

**UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN NaCl ve MgSO₄ ÇÖZELTİLERİ
İÇERİSİNDEKİ DAVRANIŞLARI**

Özgür ÇALIŞKAN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2005

BEHAVIOUR OF THE MORTARS WITH FLY ASH IN NaCl AND MgSO₄
SOLUTIONS

Özgür ÇALIŞKAN

Master of Science Thesis

Civil Engineering Department

2005

**UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN NaCl ve MgSO₄ ÇÖZELTİLERİ
İÇERİSİNDEKİ DAVRANIŞLARI**

Özgür ÇALIŞKAN

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemesi Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Haziran - 2005

Özgür ÇALIŞKAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Uçucu Küllü Harçların NaCl ve MgSO₄ Çözeltileri İçerisindeki Davranışları”, başlıklı çalışma, jürimizce değerlendirilerek kabul edilmiştir.

.....

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye: Doç. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye: Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun.....

Gün ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	v
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. BETONDA DAYANIKLILIK (KALICILIK)	3
2.1. Betonun Boşluklu Yapısı ve Geçirimsizliği.....	5
2.2. Betonun Kimyasal Nedenlerle Bozulması.....	5
2.3. Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkınması.....	6
2.4. Sülfat Saldırısı.....	7
2.5. Sülfatların Betonda Oluşturdukları Zararlı Reaksiyonlar.....	8
2.6. Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler.....	9
2.7. Klor Etkisi.....	11
2.8. Çimentonun Hidratasyon Ürünleri.....	12
3. PUZOLANLAR VE PUZOLANLARIN DAYANIKLILIĞA ETKİLERİ ... 13	
3.1. Puzolonik Reaksiyon ve Puzolonik Malzemelerin Aktivitesi.....	16
3.2. Uçucu Kül.....	17
3.2.1. Uçucu Kül Sınıfları.....	21
3.2.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	21
3.2.3. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri.....	22

3.3. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilmeleri İçin Gereken Kimyasal ve Fiziksel Değerler.....	26
3.3.1. Kimyasal Değerler.....	26
3.3.2. Fiziksel Değerler.....	27
4. DENİZ ORTAMINDA BETON ve BETONARME.....	27
4.1. Deniz Suyunun Kimyasal Etkisi.....	28
5. UÇUCU KÜLLERİN DEĞİŞİK ALANLARDA KULLANILMASI İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	31
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
6.1. Çalışmanın Amacı.....	33
6.2. Harç Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması.....	33
6.3. Kullanılan Malzemeler.....	36
6.3.1. Uçucu Kül.....	36
6.3.2. Çimento.....	37
6.3.3. Standart Harç Kumu.....	38
6.3.4. Karma Suyu.....	38
7. DENEYSEL YÖNTEMLERİ VE DENEY SONUÇLARI.....	39
7.1. Deney Yöntemleri.....	39
7.1.1. Deneyleerin Tanımlanması.....	39
7.2. Deney Sonuçları.....	45
7.2.1. Basınç Dayanım Deneyi.....	46
7.2.2. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi.....	46
7.2.3. Ultrases Geçiş Süresi Deneyi.....	48
7.2.4. Hacimce Su Emme Deneyi.....	49

7.2.5. Kılcal Su Emme Deneyi.....	50
7.2.6. Birim Ağırlık Deneyi.....	51
8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
9. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....	54
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	57
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	65
CV.....	67

ÖZET

Bu çalışmada NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinin; normal harçların, % 20 ve % 50 uçucu kül (UK) katkılı harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada Çayırhan termik santralinden temin edilen F sınıfı UK, Eskişehir çimento fabrikasından alınan PÇ 42.5 çimentosu, Set çimento Trakya Fabrikası'ndan temin edilen standart kum ve Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Yirmi sekizinci gün başlangıç kabul edilerek 28, 56 ve 90. günlerde eğilmede çekme, basınç, birim ağırlık, hacimce su emme, kılcak su emme, rezonans frekansı ve ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. Boyutları 40x40x160 mm olan her seriden yirmi yedi adet numune, sodyum konsantrasyonu 40000 mg/lit olan NaCl çözeltisinde, sülfat konsantrasyonu 40000 mg/lit olan MgSO₄ çözeltisinde ve su içinde bekletilmişlerdir. Bu deneylerin tümü Eskişehir, Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvar'ında gerçekleştirilmiştir.

Numunelere uygulanan hasarsız ve hasarlı deneyler sonucunda MgSO₄ çözeltisi içerisinde bekleyen numunelerin eğilmede çekme dayanımlarındaki artış, NaCl çözeltisi içerisinde bekletilen numunelerin eğilmede çekme dayanımlarındaki artıştan daha düşüktür. Bundan dolayı MgSO₄ çözeltisinin numunelere NaCl çözeltisinden daha fazla zarar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Harç, Uçucu kül, dayanıklılık, sülfat etkisi, klor etkisi

SUMMARY

In this research, the effects of NaCl and MgSO₄ solutions on the mechanical and physical properties of normal mortars and mortars with 20 % and 50 % fly ash (FA) additions have been investigated experimentally. The class F fly ash obtained from Çayırhan Thermal Power Plant, the portland cement (PC 42.5) obtained from Eskişehir Cement Factory, the standard sand obtained from Set Cement Factory in Trakya and Eskişehir city water have been used in this research.

After leaving the specimens in the cure for 28 days, starting from the next 28th day, flexural strength, compressive strength, unit weight, volumetric water absorption, capillary water absorption, resonance frequency and ultrasonic pulse velocity tests have been carried out at 28th, 56th and 90th days. Twenty seven specimens have been kept in NaCl solution with 40000 mg/lit sodium concentration, twenty seven specimens have been kept in MgSO₄ solution with 40000 mg/lit sulfate concentration and other twenty seven specimens have been kept in water, each with 40x40x160 mm dimensions. All these experiments have been carried out in the Materials of Construction Laboratory of Civil Engineering Department of Eskişehir Osmangazi University.

As a result of the non-destructive and destructive tests carried out on the specimens, the increase in the flexural strength of the specimens kept in MgSO₄ solution is lower than that of the ones kept in NaCl solution. Thus it has been seen that MgSO₄ deteriorates the specimens more than the NaCl solution.

Key Words: Mortar, fly ash, resistance, effect of sulphate, effect of chlorine

TEŞEKKÜR

Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, Yüksek Lisans Tezi olarak yaptığım bu çalışmada danışmanlığımı üstlenerek beni yönlendiren, sürekli çalışmaya, yeni bilgiler edinmeye teşvik eden; bu doğrultuda bilgi, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'ya, deneylerin gerçekleşmesi sırasında her türlü bilgi yardımında bulunan Arş. Gör. Mehmet CANBAZ'a, tez çalışmamda bana sürekli destek olan bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan değerli büyüğüm Kim. Yük. Müh. Ali UĞURLU'ya, laboratuvar çalışmalarım sırasında benden yardımını esirgemeyen İnş. Tek. Sevgin YILMAZ'a, inşaat mühendisliği ve yüksek lisans eğitimim boyunca ders aldığım İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki kıymetli hocalarıma, hayat boyu dostum, dert ortağım, can dostum Ulaş AKHAN'a, bugünlere gelmemde, yetişmemde en büyük emeği olan, beni maddi, manevi alanda her zaman destekleyen canımdan çok sevdiğim babam Hasan Ali ÇALIŞKAN ve annem Aysel ÇALIŞKAN'a en derin saygı ve sevgilerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. Bağlı basınç dayanımı – zaman ilişkisi.....	45
Şekil 2. Bağlı eğilmede çekme dayanımı – zaman ilişkisi.....	46
Şekil 3. Bağlı rezonans frekansı – zaman ilişkisi.....	47
Şekil 4. Bağlı ultrases geçiş süresi – zaman ilişkisi.....	48
Şekil 5. Bağlı hacimce su emme – zaman ilişkisi.....	49
Şekil 6. Bağlı kılcal su emme – zaman ilişkisi.....	50
Şekil 7. Bağlı birim ağırlık – zaman ilişkisi.....	51

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. ASTM Tipi Portland Çimentolarındaki Anabileşenlerin Oranlar.....	10
Tablo 2. Puzolanların Kimyasal Özellikleri.....	14
Tablo 3. Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri.....	15
Tablo 4. Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri.....	16
Tablo 5. Türkiye’de Uçucu Kül Kullanımı (1966 – 1980).....	19
Tablo 6. TS 640’da Belirtilen Uçucu Küllü Çimento Özellikleri.....	20
Tablo 7. ASTM C 618’e Göre Uçucu Kül Sınıfları.....	21
Tablo 8. Değişik Termik Santral Uçucu Küllerinin Kimyasal Kompozisyonları....	22
Tablo 9. Uçucu Kül’ün Beton Özelliklerine Etkileri.....	23
Tablo 10. Termik Santrallerden Elde Edilen Uçucu Küllerin Bazı Fiziksel Özellikleri.....	25
Tablo 11. Termik Santrallerden Elde Edilen Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşenleri	26
Tablo 12. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilmeleri için Gereken Kimyasal Değerler.....	26
Tablo 13. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilmeleri için Gereken Fiziksel Değerler.....	27
Tablo 14. Ülkemiz Denizlerinin Tuzluluk Oranları ve İyon Konsantrasyonları.....	28
Tablo 15. Deniz Suyundaki Tuzlar, g/l.....	31
Tablo 16. Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analizi.....	36
Tablo 17. Çimentonun Fiziksel Özellikleri.....	37
Tablo 18. Çimentonun Kimyasal Özellikleri.....	37
Tablo 19. Standart Kumun Elek Analizi.....	38
Tablo 20. Kullanılan Şebeke Suyunun Kimyasal Analizi.....	38
Tablo 21. Numunelerin Sınıflandırılması.....	39

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Fotoğraf 1. Harç makinesinde harcın karıştırılması.....	34
Fotoğraf 2. Kür edilen numuneler.....	35
Fotoğraf 3. Eğilmede çekme deneyi.....	41
Fotoğraf 4. Basınç dayanımı deneyi.....	42
Fotoğraf 5. Ultrases geçiş süresinin ölçümü deneyi.....	43
Fotoğraf 6. NaCl ve MgSO ₄ çözeltilerinde bekletilen numuneler.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. Bağlı Basınç Dayanımı Değerleri.....	45
Çizelge 2. Bağlı Eğilme Dayanımı Değerleri.....	46
Çizelge 3. Bağlı Ultrases Geçiş Süresi Değerleri.....	48
Çizelge 4. Bağlı Hacimce Su Emme Değerleri.....	49
Çizelge 5. Bağlı Kılcal Su Emme Değerleri.....	51
Çizelge 6. Bağlı Birim Ağırlık Değerleri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
°C	Santigrat Derece
%	Yüzde
μ	Mikron
mm	Milimetre
M	Eğilme momenti
P	Kırılma Yüğü
L	Mesafe
α_R	Çekme Dayanımı
α	Basınç Dayanımı
A	Alan
g	Gram
l	Litre
sn	Saniye
H	Hidrojen

Kısaltmalar	Açıklama
UK	Uçucu Kül
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
M-S-H	Magnezyum Silika Hidrat
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
DEF	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Metarials
DSİ	Devlet Su İşleri
MPa	Megapaskal
C ₃ A	Tri Kalsiyum Alüminat
KHz	Kilohertz

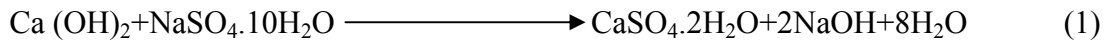
1. GİRİŞ

Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır. Endüstriyel atıklardan yapay puzolan sınıfına giren ve termik santral baca külü olan uçucu küller (UK) kendisine inşaat sektöründe kullanım alanı bulmuştur. UK'nın çimento ve beton içindeki performansını etkileyen en önemli özeliği inceliğidir. UK'lı betonların dayanım, aşınma direnci, donma-çözülme direnci gibi özellikleri kullanılan UK'nın inceliğinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar [1]. Türkiye, elektrik enerjisinin yarıya yakınını termik santrallerde üretmektedir. Bu üretim sırasında termik santrallerin bacalarından elde edilen atık UK miktarı 13.5 milyon ton/yıl dolayındadır [2]. İnşaat sektöründe UK; çimento, agrega, beton, yapı malzemesi ve geoteknik uygulamalarda kullanılır [2,3].

Hem taze ve sertleşmiş haldeki betonun bazı özelliklerini iyileştirmek, hem de üretimde ekonomikliliği sağlamak amacıyla betonda çimentonun bir kısmı yerine UK kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Küresel tane şekliyle taze betonda işlenebilmeyi iyileştiren ve kohezyonu artıran UK puzolonik özeliği nedeniyle de sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılığı arttırabilmektedir [4]. Mineral karışımlardan olan UK betonun dayanıklılık karakteristikleri üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Betonun dayanıklılığına etki eden nedenlerden birisi de donma-çözülmedir [5,6].

MgSO₄'a yeraltı sularında, deniz suyunda veya endüstriyel atık içeren sularda rastlanmaktadır. Betonun Mg tuzlarıyla uzun süreli teması halinde ise C-S-H içindeki kalsiyumun Mg iyonlarıyla yerdeğiştirdiği görülür, oluşan magnezyum silikat hidratin (M-S-H) bağlayıcılık özeliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar. MgSO₄ aynı zamanda betonda sülfat etkisine yol açtığı için magnezyum tuzları içinde en zararlısı olarak kabul edilir. Klorürler ise betonda CH'in yıkanıp süzülmesi, C-S-H'in bozulması ve boşluklarda kristalleşen tuzların bir takım gerilmeler meydana getirmesiyle etkili olmaktadır. Bazı yayınlarda suda çözünen ürünler meydana getirdikleri için NaCl ve NH₄Cl gibi klorürlerin MgCl₂'den daha zararlı olduğu ifade edilmektedir [7].

Sülfatların, hidrate çimento bileşenleriyle, özellikle Ca(OH)_2 ve C_3A ile yaptığı reaksiyonlar sonucu oluşan ürünler alçıtaşı ve kalsiyum sülfat alüminattır. Bu tuzlar yerlerini aldıkları bileşenlerden çok daha fazla hacim kaplarlar. Oluşan genleşme betonda hasara yol açar. Betonda sülfat etkisi kendini ilk 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 kırınlaştığı ve yumuşadığı, dayanımını ve rijitliğini kaybedip dağıldığı görülür. Sodyum sülfatın Ca(OH)_2 ile yaptığı reaksiyon 1 denklemde görüldüğü gibi gerçekleşmektedir.



Bu reaksiyon sonunda katı fazın hacmi % 124 artmaktadır. Suyun sürekli yıkaması sonucu Ca(OH)_2 tamamen bünyeden uzaklaşabilir. NaOH 'in birikimi sonucu reaksiyon dengeye ulaşıncaya, yalnızca SO_3 'ün bir kısmı alçı taşına dönüşür. UK puzolanik özeliği olan ve betonun bir çok özeliğini olumlu etkileyen değerli ve önemli beton katkısıdır.

UK taneleri küresel yapıları nedeniyle betonun işlenebilme özeliğini iyileştirmekte, taze betonda su kusmayı (terleme) azaltmakta, betonun hidratasyon ısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne olanak tanımakta, puzolanik reaksiyondan dolayı betonun uzun dönemli dayanıklılığına katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini azaltmakta, betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri UK'nın beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerine yoğunlaşmasını sağlamıştır [7,8].

UK'lar, hem çimentoya hem de betona katkı maddesi olarak katılırlar. UK ince malzeme olduğundan kırıcıda ve hammadde değirmeninde elektrik enerjisinden tasarruf edilebilmektedir. Bu madde aynı zamanda kalsine olmuş ve kısmen pişmiş bir halde olduğundan fırında da enerji tasarrufu sağlanmış olmaktadır. Çimentodan çok daha ucuz olması nedeni ile de ekonomiktir [9].

2. BETONDA DAYANIKLILIK (KALICILIK)

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilmelerine dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite adı verilir. Doğa yasalarına göre maddeler, en düşük enerjili doğal konumlarına geçmeye eğilimlidirler. Demirin paslanması olayında olduğu gibi, bu “termodinamik” denge halidir [10].

Bir yapının projelendirilmesi ve yapımı; beş ana ilkenin (dayanım, dayanıklılık, işlevsellik, ekonomi ve estetik) birlikte alındığı bir optimizasyon olarak tanımlanabilir. Yapay bir malzeme olan betonarmenin olumlu özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Beton veya betonarme elemanların, bazen işlevleri gereği taşınmaları gerekli yükler veya aşırı yüklemenin etkisi dışında da zamanla bozulmaları olasıdır. Betonarme elemanların bazılarının uzun yıllar sonra işlevlerini yerine getiremez duruma geldikleri, bazılarının ise çok kısa sürelerde bozulmaya başladıkları görülmektedir. Yapıların kalıcı olmaları yalnızca doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve yapımı ile kısıtlı değildir. Aynı zamanda, yapının mantıklı bir zaman süreci içinde “kalıcı” denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması da yavaşlatılmalıdır. Bu da ancak betonun, betonarme veya öngerilmeli beton yapıların bozulmasına neden olan etkenlerin bilinmesi ve bunlara karşı gereken önlemlerin alınmasıyla olur.

Mekanik yollar dışındaki bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör su veya nemin varlığıdır. Su beton içinde zararlı maddeleri taşır, ayrıca kimyasal reaksiyonların oluşumuna katkıda bulunur. Suyun beton içinde taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına, mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlakların oluşumunun engellenmesi kalıcılığın sağlanabilmesi için gereklidir. Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan beton, hizmet süresi boyunca, yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etkenle karşılaşmaktadır. Bu etkenler, doğa koşullarından, betonun kullanıldığı ortamdan ve betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Betonun içerisine sızan su, karbon dioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler betonda değişik türdeki kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Betonun

içerisindeki alkalilerle reaktif agregalar arasında gelişen ve sertleşmiş betonun genleşerek yıpranmasına yol açan reaksiyonlar da kimyasal olaylar sonucunda yer almaktadır. Islanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma ve aşınma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır. Betonda yer alan fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir. Bütün bu olaylar, betonun hasar görmesine, hizmet edemez duruma gelmesine yol açmaktadır.

Bilindiği gibi, yapıların tasarımında betonun hedeflenen dayanımdan daha düşük dayanıma sahip olmaması istenmektedir. Ancak betonun hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi yani yeterince dayanıklı olması, en az betonun dayanımı kadar hatta çoğu zaman beton dayanımından daha da önemlidir.

Betonun dayanıklılığı, hava koşullarından, sülfatlı, asitli sulardan ve betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan; kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, betonun hizmet süresince direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır.

Dayanıklılık, durabilite veya kalıcılık olarak da adlandırılmaktadır. Betonun dayanıklılığını olumsuz etkileyen bazı önemli kimyasal ve fiziksel olaylar şunlardır:

- Betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve yüzeyinde çiçeklenme oluşması,
- Sülfat etkisi (sülfat hücumu),
- Deniz suyunun etkisi,
- Asit etkisi (asit hücumu),
- Karbonatlaşma,
- Alkali-agrega reaksiyonu,
- Betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu,
- Donma-çözülme etkisi,
- Beton yüzeyinin pullanması,
- Aşınma [10]

2.1. Betonun Boşluklu Yapısı ve Geçirirliiği

Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde iki ana faktör vardır; su ve beton bünyesindeki boşluklar ile çatlaklar içindeki taşınım. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin beton içinde taşınımı (transferi) ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Taşınımın boyutu, hızı ve etkisi büyük ölçüde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton yüzeyindeki mikroiklimine bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesini ve boşluk yapısını iyi tanımak gerekir. Beton içinde boşluklar agrega ve çimento hamurunda olmak üzere ikiye ayrılır. Bu boşluklar normal beton hacminin % 10'una kadar çıkabileceği gibi % 1'in altına da düşebilir. Doğaldır ki % 10 civarında boşluk içeren bir beton, bal peteği görünümünde, çok düşük dayanımlı ve kalıcı olmayan bir betondur. Boşluk oranını kontrol etmek, en düşük değere indirebilmek, beton teknolojisinin kurallarına uymakla olur.

Agrega beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olduğundan ve normalde az boşluk içermesi nedeniyle, betonun geçirirliiği büyük ölçüde çimento hamurunun geçirirliiğine bağlıdır. Burada hamur, harç ve beton terimlerinin arasındaki farkın gözardı edilmemesi gerekir. Hamur terimi ile su ve çimentodan oluşan karışım kastedilirken; çimento, en büyük tane çapı 4 mm ve altında olan ince agrega ve sudan oluşan karışıma harç adı verilmektedir. Çimento, su, iri ve ince agrega içeren karışım ise beton olarak adlandırılır. Geçirirlilik açısından bakıldığında, aynı S/Ç oranında ve diğer şartlarında aynı kalması koşuluyla, betonun harçtan, harcın da hamurdan daha geçirirli olduğu söylenebilir. Bu durum, beton içinde en zayıf halka olarak nitelendirilen çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin etkisiyle açıklanabilir. Agreg-a-çimento hamuru ara yüzeyinde göreceli olarak S/Ç oranının artması ve kılcal çatlaklar oluşması geçirirliiğin artmasına yol açmaktadır [10].

2.2. Betonun Kimyasal Nedenlerle Bozulması

Betonda ortaya çıkan zararlı kimyasal reaksiyonlar kendini, betonun gözenekliliğinin ve geçirirliiğinin artması, çatlamlar, dökülmeler, kapak atmalar, betonun yumuşaması, dayanımı ve rijitliğini kaybetmesi şeklinde gösterir. Betonun hasar görme derecesinin artışıyla, bozulma süreci hızlanır. Pratikte beton aynı anda birçok

kimyasal etki altında kalabilir ve bu etkiler bir diğeri ortaya çıkarabilir. Betonun kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla bozulma sürecinde, zararlı maddelerin (iyon veya molekül) çoğunlukla çevreden beton bünyesine taşınımı söz konusudur. Bazı hallerde zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Bu durumda bile zararlı maddeler reaksiyona girecekleri yere taşınırlar. Madde transferi olmadığı zaman zararlı reaksiyonlar gelişemez. Dolayısıyla beton bünyesindeki kimyasal reaksiyonların oluşması için ön koşul, taşınmayı sağlayan su, su buharının varlığı ve betonun boşluklu yapısıdır. Zararlı maddeler ve betonun reaktif bileşenleri arasındaki reaksiyon gerekli ortam oluşunca hemen başlar. Genelde, beton bünyesi içinde veya yüzeyden içeriye taşınım hızı oldukça yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra belirir.

Kimyasal reaksiyonların gelişimi, büyük ölçüde zararlı maddelerin beton bünyesine taşınım hızına dolayısıyla betonun geçirimsizliğine bağlıdır. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, sıcaklık reaksiyon hızını arttıran bir faktördür. Bunun nedeni sıcaklığın iyon veya moleküllerin hareketliliğini arttırmasıdır. Kimyasal reaksiyonlar değişik tiplerde oluşabilir ve çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenlerle bir arada ve peşpeşe gelişip betonun bozulmasına neden olurlar. İyi bir şans eseri uygulamada kullanılan beton veya betonarme yapı elemanlarının yalnızca küçük bir kısmı ciddi kimyasal etkilerle karşılaşır. En çok karşılaşılan kimyasal saldırılar; sülfat, asit ve alkali saldırılarıdır. Deniz suyu ve tuz etkileri de önemli kimyasal ve fiziksel etkileri olan saldırı kaynaklarıdır [10].

2.3. Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkınması

Hidrate çimentonun katı fazını göreceli olarak çözünmeyen kalsiyum hidratlar (CSH, CH ve CAH) oluşturmaktadır. Bu bileşenler pH'ı oldukça yüksek olan gözenek suyu içinde kararlı durumdadır. Gözenek suyu içindeki Na^+ , K^+ ve $(\text{OH})^-$ iyonları betonun pH değerini 12.5–13.5 aralığında tutmaktadır. Buradan çıkarılabilecek doğal sonuç, betonun asidik ortamlarla karşılaştığında kimyasal kararlılığını kaybedeceğidir. Teorik olarak pH'ı düşük sular çimento hidrate bileşenlerinin çözülmesine yol açar. Bu açıdan bakıldığında birçok endüstriyel atık ve doğal su beton açısından saldırgan kabul edilebilir. Ancak, kimyasal saldırının şiddeti sıvının pH değeri ve betonun geçirimsizliğinin bir fonksiyonudur. Sıvının pH değerinin 6.5'in üzerinde olması ve

betonun geçirirliğinin çok az olması halinde kimyasal saldırı çok yavaş gelişir ve sonucu ihmal edilebilir seviyelerde kalabilir. Özellikle sülfat ve klor iyonları içeren yeraltı suları, deniz suyu, serbest CO₂ veya H⁺ iyonu içeren sular zararlı reaksiyonlara neden olabilir, pH 5.5 ve altındaysa saldırı şiddetli, 4.5 ve altındaysa çok şiddetli gerçekleşir. Ancak belirtildiği gibi sıvının beton içinde taşınım hızı ve betonun boşluklu yapısı önemli bir faktördür.

Doğada rastlanan yeraltı, nehir ve göl suları sertliklerine bağlı olarak bir takım Ca⁺² ve Mg⁺² iyonları içerirler ve genellikle çimento hamuru birleşenlerinde hidrolize yol açmazlar. Diğer taraftan, sertlik derecesi çok düşük olan ve özellikle erimiş kar suyu, yağmur suyu gibi saf sular çimento hamuru içindeki kalsiyumlu bileşenlerin çözülmesine neden olurlar. Hidrate çimento bileşenleri içinde CaOH litrede 1230 mg çözünürlükle saf su ile en fazla hidrolize uğrayan bileşendir. Çimento hamuru ile temas halinde olan su kirece doyduğunda hidroliz sona erer. Suyun sürekli akması veya yenilenmesi durumunda ise kalsiyum hidroksit tamamen çözünüp yıkanarak hamur dışına atılabilir ve bu kez çözünme bağlayıcı özellikteki C-S-H jellerinde başlar. Kireç içeriğinin azalması sonucunda betonda dayanım kaybı meydana gelir ve kirecin boşalttığı gözenekler sebebiyle geçirirlilik artıp, dayanıklılık azalır [10].

2.4. Sülfat Saldırısı

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-çimento aderansının etkilenmesiyle betonun dayanımı düşer. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür. Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çalılık dışında, bitki, ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda, sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilir. Bir diğer kaynak çimentodur, çimentonun C₃A

bileşeninini ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genişlemenin ve betonun dayanımının etkilenmesini önlemek için genelde çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO₃ miktarını çimento ağırlığının % 3'ü ile sınırlandırmıştır. Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) adı verilen ve betonda sülfat saldırısının bir diğer türü olan önemli ve büyük bir sorundur. Doğal alçı taşı tabakalarındaki sülfat konsantrasyonu oldukça yüksektir. CaSO₄'ların çözünürlükleri düşük olduğundan etki lokal olarak kalır. Buna karşılık uzun süre açıkta kalmaları halinde bu yataklar, Na₂SO₄ ve MgSO₄ gibi daha kolay eriyebilen tuzlara dönüşebilir. Kömürün uzun süre stok edildiği bölgelerde, pirit 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 da görülebilir. Beton açısından sülfat etkisinin şiddeti toprak veya suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Zemindeki SO₄⁻² veya SO₃⁻² yoğunlukları % veya mg/kg olarak, yer altı suyundaki sülfat konsantrasyonu ise ppm veya mg/lt olarak gösterilir [10].

2.5. Sülfatların Betonda Oluşturdukları Zararlı Reaksiyonlar

Sülfatların hidrate çimento bileşenleriyle, özellikle Ca(OH)₂ ve C₃A ile yaptığı reaksiyonlar sonucu oluşan ürünler alçıtaşı ve kalsiyum sülfat alüminattır. Bu tuzlar yerlerini aldıkları bileşenlerden çok daha fazla hacim işgal ederler. Oluşan genişleme betonda hasara yol açar. Deniz suyunda da bulunabilen magnezyum sülfat, Ca(OH)₂ ve C₃A'nın yanısıra kalsiyum silikat hidratelere de saldırır. Reaksiyon aşağıdaki 2 denkleminde görüldüğü gibi gerçekleşir.



Magnezyum hidroksitin çözünürlüğü çok düşük olduğundan bu reaksiyon tamamlanıncaya kadar devam eder. Böylece çimento hamurunun taşıyıcı iskeleti olan C-S-H yapısı bozulur. Sülfat etkisi çözeltilerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak artar. Ancak % 0.5 MgSO₄ ve % 1 MgSO₄ yoğunluklarının üzerindeki değerlerde sülfat etkisi artım hızının yavaşladığı görülmüştür. Doygun MgSO₄ çözeltisinde düşük su/çimento oranlarında bile betonda 2-3 yıl içinde ciddi yıpranma gözlenir. C₄AF ve

sülfatlar arasındaki reaksiyondan da etrenjit oluşur. Ancak oluşan etrenjitin amorf yapıda olması nedeniyle betonda genleşme hasarı oluşturması beklenmez [10].

2.6. Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler

Betonun sülfata dayanıklılığını sağlamak için alınacak önlemleri, betonun geçirimsizliğinin sağlanması, çimento C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriğinin sınırlandırılması, puzolanik katkı maddeleri kullanılması ve gereğinde betonun kaplamalarla dıştan sülfatlara karşı korunması şeklinde özetlemek mümkündür. Bu önlemlerden hangilerinin ne zaman uygulanacağını kararı çevresel etkinin şiddetine göre verilir.

ACI 318 yapı şartnamesi, orta şiddette sülfat etkisinde ($150-1500 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yeraltı 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 ($1500-10000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yeraltı 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 etki durumunda ise ($>10000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yeraltı suyunda veya $+>\% 2 \text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\% 5$ ve altında olan bir çimento ile puzolonik katkı maddelerinin birlikte kullanılması ve betonun su/çimento oranı 0.5 değerinin altında olacak şekilde kullanımını doğru bulmaktadır. TS EN 206-1 standartına 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 dozajı 300 kg/m^3 en küçük dayanım sınıfı $C30$ 'un kullanımı zorunlu koşullmaktadır. Bu ortamda sülfata dayanıklı çimento kullanımı zorunlu tutulmamakta ancak önerilmektedir.

Orta zararlı kimyasal etki $XA_2 (600 < \text{SO}_4^{-2} \leq 3000 \text{ mg/l suda veya } 3000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 12000 \text{ mg/kg zeminde})$ 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 $XA_3 (3000 < \text{SO}_4^{-2} < 6000 \text{ mg/l suda veya } 12000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 24000 \text{ zeminde})$ durumunda en büyük su/çimento oranı 0.45 , en az çimento dozajı 360 kg/m^3 , en küçük dayanım sınıfı $C35$ ve sülfata yüksek derecede dayanıklı ($C_3A \leq \% 5$) çimento kullanımı zorunlu tutulmaktadır. Şiddetli etki durumunda çimentonun C_3A içeriğini

sınırlamak yetersiz bir önlem olabilir. Bu durumda sülfata dayanıklı bir çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıların da kullanımı tavsiye edilir. Sülfatlar C_3A 'nın yanı sıra $Ca(OH)_2$ ve C-S-H ile de reaksiyona girerler.

Puzolanlar $Ca(OH)_2$ 'yi bağlayarak sülfatlarla reaksiyonunu önlerler. Sadece portland 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. Puzolan olarak kullanılan maddenin düşük CaO içerikli olması gereklidir [10]. ASTM standartlarına göre ABD'de üretilen beş tip portland çimentosunu anabileşenlerinin yaklaşık oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. ASTM Tipi Portland Çimentolarındaki Anabileşenlerin Oranları [11]

Çimento Tipi	Genel Açıklama	Anabileşenlerin Kompozisyonları, (%)			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Normal Portland Çimentosu (Genel amaç için kullanılmakta)	49	25	12	8
II	Değiştirilmiş Portland Çimentosu (Tip I'e göre daha az hidratasyon ısısına ve daha çok sülfat dayanıklılığına sahip)	46	29	6	12
III	İlk Dayanımı Yüksek Portland Çimentosu	56	15	12	8
IV	Düşük Isılı Portland Çimentosu (Barajlarda olduğu gibi kütle betonlar için kullanılmakta, hidratasyon ısısı az)	30	46	5	13
V	Sülfata Dayanıklı Portland Çimentosu	43	36	4	12

Tablo 1'den de görüleceği gibi, anabileşenlerin miktarları çimento hamurunun kazanacağı dayanımın hızını ve açığa çıkaracağı ısının hangi hızla oluşacağını

etkilediğine göre, anabileşenlerin oranlarını ayarlayarak değişik türde portland çimentosu elde etmek mümkün olmaktadır [11].

2.7. Klorür Etkisi

Klorür beton bünyesine CO₂ gibi difüzyon yoluyla girer. Klorür iyonları beton içine başka yollardan da girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması, CaCl₂ 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'ye varan miktarlarda klorür iyonu bulunabilir. Ancak en yaygın görülen durum çevrede bulunan klorürlerin beton içine taşınmasıdır. Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. Islanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır ve betonda oluşan klor etkisini artırır.

Özellikle betonla temas halindeki deniz suyu ya da tuzlu yeraltı suları, buz çözücü tuzlar, tuz üreten veya işleyen 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.

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. Bağlı ve serbest klorür iyonları arasında normal şartlarda beton içinde bir dengenin oluştuğunu, karbonatlaşma gibi dış sebeplerle, kimyasal olarak bağlı klorürlerin de serbest kalarak, beton boşluk suyuna karışma risklerinin olduğunu belirtmek gerekir [10].

2.8. Çimentonun Hidratasyon Ürünleri

Betonun ve sertleşmiş çimento hamurunun mekanik ve dayanıklılık özelliklerinden bir çoğu kimyasal yapısından çok hidrate ürünlerin koloidal boyuttaki fiziksel yapısına bağlıdır. Bu nedenle çimento jel yapısını iyi tanımak gerekir. Portland çimentosu hammaddeleri kireç (CaO), silika (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksittir (Fe₂O₃). Bu bileşenler döner fırında yüksek sıcaklıkta (1350–1450 °C) kendi aralarında birleşerek daha kompleks ürünler meydana getirirler.

Karma oksit adı verilen ve çimentonun birçok özeliğini belirleyen bu bileşenlerden en önemlileri; trikalsiyum silikat (C₃S = 3CaO.SiO₂), dikalsiyum silikat (C₂S = 2CaO.SiO₂), trikalsiyum alüminat (C₃A = 3CaO.Al₂O₃) ve tetra kalsiyum alüminoferrit (C₄AF = CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃) olmaktadır.

Tipik bir Portland çimentosu klinkeri ağırlıkça % 45-60 C₃S, % 15-30 C₂S, % 6-12 C₃A, ve % 6-8 C₄AF içerir. Ancak kalsiyum silikatlar az miktarda safsızlıklar da içerebilir. Safsızlık içeren C₃A alite, C₂S belit olarak adlandırılır. Safsızlıkların kalsiyum silikat hidrateler üzerinde önemli etkisi vardır. Çimento kimyasında 3CaO = C, SiO₂=S, Al₂O₃ = A, Fe₂O₃ = F, SO₃ = Ş ve H₂O = H harfleri ile simgelener.

Portland çimentosu su ile birleşince kalsiyum sülfat, kalsiyum silikat ve alüminatlar çözeltiye karışırlar ve sıvı faz kısa sürede çeşitli iyonlara doymun hale gelir. Hidratasyonun ilk birkaç dakikasında kalsiyum, sülfat, alüminat ve hidroksil iyonları arasındaki birleşmeden ilk önce iğne formundaki kalsiyum sülfalüminat hidrat (etrenjit) oluşur. Birkaç saat sonra ise geniş prizmatik yapılı kalsiyum hidroksit (CaOH₂) kristalleri ve kısa lifli kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) suyun ve çimento partiküllerinin oluşturduğu boşlukları doldurmaya başlar.

Bir kaç gün sonra çimentonun alümin/sülfat oranına bağlı olarak etrenjit stabilitesini kaybedip monosülfalüminata dönüşebilir. Bu bileşen hidrate çimentonun sülfat etkisine karşı hassasiyetini büyük oranda belirler. Monosülfalüminatlar ve kalsiyum alüminatlar plaka şeklindeki yapıdadır [12].

3. PUZOLANLAR VE PUZOLANLARIN DAYANIKLILIĞA ETKİLERİ

Puzolanlar ya da puzolanik malzemeler, silisli veya silisli ve alüminli yapıda, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan, ancak ince öğütüldükleri zaman rutubetli ortamlarda kireç ile reaksiyona girdiklerinde bağlayıcı özellik kazanan malzemelerdir [12-17].

Puzolanlar, ilk olarak eski Romalılar devrinde, bundan yaklaşık olarak 2000 yıl öncesinden itibaren söndürülmüş kireç ile birleştirilerek hidrolik bağlayıcı olarak kullanılan ve adını ilk olarak İtalya'daki Vezüv yanardağı eteklerindeki Puzzouli kasabasından puzolan olarak alan volkanik küllerdir [18]. Eski Romalılar volkanik küllerin veya öğütülmüş tuğla ve kiremitlerin söndürülmüş kireç ile birleştirilmesiyle elde edilen bağlayıcı malzemeleri irili ufaklı çok sayıdaki yapıda kullanmışlardır. Bir puzolan türü de Almanya'nın Ren bölgesinde çıkarılan puzolandır. Bu puzolana Tras adı verilmektedir. Ülkemizde ve diğer ülkelerde tras kelimesi puzolanın yerini almıştır. Yüksek nitelikli puzolanların bulunduğu bir diğer yer de Ege denizinde Yunanistan'a bağlı Santorin adalarıdır. Ülkemizde ise Çorum civarında Mecitözü'nde geniş puzolan yatakları bulunmaktadır [19]. Ayrıca Libya'nın Trablus kenti civarındaki Diatome fosilli topraklarda (Kieselguhr) bulunmakta ve tüm dünya ülkeleri tarafından kullanılmaktadır [18].

Puzolanların Portland çimentolu betonda kullanılması, su geçirimsizliğinin artması, hidrasyon ısısının düşmesi ile termal çatlakların azalması, alkali-agrega reaksiyonu ile oluşan çatlamlara karşı dayanımın artması, işlenebilirliğin artması, sülfat ve asit ortamlarında dayanıklılığın artması gibi pozitif sonuçlar meydana getirir. Mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilme ve su gereksinimi ile reolojik özelliklerine; terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ederler [20]. Sertleşmiş betonda da puzolanlar mekanik özelliklere ve dayanıklılığa oldukça önemli etkiler yapar. Dayanım ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı kullanımından etkilenir. Geçirimsizlik, asitlere dayanıklılık, sülfata dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılık ve donatı korozyonu gibi tüm dayanıklılık özellikleri de bu katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerinin özelliklere olan etkilerinin yönü ve

şiddeti çoğu zaman katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olmaktadır [20].

Puzolanlar sönmüş kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık kazanma özeliği bakımından farklılıklar gösterirler. Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise puzolanik özeliği de o kadar yüksektir. Puzolanik özellik, puzolanik aktivite olarak tanımlanır. Puzolanların aktivitesi, öğütülme inceliğine, yapılarındaki reaktif Al_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerinin amorf ve zeolitik yapıda bulunmasına ve CaO miktarının ağırlıkça % 4'den fazla olmamasına bağlıdır. Ayrıca TS 25 ve ASTM C 618, " $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ " miktarının ağırlıkça en az % 70 olmasını da şart koşar [21,22]. TS 25 ve ASTM C 618'e göre doğal puzolonların kimyasal özellikleri Tablo 2'deki gibi olmalıdır. Yukarıda verilen kimyasal özelliklerin uygun olması halinde ayrıca yapılacak olan kimyasal ve fiziksel deneyler ile kullanılan maddenin puzolanik özeliğinin varlığı kanıtlanmalıdır. Bu deneyler TS 25 ve ASTM C 618'e göre yapılır.

Deneylerde iki farklı yöntem kullanılır. Birincisinde; portland çimentosu, kum ve su kullanılarak üretilerek harçların yirmi sekiz günlük dayanımları puzolansız basınç dayanımının en az % 70'ini sağlaması koşulu aranır [22].

Tablo 2. Puzolanların Kimyasal Özellikleri [21,22]

$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, en az	% 70.0
MgO, en çok	% 5.0
SO_3 , en çok	% 3.0
Nem, en çok	% 10.0

İkinci yöntem TS 25'de mevcuttur. Bu yöntemde göre puzolan, sönmüş kireç, kum ve su kullanılarak elde edilen harçların 7 günlük basınç dayanım değerleri belirlenir. Bu değerlerin en az 4 MPa olması gereklidir. ASTM C 618'e göre ise doğal puzolan veya uçucu kül kullanılması durumunda bu değerlerin en az 5.5 MPa olması gereklidir. Puzolanları, doğal puzolanlar ve bir üretim sırasında yan ürün ya da atık malzeme olarak elde edilen yapay puzolanlar olarak ikiye ayırmak olasıdır [12,13,17]. Puzolanlar, portland çimentosuna ilave edildiklerinde çimentoda hidrasyon sonucu

meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasındaki reaksiyon sonucunda puzolanlar yine bağlayıcılık özeliğine sahip olurlar. Puzolanlar silisli ve alüminli malzemelerdir. Kendi başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur ya da çok azdır; ancak çok ince taneli olduklarında ve söndürülmüş kireçle birlikte su ile birleştirildiklerinde hidrolük bağlayıcı özeliği kazanan malzemelerdir [23].

Temel puzolanik reaksiyon, puzolan içeren betonlarda, puzolandaki silika ile portland çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç arasında, sulu ortamda gerçekleşmektedir. Puzolanik reaksiyon sonucu portland 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 dayanım kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ya da alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı reaksiyonu hızlandırabilmektedir. Puzolanlar elde edilışlerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki guruba ayrılırlar. Her bir guruba giren puzolan türleri Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Puzolanların Sınıflandırılması ve Puzolan Türleri [24]

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	

Önemli yapay puzolanlardan birisi olan pişirilmiş kil, 600-900 °C arasında pişirilmek suretiyle elde edilir. Bu madde çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimentoya belirli oranlarda karıştırılarak kullanılır. Tuğla ve kiremit tozunun bir bağlayıcı madde ile karıştırılması da aynı sonucu verir. Ülkemizde eski eserlerin, köprülerin yapımında tuğla tozu ve kireç karışımında oluşan Horasan denilen bu bağlayıcı maddenin harcı kullanılmıştır. Su karşısında çözülmeyen bu madde deniz yapılarında da kullanılmaya elverişlidir. Çimento icad edilmeden önce 1786 yılında yapılan Cezayir limanında bağlayıcı madde olarak pişirilmiş kil ve kireç kullanılmıştır [18].

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanılan yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkıli portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Puzolanlar, belirli oranda puzolan içeren katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona ilave edilirler ayrıca betona karıştırma esnasında çimentoya ilave veya ikameli olarak katılır. Tablo 4’de çeşitli puzolanların kimyasal bileşimleri verilmektedir [23].

Tablo 4. Çeşitli Puzolanların Kimyasal Bileşimleri [23]

Bileşen	Ren Trası	Santorin	Napoli	Mecitözü	Kayseri	Uçucu Kül	Pişirilmiş Kül
SiO ₂	% 54.6	% 63.2	% 55.7	% 64.47	% 63.08	% 42-50	% 50.2
Fe ₂ O ₃	% 3.8	% 4.9	% 4.6	% 1.5	% 5.58	% 5-10	% 7.6
Al ₂ O ₃	% 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	% 1.55	% 1.55	% 0.5-9	% 3.5
Diğer Maddeler	% 12.5	% 12.6	% 14.4	% 13.54	% 6.09	% 4-10	% 16.4

3.1. Puzolanik Reaksiyon ve Puzolanik Malzemelerin Aktivitesi

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminde oluşmaktadır. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında birtakım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi, hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip C-S-H jellerinin oluşmasına yol açar. Puzolonik aktivitenin bir diğer tanımı ise; puzolonik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği olarak tanımlanır. Puzolonik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolonik aktivite, puzolonik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda belirlenir.

ASTM C 311 standardına göre, önce, “500 g portland çimentosu + 1375 g kum + 242 ml su” kullanarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra da, “400 g portland çimentosu + 100 g puzolan + 1375 g kum + kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayabilecek kadar su” kullanarak puzolanlı harç elde edilmektedir. Bu iki harçtan 5 cm’lik küp numuneler hazırlanarak 7 ve 28 gün sonunda basınç deneyine tabi tutulmaktadır [25]. TS EN 450 standardına göre, birisi “kütlece % 75 referans çimento + % 25 puzolan” ile hazırlanmış standard harç numunesi üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmaktadır [26].

Puzolanik aktivite, “dayanım aktivite endeksi” olarak adlandırılan bir değer olarak hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

Dayanım aktivite indeksi = $(A/B) \times 100$. Burada;

A= Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Dayanım aktivite indeksi belirli bir değerden daha az olmamalıdır. Örneğin, doğal puzolanlar için, ASTM standartları bu değer en az 75 olması gerektiğini belirtmektedir [27]; Türk standartlarına göre ise bu değer, en az 70 olmalıdır [21].

3.2. Uçucu Kül

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, % 80’i 75µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir [28,29]. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan, bir miktarı da biraz daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber “uçarak” bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Daha ağır olan iri kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşmektedir. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75 - 80’i gazlarla birlikte bacadan çıkan çok ince taneli küllerdir ve uçucu kül (UK) olarak tanımlanırlar. Gazlarla birlikte çok büyük miktarda külün dışarı çıkması durumunda, termik santralın çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkacak küller birtakım elektrostatik veya

elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir. Daha sonra da silolardan konveyör bantlarla veya başka yöntemlerle, termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak depolanır.

UK'larda çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'dür. Bunların yanı sıra, bir miktar CaO ; MgO , C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve Na_2O 'da bulunabilmektedir. UK'ların yapısının büyük bir bölümü (% 60-90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir [30, 1].

UK taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık % 5'i (hacminin % 20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşur. UK taneciklerinin boyutları 1–150 μm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2.1 – 2.7 (ortalama 2.4) g/cm^3 yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir.

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için UK'lar da aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolonik özellik göstermektedirler; CaO ile sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. Bu nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının % 15–50'si civarında değişebilmektedir.

Türkiye'de betonda UK kullanımı ile ilgili çalışmaların başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. DSİ'de yürütülen iki yıllık kapsamlı bir araştırma programından sonra 1968'den 1973'e kadar geçen süre içinde iki barajın yapımında 55000 tonun üzerinde UK kullanılmıştır. 1966 – 1980 yılları arasındaki toplam UK kullanım miktarları Tablo 5'de verilmiştir. UK üretimi 1960'lar ve 1970'lerde sırasıyla 500.000 ve 1.200.000 ton/yıl civarında gerçekleşmiştir. En fazla kullanım olduğu dönemlerde bile UK kullanımı hiçbir zaman üretimin % 7'sini geçmemiştir.

Tablo 5 . Türkiye’de Uçucu Kül Kullanımı (1966 – 1980), [31].

Yıl	Kullanılan Miktar (ton)	Kullanım Amacı
1966	100	?
1967	220	Tuğla ve ateş tuğla üretimi
1968	900	Baraj inşaatı
	11600	Çimento üretimi
	23	Tuğla üretimi
1969	4750	Baraj inşaatı
	11500	Çimento üretimi
1970	5890	Baraj inşaatı
	1200	Çimento üretimi
1971	31060	Baraj inşaatı
	350	Enjeksiyon
1972	13800	Baraj inşaatı
	6200	Çimento üretimi
1973	256	Baraj inşaatı
	3147	Çimento üretimi
	590	Ateş tuğla üretimi
1974	49	?
	455	Çimento üretimi
	21	?
1977	100	?
1979	100	Ateş tuğla üretimi
1980	5666	Çimento üretimi

Türkiye’de inşaat sektöründe UK kullanımı, olması gerekenden çok düşük düzeydedir. Bunun nedenlerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

* Sektörün tutucu karakterinden kaynaklanan yeni yöntem ve malzemelere karşı duyulan şüphe

* Türkiye’de UK özellikleri ve yapı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri hakkında yeterli bilgi birikimi bulunmaması

* UK’ların sabit özelliklere sahip olmaması.

Betonda UK kullanılmasına yönelik öncü çalışmalar 1960'larda başlamıştır. 1968 yılından itibaren DSİ Porsuk ve Gökçekaya barajlarının inşaatında, betonun hidratasyon ısısını düşürmek amacıyla, çimentonun ağırlıkça % 25'i oranında düşük kireçli Tunçbilek Termik Santral'i UK'sı kullanılmıştır [32,33]. Aynı tarihlerde TCK laboratuvarlarında da UK'larla ilgili araştırmalara başlanmış ve elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda 1966 yılında Pazar köprüsü ayaklarının yapımında UK'lı beton kullanılmıştır. 1970'de de Kütahya-Tavşanlı yolunun 700 m'lik bir bölümünde UK-çimento karışımı ile zemin stabilizasyonu çalışmaları yapılmıştır [31,34,35]. Çimento endüstrisinin UK ile tanışması ise yine 1970'lerde olmuştur. Bu yıllarda Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında Soma ve Seyitömer termik santralleri UK'sı kullanılarak, deneme amaçlı çimento üretimi gerçekleştirilmiştir [36]. TS 640'a göre UK'lı çimento % 70-90 Portland Çimentosu klinkeri ile % 10-30 uçucu kül ve bir miktar alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilmektedir. Uçucu küllü çimento ile ilgili bilgiler Tablo 6'dadır.

Tablo 6. TS 640'da Belirtilen Uçucu Küllü Çimento Özellikleri [37]

Özelik	Standart Sınırlar
MgO	en çok % 5
SO ₃	en çok % 4
Çöz. Kalıntı	en çok % 29
Kızdırma Kaybı	en çok % 5
7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	en az 21.0
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	en az 32.5

Çimento ve betonda UK kullanımı bu malzemelerin hemen hemen tüm özelliklerini etkiler. Özelliklerde meydana gelen değişiklikler;

- * UK'nın kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklerine
- * Çimentonun özelliklerine
- * Bakım koşullarına v.b bağlıdır.

Bu nedenle her UK betonda farklı bir davranış gösterebilir. Bugüne kadar ülkemizde yapılan konuyla ilgili araştırmalar belirli UK'ların beton malzemesi olarak kullanılabilirliğini mevcut standart ve şartnamelere göre belirlemiştir.

3.2.1. Uçucu Kül Sınıfları

Birçok ülke standardında UK'ların sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 standardı, UK'ları F ve C sınıfı olarak iki ayrı grupta değerlendirmektedir [27]. Bu sınıflandırma, Tablo 7'de verilmiştir. Ayrıca, % 10'dan daha az CaO içeren uçucu küller, düşük kireçli UK'lar, %10'dan daha çok CaO içerenler ise, yüksek kireçli UK'lar olarak adlandırılmaktadır [27].

Tablo 7. ASTM C 618'e Göre Uçucu Kül Sınıfları [27]

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \% 70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğe sahip
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \% 50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğin yanısıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip.

3.2.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

UK'ların kimyasal kompozisyonları, yakıt olarak kullanılan kömürün tipine ve yanma şekline göre değişiklik göstermektedir. Tablo 8'de değişik termik santrallerden elde edilen UK'ların içerikleri gösterilmektedir [1,38]. Buradan görüleceği gibi, birçok UK'daki " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " miktarı % 85'in üzerindedir. UK'ların yeterli puzolonik özellik gösterebilmeleri için bu oksitlerin toplam miktarının F tipi ve C tipi küllerde, sırasıyla, % 70 ve % 50'den az olmaması gerekmektedir [27].

F tipi UK'daki CaO oranı, genellikle % 10'dan daha düşüktür. Bu tür küller sadece puzolonik özellik gösterebilmektedir. C tipi uçucu küllerdeki CaO oranı, genellikle % 10'dan daha fazladır. Yüksek miktarda CaO içeren küller, kendilerinden bir miktar bağlayıcılığa sahiptirler.

Tablo 8. Değişik Termik Santral Uçucu Küllerinin Kimyasal Kompozisyonları [39]

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül (CaO < % 10)	C Sınıfı Kül (CaO > % 10)
SiO ₂	43.6 – 64.4	23.1 – 50.5
Al ₂ O ₃	19.6 – 30.1	13.3 – 21.3
Fe ₂ O ₃	3.8 – 23.9	3.7 – 22.5
CaO	0.7 – 6.7	11.5 – 29.0
MgO	0.9 – 1.7	1.5 – 7.5
Na ₂ O	0 – 2.8	0.4 – 1.9
Kızdırma Kaybı	0.4 – 7.2	0.3 – 1.9

UK'larda, az miktarlarda da olsa, MgO, SO₃, alkali ve karbon yer almaktadır. Bunların oranının yüksek olması istenmemektedir. MgO hidratasyon sonucunda betonda genleşmeye yol açmaktadır. SO₃, sertleşmiş betonda etrenjit oluşumuna ve böylece çok büyük genleşmelere neden olmaktadır. Alkali miktarının yüksek olması reaktif silika içeren agregalarla reaksiyon olasılığını artırarak betonda genleşmelere yol açabilmektedir. Karbon miktarı fazla olan UK'larla yapılan hava sürüklenmiş betonda, daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. UK'larda çok az miktarda nem de bulunabilmektedir. Nem miktarı fazla olan UK'lar, kullanıcının işini birazcık zorlaştırmaktadır. ASTM C 618'e göre uçucu küllerdeki nem miktarının % 3'den fazla olmaması gerekir [27].

3.2.3. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan UK'ların beton özelliklerine etkileri Tablo 9'da özetlenmektedir.

Beton Karışımın Su Gereksinimi: Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için UK'lı beton karışımının gereksinimi olan su miktarı genellikle katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının % 20–30'u azaltılarak onun yerine UK kullanılan betonların su gereksiniminde yaklaşık % 7 kadar daha az su kullanıldığı görülmüştür [38]. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için, daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır. UK'lı

betonların su gereksinimi, UK'nın inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su gereksiniminde artma olmaktadır.

Tablo 9. Uçucu Kül'ün Beton Özelliklerine Etkileri [39]

Olumlu Etkileri
- Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır
- Taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır
- Betonun hidrasyon ısısını azaltmaktadır
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır
- Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını artırmaktadır
- Ekonomiklik sağlamaktadır
Potansiyel Zararlı Etkileri
- Betonun prizini geciktirmektedir; bu durum soğuk havalarda sorun olabilmektedir
- Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır
- Betonun daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmektedir
- Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir

İşlenebilme: UK'lı betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır:

1) UK'nın yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. Bu nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine UK kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacime sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.

2) UK taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır. Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış ve UK taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir. Bazı zamanlarda,

betondaki çimentonun azaltılan bölümü yerine kullanılan UK'ya ek olarak, ince agreganın bir bölümünün yerine de UK kullanılmaktadır. Bu tür betonların pompalanabilirliği daha da artmaktadır.

Priz Süresi : UK katkılı betonlarda yer alan portland çimentosu miktarı, katkısız betondakine göre daha azdır. UK katkılı betonların priz süreleri katkısız betondakinden genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan UK'nın tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi UK'lar, F tipi UK'lardan daha kısa priz süresi göstermektedir [40,41].

Hidratasyon Isısı : UK katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından bu tür betonların hidratasyon ısıları, katkısız betondakinden daha azdır.

Terleme : Beton karışımındaki ince taneli maddelerin artması, katı tanelerin yüzey alanlarının artmasına yol açmaktadır. O durumda, katı taneler, beton karışımının içerisindeki suyu kendilerine daha iyi bağlamakta, terlemeyi azaltmaktadır. İnceliği yüksek olan UK'larla yapılan betonlardaki terleme, UK katkılı olmayan betonlarda oluşan terlemeden daha az olmaktadır.

Dayanım : Katkı maddesi olarak UK kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. Normal olarak ilk zamanlarda, UK'lı betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak son dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, UK'nın inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. C tipi küllerin ilk zamanlarındaki dayanıma katkısı, F tipi küllerinkinden daha fazladır [41]. Ayrıca, incelik arttıkça, ilk zamanlardaki dayanım nispeten daha yüksek olmaktadır.

Betonun Su Geçirimsizliği : UK kullanılan betonların su geçirimsizliği, katkısız betonun su geçirimsizliğinden daha azdır.

Sülfatlara Dayanıklılık ve Alkali-Agrega Reaksiyonu: UK'lı betonların sülfatlara dayanıklılığı, katkısız betonunkine oranla daha fazladır. Bu tür betonlarda alkali-agrega reaksiyonu da daha az miktarda yer alabilmektedir. Bunun nedeni UK'lı betonlarda daha az miktarda portland çimentosu kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Katkısız betondakine göre daha az portland çimentosu bulunması, betonun içerisinde daha az miktarda C_3A 'nın ve alkalilerin yer almasını sağlar.

Betonun Ekonomikliği : UK'lar, portland çimentosuna kıyasla, çok daha ucuz olan atık malzemelerdir. Katkısız betondakine oranla daha az portland çimentosunun yer aldığı UK'lı betonlar daha ekonomik olmaktadır. Ayrıca, UK'lı betonların işlenebilmesinin daha iyi, pompalanabilirliğinin daha kolay, yüzey düzeltilmesinin daha rahat olması, betona uygulanan işlemleri kolaylaştırmakta ve böylece ekonomikliğe olumlu katkı sağlamaktadır [39].

Türkiye'deki 11 termik santralden elde edilen UK'ların kimyasal kompozisyonları ve çeşitli fiziksel özellikleri 1998 yılında TÇMB'de yapılan deney ve analizler sonunda belirlenmiştir. Birbirlerinden farklılıklarına ve dolayısıyla kullanılacakları durumlarda neden özen gösterilmesi gerektiğine bir kez daha dikkat çekmek üzere söz konusu deney ve analiz sonuçları Tablo 10 ve 11' de, TS EN 450 "Uçucu Kül- Betonda Kullanılan-Tarifler Özellikler Kalite Kontrolü" standardı sınırlarıyla belirtilmiştir.

Tablo 10. Termik Santrallerden Elde Edilen Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri [26]

UK	Özgül Ağırlık	İncelik (Blaine) (cm^2/g)	Puzolonik Aktivite (%)	TS 639 sınırı (%)
Afşin-Elbistan	2.72	2704	50.6	
Çatalağzı	2.02	2897	54.7	
Çayırhan	2.28	2754	61.0	
Kangal	2.50	1343	34.3	
Kemerköy	2.33	1764	46.6	>70
Orhaneli	2.30	4475	91.9	
Seyitömer	2.10	2371	27.5	
Soma	2.25	4550	84.5	
Tunçbilek	2.08	3019	66.3	
Yatağan	2.44	2131	62.5	
Yeniköy	2.92	1818	33.5	

Tablo 11. Termik Santrallerden Alınan Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşenleri [26]

UK	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Afşin –Elbistan	17.1	8.96	3.85	29.9	49.17	1.73	14.78	0.44	0.20	3.30
Çatalağzı	59.36	25.78	5.78	90.92	2.01	0.60	0.13	3.82	0.44	1.59
Çayırhan	47.08	17.42	8.34	72.84	13.98	1.86	4.65	1.81	2.45	1.77
Kangal	38.34	16.69	5.11	60.14	27.62	1.60	4.44	1.29	0.61	3.79
Kemerköy	23.22	12.90	4.56	40.77	43.64	1.62	11.08	1.19	0.32	1.05
Orhaneli	44.98	19.57	8.11	72.66	16.55	2.07	5.73	1.41	0.21	0.88
Seyitömer	53.14	20.77	11.36	85.27	4.44	1.19	0.55	1.56	0.75	5.79
Soma	48.48	23.94	5.49	77.91	14.19	0.74	3.77	1.59	0.57	0.98
Tunçbilek	53.14	21.89	9.31	89.79	4.43	1.41	0.41	1.81	0.24	1.39
Yatağan	49.24	21.75	6.67	77.46	15.64	0.83	2.11	2.42	0.56	0.44
Yeniköy	21.86	9.55	3.60	35.00	46.25	1.69	14.46	1.01	0.26	0.86
TS EN 450 sınırları	-	-	-	>70	-	< 5.0	< 3.0	-	-	< 10.0

3.3. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirlikleri İçin Gereken Kimyasal ve Fiziksel Değerler

UK'ların beton yapımında uygun bir katkı maddesi olarak kullanılabilirlikleri için sahip olmaları gereken fiziksel ve kimyasal özelliklerle ilgili sınır değerler, TS 639, TS EN 450 ve ASTM C 618'de belirtilmiştir. [42, 26, 27].

3.3.1 Kimyasal Değerler

Tablo 12. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirlikleri İçin Gereken Kimyasal Değerler [42, 26, 27]

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F Sınıfı	C Sınıfı
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70.0	0	70.0	50.0
SO ₃ , en fazla %	5.0	3.0	5.0	5.0
Nemlilik, en fazla %	3.0	0	3.0	3.0
Kızdırma kaybı, en fazla. %	10.0	5.0	6.0	6.0
MgO, maks. %	50.0	0	0	0
Na ₂ O olarak alkaliler, en fazla %	1.5	0	1.5	1.5
Cl ⁻¹ en fazla %	0	0.1	0	0

3.3.2 Fiziksel Değerler

Tablo 13. Uçucu Küllerin Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirmeleri için Gereken Fiziksel Değerler [42, 26, 27]

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F Sınıfı	C Sınıfı
İncelik: 45 µm gözaçıklıklı elek üzerinde kalan miktar, maks. %	0	40	34	34
Özgül yüzey, min. cm ² /g	3000	0	0	0
Dayanım Aktivitesi İndeksi: min. %,	70	75 (28gündeki) 85 (90gündeki)	75	75
Su gereksinimi: Kontrol numunesine kıyasla, mak. %	0	0	105	105

4. DENİZ ORTAMINDA BETON ve BETONARME

Deniz ortamında bulunan betonarme elemanlar değişik fiziksel ve kimyasal etkilerle karşı karşıya kalır. 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 biriyle veya hepsiyle karşı karşıya kalması ve etkinin şiddeti deniz seviyesine göre bulunduğu konuma bağlıdır. Genel olarak en çok hasarın ıslanma kuruma bölgesinde bulunan elemanlarda olduğu söylenebilir.

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi çözülmüş 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. Buharlaşmanın yüksek olduğu sıcak iklimlerde tuzluluk oranı artmaktadır. İsrail'deki Ölü deniz bu açıdan % 31.5 tuzlulukla en uç örnektir. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl₂), magnezyum sülfat (MgSO₄), kalsiyum sülfat (CaSO₄), potasyum klorür (KCl), ve potasyum sülfat (K₂SO₄) olarak sıralanabilir. Deniz suyunun tipik konsantrasyonuna bakıldığında 11 000 mg/l Na⁺, 20 000 mg/l Cl⁻, 1400 mg/l Mg⁺², 2700 mg/l SO₄⁻², 500 mg/l Ca⁺, 400

mg/l K^+ içerdiği görülmektedir. Çimento hidrasyon ürünlerine kimyasal saldırı açısından bakıldığında ise deniz suyunun yüksek miktarda sülfat ve magnezyum içerdiği söylenebilir. Ayrıca, deniz suyunun önemli miktarda çözülmüş oksijen ve karbondioksit içerebildiğini ve bu gazların yoğunluğunun lokal şartlara göre çok değişken olduğunu belirtmek gerekir. Tablo 14’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 bölgelerde inşaa edilecek yapıların daha şiddetli bir kimyasal ve fiziksel etkiyle karşı karşıya olmaları beklenir [10].

Tablo 14. Ülkemiz Denizlerinin Tuzluluk Oranları ve İyon Konsantrasyonları [43]

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

* Toplam tuzluluk yüzeyde veya az derinde yaz aylarında ölçülen değerlerdir [43].

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

4.1. Deniz Suyunun Kimyasal Etkisi

Kimyasal etki açısından bakıldığında, deniz suyu hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyon yapabilen magnezyum ve sülfat iyonları içerir. Ayrıca deniz suyunda çözülmüş CO₂ karbonik asit etkisi yapabilir. Burada yeraltı suyunda 1500 mg/l sülfat ve 500 mg/l magnezyum iyon konsantrasyonunun aşılmasının şiddetli etki sınıfı kabul edildiği bilinmelidir. Kimyasal etkinin genellikle gelgit ve sualtı bölgesinde kendini gösterdiğini söylemek mümkündür. İçerdiği yüksek sülfat iyonu

konsantrasyonu ile deniz suyu beton üzerinde sülfat etkisi yapar. C₃A ve CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur. Yapılan araştırmalar klorür iyonlarının bulunduğu ortamda oluşan etrenjitin genişlemeye yol açmadığını ve deniz suyunda çözüldüğünü göstermektedir. Bu bilgi oluşan etrenjitin ancak yüksek alkalili ortamda su emerek şiştiği ve genişlemeye yol açtığı şeklinde yorumlanmaktadır. Yüksek C₃A içerikli çimento kullanıldığında hasar genişleme ile değil katı bileşenlerin erezyona uğrayarak kütlede ayrılmalarıyla kendini göstermektedir. Bu nedenle sülfat saldırısı açısından deniz suyu yüksek miktarda sülfat iyonu içermesine rağmen genellikle orta şiddetli etki sınıfında kabul edilir. Önlem olarak C₃A içeriğinin, % 3'ten az SO₃ içeren çimentoda % 8, % 2.5'dan az SO₃ içeren çimentoda ise % 10 ile sınırlandırılması önerilmektedir. ACI 318 standardı S/C oranı 0.5 olan betonda C₃A içeriğini % 8 ile sınırlamakta, S/C oranının 0.4'e düşürülmesiyle C₃A üst limitini biraz arttırarak % 10 değerine izin vermektedir. Yapılan araştırmalar, sülfat etkisi açısından zararlı olan çimento C₃A bileşeninin aynı zamanda çimentoya klorür bağlama özelliğini kazandırdığını, böylece donatının klorür korozyonundan etkilenme riskini azalttığını göstermektedir.

Çimento C₃A bileşeni ile klorür iyonları arasındaki reaksiyonla beton içinde Friedel tuzu (3CaO.Al₂O₃.CaCl₂.10H₂O) adı verilen kalsiyum kloro alüminatlar oluşur. Düşük C₃A oranlı çimentoların klorür geçirimsizliği fazla olduğundan, bu durumda betonarme donatısının korozyon problemi de dikkate alınarak çözüm üretilmelidir. Aksi halde yapı veya yapı elemanı sülfat etkisinden korunmak istenirken donatı korozyonu nedeniyle beklenmedik kısa sürelerde işlevini yitirerek kullanılamaz hale gelebilir. Bu nedenle çok düşük C₃A içerikli sülfata dayanıklı çimentoların deniz ortamında kullanımı tercih edilmemekte ve standartlarda bu yönde zorlamalar bulunmamaktadır. Ayrıca, karbonatlaşma sonucu Friedel tuzunun çözüldüğünü böylece klorür iyonlarının tekrar serbest kalarak donatının korozyon riskini daha da arttırdıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Deniz suyunun beton üzerindeki bir diğer kimyasal etkisi ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı denklem 4'de gösterilen yer değiştirme reaksiyonudur.



Oluşan $Mg(OH)_2$ brusit adıyla da bilinir. Çökelererek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu bir tabaka oluşturarak reaksiyonun gelişimini yavaşlatır. Ayrıca $Ca(OH)_2$ 'in CO_2 ile reaksiyonundan aragonit formundaki $CaCO_3$ 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 süreli teması halinde C-S-H içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan M-S-H' in bağlayıcılık özeliği yoktur ve kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar.

Atmosferdeki (CO_2) gazının bir kısmının su içinde çözünmesi nedeniyle doğadaki tüm sular karbonik asit içerir. Sudaki karbonik asit içeriği kireçtaşını çözebilen CO_2 miktarı ile tanımlanmaktadır. Karbonik asidin agresifliğine karar vermek için CO_2 konsantrasyonunun yanında suyun sertliği ve pH değeri önemli parametrelerdir. Suda çözülmüş CO_2 miktarının 90 mg/l'yi aşması halinde karbonik asidin 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 çözülmüş CO_2 miktarı ise (35-60) mg/l civarındadır. Genellikle deniz suyunun pH değeri 8'in altına düşmedikçe $CaCO_3$ 'ü çözmesi beklenmez. TS EN 206-1 suda (40-100) mg/l CO_2 konsantrasyonunu orta şiddetteki etki sınıfı olarak kabul etmektedir.

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 yapılara etkisinin değerlendirilmesi gerekmektedir [10].

Deniz suları değişik türlerde ve miktarlarda yabancı madde içermektedir (Tablo 15). Deniz suyundaki tuzların yaklaşık % 78'ini NaCl ve % 10 kadarını $MgCl_2$ oluşturmaktadır, [44]. Deniz suyunun beton karışımında kullanılmasının beton özelliklerine etkisinin araştırılması 1920'li yıllarda Abrams tarafından başlatılmış ve daha sonraları bu konuda çok sayıda araştırma yapılmıştır [45-47].

Tablo 15 . Deniz Suyundaki Tuzlar, g/lt [43]

Tuz	Akdeniz	Tipik Okyanus
NaCl	30.0	26.0
MgCl ₂	4.6	3.2
MgSO ₄	2.3	2.2
CaSO ₄	1.4	1.3
CaCl ₂	0.7	0.6

Değişik araştırmacıların bulguları biraz farklılık göstermekle birlikte, çok sayıdaki araştırmacı tarafından ileri sürülen ortak görüş aşağıda özetlenmiştir.

* Beton karışımında deniz suyu kullanılması, betonun prizini hızlandırmakta ve hatta ilk günlerdeki dayanımını birazcık artırabilmektedir (bu durum, sudaki klorürlerden kaynaklanmaktadır). Ancak, betonun son dayanımında % 10-20 kadar azalma olur.

* Deniz suyunun yol açtığı bir başka çok önemli olumsuzluk, içerdikleri yüksek miktardaki klorür iyonu nedeniyle, betonarme yapılardaki betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu artırmasıdır. O nedenle, önerilmeli betonların yapımında kesinlikle deniz suyu kullanılmamalıdır. Hatta, betonarme yapıların betonlarının üretiminde de deniz suyu kullanımından uzak durulmalıdır.

* Deniz suları ile yapılan betonlar daha çok çiçeklenme göstermekte, beton yüzeyinin görünümü bozulmakta, betonun dayanıklılığı azalmaktadır [39].

5. UÇUCU KÜLLERİN DEĞİŞİK ALANLARDA KULLANILMASIYLA İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Betonun ana bileşenlerinden olan çimento beton maliyetinde önemli bir yer tutar. Çimento üretiminin çevreye verdiği zarar da azımsanmayacak kadar yüksektir; bir ton çimento üretimi sırasında yaklaşık olarak bir ton CO₂ gazı açığa çıkar. Ayrıca çimentonun üretilmesi fazla miktarda enerji gerektirir. Günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirerek hem daha ekonomik, hem de çevreye karşı daha duyarlı bir beton üretimi giderek daha fazla ilgi çekmektedir. En yaygın

puzolan UK'dır. Bu malzeme termik enerji santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür.

Yapılan deneysel çalışmada ince öğütülmüş (Blaine özgül yüzeyi 604 m²/kg) UK miktarının betonun basınç dayanımına ve hızlı klor geçirimine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada UK çimento ile % 0'dan % 70'e kadar yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen betonların bir yıllık basınç dayanımları ve ASTM C 1202-97 standardına göre hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları elde edilmiştir. Çimentonun % 40 oranında ince UK ile yer değiştirilmesi durumunda beton basınç dayanımları UK'sız beton ile yaklaşık aynı olduğu gözlenmiştir. Bu orandaki yer değiştirmeden itibaren, basınç dayanımının önemli derecede azaldığı görüldü. Betonda ince öğütülmüş UK kullanımının klor geçirimsizliklerini önemli ölçüde azalttığı saptanmıştır [48].

Özyurt ve vd.'leri; kırma kum ile doğal kumun belirli oranlarda yer değiştirmesinin UK içeren betonların mekanik özelliklerine, kılcal geçirimsizliğine ve donma-çözünme dayanıklılığına etkisini araştırmıştır. Bütün karışımlarda rafine linyosülfonat ve modifiye polimer esaslı akışkanlaştırıcı karışımı bir katkı maddesi 185 ± mm'lik çökme elde edilecek miktarlarda kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda "kırma kum/ince agrega" oranındaki artışın betonun basınç dayanımını arttırdığı, kılcal su geçirimsizliğini ve donma çözülme dayanıklılığını azalttığı görülmüştür [49].

Tosun ve vd.'leri ise yaptıkları araştırmada betonda yaygın olarak görülen bozulma süreçlerinden olan sülfat etkisinin, ileri derecedeki etkilenmelerde betonu tamamen tahrip edebileceğini araştırmıştır. Bu çalışmada, iki tip çimento (PÇ 42.5, SDC 32.5) kullanılarak hazırlanan, değişik oranlarda C sınıfı UK içeren harçların Na₂SO₄ çözeltisinde farklı koşullarda bekletildiklerinde yaptıkları genleşmeler ve dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir.

Bir grup numune ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış 50 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde sürekli olarak bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisine bırakılmıştır. Ayrıca buhar kürü geçirmiş (60 °C'de 9 saat) karışımlar için de deney programı tekrarlanmış ve sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [50].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmaya başlarken betonda çimento yerine UK'yı hangi oranda kullanabileceğimiz, en iyi verimi nasıl alabileceğimiz ve UK harçların $MgSO_4$ ve $NaCl$ çözeltilerine karşı direncinin saptanması amaçlanmıştır. Bilindiği gibi UK elde edilme açısından çimentoya oranla çok daha ucuz bir malzemedir, bu da ekonomik bir beton üretimini sağlar. Aynı zamanda UK'nın betonun dayanıklılığına olumlu yönde etkileri vardır. Bu çalışmada Çayırhan termik santralinden sağlanan F tipi UK katkılı harçların $NaCl$ ve $MgSO_4$ çözeltileri içerisindeki (Cl^{-1} , SO_4^{-2} ve Mg^{+2} iyonlarına) dayanıklılıklarının belirlenmesi araştırıldı. UK harçta çimento ağırlığının % 20 ve 50'si oranında yer değiştirilerek kullanıldı. Zamanla harçlar üzerindeki Cl^{-1} , SO_4^{-2} ve Mg^{+2} iyonları etkisi incelendi numuneler üzerinde hasarlı ve hasarsız beton deneyleri uygulandı. Deneyin yapılmasındaki amaç UK'nın çimento yerine hangi orana kadar verimli olarak kullanılabileceğini saptamak ve UK'nın hangi oranlarda Cl^{-1} , SO_4^{-2} ve Mg^{+2} iyonlarına karşı dayanıklılığı en üst seviyede olduğu araştırmaktır. UK bir atık maddesi olduğu ve elde edilme maliyeti çimentoya göre çok daha ucuz olduğu için betonda belirli oranlarda çimento yerine kullanılması ekonomik açıdan olumlu bir gelişmedir.

6.2 Harç Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması

Harç üretiminde TS 24 standardı esas alınarak çalışmalar yapılmıştır. Harç hazırlanırken üç numune için 450 gr çimento, 1350 gr kum ve 225 gr su tartılır. Bu tartım işlemi 1 gr duyarlıkta terazide yapılır. Harç, sıcaklığı 20 ± 2 °C olan bir odada karıştırılarak hazırlanır. Çimento, kum, su, karıştırıcı ve kalıpların da aynı sıcaklıkta olması için bu malzemelerin daha önceden oda içerisinde bekletilmesi gerekmektedir. Harç hazırlanan ve deney yapılan yerin nem oranı % 65'den az olmamalıdır. Karıştırma kabına önce 225 gr su boşaltılır, üzerine 450 gr çimento ilave edilir, harç makinası (Fotoğraf 1) düşük hızda 30 sn çalıştırılır. Otuz saniye sonunda 1350 gr kum, karıştırma devam ederken yavaş yavaş karışıma ilave edilir. Bir dakika sonunda karıştırıcı yüksek hızda 30 sn daha çalıştırılır. Toplam 90 sn'lik çalıştırmadan sonra karıştırıcı durdurulur. Karıştırıcı durduktan sonra 15 sn içinde karıştırma kabının cidarlarına yapışmış olan harç, kauçuk başlı bir çubuk ile kabın içine boşaltılır.

Kabın üzeri örtülerek 75 sn beklenir. Bu süre sonunda karıştırıcı yüksek hızda yeniden 1 dakika daha çalıştırılır. Böylece toplam olarak 4 dakika sonunda harç kalıplarına konulmak üzere hazır hale gelir. Yaptığımız çalışmada kullanılan karıştırıcının otomatik olarak bu şekilde çalışma özelliği olduğundan karıştırma işine karışılmamış ve karışım yukarıda tanımlandığı gibi gerçekleştirilmiştir. Harç hazırlanmasında kullanılan karıştırıcının karıştırma kabı paslanmaz çelikten yapılmış olup kapasitesi 4.7 lt'dir. Karıştırıcı kanadı, hem kendi eksenini etrafında hem de karıştırma kabının ekseninin etrafında dönebilen bir yapıdadır. Dönme yönleri birbirlerine zıt olup hızlar bir elektrik motoruyla kontrol edilmektedir.



Fotoğraf 1. Harç Makinesinde Harcın Karıştırılması

TS 24'e göre hazırlanan harç kalıplara doldurulmuş ve sıkıştırılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan kalıplar sert çelikten imal edilmiş olmalıdır. Kalıplarda 3 numune prizmasını aynı anda hazırlayabilmek için 3 ayrı bölme bulunmalıdır. Kalıp boyutları aşağıda verilen değerlere uygun olmalıdır. Uzunluk:160 mm, genişlik:40 mm, yükseklik:40 mm, et kalınlığı:10 mm. Kalıplar harç ile doldurulmadan önce kalıpların içi ince bir yağ ile hafifce yağlanmıştır. Kalıplar tabla vibratörü üzerine yerleştirilerek bağlama vidalara sıkıştırılmış daha sonrada kalıp başlığı takılmıştır. Harç numunelerin yerleştirilip sıkıştırılmasında kullanılan vibratör, esas itibarı ile dikdörtgen şeklinde bir sarsma tablasından oluşur. Saniyede 1 devir yapan, 250 watt'lık bir motorla hareket ettirilen bir disk 60 düşme yaptıktan sonra otomatik olarak durmaktadır. Hazırlanan harç, kalıp bölmelerinin her birinin içine kalıp hacimlerinin yarısı ölçüsünde doldurulmuştur. Kalıplara konan harç, kaşık ile ileri geri yayılarak harcın kalıp içinde aynı kalınlıkta dağılıp yerleşmesi sağlanmıştır. Tabla vibratörü çalıştırılarak aletin 60 sn içinde 60 sarsma yapması sağlanmıştır. Vibratör durdurulduktan sonra harcın ikinci tabakası da aynı şekilde yerleştirilmiş ve vibratör yeniden 60 sarsma yapacak şekilde 60 sn çalıştırılmıştır. Kalıplar sarsma tablasından alındıktan sonra üzerindeki huni çıkartılmış ve harcın fazlası metal bir master ile sıyrılarak alınmıştır. Daha sonra kalıp üst yüzü aynı master ile düzeltilmiştir. Bu şekilde yerleştirilerek hazırlanan numuneler etiketlenerek kür ortamına alınmıştır (Fotoğraf 2).



Fotoğraf 2. Kür Edilen Numuneler

6.3 Kullanılan Malzemeler

6.3.1 Uçucu kül

Bu çalışmada Ankara ili Nallıhan ilçesinde bulunan Çayırhan termik santralinden temin edilen gri renkli uçucu kül kullanıldı. UK'nın özgül ağırlığı 2.15 gr/cm^3 olarak bulundu. UK üzerinde yapılan deneyler aşağıda belirtilmiştir.

Kimyasal Analiz Sonuçları: Çayırhan Termik Santralına ait UK numunesinin kimyasal analizleri yapılmış; sonuçların standartlara uygunluğunun karşılaştırılması Tablo 16'da gösterilmiştir. Çayırhan UK'sı, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle TS EN 197-1 standardına göre V sınıfına (silisli uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C 618 standardına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin % 70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) girmektedir. TS EN 450 standardına göre serbest kireç yüzdesi için kabul edilen en fazla % 1.0 koşullarına uymaktadır. Yine bu standart için, reaktif silis, kızdırma kaybı ve Cl'de sınırlar içindedir. SO_3 miktarı % 3.94 olup, bu standarttaki sınırın (% 3) dışındadır. Analitik CaO miktarının % 10'un üzerinde olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Buna göre bu külün her iki UK sınıfı için de sınırda olduğu düşünülmüştür. Tablo 16'de görüldüğü gibi, Çayırhan külü, ASTM C 618 ve TS 639'daki S+A+F > 70 koşulunu sağlamaktadır.

Tablo 16. Çayırhan Uçucu Külünün Kimyasal Analizi [51].

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EVN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO_2	50.98						
Al_2O_3	13.51						
Fe_2O_3	9.74						
S+F+A	73.82				>70.00	>70.00	>50.00
CaO	11.82						
MgO	3.91				<5.00		
SO_3	3.94	<3.00			<5.00	<5.00	<5.00
K_2O	1.91						
Na_2O	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					
Reak. SiO_2	40.89	>25.00	>25.00	>25.00			
Reak.CaO	8.78		<10.00	>10.00			

6.3.2 Çimento

Harç numunesi üretiminde Eskişehir Çimento fabrikasının üretimi olan PÇ 42.5 cinsi çimento kullanıldı. Kullanılan çimentonun üzerinde yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 17. Çimentonun Fiziksel Özellikleri [52]

Blaine özgül yüzeyi (m ² /kg)	328
90 mikronluk elekte kalan (m ² /kg)	0.2
200 mikronluk elekte kalan (%)	0
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3.16
Normal kıvam suyu (%)	30
Le Chatelier halkalarının toplam açılması (mm)	2.5
Priz başlangıcı	2 saat 40 dakika
Priz sonu	4 saat

Deneylerde kullanılan çimento Eskişehir çimento fabrikası üretimi olup PÇ 42.5 cinsi çimentodur. Çimentonun kimyasal analizi Tablo 18’de gösterilmektedir.

Tablo 18. Çimentonun Kimyasal Özellikleri [52]

Bileşen	(%)
SiO ₂	20.03
Al ₂ O ₃	5.06
Fe ₂ O ₃	3.6
CaO	63.24
MgO	1.12
SO ₃	2.82
K ₂ O	0.78
Na ₂ O	0.27
Cl	0.03
TiO ₂	0.31
Kızdırma Kaybı	2.75

Kullanılan PÇ 42.5 fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından TS 19 standartlarına uygun olduğu görülmüştür.

6.3.3. Standart Harç Kumu

Hazırlanan harç numunelerinde Set Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.'nin Trakya Çimento Fabrikasında üretilen ve TS 819'a uygun standart kum (harç kumu) kullanılmıştır, [53]. Karışımlarda kullanılan standart kumun elek analizi Tablo19'da verilmiştir.

Tablo 19. Standart Kumun Elek Analizi [53]

Elek Göz Açıklığı, (mm)	Elekte Kalan, %
0.08	98+2
0.16	87+2
0.50	67+2
1.00	33+2
1.60	9+2
2.00	0

6.3.4. Karma Suyu

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerde Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır. Şebeke suyunun yapılan kimyasal analizinde suyun TS 1247 karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür, Tablo 20 [54].

Tablo 20. Kullanılan Şebeke Suyunun Kimyasal Analizi [54]

Parametreler	Bulunan Değerler
pH	6.85
Kalsiyum (Ca)	58 mg/l
Magnezyum (Mg)	83 mg/l
Klorür (Cl)	46 mg/l
Sülfat (SO ₄)	45 mg/l
Buharlaşma bakiyesi	434 mg/l

7. DENEYSEL YÖNTEMLERİ VE DENEY SONUÇLARI

Beton üretiminde yaygın olarak kullanılan UK katkılı harçlar; NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinde ayrı ayrı bekletilerek numunelere 28., 56. ve 90. günlerde; basınç, eğilmede çekme, birim hacim ağırlık, rezonans frekansı, ultrases geçiş süresi, hacimce su emme, kılcal su emme gibi sertleşmiş beton özelliklerini araştıran deneyler uygulandı. Bu deneylerde 40x40x160 mm boyutlarında harç numuneleri kullanıldı. Harç numuneleri üretim aşamasında çimento ağırlığının % 20 ve 50'si oranlarında yer değiştirmeli olarak UK kullanıldı.

Tablo 21. Numunelerin Sınıflandırılması

UK %	Numunelerin Cinsi	Numunelerin Kodu
0	Standart Harç	SH
	NaCl çözeltilisinde bekletilen standart harç	NSH
	MgSO ₄ Çözeltilisinde bekletilen standart harç	MSH
20	Suyun içinde bekletilen standart harç	UKH20
	NaCl çözeltilisinde bekletilen harç	NUKH20
	MgSO ₄ Çözeltilisinde bekletilen harç	MUKH20
50	Suyun içinde bekletilen standart harç	UKH50
	NaCl çözeltilisinde bekletilen harç	NUKH50
	MgSO ₄ Çözeltilisinde bekletilen harç	MUKH50

7.1. Deney Yöntemleri

7.1.1 Deneylerin Tanımlanması

Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi: Eğilmede çekme deneyinde kullanılan presin TS 24' e göre duyarlılığı, 10000 N'dan daha az yüklerde % 1, daha büyük yüklerde ise % 0.8 olmalıdır. Eğilme aletinin yükleme düzeni birbirinden 100 veya 106.7 mm uzaklıkta olan 10 mm çaplı iki destek silindirden oluşur. Bu iki silindirin tam orta yerinde aynı çapta üçüncü bir yükleme silindiri vardır. Bu üç silindirin eksenlerinden geçen düşey düzlemler birbirine paralel olmalı ve deney süresince paralel kalmalıdır. Destek silindirlerinden birisi ve yükleme silindiri prizma üzerinde yükün üniform şekilde dağılımını sağlayacak ve burulma gerilimi meydana getirmeyecek şekilde

kendi merkezleri etrafında aşağı yukarı ayarlanabilmelidir. Harç prizmaları, kalıptan çıkmış yan yüzlerinden biri üzerine ve uzunluğuna ekseni destek silindirler eksenine dik gelecek şekilde destek silindirler üzerine konulur.

P yükü, yükleyici silindir vasıtası ile numuneye karşı yüzden dik olarak uygulanır. Yükleme hızı saniyede 50 ± 10 N olacak şekilde ayarlanmalıdır. Eğilme momentinden çekme dayanımı (σ_R) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sigma_R = 6 M/b^3 = 1.5 \times PL/b^3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Burada,

M = Eğilme momenti ($M = PL/4$)

b = Prizmanın kare kesitini kenar uzunluğu, mm

P = Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, N

L = Destek silindirleri eksenleri arasındaki uzaklık, mm

σ_R = Çekme dayanımı, MPa

Deneylerde Alşa'nın üretmiş olduğu Michaelis çimento çekme-eğilme deney aleti kullanılmıştır. Bu cihaz mekanik olarak kaldıraç esasına göre tasarlanan ve 1/50 üst manivela ile 1/5 alt manivela kolundan oluşturulmuş olup, kollar hassas bıçakların üzerine oturtulmuştur (Fotoğraf 3). Çekme ve eğilme deneyleri için değiştirilebilen alt çene ayarlı olarak yapılmıştır. Cihazla çekme ve eğilme yüklemesi çapı 2 mm olan saçmaların bir kabın içine akışı ile temin edilmektedir. Numune kırıldığında otomatik kesici saçma akışını durdurmaktadır.

Kür havuzundan alınan numuneler önce bir köşede kurumaya bırakılmıştır. Doymun kuru yüzey durumuna gelen numuneler ayrı ayrı aletin sol alt tarafındaki numune yerine her iki taraftan da ortalanarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilen numune alttaki halka yardımı ile sıkıştırılarak sabitlemiştir. Bu sabitleme esnasında üstteki yük kolunun da tam olarak yatay hale gelmesi sağlanmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra haznedeki saçmaların kovaya dökülmesini engelleyen sürgü açılarak saçmaların kovaya akışı sağlanmıştır. Saçmaların kovaya akışı ile birlikte kuvvet kolu yardımıyla numune üzerine kuvvet uygulanmaya başlanmıştır. Uygulanan bu kuvvet zamanla artarak numunenin kopmasını sağlamıştır. Kopma anında sistem kendiliğinden saçma akışını kesmiştir. Kova içerisindeki saçmaların kova ağırlığı ile beraber tartılmasıyla numunenin kopmasını sağlayan kuvvet bulunmuştur.



Fotoğraf 3. Eğilmede Çekme Deneyi Aleti

Basınç Deneyi: Basınç deneyi de TS 24 gereği çimento kalitesini tayin etmek üzere yapılması zorunlu bir deneydir. Deney TS 24 esaslarınca yürütülmüştür. Eksenel basınç yükü altında malzemede ortaya çıkan en yüksek gerilme, basınç dayanımı olarak tanımlanır. Eğilme deneyinde iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç deneyine tabi tutulmuştur. Her yarım prizma 40x40 mm'lik ve kalınlığı en az 10 mm olan sert metalden yapılmış iki kalın levha arasında kalıplanmış yan yüzler üzerinden kırılmıştır. Bu levhalar en az 600 Vickers sertliğinde çelikten veya daha iyisi Volfram karbüründen yapılmış ve yüzleri hassas taşlanmış olmalıdır. Kırma presinin duyarlılığı en küçük yerlerde bile en az % 1.5 olmalıdır. Presin yük göstergesi biri 4 veya 5 ton diğeri 15 veya 25 ton olmak üzere en az iki kademeli olmalıdır. Prizmalar presin alt ve üst tablaları arasına yerleştirilen kırma başlığı yardımı ile kırılır. Kırma başlığı yükü, herhangi bir sürtünmeye neden olmadan prizmaya iletmelidir. Prizma kırıldıktan sonra kırma başlığı otomatik olarak eski halini almalıdır. Yükleme, basınç saniyede 10–20 MPa artacak şekilde yapılmalıdır. Hiçbir halde kırma süresi 10 sn'den az olmamalıdır. Eğilmede çekme deneyi sırasında, 4x4x16 cm boyutlarındaki standart numuneler yaklaşık olarak ortadan ikiye ayrılmışlardır. İkiye ayrılan bu numunelerin alt ve üst yüzlerine 4x4 cm boyutlarında çelik levhalar yerleştirilerek 4x4x4 cm boyutlarında küp elde edilmiştir. Oluşturulan bu küpler basınç deneyi aletinin içerisine yerleştirilerek yüklemeye

başlanmıştır (Fotoğraf 4). Harç numunelerinin taşıyabileceği en fazla yük değerine ulaşmasının ardından kırılmasıyla basınç deneyi sona ermiştir.



Fotoğraf 4. Basınç Danayımı Deneyi

Birim Ağırlık Deneyi: Birim ağırlık deneyi ile; belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş harcın birim hacmine karşılık gelen ağırlığı bulunmuştur. Birim ağırlığın azalması ya da şahit numuneye göre küçülmesi harç iç yapısının yeterince yoğun olmamasının bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu amaçla deney süresi boyunca her numune üzerinde birim ağırlık deneyi yapılmıştır, numuneler sudan çıkarılarak doygun kuru yüzey durumuna getirilmiştir. Daha sonra 0.1 g duyarlıklı terazi ile tartılan numunelerin ağırlığı standart kalıp hacmine bölünerek birim ağırlık bulunmuştur.

Ultrases Geçiş Süresi: Hasarsız olarak yapılan bu deneyle; çimento, harç ve betonun iç yapısı, yoğunluğu dinamik elastisite modülü gibi özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Titreşim frekansı 20 KHz'den yüksek olan ses dalgalarının numunenin bir yüzeyinden gönderilip diğerinden alınması esasına dayanan bu deneyle ses dalgasının numune içerisinde geçiş süresi belirlenir. İç yapıda çatlak ve boşluk

olması durumunda ya da düşük yoğunluklu, su/çimento oranı düşük numunelerde bu sürenin uzadığı bilinir. Sürenin kısalması, çatlaksız ve boşluksuz bir iç yapı ve yüksek yoğunluğun ifadesi olarak değerlendirilir. Deney Fotoğraf 5’de görülen Pundit cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Cihaz yardımı ile ultrases dalgaları alıcı ve verici problar yardımıyla numunenin bir ucundan verilip diğer ucundan alınmış ve aradaki zaman cihazın skalasında μs olarak okunmuştur.



Fotoğraf 5. Ultrases Geçiş Süresinin Ölçümü

Rezonans Frekansı: Titreşimin doğal frekansı, elastik sistemlerin dinamik bir özeliğidir. Rezonans frekansı temel olarak titreşen bir kirişin dinamik elastisite modülü ve yoğunluğu ile ilişkilidir. Rezonans frekansı deneyi aparatları, ASTM C 215’de tanımlandığı gibi iki esas kısımdan oluşur. Birinci kısım mekanik titreşimler yapan kısımdır. Titreşim yaratan kısmın temel parçası elektronik ses frekansı osilatörüdür. Bu kısım, ses frekansı voltajlarını oluşturur. Osilatörün çıkışı güçlendirilir ve sürücü üniteye mekanik titreşimlere çevrilmeye üzere iletilir. Rezonans frekansını ölçümlerini birden fazla faktör etkilemektedir. Bu faktörler; agrega özellikleri, karışım oranları, numunelerin boy etkisi ve kür koşulları gibi faktörlerdir. Rezonans frekansı tekniği ile ilişkili temel aletler ve deney işlemleri birçok ülkede standartlaştırılmıştır. Ancak deneyin kullanılabilirliği ciddi bir şekilde sınırlıdır çünkü genellikle bu deneyler, yerindeki yapısal öğeler yerine, laboratuvarda küçük boylu numuneler üzerinde yapılmaktadır.

Hacimce Su Emme: Prizma şeklindeki harç numuneler suya konmadan önce kuru halde tartılır ve daha sonra 24 saat suda, NaCl ve MgSO₄ çözeltileri içerisinde bekletilir (Fotoğraf 6). Daha sonra numuneler sudan çıkartılarak yaş yüzeyleri silinir ve suya doymuş halde tartılır. Yaş ağırlık ile kuru ağırlık arasındaki fark, kuru ağırlığa bölünerek prizmanın ağırlık cinsinden su emme yüzdesi bulunur.

Kılcal Su Emme: Prizma şeklindeki harç numuneler suya konmadan önce kuru halde tartılır ve daha sonra suda, NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinde tabana sıvının serbest şekilde ulaşabilmesi için numuneler iki mesnet üzerinde yalnız alt yüz sıvıya temas edecek şekilde 24 saat bekletilir ve 24 saat sonunda numuneler sudan çıkartılarak tartılır. Yaş ağırlıktan kuru ağırlık çıkarılır ve sonuç kuru ağırlığa bölünerek prizmanın ağırlık cinsinden kılcal su emme yüzdesi bulunur.



Fotoğraf 6. Suda, NaCl ve MgSO₄ Çözeltilerinde Bekletilen Numuneler

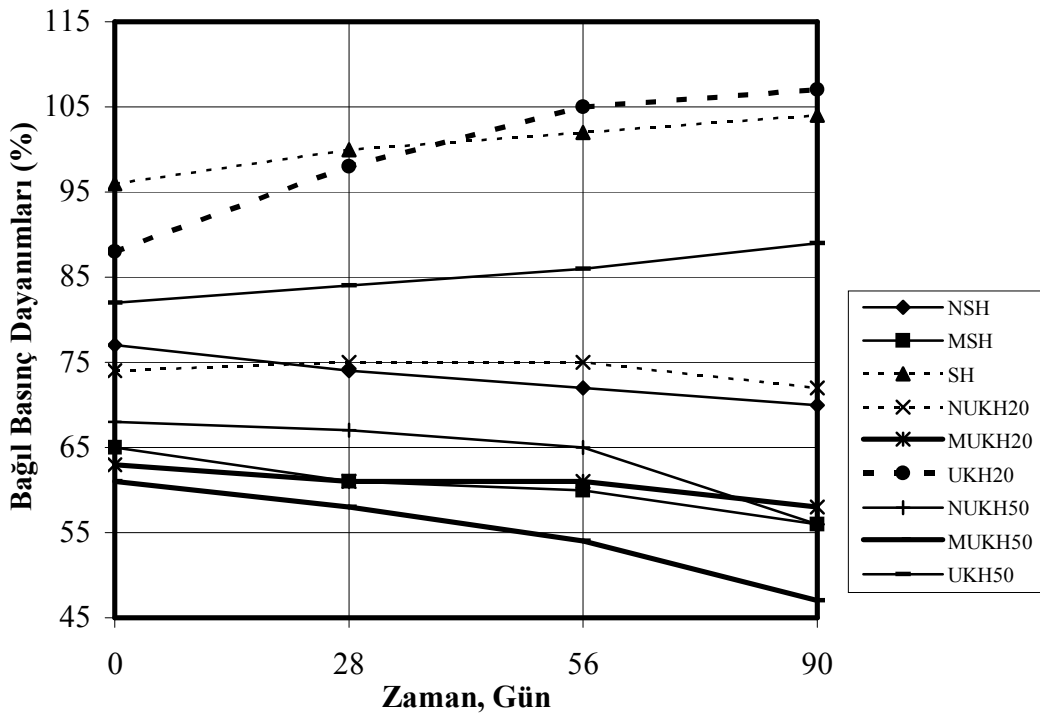
7.2. Deney Sonuçları

7.2.1. Basınç Deneyi

Başlangıç değerleri baz alındığında suda saklanan standart harç numunesinin basınç dayanımı, suda saklanan ve % 20 oranında UK içeren harç numunesine oranla % 9 daha büyük, yine suda saklanan ve % 50 oranında UK içeren standart harçtan ise % 17 daha büyüktür. Bu da UK katkılı harçların erken dayanımlarının standart harçlara oranla daha düşük olduğunu gösterir. Fakat 56. gün sonunda suda saklanan ve % 20 oranında UK içeren harç numuneleri, yine suda saklanan standart harçlardan % 3 daha fazla bir dayanım göstermiştir ve bu oran 90. güne kadar devam etmiştir. Buradan da görülmektedir ki % 20 oranında UK kullanılması harca ileriki yaşlarda basınç dayanımı anlamında olumlu katkılar sağlamıştır.

Çizelge 1. Bağlı Basınç Dayanımı Değerleri

Bağlı Basınç Dayanımı Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
77	65	96	74	63	88	68	61	82	0
74	61	100	75	61	98	67	58	84	28
72	60	102	75	61	105	65	54	86	56
70	56	104	72	58	107	56	47	89	90



Şekil 1. Bağlı basınç dayanımı- zaman ilişkisi

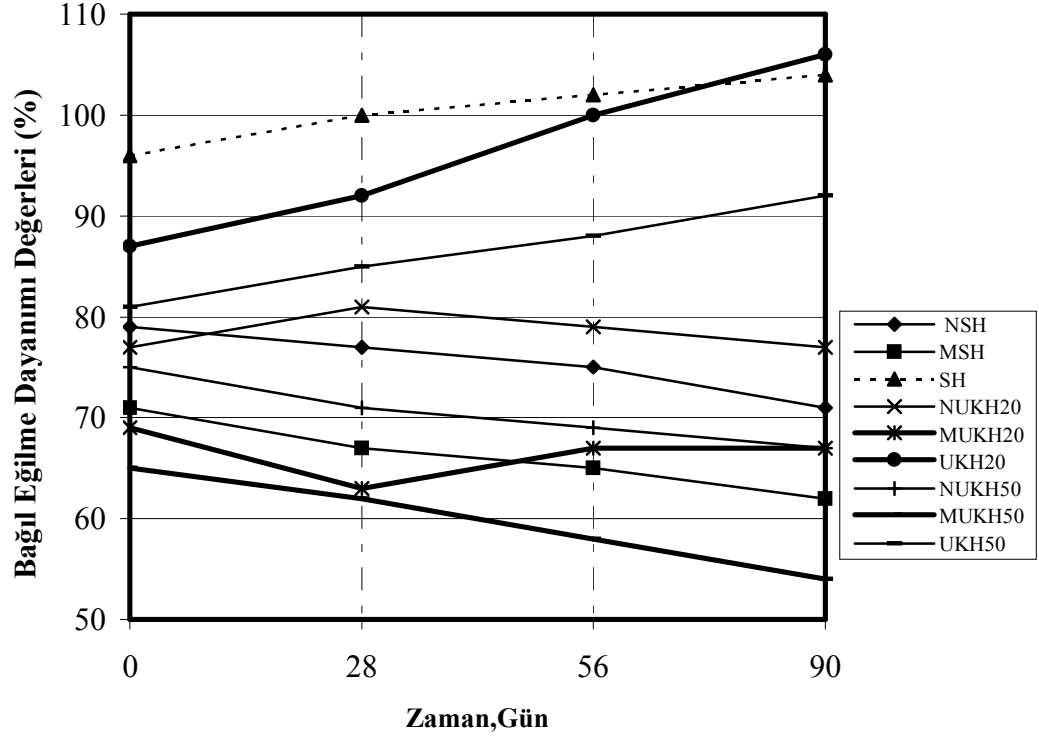
MgSO₄ çözeltilisinde saklanan ve UK içermeyen standart harçların basınç dayanımları deney başlangıcında yine MgSO₄ çözeltilisi içerisinde bulunan % 20-50 oranlarında UK içeren harç numunelerinden fazladır. Deney başlangıcından deney sonuna kadar MgSO₄ çözeltilisi içinde bulunan tüm numunelerin basınç dayanımları değerlerinde zamanla düşüş gözlenmiştir, bu değerler sırasıyla UK içermeyen harç numunelerinde % 14, % 20 oranında UK içeren numunelerde % 8, % 50 oranında UK içeren numunelerde ise % 23 oranında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi MgSO₄ çözeltilisinin harçlar üzerinde olumsuz bir etki yaptığı gözlemlenmektedir. UK'nın % 20 oranında kullanılması MgSO₄ çözeltilisi içerisinde bulunan harç numunelerine olumlu yönde etki yapmıştır, basınç dayanımındaki düşüş UK içermeyen harç numunesinden daha az bir oranda meydana gelmiştir. NaCl çözeltilisinde ise UK içermeyen standart harçların basınç dayanımındaki düşüş 90. gün sonunda % 9 ile sınırlı kalmıştır, % 20 oranında UK içeren harç numunelerinde bu oran % 3, % 50 oranında UK içeren numunelerde ise % 18 olarak gerçekleşmiştir. Buradan da görüldüğü gibi % 20 oranında UK'ün çimento ile yer değiştirilerek kullanılması olumlu sonuç vermiştir, bu oran % 50'lere ulaştığında UK'nın harç basınç dayanımına olumsuz yönde etki yaptığı gözlenmektedir. Basınç dayanımı anlamında MgSO₄ çözeltilisi ve NaCl çözeltilisi karşılaştırıldığında MgSO₄ çözeltilisinin harçlara NaCl çözeltilisinden daha fazla zarar verdiği gözlemlenmiştir.

7.2.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deney sonuçları, basınç dayanımı deney sonuçlarına paralellik göstermektedir. Deney başlangıcında suda saklanan standart harç numunelerinin eğilme dayanımındaki artış % 13 oranında, % 20 oranında UK içeren numunelerde % 22 oranında ve % 50 oranında UK içeren numunelerde % 14 oranında gerçekleşmiştir.

Çizelge 2. Bağlı Eğilme Dayanımı Değerleri

Bağlı Eğilme Dayanımı Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
79	71	96	77	69	87	75	65	81	0
77	67	100	81	63	92	71	62	85	28
75	65	102	79	67	100	69	58	88	56
71	62	104	76	67	106	67	54	92	90



Şekil 2. Bağlı eğilmede çekme dayanımı-zaman ilişkisi

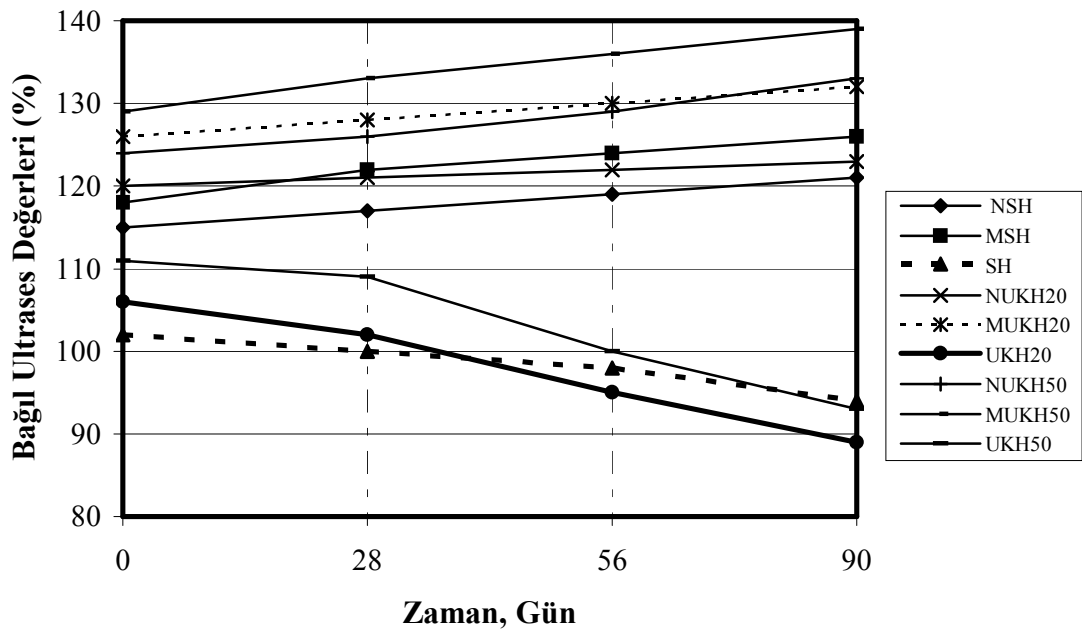
Başlangıç gününde su içinde saklanan standart harçların eğilme dayanımında, yine su içinde saklanan % 20-50 oranlarında UK içeren harçlara göre bir üstünlük görülmüştür. $MgSO_4$ çözeltisi içinde bulunan standart harçların eğilme dayanımındaki düşüş 90. gün sonunda ilk güne oranla % 13 olarak gerçekleşmiştir, bu düşüş % 20 oranında UK içeren harçlarda % 3 ile sınırlı kalmış, % 50 oranında UK içeren harçlarda ise % 17 olarak gerçekleşmiştir. $NaCl$ çözeltisinde ise standart harçların eğilme dayanımında başlangıçtan 90. güne kadar düşüş gözlenmiş ve bu düşüş 90. gün sonunda % 10 olarak gerçekleşmiştir. UK oranı % 20 olan harçlarda ise başlangıçtan 28. güne kadar % 5'lik bir artış olmuş ve bu artış 90. günde yerini % 5'lik bir düşüşe bırakmıştır. UK oranı % 50 olan numunelerde ise başlangıçtan 90. güne kadar eğilme dayanımında % 11'lik bir düşüş kaydedilmiştir. $MgSO_4$ çözeltisi içerisindeki harçların eğilme dayanımları her yaşta $NaCl$ çözeltisi içerisindeki numunelerin eğilme dayanımından küçük değerler vermişlerdir. Bu da $MgSO_4$ çözeltisinin basınç dayanımında olduğu gibi, eğilme dayanımının da $NaCl$ çözeltisine oranla numunelere daha olumsuz yönde etki yapmaktadır.

7.2.3 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi

Başlangıçta en küçük ultrases geçiş süresi su içinde bulunan ve UK içermeyen standart harçlarda gerçekleşmiştir ve bu değer 90. gün sonunda % 8 oranında azalmıştır. Bu da numunenin zamanla boşluklu yapısının azaldığını, zamanla dayanım ve rijitliğinin arttığını gösterir ki basınç ve eğilme deney sonuçları da bu bulguyu destekler niteliktedir. Su içinde bulunan ve % 20 oranında UK içeren numunelerde ise ultrases geçiş süreleri zamanla azalmış ve 90. gün sonunda % 16'lık bir düşüş kaydetmiştir. Yine su içinde bulunan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin geçiş süreleri de deney başlangıcından 90. güne kadar düşüş kaydetmişlerdir, bu düşüş 90. gün sonunda % 16 olarak saptanmıştır. Başlangıçta en yüksek ultrases geçiş süresi değerlerini MgSO₄ çözeltisi içerisinde bulunan harç numuneleri göstermiştir.

Çizelge 3. Bağlı Ultrases Geçiş Süresi Değerleri

Bağlı Ultrases Geçiş Süresi Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
115	118	102	120	126	106	124	129	111	0
117	122	100	121	128	102	126	133	109	28
119	124	98	122	130	95	129	136	100	56
121	126	94	123	132	89	133	139	93	90



Şekil 4. Bağlı ultrases geçiş süresi - zaman ilişkisi

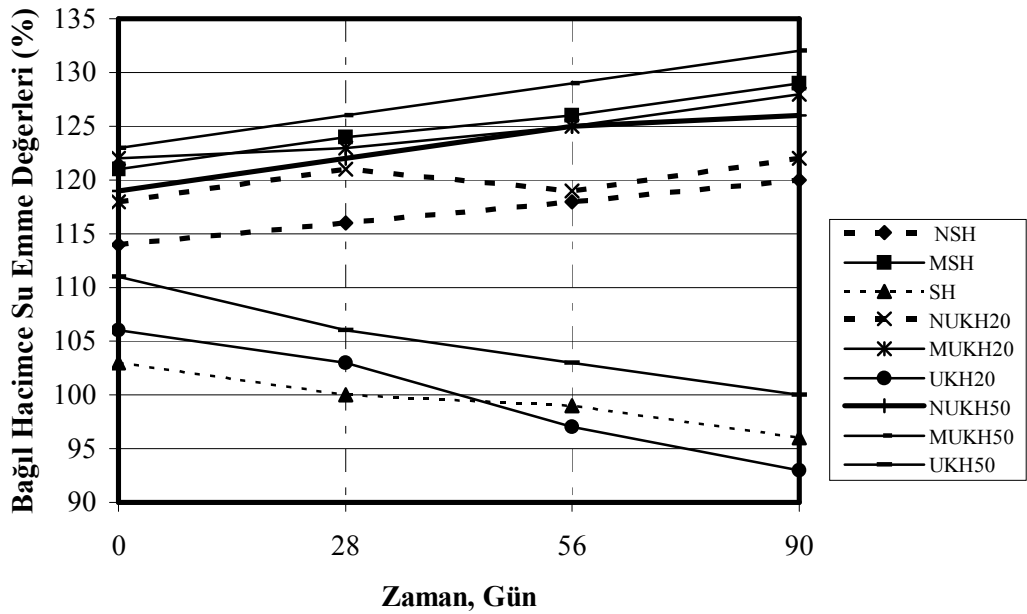
MgSO₄ çözeltisi içerisinde bulunan standart harçların ultrases geçiş süreleri başlangıçtan 90. güne kadar % 7 oranında artmıştır, bu oran 20 oranında UK içeren numunelerde ise % 5 civarındadır, % 50 oranında UK içeren harçların ise 90. güne kıyasla ultrases geçiş süreleri % 8'lik bir artış göstermiştir. NaCl çözeltisi içinde bulunan standart harçlar başlangıçtan 90. güne kadar % 5 oranında artış göstermiş, % 20 UK içeren numuneler % 2.5 ve % 50 oranında UK içeren numuneler ise % 7 oranında bir artış göstermişlerdir. Deney sonuçlarından görüldüğü üzere MgSO₄ çözeltisi numunelere NaCl çözeltisinden daha olumsuz bir etki yapmaktadır.

7.2.4. Hacimce Su Emme Deneyi

Başlangıç değerleri baz alındığında suda saklanan standart harçların 90. güne kadar hacimce su emme değerlerinde % 7'lik bir düşüş kaydedilmiştir aynı şekilde % 20 UK içeren numunelerde başlangıçtan 90. güne oranla % 12'lik bir düşüş olmuştur.

Çizelge 4. Bağlı Hacimce Su Emme Değerleri

Bağlı Hacimce Su Emme Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
114	121	103	118	122	106	119	123	111	0
116	124	100	121	123	103	122	126	106	28
118	126	99	119	125	97	125	129	103	56
120	129	96	122	128	93	126	132	100	90



Şekil 5. Bağlı hacimce su emme - zaman ilişkisi

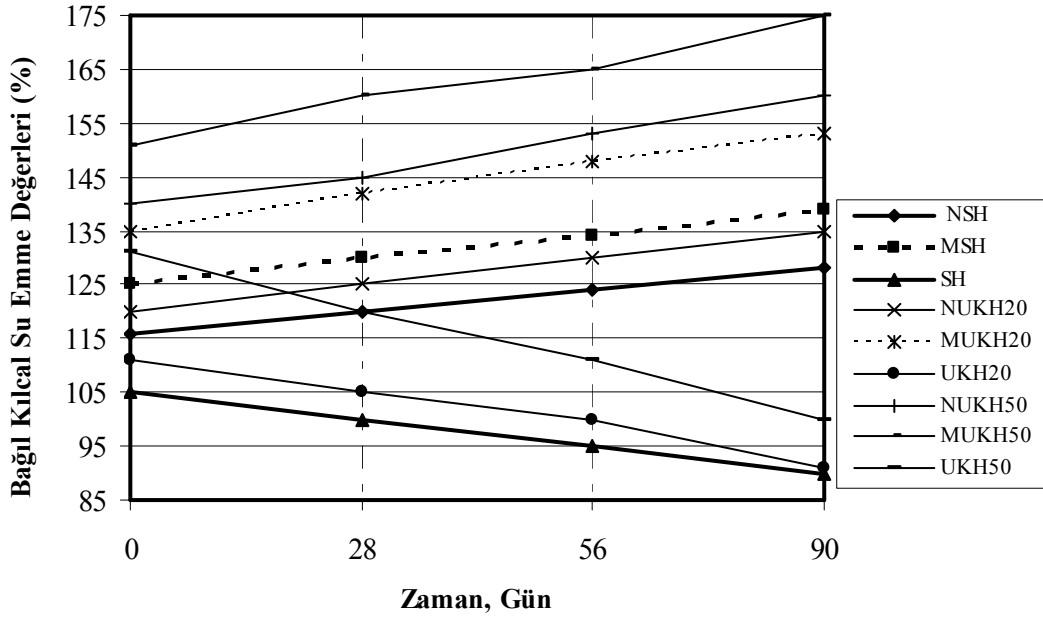
MgSO₄ çözeltisi içerisinde bulunan tüm harç nuunelerinde başlangıçtan 90. güne kadar hacimce su emme oranlarında artış gözlemlenmiştir bu artış standart harçlarda % 7, UK oranı % 20 olan numunelerde % 5 ve UK oranı % 50 olan numunelerde ise % 7 oranında gerçekleşmiştir. MgSO₄ çözeltisi numunelerin boşluklu yapısına zaman içerisinde olumsuz yönde etki yaparak artırmış ve buda numunelerin ileriki yaşlarda daha fazla hacimce su emmelerine yol açmıştır. NaCl çözeltisi içerisinde bulunan tüm numunelerde de başlangıçtan 90. güne oranla hacimce su emme değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Bu artış standart harçlarda % 5 oranında, UK oranı % 20 olan harçlarda % 3.5 oranında ve UK oranı % 50 olan harçlarda ise % 6 oranında gerçekleşmiştir. MgSO₄ çözeltisi numunelerin boşluklu yapısına ve rijitliğine daha olumsuz yönde etki ettiğinden, NaCl çözeltisi içinde bulunan numuneler, MgSO₄ çözeltisi içerisinde bulunan numunelere oranla daha az hacimce su emme oranları kaydetmişlerdir.

7.2.5. Kılcal Su Emme Deneyi.

Su içinde saklanan standart harçlar başlangıç gününden 90. güne kadar kılcal su emme değerlerinde % 17'lik bir düşüş kaydedilmiştir. Su içerisinde bulunan ve % 20 oranında UK içeren numunelerin başlangıçtan 90. güne kadar kılcal su emme değerlerinde %18'lik bir düşüş kaydedilmiş ve UK oranı % 50 olan numunelerde ise başlangıçtan son güne oranla % 24'lük bir düşüş kaydedilmiştir. MgSO₄ çözeltisi içerisinde bulunan standart harçların kılcal su emme oranlarında % 11'lik bir artış kaydedilmiş, % 20 oranında UK içeren numunelerde % 13'lük bir artış kaydedilmiş ve UK oranı % 50 olan numunelerde ise % 16'lık bir artış kaydedilmiştir. NaCl çözeltisi içerisinde bulunan standart harçların kılcal su emme oranlarındaki artış başlangıçtan 90. güne kadar % 7 olarak gerçekleşmiştir, % 20 oranında UK içeren numunelerde ise bu artış 90. gün sonunda % 12.5 olarak gerçekleşmiştir. UK oranı % 50 olan harç numunelerinde ise bu artış 90. gün sonunda % 14 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5. Bağlı Kılcal Su Emme Değerleri

Bağlı Kılcal Su Emme Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
116	125	105	120	135	111	140	151	131	0
120	130	100	125	142	105	145	160	120	28
124	134	95	130	148	100	153	165	111	56
128	139	90	135	153	91	160	175	100	90



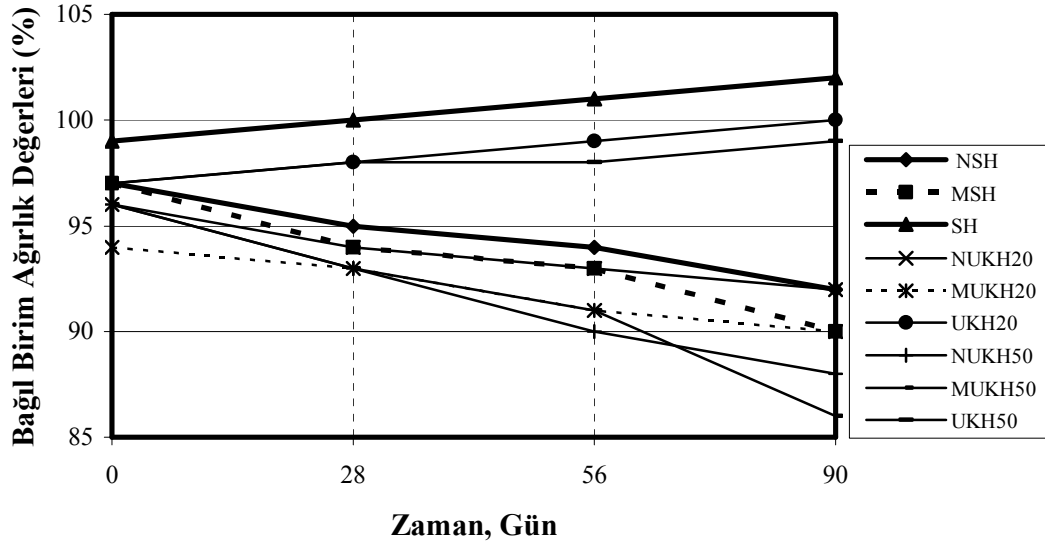
Şekil 6. Bağlı kılcal su emme-zaman ilişkisi

7.2.6. Birim Ağırlık Deneyi

Deney başlangıcında 90. güne kadar suda saklanan standart harçların birim ağırlıklarında % 3 oranında bir artış kaydedilmiştir, su içinde saklanan ve % 20 oranında UK içeren numunelerin birim ağırlıkları 90. gün sonunda % 3.1'lik bir artış göstermiştir. Yine su içinde saklanan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin birim ağırlıklarında ise % 2'lik bir artış kaydedilmiştir. $MgSO_4$ çözeltisi içinde saklanan standart harçların birim ağırlıklarında başlangıçtan 90. güne kadardüşüş gözlenmiş ve 90. gün sonunda bu düşüş % 7 olarak gerçekleşmiştir, UK oranı % 20 olan harçlarda ise birim ağırlık değerlerinde yine başlangıçtan 90. güne kadar düşüş gözlenmiş ve bu düşüş 90. gün sonunda % 4 olarak gerçekleşmiştir. UK oranı % 50 olan harçlarda birim ağırlığındaki düşüş 90. gün itibariyle % 10 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 6. Bağlı Birim Ağırlık Değerleri

Bağlı Birim Ağırlık Deneyleri Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
97	97	99	96	94	97	96	96	97	0
95	94	100	94	93	98	93	93	98	28
94	93	101	93	91	99	90	91	98	56
92	90	102	92	90	100	88	86	99	90



Şekil 7. Bağlı birim ağırlık-zaman ilişkisi

NaCl çözeltisi içerisinde saklanan standart harçların birim ağırlık değerlerinde başlangıçtan 90. güne kadar düşüş kaydedilmiş ve bu düşüş 90. gün sonunda % 5 olarak gerçekleşmiştir. UK oranı % 20 olan harç numunelerinin birim ağırlığındaki düşüş 90. gün sonunda % 4 olarak gerçekleşmiştir, % 50 oranında UK içeren numunelerde ise bu düşüş 90. gün sonunda % 8 olarak gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi MgSO₄ çözeltisi numunelere NaCl çözeltisinden daha fazla zarar vermiş ve numuneler üzerinde zaman içinde daha kuvvetli kimyasal etki yaparak ayrışmalara yol açmış ve böylelikle MgSO₄ içinde saklanan numunelerin birim ağırlıklarındaki düşüş daha fazla olmuştur.

8. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneylelerden alınan sonuçlar doğrultusunda, ilk yaşlarda UK katkılı tüm harç numunelerinin gerek $MgSO_4$ çözeltisi içinde, gerek $NaCl$ çözeltisi içinde, gerekse de suyun içinde basınç ve eğilme dayanımları UK kullanılmayan harçların dayanımlarından daha düşük çıkmıştır. Su içerisinde bekletilen ve % 20 oranında UK katkısı içeren numunelerin, standart harçlara göre basınç dayanımları 56. güne kadar düşük çıkmış 56. gün ve sonrasında % 20 UK katkılı harçlar basınç dayanımında katkısız harçları geçmiş ve 90. gün sonunda yaklaşık % 3'lük bir üstünlük sağlamıştır. Buradan görülmektedir ki % 20 oranında UK kullanımı harçlar üzerinde ilk yaşlarda olumsuz bir etki yaratmakta fakat ilerleyen süre içerisinde % 20 oranında UK katkılı harçların basınç ve eğilme dayanımları, katkısız harçların dayanımlarını geçmektedir. Fakat % 50 oranında UK içeren harçların basınç ve eğilme dayanımları, hiçbir zaman katkısız harçların dayanımlarından büyük değerler vermemiştir. UK'nın artan oranıyla basınç ve eğilmede dayanımları azalmıştır. $MgSO_4$ ve $NaCl$ çözeltileri içerisinde bulunan tüm numunelerin basınç ve eğilme dayanımında başlangıçtan 90. güne kadar düşüş gözlenmiştir. UK'nın % 20 oranında kullanılması $MgSO_4$ ve $NaCl$ çözeltilerindeki numunelerin gerek basınç dayanımı, gerekse de eğilme dayanımındaki düşüşleri % 50 oranında UK kullanılan harçlara oranla yavaşlatmıştır. $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde bulunan UK katkılı ve katkısız harçların basınç ve eğilme dayanımı değerleri her yaşta $NaCl$ çözeltisi içerisinde bulunan UK katkılı ve katkısız harçların basınç ve eğilme dayanımlarından düşük çıkmıştır. Ultrases geçiş süresi deney sonuçları basınç dayanım deney sonuçlarıyla paralel olarak sonuçlanmıştır. Başlangıçta ultrases geçiş süresi en kısa olarak suda saklanan standart harçlarda kaydedilmiştir. UK oranı % 20 olan ve suda saklanan harçların ultrases geçiş süreleri başlangıçta katkısız harçlarınkinden daha uzun bir değer olarak kaydedilmiş fakat 56. günden itibaren % 20 UK içeren harçların ultrases geçiş süreleri standart harçların sürelerinden daha kısa olarak kaydedilmiştir. $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde bulunan UK katkılı ve katkısız harç grubunun ultrases geçiş süreleri, $NaCl$ çözeltisi içerisinde bulunan UK katkılı ve katkısız harç gruplarının geçiş sürelerinden daha uzundur. Bu da $MgSO_4$ çözeltisinin numunelerin iç yapısına $NaCl$ çözeltisinden daha fazla zarar verdiğini göstermektedir. Hacimce ve kılcal su emme deney sonuçları oransal olarak birbiriyle paralellik göstermişlerdir. Su içinde saklanan standart harçların hacimce su emme yüzdeleri başlangıçtan 90. güne kadar

yaklaşık % 7 oranında düşmüştür. Suda saklanan ve % 20 oranında UK içeren numunelerin kılcal su emme oranları başlangıçtan 90. güne kadar % 18 azalmıştır. Birim ağırlık deneylerinde ise suda saklanan standart harçların birim ağırlıkları 90. gün sonunda başlangıca göre % 3 oranında artış kaydetmişlerdir. MgSO₄ ve NaCl çözeltileri içerisinde bulunan numunelerin çoğunda 90. gün sonunda başlangıç gününe oranla düşüşler kaydedilmiştir. MgSO₄ çözeltisi içinde bulunan ve yüzde % 20 oranında UK içeren harç numunelerinin birim ağırlıklarında 90. gün sonunda başlangıç gününe göre % 4'lük bir azalma söz konusudur.

9. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Deney başlangıcında en yüksek basınç dayanımını su içinde saklanan standart harç numuneleri göstermiştir ve bu numunelerin 90. gün sonunda başlangıca göre basınç dayanımında % 8 artış kaydedilmiştir. Su içinde saklanan ve % 20 oranında UK içeren numuneler başlangıçta yine su içinde bulunan standart harç numunelerine oranla % 9 daha düşük bir basınç dayanımı göstermiştir fakat 56. gün ve deney sonunda % 20 oranında UK içeren numunelerin basınç dayanım deney sonuçları standart harç numunelerinkilerden yüksek çıkmıştır. Buradan da görülmektedir ki UK içeren harç numunelerinin erken yaşlarda dayanımları düşük fakat ilerki yaşlarda daha yüksek olmaktadır. MgSO₄ ve NaCl çözeltileri birbirleriyle kıyaslandığında ise MgSO₄ çözeltisinin UK katkılı ve katkısız harçlar üzerinde NaCl çözeltisine oranla daha zararlı etkiler yaptığı görülmektedir. MgSO₄ çözeltisindeki tüm numunelerin basınç dayanımları NaCl çözeltisi içerisindeki numunelerin basınç dayanımlarından düşük değerler göstermektedirler. Eğilme dayanımı deneyleri basınç dayanım değerleriyle paralel sonuçlar vermiştir. Başlangıçta en yüksek eğilme dayanımını su içinde saklanan standart harçlar vermiştir. Zaman içerisinde suda saklanan standart harçların eğilme dayanımlarındaki artış başlangıçtan 90. güne kadar % 8 oranında gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde de MgSO₄ çözeltisi UK katkılı ve katkısız numunelere NaCl çözeltisinden daha fazla zarar vermiştir. UK içeriği % 20 olan harç numunelerinin MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinin olumsuz etkilerine karşı dayanıklılıkları, % 50 oranında UK içeren harç numunelerine oranla daha fazladır. Ultrases geçiş süresi deneylerinde en kısa geçiş süresi değeri su içindesaklanan standart harçlara aittir, bu süre başlangıçtan 90. gün sonuna kadar % 8 oranında bir düşüş kaydetmiştir. MgSO₄ ve NaCl çözeltileri içerisindeki standart harçların

ultrases geçiş süreleri zamanla artış göstermiştir. Bunun sebebi ise her iki çözeltinin de numunelere kimyasal etki yapmaları ve böylelikle numunelerin iç yapılarını bozmalarıdır. Hacimce su emme ve kılcal su emme deney sonuçları birbirlerine paralel sonuçlar vermiştir. Su içinde saklanan ve % 20 oranında UK içeren harç numunelerinin 90. gün sonunda başlangıç gününe oranla hacimce su emme değerlerinde % 12'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. MgSO₄ zeltisi içinde bulunan ve % 20 oranında UK içeren harç numunelerinde ise 90. gün sonunda başlangıç gününe oranla hacimce su emme oranlarında % 5'lik bir artış gözlemlenmiştir. UK oranı % 50 olan harç numunelerinin başlangıçtan 90. güne kadar gerek hacimce su emme gerekse de kılcal su emme oranlarındaki artış % 20 oranında UK içeren harç numunelerinden daha fazladır. MgSO₄ zeltisi içerisinde bulunan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin birim ağırlıklarında 90. gün sonunda başlangıca oranla yaklaşık % 10'luk bir azalma grlmştir, bunda sebebi MgSO₄ zeltisinin numunelere yaptığı olumsuz etkilerdir. Numuneler MgSO₄ zeltisi içerisinde zamanla köşelerden parçalanarak kütle kaybına uğramaktadırlar.

Aköz vd.'lerinin yapmış olduğu çalışmada NaCl zeltisi içerisinde saklanan ve % 10 oranında çimentoyla yer değiştirmeli olarak kullanılan silis dumanının eğilme dayanımı deneyi verilerinde başlangıçtan 300. güne kadar % 4 oranında bir artış kaydedilmiş. En büyük artış % 18 ile 180. günde grlmştir. Burada yapılan deneylerde ise NaCl zeltisi içerisinde bulunan ve % 20 oranında çimentoyla yer değiştirmeli olarak kullanılan UK katkılı harçların eğilme dayanımı deneyi sonuçlarında; 90. gün sonunda % 3'lere varan bir artış sağlamıştır. Ortaya çıkan bu sonuçta silis dumanının UK'ya oranla numunelere daha olumlu katkı yaptığı görülmektedir [55].

zcan vd.'lerin yapmış olduğu "Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton zeliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi" konulu tezde Seyitömer ve Tunçbilek santrallerinden sağlanan UK'lar kullanılmıştır. Küller betona imento miktarının % 10, 20 ve 30 oranlarında katılmış ve UK'nın betonun mekanik ve dayanıklılık özeliklerine olan etkisi incelenmiştir. Numuneler havada, suda ve amanyum nitrat çözeltisinde bekletilmiştir. Üretilen betonlarda P 42.5 imentosu kullanılmıştır. Deneyler sonucunda UK'ların betonda işlenebilirliği iyileştirdiği ve betonda su ihtiyacını azalttığı gözlemlenmiştir [56].

Tuygun vd.'lerinin yapmış olduğu bir başka yüksek lisans çalışmasında ise “Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi” konu alınmıştır. Bu çalışmada Çayırhan UK'sı kullanılmış ve çimento olarak PÇ 42.5 tercih edilmiştir. UK Beton karışımına % 10, 30 ve 50 oranlarında çimentoyla yerdeğiştirmeli olarak kullanılmıştır. UK'lı betonların kontrol betonuna göre erken yaşlarda düşük dayanım verdiği, rutubetli kür koşullarında etkinliğinin azaldığı görülmüştür. UK'nın % 50 oranında kullanımı ise beton üzerinde mekanik özellikler açısından olumsuz sonuçlar doğurmuştur [57].

Erdiñ vd.'lerinin yapmış olduğu “Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliği” konulu tezde çimento ağırlığının % 10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında karışımına F tipi UK ilave edilmiş ve ilave edilen UK'nın ağırlığı kadar kum miktarı azaltılmıştır. Bu çalışmada numunelere 7, 28, 56. günlerde yapılan basınç dayanımı testleri sonuçlarına göre UK'lı numuneler her yaşta UK içermeyen şahit numuneden daha büyük dayanım değerleri vermiştir [58].

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda; harç üretiminde suda saklanan ve % 20 oranında UK içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında zamana bağlı artış % 50 oranında UK içeren numunelere oranla daha fazladır. MgSO₄ ve NaCl çözeltileri içinde bulunan ve % 20 oranında UK içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarındaki düşüş, yine MgSO₄ ve NaCl çözeltileri içinde bulunan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımındaki düşüşten çok daha azdır. Buradan görülmektedir ki uçucu kül ile çimentonun yer değiştirme oranında % 20'lik oran daha uygundur ve daha olumlu sonuçlar vermiştir. MgSO₄ çözeltisinin basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde harçlar üzerindeki olumsuz etkisi, NaCl çözeltisi etkisine oranla daha fazladır. Ultrases geçiş süresi deneylerinde elde edilen en kısa geçiş süresi değeri su içinde saklanan standart harçlarda gözlemlenmiştir. NaCl çözeltisi içinde bulunan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin ultrases geçiş süreleri, MgSO₄ çözeltisi içinde bulunan ve % 50 oranında UK içeren numunelerin geçiş sürelerinden daha kısadır.

KAYNAKLAR

- [1] Lane, R.O. and Best J.F., “Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete”, Concrete International, ACI, V. 4, No. 7, pp. 81 – 92, July,1982.
- [2] Tokyay, M., “Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)”, 2. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, pp. 29-36, 1993.
- [3] Wasti, Y., “Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı”, 2. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, pp. 37-44, 1993.
- [4] Özturan, T., “Uçucu Küllü Lateks Harçların Mekanik Özellikleri”, TMMOB, 3. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, ss. 15-25, Ankara, 1995.
- [5] Sun, W. Etc., “Damage and Damage Resistance of High Strenght Concrete Research”, Vol. 29, 1999.
- [6] Dolch, W.L., Diamond, S., Durability of Concrete, Part 39 of Civil Engineering Handbook, Editor-in-chief, W.F. Chen, Boca Raton: CRC 1995.
- [7] Malhotra, V.M., Mehta, P.K., High Performance, High Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Practice, and Case Histories, Supplementary Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2002.
- [8] Sivasundaram, V., Carette, G.G., Malhotra, V.M., Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes: Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt-scaling and to Chloride-ion Penetration, Am. Concr. Inst. SP 132 (1) pp. 319-349, 1992.
- [9] Tonak, T., Atay, Y. ve Ertürk, F., Termik Santral Atık Maddelerinin Çimento Üretiminde Kullanımı ile Enerji Tasarrufu, Çimento Sanayiinde Enerji Tasarrufu Semineri, Ankara, 19-20 Ekim 1989.

- [10] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No: 298 İzmir, Nisan 2002.
- [11] Erdoğan, T.Y., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri: Çimentolar, Agregalar, Su, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004
- [12] Postacıoğlu, B., Beton: Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1986.
- [13] Erdoğan, T.Y., Betonu Oluşturan Malzemeler: Çimentolar, Türkiye Hazır Beton Birliği, Ankara, 1995.
- [14] Mindess, S., Young, J.F., Concrete, Prentice – Hall inc. New Jersey, USA 1986.
- [15] Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitman Books Ltd., 3rd Edition Great Britain, 1986.
- [16] Troxell, E.G., Davis, E.H., Kelly, J.W., “Composition and Properties of Concrete”, Mc Graw – Hill Book Company Civil Engineering Series, 2nd Edition, New York, 1979.
- [17] Uğurlu, A., Farklı Çimentoların Basınç ve Çekme Dayanımı Yönünden Betondaki Davranışı, DSİ TAKK, Ankara, Haziran 1997.
- [18] Akman, S., Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi, 1987.
- [19] Postacıoğlu, B., Yapı Malzemesi Dersleri, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton İTÜ İnşaat Fakültesi, 1982.
- [20] Özturan, T., Uluslararası IV. CANMENT-ACI, Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, 1993.

- [21] TS 25, Tras, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1975.
- [22] ASTM C 618, “Fly Ash and Row or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement”, Concrete 1991.
- [23] Postacıoğlu, B., “Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar”, Cilt-2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1986.
- [24] Erdoğan, T.Y., Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Bildiriler Kitabı, Ankara 18-19 Kasım 1993.
- [25] ASTM C 311, “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 1994.
- [26] TS EN 450: “Betonda Kullanılan Uçucu Kül – Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü”, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 1975.
- [27] ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 1994.
- [28] Concrete Technology and Design, Vol. 3, Cement Replacing Materials, R.N. Swamy (ed.) Surrey University Press, 1986.
- [29] Cook., J.E., “Fly Ash in Concrete–Technical Considerations”, Concrete International, ACI, pp. 51-59, Sept., 1983.
- [30] Roy., D.M., Luke, K. And Diamond, S., “Characterization of Fly Ash and Its Reaction in Concrete”, Proceedings, Materials Research Society, Pittsburg, USA, 1984.

- [31] Erdoğan, T.Y., Ar, G. ve Koman, K.; Türkiye Uçucu Külleri (Üretim, Kullanılma Olanakları, Sorunlar, Öneriler), E.İ.E. Gn. Dir. Yayın No 82-19, pp. 15, 1982.
- [32] Bayazıt, Ö.L.; “Application of Fly Ash in Gökçekaya Dam and Economy”, Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Fly Ash, Paper A-2, 1970.
- [33] Özel, İ.; “Utilization of Fly Ash in the Production of Mass Concretes Used in the Construction of Porsuk Dam in Turkey”, Europe Committee on Electric Power, Symposium on the Use of Fly Ash, Paper A-5, 1970.
- [34] Atanur, A. ve Yağız, F.; “An Investigation of the Use of Cement-Fly Ash for Base Course Stabilization”, T.C.K. Gn. Md. pp. 18, Ankara 1970.
- [35] Atanur, A.; “Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması”, T.C.K. Gn. Md. Yayın No. 193, pp.291, Ankara 1971.
- [36] Tulgar H.E.; “Türkiye’de Elektrik Santrallerinde Kullanılan Kömürden Elde Edilen Cüruf ve Baca Tozlarının Endüstri Bakımından Değerlendirilmesi”, TÜBİTAK M.A.G. Proje No.182, pp. 92.; 1971.
- [37] TS 640 “Çimento-Uçucu Küllü Beton”, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1992.
- [38] ACI Committee 226. 3R – 87, Use of Fly Ash in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA, 1990.
- [39] Erdoğan, T.Y., Beton, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mart 2003.
- [40] Berry, E.E. and Malhotra, V.M., “Fly Ash for Use in Concrete – A Critical Review”, J. of American Concrete Institute, March – April, pp. 59 – 73, 1980.
- [41] Erdoğan, T.Y., “High-Lime Fly Ash Concretes”, Proceedings, Cairo First International Conference on Concrete Structures, Vol.1, Jan, pp. 1- 9, 1996.

- [42] TS 639, “Uçucu Küller”. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 1975.
- [43] Akman, M. S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İTÜ Rektörlüğü, Sayı: 1481, İstanbul, 1992.
- [44] Erdoğan, T.Y., Karışım ve Bakım Suları, THBB, İstanbul, 1995.
- [45] Steinour, H.H., Concrete Mix Water-How Impure Can It Be ?, Journal, Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Vol. 2, No. 3, pp. 32-55, 1960.
- [46] Abrams, D.A., “Test of Impure Waters for Mixing Concrete”, Proceedings, American Concrete Institute, Vol. 20, pp. 442-486, 1924.
- [47] Liebs, W., “The Change of Strength of Concrete By Using Sea Water for Mixing and Making Additions to Concrete”, Bautechnik, pp. 315-316, 1949.
- [48] Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Sönmez, R., “Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği”, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul, 1-2-3 Ekim 2003.
- [49] Özyurt, N., Taşdemir, C., Kara, G., Ertuğrul, C., “Uçucu Küllü Betonlarda Kırmakum İçeriğinin Beton Özelliklerine Etkisi”, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul, 1-2-3 Ekim 2003.
- [50] Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan, B., Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), İstanbul, 1-2-3 Ekim 2003.
- [51] Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., Yeğınobalı, A., “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, Ar-Ge Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı Ankara, 2004.

- [52] Eskişehir Çimento Fabrikası, “PÇ 42.5’un Fiziksel ve Kimyasal Analiz Sonuçları”, Eskişehir, 2002.
- [53] TS 819, “Rilem Cembureau Standart Kumu”, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan, 1988.
- [54] TS 1247, “Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, 1984.
- [55] Aköz, F., Yüzer, N., Koral, S., “Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harçlara Sodyum Klorür ve Magnezyum Klorür Etkileri”, 4. Ulusal Beton Kongresi TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, ss. 305-316, 1996.
- [56] Metin, Ö., “Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 119 s., Temmuz, 1997.
- [57] Tuygun, C., “Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 75 s., Mayıs, 2002.
- [58] Erdinç, M., “Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klorür Geçirimsizliği”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 143 s., Haziran, 1995.

EKLER

Ek 1. Basınç Dayanımları (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Basınç Dayanımı Değerleri (fc, MPa)									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
44	37	55	42	36	50	39	35	47	0
42	35	57	43	35	56	38	33	48	28
41	34	58	43	35	60	37	31	49	56
40	32	59	41	33	61	35	27	51	90

Ek 2. Eğilme Dayanımları (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Eğilme Dayanımı Değerleri (fc, MPa)									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
4.1	3.7	5.0	4.0	3.6	4.5	3.9	3.4	4.2	0
4.0	3.5	5.2	4.2	3.3	4.8	3.7	3.2	4.4	28
3.9	3.4	5.3	4.1	3.5	5.1	3.6	3.0	4.6	56
3.7	3.2	5.4	4.0	3.5	5.5	3.5	2.8	4.8	90

Ek 3. Ultrases Geçiş Süresi Değerleri (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Ultrases Geçiş Süresi Değerleri (μs)									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
51	52	45	53	56	47	55	57	49	0
52	54	44	54	57	45	56	58	48	28
53	55	43	53	57	42	57	59	44	56
55	56	41.5	52	58	39	59	60	41	90

Ek 4. Hacimce Su Emme Değerleri (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Hacimce Su Emme Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
8.0	8.4	7.2	8.2	8.5	7.4	8.3	8.6	7.8	0
8.2	8.6	7.0	8.4	8.6	7.2	8.5	8.8	7.4	28
8.4	8.8	6.9	8.3	8.7	6.8	8.7	9.0	7.2	56
8.6	9.0	6.7	8.5	8.9	6.5	8.8	9.2	7.0	90

Ek 5. Kılcal Su Emme Değerleri (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Kılcal Su Emme Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
2.3	2.5	2.1	2.4	2.7	2.2	2.8	3.0	2.6	0
2.4	2.6	2.0	2.5	2.8	2.1	2.9	3.2	2.4	28
2.5	2.7	1.9	2.6	3.0	2.0	3.0	3.3	2.2	56
2.6	2.8	1.8	2.7	3.2	1.8	3.2	3.5	2.0	90

Ek 6. Birim Ağırlık Değerleri (Suda, MgSO₄ ve NaCl çözeltilerinde)

Birim Ağırlık Değerleri									
NSH	MSH	SH	NUKH20	MUKH20	UKH20	NUKH50	MUKH50	UKH50	GÜN
2.15	2.15	2.20	2.15	2.13	2.16	2.14	2.12	2.15	0
2.11	2.11	2.22	2.10	2.10	2.17	2.09	2.08	2.17	28
2.09	2.06	2.24	2.06	2.05	2.18	2.06	2.04	2.18	56
2.04	2.02	2.26	2.04	2.01	2.22	2.03	2.00	2.19	90



Özgür ÇALIŞKAN

ÖZGEÇMİŞ

22.05.1978 tarihinde Ankara'da doğdu. İlkokulu Gaziosman Paşa ilkokulunda, ortaokul ve liseyi Ankara Arı Koleji'nde tamamladı. Liseden 1996 yılında mezun olup 1997 yılında Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Buradan 2001 yılında mezun oldu. Ankara'da ikamet etmektedir. İngilizce bilmektedir.

Adres : 2. Etap Eston Blk. Beste Apt. No:16

Çayyolu / ANKARA

Tel: 0 312 240 86 06

0 532 682 98 83

e-posta: caliskanozgur78@yahoo.com

ÖZGEÇMİŞ



Adı ve Soyadı : Özgür ÇALIŞKAN

Doğum yeri ve Tarihi : ANKARA- 22/05/1978

Baba Adı: : Hasan Ali

Eğitim : 1997-2001 Osmangazi Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği / ESKİŞEHİR
1993-1996 Özel Arı Fen Lisesi / ANKARA
1989-1993 Özel Arı Koleji / ANKARA
1984-1989 Gaziosman Paşa İlköğretim Okulu / SİVAS

Stajlar ve Bilgisayar :

Yapı Stajı (aktif) : Günsayıl İnşaat Kocaeli Deprem Konutları İnşaatı

Su Stajı (aktif) : DSİ 5. Bölge Müdürlüğü Ankara Akyar Barajı Yapım
İnşaatı

Bilgisayar : Office (ileri düzey), Autocad (orta düzey), İnternet (ileri
düzey)

Askerlik : Tamamlanmıştır

Ehliyet : B sınıfı ehliyet (1996)

Hobiler: Seyahat etmek, sinema ve tiyatroya gitmek, kitap okumak

Spor : Futbol, basketbol, yüzme, tenis

Adres: 2. Etap Eston Blk. Beste Apt. No: 16 Çayyolu/ ANKARA

Tel : 312 240 86 06 – 532 682 98 83

E-posta : caliskanozgur78@yahoo.com



Özgür ÇALIŞKAN

CV

He was born in 22.05.1978 in Ankara. He finished the primary school in Gaziosman Paşa in Sivas, finished the middle and high school in Arı College in Ankara . He finished high school in 1996 then he started Osmangazi University, Engineering-Architecture Faculty, Civil Engineering Department in 1997 in Eskişehir. He graduated from university in 2001. He's living in Ankara and he can speak English.

Address : 2. Etap Eston Blk. Beste Apt. No:16

Çayyolu / ANKARA

Phone: 0 312 240 86 06

0 532 682 98 83

e-mail: caliskanozgur78@yahoo.com

CV



Name Surname : Özgür ÇALIŞKAN
Date of Born : 22/05/1978 in Ankara
Father Name: Hasan Ali

Education : 1997-2001 Osmangazi University
Engineering-Architecture Faculty
Civil Engineering Department / ESKİŞEHİR
1993-1996 Arı High School / ANKARA
1989-1993 Arı Middle School / ANKARA
1984-1989 Gaziosman Paşa Primary School / SİVAS

Training Period and Computer Knowledge :

Building Training Period: Günsayıl İnşaat Kocaeli Earthquake Building
Construction

Water Training Period: DSİ 5. Bölge Müdürlüğü Ankara Akyar Dam
Construction

Computer Knowledge: Office (high level), Autocad (middle), Internet (high level)

Military profession : Completed
Driving licence : B class (1996)
Hobbies: Travelling, cinema, theatre, reading
Sport : Football, basketball, swimming, tennis

Adress: 2. Etap Eston Blk. Beste Apt. No: 16 Çayyolu/ ANKARA
Phone : 312 240 86 06 – 532 682 98 83
E-mail : caliskanozgur78@yahoo.com