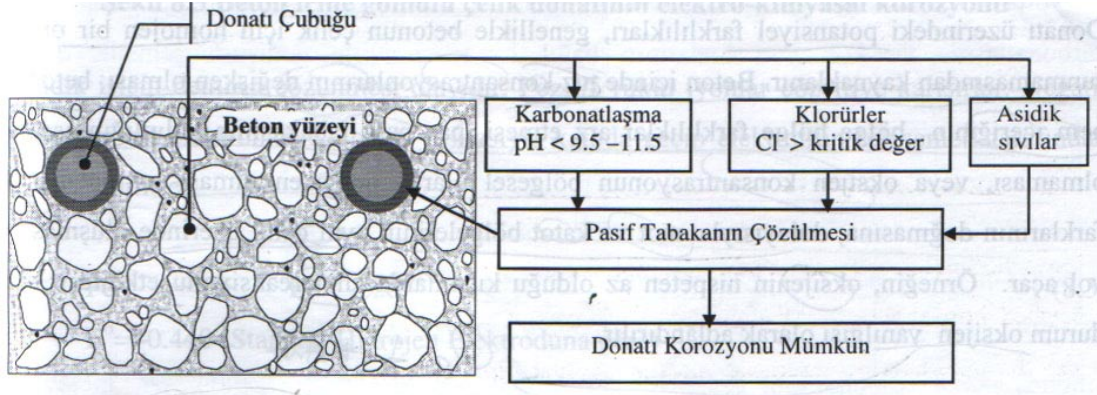
2.3.4.2 Betonarme Donatısında Korozyon

Beton içine gömülü çeliğin açıkta kalan bir çeliğe kıyasla korozyondan çok daha iyi korunması beklenir. Fiziksel koruma, ortamda bulunan zararlı maddelerin, özellikle klorür iyonlarının, oksijen ve nemin çeliğe ulaşmasının engellenmesi veya yavaşlatılması ile sağlanır. Kimyasal koruma ise, betonun çelik donatıya yüksek dereceden alkali (pH 12.5–13.5) bir ortam sunması ile gerçekleşir. Betonun, korozyonun durdurulması açısından çok olumlu olan bu özelliklerine rağmen günümüzde birçok yapıda betonarme donatısının korozyona uğradığı gerçeği de ortadadır. Yetersiz kalınlıkta ve çok geçirimli bir pas payı tabakası, fiziksel ve kimyasal korumanın çok zayıf olması anlamına gelir. Atmosferdeki karbondioksit gazı hidrate çimento bileşikleri ile özellikle beton içindeki kireçle reaksiyona girerek betonun pH değerini indirir. Karbonatlaşma cephesinin donatıya ulaşmasıyla donatı çevresindeki alkali ortam yok olur ve kimyasal koruma sona erer. Beton içine gömülü çelik donatının korozyondan korunması için gerekli en düşük pH değeri konusunda farklı görüşler mevcuttur.

Bazı kaynaklarda, betonun pH değerinin 9.5'in altına inmesiyle pasif tabakanın kararlılığını kaybettiği belirtilirken, bazı kaynaklarda ise bu durum pH değerinin 11.5'in altına düşmesiyle görülme olasılığından söz edilmektedir.

Kimyasal korumanın yok olmasının bir diğer nedeni klorür iyonlarının donatıya ulaşmalarıdır. Bu durumda da donatı çubuğunun üzerinde oluşan ve metalin korozyonunu engelleyen pasif tabaka kararlılığını kaybedere çözünür. Bir diğer olasılık asidik sıvıların özellikle beton örtü tabakasının çatlaklı ve geçirimli kısımlarından donatıya ulaşmalarıdır. Bu durumda da donatının korozyona uğraması beklenir. Fakat betonun da asitlere dayanıksızlığı düşünüldüğünde bu tür sıvılarla temas edecek betonarme yapılarda önlemlerin hem beton hem de donatı açısından

düşünülmesi gereklidir. Ortamda su ve oksijen mevcutsa –ki durum genelde böyledir- donatı korozyona uğrar. Pasif tabakanın çözünmesiyle donatının korozyona uğraması **Şekil 2.18’de** şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Karbonatlaşma veya klorür iyonları nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması

Betonarme donatısında elektro-kimyasal korozyonun gelişimi, ortamda klorür iyonlarının bulunmaması ve bulunması durumları için aşağıda ayrı ayrı incelenmiştir [66].

2.3.4.3 Çelik Donatının Elektro Kimyasal Korozyonu

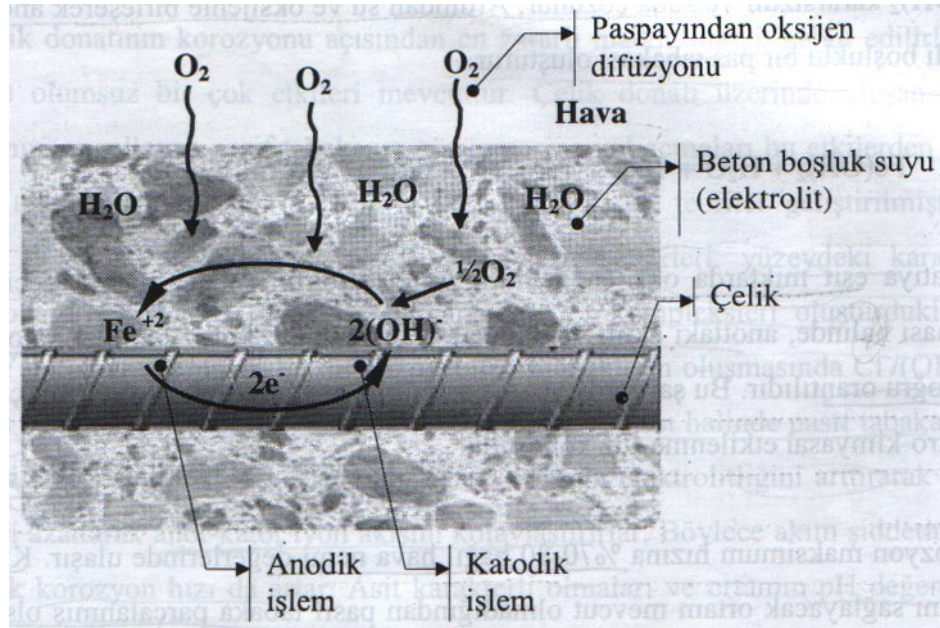
Korozyon, birbirini tamamlayan ve eş zamanlı gelişen, oksidasyon (yükseltgenme) ve redüksiyon (indirgenme) adı verilen iki elektro-kimyasal reaksiyonla meydana gelir. Oksidasyon atom halindeki metalin (çeliğin) elektron kaybederek iyonla dönüşmesi, redüksiyon ise atomdan ayrılan elektronların başka bir ortamda harcanmasıdır. Oksidasyona anot reaksiyonu, redüksiyona katot reaksiyonu adları verilir. Korozyonun sürekliliği için anot reaksiyonunun katot reaksiyonu ile tamamlanması şarttır. Bunun için anotta oluşan elektronların katoda, katotta oluşan hidroksit iyonlarının ise anota ulaşması gereklidir. Anot ve katot aynı çelik eleman üzerindeyse –ki çoğunlukla durum böyledir- çelik donatı elektronları katoda iletirken, elektrolitik sıvı, örneğin beton boşluk suyu sayesinde hidroksit iyonları anota taşınır. Anot reaksiyonu gösteren kısım veya metal kütle kaybederek hasara uğrar. Bu şartlardan birinin ortadan kaldırılması reaksiyonun durdurulması anlamına gelir.

Beton içine gömülü çelik donatının korozyonu elektro-kimyasal reaksiyonla gelişir. Korozyon tam hücresi, elektron ve iyon akışını sağlayan boşluk suyunun oluşturduğu

elektrolitik ortamla birbirine bağılı anot ve katot elemanlarından oluşur. Anot ve katot aynı donatı üzerinde birbirine çok yakın (mikro eleman) olabileceği gibi, birbirinden uzakta da (makro eleman) olabilmektedir.

Donatı üzerindeki potansiyel farklılıkları, genellikle betonun çelik için homojen bir ortam sunmamasından kaynaklanır. Beton içindeki tuz konsantrasyonlarının değişken olması, betonun nem içeriğinin bölge bölge farklılıklar arz etmesi, pas payı tabakasının sabit olmaması veya oksijen konsantrasyonunun bölgesel olarak değişken olması bu potansiyel farklarının doğmasına, dolayısıyla katot ve anot bölgelerinin aynı çelik üzerinde oluşmasına yol açar. Örneğin, oksijenin nispeten az olduğu kısımlarda anot reaksiyonu etkinleşir. Bu durum oksijen yanılıgısı olarak adlandırılır.

Beton içindeki donatının korozyonu **Şekil 2.19'da** şematik olarak verilmiştir. Elektro-kimyasal reaksiyonun aşamaları ise aşağıda gösterilmiştir. Burada verilen formüllerin reaksiyonun ana hatlarını yansıttığı, farklı kaynaklarda farklı kabullerin de olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.19: Beton içinde gömülü çeliğin elektro-kimyasal korozyonu

Anodik işlem demirin çözünmesi olayıdır. Pozitif yüklü iyonlar çözeltiye karışırlar. Negatif yüklü serbest elektronlar ise çelik vasıtasıyla katoda geçip elektrolitin bileşenleri tarafından adsorbe edilirler.



$E^0 = -0.440$ (Standart Hidrojen Elektroduna göre)

Katodik işlemde, çelik vasıtasıyla katoda geçen elektronlar su ve oksijenle birleşip hidroksit iyonlarını oluştururlar.



$E^0 = 0.401$ (Standart Hidrojen Elektroduna göre)

Anottan çözeltiye geçen demir iyonları hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girerek demir hidroksiti oluştururlar.

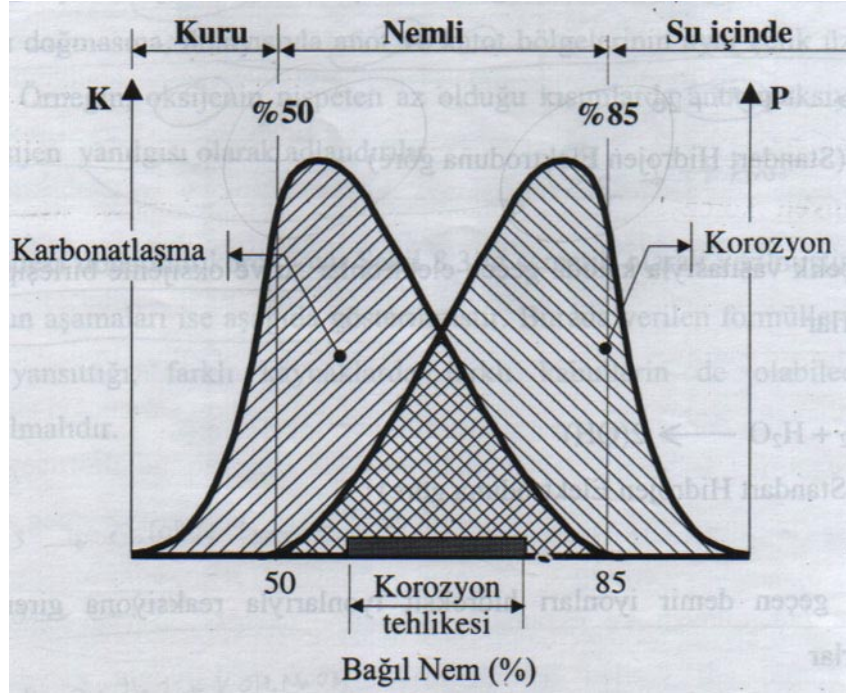


$Fe(OH)_2$ kararsızdır ve suda çözünür. Ardından su ve oksijenle birleşerek anot çevresinde sarı renkli boşluklu bir pas tabakası oluşturur.



Donatıya eşit miktarda oksijen gelmesi ve elektrolitin (nemli beton) geçirgenliğinin sabit kalması halinde, anottaki akım yoğunluğu ve buna bağlı korozyon hızı katot alanı/anot alanı ile doğru orantılıdır. Bu şartlarda yüzeyi aşındıran atmosferik korozyondan çok daha etkili elektro-kimyasal etkilenme söz konusudur.

Korozyon maksimum hızına %70–80 bağıl hava nemi değerinde ulaşır. Kuru betonda iyon akışını sağlayacak ortam mevcut olmadığından pasif tabaka parçalanmış olsa bile korozyon ilerleyemez. En çok zararı sürekli ıslanma-kuruma etkisine maruz yapılar görür. Yarı ıslak periyotta karbonatlaşma gelişirken, daha doygun ortamda korozyon etkinleşir. **Şekil 2.20'de** karbonatlaşma ve korozyon hızlarının bağıl hava nemi ile değişimi şematik olarak gösterilmektedir [66].



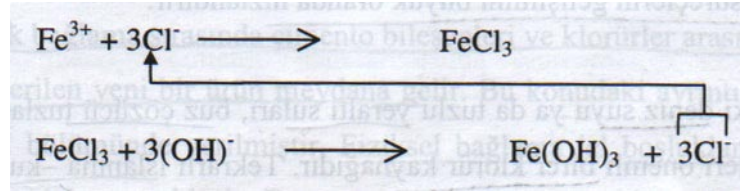
Şekil 2.20: Betonun karbonatlaşmasının ve betonarme donatısının korozyon hızının bağıl hava nemi ile değişimi

2.3.4.4 Betonarme Donatısında Klorür Korozyonu

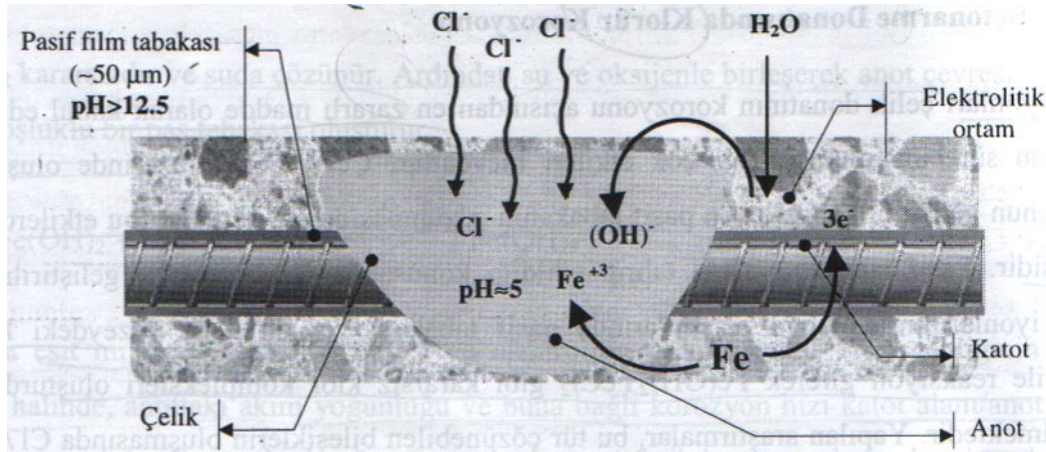
Klorür iyonları betonun korozyonu açısından en zararlı madde olarak kabul edilirler. Korozyon sürecine olumsuz birçok etkileri mevcuttur. Çelik donatı üzerinde oluşan ve korozyonun gelişimini engelleyen pasif tabakanın çözünmesine yol açmaları bu etkilerden en önemlisidir. Pasif tabakanın nasıl tahrip edildiği konusunda farklı teoriler geliştirilmiştir. Klorür iyonlarının donatıya ulaştıklarında pasif tabakayı gevşettikleri, yüzeydeki kararlı tabaka ile reaksiyona girerek $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeCl_2 gibi zararsız klor kompleksleri oluşturdukları düşünülmektedir. Yapılan çalışmalar, bu tür çözünebilen bileşiklerin oluşmasında $\text{Cl}^-/(\text{OH})^-$ oranının önemli bir parametre olduğunu, bu oranın 0.60 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 indirmeleri bir diğer olumsuz etkidir. Pasif tabakanın kararlılığını koruması için ortamın pH değerinin 9.5–11.5'in üzerinde olmasının gerektiği daha önce ifade edilmişti.

Klorür iyonları metal tarafından O_2 ve $(\text{OH})^-$ iyonlarına kıyasla çok daha kolay adsorbe edilirler. Böylece katalizör görevi görerek, Anodik reaksiyonun kolaylıkla

oluşmasını sağlarlar ve demirin iyonlaşmasını çarpıcı biçimde hızlandırırlar. Klorür bulunan ortamda korozyonun gelişimi **Şekil 2.21'deki** formüller ile gösterilmiştir. Ortamda demir ve $(OH)^-$ iyonlarının bol miktarda bulunması nedeniyle klorür iyonları reaksiyon sonucunda sürekli yenilenmekte ve donatıda tahribat devamlılık arz etmektedir. Bu nedenle, klorürlerin donatıda yol açtıkları korozyonun, en tehlikeli korozyon türü olduğunu söylemek mümkündür. Reaksiyonun gelişimi şematik olarak **Şekil 2.22'de** gösterilmiştir [66].



Şekil 2.21: Klorür bulunan ortamda korozyonun gelişimi



Şekil 2.22: Betonarme donatısında klorür iyonlarının yol açtığı oyulma tarzı korozyon

2.3.4.5 Klorür Kaynakları

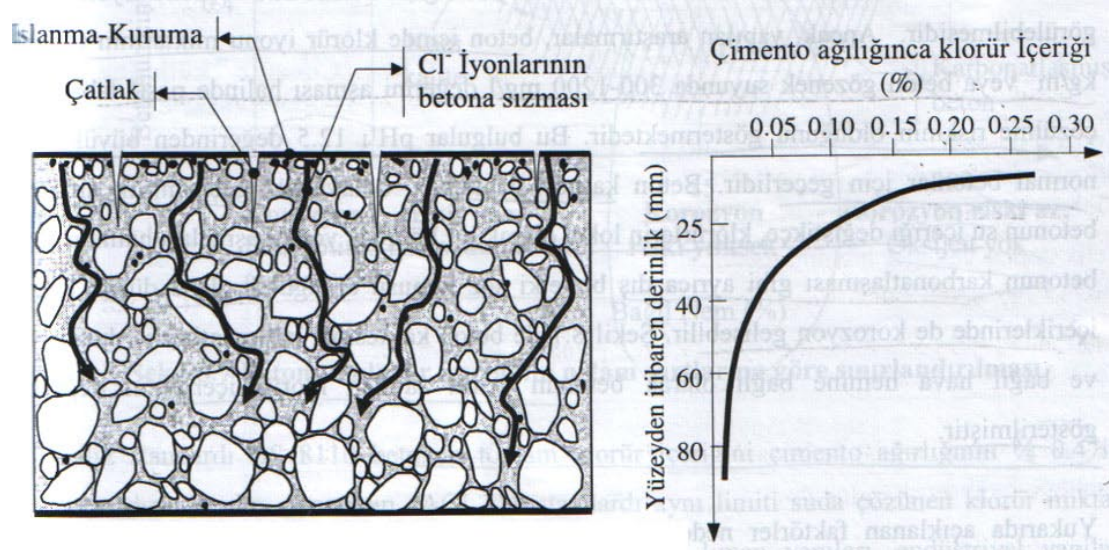
Klorürler beton bünyesine CO_2 gibi difüzyon yoluyla girerler. Beton içinde ilerleme hızları karbonatlaşma olayındakine benzer olarak zamanın karekökü ile ilişkilidir.

Klorür iyonları beton içine çeşitli yollardan girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür için 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 sayılabilir. Ayrıca, çimentoda hatta içme suyunda bile 250 ppm'e varan miktarlarda klorür iyonu bulunabildiğini belirtmekte fayda vardır. Ancak en yaygın görülen

durum çevrede bulunan klorürlerin beton içine taşınmasıdır. Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. İslanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır.

Özellikle betonla temas halindeki deniz suyu ya da yeraltı suları, buz çözücü tuzlar, tuz üreten veya işleten sanayi tesisleri önemli birer klorür kaynağıdır. Tekrarlı ıslanma-kuruma etkisine maruz deniz yapılarında deniz suyu ile beton içine sızan klorür iyonları, suyun buharlaşması sonucu beton içinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça klorür yoğunluğu da artmaktadır. Bu durumda deniz suyundaki klorür iyonu konsantrasyonundan daha fazla miktarda klorür iyonu beton içinde birikebilmektedir. Ayrıca, denizden yükselen çok ince deniz suyu damlacıkları dolayısıyla klorürler rüzgarlarla önemli mesafelere taşınarak beton yüzeyine yerleşebilmektedir.

Zamanla beton içinde, yüzeyden derinlere inildikçe azalan bir klorür iyonu dağılımı gözlenir. **Şekil 2.23**'de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. **Şekil 2.23**, klorür iyonlarının yapının servis ömrü boyunca donatıya ulaşamamaları için en önemli unsurun yeterli kalınlıkta ve geçirimsizlikte beton örtü tabakasının mevcudiyeti olarak vurgulamaktadır.



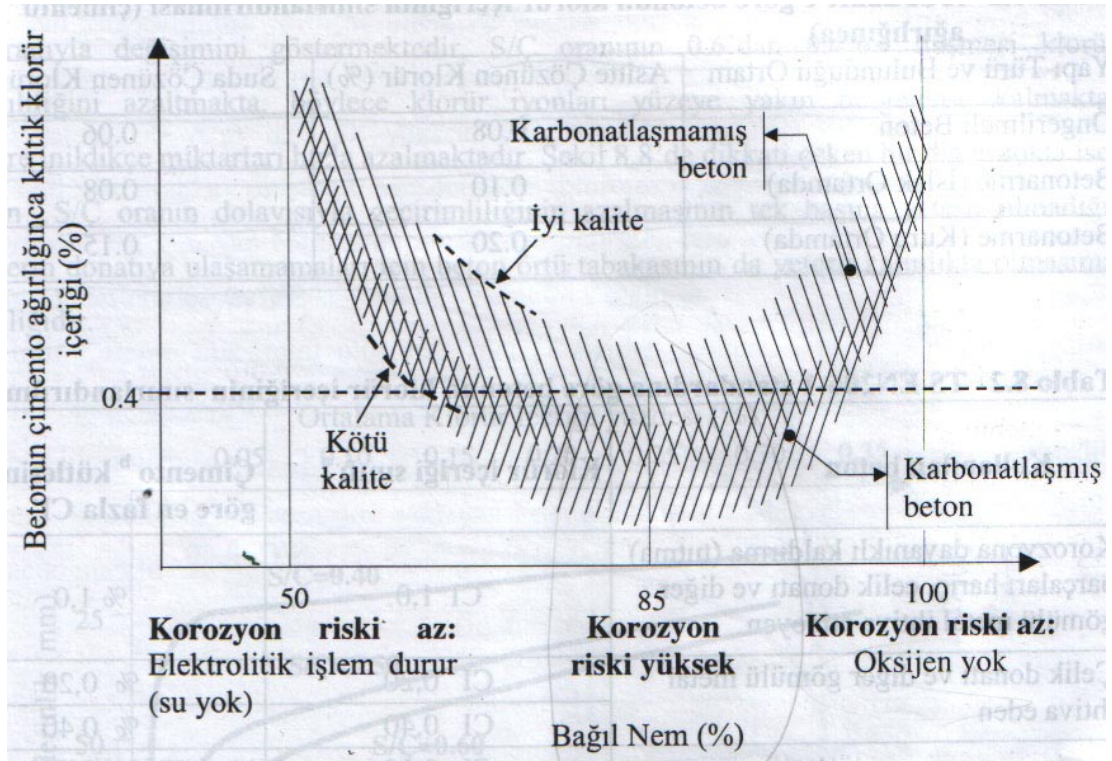
Şekil 2.23: Beton içine sonradan giren klorürlerin yüzeyden derine doğru miktarlarının değişimi

Beton, klorür iyonlarının bir kısmını fiziksel ve kimyasal olarak bağlayabilmektedir. Bu nedenle, beton içindeki klorür iyonları bağlı ve serbest klorür olarak ikiye ayrılır. Kimyasal olarak bağlama sırasında çimento bileşenleri ve klorürler arasındaki reaksiyondan Friedel tuzu adı verilen yeni bir ürün meydana gelir. Bu konudaki

ayrıntılı bilgiler deniz suyunun betona etkisi bölümünde verilmiştir. Fiziksel bağlama jel boşlularında 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. Betonun toplam klorür miktarı nitrik asitte çözünen klorür olarak belirlenir. Deney yöntemleri ASTM C 1152 “Betonda ve harçta asitte çözünür klorür” ve ASTM C 1218 “Betonda ve harçta suda çözünür klorür” standartlarında tarif edilmiştir.

Betonda korozyona yol açmayacak klorür iyonu içeriğini saptamak oldukça güçtür. Bu değer, betonun su/çimento oranı, çimento dozajı, çimento tipi ve özgül yüzeyi, kür koşulları, yaşı, çevre koşulları, karbonatlaşma riski, bağıl hava nemi gibi birçok parametreye bağlıdır. Bir diğer zorluk maruz kalma koşullarının değişkenliği ve betonun homojen olmayan yapısı nedeniyle, aynı yapının farklı bölümlerinde değişik klorür konsantrasyonlarının görülebilmesidir. Ancak, yapılan araştırmalar, beton içinde klorür iyonu miktarının $0.6\text{--}0.9\text{ kg/m}^3$ veya beton gözenek suyunda $300\text{--}1200\text{ mg/l}$ değerini aşması halinde pasif tabakanın çözülme riskinin olduğunu göstermektedir. Bu bulgular pH’ı 12.5 değerinden büyük olan normal betonlar için geçerlidir. Beton kalitesi azaldıkça, dolayısıyla geçirimsizlik arttıkça, betonun su içeriği değiştikçe, klorürlerin lokal olarak bir bölgede yoğunlaşmaları halinde veya betonun karbonatlaşması gibi ayrıca dış bir etki söz konusu olduğunda daha düşük klorür içeriklerinde de korozyon gelişebilir. **Şekil 2.24’de** beton kalitesine, karbonatlaşma durumuna ve bağıl hava nemine bağlı olarak betonun kritik sayılan klorür içeriğinin değişimi gösterilmiştir.

Yukarıda açıklanan faktörler nedeniyle betonun kritik klorür muhtevası için geçerli tek değerden bahsedilemez. Genellikle betonarme yapılar için kabul edilebilir sınır çimento ağırlığınca %0.4, öngerilmeli beton yapılar için %0.2 civarında alınmaktadır. **Şekil 2.24’den** görüldüğü üzere beton karbonatlaşmış ve bağıl hava nemi %85 civarındaysa bu sınırlamaların bile yeterliliği tartışılmalıdır. Özellikle Marmara depremi sonrası, denize yakın bölgelerdeki yıkılmış betonarme yapıların donatılarında yapılan incelemeler, bu değerlerin gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.



Şekil 2.24: Betonun klorür içeriğinin ortam şartlarına göre sınıflandırılması

İngiliz standardı BS 8110 betonun toplam klorür içeriğini çimento ağırlığının %0.4 ile sınırlandırmaktadır. Amerikan ACI 318 standardı aynı limiti suda çözünen klorür miktarı olarak, klor etkinliğine açık (köprü, kapalı garajlar, liman yapıları, endüstriyel yapılar) yapılarda %0.15, öngerilmeli betonarme yapılarda %0.06, hiç nem etkisinde kalmayacak yapılarda %1, diğer yapılarda ise %0.3 ile sınırlamıştır. Ancak ACI 222R-96 daha sıkı sınırlamalar önermektedir. Bu değerler çimento ağırlığına oranla asitte ve suda çözünen klorür miktarları olarak **Tablo 2.13'de** özetlenmiştir.

Ülkemizde çimento standartlarında çimentoların klorür içerikleri kütlece %0.1 ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca betonarme ve öngerilmeli beton yapılar için TS EN 206-1'de bulunan koşullar **Tablo 2.14'de** özetlenmiştir. TS EN 206-1 yetmişli yılların ortalarından beri Avrupa ve Amerika'da uygulanan, kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıların çelik donatı, öngerilmeli çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden betonlarda kullanılmamasını hükmünü de getirmiştir.

Tablo 2.13: ACI 222R’e göre betonun klorür içeriğinin sınıflandırılması (çimento ağırlığınca)

Yapı türü ve bulunduğu ortam	Asitte çözünen klorür (%)	Suda çözünen klorür (%)
Öngerilmeli beton	0,08	0,06
Betonarme (ıslak ortamda)	0,10	0,08
Betonarme (kuru ortamda)	0,20	0,15

Tablo 2.14: TS EN 206-1 standardına göre betonun klorür içeriğinin sınıflanması

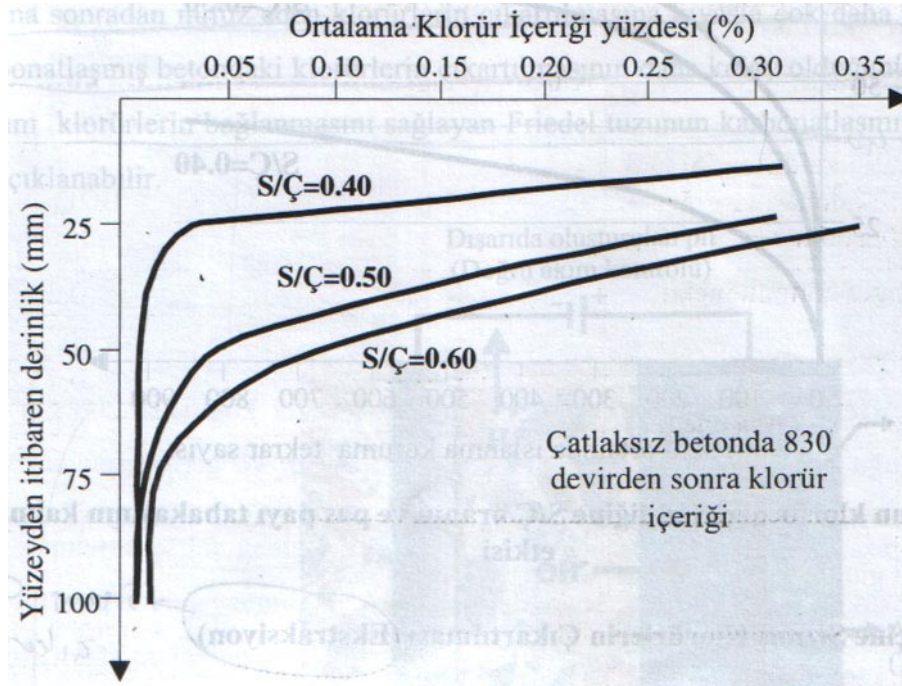
Kullanılan beton	Klorür içeriği sınıfı ^a	Çimento ^b kütlesine göre en fazla Cl
Korozyona dayanıklı kaldırma (tutma) parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen	Cl 1,0	% 1,0
Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden	Cl 0,20	% 0,20
	Cl 0,40	% 0,40
Çelik öngerme donatısı ihtiva eden	Cl 0,10	% 0,10
	Cl 0,20	% 0,20
^a Özel kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli kurallara bağlıdır.		
^b Mineral katkıların kullanıldığı ve katkının çimentoya dahil olarak kabul edildiği yerlerde, klorür muhtevası, klorür iyonlarının, çimento + dikkate alınan toplam katkı miktarlarına oranlanmasıyla hesaplanır.		

Agregalarda ise klorür içeriğinin toplam agrega kütlesinin %0.05’ini aşmaması, sülfat dayanıklı çimento kullanıldığında bu sınırın %0.03’e çekilmesi önerilmektedir. Öngerilmeli beton agregasında bu değer %0.01 olarak verilmektedir.

Betonun klorür geçirimliliğinin tayini için hızlandırılmış deney yöntemi ASTM C 1202 kullanılabilir. Deney, sodyum hidroksit ve sodyum klorür içeren çözeltiye yerleştirilmiş beton diskten belli bir zaman zarfında geçen akım miktarının (Coulomb) ölçümü esasına dayanır. Farklı özelliklerdeki betonların kıyaslanması için uygundur. Ancak klorür iyonlarının beton içinde ilerlemesiyle ilgili gerçek durumu yansıttığını söylemek güçtür.

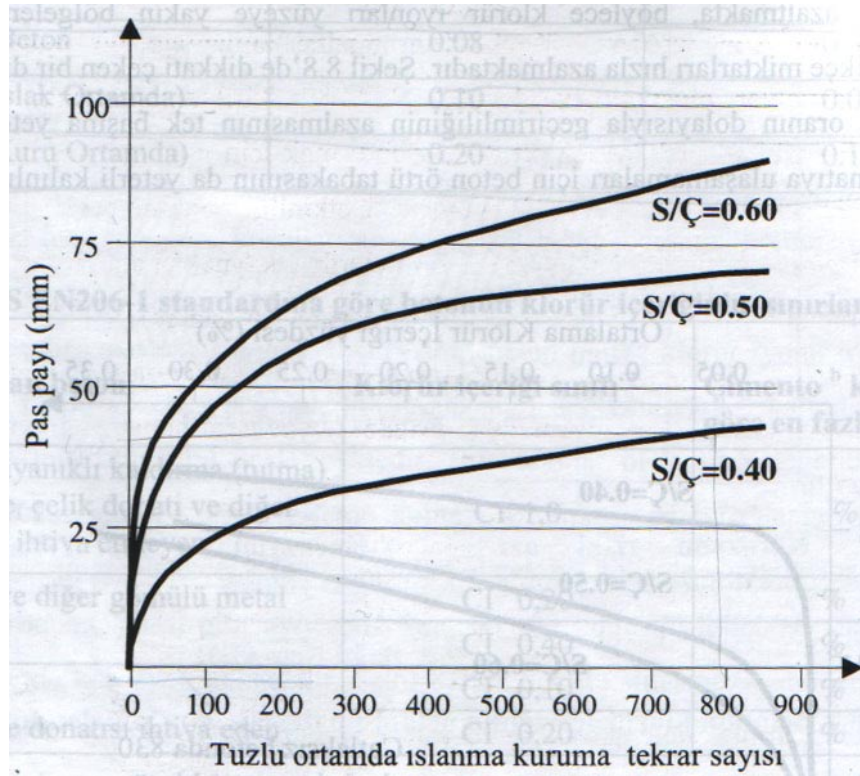
Şekil 2.25, klorür tuzlarına 830 gün maruz bırakılan beton örneklerinin klorür geçirimliliklerinin S/Ç oranıyla değişimini göstermektedir. S/Ç oranının 0.6’dan 0.4’e düşmesi klorür geçirimliliğini azaltmakta, böylece klorür iyonları yüzeye yakın bölgelerde kalmakta, derinlere inildikçe miktarları hızla azalmaktadır. **Şekil 2.25’de** dikkati çeken bir diğer nokta ise, betonun S/Ç oranının dolayısıyla geçirimliliğinin

azalmasının tek başına yeterli olmadığı, klorürlerin donatıya ulaşamamaları için beton örtü tabakasının da yeterli kalınlıkta olmasının gerekliliğidir.



Şekil 2.25: Betonun klorür geçirimliliğine S/Ç oranının etkisi

S/Ç oranının ve beton örtü tabakasının kalınlığının klorür geçirimliliğine etkisi **Şekil 2.26'da** gösterilmiştir. Bu çalışmada, betonun farklı derinliklerinde asitte çözünür klorür miktarının %0.2 değerine ulaşması için gerekli olan klorüre maruz kalma süreleri (sayıları) belirlenmiştir. Buna göre, S/Ç oranı 0.4 olan bir beton örtü tabakası, 800 kez tuza maruz kaldığında, çeliği korozyondan korumak için gerekli kalınlık 40 mm olmaktadır. Aynı koruma S/Ç oranı 0.5 olan betonda 70 mm kalınlığındaki beton örtü tabakası ile sağlanırken, S/Ç oranı 0.6'a yükseldiğinde gerekli beton kalınlığı 90 mm olmaktadır. Bu ve benzeri çalışmaların sonuçlarına dayanarak, tuzlara tekrarlı ıslanma-kuruma şeklinde maruz yapılarda pas payı tabakasının kalınlığının, S/Ç oranı 0.40 olan betonda en az 50 mm, 0.45 olan betonda ise en az 65 mm alınması, daha şiddetli etki durumunda bu kalınlıkların arttırılması ve gereğinde betonun klorüre karşı kaplamalarla izole edilmesi ACI 222R'de önerilmektedir [66].

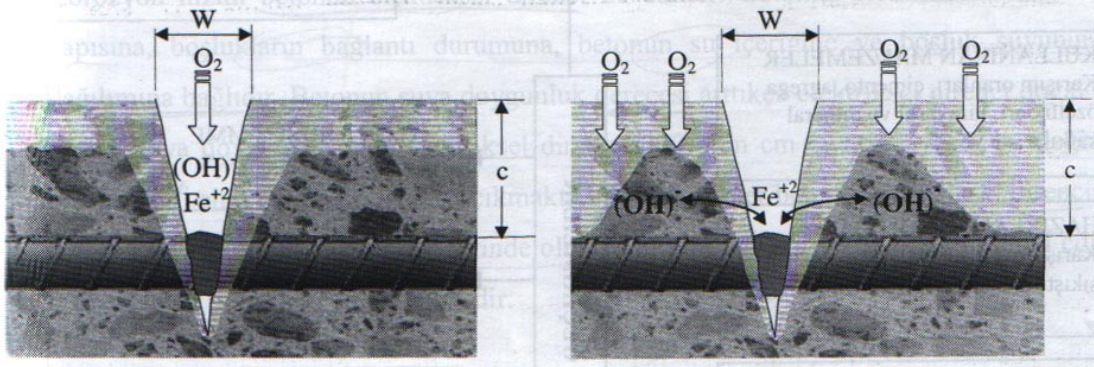


Şekil 2.26: Betonun klorür geçirirliliğine S/Ç oranının ve pas payı tabakasının kalınlığının etkisi

2.3.4.6 Çatlaklı Betonda Korozyon

Betonda oluşan çatlaklar, klorürlerin, karbonatlaşma cephesinin, oksijen ve nemin çeliğe ulaşmalarını kolaylaştırırlar. Bu sebeple çatlak genişliklerinin belli bir mertebeyi aşmaması istenir. Donatıya dik çatlaklar, korozyonun nispeten dar bir alanda oluşmasına yol açarlar. Deneyimler, bu durumda, korozyona uğrayan donatı kısmının donatı çapının üç katını aşmadığını göstermektedir. Donatı boyunca uzanan, böylece tüm donatının ve dolayısıyla pas payı tabakasının hasar görmesine yol açan çatlaklar enine çatlaklara kıyasla çok daha tehlikeli kabul edilirler. Çatlak genişliği ve korozyon arasındaki ilişkiler arasında farklı görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar çatlak genişliği ve korozyon hızı arasında direk bir bağlantı olmadığını iddia ederken, bazıları bu durumun 0.3 mm den ince çatlaklar için geçerli olduğunu ifade etmektedir. **Şekil 2.27**, donatı üzerindeki betonda, enine çatlak bulunması durumunda, korozyonun gelişimi konusunda iki alternatif bulunduğunu şematik olarak göstermektedir. İlk durumda anot ve katot çatlaklı bölgede birbirine çok yakındır. Çatlak dar (<0.5 mm) ve aktif değilse, yani açılmaya devam etmiyorsa, büyük olasılıkla korozyon ürünleri, betondan süzülen bileşenler, toz, kir vb. gibi

maddeler çatlağın içini doldurarak korozyonun yavaşlamasına yol açacaktır. **Şekil 2.27**'de sağda gösterilen durumda ise, çatlak içindeki küçük bölge anot, beton içinde kalan daha büyük alan ise katot olmaktadır. Korozyon hızını doğrudan etkileyen parametre betonun geçirimliliğidir. Uygun ortamda bu tür korozyonun hızı dolayısıyla donatının hasar görmesi daha fazladır. Klorürlerin de ortamda bulunması halinde korozyonun çok daha tehlikeli bir hale geleceğini belirtmekte fayda vardır.



Şekil 2.27: Çatlak bölgesinde korozyonun gelişimi

Betonarme yapılarda çatlak genişliklerinin sınırlandırılması, pas payı tabakasının kalınlığı ve kalitesinin artırılmasının yanında, korozyonu önlemede ikinci bir önlem olarak düşünülür. Çünkü uygulamada tamamen çatlaksız bir beton elde etmek oldukça güçtür. Ayrıca çatlaksız bir betona da oksijen, klorür ve karbondioksit girişi söz konusudur. Aşılması önerilen çatlak genişlikleri 0.2–0.3 mm civarındadır [66].

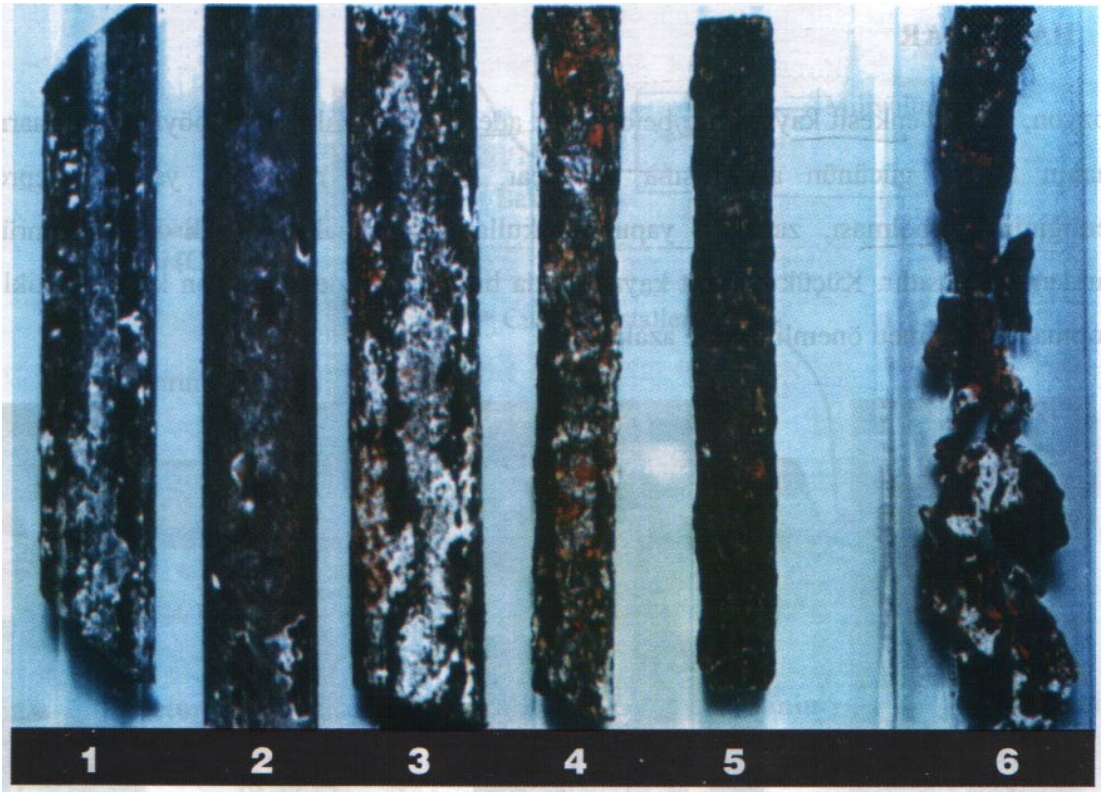
2.3.4.7 Korozyonun Betonarme Yapılarda Meydana Getirdiği Hasarlar

Şekil 2.28'de İzmir'de Konak-Alsancak hattında ve sahil kasabası Mordoğan'da bulunan, sargı donatısı yer yer kaybolmuş, boyuna donatısı paslanmış, beton örtü tabakası dökülmüş elektrik direkleri gösterilmektedir. Denizlerin denize bakan yüzlerinin ağır hasar görmüş olması, karbonatlaşma cephesinin çelik donatıya ulaştığı, deniz ortamından kaynaklanan klorür iyonlarının ise korozyonun gelişimini hızlandırdığı şeklinde yorumlanabilir [66].



Şekil 2.28: İzmir’de korozyon hasarına uğramış elektrik direkleri

Sıva uygulanmadan kullanılan bu tür betonarme elemanlarda, pas payı tabakası donatıyı korumakta yetersiz kalabilmektedir.

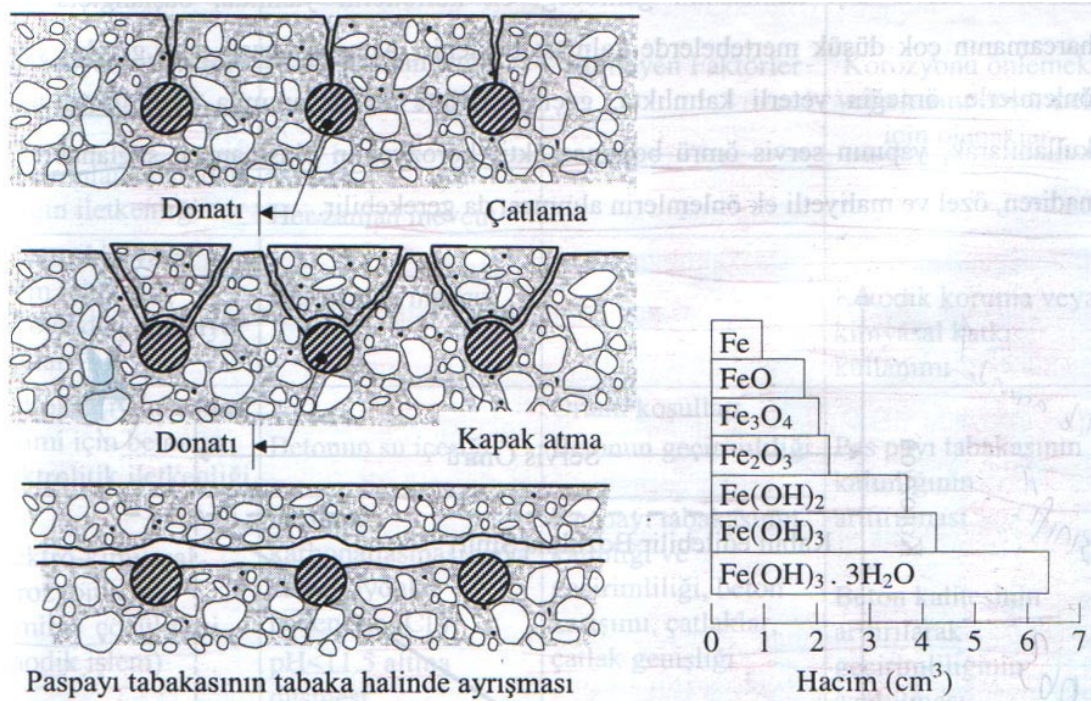


Şekil 2.29: Donatının korozyonu sonucu kesit kaybı ve parçalanması

Şekil 2.29’da betonarme donatısının korozyon nedeniyle aşama aşama kesit kaybetmesi ve sonuçta tamamen parçalanması görülmektedir.

Pas ürünleri ortamdaki oksijen içeriğine bağlı olarak çelikten yaklaşık altı kat daha fazla hacim işgal ederler. Bu durum Şekil 2.30’da şematik olarak gösterilmiştir. Hacim artışı nedeniyle oluşan çekme gerilmeleri betonda çatlamaya ve pas payı tabakasının dökülmesine sebep olur.

Korozyonun ilerlemesi ile betonda görülen hasar türleri de Şekil 2.30’da sol tarafta şematik olarak gösterilmiştir. Pas ürünlerinin betonla çelik arasındaki aderansın kaybolmasına yol açtıkları daha önce belirtilmişti. Oksijenin nispeten düşük olduğu ortamlara ise pas ürünlerinin meydana getirdiği hacim artışı %50–200 mertebelerinde kalır, korozyon hızı düşer, oluşan ürünler çatlamaya ya da dökülmeye yol açmadan betonun gözeneklerine dağılırlar. Korozyon görünür bir işaret vermeden ilerleyerek yapı elemanlarında ani göçmelere neden olabilir.



Şekil 2.30: Korozyon ürünlerinin hacimlerinin demire kıyasla gösterimi ve korozyon sonucu betonda görülen hasar çeşitleri

Korozyon sonucu betonda oluşacak çatlakların donatıya göre yönü de önem kazanmaktadır. Donatıya paralel çatlaklar betonun dökülmesine yol açarak donatının fiziksel korunmasının tamamen kaybolmasına ve atmosferik korozyonun başlamasına sebep olmaları açısından donatıya dik çatlaklardan daha tehlikelidirler.

2.3.4.8 Alınacak Önlemler

Tablo 2.15: Korozyon gelişimini etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler [66].

Korozyonu kontrol eden faktörler	Doğrudan bağlı olduğu koşul	Etkileyen faktörler	Korozyonu önlemek veya hızını düşürmek için olanaklar
Elektronlar açısından çeliğin iletkenliği	Her zaman mevcut	-	-
Elektro-kimyasal işlem için çelik yüzeyinde potansiyel farklar	Her zaman mevcut	-	Katodik koruma veya kimyasal katkı kullanımı
Hidroksit iyonlarının iletimi için betonun elektrolitik iletkenliği	Betonun su içeriği	Ortam koşulları, betonun geçirimsliliği	Pas payı tabakasının kalınlığının artırılması.
Elektro- kimyasal korozyon için demirin çözülmesi (anodik işlem)	Betonun karbonatlaşması veya zararlı iyonlar nedeniyle (Cl^-) $pH < 11,5$ altına düşmesi	Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimsliliği, beton karışımı, çatlaklar, çatlak genişliği	Beton kalitesinin artırılarak geçirimsliliğin azaltılması.
Katodik işlem ve pas ürünlerinin oluşması için oksijen bulunması	Oksijenin beton içinden geçerek donatı yüzeyine ulaşması	Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimsliliği, betonun su içeriği, çatlaklar, çatlak genişliği	Çatlak genişliğinin sınırlandırılması.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

Aşağıda özelliklerinden bahsedilen malzemeler tüm beton karışımlarında değiştirilmeden kullanılmıştır.

3.1.1 Agregalar

Yapılan bu çalışmada, beton karışımında doğal kum, kırma kum ve kırmataş I olmak üzere üç değişik agregalar kullanılmıştır. Doğal kum, Boğaziçi Beton'dan, kırma kum ve Kırmataş I ise Kancataş'tan temin edilmişlerdir. Agregalar beton üretiminde kullanılmadan önce, laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları

Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık, (kg/m ³)
Kum	2650
Kırma Kum	2680
Kırmataş I	2700

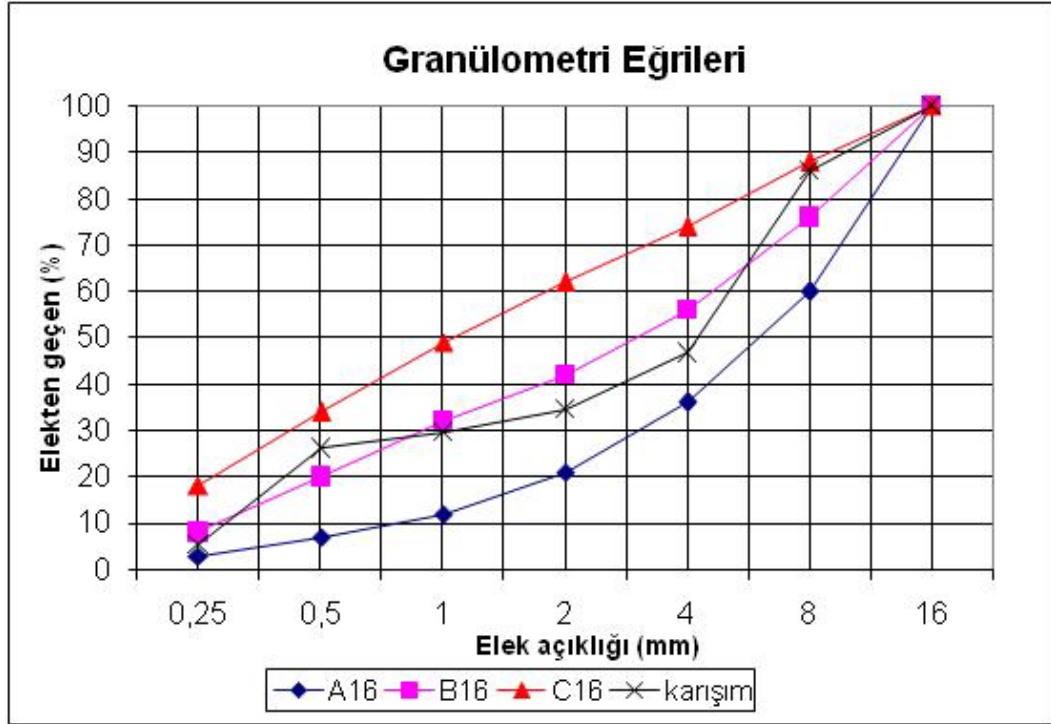
Kullanılan agregaların granülometreleri TS 706 EN 12620'ye uygun olarak belirlenmiştir. Agregalardan alınan numuneler sırası ile 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.50 mm ve 0.25 mm göz açıklıklı eleklerden elenmişlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucunda beton karışımında kullanılacak agregaların %60'ı Kırmataş I, %16'ü kırma kum ve %24'si doğal kum olarak belirlenmiştir. Karışıma ait granülometri eğrisi **Şekil 3.1**'de verilmiştir. Malzemelerin elek analizi deney sonuçları **Tablo 3.2**'de, seçilen karışım için elekten geçen malzeme yüzdeleri **Tablo 3.3**'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Elek analizi deney sonuçları

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)		
	Kum	Kırma Kum	Kırma Taş I
16	100	100	100
8	100	100	77
4	99	89	15
2	96	65	2
1	93	40	2
0,5	87	27	2
0,25	9	15	1

Tablo 3.3: Seçilen karışım için elekten geçen malzeme yüzdeleri

Elek Göz Açıklığı (mm)	16	8	4	2	1	0,5	0,25
Karışım	100	86	47	35	30	26	5



Şekil 3.1: Beton agregası karışımının granülometri

3.1.2 Çimento

Numunelerin üretiminde Nuh Çimento Sanayi A.Ş. tarafından üretilen SDÇ 32.5, Lafarge Aslan Çimento Fabrikası'nın ürettiği CEM I 42.5R, Lafarge Ereğli Çimento Fabrikası'nın ürettiği CEM III/A 32.5N ve CEM III/A 42.5N çimentoları kullanılmıştır. Kullanılan çimentolar türlerine göre ilgili standartlara uygundur (TS EN 197-1, TS EN 197-4, TS 10157). Çimentolarla ilgili deney sonuçları **Tablo 3.4**'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Çimento Deney Sonuçları

Bileşim (%)	Portlant Çimentosu CEM I 42.5R	Cürufllu Çimento CEM III/A 32.5N	Cürufllu Çimento CEM III/A 42.5N	Sülfata Dayanıklı Çimento SDÇ 32.5N
SiO ₂	19.83	26.94	25.38	20.57
Fe ₂ O ₃	2.71	2.35	2.72	3.96
Al ₂ O ₃	4.95	8.63	7.65	4.18
CaO	64.28	50.36	55.29	64.29
MgO	1.56	3.92	2.99	0.95
SO ₃	2.65	1.51	1.70	2.53
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	0.65	0.81	0.79	0.58
Cl ⁻	0,01	0,01	0.01	0,006
C ₂ S	6.86	-	-	10.42
C ₃ S	66.3	-	-	64.39
C ₃ A	8.54	-	-	4.38
C ₄ AF	8.25	-	-	12.05
Kızdırma Kaybı	2.68	2.34	2.55	1.84
Cüruf İçeriği (%)	–	56.00	37.50	–
Blaine İnceliği, (cm ² /g)	3350	3593	3593	3226
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3,15	3,15	3,15	3,23

3.1.3 Su

Beton üretimi ve kür işleminde şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4 Akışkanlaştırıcı

C25/30, C30/37, C35/45 sınıfı betonların üretiminde Draco Fluicon 1000 marka süper akışkanlaştırıcı ve C40/50 sınıfı beton numunelerinin üretiminde Draco Fluicon 981SR marka süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

3.1.5 Mineral Katkılar

Beton üretiminde Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait deney sonuçları **Tablo 3.5**'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS ENV 197-1		TS639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	50,98						
Al ₂ O ₃	13,11						
Fe ₂ O ₃	9,74						
S+A+F	73,83				>70,00	>70,00	>50,00
CaO	11,82						
MgO	3,91				<5,00		
SO ₃	3,94	<3,00			<5,00		
K ₂ O	1,91						
Na ₂ O	2,71						
KK	0,86	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<5,00	<6,00
Cl ⁻	0,014	<0,10					
Serb. CaO	0,56	<1,00					
Reaks. SiO ₂	40,89	>25,00	>25,00	>25,00			
Reaks. CaO	8,78		<10,00	<10,00			

3.1.6 Sodyum-Sülfat Çözeltisi

Deneylerde kullanılan Na₂SO₄ çözeltisinin hazırlanmasında 100 lt çözelti için 90 lt su ve 10 kg Na₂SO₄ Anhidr kullanılmasıyla ağırlıkça %10'luk çözelti elde edilmiştir.

3.1.7 Deniz Suyu

Deniz suyuna maruz bırakılacak numuneler için gerekli deniz suyu İstinye sahilinden alınmıştır.

3.2 Beton Karışım Hesabı

Kullanılan bağlayıcı malzemeye göre beş farklı grup beton numunesi üretilmiştir. Bunlar sadece portland çimentosu ile üretilen numuneler (PÇ), sülfata dayanıklı çimento ile üretilen numuneler (SDÇ), portland çimentosu ve uçucu kül ile üretilmiş numuneler (PÇ+UK) ve iki farklı cüruflu çimento ile üretilmiş numuneler (CÇ32.5 ve CÇ42.5) olarak isimlendirilebilir. Her bir bağlayıcı türü için C25/30, C30/37, C35/45 ve C40/50 olmak üzere dört farklı dayanım sınıfında ve TS EN 12350-2'ye uygun olarak S4 sınıfında (160–210 mm) numuneler üretilmişlerdir. Toplamda yirmi farklı karışım vardır. Aynı dayanım ve kıvam sınıflarında üretim yapabilmek için; uçucu kül içeren karışımlarda, çimento miktarından belirlenen yüzdelerde çimento eksiltiilerek yerine uçucu kül ilave edilmiştir. Cüruflu çimento veya sülfata dayanıklı çimento ile yapılacak üretimlerde ise önceden deneme betonları üretilerek, bu

deneme betonlarının 7 ve 28 günlük dayanımları esas alınıp, kullanılacak çimento dozajları ve su/çimento oranları belirlenmiştir.

Beton karışım hesabı mutlak hacim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu metotta hesaplara başlamadan önce kullanılacak çimento ve katkı miktarları belirlenmiştir. Bu belirlenen miktarlara göre denklem 3.1 kullanılarak toplam agregası hacmi bulunmuştur.

$$V_{agr} = 1000 - \left(\frac{C}{\delta_C} + W + \frac{K}{\delta_K} + H \right) \quad (3.1)$$

Burada;

V_{agr} = Agregası hacmi, dm^3

C = $1 m^3$ betondaki çimento miktarı, kg

W = $1 m^3$ betondaki su miktarı, kg

K = $1 m^3$ betondaki kimyasal katkı miktarı, kg

H = $1 m^3$ betondaki hava miktarı, dm^3

δ_C = Çimentonun özgül ağırlığı, kg/dm^3

δ_K = Kimyasal katkının özgül ağırlığı, kg/dm^3 'dır.

Karışımda kullanılacak her bir agreganın hacmi denklem 3.2 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$A_{agr,i} = V_{agr,i} \cdot \delta_{a,i} \cdot Y_i \quad (3.2)$$

Burada;

$A_{agr,i}$ = Karışımda kullanılacak agregaların ağırlığı, kg

$\delta_{a,i}$ = Karışımda kullanılacak agregaların özgül ağırlığı, kg/dm^3

Y_i = Agregaların karışım yüzdeleridir.

Deneme üretimleri sonucunda elde edilen dayanım değerlerinden yola çıkılarak kullanılacak çimento dozajları belirlenmiş ve bu dozajlara göre hesaplanan beton karışım oranları

Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Beton karışım oranları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento	Su	Uçucu Kül	S/Ç	Katkı	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırmataş I	Birim Ağırlık
PÇ – C25	260	195	-	0,75	2.1	449	303	1142	2350
PÇ – C30	300	195	-	0,65	2.4	441	297	1124	2360
PÇ – C35	342	205	-	0,60	2.7	428	290	1092	2360
PÇ – C40	379	170	-	0,45	6.1	436	294	1110	2395
PÇ+UK - C25	239	214	66	0,70	2.4	415	293	1140	2370
PÇ+UK -C30	270	207	75	0,60	2.8	398	280	1088	2320
PÇ+UK -C35	313	228	87	0,57	3.2	387	272	1060	2350
PÇ+UK -C40	345	198	96	0,45	4.4	386	271	1058	2360
SDÇ – C25	247	210	-	0,85	2.0	445	300	1136	2340
SDÇ – C30	294	206	-	0,70	2.4	440	296	1121	2360
SDÇ – C35	337	186	-	0,55	2.7	432	292	1101	2350
SDÇ – C40	377	170	-	0,45	3.8	434	292	1104	2380
CÇ32.5 - C25	369	203	-	0,55	2.9	423	286	1077	2360
CÇ32.5 -C30	451	216	-	0,48	3.6	398	268	1013	2350
CÇ32.5 -C35	490	225	-	0,46	3.9	384	258	978	2340
CÇ32.5 -C40	585	263	-	0,45	4.7	355	239	903	2350
CÇ42.5 -C25	289	196	-	0,68	2.3	441	298	1124	2350
CÇ42.5 -C30	353	198	-	0,56	2.8	428	288	1091	2360
CÇ42.5 -C35	404	194	-	0,48	3.2	419	282	1068	2370
CÇ42.5 -C40	451	203	-	0,45	4.4	408	275	1038	2380

3.3 Beton Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması

Beton üretiminde düşey ekseninde karıştırma yapan 50 dm³ kapasiteye sahip betonier kullanılmıştır. Tüm karışımlar tek bir seferde, tüm malzemeler bir araya getirilerek üretilmiştir. Malzemeler kuru olarak karıştırıldıktan sonra suyun önemli kısmı ilave

edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Arta kalan az miktardaki su ise akışkanlaştırıcı katkı ile karıştırılarak betonyer içerisinde karışmakta olan taze betona ilave edilmiştir. Üretilen her beton karışımı için S4 kıvam sınıfında yani 160–210 mm arası çökme değeri hedeflenmiştir. Karıştırma işlemi takiben birim hacim ağırlık ve çökme deneyleri yapılmıştır. Çökme deneyleri için alt çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan çökme konisi kullanılmıştır. Taze beton deneyleri sonrasında, beton kalıplara yerleştirilerek sarsma tablasında ayrılmaya (segregasyon) imkan vermeyecek şekilde sarsılarak betonun tam olarak yerleşmesi ve fazla havanın dışarı atılması sağlanmıştır.

Üretilen beton numuneler bir gün kalıpları içinde bekletildikten sonra kirece doymun su ile dolu kür havuzlarında 28 gün boyunca küre tabi tutulmuştur.

3.3.1 Numune Boyutları ve Sayıları

Her bir beton karışımı için 3 adet 28 günlük, 3 adet ise 40 günlük basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmak üzere 6 adet 150 mm ayrıtlı küp numune üretilmiştir. Durabilite deneyleri için ise; su, sülfat çözeltisi ve deniz suyu ortamlarına maruz kalacak 9 adet 70x70x280 mm ayrıtlı prizmatik numunelerin yanı sıra klor geçirimsizliği deneyleri için 2 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir numune, geçirimsizlik deneyleri için ise 3 adet 70 mm ayrıtlı küp numuneler üretilmiştir.

3.4 Deney Yöntemleri

3.4.1 Taze Beton Deneyleri

Taze beton deneylerinde çökme ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır, gerçek birim hacim ağırlık değerlerinden yola çıkılarak hava değerleri hesaplanmıştır. Çökme deneyi TS EN 12350-2 standardına göre yapılmıştır. Hava ve çökme değerleri **Tablo 4.1**'de verilmiştir.

3.4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Üretilen tüm beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı deneyleri yanı sıra betonun durabilite (kalıcılık) özelliklerinin de belirlenebilmesi için hızlı klor geçirimsizliği deneyi, ağırlıkça su emme ve kılcal su emme deneyi yapılmıştır. Sülfat çözeltisi,

deniz suyu ve su ortamlarında bulunan numuneler için ise ağırlık değişimi, ultrases hızı ve boy değişimi deneyleri periyodik olarak yapılmıştır.

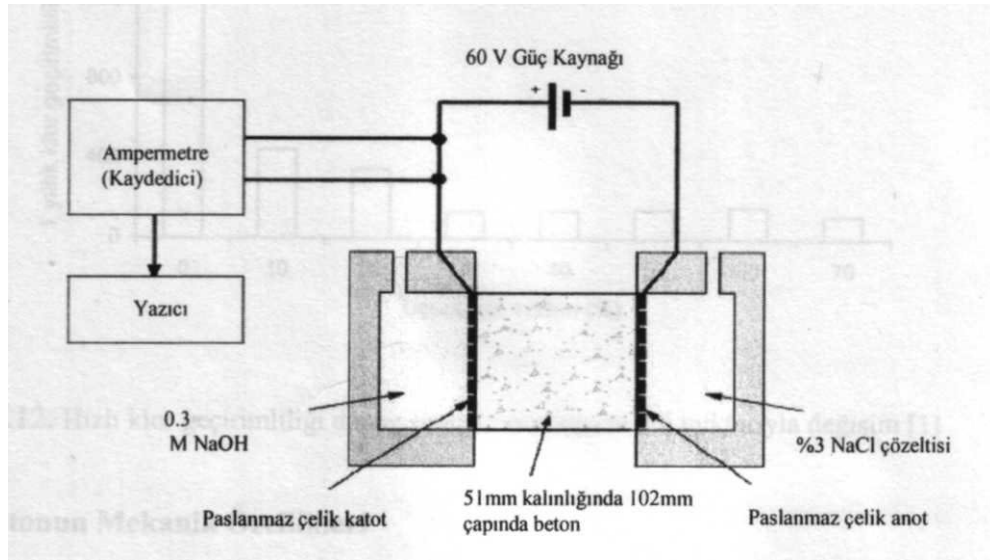
3.4.2.1 Basınç Dayanımı Deneyleri

Üretilen 150 mm ayrıtlı küp numunelerin 3 adeti üzerinde 28 günlük basınç dayanımı deneyleri, diğer üç adeti üzerinde ise 40 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Tüm numuneler 28 gün su kürünü takiben 40. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir. Deneyler için Alsa marka, 2000 kN kapasiteli pres kullanılmıştır.

3.4.2.2 Geçirimsizlik

- Hızlı Klor Geçirimsizliği

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi betonun elektriksel iletkenliği esasına dayanır. Deneyde çapı 100 mm, kalınlığı 51 ± 2 mm olan numuneler kullanılır. Disk numunelerin yan yüzeyleri elektrik iletmeyen bir malzeme ile kaplandıktan sonra numunelere 3 saat boyunca vakum uygulanır. Ardından vakum haznesine su doldurularak numunelere vakum etkisinde 1 saat su emdirilir. Bu işlemlerden sonra numuneler su içerisine yerleştirilerek deney başlangıcına kadar suya doygun halde kalması sağlanır. Numuneler hızlı klor geçirimsizliği deneyi için sudan çıkartıldıktan sonra çözelti hücreleri arasına yerleştirilir. Hücreler, içlerine doldurulan çözeltilerin numuneye temasına izin veren ve kullanılan disk numunelere uygun boyutlara sahip bir tasarıma sahiptir. Deney için hücrelerden birisi %3'lük sodyum klorür (NaCl), diğeri ise 0,3 M sodyum hidroksit (NaOH) ile doldurulur. Ardından 60V sabit potansiyel farkı uygulanarak beton diskten geçen elektrik akım şiddeti miktarı en az yarım saatte bir altı saat boyunca kaydedilir (**Şekil 3.2**) [17].



Şekil 3.2: Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği

Altı saat süren deney sonunda numuneden geçen akım şiddeti - zaman grafiği çizilip, grafik altında kalan alan yardımıyla bu sürede iletilen elektrik akım miktarı coulomb cinsinden hesaplanır.

Çimentonun bir kısmının ince uçucu kül ile yer değiştirmesi halinde klor geçirimliliğinin azaldığı **Şekil 4.6**'da görülmektedir. Ayrıca, **Tablo 3.7**'de betonun klor geçirimliliği yönünden değerlendirilmesi yapılmıştır [1].

Tablo 3.7: Hızlı Klor İyon Geçirimlilik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimliliği yönünden değerlendirilmesi

Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor iyonu Geçirimliliği Yönünden Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

- Kılcallık Deneyleri

Su emme ve kılcallık deneyleri, 40 günlük 70 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde yapılmışlardır. Numunelerin kuru ağırlıkları belirlendikten sonra sadece bir yüzeyleri suyla temas halinde olacak şekilde su dolu kabın içerisine bırakılarak 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 ve 81. dakikalarda 0.1 gram hassasiyetli elektronik terazide tartılarak

içlerine giren su miktarı bulunmuştur. Bu deneyin yapılmasında Uyan'ın çalışmalarından yararlanılarak kılcallık katsayılar hesaplanmıştır [65].

Kılcallık katsayısı aşağıdaki bağıntıdan elde edilmiştir.

$$q = \sqrt{k \cdot t} \quad (3.3)$$

$$m = \left(\frac{q}{\sqrt{t}}\right) \quad (3.4)$$

Bu denklemde;

k: Kılcallık katsayısı (cm²/sn)

q: Birim alanda emilen su miktarı (Q/A) g/cm²

t: süre (sn)

m: doğrunun eğimi olarak gösterilmektedir.

- Ağırlıkça Su Emme Deneyleri

Kuru ağırlıkları bilinen küp numunelerin su içerisinde üç gün bekletilmesinin ardından tekrar ağırlıkları ölçülerek su emme değerleri hesaplanmıştır. Ağırlıkça su emme oranını bulmak için gerekli olan bağıntı Denklem (3.5)'de belirtilmiştir.

$$Sa = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (3.5)$$

Bu denklemde;

Sa: Ağırlıkça su emme oranı (%)

A: Beton numenin yaş ağırlığı (g)

B: Beton numunenin kuru ağırlığı (g)

3.4.2.3 Sülfat Etkisi

- Ağırlık Değişimi

Ağırlık değişimi ölçümleri, su, sülfat çözeltisi ve deniz suyu ortamında bekletilen SDÇ, CÇ32.5 ve CÇ42.5 grubu, 70x70x280 mm ayrıtlı prizmatik numuneler üzerinde periyodik olarak yapılmıştır. Numuneler ölçüme tabi tutulmadan önce kurutulmuşlardır. Ölçümlerden alınan ağırlık değerleri ilk kuru ağırlık değerleri ile kıyaslanarak ağırlık değişim oranları hesaplanmıştır.

- Boy Değişimi

Boy değişimi, su, sülfat çözeltisi ve deniz suyu ortamında bekletilen SDC, CÇ32.5 ve CÇ42.5 grubu, 70x70x280 mm ayrıtlı prizmatik numuneler üzerinde 30 günlük periyotlar halinde ölçülmüştür. Numuneler ölçüme tabi tutulmadan önce kurutulmuşlardır. Ölçümlerden alınan boy değişim değerleri ilk değerler ile kıyaslanarak boy değişim oranları hesaplanmıştır. Boy değişimleri, W.H. Mayes & Son (Windsor) Ltd. üretimi 0,002 hassasiyetli demec ile ölçülmüştür. **Şekil 3.3**'de boy değişimi ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Numunelerde Boy Değişimi Ölçümü

- Ultrases Hızı Değişimi

Ultrases hızı değişimi, su, sülfat çözeltisi ve deniz suyu ortamında bekletilen SDC, CÇ32.5 ve CÇ42.5 grubu, 70x70x280 mm ayrıtlı prizmatik numuneler üzerinde 30 günlük periyotlar halinde ölçülmüştür. Numuneler ölçüme tabi tutulmadan önce kurutulmuşlardır. Ölçümlerden alınan ultrases değerleri ilk değerler ile kıyaslanarak ultrases hızı değişimleri hesaplanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

Bölüm 3’te bahsedilen deneylerin sonuçlarının nasıl elde edildikleri ve sonuçlara ait grafik ve tablolar bu bölümü oluşturmaktadır.

4.1 Taze Beton Özellikleri

Tablo 4.1: Taze Beton Deney Sonuçları

Karışım Kodu	Çökme (cm)	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Hava (%)
PÇ – C25	16,5	2350	1,56
PÇ – C30	16,0	2360	1,36
PÇ – C35	16,0	2360	0,95
PÇ – C40	16,0	2395	1,85
PÇ+UK -C25	17,0	2370	0,00
PÇ+UK -C30	16,5	2320	1,00
PÇ+UK -C35	17,0	2350	0,00
PÇ+UK -C40	17,0	2360	0,09
SDÇ – C25	16,0	2340	1,12
SDÇ – C30	16,0	2360	0,88
SDÇ – C35	16,0	2350	2,80
SDÇ – C40	17,5	2380	2,86
CÇ32.5 - C25	17,0	2360	1,24
CÇ32.5 - C30	17,0	2350	1,18
CÇ32.5 - C35	16,0	2340	1,18
CÇ32.5 - C40	17,5	2350	0,00
CÇ42.5 - C25	17,0	2350	1,61
CÇ42.5 - C30	16,0	2360	1,48
CÇ42.5 - C35	16,5	2370	1,60
CÇ42.5 - C40	17,5	2380	0,85

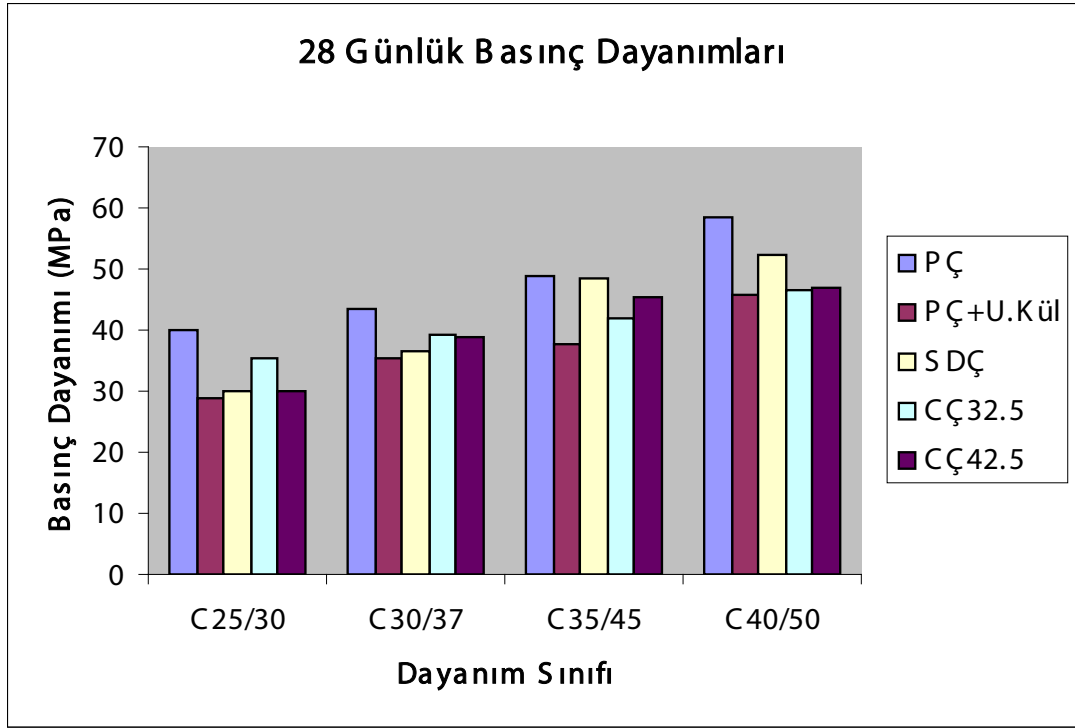
Taze beton üzerine yapılan çökme, birim hacim ağırlık ve hava içeriği deney sonuçları **Tablo 4.1**’de verilmiştir.

4.2 Basınç Dayanımı

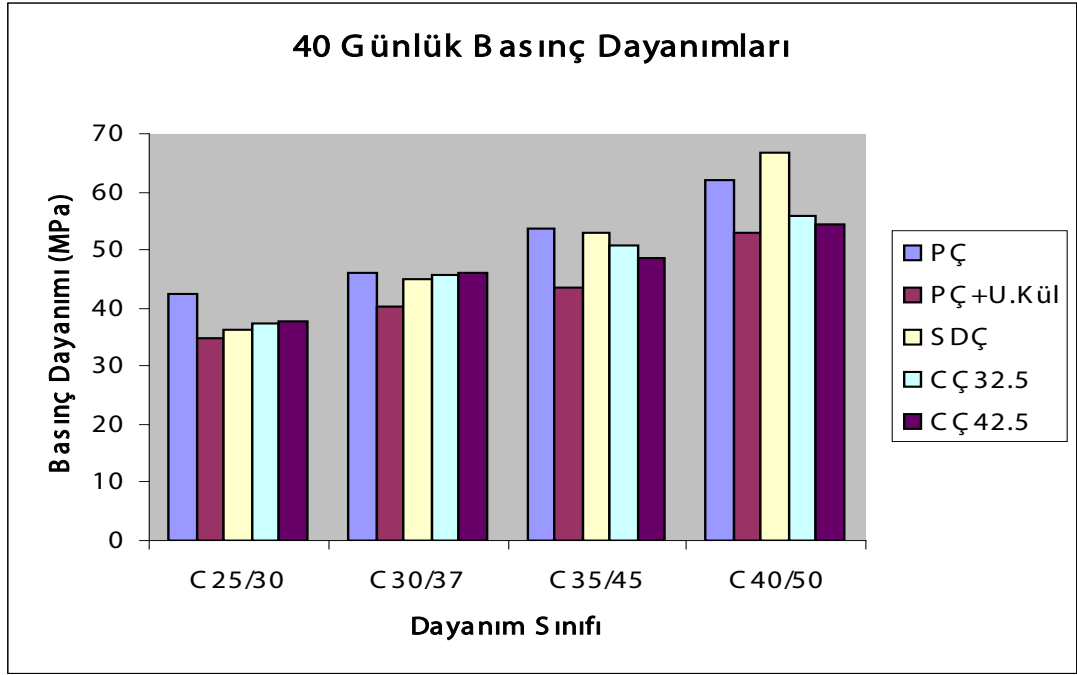
Basınç dayanımı deneyleri 150 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde, üretimin 28 ve 40. günlerinde yapılmıştır. Her bir beton grubu için, üretimden sonra 28 gün kirece

doğru su içinde kür gören beton numunelerinin 3 tanesi su kürünün sonunda deneye tabi tutulmuş diğer 3 tanesi ise 40. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir ve 40. günde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. **Şekil 4.1**'de üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımı değerleri, **Şekil 4.2**'de ise 40 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Su küründen çıkarılan numunelerin 40. güne kadar dayanımlarında meydana gelen artışlar

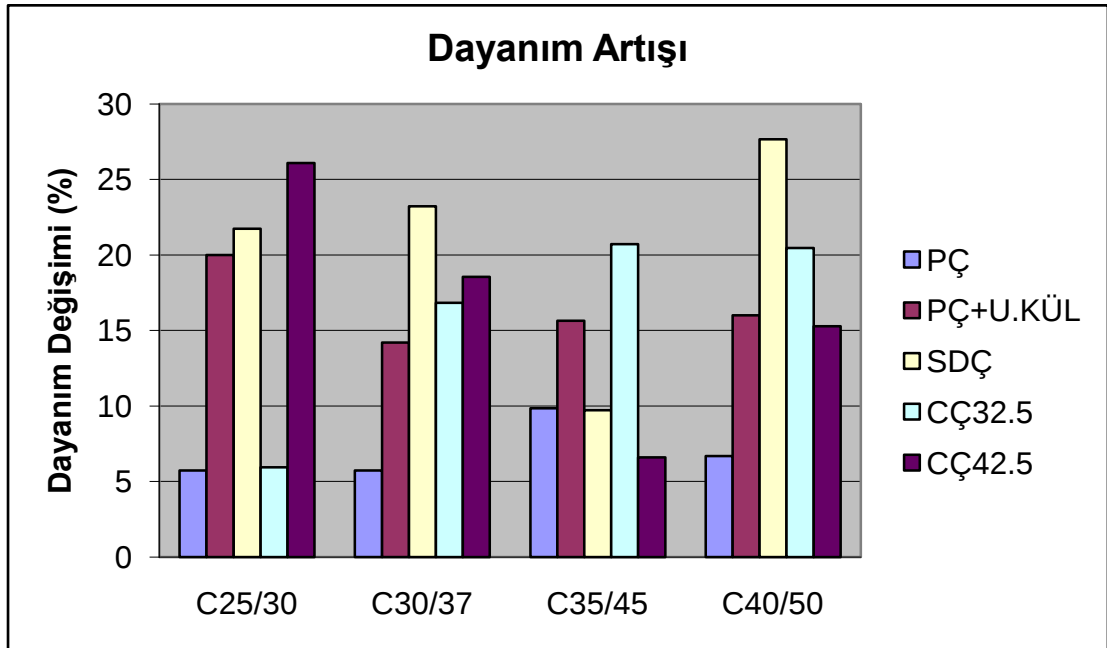
Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.1: 28 Günlük Basınç Dayanımları



Şekil 4.2: 40 günlük basınç dayanımları



Şekil 4.3: Havada kür süresince dayanım artışı (%)

4.3 Geçirirmlilik

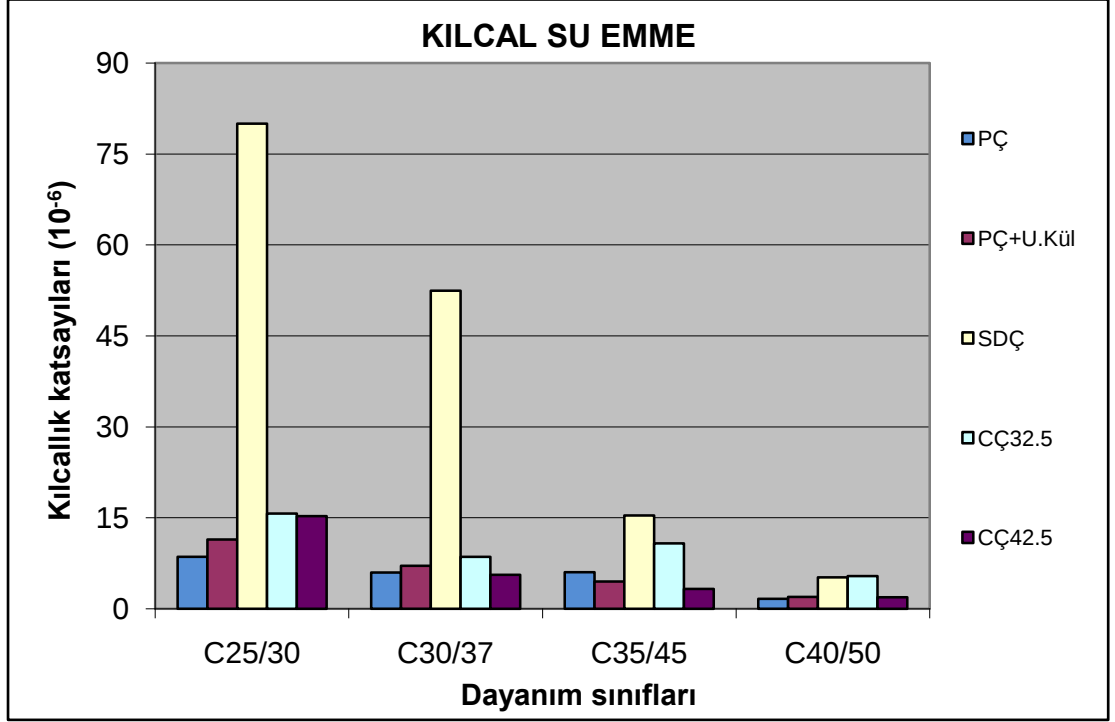
4.3.1 Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcallık katsayıları, 70 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde üretimlerin 40. gününde gerçekleştirilen deneyler ile belirlenmiştir. 28 gün kirece doymun su içerisinde kür havuzlarında bekletilen numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında

saklandıktan sonra kuru ağırlıkları belirlenerek deneye tabi tutulmuşlardır. Başlangıç anından itibaren 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 ve 81. dakikalarda 0.1 gram hassasiyetli elektronik terazide tartılarak numune içerisine kılcallık yoluyla giren su miktarları belirlenmiştir. **Tablo 4.2** ve **Şekil 4.4**'de kılcallık deneyi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.2: Kılcallık Katsayıları

Beton Kodu	Dayanım Sınıfı	Kılcallık katsayısı 10^{-6}
PÇ	C25/30	8,59
PÇ	C30/37	5,95
PÇ	C35/45	6,03
PÇ	C40/50	1,63
PÇ+U.Kül	C25/30	11,43
PÇ+U.Kül	C30/37	7,11
PÇ+U.Kül	C35/45	4,51
PÇ+U.Kül	C40/50	1,97
SDÇ	C25/30	80,00
SDÇ	C30/37	52,46
SDÇ	C35/45	15,38
SDÇ	C40/50	5,19
CÇ32.5	C25/30	15,71
CÇ32.6	C30/37	8,56
CÇ32.7	C35/45	10,77
CÇ32.8	C40/50	5,40
CÇ42.5N	C25/30	15,31
CÇ42.5N	C30/37	5,61
CÇ42.5N	C35/45	3,27
CÇ42.5N	C40/50	1,90



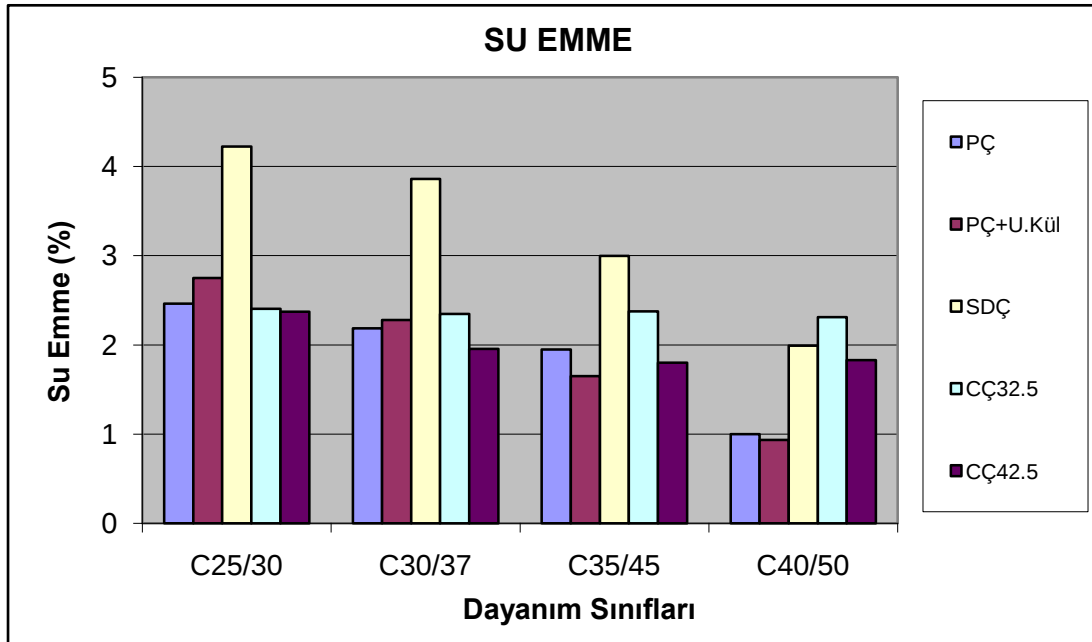
Şekil 4.4: Kılcal Su Emme

4.3.2 Ağırlıkça Su Emme Deneyi

Ağırlıkça su emme deneyi, 70 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde üretimlerin 40. gününde gerçekleştirilmiştir. 28 gün kirece doymun su içerisinde kür havuzlarında bekletilen numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında saklandıktan sonra kuru ağırlıkları belirlenerek deneye tabi tutulmuşlardır. Numuneler kuru ağırlıkları not edildikten sonra 48 saat suda beklemeye alınmışlardır. Daha sonra sudan çıkartılan numuneler üzerleri havlu ile kurularak fazla kurumadan tek tek hassas terazi ile tartılmışlardır. Böylece her bir numunenin suya doymun ve kuru haldeki ağırlıkları bulunarak ağırlıkça su emme oranları belirlenmiştir. Deney sonuçları **Tablo 4.3** ve **Şekil 4.5**'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Ağırlıkça su emme değerleri

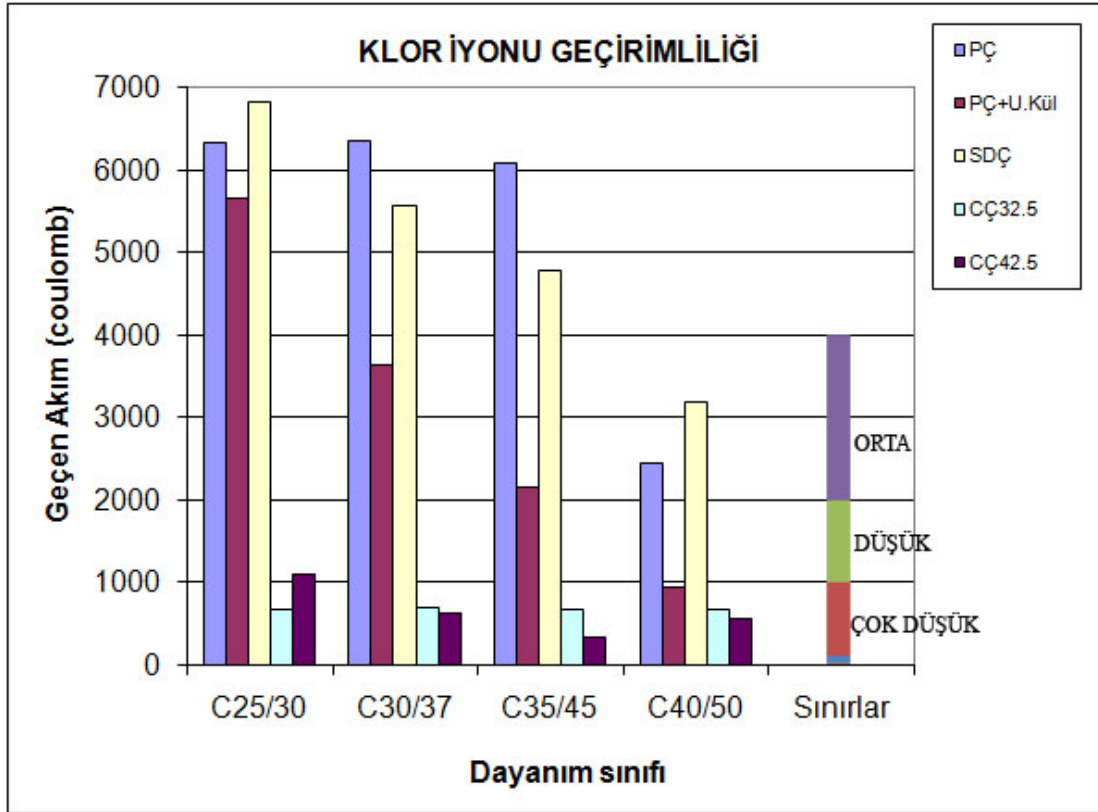
Beton Kodu	Dayanım Sınıfı	Ağırlıkça Su Emme (%)
PÇ	C25/30	2,46
PÇ	C30/37	2,19
PÇ	C35/45	1,95
PÇ	C40/50	1,00
PÇ+U.Kül	C25/30	2,75
PÇ+U.Kül	C30/37	2,28
PÇ+U.Kül	C35/45	1,65
PÇ+U.Kül	C40/50	0,93
SDÇ	C25/30	4,22
SDÇ	C30/37	3,86
SDÇ	C35/45	3,00
SDÇ	C40/50	1,99
CÇ32.5	C25/30	2,40
CÇ32.6	C30/37	2,35
CÇ32.7	C35/45	2,37
CÇ32.8	C40/50	2,31
CÇ42.5N	C25/30	2,37
CÇ42.5N	C30/37	1,95
CÇ42.5N	C35/45	1,80
CÇ42.5N	C40/50	1,83

**Şekil 4.5:** Ağırlıkça Su Emme

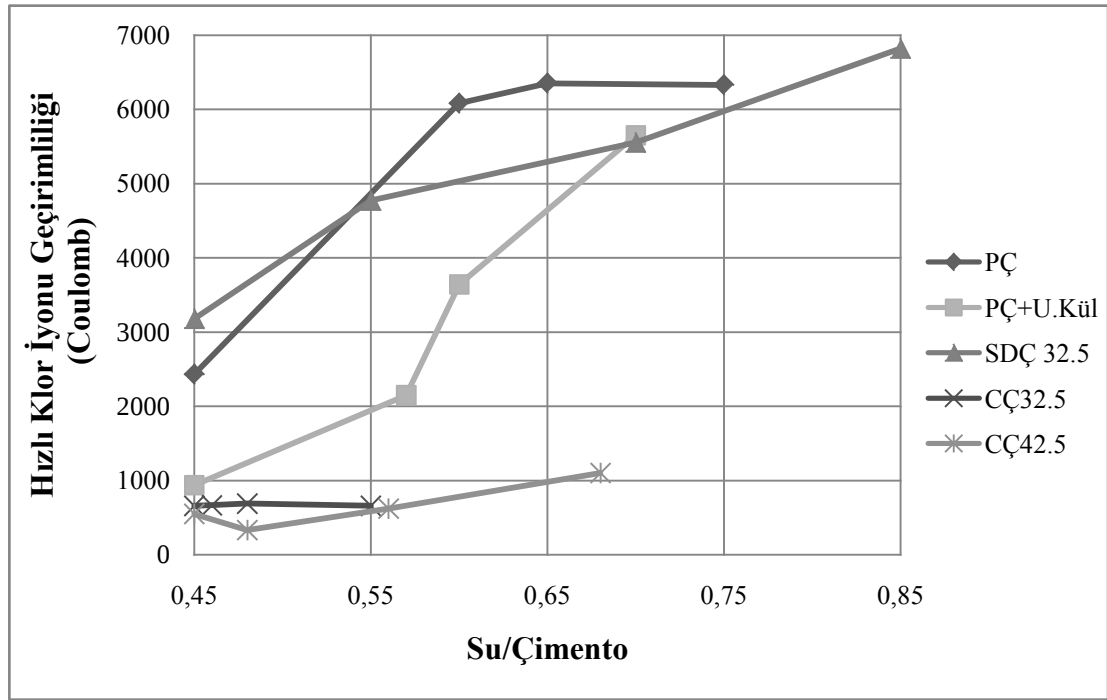
4.3.3 Hızlı Klor Geçirirliği Deneyi

Deney düzeneğine yerleştirilen numunelere ASTM C 1202-05 standardına uygun olarak 6 saat boyunca 60V sabit potansiyel fark uygulanmıştır. Deney süresi boyunca beton numunesinden geçen elektrik akım şiddeti miktarı yarım saatte bir

kaydedilmiştir. Deney sonunda, kaydedilen veriler yardımıyla numuneden geçen akım şiddeti-zaman grafiği çizilip, grafik altında kalan alan bulunmuştur. Bu alan yardımıyla deney süresince iletilen elektrik akım miktarı coulomb cinsinden hesaplanmıştır. **Şekil 4.6**'da üretilen betonlardan geçen toplam akım miktarları gösterilmektedir. Toplam geçen akım miktarı ile su/çimento oranları arasındaki ilişki **Şekil 4.7**'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Farklı çimento türlerinin klor iyonu geçirimsizliğine etkisi



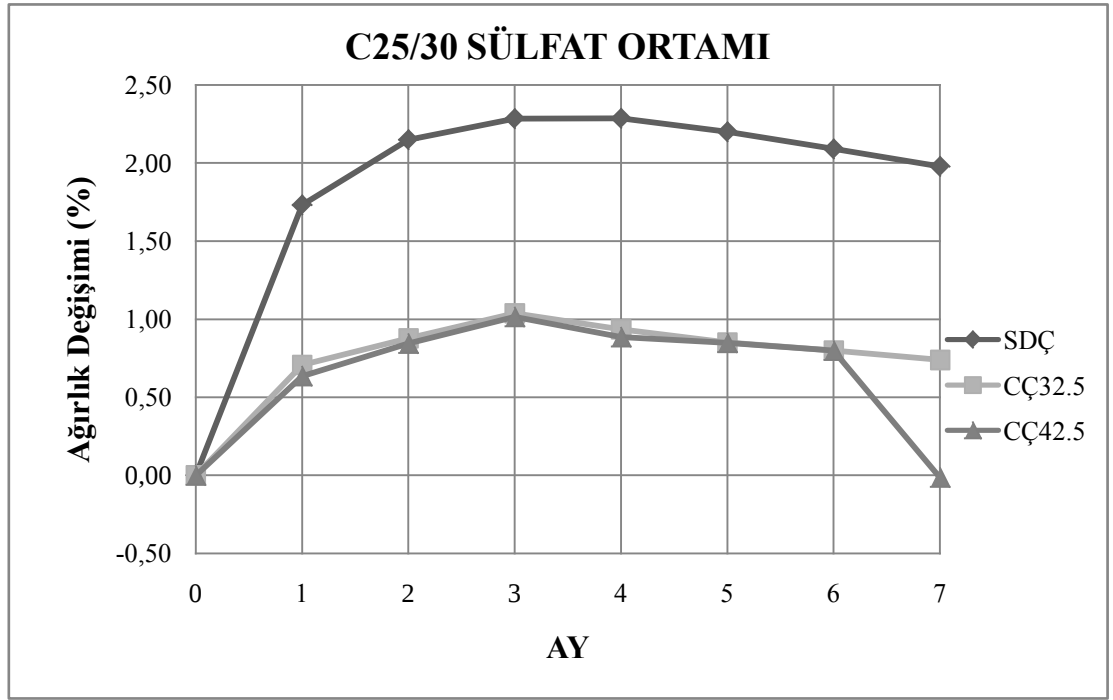
Şekil 4.7: Klor iyonu geçirirliiğinin S/Ç oranına göre değişimi

4.3.4 Sülfat Etkisi

4.3.4.1 Ağırlık Değişimi

Sodyum sülfat çözeltisi, deniz suyu ve su ortamlarında bırakılan SDÇ, CÇ32.5 ve CÇ42.5 numunelerinde aylık periyotlar halinde 0,1 gram hassasiyetli terazi ile ağırlıkları ölçülerek, deneylere başlamadan önce tespit edilen kuru ağırları üzerinden ağırlık değişimleri % cinsinden hesaplanmıştır.

Ağırlık ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir. C25 dayanım sınıfı numunelerin sülfat ortamında ağırlık değişim grafiği Şekil 4.8'da verilmiştir.

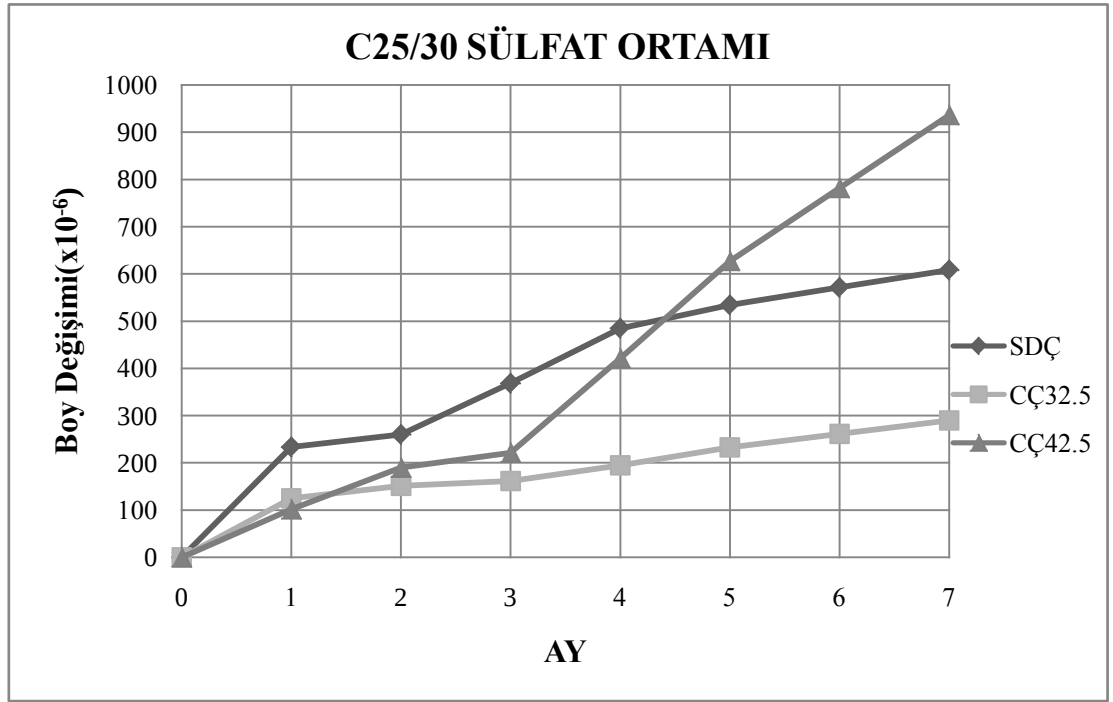


Şekil 4.8: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Ağırlık Değişimi

4.3.4.2 Boy Değişimi

Sodyum sülfat çözeltisi, deniz suyu ve su ortamlarında bırakılan SDÇ, CÇ32.5 ve CÇ42.5 numunelerinde ilk boy ölçüm değerlerine bağlı olarak boy değişim değerleri elde edilmiştir.

Boy değişim ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir. C25 dayanım sınıfı numunelerin sülfat ortamında boy değişim grafiği **Şekil 4.9**'de verilmiştir.

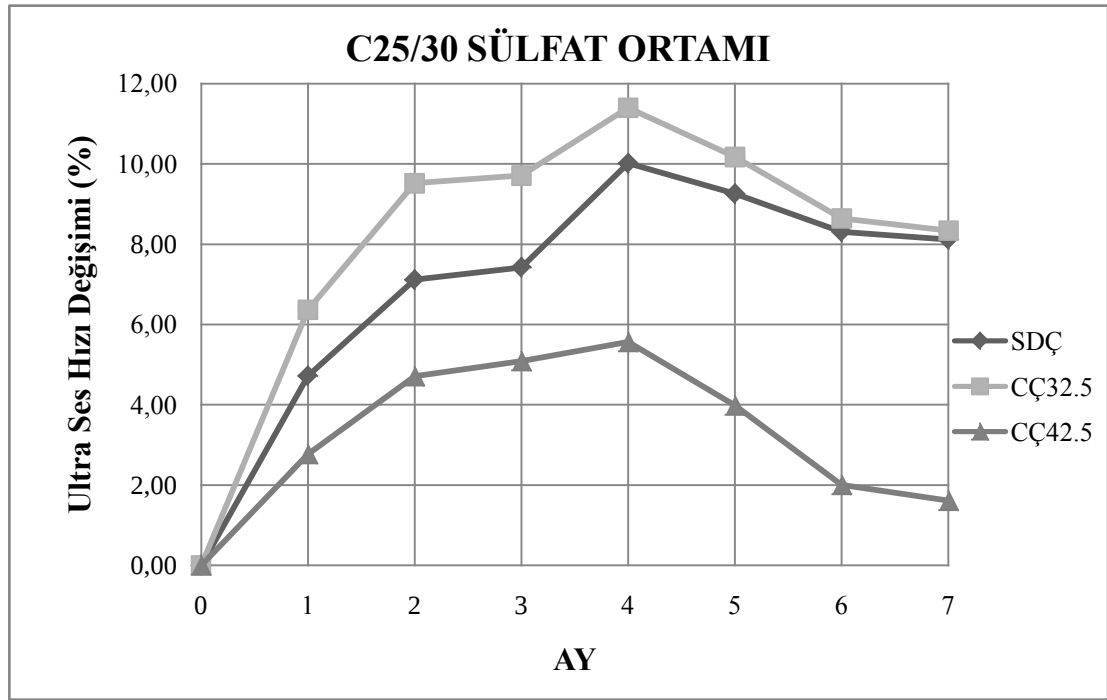


Şekil 4.9: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Boy Değişimi

4.3.4.3 Ultrases Hızı Değişimi

Sodyum sülfat çözeltisi, deniz suyu ve su ortamlarında bırakılan SDÇ, CÇ32.5 ve CÇ42.5 numunelerin ortamlara konulmadan önce ultra ses hızı değerleri ölçülmüş ve aylık periyotlar halinde ultra ses hızı değişimleri % cinsinden hesaplanmıştır.

Ultra ses hızı ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak kuru hale getirilmişlerdir. C25 dayanım sınıfı numunelerin sülfat ortamında ultra ses hızı değişim grafiği **Şekil 4.10**'de verilmiştir.



Şekil 4.10: C25 Dayanım Sınıfı Numunelerin Sülfat Ortamında Ultra Ses Hızı Değişimi

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan taze beton deneyleri sonucunda tüm beton serileri S4 kıvam sınıfını sağlamıştır. Birim ağırlık ve hava içeriği değerleri **Tablo 4.1**'de verilmiştir.

5.2 Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.1 ve **Şekil 4.2** incelendiğinde 28 ve 40 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek dayanımların portlant çimentosu numunelerinden elde edildiği görülmektedir. 28 günlük deney sonuçlarında sülfata dayanıklı çimento ile üretilen numunelerin portlant çimentosu numunelerinden daha düşük dayanım vermesine rağmen 40 günlük deney sonuçlarında aradaki farkın azaldığı ve hatta C40 dayanım sınıfı betonlarda sülfata dayanıklı çimento numunelerin en yüksek dayanım değeri verdiği görülmektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonların dayanımları ise 28. günde yapılan kırımelerde portlant çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento numunelerinin bir miktar aşağısında kalmıştır.

28 günlük kirece doymun su küründen sonra 40. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde bir miktar dayanım artışı söz konusudur. 28 ve 40 günlük sonuçlar karşılaştırıldığı takdirde en az dayanım artışı portlant çimentosu ile üretilen numunelerde olmuştur. Beklenildiği gibi mineral katkıları numunelerin dayanım artışları çok daha yüksek mertebelerde olmuştur. C₃A oranı oldukça düşük olan sülfata dayanıklı çimento numunelerinde geç dayanım kazandığı belirlenmiştir. Örnek olarak C40 dayanım sınıfı beton numuneleri için portlant çimentosu numuneleri %7, uçucu küllü numuneler %16, CÇ32.5 ile üretilen numuneler %20, CÇ42.5 ile üretilen numuneler %15 dayanım kazanırlar iken sülfata dayanıklı çimento ile üretilen numuneler %28 gibi yüksek bir dayanım artışı göstermiştir.

5.3 Geçirimsizlik Deney Sonuçları Değerlendirilmesi

5.3.1 Kılcal Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu deney yöntemi, kısmen su ile temas halindeki numunelerin ağırlık değişimlerinden yola çıkarak, numunelerdeki muhtemel makroskobik boşluk yapısını açıklamaya çalışır. Kılcal su emme değeri, su ile temas halindeki malzemenin birim alanından kapiler yolla emilen su miktarıdır.

Su emilmesi ile meydana gelen ağırlık değişimleri çeşitli zaman aralıklarında kaydedilmiştir. **Şekil 4.4** çimento türünün kılcallık değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Kılcal su emme katsayısındaki artış, su emme değerinin artışının göstergesidir. **Şekil 4.4**'de görüldüğü gibi beton dayanım sınıfı arttıkça kılcal su emme değerleri düşmektedir. Bu düşüş sülfata dayanıklı çimento türleri için çok belirgindir. Sülfata dayanıklı çimentoların kılcal su emme değerleri diğer çimento türleri ile üretilen numunelerden belirgin derecede yüksektir. C25 dayanım sınıfı için, sülfata dayanıklı çimento numunelerin kılcallık (kapilerite) değeri portlant çimentosu numunelerinin yaklaşık 10 katıdır. C40 dayanım sınıfında ise sülfata dayanıklı çimento ve CÇ32.5 numunelerin kılcallık değerleri yaklaşık aynıdır.

En düşük klor iyonu geçirimsizliğine sahip olan yüksek fırın cürufu numunelerin (**Şekil 4.6**), kılcal su emme değerleri ise klor geçirimsizliğinin aksine minimum seviyede değildir. Deney sonuçları yüksek fırın cürufu numunelerin kılcal su emme değerlerinin portlant çimentosu numunelerinden çokta farklı olmadığını göstermektedir.

5.3.2 Ağırlıkça Su Emme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kılcal su emme deneyine tabi tutulan numuneler daha sonra 3 gün tamamen su içerisinde bırakılarak suya doymuş hale getirilmiş ve kuru ağırlıkları vasıtasıyla ağırlıkça su emme değerleri hesaplanmıştır. Yüzeye açılan sürekli boşluk miktarı betonun su emme değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle ağırlıkça su emme deneyi numunenin porozitesini dolaylı olarak temsil edebilmektedir. **Şekil 4.5**, çimento türünün ağırlıkça su emme değerlerine etkisini göstermektedir.

Deney sonuçları en yüksek su emme değerlerinin sülfata dayanıklı çimento numunelerinde olduğunu göstermiştir. Kılcal su emme deneylerine paralel olarak, C40 dayanım sınıfı haricindeki sülfata dayanıklı çimento numuneleri en yüksek su

emme değerlerine sahiptir. Kılcal su emmede olduğu gibi dayanım sınıfı arttıkça su emme miktarı azda olsa azalmaktadır. Herhangi bir dayanım sınıfı kendi içinde kıyaslanırsa çimento türünün su emme değerleri üzerindeki etkisi açıkça belirli değildir. Hızlı klor geçirimliliği (**Şekil 4.6**), kılcal su emme (**Şekil 4.4**) ve ağırlıkça su emme (**Şekil 4.5**) ile kıyaslanırsa yüksek fırın cürufunun olumlu performansı kapilerite ve ağırlıkça su emme değerlerine tam olarak yansımamıştır.

5.3.3 Hızlı Klor Geçirimliliği Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.6 Klor iyonu geçirimliliğinde çimento türünün etkisini açıkça koymaktadır. **Şekil 4.6**'den de görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu çimento ile üretilen betonların (CÇ32.5 ve CÇ42.5) klor iyonu geçirimliliği değerleri diğer çimento türlerine göre çok azdır. Örnek olarak, C25 sınıfı beton serileri için; Portlant çimentosu ile üretilen numunelerin hızlı klor geçirimlilik değerleri, yüksek fırın cürufu numunelerin yaklaşık 6 katıdır. Benzer sonuçlar C30 ve C35 dayanım sınıfı serileri içinde geçerlidir. **Şekil 4.6**'de görüldüğü üzere, portlant çimentosu ile üretilen numunelerde C35 ve C40 dayanım sınıfları arası klor geçirimlilik değerlerinde önemli bir azalma elde edilmiştir. Bununla beraber C40 dayanım sınıfı portlant çimentosu numunelerinin hızlı klor geçirimlilik değeri aynı dayanım sınıfındaki yüksek fırın cürufu numunelere göre 3 kat daha fazladır.

Şekil 4.6'den de görülebildiği gibi, portlant çimentosunun uçucu kül ile beraber kullanılmasının klor geçirimlilik değerleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. C25 dayanım sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımının önemli bir etkisi görülme bile, diğer dayanım sınıfları için uçucu kül kullanımı ile klor geçirimliliğinde %50'den fazla azalma sağlanmıştır. C40 dayanım sınıfı betonlar için ise, uçucu küllü betonlar ile yüksek fırın cürufu betonlar yakın değerler vermiştir.

C30 ve C35 dayanım sınıflarında sülfata dayanıklı çimento ile üretilmiş serilerin klor geçirimlilik değerleri portlant çimentosu ile üretilen serilerden bir miktar aşağıdadır. Sülfata dayanıklı çimento ile üretilen betonların klor geçirimlilik değerleri C25, C30 ve C35 dayanım sınıfları için yüksek fırın cürufu betonların yaklaşık 6 kat, C40 dayanım sınıfı için ise yaklaşık 3 kat daha fazladır.

Sülfata dayanıklı çimentolar ülkemizde deniz yapılarında da kullanılmaktadır. Ancak deney sonuçları klor geçirimliliği açısından sülfata dayanıklı çimento performansının portlant çimentosu performansına yakın olduğunu göstermektedir.

Önceden de tahmin edilebileceği gibi hızlı klor geçirimsizlik değerleri beton dayanım sınıfının artmasıyla azalmaktadır. **Şekil 4.6**'den görüldüğü gibi, portland çimentosu serilerinde C25, C30 ve C35 dayanım sınıfları için klor geçirimsizlik değerleri birbirine yakındır. Ancak C40 dayanım sınıfı için kayda değer bir düşüş gözlenmiştir.

Yüksek fırın cürufu içeren seriler çok düşük klor geçirimsizlik değerlerine sahiptirler ancak; dayanım artışına bağlı olarak klor geçirimsizlik değerlerinde belirli bir değişim elde edilmemiştir.

ASTM C 1202-5'e göre 6 saatlik deney sonunda toplam geçen akım miktarı 4000 coulomb'un üzerinde olan numuneler yüksek geçirimsiz olarak kabul edilmektedir. Akım miktarı 100-1000 coulomb arasında ise geçirimsizlik çok azdır denilebilir. **Şekil 4.6**'de görüldüğü gibi tüm dayanım sınıflarında yüksek fırın cürufu betonlar çok düşük geçirimsiz olarak adlandırılabilirler. Bu numunelerin daha az geçirimsiz olması içerdikleri cüruf nedeni ile daha yoğun ve sıkışık bir mikro yapıya sahip olmalarındandır.

Puzolanik reaksiyon daha az kapiler boşluklu yapı oluşumuna ve/veya mevcut boşlukların tıkanmasına sebep olarak klor iyonu geçirimsizliğini azaltabilir.

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, yüksek fırın cürufu numuneler 0.68 gibi yüksek S/Ç oranlarına sahip olsalar bile ASTM C 1202-5 standardına göre çok düşük klor iyonu geçirimsizliğine sahiptirler.

S/Ç oranı 0.45 olan seriler haricinde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento numunelerinden geçen toplam akım miktarı 4000 coulomb'un üzerindedir. Bu nedenle bu betonların klor iyonu geçirimsizliğine karşı düşük dirençli olduğu söylenebilir.

Şekil 4.6 ve **Şekil 4.7**'ya göre, uçucu kül kullanımının klor iyonu geçirimsizliğine karşı direnci arttırdığı söylenebilir.

5.4 Sülfat Etkisi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.4.1 Ağırlık Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan ölçümler sonucunda sülfat ve deniz ortamında bekleyen numunelerde, bünyelerindeki boşlukların sülfat ve/veya deniz suyunda bulunan çeşitli tuzlar ile

dolması sonucu ağırlık artışları gözlemlenmiştir. Bu ağırlık artışları ilk 3 ay etkili olup 3. aydan sonra ağırlıklarda azalma başlamakla birlikte son ölçümde dahi ilk yapılan ölçüm değerinin üzerinde kalmaktadır. Tüm serilerin ağırlık değişim grafikleri Ek A'da verilmiştir.

C40/50 dayanım sınıfı haricinde SDÇ ile üretilen beton numuneler, ilk ağırlıklarına kıyasla en fazla ağırlık artışını gösteren numuneler olmuştur. Bu durumun sebebi, kılcallık ve ağırlıkça su emme deney sonuçlarına paralel olarak SDÇ numunelerin CÇ numunelerine kıyasla daha boşluklu olması ile açıklanabilir.

C40/50 dayanım sınıfında ise CÇ32.5 numuneleri kılcallık ve ağırlıkça su emme deney sonuçlarından da görüldüğü gibi boşluklu yapısına bağlı olarak en yüksek ağırlık değişimini göstermiştir.

Geçirimlilik ve ağırlık değişimi değerleri SDÇ numunelerin çok altında olan CÇ42.5 C25 sınıfı numuneleri 7. ay sonunda parçalanarak diğer numunelere göre büyük ağırlık kaybına uğramıştır.

C25 dayanım sınıfındaki SDÇ numunelerinin düşük C_3A oranı sebebi ile sülfat saldırısından çok etkilenmedikleri CÇ32.5 numunelerinin ise yüksek oranda ince malzeme içermesinden dolayı daha geçirimsiz yapıya sahip olarak sülfattan fazla etkilenmedi tahmin edilmektedir.

Deniz suyunda bekleyen numuneler incelendiğinde deniz suyunun ağırlık değişimi üzerindeki etkisi tam olarak gözlemlenememiştir. Ancak sülfat ve su ortamında bekleyen numunelere bakarak 4. aydan sonra ağırlık değişimin neredeyse durduğu ve eğrilerin daha yatay eksene paralelleştiği gözlemlenmiştir.

Genel olarak su ortamındaki numunelerde de benzer davranış gözlemlenmekle birlikte özellikle sülfat ortamındaki numunelere bakarak ağırlık değişim değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tüm seriler için, basınç dayanım sınıflarının ağırlık değişimi değerleri ile direk bir bağlantı kuramadığı da gözlemlenmiştir.

7 aylık ölçüm süresinin bu numuneler üzerinde sülfat etkisinin gözlemlenmesi için yeterli olmadığı anlaşılmıştır. **Şekil 5.1'**de sülfat etkisinde zarar görmüş CÇ42.5-C25 numunesi gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Sülfat Etkisinde Zarar Görmüş CÇ42.5-C25 Numuneleri

5.4.2 Boy Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan ölçümlerde, tüm numunelerde boy artışının söz konusu olduğu tespit edilirken su ortamında bekleyen numunelerin boy değişimlerinin deniz ve sülfat ortamına göre ihmal edilebilir mertebede düşük olduğu görülmüştür. Tüm serilerin boy değişim grafikleri Ek A'da verilmiştir.

7 ay sonunda parçalanma gösteren C25 dayanım sınıfı CÇ42.5 serisinin boy değişimi değerleri de ağırlık değişimi değeri gibi diğer numunelerden ayrılmaktadır.

Deniz ve sülfat ortamındaki CÇ42.5-C25 numunelerin boy değişim değerleri 4. aydan sonra sıçrama yapmıştır. Sülfatta bekleyen CÇ42.5-C25 numuneleri 7 ay sonunda SDÇ numunelerin 1.5 katı, CÇ32.5 numunelerin ise 3 katından fazla boy değişimi gösterirken deniz ortamında bekleyenler ise SDÇ numunelerinin 1.4, CÇ32.5 numunelerin 1.5 katı değişim yapmıştır.

Diğer dayanım sınıfları da incelendiğinde, sülfattan az etkilenmesi gereken SDÇ numunelerinin hiçbir zaman minimum değişim yapan seri olmadığı, bunun sebebinin ise diğer serilere nazaran daha geçirimliği olduğu düşünülmektedir.

Her dayanım sınıfı için, sülfat ortamında bekleyen numunelerin deniz suyu ortamında bekleyen numunelere göre daha fazla boy değişimi gösterdiği tespit edilmiştir. Örnek olarak, C40 dayanım sınıfı için sülfat ortamındaki SDÇ numuneleri, deniz suyu ortamında bekleyen numunelerin 2 katından fazla, sülfat ortamındaki CÇ32.5 numuneleri deniz suyu ortamında bekleyenlerin 3 katından fazla, sülfat ortamındaki CÇ42.5 numuneleri ise deniz suyu ortamındakilerin 1.5 katından fazla boy değişimi göstermiştir. Tüm seriler için, basınç dayanım sınıflarının boy değişimi değerleri ile direk bir bağlantı kuramadığı da gözlemlenmiştir.

5.4.3 Ultra Ses Hızı Değişimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Su ortamında bekletilen numuneler için son aylarda ultra ses hızlarında bir sabitleme gözlenmekle birlikte genel eğilim olarak beton içerisindeki boşlukların zamanla sülfat tuzları, deniz suyunda bulunan tuzlar ve hidrasyon ürünleri ile dolması sebebiyle ultra ses hızlarında bir artma eğilimi gözlenmiştir. Su ortamında bekletilen numunelerdeki hız artışının hidrasyon gelişimine bağlı olduğu düşünülmektedir. Tüm serilerin ultra ses hızı değişim grafikleri Ek A'da verilmiştir.

Deniz suyu ortamında bekletilen numunelerde 4. aya kadar yapılan ölçümlerde ultra ses hızlarında artış, bu aydan sonra ise hızlarda sabitleme gözlemlenmiştir.

Sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde ise yine 4. aya kadar daha düzensiz bir artış, bu aydan sonra hızda düşme eğilimi olmuştur. C25 sınıfı numunelerde, en yüksek ultra ses hızının okunduğu tepe noktasından sonra olan kayıplarda, en yüksek değer %4 ile CÇ42.5 ile üretilen serilerde görülmüştür. Bu seri parçalanma göstermiş olup, ağırlık ve boy değişimi değerleri de bu sonucu doğrulamaktadır. Aynı çimento ile üretilen C40 sınıfı seride de %4'lük bir ultra ses hızı kaybı söz konusudur.

Genel olarak, ultra ses hızı değişimlerine bakılarak kılcalık ve ağırlıkça su emme deney sonuçları ile bağlantı kurmak zordur. Ultra ses hızı değişimlerinde diğer deneylerde de olduğu gibi hidrasyon derecesi ön plana çıkmaktadır. Kılcal geçirimsizlik ve ağırlıkça su emme değerleri yüksek olan SDÇ numunelerinin ultra ses hızı değişimleri aynı oranda yüksek olmamıştır.

Tüm seriler için, basınç dayanım sınıflarının ultra ses hızı değişimi değerleri ile direk bir bağlantı kuramadığı da gözlemlenmiştir.

6. GENEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar sınırlı sayıda numune üzerinde yapılmıştır ve deneyler hızlandırılmış yöntemler üzerinden uygulanmıştır. Bununla beraber deney sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Cürufu çimento ile üretilen betonlar, diğer çimento türleri ile üretilen beton numunelerine göre çok daha az klor geçirimsiliğine sahiptir. Tüm dayanım sınıfları için portlant çimentosu ile üretilen numuneler en yüksek klor geçirimsiliği değerlerine ulaşmıştır. Tüm dayanım sınıfları için SDÇ ile üretilen numunelerin klor geçirimsilik performansı düşük değerlerdedir.
- SDÇ ile üretilen numuneler en yüksek kılcallık değerlerine ulaşmıştır. C25 dayanım sınıfı için, SDÇ numunelerinin kılcallık katsayısı PÇ numunelerin yaklaşık 10 katıdır. SDÇ numunelerin ağırlıkça su emme değerleri de en yüksek değerlere ulaşmıştır.
- CÇ numuneleri diğer çimento türleri ile üretilen numunelere göre çok daha az klor geçirimsiliği değerlerine sahiptir ancak bu performans kılcallık ve ağırlıkça su emme değerlerine yansımamıştır.
- Deneylerin sürdürüldüğü 7 aylık sürecin numuneler üzerindeki sülfat etkisini gözlemlemede yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber CÇ42.5-C25 serisinin 7 ay sonunda parçalanma göstererek en yüksek ağırlık kaybı, en yüksek boy değişimi ve en yüksek ultra ses hızı kaybına ulaştığı görülmüştür.
- SDÇ numunelerin sülfat performansının cürufu çimentolara göre beklendiği kadar yüksek olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Deniz ve kıyı yapılarında sülfat etkisinden korunmak için kullanılan sülfata dayanıklı çimentonun klor geçirimsilik performansının düşük olmasından dolayı deniz yapılarında çok karşılaşılan bir sorun olan donatı korozyonu sorunu ile karşılaşmamak için yapıda kullanılacak betonda SDÇ'nin bu olumsuz özelliğinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

- Zararlı ortama maruz kalacak betonlarda TS EN 206 standardında belirtildiği gibi sadece dayanım sınıfının, en düşük dozajın ve em büyük su/bağlayıcı oranının ve çevresel etki sınıfının belirtilmesi yeterli değildir. Çimento türü ve özelliklerinin de belirtilmesi gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Portlant Çimentosu, www.antepcemento.com/portland.asp, 29.05.2006
- [2] Cürüflu Çimento, www.akcansa.com.tr/a_bagliortak.asp, 28.05.2006
- [3] Beyaz portlant çimentosu, www.cimsa.com.tr/urunler, 29.05.2006
- [4] Durabilite, www.beksa.com, 28.05.2006
- [5] Coarsa Manual, 1991, Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity, Ottawa
- [6] Çimento Standartları, www.rekabet.gov.tr/word/dergi17/16kurtalancimento.doc, 30.05.2006
- [7] Portlant Çimentosu, www.us.geocities.com/sayilibeton/turkiyedecimento.htm, 29.05.2006
- [8] 4. Ulusal Beton Kongresi, Akyüz S., Yıldırım H., 1996
- [9] Uçucu Küllü Çimento, www.ce.boun.edu.tr/eng/ace2004/papers, 29.05.2006
- [10] Sülfata dayanıklı çimento, www.yibitas-lafarge.com.tr/cemhome.nsf, 01.06.2006
- [11] Postacıoğlu Bekir, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-2
- [12] Mehta P.K. Natural Pozzolans Department of Civil Engineering, University of California Berkeley, California USA

- [13] **Özturan Fahri Uluç**, Uçucu Küllerin Betonit, Kireç Ve Çimento Katkılarıyla Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Kullanımı Endüstriyel tıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 1993
- [14] **Postacioğlu Bekir**, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Cilt-1
- [15] **Özturan, T.**, 1991, Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul
- [16] **TSE 639, 1975**, Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan,Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [17] **TS EN 450**, 1998, Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler Ve Kalite Kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [18] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, 2003, Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, Ankara
- [19] **Şengül Ö., Taşdemir M. A. ve Sönemz R.**, 2003, Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal Ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, V. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul S.75-76
- [20] **Kural Orhan**, Kömür Özellikleri, Teknolojisi Ve Çevre İlişkileri 1998
- [21] **Intron**, Institute for Material and Enviromental Research B.V. Fly Ash as Additional to Concrete
- [22] **Kural Orhan**, Kömür 1991
- [23] **Saçaklı Emel**, Kömür Yakılan Kazanda Ve Sobada Ağır Metal Emisyonlarının İncelenmesi İTÜ Kimya Fakültesi
- [24] **E.İ.E Genel Müdürlüğü Yayını**, Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları

- [25] **Akman Süheyl**, Yapı Malzemeleri İTÜ İnşaat Fakültesi
- [26] **TS EN 197-1**, 2002, Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Birleşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [27] **Tokyay, M.**, 1993, Betonda Uçucu Kül Kullanımı Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Türkiye, S26-36
- [28] **Berry, E.E., Malhotra V.M.**, Fly Ash in Concrete, Mineral Siences Laboratory Canmet Februrary 1986
- [29] **Munday John G. L., Ong T. Lean**, Mix Proportioning of Concrete with PFA a Critical Rewiew
- [30] **Metha P. K.**, Pozzolonic and Cementitious by Products as Mineral Admixture for Concrete
- [31] **Akman M. Süheyl, T. Yücel Kemal**, Efficency Factors of Turkish C Class Fly Ashes Istanbul Technical University
- [32] **Prepared by The University of Wisconsin-Milwaukee**, High Volume Fly Ash Concrete Tecnology
- [33] **Özturan T.**, 1993, Uluslar Arası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf Ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Türkiye, S57-58
- [34] **Schielbl, P., and Hardtl, R.**, 1989, The Charge of Mortar Properties as Result of Fly Ash Processing, Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference On Fly Ash, Slica Fume, Slag and Puzzolans in Concrete, Trodheim, Norway, Pp.277-294

- [35] **Akman, M.S., Erdinç, M.**, 1997, uçucu küllü betonlarda klor geçirimliliği, endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, s.1-19
- [36] **ACI COMMITTEE 226**, Use Of Fly Ash İn Concrete, ACI Materials Journal, Pp. 381-409, Seprember-October (1987)
- [37] **Özturan, T.**, Uluslar Arası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf Ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, S.57-78, Ankara, Kasım 1993
- [38] **Yeğınobalı, A.** Uçucu Kül Tras ve Yüksek Fırın Cürufunun Betonda Katkı Maddeleri Olarak Kullanılması ve Optimum Uçucu Kül Karışım Oranlarının Tayini, Tübitak, Proje No. Mag-157/A, Ankara, 1971
- [39] **Mehta, P.K.**, Puzzolanic And Cementitious By-Pruducts in Concrete – Another Look, Third İnternational Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Puzzolans in Concrete, Editor V.M. Malhotra, Trondheim, Norway 1989
- [42] **Akman, M.S.**, 1987, Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [43] **Artırma, Ş., Özkul, H., Akalın, Ö.**, 1996, Doğal Puzolanların Sodyum Sülfata Dayanıklılığa Etkisi, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye, S.337-347
- [44] **Tikalsky, P.J. and Carrasquillo, R.L.**, 1992, Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, Pp.69-75
- [45] **Fidjestol, P.**, 1989, Durability of Silica Fume And Fly Ash Cocnretes Exposed to Organic Acids, Supplementary Papers of Third CANMET/ACI

International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, Pp.459-485

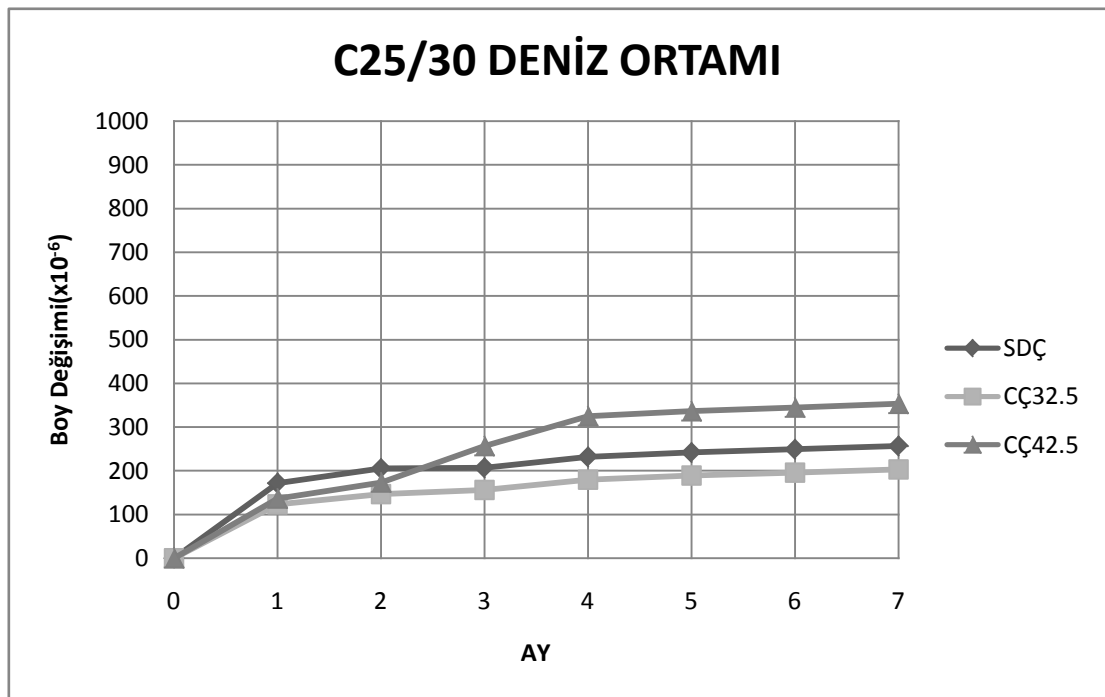
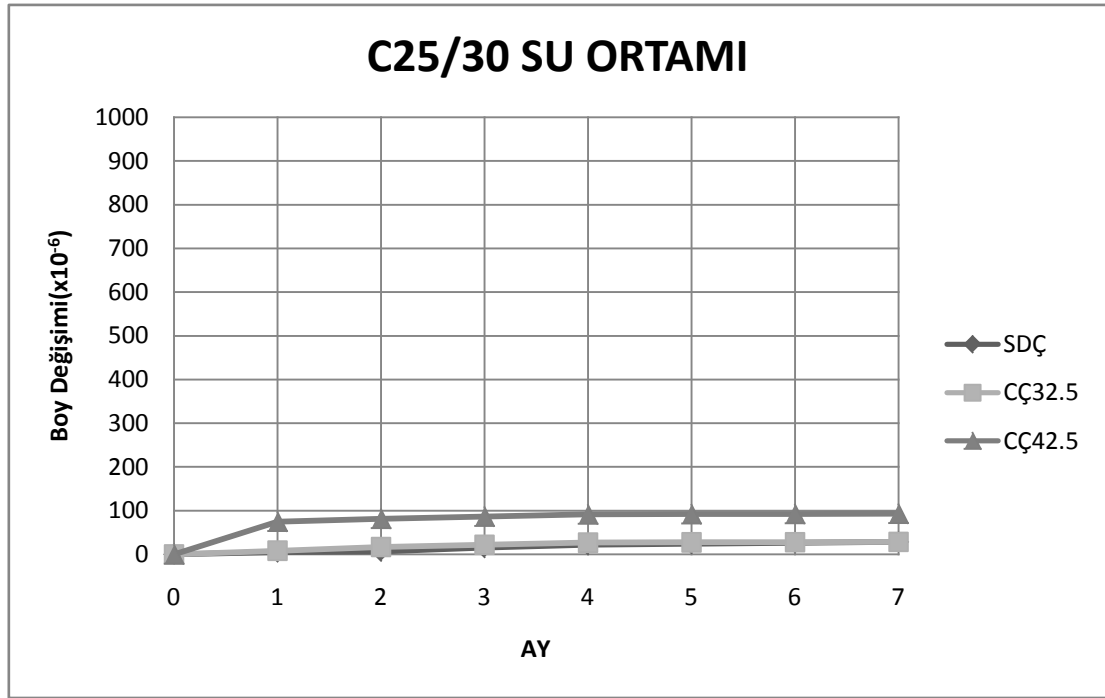
- [46] **Haque, M.N., Kawamura, M.**, Carbonation and Chloride Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes, ACI Materials Journal, V.89, No.1, January-February 1992
- [47] **Sivasundaram, V., et al**, Mechanical Properties, Creep And Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Concretes Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash From Seven Different Sources, ACI Material Journals, July-August 1991 Pp407-417
- [48] **Haque, M.N., et al**, Fly Ash Reduces Harmful Chloride Ions in Concrete, ACI Materials Journal, Vol 89, Pp 238-241, May-June 1992
- [49] **Sirivnatnanon, V., et al**, Mechanical and Durability Properties of High Volume Fly Ash Concrete, 3. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Pp 967-983, Nice, France 1994
- [50] **Cho, H.T., Bucea, L., et al**, Corrosion Behaviors of Steel Embedded in Fly Ash Blanded Cements, 3. Canmet/ACI International of Conference On Durability of Concrete, Supplementary Papers, Pp 215-227 Nice, France 1994
- [51] **Schiessl, P. And R. Hardtl, 1994**, Relationship Between Durability and Pore Structure Properties of Concretes Containing Fly Ash, Proceedings of Metha Symposium on Durability of Concrete, Nice, Pp 99-117
- [52] **Tikalsky, P.J., Carrasquillo, R.L.**, Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, ACI Material Journals, V.89, No.1, Pp.69-75, January-February 1992

- [53] **Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği**, Mayıs 2001, Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar, Ankara
- [54] **Nurse, R.W.**, Slag Cements In: The Chemistry of Cements, Edited By H.F.W. Taylor, Academic Pres, London 1964, Pp 37-68
- [55] **D.G. Mantel**, September-October 1994, Investigation into the Hydraulic Activity of Five Grabulated Blast Furnace Slags with Eight Different Portland Cements ACI Material Journal, V91, No.5
- [56] **Erdoğan, T.**, 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara
- [57] **Lea, F.M.**, 1970, The Chemistry of Cement and Concrete Edward Arnold (Publishers) Ltd., Glasgow
- [58] **Venuat, M. Et Papadakis M.**, 1961, Controle et Essais des Ciments, Mortiers, Betons, Editions Eyrolles, Paris
- [59] **Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği**, 1982, Cüruflu Çimentoların Mikroyapısı, Cilt 19, Sayı 178, Sayfa 20-30 Ankara
- [60] **V.G. Papadakis, S. Tsimas**, 2001, Supplementary Cementing Materials in Concrete PART 1: Efficiency and Design Cement and Concrete Research
- [61] **K. Ganesh Babu and V. Sree Rama Kumar**, 2000, Efficiency of GGBS in Concrete Cement and Concrete Research
- [62] **P.S. Mangat and J.M. Khatib**, 1995, Influnce of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete ACI Material Journals, V.91, No.5
- [63] **Young-Jin Kwon**, 2004, A Study on the Alkali-Aggregate Rection in High-Strenght Concrete with Particular Respect to the Ground Granulated Blast-Furnace Slag Effect Cement and Concrete Research

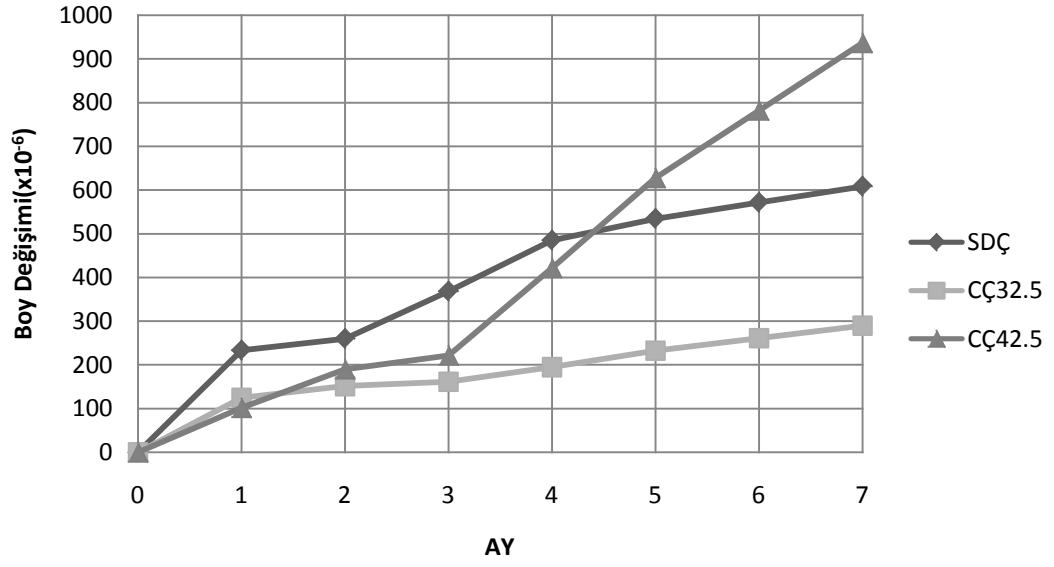
- [64] **Durability of Concrete**, Second International Conference 1991, V.M. Malhotra, Montreal, Canada
- [65] **Özcan, M.**, Tunçbilek Ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi Ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 1997
- [66] **Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H.**, Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite) 2002, DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir, s.89-200

8. EK A

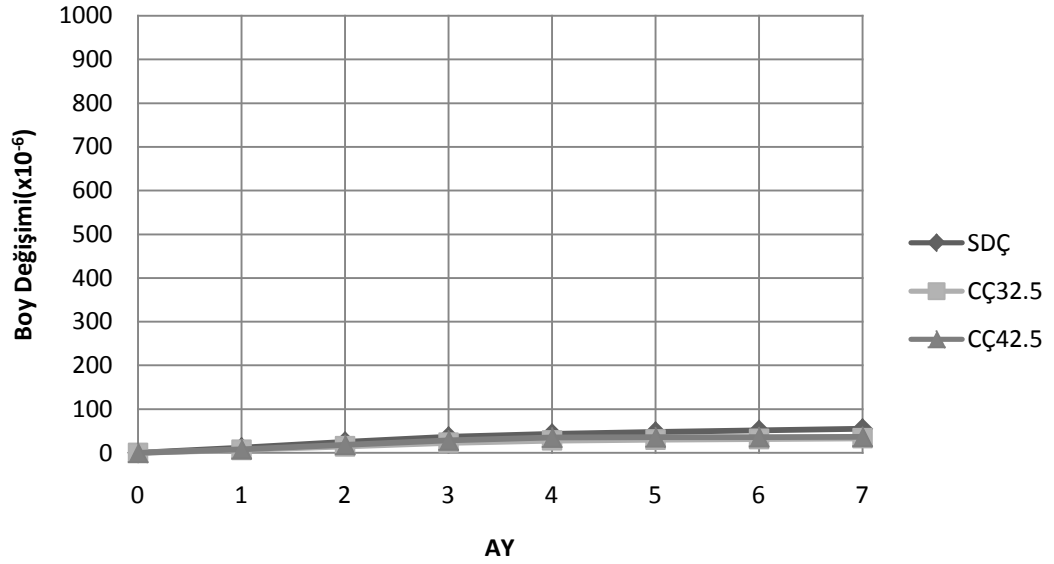
Boy Değişimi Grafikleri



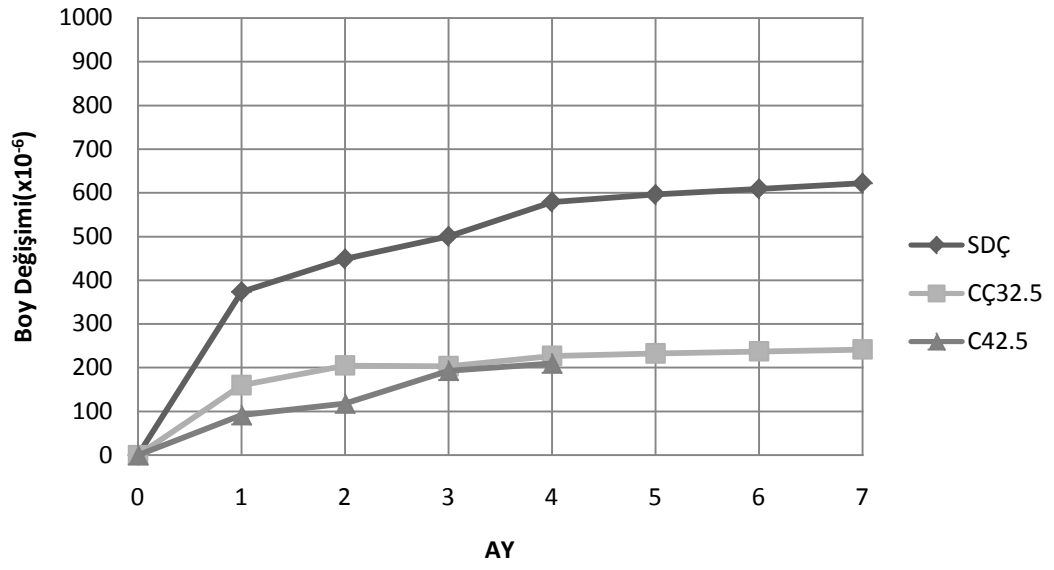
C25/30 SÜLFAT ORTAMI



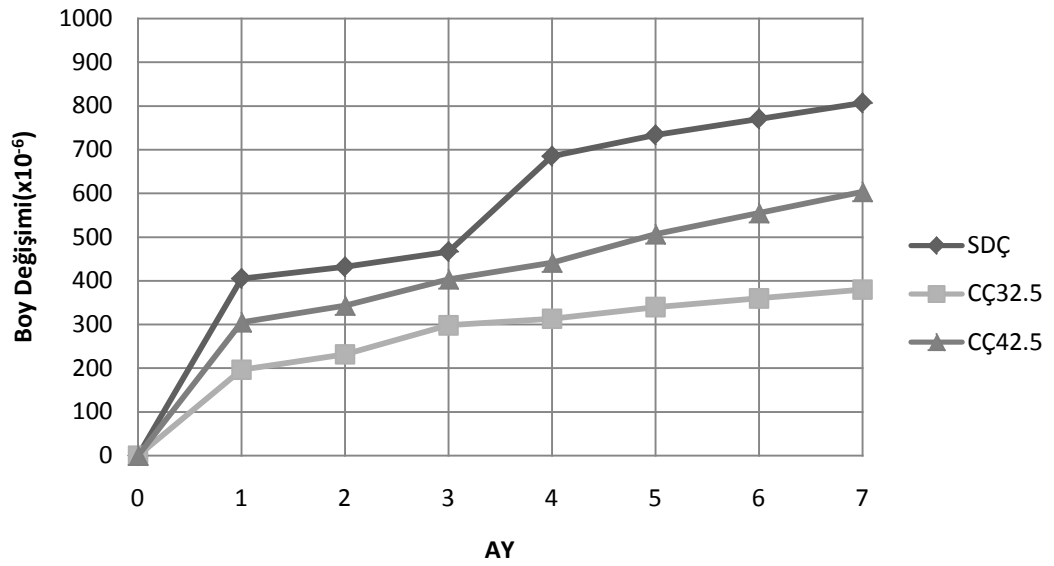
C30/37 SU ORTAMI



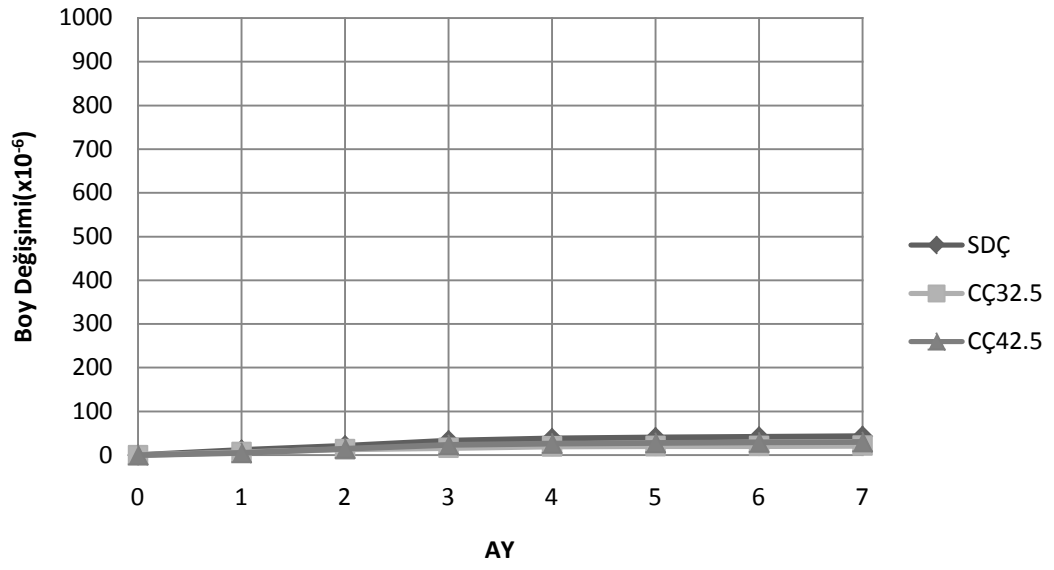
C30/37 DENİZ ORTAMI



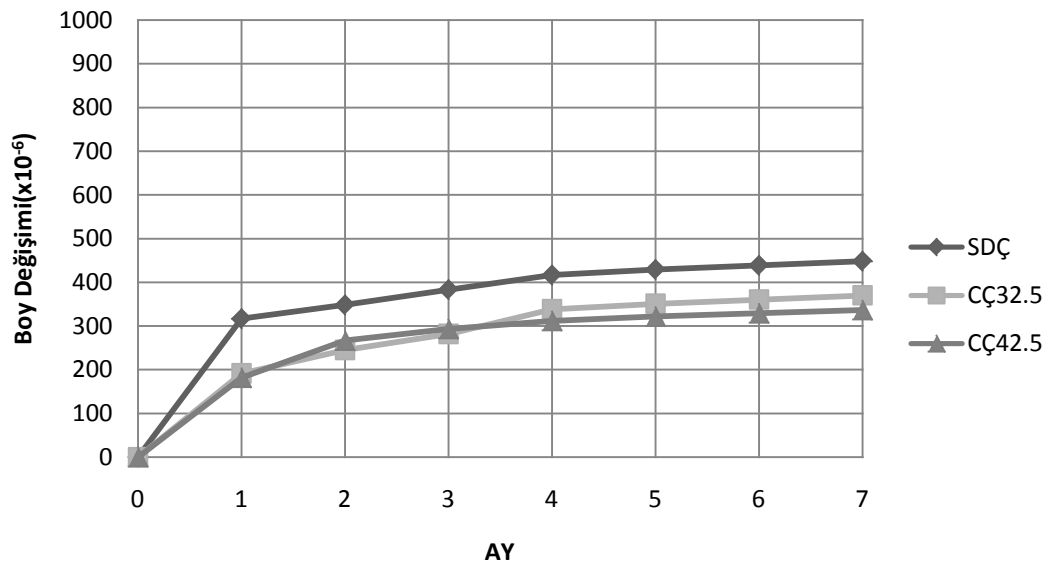
C30/37 SÜLFAT ORTAMI



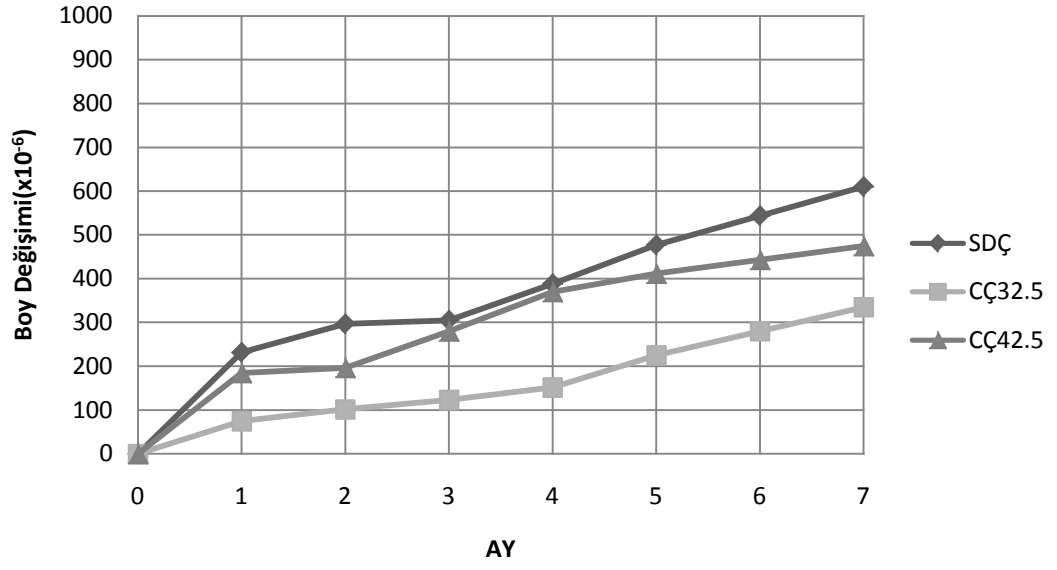
C35/45 SU ORTAMI



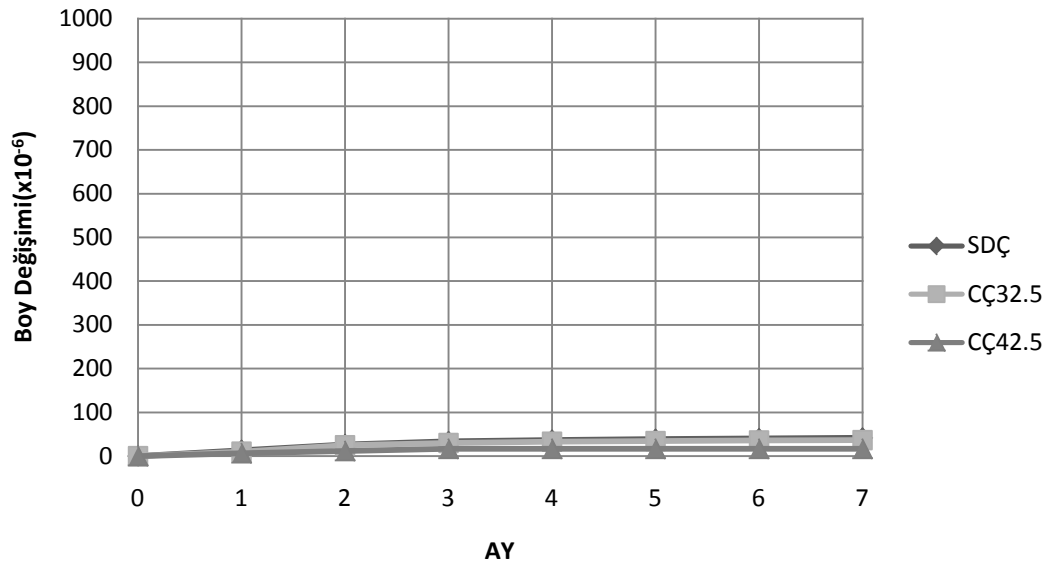
C35/45 DENİZ ORTAMI



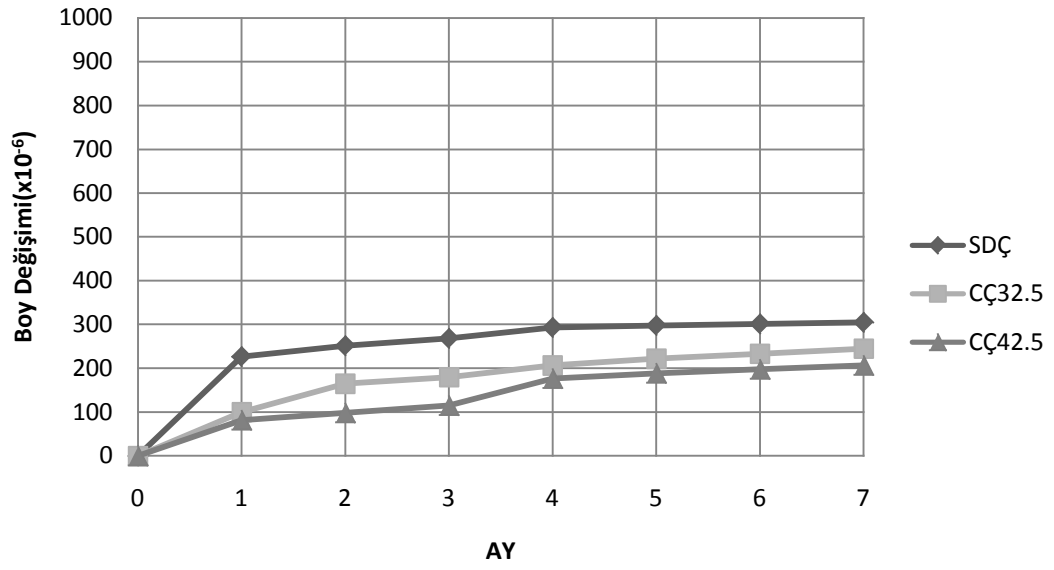
C35/45 SÜLFAT ORTAMI



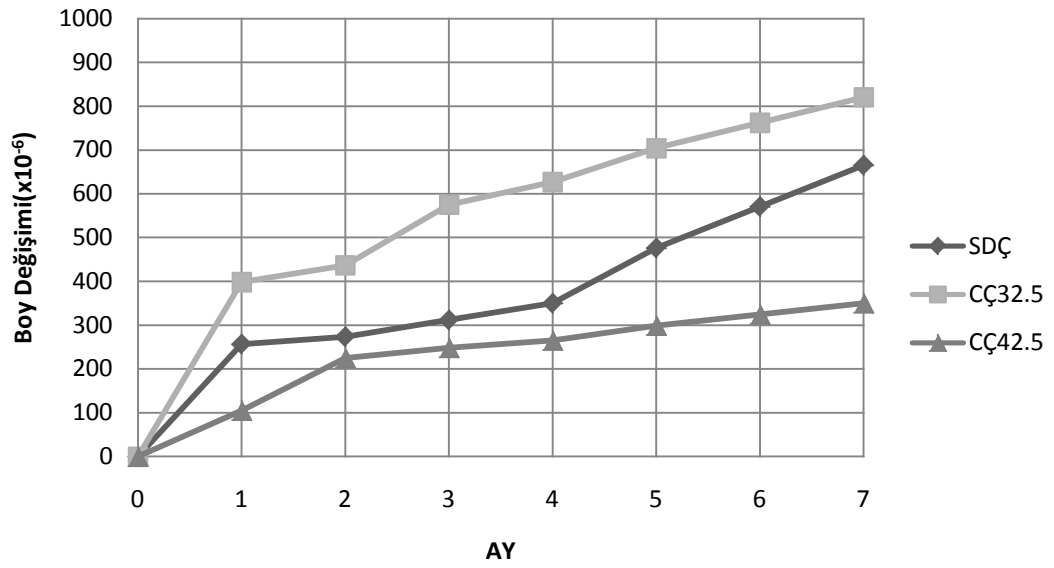
C40/50 SU ORTAMI



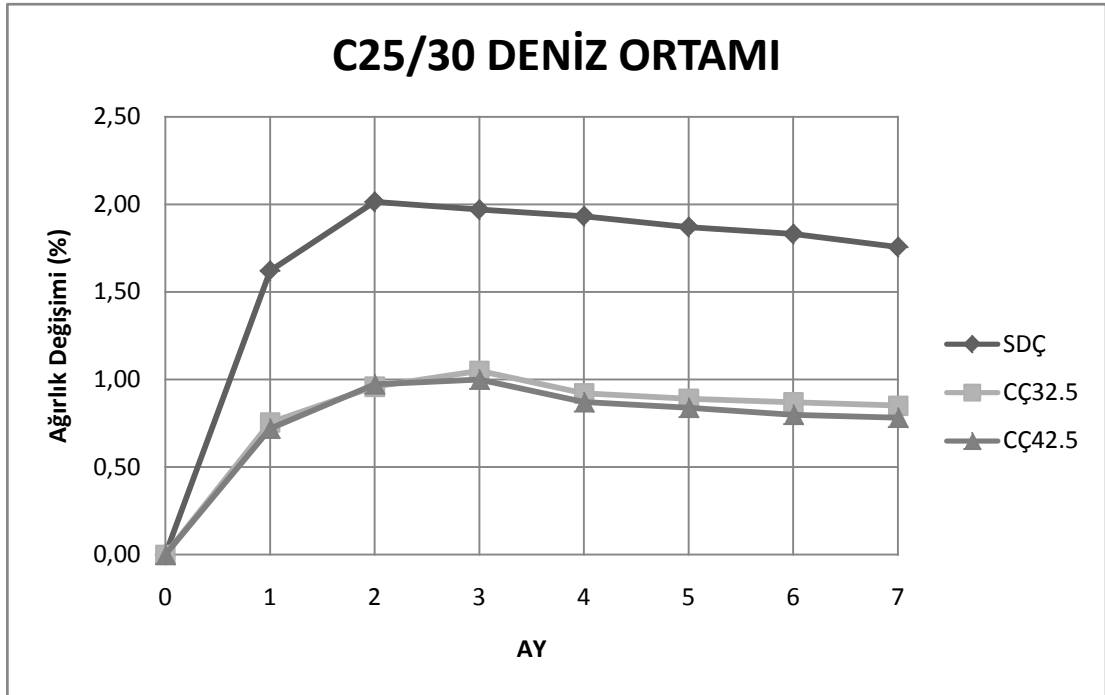
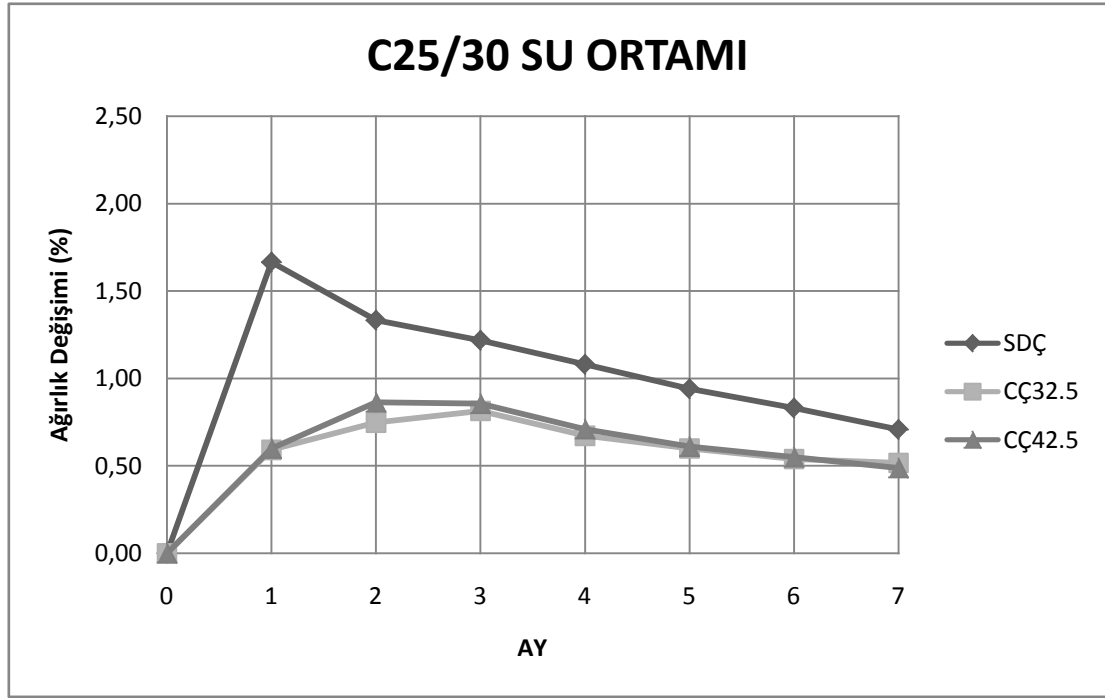
C40/50 DENİZ ORTAMI



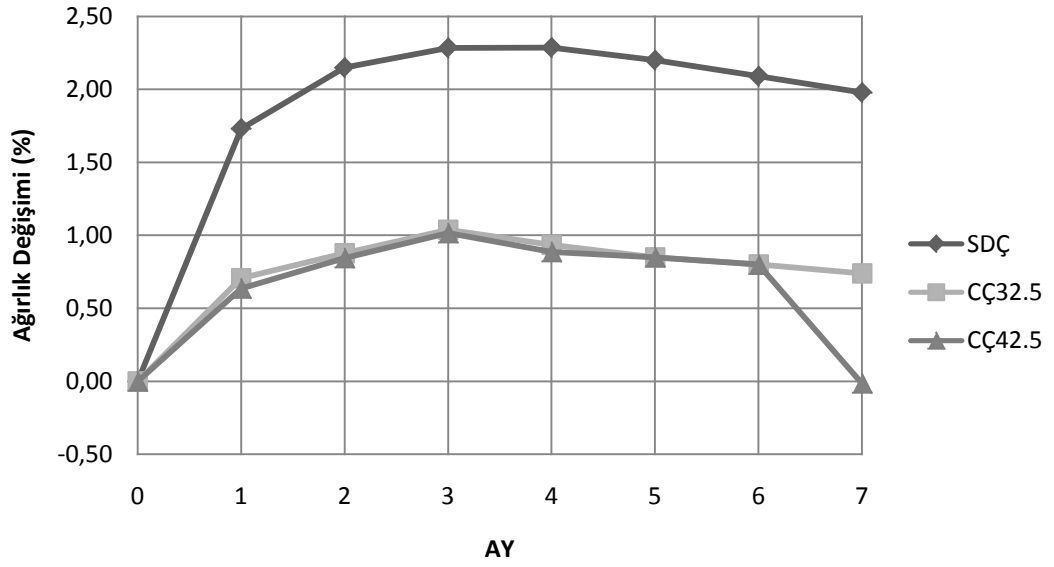
C40/50 SÜLFAT ORTAMI



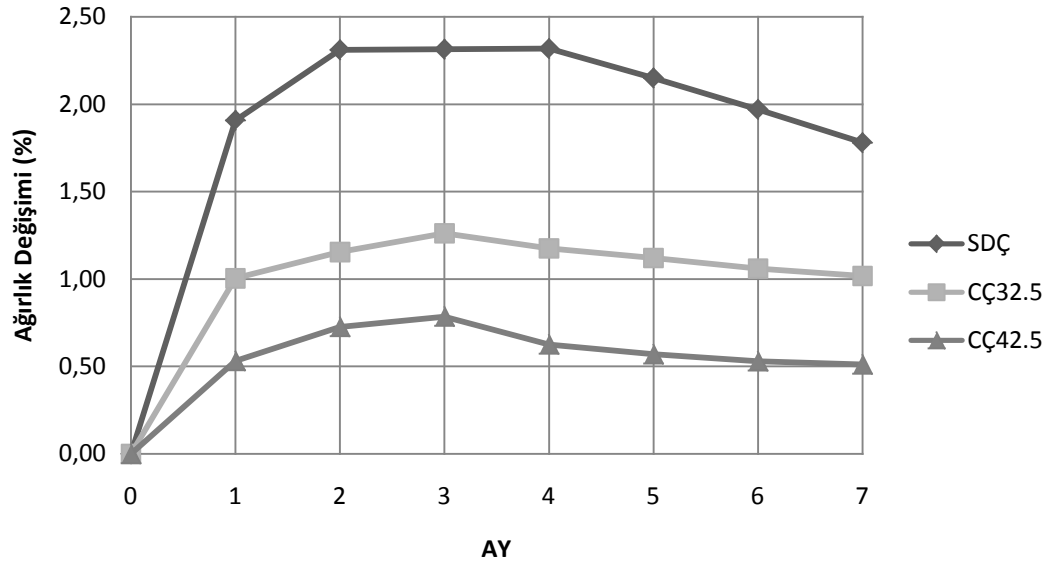
Ağırlık Değişimi Grafikleri

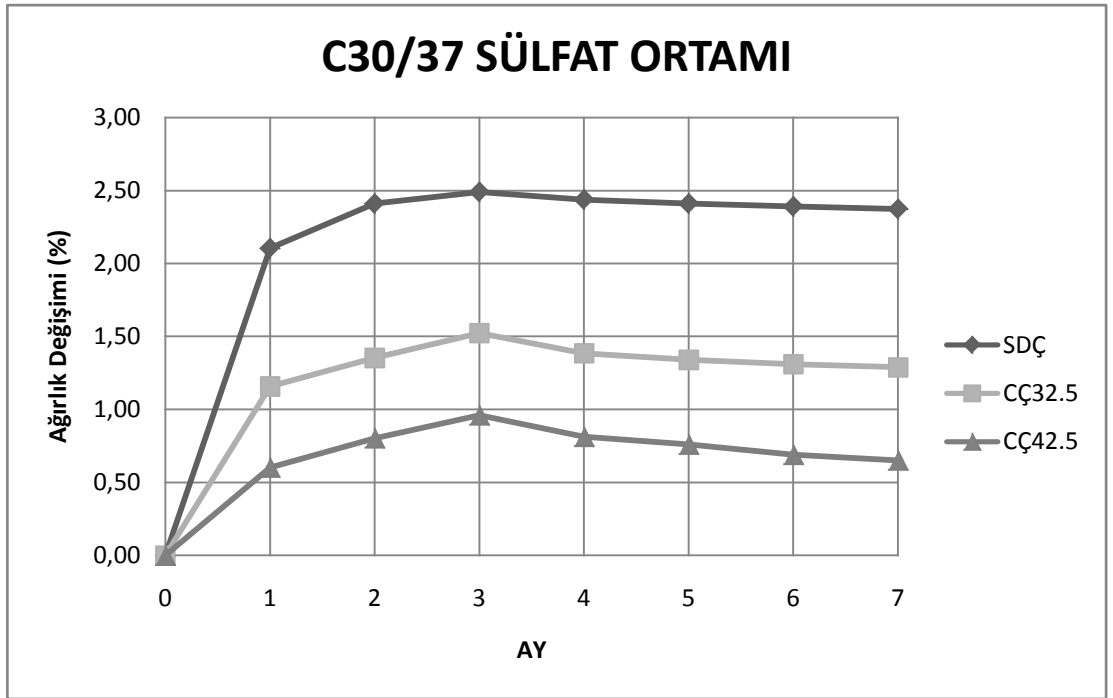
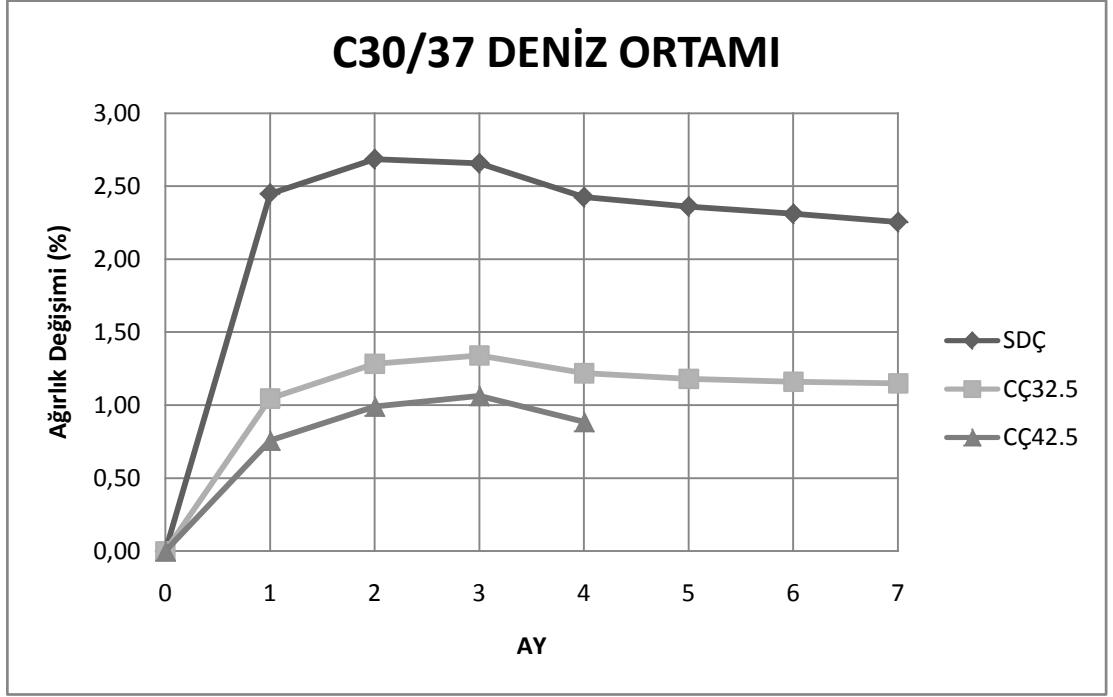


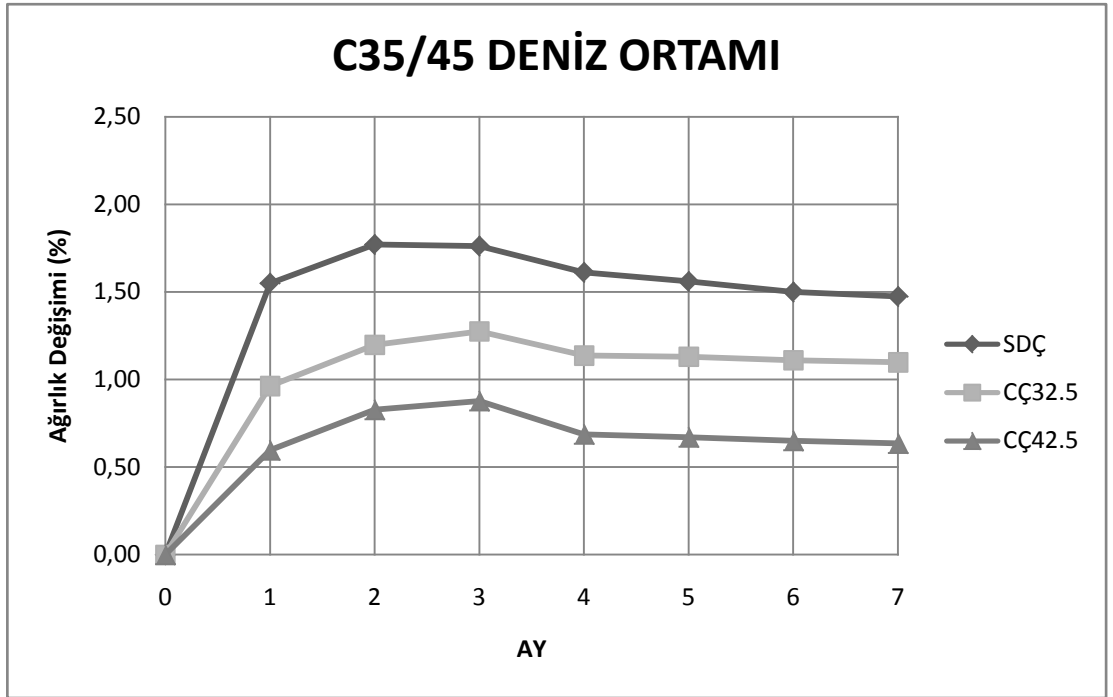
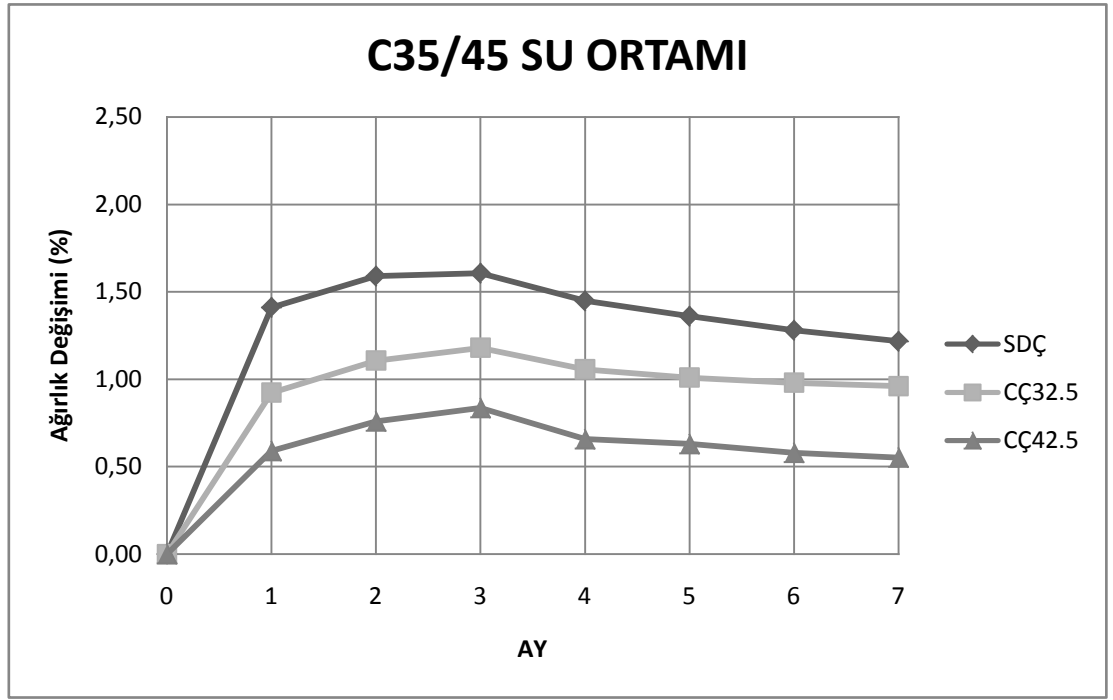
C25/30 SÜLFAT ORTAMI



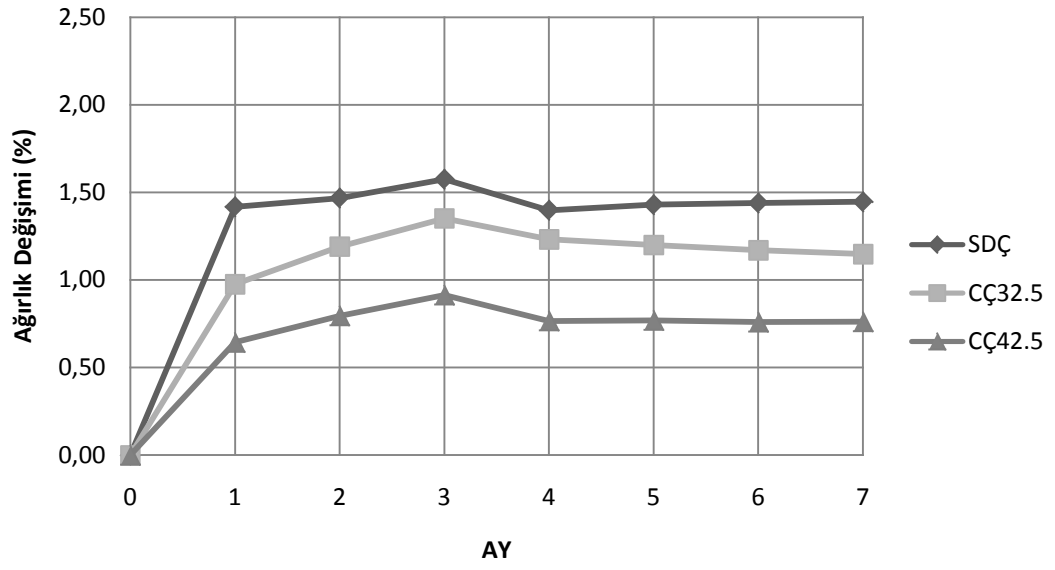
C30/37 SU ORTAMI



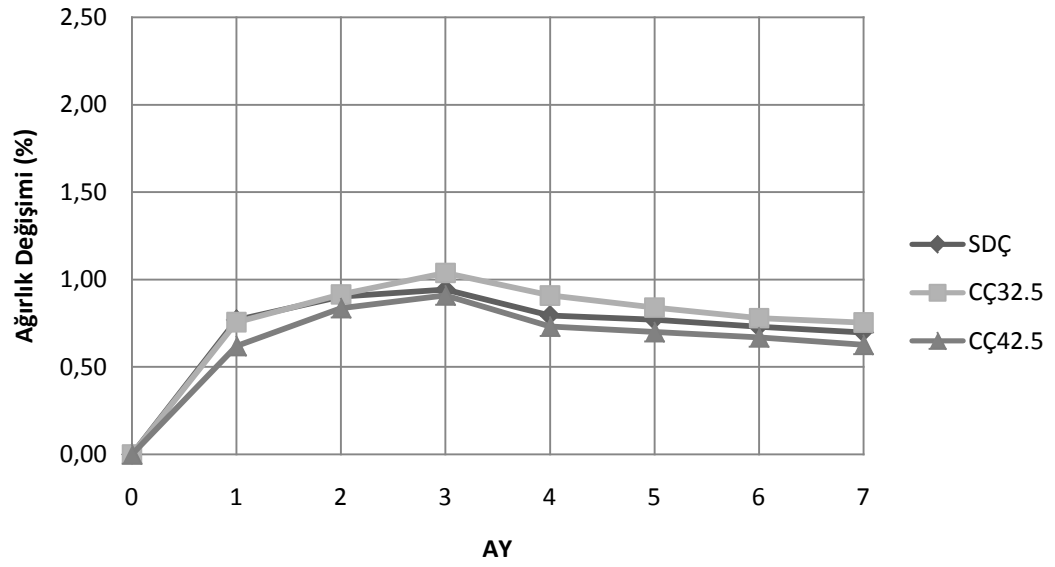




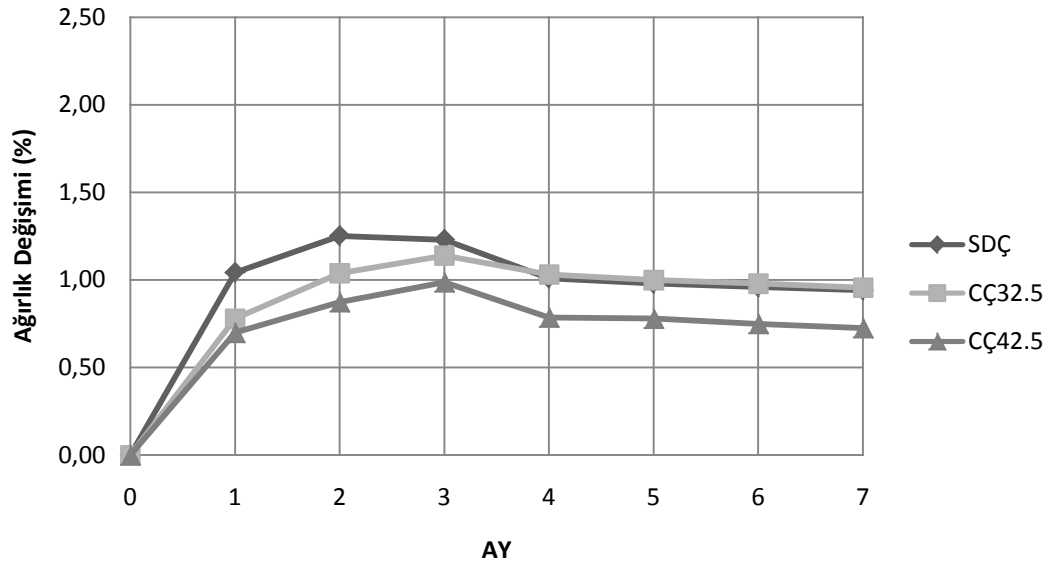
C35/45 SÜLFAT ORTAMI



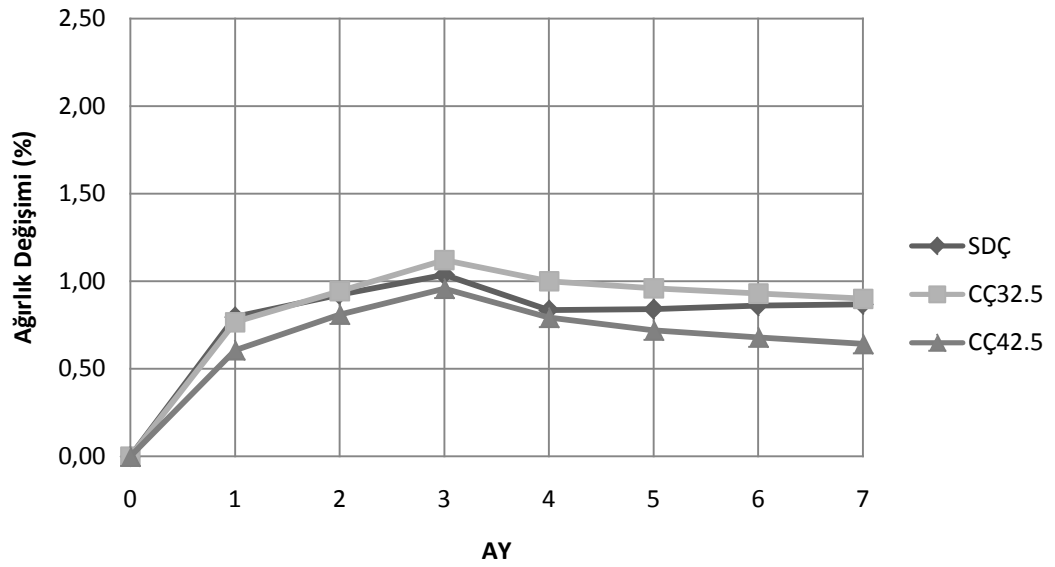
C40/50 SU ORTAMI



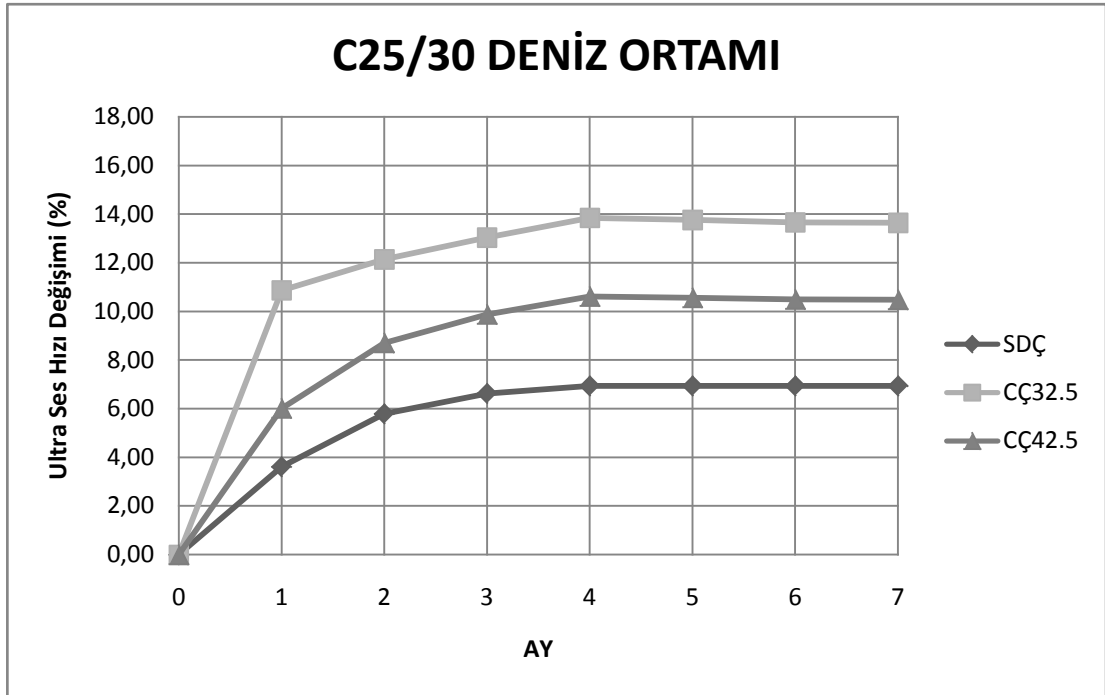
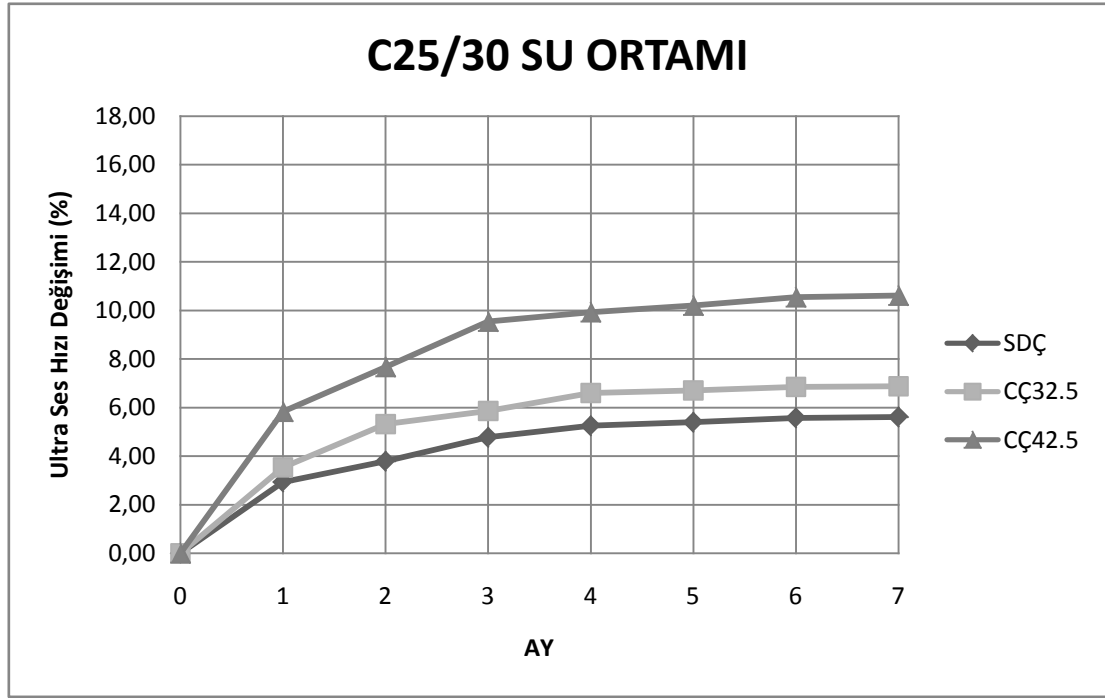
C40/50 DENİZ ORTAMI



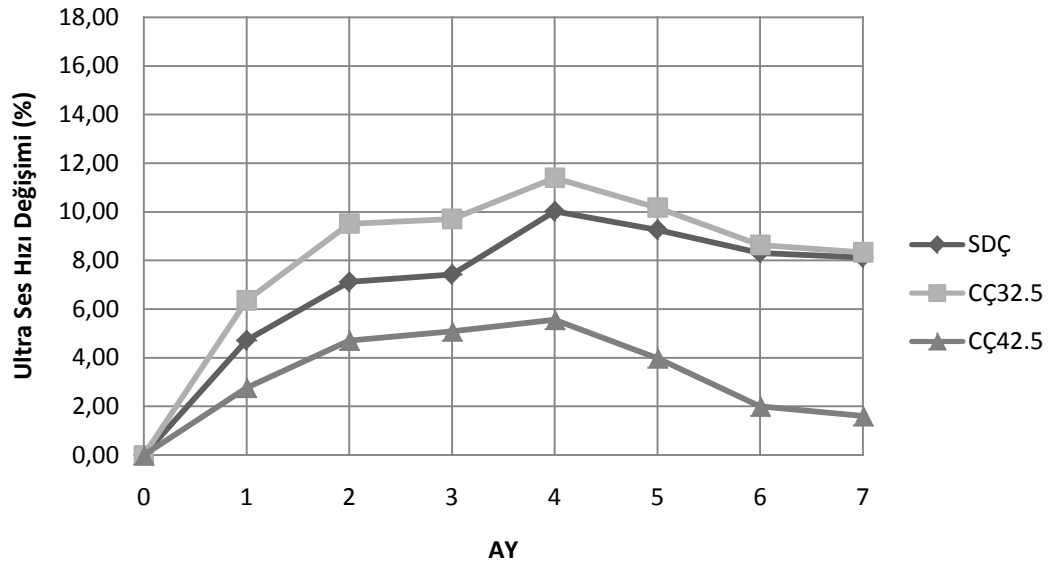
C40/50 SÜLFAT ORTAMI



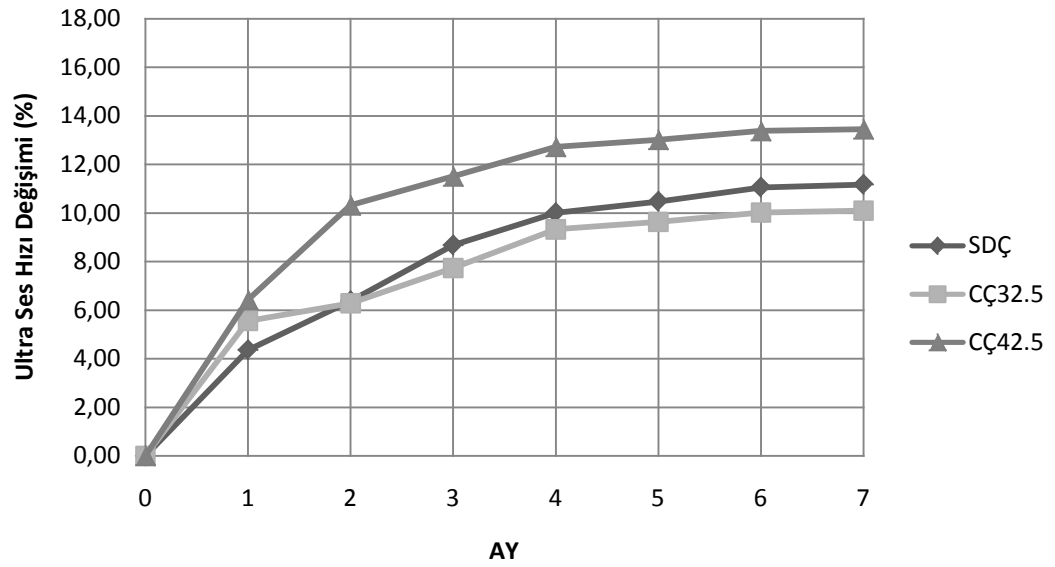
Ultrases Grafikleri



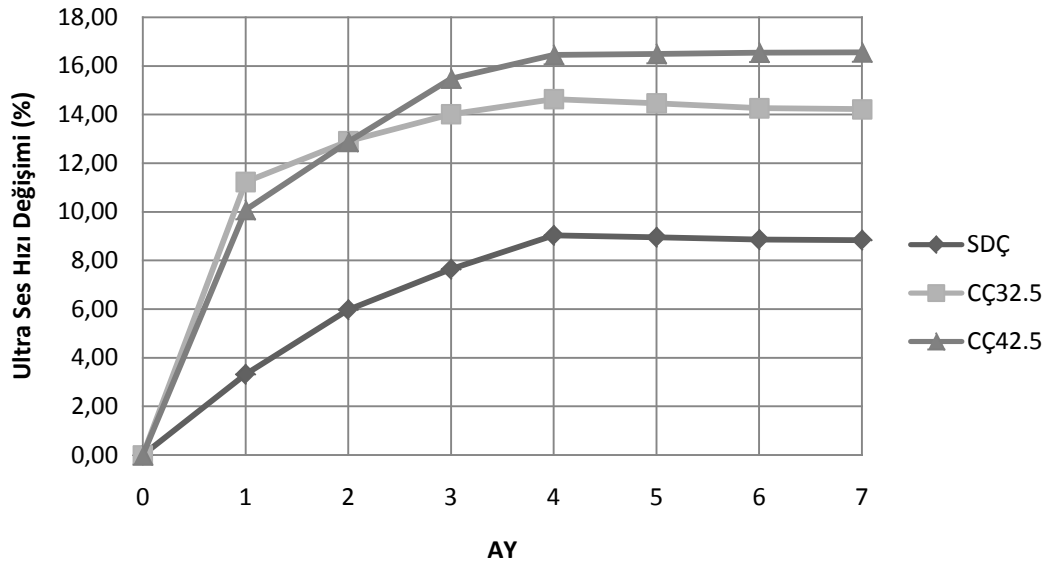
C25/30 SÜLFAT ORTAMI



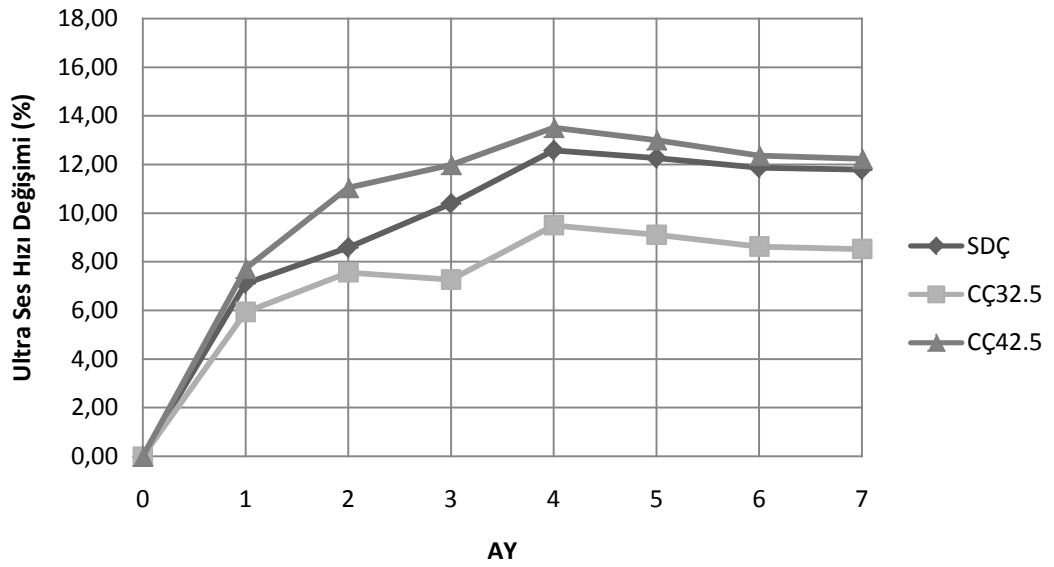
C30/37 SU ORTAMI

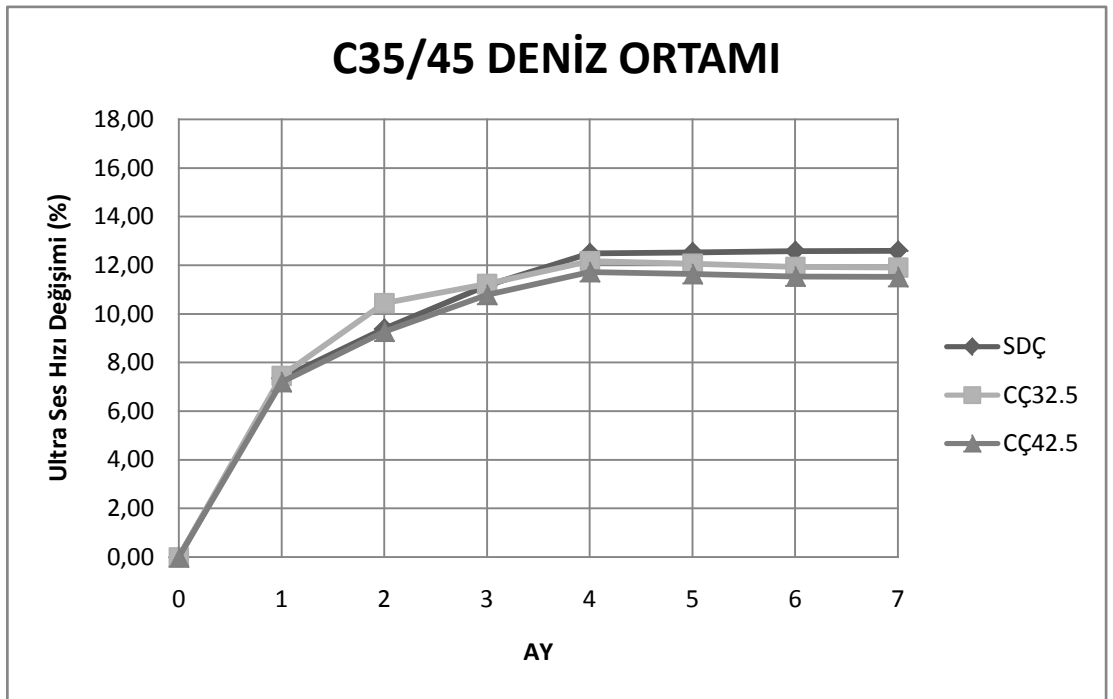
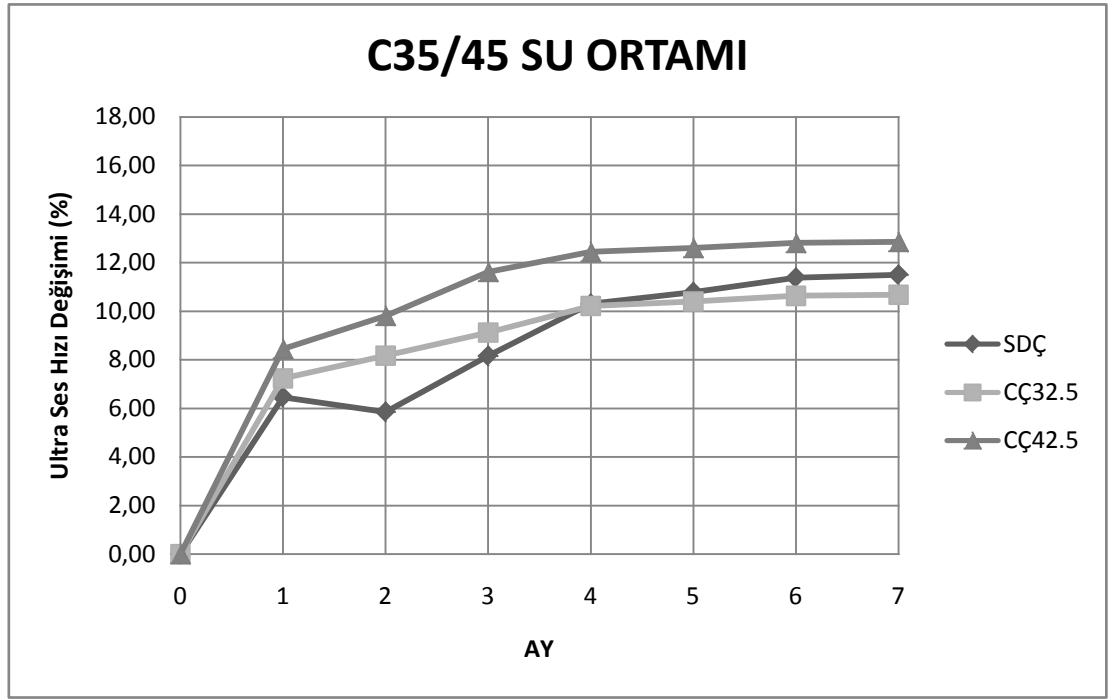


C30/37 DENİZ ORTAMI

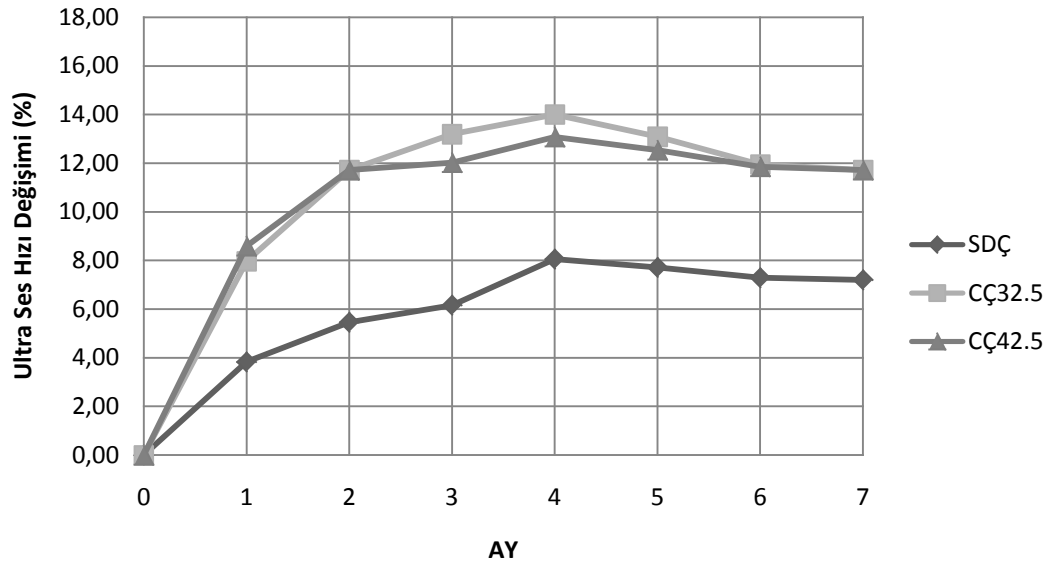


C30/37 SÜLFAT ORTAMI

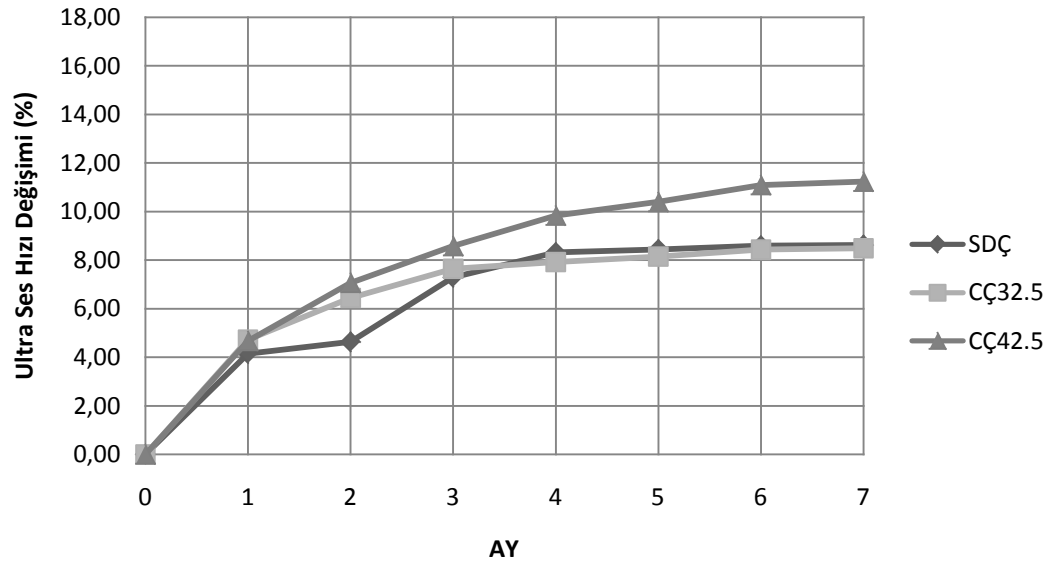




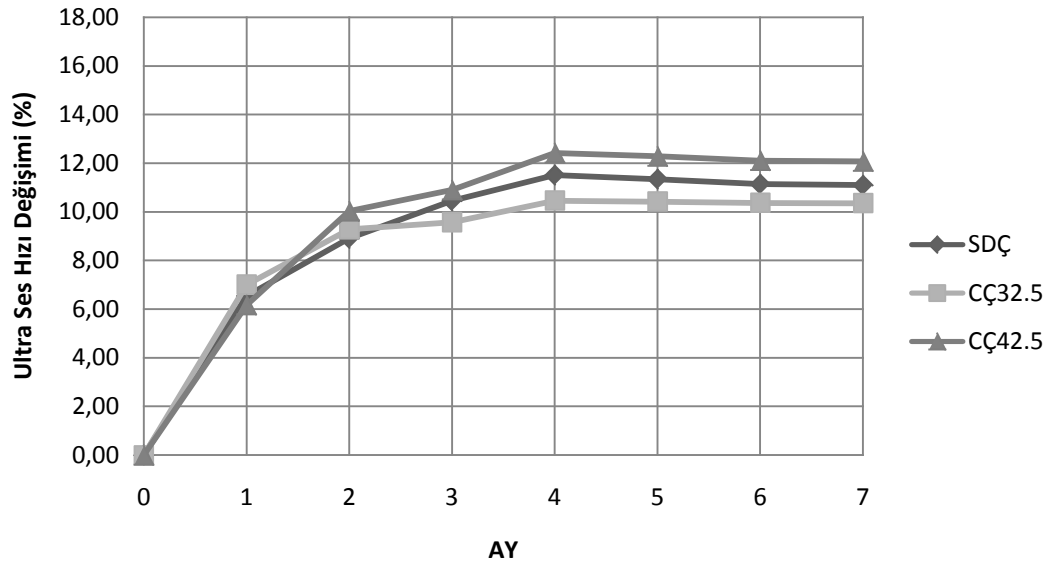
C35/45 SÜLFAT ORTAMI



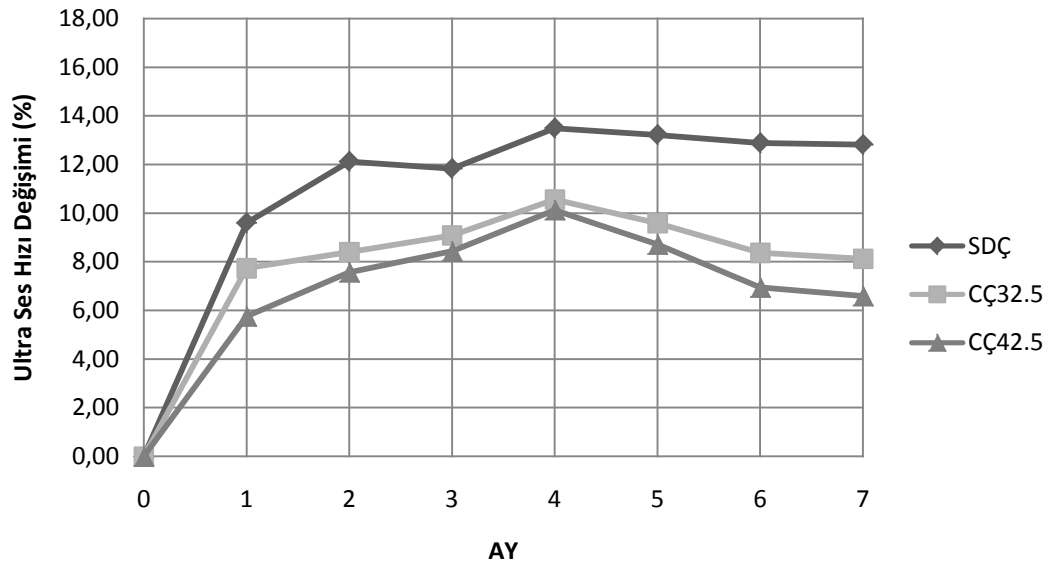
C40/50 SU ORTAMI



C40/50 DENİZ ORTAMI



C40/50 SÜLFAT ORTAMI



ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Ankara’da doğan Tolga ILICA, ilköğrenimini Ankara Mamak İlkokulu’nda, orta öğrenimini Ankara Mamak Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2001 yılında başladığı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisansa başlamıştır.