

T.C.
DICLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIIRT VE BATMAN YÖRESİNE AİT SÜLFATLI ZEMİNLERİN
BETON DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Murat DOĞRUYOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DIYARBAKIR

Eylül 2011

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Murat Doğruyol tarafından yapılan “Siirt ve Batman Yöresine Ait Sülfatlı Zeminlerin Beton Davranışına Etkisi ” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Üye : Yrd. Doç. Dr. A.Halim KARAŞİN(Tez Danışmanı)

Üye : Doç. Dr. İclal ALUÇLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. M.Emin ÖNCÜ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 26/09/2011

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../.../.....

Prof. Dr. Hamdi TEMEL

Enstitü Müdürü

TEŐEKKÖR

Tez çalıőmam sırasında bana yol gösteren tez danıőmanım sayın Yrd.Doç.Dr. A.Halim Karaşin'e, Karayolları 9.Bölge Müdürlüğü Araştırma Başmühendisi Sayın M.Ali Sabaz ve tüm araştırma laboratuvarı çalıőanlarına, Limak Ergani imento fabrikasına, ayrıca tez çalıőmam süresince her türlü yardımı esirgemeyen Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı sayın Prof. Dr. Ayhan Demirbaő'a teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VI
KISALTMA VE SİMGELER.....	VIII
1-GİRİŞ	1
1.1.Amaç.....	1
1.2. Önem	2
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1.Beton.....	3
2.1.1. Betonda bağlayıcılık özelliği kazandıran malzemeler	4
2.1.1.1.Portland Çimento	4
2.1.1.2.Puzolanlar	5
2.2.Betonun Dayanımı ve Dayanıklılığı (Durabilite)	5
2.2.1. Betonda Sülfat Etkisi	6
2.2.2. Deniz Sularının Etkisi.....	14
2.3. Sülfat Etkisini Azaltmak İçin Yapılması Gerekenler	15
2.3.1. Portland Çimentosu ve Üzerinde Çalışmalar.....	15
2.3.2. Su /Çimento Oranı	18
2.3.3. Mineral Katkılar	20
2.3.3.1.Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması.....	20
- Uçucu Kül	23
-Çimentoda UK Kullanımı	27
-Agrega Olarak UK Kullanımı	27
-Betonda UK Kullanımı	28
-Yüksek Fırın Cürufu.....	29
2.3.3.3. Mineral Katkılarının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Detaylı İncelenmesi	31
- Uçucu Küllerin Basınç Ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkileri.....	31
- Yüksek Fırın Cürufu Basınç Ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkiler.....	31
2.3.3.4. Mineral Katkı Kullanımını Çevreye Etkileri	32
- Çimento Fabrikalarının CO ₂ salınımı.....	32
2.4. Puzolanik Reaksiyon	33
2.5. Mineral Katkılar Üzerinde Yapılan Çalışmalar	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
3.1. Amaç.....	37

3.2.Arazi Araştırmaları	37
3.2.1. Çalışma Yöntemi	37
3.2.2.Toprak Analizi	37
3.2. Malzemeler	44
3.2.1. Sodyum Sülfat özeltisinin Hazırlanışı	44
3.2.2. Çimento.....	45
3.2.3. Agrega.....	45
3.2.4.1. Uçucu Kül	49
3.2.4.2. Yüksek Fırın Cürufu	49
3.2.5. Mineral Katkı İçeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Yöntemleri	50
3.2.5.1. Basit Yer değiştirme Yöntemi.....	50
3.2.5.2.İlave Yöntemi.....	51
3.2.5.3. Kısmi Yer değiştirme Yöntemi	51
3.3. Beton Karışım Oranları	51
4. BULGULAR VE TARTIşMA	53
4.1. Taze Beton Sonuçları	54
4.1.1. Uçucu Küllerin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkileri.....	55
4.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun İşlenebilirlik Üzerindeki Etkileri	55
4.2. Sertleşmiş Beton Sonuçları	55
4.2.1. Birim Hacim Ağırlığı	56
4.2.2. Numunelerin Ağırlık Değişimi	56
4.2.3. Basınç dayanımı testleri	56
4.2.4.Numunelerin Birim Hacim ağırlıkları.....	58
4.3. Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri	59
4.3.1 Dayanım Gelişimi	59
4.3.2.Elastisite Modülü	60
4.3.3. Sünme ve Rötire.....	61
4.3.4. Uçucu Küllerin Sülfat Saldırısı Üzerindeki Etkileri	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
6. KAYNAKLAR	67
ÖZGEçMİş	73

ÖZET

SİİRT VE BATMAN YÖRESİNE AİT SÜLFATLI ZEMİNLERİN BETON DAVRANIŞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat DOĞRUYOL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2011

Bu çalışma çerçevesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada Siirt ve Batman yöresine ait sülfatlı topraktan alınan numunelerin sülfat oranı tayin edildi. Mineral katkı maddeleriyle üretilen betonların sülfat kürü ve su küründeki performansları belirlendi. Bu kapsamda belli orandaki uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ilaveli beton numune ile katkısız üç seri beton numune üretildi. Karşılaştırma yapmak amacıyla mineral katkı içermeyen karışımlar da üretildi. Küp beton numuneler su kürü ve %15'lik NaSO₄ sodyum sülfat çözeltisinde oda sıcaklığında bekletildi. Sülfat etkisine maruz beton numunelerin belli aralıklarla yüzey sertlikleri ve basınç dayanımları ölçülerek aynı zamanda numunelerde meydana gelen ağırlık değişimleri yüzeysel bozulmalar periyodik olarak gözlemlendi. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında Siirt ve Batman yöresine ait zeminin sülfatlı zeminin beton basınç dayanımına etkisi araştırıldı ve sülfatın betonun basınç dayanımını düşürdüğü gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Mineral Katkılar, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu, Sülfat etkisi, Basınç Dayanımı

ABSTRACT

INFLUENCE OF SULPHATE SOIL ON CONCRETE BEHAVIOUR BELONGING SIIRT
AND BATMAN REGION

MA THESIS

Murat DOĞRUYOL

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
UNIVERSITY OF DICLE

2011

In this thesis, the ratio of sulphate was determined from the samples of sulphate soil which was taken from Siirt and Batman site field. The performance of mineral additives concrete was obtained both in the sulphate and water cures. In this context, three series of concrete samples was produced; in two concrete samples series the certain ratio of fly ash and granulated blast furnace slag was used as additives, and one series of sample was used without additives. The cube samples were rested individually in water cure and (15%) sodium sulphate solutions at room temperature. The compressive strength and surface hardness of samples, which were exposed to effect of sulphate, was measured at the certain time intervals. Furthermore, the weight difference and surface deformation of these samples was also observed periodically. Consequently, in this thesis the used soil was taken from Siirt-Batman region, the observation was primarily focused on how the sulphate soil effects on the compressive strength of concrete was researched, and it showed that sulphate decreased the strength of concrete.

Keywords: Mineral Additives, Fly Ash, Granulated Blast Furnace Slag, Sulphate effect, Compressive Strength

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Portland çimentosu ana bileşenleri	4
Çizelge 2.2. Deniz sularında bulunan başlıca iyonlar.....	14
Çizelge 2.3. Deniz sularında buluna başlıca tuzlar (g/l).....	14
Çizelge 2.4. Farklı Çimento Türlerinin Kimyasal Özellikleri.....	17
Çizelge 2.5. Puzolanların sınıflandırılması.....	21
Çizelge 2.6. Türkiye'deki bazı UK'lerin kimyasal kompozisyonları.....	25
Çizelge 2.7. Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler.....	34
Çizelge 2.8. Beton Karışım Oranları.....	34
Çizelge 3.1. Toprak analiz sonuçları.....	42
Çizelge 3.2. Analiz edilen noktaların TS 12457-4 Standartlarına uygunluğu.....	43
Çizelge 3.3. SM 4500-E Turbidimetre Method Deney Sonucu.....	43
Çizelge 3.4. CEM I 42,5 R Portland Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	45
Çizelge 3.5. Agregaların Granülometri Değerleri ve Fiziksel Özellikleri.....	47
Çizelge 3.6. Uçucu kül fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları.....	49
Çizelge 3.7. Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	49
Çizelge 3.8. 1 m ³ betondaki karışım miktarları	52
Çizelge 4.1. Taze beton slump testi sonuçları	54
Çizelge 4.2. Küp numunelerin 28 gündeki birim hacim ağırlıkları.....	56
Çizelge 4.3. Numunelerin ağırlık değişimi.....	56
Çizelge 4.4. Beton Basınç Dayanımları.....	57
Çizelge 4.5. %15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı	57
Çizelge 4.6. Su kürüne maruz bırakılmış Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı.....	57
Çizelge 4.7. Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı.....	57
Çizelge 4.8. %15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki birim hacim ağırlıklar.....	58
Çizelge 4.9. Su kürünün çözeltisindeki birim hacim ağırlıklar.....	59

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Sülfat etkisiyle betonun bozulması.....	8
Şekil 2.2. Sülfat etkisinin işleyişi	13
Şekil 2.3. Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş beton.....	18
Şekil 2.4. Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş yapı.....	18
Şekil 2.5. Beton dayanımı ile su / çimento oranı arasındaki ilişki.....	19
Şekil 2.6. Uçucu kül çimento – agrega matrisi içerisinde boşlukları doldurur.....	26
Şekil 2.7. Uçucu Kül.....	26
Şekil 2.8. Yüksek Fırın Cürufu.....	30
Şekil 2.9. Beton Basınç Değerleri.....	35
Şekil 2.10. Numunelerin Basınç Değerleri	35
Şekil 3.1. Sülfat etkisine uğramış hidrolik sanat yapısı	37
Şekil 3.2. Sülfat etkisi	38
Şekil 3.3. Hidrolik sanat yapısı	38
Şekil 3.4. Sülfat etkisine uğramış beton	39
Şekil 3.5. Betonarme yapı.....	39
Şekil 3.6. Betonarme yapı.....	40
Şekil 3.7. Betonarme yapı.....	40
Şekil 3.8. Hendek Betonu	41
Şekil 3.9. Yöreden görüntü.....	41
Şekil 3.10. Siirt İli semtlerinin topraktaki sülfat oranları	44
Şekil 3.11. Bölgeç yardımıyla agrega numune alımı	46
Şekil 3.12. Etüv.....	46
Şekil 3.13. Agrega gradasyon eğrisi	48
Şekil 3.14. Deney Aletleri	48
Şekil 4.1. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş numuneler	53
Şekil 4.2. Slump Deney Aleti	54
Şekil 4.3. Beton Basınç Dayanımları.....	58

KISALTMA VE SİMGELER

U.Ç.	: Uçucu Kül
Y.F.Ç.	: Yüksek Fırın Cürufu
S.D.	: Silis Dumanı
C ₂ S	: Dikalsiyum silikat (2CaOSiO ₂)
C ₃ S	: Trikalsiyumsilikat (3CaOSiO ₂)
C ₃ A	: Trikalsiyum alüminat (3CaOAl ₂ O ₃)
C ₄ AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃)
C-S-H (C ₃ S ₂ H ₃)	: Kalsiyum silika hidrat jel (xCaOSiO ₂ .yH ₂ O)
mg	: Miligram
g	: Gram
l	: Litre
kg	: Kilogram

1-GİRİŞ

1.1.Amaç

Ana karışım malzemeleri, su, çimento, ince ve iri agrega olan beton, gerektiğinde uygun oranlarda kimyasal ve puzolanik katkılarıyla karıştırılmasıyla oluşan, başlangıçta şekil verilebilir nitelikte olan ve sonra zamanla sertleşen çığımızın en önemli taşıyıcı yapı malzemesidir.

Sertleşmiş betondan beklenen, dayanıklı ve ekonomik olmasıdır. Günümüzde en önemli yapı malzemesi olarak kullanılan betonun, dayanıklı, üretimi kolay ve ekonomik olması nedeniyle betonun sürekli araştırılmasına ve geliştirilmesine sebep olmuştur. Beton üretim yöntemleri ve malzeme bileşenlerinde de son yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Henrichsen 2005). Betonda basınç dayanımlarında çevresel olumsuzlukların başında sülfat etkisine bağlı sülfat korozyonu gelmektedir. Sülfatın betonla etkileşimi daha çok toprak ve yer altı sularıyla gerçekleşir. Betonda sülfat korozyonunun şiddeti, sülfat iyonunun yoğunluğuna, çimento içindeki bileşenlere ve oranlarına, sülfat iyonun oluşturacağı bileşimin cinsine ve miktarına, betonla temas süresi ve şekline bağlıdır. Sodyum ve kalsiyum sülfatla korozyona uğrayan beton yumuşamakta, magnezyum sülfat ile ise beton yüzeyinde sert bir kabuk oluşarak parçacıklar şeklinde bozulma olmaktadır (Onüçyıldız 1991). Bu sebeple Karayolları 9.Bölge Müdürlüğü tarafından Siirt-Batman yöresinin sondaj, araştırma çukurları ve yüzeysel kazılar yardımıyla alınan toprak numunelerinin analiz sonuçları incelenerek yöreye ait toprak numunelerinin standart üst değerlerine yakın ve fazla olduğu tespit edilen yörede yapılacak beton ve betonarme yapılarının basınç dayanımlarını olumsuz etkileyen sülfat etkisine karşı yapılabilecek önlemler ve bu önlemlerin betonun basınç dayanımını ve dayanıklılığına etkisini görebilmektir.

Sülfat oranının standart üst değerlerine yakın ve fazla olduğu sonucuna varılmış olan Siirt-Batman yöresine ait toprak analizi sonucu yörede yapılması hedeflenen beton ve betonarme yapılarında alınması gereken önlemler araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada sülfat etkisinde beton davranışını görme maksadıyla %15 oranında hazırlanan sülfat çözeltisinde 28 gün küre maruz bırakılan beton numunelerinin standart kür havuzunda bekletilen numunelerin basınç dayanımı değerleriyle karşılaştırıp, sülfat etkisinin beton basınç dayanımına ve dayanıklılığına etkisini araştırmaktır.

1.2. Önem

Çalışma sonucu toprak numunelerinin sülfat oranının standart üst değerlerine yakın ve fazla olduğu tespit edilen Siirt-Batman yöresinde yapılacak olan beton ve betonarme yapılarında sülfat etkisinin göz önünde bulundurulması, yapılarda alınabilecek önlemlere dikkat çekmektir.

Alınabilecek önlemler çerçevesinde beton karışımına %20 oranındaki çimento yerine ikame edilerek hazırlanan mineral katkılı beton numuneleri, ikame ettirilen katkı malzemelerinin atık malzemeler olması sebebiyle geri dönüşümleri konusunda çevreye katkı sağlamakta olup aynı zamanda beton karışımında da daha az çimento kullanılacağı için, çimento üretimi sırasında atmosfere salınan sera gazlarının azaltılmasını da sağlayıp hem çevreci hem de ekonomik beton üretimini sağlayabilmenin yanı sıra sülfat etkisine karşı da dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton elde edilebilmesidir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1.Beton

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Betonda aranan en önemli özellik basınç dayanımıdır (Arslan 2001). Betonun basınç mukavemetinin yüksek olması çekme ve eğilme gibi mekanik mukavemetlerinin de yüksek olması anlamına gelmektedir. Betonun basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı, basınç dayanımı yanında oldukça düşüktür. Bu yüzden betonun çekmeye karşı dayanımını artırmak için çelik donatıyla birlikte kullanılmasında fayda vardır. Gevrek bir yapı malzemesi olan betonun sünek bir yapı malzemesi olan çelik donatıyla kullanılmasına betonarme denir. Betonarmedeki amaç; çelik donatıyla betonun birbirlerini eksik yanlarıyla tamamlamalarıdır. Yangına ve korozyona karşı zayıf olan çelik, beton örtüsüyle korunmakta, çekme dayanımı ve sünekliği yetersiz olan beton ise çelikle donatıldığında, hem basınç hem de çekme dayanımı yüksek bir malzeme haline gelmektedir (Ersoy 2004).

Betonun en önemli bileşeni çimentodur (Erdoğan 2003). Çimento beton karışım malzemelerinde maliyeti en yüksek olan yapı malzemesidir. Çimento üretiminde kil ve kalkerden oluşan klinkerin oluşumu esnasında çimento fabrikalarından çevreye zararlı olan CO₂, NO₂ ve SO₃ gazları çok miktarda yayılmakta olup doğaya büyük zarar verilmektedir. Bu nedenle hem çevreye zararlı olup hem de beton karışımında maliyet açısından yüksek olduğu için beton karışımına çimento karışım oranının olabildiğince uygun tutulmalıdır. Betonda çimento oranını düşürebilmek için çimento gibi bağlayıcılık özelliği olan aynı zamanda beton deformasyonunu önemli derecede etkileyen ve sülfat ataklarına karşı mukavemet artırıcı özelliği olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi bazı mineral katkı malzemeleri beton karışımına ekleyebiliriz.

TSE 706 EN 12620'ye göre 4,0 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen boyuttaki agrega ince agrega; bu elek üzerinde kalan agrega iri agrega olarak tanımlanmaktadır. Agreganın hacim olarak betonun yaklaşık olarak %60-%70'ini oluşturmaktadır. Agreganın çimento hamurunun beton içinde zamanla kuruyarak serbestçe büzülmesini engeller ve böylece betonun büzülme nedeniyle çatlamasını azaltır. Agreganın ayrıca hem beton dayanımına hem de dayanıklılığına katkıda bulunan betonun temel bileşenlerindedir.

Beton harç malzemelerini birbirine bağlayıcılık özellik kazandıran ise çimentodur. Çimento beton karışımında su ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanır. Su ile çimentonun karışmasıyla başlangıçta plastik olan çimento hamuru prizini aldıktan sonra zamanla sertleşir ve inşaat malzemelerinden en önemli malzeme olarak yerini alır.

2.1.1. Betonda bağlayıcılık özelliği kazandıran malzemeler

2.1.1.1. Portland Çimento

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmesi ile ortaya çıkan ve “klinker” olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür; su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır (Erdoğan 2003).

Dönel fırınlarda yaklaşık 1200 °C de pişirilen klinker sıcaklığın etkisiyle hammadde karışımından CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ açığa çıkan oksitler, sıcaklık arttıkça kendi aralarında kimyasal reaksiyona başlamaktadır. 1250–1300 °C sıcaklıkta, hammadde karışımının %20- 30'u sınılaşma göstermekte ve klinker denilen irili ufaklı katı tanecikler haline dönüşmektedir. Oksitlerin 1200–1450 °C civarındaki kimyasal reaksiyonlardan sonra, çimentoyu oluşturan ve birbirinden farklı özelliklere sahip dört ana bileşenin oluşumu tamamlanmış olur. Duda (1985) çalışmasında bunlar;

Çizelge 2.1. Portland Çimentosu Ana Bileşenleri.

Trikalsiyum silikat (alit)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiyum silikat (belit)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum alüminat (celit)	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetra kalsiyum alüminoferrit (felit)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Portland çimentosu olarak elde edilen ürün genellikle gri renktedir. Bu gri renk, çimento üretiminde kullanılan hammaddelerde çok küçük miktarda yer alan demir oksitten kaynaklanmaktadır. Pişirmek için seçilen hammadde de demir oksit ve mangan oksit bulunmadığı takdirde, üretilen portland çimentosunun rengi beyaz ve beyaza yakın olmaktadır. Boyutları 1–200 µm arasında olmaktadır (Erdoğan 2003).

2.1.1.2.Puzolanlar

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak ince öğütülmüş halde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan, silisli veya silisli alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Anonim 2002).

Puzolanların genleşme oluşturan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisinin PH' ının düşmesinde puzolanların etkili olduğu öne sürülmektedir. Puzolanların alkali-silika reaksiyonunu azaltmadaki etkisinin puzolanın reaktivitesine bağlı olduğu ve bu etkinin çimento yerine kullanılabilir miktarı belirlediği ifade edilmektedir (Cook ve Swamy 1986).

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay puzolan olmak üzere ikiye ayrılırlar doğal puzolan doğal oluşum olarak volkanik tüf ve traslardır, yapay puzolanlar ise demir çelik fabrikalarının ve termik santrallerinin bacalarından çıkan yan ürün malzemeleri olarak bilenen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanıdır.

2.2.Betonun Dayanımı ve Dayanıklılığı (Durabilite)

Dayanım, betonun üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun göstereceği maksimum direnme gücüdür. Beton kullanıldığı yere göre değişik karakterde yüklere maruz kalabilir. Beton, maruz kaldığı yük arttıkça bu yüke karşı direnç göstermekte ve yükün türüne, büyüklüğüne göre şekil değiştirmektedir. Beton karşı koyabileceği yükten fazlasına maruz kaldığında ise kırılmaktadır.

Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti sırasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine yorulma dayanımı denilmektedir.

Betonda dayanımı artırmak için betonda kullanılan agregaların sert, dayanıklı ve temiz olmaları, mümkün olduğu kadar reaktif silis ve reaktif karbonat içermemeleri gerekmektedir. Normal ağırlıklı beton üretiminde kullanılan agregalar genellikle çimento hamurunun dayanımından daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ayrıca Çimento hamurunun dayanımı su/çimento oranına ve çimentonun ne ölçüde hidrasyon yapmış olduğuna da bağlıdır. Daha fazla miktarda hidrasyon sonucunda çimento hamuru

içerisinde mevcut bağlayıcı özellikteki kalsiyum–silika-hidrat jelleri artmakta ve kapiler boşluk miktarı azalmaktadır. Bu şekilde çimento hamurunun dayanım kazanma potansiyeli artmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip çimento hamurunda kapiler boşluk oranı da azdır. Kapiler boşluk oranının azalması çimento hamurunun ve buna bağlı olarak betonun daha yüksek dayanım kazanması demektir.

Durabilite yani kalıcılık, bir yapının içinde bulunduğu bulunacağı çevre etkileri altında, servis ömrü boyunca, dayanım ve diğer işlevleri koruyabilmesi özelliğidir. ACI 116 R – Amerikan şartnamesine göre durabilite, betonun hava koşullarına, kimyasal etkilere aşınma ve diğer kullanım koşullarına dayanabilme yeteneğidir. AS 1480-Avustralya şartnamesine göre ise, beton, beklenen kullanım koşulları altında özellikle, aşınma, sülfat etkisi ve su geçirirmliliğine karşı yeterli dayanıklılığa sahip olması gerekmektedir.

Yapı projelerinde dayanım, beton sınıfı olarak yer alır. Dayanıklılık için projede, maksimum su/çimento oranı, minimum çimento dozajı, çimento cinsi ve sürüklenen hava miktarı gibi bilgiler verilir. Ülkemizde yapılan projelerde ise, durabilite ile ilgili çok az bilgiye rastlanır. Durabilite açısından TS 500 ile ACI 318’ i karşılaştıracak olursak, ACI 318’de ayrı bir durabilite bölümü bulunmaktadır. Fakat TS 500’de böyle bir bölüm bulunmamaktadır. Örneğin ACI 318’ de, donma-çözülme etkisi, minimum sürüklenmiş hava miktarıyla belirtilmesine karşılık TS 500’ de bu konuda bilgi yoktur. Sülfat etkisine karşı beton bileşimi, ACI 318’de çimento cinsi, maksimum su/çimento oranı ve minimum beton sınıfları ile belirlenmiştir, TS 5900 ‘de bu konu “ TS 3440 – Zararlı Kimyasalların Etkilerine Maruz Betonlar İçin Yapım Kuralları” standardına refere edilmiştir. Korozyon etkisi için ise ACI 318’ d, betonda maximum klor içeriği, Su/Çimento oranı sınırı ve minimum beton sınıfları belirtilmiş fakat TS 500’ de korozyon ile ilgili bölüme yer verilmemiştir.

2.2.1. Betonda Sülfat Etkisi

Sülfat çözeltileri betonarme çeliğini doğrudan paslandırmadığı halde, betonda sertleşmiş olan çimentoya tesir ederek mevcut sülfatın yapısı ve çimento tipine göre iki tip reaksiyon meydana getirirler. Bunlar;(Arslan 2001)

- 1- Sülfatlar çimento içerisinde alçı taşı oluşturmak için serbest kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer (Arslan 2001).

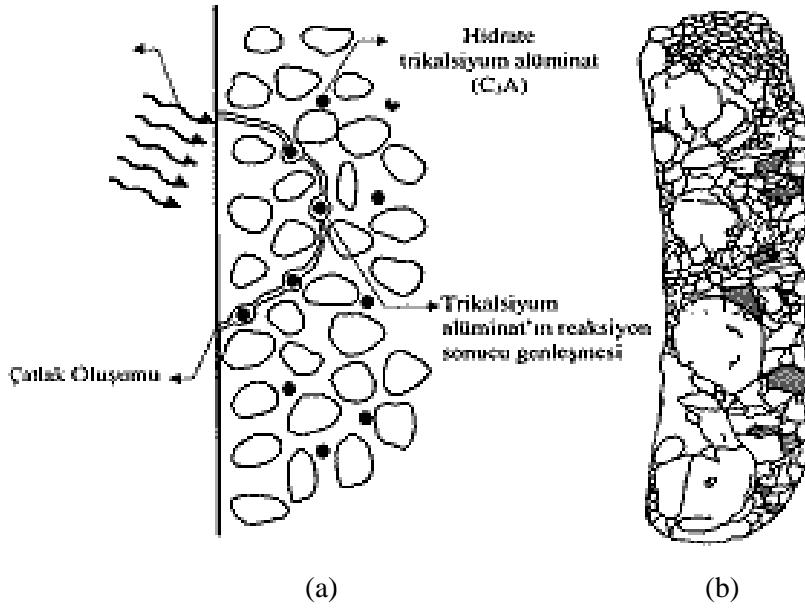
- 2- Alçıtaşı ve trikalsiyum alüminat ile birlikte trikalsiyum sülfalüminat oluşturur (Arslan 2001).

Bu reaksiyon ürünleri; paslanmada olduğu gibi, kendilerini oluşturan bileşenlerden daha fazla hacme sahiptirler (Fookes 1995).

Sülfattan etkilenmiş beton; karakteristik beyaz türü bir görünüm kazanır. Bu görünüm oluşma nedeni, trikalsiyum sülfalüminatın formasyonu olan sülfat tesirinin var olmasıdır. Hasarlar genellikle köşe ve kenarlarda başlar, betonun çatlama ve pullanmasıyla devam eder. Bu görünüşün oluşmasının nedeni, trikalsiyum sülfalüminatın formasyonu olan sülfat tesirinin var olmasıdır (Arslan 2001).

Alçıtaşı, çimento klinkerine trikalsiyum alüminat hidratasyonu nedeniyle ani sertleşmeyi (ani priz) önlemek için katılır. Alçıtaşı ile trikalsiyum alüminat trikalsiyum sülfalüminat üretmek için hızlı reaksiyona girer, bu süreçte beton yarı plastik durumda olduğu için genleşme karşılanabilir. Benzer reaksiyon, beton dış kaynaklarından sülfatlara maruz bırakıldığı zamanda geçerlidir, fakat genleşme karşılanamaz. Tipik sülfat çözültisi; sodyum, kalsiyum veya magnezyum sülfat taşıyan bazı killi zeminlerdeki yer altı sularında oluşur. Magnezyum sülfat diğer sülfatlardan daha çok zarar verici etkiye sahiptir. Reaksiyon sonucu, hidrate olmuş magnezyum silikat oluşur ve bağlayıcı özelliği yoktur (Troxell 1968). Sülfat tesirinin şiddeti onun yapısına ve betonun permeabilitesine göre değişir (Anon 1982). Zemin içerisinde % 0,1 civarında görülmüş sülfat konsantrasyonu betona zararlı etki yapacak düzeyde görülmektedir. % 0,5 civarında bir konsantrasyon ise ciddi boyutlarda zararlı tesir özelliği taşır (Rasheeduzzafar 1984). Trikalsiyum alüminat sülfatlardan etkilendiği için, sülfatların betona tesiri, trikalsiyum alüminatı düşük çimento kullanmak veya beton karışımına mineral katkı karıştırılması suretiyle azaltılabilir.

Topraktan, yer altı suyundan, deniz suyundan, yağmur suyundan ve atık sulardan gelen sülfat iyonları beton yüzeyinden nüfus ederek çimentodaki $3CaO_2Al_2O_3$ (C_3A) ile reaksiyonu sonucu yan ürünler oluşturur bu yan ürünle oluşan boşluk betonun dayanımını düşürmektedir. Sülfat iyonlarının beton etkisiyle bozulması Baradan ve arkadaşlarının (2002) yılındaki çalışmalarında Şekil 2.1.'de gibi gösterilmiştir.

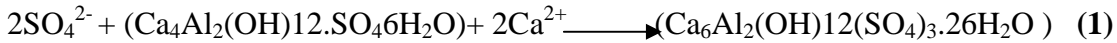


Şekil 2.1. Sülfat etkisiyle betonun bozulması

Şekil 2.1. (a)' da dış faktör olarak etkiyen sülfat ok şeklinde gösterilmiştir. Geçirgenliği fazla olan betona yüzeyden sızan sülfat beton kullanılan çimento cinsine göre oranı farklılık gösteren C₃A ile tepkime vererek hacimde artış meydana getirir ve Şekil 2.1. (b) 'de ki gibi betonda bozulmalara sebep olur.

Dış kaynaktan betona giren sodyum sülfat hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek betonda alçıtaşı ve etrenjit oluşturur. Su tarafından taşınan sodyum sülfatın betonun içerisine girmesiyle monosülfatlarla reaksiyona girerek betonun içyapısında yeni ürünler oluşturur. Bu ürünler betonda istenmeyen bir durumdur.

Reaksiyon (1) ortamdaki Sülfat(SO₄²⁻)'ın, mono sülfat (Ca₄Al₂(OH)₁₂.SO₄6H₂O) ile reaksiyonu sonucu Etrenjit (Ca₆Al₂(OH)₁₂(SO₄)₃.26H₂O) oluşmuştur.



Yukarıdaki reaksiyon için gerekli Ca²⁺ iyonu portlanditin çözünmesinin sonucudur.



Betondaki portlanditin tükenmesinden sonra eğer ortamda sülfat iyonu bitmemişse (1) nolu reaksiyon için gerekli Ca²⁺ iyonu C-S-H'dan sağlanmaya başlar ve bu durumda betonda bağlayıcılık özelliği sağlayan C-S-H'da ki bu bozulma gerçekleşir

ve özellikle C-S-H yapısındaki CaO/SiO₂ oranındaki azalma betonun zamanla bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasında ve betonda ciddi sorunlara yol açabilir. C-S-H'dan mevcut tüm kalsiyum iyonlarının ayrılması çok yüksek yoğunlaşma sodyum sülfat çözeltilerinde gerçekleşebilir (Skalny ve ark. 2002).

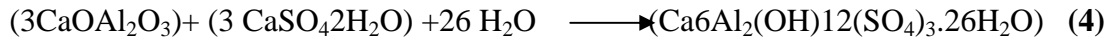
SO₄²⁻ iyonu etkisiyle ortamdaki Al³⁺ iyonu tükenirse ve halen ortamda sülfat iyonu mevcutsa betonda yan ürün olarak etrenjitten ziyade alçıtaşı oluşur. Sülfat iyonları betona yüzeyden nüfuz ettiğinden dolayı sülfat iyonları alüminat iyonlarından fazla olacağından alçıtaşı beton yüzeyine daha yakın yerinde oluşur.



(3) Reaksiyonu sonucu (CaSO₄·2H₂O) alçı taşı oluşmuştur.

Reaksiyona giren Al³⁺ iyonu monosülfatlardan başka hidrasyon sırasında hidrate olmayan C₃A'dan da sağlanabilmektedir. Bu olay nadir olarak gerçekleşir (Skalny ve ark. 2002).

Reaksiyon (4)' teki gibi Alçı taşı (CaSO₄·2H₂O), C₃A(3CaOAl₂O₃) ile reaksiyonu sonucu daha fazla hacme sahip olan etrenjit (Ca₆Al₂(OH)₁₂(SO₄)₃·26H₂O) oluşur.

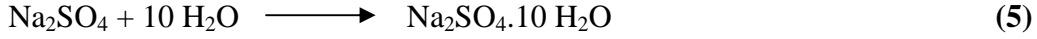


Alkali iyonlarla birleşen sülfat iyonlarının betondaki boşluk sistemi vasıtasıyla başka yerlere hareketi sağlanır. Bu durum boşluk çözeltilisindeki alkali konsantrasyonu ve pH değerini artırır. Bu uygun olmayan şartlar altında betonda alkali silika reaksiyonları da oluşabilir (Skalny ve ark. 2002).

Alkali sülfatlarla portland çimentosundan üretilen betonun karşılıklı etkileşimiyle gözeneklerde oluşan etrenjit boşlukları doldurduğu için geçici bir dayanım artışına sebep olmaktadır. Ancak etrenjit kristalleşmesi devam ettikçe açığa çıkan iç basınç betonda hacim artışına ve çatlama sebeptir. Düşük Al₂O₃ ve yüksek sülfat konsantrasyonlu çimentolarla üretilen betonlarda oluşan alçıtaşı da etrenjit oluşumu kadar hacim artışına yol açmaktadır (Skalny ve ark. 2002).

Eğer betonda sodyum sülfat etkisi ile sodyum miktarı yüksek olursa 4CaO·0,9Al₂O₃·1,1SO₃·0,5Na₂O·16H₂O ile formülize edilen U-oluşumu diye adlandırılan bileşikler de oluşabilir. U-oluşumu monosülfatlara sodyum eklenmesiyle

oluşur. U-oluşumu betona yüksek miktarda Na_2SO_4 bulunduran suyun sızması, bir taraftan da suyun karşı yüzeyden buharlaşması sonucu sodyumun birikmesi veya beton üretimi sırasında karışıma yüksek oranda sodyum içeren suyun katılması durumunda oluşmaktadır. Bu olaya yüksek sıcaklıklarda daha çok rastlanmaktadır. U-oluşumu aşırı miktarda olması durumunda bozulmalara sebep olabilmektedir. U-oluşumu uygun şartlar altında etrenjite dönüşebilmektedir (Skalny ve ark. 2002).



Yukarıdaki denklemde tenardite'nin mirabilite'ye dönüşümünde katı hacminde %315,4' lük artış meydana gelmektedir. Sıcaklık değişimleri durumunda yukarıdaki reaksiyon tersine dönebilmektedir. Reaksiyondaki tekrarlanma dönüşümleri betondaki yıkıcı etkiyi artırır (Skalny ve ark. 2002). Betondaki çiçeklenme de mirabilitenin tenarditeye dönüşmesi sonucunda olmaktadır (Nehdi ve Hayek 2005).

Betona su ile giren sodyum sülfat zamanla suyun buharlaşmasıyla betonun gözeneklerinde kalır ve zamanla kristalleşir ve bu kristalleşme sonucu betonda hacim artışı gerçekleşir ve betonda dayanımı düşüren bir sebep önemli bir sebep olabilir.

Sülfata dayanıklı çimento üretmek için Al_2O_3 miktarı sınırlandırılan çimentolar üretilmektedir. Ancak Al_2O_3 miktarının sınırlandırılması çimento bileşimindeki C_3A miktarı belli değerin altına çekilerek gerçekleştirilmektedir. C_3A miktarı düşürülen çimentonun hidrasyonunda daha az monosülfat oluşacağından alkali sülfat etkisinde etrenjit ve alçıtaşı oluşumu azalacaktır (Skalny ve ark. 2002). C_3A miktarı azaltılmış çimento ile üretilen betonların sodyum sülfat gibi alkali sülfatlara dayanım kazanmasına rağmen magnezyum sülfat ve sülfirik asit bulunan ortamlar beton için zararlı olabilir. Düşük pH değeri sülfat atağının doğrudan C-SH jeline etkimesine yol açar (Santhanam ve ark. 2001).

Günümüzde çimentoda doğal puzolan diye bilinen volkanik tüf ve traslar ile yapay puzolan diye bilinen silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu külün kullanımı artmıştır. Bu tür mineral katkılarla üretilen betonların sülfat atağı karşısındaki davranışları araştırılmaktadır (Thomas ve ark. 1999, Irassar ve ark. 2000, Santhanam ve ark. 2001, Skalny ve ark. 2002, Al-Amoudi 2002).

Betonun sülfat etkisi karşısında dayanımını artırmak için sülfata dayanıklı çimento kullanımı yanında, betonun permeabilitesinin de düşük olması gerekir. Betonun

sülfat dayanımını artıran birinci faktör permeabilitedir (Irassar ve ark. 2000). Düşük geçirimsizlik beton yapımındaki düşük su/çimento oranıyla yakından ilişkilidir ve su/çimento oranının düşük tutulmasıyla beton yüzeyi geçirimsiz bir hal alır ve çevresel faktörlerin olumsuz etkileri minimize olmuş olur. Betonun hidratasyonunun ilk zamanlarında açığa çıkan kalsiyum hidroksit (CH) miktarı da betonun sülfata karşı direncini etkilemektedir (Irassar ve ark. 2000). Yüksek C_3S/ C_2S oranına sahip çimentolarda, betonun hidratasyon sürecinin ilk zamanlarında açığa çıkan kalsiyum hidroksit miktarı fazladır. Betondaki kalsiyum hidroksit miktarı arttıkça dış ortamdan gelen sülfat iyonlarının reaksiyonu sonucu alçıtaşı oluşumu artar. Oluşan bu alçıtaşı etrenjit oluşumuna neden olur ve bu ürünün betonda oluşturduğu boşluklarla yüzeye çatlamlar oluşur ve dışarıdan madde girişinin artmasına neden olur. Böylelikle kalsiyum hidroksiti fazla olan beton sodyum sülfat atağından daha fazla etkilenir. Sülfata dayanıklı iki tür çimento ile üretilen betonlarda, yüksek C_3S/ C_2S oranına sahip çimento ile üretilenin sülfat etkisine karşı performansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Irassar ve ark. 2000).

Sodyum sülfat etkisine maruz sülfata dayanıklı çimentonun bir kısmı doğal puzolanla ikame edilerek üretilen harçların performansı normal harçlara göre daha iyi olmaktadır (Irassar ve ark. 2000).

Silis dumanı, uçucu kül ve normal çimento birlikte kullanılarak üretilen betonlar sodyum sülfat etkisine karşı iyi performans göstermektedir (Thomas ve ark. 1999). Betonda kullanılan uçucu küldeki CaO miktarı da betondaki sodyum sülfat hücumunu etkilemektedir. Düşük CaO içeriğine sahip uçucu kül katkılı betonlar sodyum sülfat etkisine karşı daha dayanıklıdır ve daha az hacim artışı yaratmaktadır (Irassar ve ark. 2000).

Omar yapmış olduğu çalışmada değişik türde çimento, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak betonlar hazırlayıp bunların sülfatlı ortamdaki davranışlarını inceledi (Al-Amoudi 2002). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların sodyum sülfat etkisine karşı performanslarının iyi olduğunu gözlemlendi. Bunun nedenini uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betondaki portlanditi (CH) bağlayarak C-S-H yapısına çevirmesi sonucu, dış kaynaktan gelen sülfat iyonunun ortamda yeteri miktarda CH bulanmayışından dolayı hacim artışına neden olan gecikmiş etrenjitin fazla miktarda oluşmamasına bağladı (Al-Amoudi 2002).

Cüruflu portland çimentosu kullanılması durumunda normal çimentolara göre betondaki alkali sülfat etkisi zararları azalır. Sodyum sülfat etkisinde cüruflu portland çimentolu betonlarda çatlamaya ve yumuşamaya rastlanmadığı halde normal çimentoyla üretilen betonlarda çatlak, parçalanma ve daha fazla hacim artışına rastlanmıştır (Skalny ve ark. 2002).

Kullanılan çimento tipi sodyum sülfat hücumunda etkilidir (Skalny ve ark. 2002). Düşük C_3A 'ya sahip çimentolarla üretilen betonların sodyum sülfat etkisine karşı dirençli olduğu görülmektedir (Thomas ve ark. 1999, Irassar ve ark. 2000, Santhanam ve ark. 2001, Al-Amoudi 2002, Nehdi ve Hayek 2005).

Çimentodaki C_3A miktarının düşük olması hidrasyon sırasında daha az monosülfatın oluşmasına neden olduğundan sodyum sülfattan gelen sülfat iyonları daha az etrenjit oluştururlar. Bu durum, betonda etrenjit oluşumuyla meydana gelecek hacim artışının azalmasına neden olur. Yüksek miktarda C_3S 'a sahip çimentolarla üretilen betonlar sülfat etkisinde erken bozulmaktadırlar (Irassar ve ark. 2000, Monterio ve Kurtis 2003).

Sodyum sülfat çözeltilisinin konsantrasyonu arttıkça betonda bozulmalar artmaktadır (Thomas ve ark. 1999, Irassar ve ark. 2000, Al-Amoudi 2002).

Çözeltinin konsantrasyonu sülfat atağıyla oluşan ürünlerin miktarını da değiştirmektedir. Düşük konsantrasyondaki sodyum sülfat atağında (< 1000 ppm SO_4^{2-}) ilk oluşan ürün etrenjittir. Konsantrasyon arttıkça (>8000 ppm SO_4^{2-}) oluşan ana ürün alçıtaşıdır. Orta konsantrasyon değerlerinde ise ($1000-8000$ ppm SO_4^{2-}) etrenjit ve alçıtaşının her ikisine birden rastlanmaktadır (Santhanam ve ark. 2001).

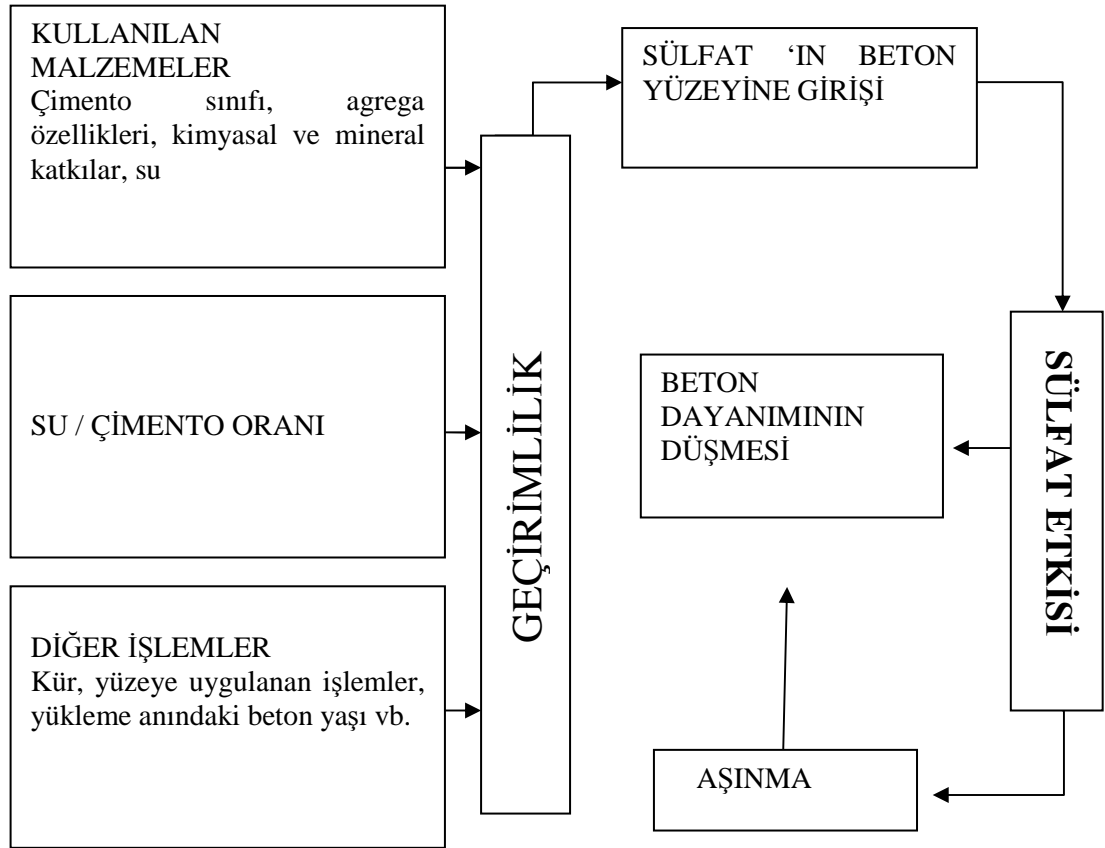
Betonun su/çimento oranındaki artış permeabilityyi artırmaktadır. Permeabilitesi fazla olan betonlara dış ortamdan sülfat girişi kolay olduğundan sülfat etkisi, permeabilitesi düşük betonlara göre daha etkilidir (Brown ve Hooton 2002). Bu bakımdan betonun geçirimsizliği dış kaynaklı sülfat etkisinde birinci derecede öneme sahiptir (Skalny ve ark. 2002).

Beton üretimi sırasında kullanılan silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve doğal puzolanlar sodyum sülfat etkisine karşı betonun performansını etkilemektedir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı olarak üretilen betonlar sodyum sülfat etkisine karşı yüksek direnç göstermektedir (Al-Amoudi 2002). Silis dumanı, uçucu kül ve normal portland çimentosu birlikte kullanılarak üretilen betonlar da sodyum sülfat

etkisine karşı iyi performans göstermektedir (Thomas ve ark. 1999). Düşük C_3A 'ya sahip portland çimentosuyla doğal puzolan katkılı olarak üretilen betonda CH miktarında azalma olduğundan sodyum sülfat etkisine karşı betonun performansı iyileşme göstermektedir (Irassar ve ark. 2000). Kireç filleri katkılı betonun sodyum sülfat etkisine karşı direnci azalmaktadır (Irassar ve ark. 2000). %25 ile %45 oranında uçucu külle düşük C_3A 'ya sahip portland çimentosuyla hazırlanan betonların sodyum sülfat etkisine karşı dirençleri artmaktadır (Monterio ve Kurtis 2003, Santhanam ve ark. 2001). Uçucu kül katkısı zaman içinde sodyum sülfat etkisi ile oluşan hacim artışını azaltmaktadır (Monterio ve Kurtis 2003). Sodyum sülfat etkisinde silis dumanı, F tipi uçucu kül, yüksek fırın cürufu kullanımı betonun genişmesini azaltmaktadır (Nehdi ve Hayek 2005).

Beton üretiminden sonra uygulanacak uygun kür meydana gelebilecek çatlak türü oluşumlarını önleyeceğinden sülfat etkisine karşı betonun performansı artar.

Sülfatın betonda oluşturu olumsuz sonuçları ve bu olumsuzluğu arttıran sebepleri sıralarsak betonda sülfat etkisi Şekil 2.2'den daha net anlaşılır.



Şekil 2.2. Sülfat etkisinin işleyişi

2.2.2. Deniz Sularının Etkisi

Bilindiği gibi deniz suları sülfat içerir. Diğer taraftan, sülfat içeriği ortamda klorürlerin bulunmasından dolayı da ayrıca önem kazanmaktadır. Deniz suyundaki tuzlara bakıldığında sodyum klorür(NaCl) daha çoğunlukta olduğu görülürken bunu magnezyum klorür (MgCl₂), Magnezyum sülfat (MgSO₄) ve kalsiyum sülfat (CaSO₄) tuzları izlemektedir. Betona olumlu ve olumsuz etki edebilecek tuzlar bunlardır. Deniz suyunda bulunan başlıca tuz oranları Çizelge 2.2. de görülmektedir (Şimşek 2004).

Çizelge 2.2. Deniz sularında bulunan başlıca iyonlar

İyonlar (g/l)	Akdeniz	Karadeniz	Atlantik	Dünya ortalaması
Na	11,56	4,9	9,95	11,00
K	0,42	0,23	0,33	0,40
Mg	1,78	0,64	1,50	1,33
Ca	0,47	0,24	0,41	0,43
Cl	21,38	9,50	17,83	19,80
Br	0,07	-	0,06	-
SO ₄	3,06	1,36	2,54	2,76

Deniz suyu ile temas eden betonlarda üç etki ortaya çıkar. Bunlar mekanik, fiziksel ve kimyasal etkilerdir. Kimyasal etki temas suyundaki etki ile aynıdır. Mekanik etki ise deniz dalgasının gidip gelmesi ve çarpması sonucu aşınma, oyulma ve parçalanmalar meydana getirir. Fiziksel etki ise deniz dalgasının gidip gelmesi sonucu ıslanma kuruma olayını sürekli tekrar etmesi sonucu bozulmalar meydana gelir. Ayrıca beton yüzeyindeki suyu buharlaşma sonucu beton yüzeyindeki boşluklarda tuz kristalleri birikir bu uzun süreli kuruma ve tekrar ıslanma etkisi ile kimyasal korozyon hızlanır (Şimşek 2004) . Şimşek (2004)' te yaptığı çalışma bazı deniz sularının bulunan başlıca tuzları Çizelge 2.3. verilmiştir.

Çizelge 2.3. Deniz sularında bulunana başlıca tuzlar (g/l)

Tuzlar	NaCl	MgCl ₂	MgSO ₄	CaSO ₄	CaCl ₂
Akdeniz	30,0	4,8	2,3	1,6	-
Okyanus Ort.	26,0	3,2	2,2	1,3	0,6

Deniz suyu tesiri genellikle betonda genleşmeye dayalı hasara neden olmaz. Betonarme, köprü tabliye ve alt yapısı, rıhtım iskeleleri, dalga kıranlar ve balıkçı

barınaklarının yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Deniz suyu şartlarına maruz kalan bu yapılarda korozyon ve deniz suyunun diğer tahrip edici etkileri görülmektedir. En şiddetli etkinin deniz suyunun yükselme alçalma ve sıçrama bölgesinde gerçekleştiği bilinmektedir (Martin ve Firlotte 1995). Betonarme yapı elemanlarının erken yapısal bozulmasına neden olan donatı korozyonu yönünden, deniz şartlarının en etkili ortam olduğu anlaşılmaktadır. Deniz suyunda bulunan yüksek klorür miktarı, deniz suyunun sürekli olarak beton yüzeyini ıslatması ve yüzeyin kuruması dönüşümü ve yüksek permeabiliteye sahip beton yüzeyinin mevcut olması gibi şartların bir araya gelmesi durumunda korozyon için en uygun ortam hazırlanmış olur (Mustafa ve Yusuf 1994).

Suya daldırılmış veya gelgit hareketinden etkilenmeyen sürekli doygun durumda bulunan betonarme yapı elemanları genellikle daha dayanıklıdır. Diğer taraftan, betonun boşluklarından tuzların kristalleşmesinden dolayı artan basıncın sonucu olarak genleşme meydana gelebilir. Kristalleşme suyun buharlaşma noktasında, en yüksek su seviyesinin üst bölgesinde oluşur. Tuzlu çözelti, kapiler hareket nedeni ile betonda yükseldiği için, zararlı etkiler betonun penetrasyon bölgesinde söz konusudur. Bazı durumlarda beton içerisindeki deniz suyunun hareketinin donmanın, dalga çarpmasının ve aşınmanın tahrip edici etkisi ile birleştiği görülür (Baboian 1995).

2.3. Sülfat Etkisini Azaltmak İçin Yapılması Gerekenler

2.3.1. Portland Çimentosu ve Üzerinde Çalışmalar

Çimento üretimi bugün en çok döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta yapılmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan temel maddeler kil ve kalker taşıdır. Kil dolayısıyla çimento bileşimine silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3), demiroksit (Fe_2O_3), gayri saflıklar ve kalker taşı dolayısıyla da, manyezi (MgO), kireç (CaO) ve gayri saflıklar girmektedir. Gayri saflıklar ve alçıtaşı göz önüne alınmazsa, denebilir ki, Portland çimentosunu meydana getiren temel bileşenler yukarıda adı geçen beş oksitten ibarettir.

Temel maddelerin döner fırında 1500°C de pişirilmesi sonucu silis, demiroksit ve alümin, kireçle birleşerek klinkeri meydana getirirler. Çimento klinkeri içinde şu bileşenler vardır;

Ana Bileşenler;

Trikalsiyum alüminat; $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ (veya C_3A)

Trikalsiyum silikat; $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (veya C_3S)

Dikalsiyum silikat; 2CaO , SiO_2 (veya C_2S)

Tetrakalsiyum alümino ferit; 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (veya C_4AF)

Diğer Bileşenler;

MgO , CaO , Cam, Katı eriyikler, gayri saflıklar.

Klinker özel değirmenlerde % 2 alçıtaşı (CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$) ilavesinden sonra öğütülerek ince toz halinde çimento elde edilir. Çimento bileşimi, klinker bileşiminin aynıdır, yalnız prizi geciktirmek için alçıtaşı katılmıştır.

Sülfat iyonlarının betonda çimentonun 3CaO , Al_2O_3 (veya C_3A) ana bileşeniyle reaksiyonu sonucu betonda istenmeyen yan ürünler oluşturduğunu ve betonun dayanımını düşürmesinden daha önceden bahsetmiştik bu yüzden sülfata dayanıklı çimento klinkerde bulunan trikalsiyum alüminat (C_3A)' ın oranını sınırlandırılmış olması gerekmektedir.

C_3A miktarı düşürülen çimentonun hidrasyonunda daha az monosülfat oluşacağından alkali sülfat etkisinde etrenjit ve alçıtaşı gibi beton içerisinde boşluk hacmi oluşumu azalacaktır (Skalny ve ark. 2002).

Oluşan alçıtaşı etrenjit oluşumuna neden olur. Beton bünyesinde fazla miktarda sonradan oluşan bu ürünler çatlama yoluyla dışarıdan madde girişini artırır.

Yüksek C_3S / C_2S oranına sahip çimentolarda, betonun hidrasyon sürecinin ilk zamanlarında açığa çıkan kalsiyum hidroksit miktarı fazladır. Betondaki kalsiyum hidroksit miktarı arttıkça dış ortamdan gelen sülfat iyonlarının reaksiyonu sonucu alçıtaşı oluşumu artar ve böylelikle kalsiyum hidroksiti fazla olan beton sodyum sülfat atağından daha fazla etkilenir.

Yüksek C_3S / C_2S oranına sahip çimento ile üretilenin betonun sülfat etkisine karşı performansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Irassar ve ark. 2000).

Çimentonun dört ana bileşenin özellikleri arasında açık farklar vardır. Böylelikle çimento içinde bu bileşenleri farklı oranlarda bulundurarak çeşitli maksatlara hizmet edecek farklı çimentolar elde etmek mümkündür. Mesela Amerika'da aşağıdaki gibi beş tip Portland çimentosu üretilmektedir.

ASTM Tip I; Normal Portland çimentosu .Genel olarak yapıda kullanmak içindir ve özel bir maksadı yoktur.

Bileşimi kabaca %50 C_3S , %30 C_2S , %20 $\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}+\text{Gayri saflıklardan}$ ibarettir.

ASTM Tip II; Değişik Portland çimentosu hidratasyon ısısı orta ve sülfat dayanıklılığı orta, C_3A miktarı ise nispeten az olan çimentodur.

ASTM Tip III; Yüksek mukavemetli çimento olarak bilinir C_3S miktarı ve öğütme inceliği fazla olan çimentodur.

ASTM Tip IV; Hidratasyon ısısı az çimento. C_2S miktarı fazladır.

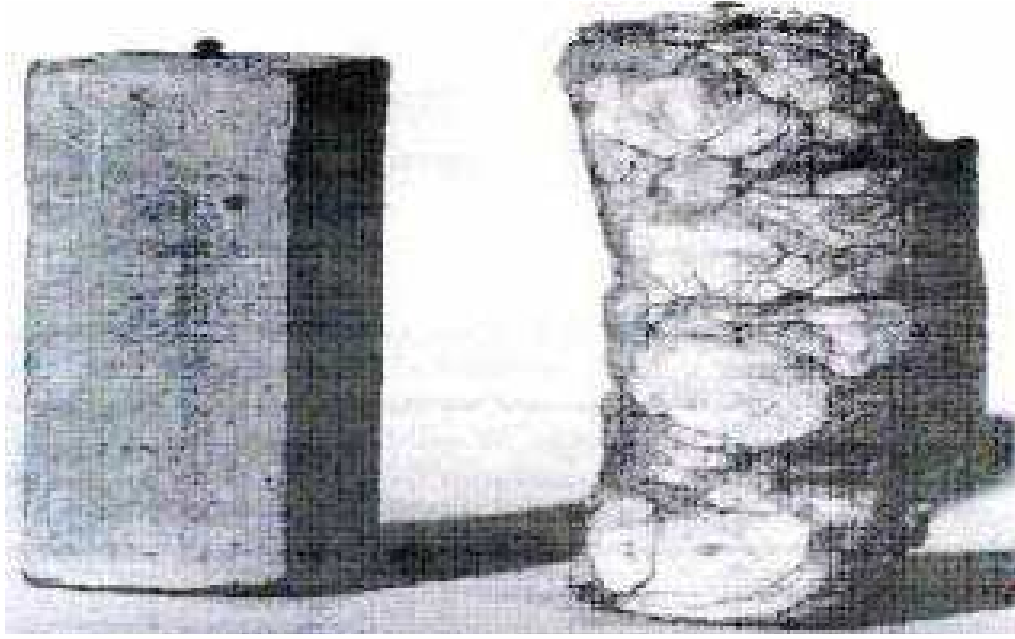
ASTM Tip V; Sülfata dayanıklı çimento. C_3A miktarı en az olanıdır. Çimentodaki C_3A miktarını belli bir oranın ($< \%5$) altında olması halinde sülfata dayanıklı çimento üretilebilmektedir.

ASTM Tip V olarak bilinen çimento, betonun sülfata karşı dayanıklılığını artırmak için üretilmektedir. (TS EN 206-1).

Çizelge 2.4. Farklı Çimento Türlerinin Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler(%)	Tip I	Tip II	Tip III	Tip IV	Tip V
C_3S	45	44	53	28	38
C_2S	27	31	19	49	43
C_3A	11	10	10	4	4
C_4AF	8	13	10	12	8

Baradan, ve ark. (2002) çalışmasından sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş beton Şekil 2.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş beton

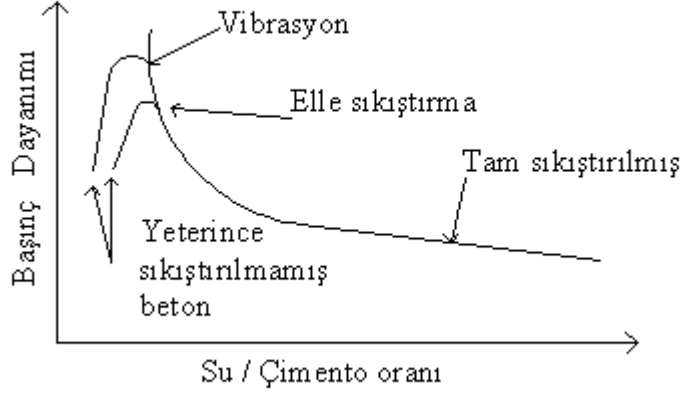


Şekil 2.4. Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş yapı

2.3.2. Su /Çimento Oranı

Betonun geçirimsizliğinin sağlanması su / çimento oranını düşürerek sağlanır. Yani Su / Çimento oranı ile beton basınç dayanımı ters orantılıdır. Bu yüzden su/çimento oranını 0.45–0.50 arası tutulması beton basınç dayanımını artırır, fakat

düşük geçirimsizlik durumunda betonu sıkıştırmak zorlaşır bu yüzden vibratör kullanılmalıdır aksi durumda basınç dayanımı istenilen sonucu vermez. Beton basınç dayanımı ile su / çimento oranı arasındaki ilişki ve vibrasyonun etkisi Erdoğan'nin (2003)' teki çalışmasında şekil 2.5.' teki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Beton dayanımı ile su / çimento oranı arasındaki ilişki

Amerikan Beton Enstitüsü ACI 318 yapı şartnamesi, orta şiddetteki sülfat etkisinde ($150-1500 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $0.1-0.2 \text{ SO}_4^{-2}$ zemininde) C_3A oranı %8'den az olan (ASTM Tip II) bir çimento kullanımını ve betonun su/çimento oranının 0.5 değerinin altında kalmasını, şiddetli sülfat etkisi durumunda ($1500-10000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $0.2-2 \text{ SO}_4^{-2}$ zemininde) C_3A oranı %5'den az olan (ASTM Tip V) bir çimento kullanımını ve betonun su/çimento oranının 0.45 değerinin altında kalmasını, çok şiddetli etki durumunda ise ($>10000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $>2 \text{ SO}_4^{-2}$ zemininde) C_3A oranı %5'den az olan bir çimento ile puzolanik katkı maddelerinin birlikte betonun su/çimento oranı 0.5 değerinin altında olacak şekilde kullanımını önermektedir.

TS EN206-1 standartlarına göre az zararlı kimyasal etki ($200-600 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $2000-3000 \text{ mg/kg SO}_4^{-2}$ zemininde) durumunda, en fazla su/çimento oranı olarak 0.55, en az çimento dozajı 300 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı da C30 olmasını önermektedir. Orta dayanımlı kimyasal etki durumunda ($600-3000 \text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $3000-12000 \text{ mg/kg SO}_4^{-2}$ zemininde) en fazla su/çimento oranı olarak 0.50, en az çimento dozajı 320 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı

C30 olmasını ve sülfata orta derece dayanıklı (C_3A oranı %8'den az) çimento kullanımını zorunlu kılmaktadır. Çok zararlı kimyasal etki durumunda (3000- 6000 mg/l SO_4^{-2} yer altı suyunda veya 12000–24000 mg/kg SO_4^{-2} zemininde) en fazla su/çimento oranı olarak 0.45, en az çimento dozajı 360 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı C35 olmasını ve sülfata yüksek derece dayanıklı (C_3A oranı %5'den az) çimento kullanımını zorunlu kılmaktadır.

2.3.3. Mineral Katkılar

2.3.3.1. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Uçucu küller ve granüle yüksek fırın cürufu, yapay puzolanlardır (Erdoğan 2003). Yapay puzolanlar endüstriyel yan ürünlerdir. Yan ürün olmaları nedeniyle maliyetleri oldukça düşüktür. Puzolanik malzemelerin çimento ve beton üretiminde kullanılması sadece maliyeti düşürmek için yapılmamaktadır.

Puzolanik katkı malzemelerinden yapay puzolanlar olarak bilinen mineral katkıları genellikle betonun dayanım özelliklerini iyileştirmek veya betona özel nitelikler kazandırmak amacıyla kullanılan ince malzemelerdir. Bu katkıların betona ek dayanım kazandırma özelliği olduğu kadar, betonun durabilite (kalıcılık) anlamında da performansını artırırlar. Tüm dünyada ve ülkemizde mineral katkıları zaman içinde her türlü fiziksel, kimyasal gibi dış etkilere karşı uzun ömürlü betonarme yapıların üretiminde portland çimentosuyla belli oranda yer değiştirilerek veya portland çimentosu klinkeri ile birlikte kullanılmaktadır.

ASTM C 125 (1994) ve ASTM C 618 (1994)'e göre puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak ince öğütüldüğünde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ya da silisli ve alüminli malzemelerdir. Esas oksitleri olan silis ve alümine ilave olarak yapılarında demir oksit, kalsiyum oksit (CaO), alkali ve karbon bulunmaktadır. Bu maddelerin miktarları ise elde edildikleri kaynağa göre değişmektedir.

Puzolanların kullanımı yaklaşık olarak bundan 2000 yıl önce eski Romalılar döneminde başlamıştır. Bugünkü İtalya'da Vezüv yanardağı eteklerinde bulunan Pozzuoli kasabasında, volkanik küllerin su ve söndürülmüş kireçle karıştırıldığında bağlayıcı bir madde olduğu ilk kez Romalılar tarafından fark edilmiştir (Erdoğan 1995).

Puzolanlar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Birinci gruptaki puzolanlar doğal olarak ortaya çıkan malzemeler olup elde edilirler genellikle kırma, öğütme ve eleme ile sınırlıdır (Erdoğan 1995). Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomlu topraklar, traslar ve bazı killer bu gruba giren doğal puzolanlardır. Bir diğer grup puzolan da yapay puzolanlar olup bunlar bazı endüstri kollarında yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürüfları en yaygın olarak kullanılan yapay puzolanlardır. Puzolanların sınıflandırılması Çizelge 2.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Puzolanların sınıflandırılması

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

Genel bir çerçeveden bakıldığında puzolanik katkıların etkilerini Ün (2007) çalışmasında belirttiği üzere şöyle sıralayabiliriz:

Erken dayanımı bir miktar düşürmekle birlikte ileri yaşlardaki dayanımı artırmaktadır yani betonun servis ömrünü artırmaktadır. Betonun priz süresini uzatır(Yalnız bu durum kışın soğuk hava koşullarında olumsuz etki yaratabilir.), yeterli bakım yapılmadığı takdirde betonun donma-çözünme direncini azaltır, sertleşmiş betonun geçirimliliğini azaltır, bu durum atık su ve toprakta bulunan sülfat ataklarının beton üzerindeki olumsuz etkilerini azaltır. Çimento ile suyun reaksiyonu sonucu açığa çıkan hidrasyon ısısını karışımdaki çimento oranının düşük tutulmasından dolayı hidrasyon ısısını azaltır, çimentonun su ile reaksiyonundan dolayı açığa çıkan CaOH_2 'le birleşerek daha çok çimentolaşabilen malzeme meydana getirir.

Puzolan malzemelerin çevreye katkıları da şu şekildedir:

Demir çelik ve krom gibi bazı metallerin üretimlerinde elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra amacın dışında fazla miktarda yan ürün olarak açığa çıkan atıl malzemeler olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun geri dönüşümünü sağlayarak çevrenin fazla kirlenmesinin önüne geçilmiş olunur, bu endüstriyel yan ürün atıklarının yok edilmesi için yapılacak masraftan tasarruf sağlar, betonda çimento kullanımını azaltır bununla birlikte yine çimento fabrikalarının çevreye vermiş olduğu hava ve su kirliliği gibi olumsuz etkiyi azalmaya sağlar, Yaygın kullanımlarıyla çimentoya olan talebin düşürülmesiyle, çimento üretim fabrikalarının bacalarından atmosfere CO₂, NO₂ ve SO₃ gibi sera gazlarının yayılmasını azaltarak küresel ısınmayı azaltır, çok ihtiyaç duyulan beton gibi yapı malzemelerinin varlığını artırır,

Çimentoya mineral katkı ilave edilmesi çimento üretimini artırır ve her bir ton çimento üretimi için gerekli yakıt ve enerji ihtiyacını azaltır (Ulus 2006).

Puzolan katkı malzemelerinin betonda kullanmanın olumlu etkileri;

Betonun servis ömrünün ve basınç dayanımının daha yüksek olmasına sağlar. Prizi geciktirir ani sertleşmeden kaynaklı rötre çatlamlarının önüne geçer. Betonda çimentonun yerine kullanıldığından çimentonun betondaki sebep olduğu bazı olumsuzluklar betonun terlemesi ve segregasyonunu azaltır betonda hidrasyon ısısının hızını ve miktarını azaltırlar. Segregasyon ve hidrasyon ısısının hızının düşmesi çimento miktarının daha düşük tutulmasından dolayıdır. Betonda su geçirgenliğini azaltır bu durum yeraltı suyu veya toprakta bulunan sülfatın betona karşı oluşturduğu sülfat ataklarında betonun dayanıklılığı arttırmaktadır. Betonda çimentonun yerine kullanıldığından ekonomiklik sağlamaktadır şeklinde özetleyebiliriz.

Puzolan katkı malzemesi kullanımında dikkat edilmesi gerekenler;

Puzolan malzeme taze betonun priz süresini geciktirdiği tespit edilmiştir. Priz süresinin geciktirmesi betonun ani sertleşmesinin önüne geçilmesiyle rötre çatlamlarının önüne geçilmesinde olumlu etkisi vardır ancak puzolanik katkı malzemesi kullanımı özellikle soğuk hava koşullarında zaten betonun geç priz almasından dolayı mineral katkıların etkisiyle betonun priz alması daha da gecikeceğinden soğuk hava koşullarında kullanılmamasına dikkat edilmelidir. Genellikle betonun ilk günlerdeki dayanımının ileri döneme göre daha düşük olmasına yol açabilir. Puzolan katkılı betonların daha uzun süreli ve daha dikkatli kür edilmeleri gereklidir, betonda belirli miktarda sürüklenmiş havanın yer alabilmesi için, mineral

katkısız betonda kullanıldandan daha yüksek miktarda hava sürükleyici katkı maddesi kullanımını gerektirebilir. Puzolanlar beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oran %15'den %40'a kadar önerilmektedir (Prince 1975, Şimşek 2004).

Puzolanlar fazla kullanıldıkları zaman zararlı da olabilirler;

Betonun su ihtiyacını artırır, donma çözülmeye karşı direnci düşürürler, sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltırlar, betonun kuruma büzülmesini arttırırlar (Prince 1975, Şimşek 2004).

- Uçucu Kül

Kömürle çalışan termik santrallerde oluşur. Türkiye'de açığa çıkan toplam kül 22 milyon ton/yıl olup toplam uçucu kül miktarı 18 milyon ton'dur değerlendirilen miktar ise 700–800 bin ton/yıl (Ün 2007).

Isınma amacıyla kullanılma imkânı olmayan düşük kalori kömürlü Termik santrallerde, buhar üreten kazanları ısıtmak amacıyla çoğunlukla pulvarize (öğütülmüş) halde yakılır. 75 µm'lik elekten %80'i geçecek şekilde kırılıp inceltelen kömür tozları önceden ısıtılmış hava ile karıştırılır ve yanma için kazan içine üflenir. Bu yanmanın sonucunda farklı özellikteki çeşitli gazlar ve bazı atıklar (kömür külleri ve yanmayan kalıntı) açığa çıkar. Genellikle, termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı küldür. Üretilen atığın %75–80' lik birincil kısmı, çok küçük tanecikler halinde yanma odasından gazlarla birlikte uçarlar. Modern santrallerde, bu ince malzemelerin %99'u gaz çıkmadan önce tutulmaktadır. Bu tanecikler, gazlarla birlikte bacadan havaya çıkarken, elektrostatik filtreler veya elektromekanik yöntemler kullanılarak tutulur. Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir (Ün 2007).

Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 genelde agrega üzerine çökeler. Uçucu kül ve diğer puzolanlar arayüz bölgesini puzolanik etki nedeniyle güçlendirirler. Uçucu kül gri renklidir, küresel şekillidir, tane çapı 1–150 µm, yoğunluğu 2,1 – 2,7 g/cm³ özgül yüzeyi 1800–5000 cm²/g, F ve C tipleri vardır (Ün 2007).

UK'ler, ASTM C 618'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla,

1) bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70'in üzerinde olan F sınıfı UK,

2) genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı UK'lerdir (ASTM C 618 1991). Yukarıda belirtilen siliko alüminalı UK, F sınıfındadır. Siliko kalsik UK'lerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfü kalsik UK'lerin çoğu, C sınıfı UK olarak isimlendirilmektedir (Aitcin ve ark.1986). Diğer bir sınıflandırma, ENV 197-1'e göre yapılmakta ve UK, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre UK'lü çimentolarda kullanılacak olan UK'ler, silisli ve kalkerli UK'ler olarak sınıflandırılmıştır (ENV 197-1 1994).

UK'ler, içerdiği analitik CaO miktarı bakımından;

1.CaO miktarı % 10'dan az olanlara düşük kireçli/kalsiyumlu UK,

2.CaO miktarı % 10'dan fazla olanlara yüksek kireçli/kalsiyumlu UK,

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (ASTM C 618 1991).

UK, yapısındaki kireç ve SO₃ miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

a) Esas yapısı siliko alüminatlardan meydana gelen, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (S+A+F) toplamı % 70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı UK,

b)Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik UK,

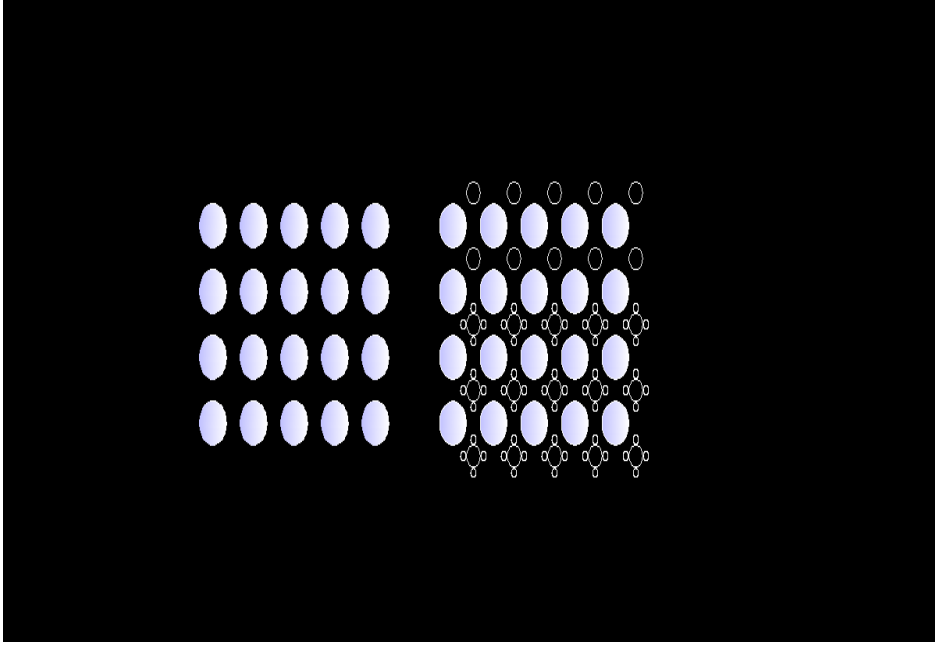
c)Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO₃ ve CaO ihtiva eden sülfü kalsik UK'lerdir (Aitcin 1986). Türkiye'deki bazı UK'lerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.6.'da gösterilmiştir (Tokyay ve Erdoğan 1998).

Çizelge 2.6. Türkiye’deki bazı UK’lerin kimyasal kompozisyonları

Bileşim (%)	Afşin Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları	
						F	C
SiO ₂	27,4	56,8	58,59	49,13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12,8	24,1	21,89	15,04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5,5	6,8	9,31	8,25	-	-	-
S+A+F	45,7	87,7	89,79	72,42	>70	>70	>70
CaO	47,0	1,4	4,43	13,2	-	-	-
MgO	2,5	2,4	1,41	4,76	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K)0,3	(N+K)3,0	0,24	2,2	-	<1,5	<1,5
K ₂ O	-	-	1,81	1,76	-	-	-
SO ₃	6,2	2,9	0,41	3,84	<5	<5	<5
K.Kaybı	2,4	0,6	1,39	0,72	<10	<12	<6

Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup bu santrallerden yılda 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği 2003).

Uçucu kül betonda dayanımı ince daneli olduğundan dolayı agregalar arası boşlukları daha iyi doldurur ve beton da geçirimsiz bir yüzey oluşturur. Bu sayede betonun dayanımını olumsuz etkileyen bazı çevresel faktörlerden betonun tepkime vermesini azaltır. Uçucu külün betonda agregaların boşluklarının doldurması Ün’nün (2007) çalışmasında Şekil 2.6.’ da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Uçucu kül çimento – agrega matrisi içerisinde boşlukları doldurur



Şekil 2.7. Uçucu Kül

- Çimentoda UK Kullanımı

Türkiye’de ve Dünyada UK’lü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Tokyay 1987, Kula. ve ark. 2001). Türkiye’de 1980 yılına kadar çimento üretiminde kullanılan toplam UK miktarı, yaklaşık olarak 40.000 tondur (Erdoğan 1982). İtalya’da elde edilen UK’ün ancak % 1’i çimento üretiminde kullanılırken (Valenti ve ark.1986), Fransa’da 4 milyon ton/yıl dolayında UK elde edilmekte ve bunun % 25’i çimento üretiminde kullanılmaktadır (Postacıoğlu 1986). A.B.D.’de ise üretilen UK’ün yaklaşık % 25’i çimento ve betonda değerlendirilmektedir (Rayzman 1997). Çin’de UK-kireç karışımları, yaklaşık 50 yıldan beri duvar çimentosu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Jueshi ve ark. 2001). Öte yandan deneysel bir çalışma ile UK’ün, çimento şerbeti içinde yüksek miktarda ek bağlayıcı madde olarak kullanılabileceği belirlenmiştir (Krishnamoorth ve ark.2002).

- Agregada Olarak UK Kullanımı

UK’ün agregada olarak beton ve harç içinde kullanıldığı uzun zamandan beri bilinmektedir. UK; Türk, Amerikan ve İngiliz standartlarında beton ve duvar elemanları için yapay hafif agregada olarak kabul edilmektedir (TS 1114 1986, BS 3892-1 1997). Betonda UK kullanımı; 1) ince agregada, 2) sinterleme sonrası yapay hafif agregada ve 3) UK ile bir miktar PÇ karıştırılarak elde edilen iri hafif agregada olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır. Ülkemizde yapılan bir çalışmada, sinterlenmiş UK hafif agregası üretimi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve bu malzemenin inşaat sektöründe başta agregada olmak üzere bir çok alanda kullanılabileceği önerilmiştir (Baykal ve ark.1993). Sinterlenmiş UK hafif agregasının geleneksel agregada yerine betonda içi dolu veya boş blok üretimi için kullanılabileceği ve çok katlı binalarda ölü yükü azaltacağı belirtilmektedir (Verma ve ark. 1993)

. UK’ün agregada olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar, özellikle son yıllarda hız kazanmıştır. Beton karışımına ince agreganın bir kısmı yerine UK kullanılarak yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiş ve UK’ün ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabileceği tespit edilmiştir (Ravina 1997, Papadakis 2000). UK’den elde edilen hafif agregalarla ilgili literatürde bir çok çalışma vardır (Yamashita 1992, Kayall ve ark. 2003). Yapılan bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agregada olarak üretilen UK, hafif beton yapımında kullanılmış ve beton özelliklerine etkisi

araştırılmıştır. Diğer taraftan yüksek oranda UK ile bir miktar PÇ karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların, hafif beton üretiminde kullanıldığı ve taşıyıcı betonlar elde edildiği görülmektedir (Chang ve Shieh 1996, Gesoğlu ve ark. 2004). Başka bir çalışmada UK, kil ile birlikte yapay agrega olarak üretilmiş ve betonda, yıkıntı atığı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır (Zakaria ve Cebra 1996). Öte yandan UK'ün bir dizi işlem sonrası beton içinde tekrar kullanılan agrega (recycled agrega) olarak kullanıldığı bir araştırmada, doğal agrega kullanılarak üretilen beton ile atık agrega içeren betonda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Collivignorelli ve Sorlini 2001). İngiltere'de inşa edilen nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş UK, hafif agrega olarak beton içinde kullanılmıştır (Davies ve Kitchener 1996).

- **Betonda UK Kullanımı**

UK'ün çimento ile birlikte inşaat sektöründe en çok kullanıldığı diğer bir alan, beton üretimidir. UK, hem normal ve hafif betonda hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır (Abdun-nur 1961, Berry ve Malhotra 1980, Neville 1981, Manz 1999). Bundan başka UK, ön üretim ve ön gerilmeli beton elemanların yapımında da kullanılmaktadır (ACI Committee 226 1987, Wesche 1991). Diğer taraftan UK'ün, betonda su tutucu katkı maddesi olarak da kullanılabilmesi önerilmektedir (Postacıoğlu 1986). Dünyada UK'ün inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili çalışmalar, genellikle beton üzerinde yoğunlaşmaktadır (Bayazıt 1980, Özturan ve Bastopçu 2003). Beton karışımında UK kullanıldığında, betonun hem dayanım hem de dayanıklılığında artışlar elde edilmektedir (Bayazıt 1980, Lee ve ark. 2003). Çayırhan ve Soma-B UK'leri, çimentonun bir kısmı yerine ikame malzemesi olarak normal betonda kullanıldığında basınç dayanımı artışı sağlanmıştır (Şimşek ve ark. 2001). Betonda yüksek oranda UK ikamesi yapılan ve SA kullanılan deneysel bir çalışmada, basınç dayanımı artarken aşınma dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir (Atiş 2000). Benzer şekilde hafif betonlarda UK'ün çimento ile ikame edildiği durumda dayanım artışı elde edilmiştir (Kılıç ve Şimşek 1991, Şimşek ve ark. 1999). Yüksek miktarda C sınıfı UK'ün kullanıldığı bir çalışmada, daha iyi kalitede ve düşük maliyetli beton üretimi gerçekleştirilmiştir (Naik ve ark. 1998). Dördüncü eleman olarak yüksek miktarda UK'ün betondaki performansının uzun süreli olarak incelendiği diğer bir çalışma,

UK'ün taşıyıcı beton uygulamaları ile sülfat ve klorür etkisine maruz kalan ortamlarda kullanılabilceğini göstermiştir (Dunstan ve ark.1992). Öte yandan yapılan deneysel bir araştırma sonucunda UK'ün polimer beton üretiminde de kullanılabilceği tespit edilmiştir (Rebeiz ve Mielich 1995). Beton karışımında hafif iri agrega olarak sinterlenmiş UK'ün kullanıldığı bir çalışmada, betonarme kirişler üretilmiş ve kirişler üzerinde yapılan deneylerde uygun sonuçlar elde edilmiştir (Swamy ve ark. 1984). UK'ün olumlu bir etkisi de betonarme çeliği üzerinedir. Beton karışımında UK kullanılması durumunda betonarmeye donatı korozyonunun azaldığı deneysel olarak belirlenmiştir (Montemor ve ark. 2000). UK'ün kullanıldığı diğer bir beton çeşidi lifli betondur. Deneysel olarak yapılan araştırmalarda otoklav uygulanmış lifli beton üretiminde ve kendiliğinden yerleşen lifli beton yapımında yüksek oranda UK kullanılabilceği önerilmektedir (Şahmaran ve Yaman 2005, Yazıcı ve ark.2006). Diğer taraftan UK, betonun hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla Türkiye'de ve Dünyada bir çok barajın yapımında da kullanılmıştır (Erdoğan 1982). A.B.D.'de 1953 yılında tamamlanan Hungry Horse barajının kütle betonunda 120.000 ton UK kullanıldığı bildirilmektedir (ACI Committee 226 1987). Bundan başka silindirle sıkıştırılmış beton (rolkrit) çok sayıda baraj, beton karışımlarına UK katılarak inşa edilmiştir (Dunstan, Papayianni 1992). İngiltere'de nükleer bir enerji santralında kullanılan betonda yaklaşık olarak 100.000 ton UK'ün katkı malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Davies ve Kitchener 1996).

- **Yüksek Fırın Cürufu**

Metal endüstrilerinin yan ürünü cüruflar, elde edildikleri metal endüstrisinin ana ürün tipine ve üretim yöntemlerine bağlı olarak birbirinden farklı kimyasal bileşenlere ve özelliklere sahiptir. Örneğin, nikel ve bakır gibi metallerin cürufları yalnızca puzolanik özelliğe sahipken, demir-çelik üretiminden elde edilen yüksek fırın cüruflarının (YFC) kendi başına bağlayıcı olma özelliği vardır. Modern yöntemlerle çelik üretiminden elde edilen cüruflar ise camsı yapıya sahip olup puzolanik özellik gösterirler. Bunları çimento ile birlikte kullanmak mümkündür. Yüksek fırınlarda demir cevherinden demir elde edilirken demir cevheri yüksek sıcaklıklarda eritilmektedir. Yüksek fırınlarda en çok kullanılan yakıt türü kok kömürüdür. Yüksek fırınlarda demir cevherinin yabancı maddelerden arıtılması ve ergitmeyi kolaylaştırmak amacıyla kireçtaşı kullanılır. Demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı sürekli olarak fırının üst

tarafından verilmektedir. Yüksek fırında 1500°C sıcaklıkta, kok kömürünün karbonu ile demir cevherinin içindeki oksitler birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları şeklinde fırını terk ederler. Fırının içinde ise eriyik durumdaki demir ile birlikte yine eriyik durumda kireç, kok kömürü külü, silis, alumin ve diğer maddelerden oluşan ve curuf adı verilen malzeme kalır. Eriyik malzemeler fırının alt tarafında toplanırlar. Fırının alt tarafında toplanan eriyik durumdaki malzeme grubu içinde, yoğunluğu az olan curuf üstte, daha ağır olan demir ise altta yer almaktadır. Yüksek fırından alınan curuf 1500°C civarında, çok yüksek bir sıcaklıkta olduğundan puzolan olarak kullanılabilmesi için soğutulması gerekmektedir. Uygulanan soğutma yöntemi ve hızına göre yüksek fırın curufları oldukça değişik yapısal karakteristikler gösterirler. Granüle yüksek fırın curuflarının puzolanik özelliği belli bir sınır değere kadar, CaO/SiO₂ oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Ancak, CaO miktarının çok yüksek olması halinde granülasyon zorlaştığından puzolanik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarı artışı ise curufun puzolanik aktivitesini arttırmaktadır. Curuf içinde %10' a kadar MgO bulunmasının dayanıma olumsuz bir etkisi olmamaktadır. Ancak daha yüksek MgO miktarları zararlıdır (Ün 2007).



Şekil 2.8. Yüksek Fırın Cürufu

2.3.3.3. Mineral Katkıların Beton Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Detaylı İncelenmesi

- Uçucu Küllerin Basınç Ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkileri

Beton karışımı içinde uçucu kül kullanımı genelde su ihtiyacını azaltmakta, bağlayıcı madde içeriğini artırmakta ve uzun dönemde puzolanik aktivite yoluyla dayanıma katkıda bulunmaktadır. Uçucu külün katılma oranının yavaş ve erken yaşlarda basınç dayanımı kazanımını azalttığını bilinmektedir. Bu durum uçucu külün çimento ile kısmen yer değişimi yaptığı zaman geçerlidir ve bağlayıcı olarak görev görür. Eğer, bir beton karışımında bağlayıcı malzeme miktarı sabit ise ve bu bağlayıcı miktarının bir kısmı uçucu kül ile yer değiştirmiş ise; basınç dayanımı uçucu kül miktarının artmasıyla daha da düşer. Diğer taraftan, uçucu küllü betonun dayanımı ve dayanım kazanma oranı kullanılan uçucu külün miktarına, karakteristiklerine ve kullanılan çimentoya kuvvetlice bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu kül daha yüksek reaksiyon oranı ve yüksek dayanımı düşük kireçli uçucu küle nazaran erken yaşlarda gösterir. Genelde, bütün betonların dayanım ve dayanım kazanma oranı kür edilme zamanı tarafından etkilenmektedir. Uçucu küllü beton normal betona göre daha uzun kür edilme zamanı isteyebilir. (Erdoğan 1997; Bilim 2001; Atış, Beton katkı malzemeleri ders notu).

- Yüksek Fırın Cürufu Basınç Ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkiler

Puzolanlar, betonda klinkerin hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile tepkimeye girer ve bu nedenle betona su karıştırıldıktan sonra, bir süre ortamda Ca(OH)_2 'in toplanma süresince portland çimentosuna seyreltici bir etki yapar. Ancak zamanla ortamda Ca(OH)_2 birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlar. Bu nedenle, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması beklenir. Sonuç olarak portland çimentosu ile puzolan karışımı içeren çimentolar, dolayısıyla betonlar özdeş incelikte portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süre suya (kür) ihtiyaç duyarlar. Buradan da anlaşılacağı üzere traslı çimentolarla üretilen betonların, ancak geç dayanımlarının eşdeğer karşılaştırma örneklerinin sonuçlarına ulaşması hatta bunları geçmesi beklenir (Erdoğdu ve ark. 2001).

2.3.3.4. Mineral Katkı Kullanımını Çevreye Etkileri

Betonda mineral katkı kullanımı çimento tüketimini azaltmasıyla betonun ekonomik anlamda rahatlatmanın yanında çimento fabrikalarından çevreye yayılan CO₂ gibi atmosferde sera etkisini arttıran gazların salınımını azaltmaktadır.

- Çimento Fabrikalarının CO₂ salınımı

Son on yılda artan yapılaşmayla beraber çimento talebi %60 artmıştır. Ülkemizde yıllık 50.000 tonunu üzerinde gerçekleştirilen çimento üretiminin %20'si ihraç edilmektedir. Diğer ülkelerin tersine çimento üretiminde çevre vergisi alınmadığı ülkemizde, bu üretimin çevreye zararı çığ gibi büyümektedir.

Çimento fabrikalarında kömür, ithal kaynaklardan ve çoğunlukla Rusya üzerinden sağlanmaktadır. Ülkemizden gerçekleştirilen çimento ihracatının en büyük pazarının da Rusya olması akıllarda bazı karışıklıklara neden olmaktadır. Rusya'nın kendi çimentosunu neden üretmediği üzerinde düşünülmesi gereken bir konudur. Rusya gibi ABD ve AB ülkelerinde çimento üretmekten çok ithal etmeyi uygun bulmaktadır. Konunun özü, çimento üretiminin getirdiği çevre sorunlarıyla birlikte yoğun enerji kaynaklı bir sektör olmasıdır. Yabancı ülkelerin son yıllarda çevreci yaklaşımlarla çıkarttıkları yasalar, o ülkelerde çimento üretiminden çok ithalatın daha karlı duruma getirmiştir. Bu yasaları çıkartan yalnızca tuzu kuru gelişmiş ülkeler değildir. Mısır, sınırlı olanaklarına rağmen çimento üretimine önce çeşitli vergiler getirmiş ve ardından Ağustos 2008'de çimento ihracatını yasaklamıştır. 9 milyon ton gibi çok yüksek oranda çimento ihracatı yapan Mısır'ın, bu kararı almasının temelinde yine çimento üretiminin çevreye verdiği büyük yıkım yatmaktadır. 1 ton çimento üretiminde ~1 ton (0,94 ton) karbondioksit açığa çıkmaktadır. Küresel ısınmanın temel nedeninin karbondioksit olduğu bilinmektedir. Yabancı ülkelerin çimento üretimine sınırlama getirmesinin temelinde aşırı karbon salımı yatmaktadır. Dünya genelinde tüketilen enerjinin %5'i (ülkemizde %15) tek başına çimento sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Dünyada başka hiçbir sektör bu yoğunlukta enerji tüketmemektedir. Bu nedenle açılan her çimento fabrikası küresel ısınmayı önemli düzeyde arttırmaktadır.

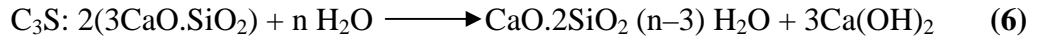
Çimento üretiminde önemli diğer bir konu, sanayide üretilen tehlikeli atıklar için yakma tesisi olarak kullanılmasıdır. Çimento üreticileri maliyetin en önemli kalemi olan yakıtı, ucuza ve hatta bedavaya getirmek için, tehlikeli kimyasal atıklar yakmaktadır. Tehlikeli atıkların yakılmasıyla zehirli gazlar ve KOK-Kalıcı Organik Kirleticiler

havaya oradan su ve toprağa karışarak besin yoluyla insan bedenine girmektedirler. Yağ dokularında biriken ve bedene girdikten sonra dışarı atılamayan KOK lar kanser dahil birçok hastalığa, çocuklarda zeka geriliğine, tiroit hormonu azalmasına, hiperaktiviteye ve daha birçok sayamadığımız hastalığa neden olmaktadır.

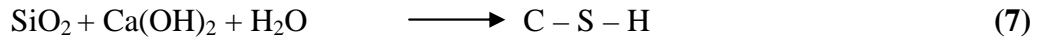
Çimento üretiminde açığa çıkan toz ve partiküller, fabrika çevresindeki yöre halkında ciddi solunum yolları hastalıklarına neden olmaktadır. Rinit, kronik bronşit, astım, kalp ritim bozukluğu bu gibi yörelerde yaşayan halkın temel sorunu durumuna gelmektedir. Çıkan toz, yörede yetişen bitki ve tarımsal ürünler üzerinde zarara neden olmakta, büyük ölçüde verim kaybı ile toprak niteliğinin bozulması gibi geri dönüşü olmayan sorunlara yol açmaktadır (Anonim).

2.4. Puzolanik Reaksiyon

Çimentonun karma oksitlerinin hidratasyonu sonucu Ca(OH)_2 oluşur



Bu Ca(OH)_2 ile bünyesinde aktif silis içeren puzolan reaksiyona girerek betonda bağlayıcılığı arttıran C-S-H oluşturur.



Puzolan ve Portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyon etkisiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belli bir sürenin sonunda, puzolan içeren betonların çimento hamurunda Portland çimentosunun hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ürünü bulunmaktadır.

Puzolan içeren betonlarda daha çok bağlayıcı ürün olan C-S-H jellerinin bulunması, dayanım artışına neden olurken hamur boşluk yapısının iyileşmesi neticesinde betonun dış etkilere dayanıklılığı da artmaktadır (Özturan 1991).

Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri, incelenen özellik ve madde bakımından TS 3440'da verilen Çizelge 2.7 sınır değerler göz önüne alınarak tayin edilir. Bu değerler durgun veya yavaş akan, doğrudan doğruya beton ile temas eden sular için geçerlidir(TS 3440) .

Çizelge 2.7. Doğadaki Suların Zararlı Etkinlik Dereceleri İçin Sınır Değerler

İncelenen Özellik	Zararlı Etkinlik Derecesi		
	Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
pH değeri	6.5 – 5.5	5.5 – 4.5	4.5
CO ₂ (mg/l)	15 – 30	30 – 60	60
Amonyum (mg/l)	15 – 30	30 – 60	60
Magnezyum (mg/l)	100 – 300	300 – 1500	1500
Sülfat (mg/l)	200 – 600	600 – 3000	3000

2.5. Mineral Katkılar Üzerinde Yapılan Çalışmalar

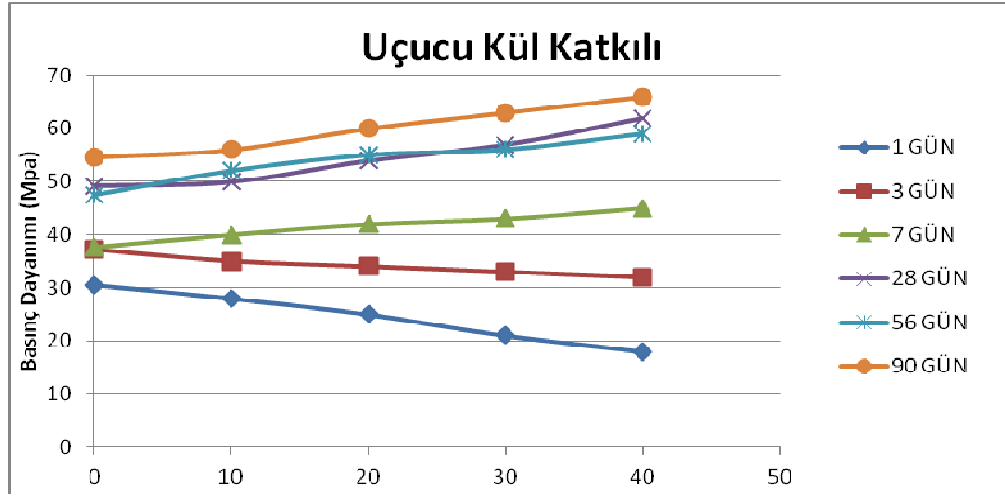
Montgomey v.d., (1981)'e göre uçucu küllü harçlardaki ağırlık değişiminin, uçucu kül parçacıklarının çekirdek noktalar olarak hareket ederek mikro çatlakları azaltma eğiliminde olan mekanizmalara yardımcı olduğu şeklinde yorum getirmiştir.

Puzolaların çimento ile yer değişimi farklı oranlarda da denenmiştir .Yiğiter vd.'nin yaptığı çalışmada %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek hazırlanan numunelerin karışım oranları Çizelge 2.8. ' da gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Beton Karışım Oranları

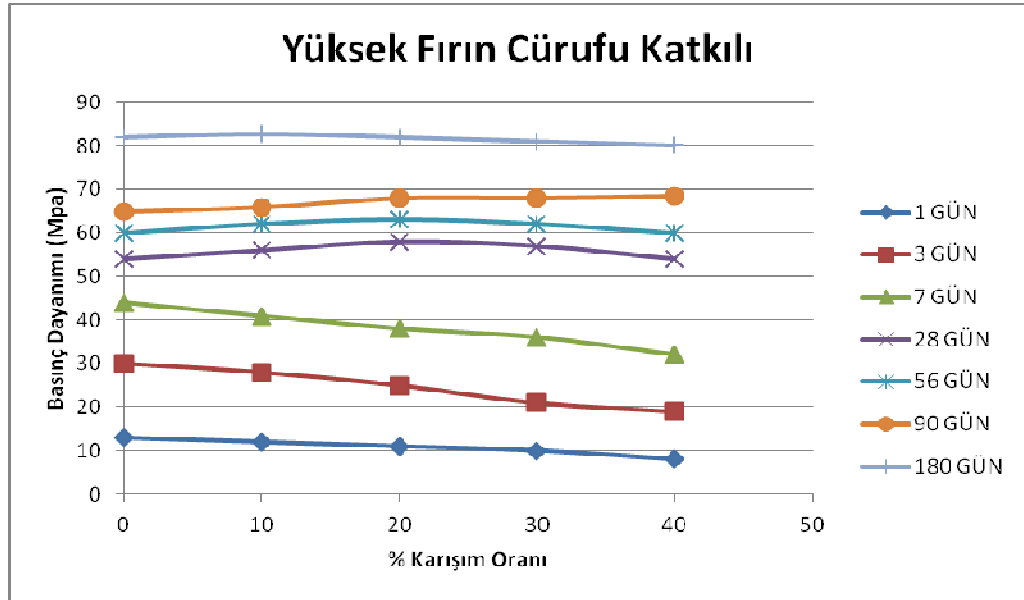
FARKLI ORANLARDA UÇUCU KÜL KATKISININ BETON KARIŞIM ORANLARI					
C20	UK 0	UK 10	UK 2 0	UK 30	UK 40
ÇİMENTO	360	324	288	252	216
SU	0	36	72	108	144
ÇAKIL 15–25	286	285	285	283	281
ÇAKIL 5–15	671	669	667	663	660
KUM 0–5	143	143	143	143	143
KİMYASAL KATKI	8,50	8,64	8,93	9,47	9,47

Yiğiter vd.'nin Uçucu Kül katkılı numuneler üzerinde yaptığı çalışmada beton basınç değerleri Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Beton Basınç Değerleri

Uçucu kül oranının artışı ile betonun basınç dayanımı 1 günde azalırken, 3 günde bu farklar önemli oranda azalmıştır. 7. günde uçucu kül oranının artışı ile basınç dayanımları artmaya başlamış, bu artış 28, 56 ve 90 günde oldukça belirgin bir hal almıştır. (Yiğiter ve ark. 2004). Halit Yazıcı'nın 2006'da yaptığı başka bir çalışmada ise puzolan katkı malzemesi olarak bu sefer %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere yüksek fırın cürufu(YFC) kullanmıştır. Hazırlanan numunelerin basınç değerleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Numunelerin Basınç Değerleri

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, topraktaki sülfat oranı yüksek Siirt-Batman yöresinde yapılması düşünülen beton ve betonarme yapılarında sülfat saldırılarına karşı yüksek dayanımlı beton elde etmek olup ayrıca betonun ana karışım malzemesi çimentonun kullanımının azaltarak çimento fabrikalarından atmosfere salınan sera gazlarının miktarını azaltmak; çimento malzemesi yerine termik santral, demir çelik fabrikalarının katı atık malzemeleri olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu gibi malzemeleri beton karışım malzemesi olarak kullanarak hem bu malzemelerin imha maliyetinden kurtulmak hem de çevresel kirlenmeyi önlemektir. Bu sebeple betonda belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı beton numuneler ile birlikte mineral katkı kullanılmadan üretilerek hazırlanan 45 beton numunesinin sülfat etkisine karşı gösterdikleri performansı belirlemek ve karşılaştırmaktır.

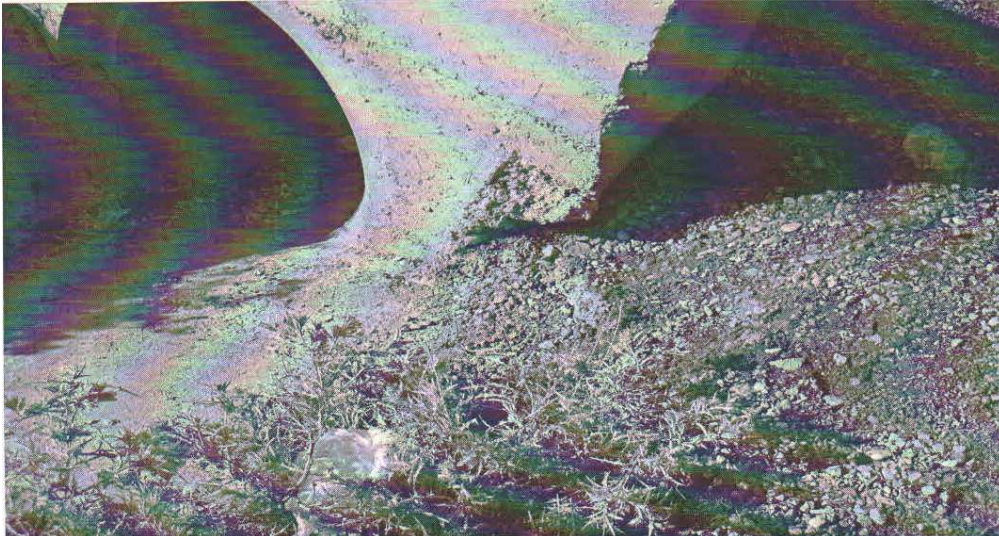
3.2. Arazi Araştırmaları

3.2.1. Çalışma Yöntemi

İnceleme alanı çoğunlukla toprak örtü türü zeminle örtülüdür. Bu nedenle temel formasyonların özellikleri inceleme alanı civarında bulunan mostralarda araştırılmıştır. Bu amaçla, ayrıca önceki incelemelerden, yol yarmalarından, temel kazılarından, açılmış su ve temel sondaj kuyularına ait verilerden faydalanılmıştır.

3.2.2. Toprak Analizi

Köy hizmetleri tarafından yaklaşık 28 sene önce yapılan hidrolik sanat yapısına ait beton dokusu durumu (Görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.)



Şekil 3.1. Sülfat etkisine uğramış hidrolik sanat yapısı

Karayolları tarafından 15 yıl önce yapılan 6–7 metre derinlikte yarma kesitinde yer üstü drenaj hendek betonu üzerine, yağışlar sonucu zemindeki sülfatın yıkıp beton yapıyı etkilemediği görülmektedir.



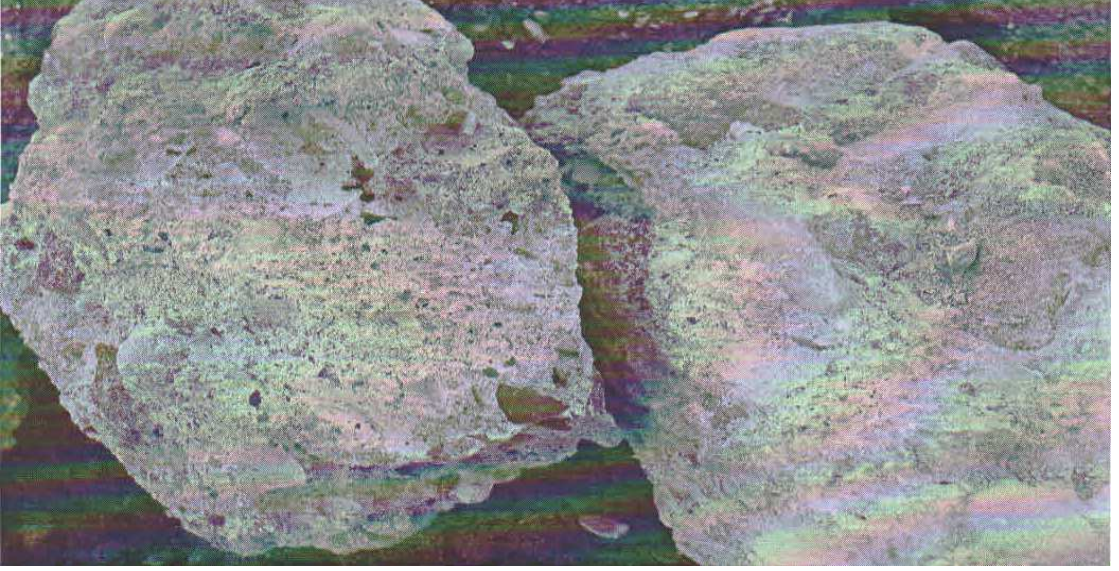
Şekil 3.2.Sülfat etkisi

Yeni Mahalle bölgesinde çalışma alanı içerisinde Belediye verilerine göre 22 yıl önce yapılan hidrolik sanat yapısının beton doku durumu görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.



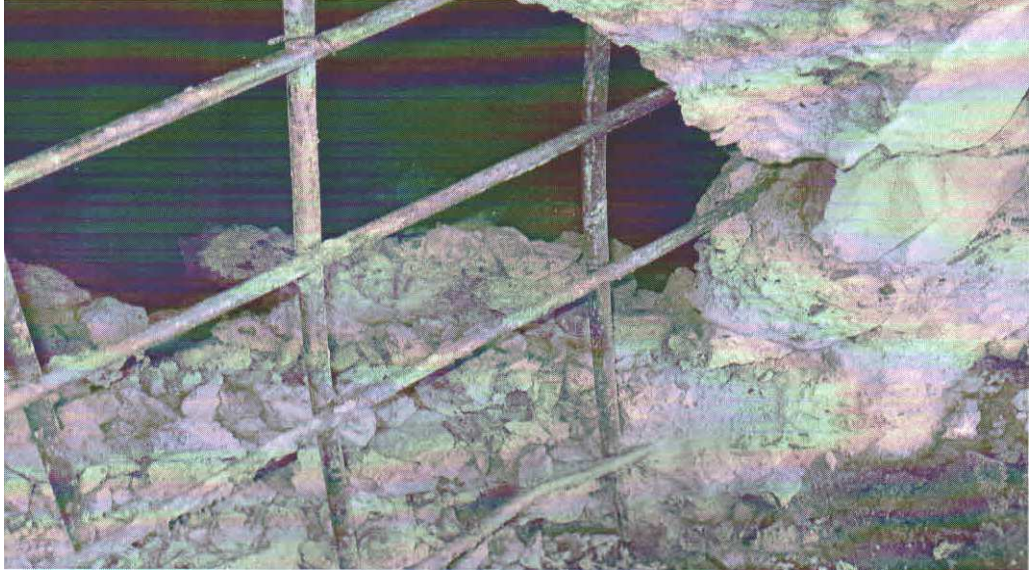
Şekil 3.3.Hidrolik sanat yapısı

Yeni Mahalle bölgesinde çalışma alanı içerisinde Belediye verilerine göre 22 yıl önce yapılan hidrolik sanat yapısının beton doku durumu görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.



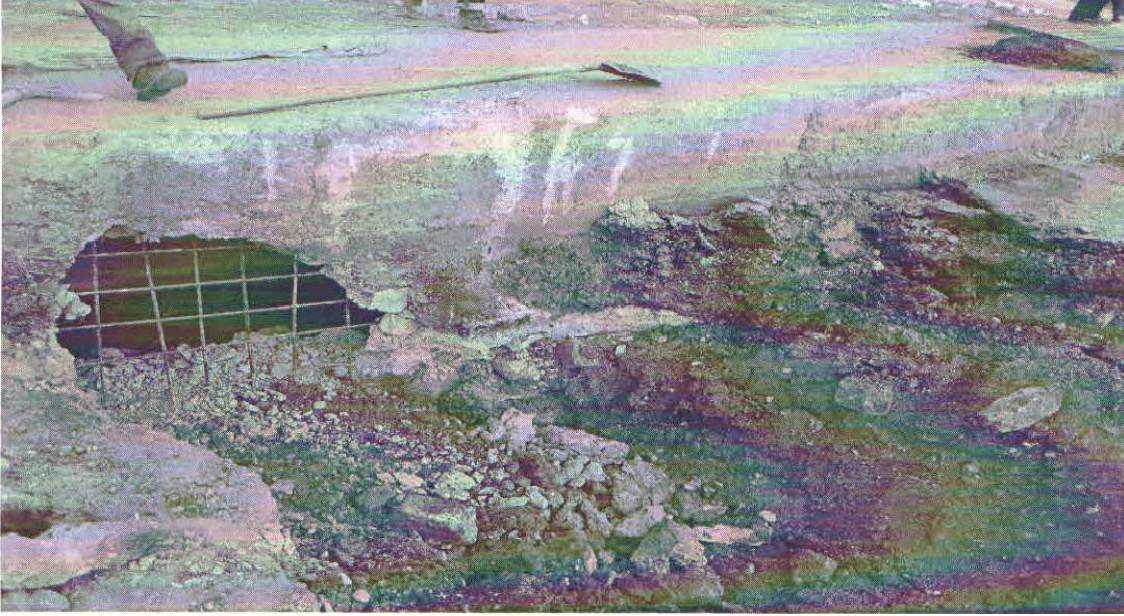
Şekil 3.4.Sülfat etkisine uğramış beton

Tillo-1 bölgesinde çalışma alanı içerisinde Belediye verilerine göre 22 yıl önce yapılan hidrolik sanat yapısına ait donatı korozyonu ve beton dokusu durumu.(Görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.)



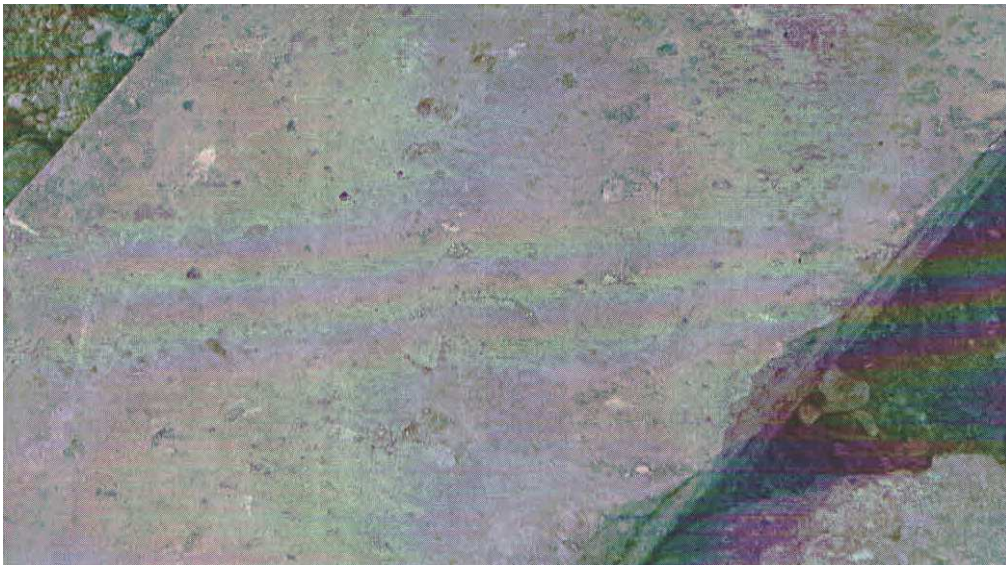
Şekil 3.5. Betonarme yapı

Aynı bölgeye ait çalışma alanı içerisinde Belediye verilerine göre 22 yıl önce yapılan hidrolik sanat yapısına ait donatı korozyonu ve beton dokusu durumu.(Görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.)



Şekil 3.6. Betonarme yapı

Yeni Mahalle bölgesinde çalışma alanı içerisinde Belediye verilerine göre 22 yıl önce yapılan hidrolik sanat yapısının beton doku durumu görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmektedir.



Şekil 3.7. Betonarme yapı

Karayolları tarafından 18 yıl önce yapılan yer üstü drenaj hendek betonu (Görüldüğü gibi sülfat etkisi görülmemektedir.)



Şekil 3.8.Hendek Betonu

Karayolları tarafından 15 yıl önce yapılan 5-6 metre derinlikte yarma kesitinde yer üstü drenaj hendek betonu üzerine, yağışlar sonucu zemindeki sülfatın yıkanıp beton yapıyı etkilemediği görülmektedir.



Şekil 3.9. Yöreden görüntü

Bu inceleme Siirt ve çevresinden alınan toprak numunelerinin sülfat ve beton yapıların durabilite, kimyasal reaktivite ve çevresel etkilerin tespiti amacıyla yapılmıştır.

TS 3440 'da yer alan zararlı etkili maddeler bulunan zeminlerin genel görünüş özellikleri genel olarak, kendilerini normal zeminlerden ayıran, kahverenginden sarımtırak kahverengi pas lekeleri gösteren zeminler daha da şüpheli kabul edilmektedir. Koyu kahverengi ile siyah arasındaki bir humus tabakasının altında bulunan ve açık griden beyaza kadar değişebilen renklerdeki tabakalar ise asitli karaktere işaret etmektedir. Ancak hiç zararlı etkisi olmayan birçok killerin doğal renginin kahverenginden sarımtırak renge kadar değişen renklerde bulunduğu gözden uzak tutulmalıdır. Ayrıca jeolojik haritalardaki jips, anhidrit veya diğer sülfatlar olarak bilinen detaylı kimyasal incelemeler yapılmalıdır. Siirt ilinin bazı mahallerinden alınan toprak numunelerinin analiz sonuçları Çizelge'3.1 de gösterilmiştir. Siirt ili ve çevresinde alınan numunelerin sülfat oranları TS EN 12457-4 Standartlarının sınırlarına yakın veya fazla olduğu tespit edilmiştir. Siirt ili ve çevresinde alınan numunelerin sülfat oranları TS EN 12457-4 Standartlarına göre uygunluğu Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Toprak analiz sonuçları

Parametre		Analiz Sonucu					
		Tillo-1	Yeni Mah.	9051 Çakmak Mah.	8653 Çakmak Mah.	Şeyh Zeynep	9313/1 Çakmak Mah.
Sülfat	Mg/L	10,1	9,8	10,5	13,8	12,3	15,1
Klorür	Mg/L	7	5	10	15	22	12

Çizelge 3.2. Analiz edilen noktaların TS 12457–4 Standartlarına uygunluğu

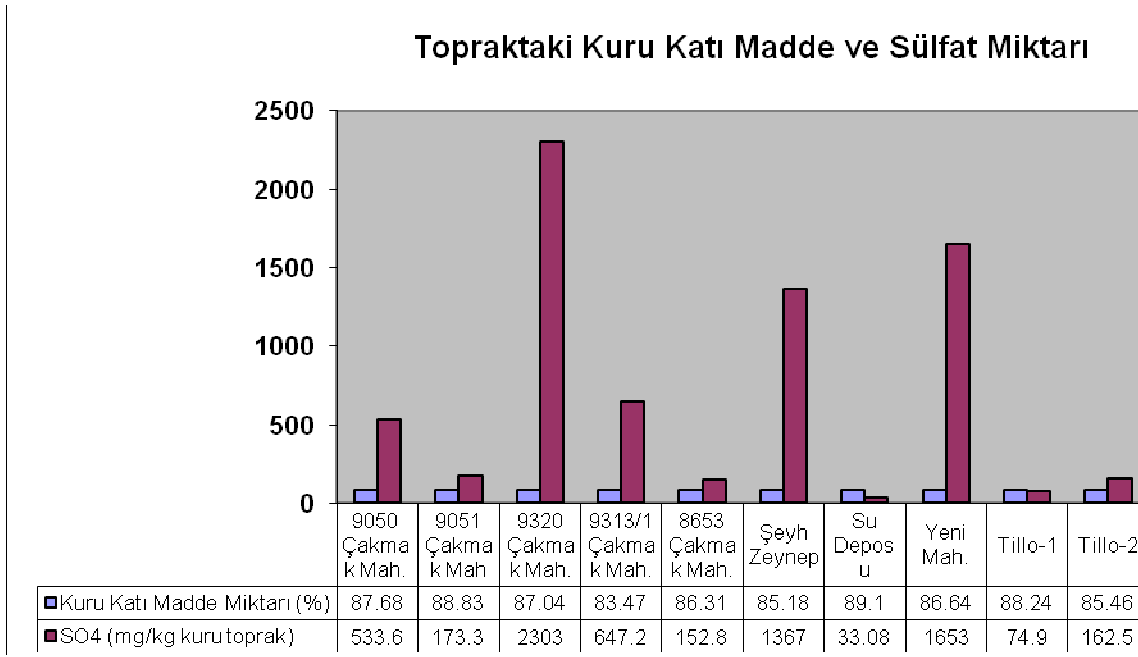
Sıra No	Analiz Edilen Noktalar	Parametreler		TS 12457–4 Standartları	
		Sülfat (mg/l)	Klorür (mg/l)	Sülfat (mg/l) Max 15	Klorür (mg/l) Max 25
1	Tillo–1	10,1	7	Uygun	Uygun
2	Yeni Mah.	9,8	5	Uygun	Uygun
3	9051 Çakmak Mah.	10,5	10	Uygun	Uygun
4	8653 Çakmak Mah.	13,8	15	Uygun	Uygun
5	Şeyh Zeynep	12,3	22	Uygun	Uygun
6	9313/1 Çakmak Mah.	15,1	12	Uygun Değil	Uygun
7	STP 3	10,4	7	Uygun	Uygun
8	STP 15	10,2	5	Uygun	Uygun
9	STP 30	15,4	10	Uygun Değil	Uygun
10	SBH 2	13,8	15	Uygun	Uygun

Sülfat analizleri ‘‘ SM 4500-E Turbidimetre Method’’ deneyi sonucunda elde edilen bu verileri TS EN 12457–4 Standartlarına göre değerlendirirsek,

Çizelge 3.3. SM 4500-E Turbidimetre Method Deney Sonucu

Sıra No	Analiz Edilen Noktalar	Parametreler		TS 12457–4 Standartları	
		Kuru Katı Madde Miktarı(%)	SO ₄ ⁻² (mg/Kg Kuru Toprak)	Kuru katı madde mik. (% 100)	SO ₄ ⁻² (mg/Kg Kuru Toprak)
1	9050 Çakmak Mah.	87,68	533,6		
2	9051 Çakmak Mah.	88,83	173,3		
3	9320 Çakmak Mah.	87,04	2302,4		
4	9313/1 Çakmak Mah.	83,47	647,2		
5	8653 Çakmak Mah.	86,31	152,8		
6	Şeyh Zeynep	85,18	1367,7		
7	Su deposu	89,10	33,8		
8	Yeni Mah.	86,64	1653,3		
9	Tillo-1	88,24	74,9		
10	Tillo-2	85,46	162,5		

Siirt ilinin bazı semtlerindeki alınan toprak numunelerinin sülfat oranları Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Siirt İli semtlerinin topraktaki sülfat oranları

Diyarbakır Karayolları 9.Bölge Müdürlüğü Araştırma Başmühendisi Sayın M.Ali Sabaz'a göre ise sülfatlı zeminlerin sadece Siirt ve çevresinde değil Şırnak ili ve çevresinde de ciddi oranda yüksek olduğu görüşündedir.

3.2. Malzemeler

3.2.1. Sodyum Sülfat Çözeltisinin Hazırlanışı

Hazırlanan karışımların dayanımlarının 25 MPa olarak dizayn edilmiş 150x150x150 mm boyutlu küp örnekleri sülfat etkisine bırakılmıştır. ASTM C1012'ye göre 50 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi kullanılmalıdır. Ancak, daha önce yapılan çalışmada söz konusu çözeltinin, hazırlanan karışımların sülfat dayanıklılığı açısından farklılıklarını ortaya koymada yetersiz kaldığı gözlenmiştir (Tosun vd. 2003). Bu nedenle, bu çalışmada 150 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Sülfat çözeltisi örneklerle iki şekilde etki ettirilmiştir. Başlangıçta çözeltinin pH değeri 8,0 olarak ölçülmüştür. Zamanla harçların kirecinin çözülmesi sebebiyle pH'ı artan çözelti 4 haftada bir değiştirilmiştir. Sülfatın Betona Etki Mekanizması Sülfat korozyonu, reaksiyon ortamında su bulunduğu zaman mümkündür. Betonla temas halinde bulunan sülfat iyonu, çimentonda bulunan C₃A ile reaksiyona girerek candlot tuzu olarak

isimlendirilen bir tuz oluşumuna neden olur. Bu tuzun oluşumu sırasında çok büyük bir hacim artışı meydana gelir. Bu istenmeyen bir durumdur. Hacim genişmesi sırasında, beton dokularında meydana gelen içsel gerilmeler ve boşluklar betonu zayıflatarak çatlatır, bazen de tamamen parçalanmasına yol açar.

3.2.2. Çimento

Beton karışımlarında Ergani Limak firmasının CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmış olup , fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4 te verilmiştir

Çizelge 3.4. CEM I 42,5 R *Portland* Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Analiz Sonuçları					
	%			%	
SiO ₂	20,0		MgO	1,42	
CaO	61,61		SO ₃	2,80	
Al ₂ O ₃	5,82		K ₂ O	0,92	
Fe ₂ O ₃	3,62		Na ₂ O	0,18	
Kızdırma kaybı	2,8 < 5 TS EN197-1 üst sınır değerini sağlıyor.				
40µm (%)	90µm (%)	200µm (%)	Özgül ağırlık(g/cm ³)	Blaine Değeri (cm ² /g)	
13,60	0,90	-	3,14	3524	

3.2.3. Agrega

Beton numune üretiminde kullanılan agrega Diyarbakır ilindeki bir beton santralinden temin edildi. Kullanılan iri agrega ve ince agrega dere agregası ise doğal dere kumudur. İri agregada doğal dere kırma bazalta nazaran mukavemeti düşüktür fakat doğal dere doğal aşınımına uğradığı için betonda işlenebilirliği kolaydır aynı durum iri kırma bazalt için geçerli değildir. Kırma bazaltın aşınmış yüzeyi olmadığından beton karışımında işlenmesi zordur.



Şekil 3.11. Bölgeç yardımıyla agrega numune alımı

Beton santralinden alınan agregaların nemini almak için bir müddet etüvde bırakıldı.



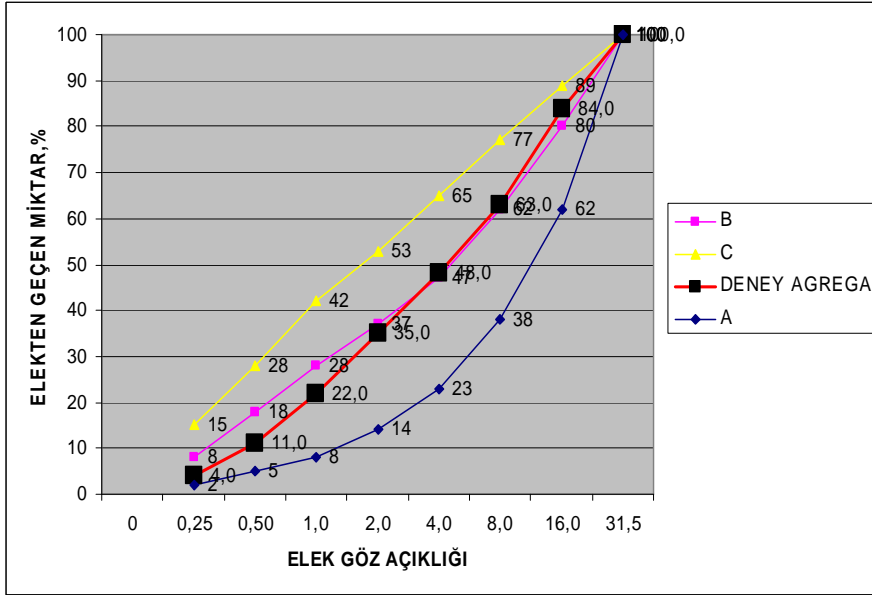
Şekil 3.12. Etüv

Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü Araştırma Başmühendisliği Beton Laboratuvarında yapılan deneyimizde kullanılan agregaya ait özellikler Çizelge 3.5.'te verilmektedir. Beton karışımında iri agregalar dere çakıl agregası ve doğal yıkanmış dere kumu kullanılmıştır.

Çizelge 3.5. Agregaların Granülometri Değerleri ve Fiziksel Özellikleri

	Yüzde Geçen Miktar			Kimyasal Katkı
	Dere Çakıl (15-30)	Dere Çakıl (7-15)	Doğal Kum (0-5)	
31.5 (mm)	100	100	100	
16 (mm)	43,5	100	100	
8 (mm)	1,1	49,3	100	
4 (mm)	-	12,1	84,8	
2 (mm)	-	6,4	62,1	
1 (mm)	-	2,1	40,5	
0.5 (mm)	-	1,2	19,3	
0.25 (mm)	-	1.0	7,2	
Agrega oranları(%)	28	18	54	
Doygun yüzey kuru özgül ağırlığı	7,746	2,735	2,655	1,170–1,191
Su emmesi	1,2	1,4	1,7	
Los A. Aşınma	% 20 kayıp			

Agrega numunesinin sahip olduğu gradasyonun uygunluğunu kontrol edebilmek için agreganın maksimum tane boyutu 31,5 mm olan agreganın numunelerinin Türk standardına göre gradasyon sınır değerlerine uygunluğu Şekil 3.13.'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13. Agrega gradasyon eğrisi

Şekil 3.13'te A,B,C olarak gösterilmiş üç gradasyon eğrisi bulunmaktadır. Kırmızı çizgiyle gösterilen çizgi, deney agregasının çizgisi olup A ve B eğrileri arasında kaldığından deney agregası 'çok iyi' olarak tanımlanmaktadır.

3.2.4. Mineral Katkılar

Limak Ergani Çimentonun Laboratuvarında yapılan deneylerde Piknometre ve Blaine deney aleti yardımıyla numunelerin çeşitli deneyleri yapıldı. Deneyde kullanılan deney aletleri Şekil 3.14.' te gösterilmiştir. (Şekil 3.14 a) Piknometre cihazı (Şekil 3.14 b) Blaine deney aleti (Şekil 3.14 c) XRF cihazı

(a)



(b)



(c)



Şekil 3.14. Deney Aletleri

3.2.4.1. Uçucu Kül

Beton karışımlarında Kahramanmaraş Afşin Elbistan termik santraline ait uçucu kül kullanılmış olup, fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Uçucu kül Fiziksel ve Kimyasal Analiz Sonuçları

Bileşik Adı	%	Bileşik Adı	%
SiO ₂	54,28	MgO	1,31
Al ₂ O ₃	23,58	SO ₃	0,53
Fe ₂ O ₃	8,80	K ₂ O	2,00
CaO	5,00	TiO ₂	1,48
S+A+F>70	86,66	MnO	0,07
Kızdırma.kaybı	1,72	Ba	0,17
45µ	0,73	Blaine (cm ² /gr)	2660

Uçucu Külün SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ bileşenleri toplamı S+A+F = % 86,66 yani > % 70 sınırlarında olduğu için TS 639 ve ASTM C 618' in şartlarını sağladığı görülmektedir.

3.2.4.2. Yüksek Fırın Cürufu

Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda Çizelge 3.7.'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Analiz			
Bileşik Adı	%	Bileşik Adı	%
SiO ₂	39,58	SO ₃	0,4
Al ₂ O ₃	11,13	Kızdırma Kaybı	0,34
Fe ₂ O ₃	0,86	K ₂ O	0,94
CaO	36,07	TiO ₂	0,85
MgO	7,27	MnO	1.17
S+A+F<70	51,57	Ba	1.09
Blaine (cm ² /gr)	4574	45µ	0,02

3.2.5. Mineral Katkı İçeren Betonların Karışım Oranlarını Hesaplama Yöntemleri

Uygulamada mineral katkıların beton içerisinde kullanılması iki şekilde olmaktadır:

1. Mineral katkılı çimentoyu portland çimentosu yerine kullanmak,
2. Mineral katkılı ilave bir bileşen olarak beton üretim sırasında betonun içine karıştırarak şeklinde yapabiliriz.

Son zamanlarda, uçucu küllü betonun bileşenlerini bir bütün olarak ele alma ve de uçucu küllü betonu bir denk referans betonla karşılaştırmadan tek bir malzeme olarak inceleme eğilimi vardır. Bu farklı görüşlerin sonucunda, uçucu külün betona katılımında üç temel karışım oranı metodu geliştirilmiştir. (Berry ve Malhotra 1986.)

1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması
(Basit yer değiştirme yöntemi)
2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması
(İlave yöntemi)
3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine koyulması (Kısmi yer değiştirme yöntemi) Modifiye edilmiş yer değiştirme yöntemi

3.2.5.1. Basit Yer Değiştirme Yöntemi

Basit ikame metodu, mineral katkıların beton karışımındaki portland çimentosunun bir kısmı ile belirli bir oranda doğrudan yer değiştirmesi şeklinde tanımlanır. Mineral katkıların beton karışımına bu şekilde eklenmesi beton ekonomisi için oldukça önemlidir. Yapılan araştırmaların çoğunluğu göstermektedir ki, portland çimentosunun hangi yüzdeyle olursa olsun ister hacimce ister ağırlıkça bire bir mineral katkıyla yer değiştirmesi halinde betonun basınç, eğilme dayanımının üç aya kadar olan nem kürü durumunda düşmekte olduğunu, altı aydan daha fazla sürede ise daha fazla dayanım artışı olduğunu göstermiştir. 3-6 ay sonrasında , %20 'ye kadar uçucu kül ikamesi portland çimentosu betonuna göre bu yöntem dayanım artışına neden olmaktadır. Uçucu kül ilk defa kullanıma girdiği kütle beton uygulamalarında, bu erken yaş dayanım azalmaları arzu edilen ısı yükselişi azalmasına nazaran daha az yapısal öneme sahiptir. Çoğunlukla bu tip uygulamalarda bu metot kullanılmıştır (Metha 1996).

3.2.5.2. İlave Yöntemi

Bu yöntemde karışımda kullanılan çimento miktarında bir azaltma yapılmadan mineral katkı eklenir. Beton içerisindeki efektif bağlayıcı miktarı bu yöntem sayesinde artırılır. Mineral katkıların bu şekilde beton karışımına eklenmesi atıl malzeme olan yapay puzolanların geri dönüşümüne kazanılmasında yarar sağlamaktadır. Diğer karışım ayarlamaları agrega bileşiminin değiştirilmesiyle yapılır. Bu yöntemin bir uygulaması Price tarafından yapılan Güney Saskatchewan baraj inşaatı için beton malzeme araştırması sonucunda oluşmuştur. Sülfatın mukavemetinden dolayı minimum bir çimento faktörü ve çimentodan çok ince agrega yerine bir puzolan kullanmanın önemli olduğu düşünülmüştür. İlave yapılan mineral katkıların tüm yaşlarda genellikle dayanım artışına sebep olduğu bulunmuştur. Artışların yedi güne kadar az olduğu fakat üç aylık ve bir yıllık periyotta 6.9 MPa. düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir. Mineral katkı ilavesi ile elde edilen artışların aynı miktarda çimento ilave edilmesiyle edilen artışlara eşit veya bu artışlardan fazla olduğu gözlenmiştir.

3.2.5.3. Kısmi Yer değiştirme Yöntemi

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

3.3. Beton Karışım Oranları

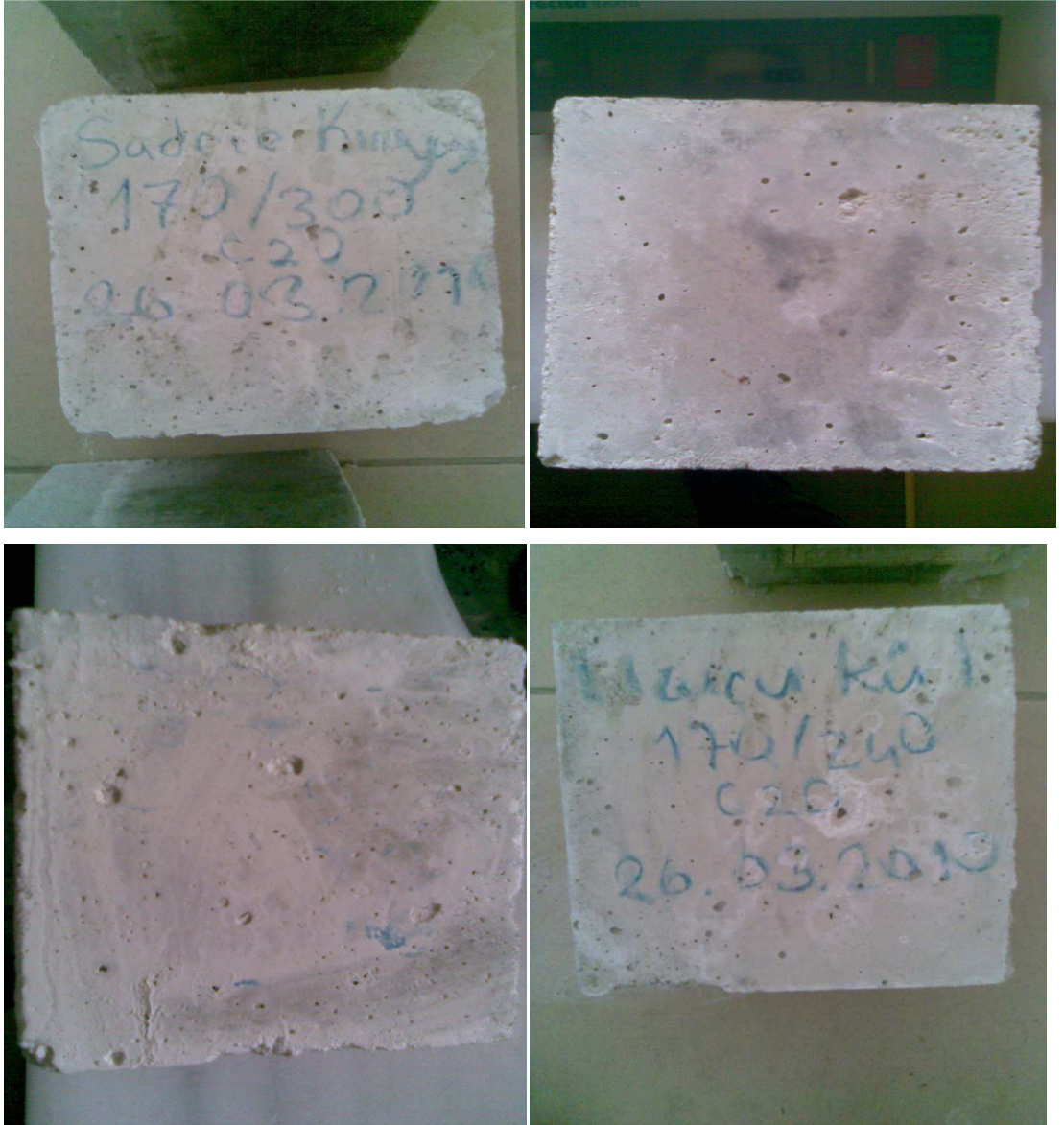
Karışımda Şanlıurfa Limak firmasının CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile sülfata hem dayanıklı hem de ekonomik beton edebilmesi amaçlandığından portland çimentonun ağırlıkça %20 si oranında çeşitli mineral katkı malzemeleri karıştırılmıştır. Ayrıca betonu akışkanlaştırmak için hiper akışkanlaştırıcı kimyasal madde kullanılmıştır. Beton karışım oranları 1 m³ için Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. 1 m³ betondaki karışım miktarları

	U.K.	Y.F.C.	Mineral
	katkılı	katkılı	Katkısız
	1 m ³		
	Kg		
SU	170	170	170
ÇİMENTO	240	240	300
MİNERAL KATKI (UÇUCU KÜL)	60	60	-
ÇAKIL 15-30	348	348	348
ÇAKIL 7-15	544	544	544
KUM 0-5	1013	1013	1013
KİMYASAL KATKI	1,8	1,8	1,8

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Betonun dayanımını olumsuz etkileyen çevresel olarak en büyük problemlerin başında sülfat ataklarına bağlı sülfat korozyonu gelmektedir. 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. Karayolları 9.Bölge Müdürlüğü araştırma laboratuvarında yapılan deneylerde hazırlanan beton numunelerinin 28 gün sonra sülfat etkisi ile bozulması Şekil 4.1.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1.Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş numuneler

4.1. Taze Beton Sonuçları

Taze beton sonuçlarını alabilmek için numuneler TS EN 12350–1 standartlarına uygun şekilde slump deneyine tabi tutuldu.



Şekil 4.2. Slump Deney Aleti

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun beton harcında katılaşmaya sebep olduğu harcın işlenmesini zorlaştırdığı tespit edilmiştir. Taze beton slump testi sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Taze beton slump testi sonuçları

Taze Beton Sonuçları	
	Çökme-Slump (cm)
UÇUCU KÜL	13
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	10
MİNERAL KATKISIZ	18

Yüksek fırın cüruf katkılı beton numunesi yüksek fırının tutucu özelliğinden dolayı slump deneyinde diğer numunelere göre düşük sonuç vermiştir.

4.1.1. Uçucu Küllerin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkileri

Uçucu kül çok ince bir puzolonik malzemedir. Betonda çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül konularak kullanılması betonun su ihtiyacını, uçucu külsüz olarak üretilen betona göre aynı slump değeri için azaltmaktadır. Uçucu külün su ihtiyacını azaltmaktaki rolü esas olarak inceliğine dayanmaktadır. İnceliğin artması su ihtiyacını arttırırken, küresel şekillenmiş olan taneler içsel sürtünmeyi azaltmaktadır, dolayısıyla su ihtiyacında azalma olmaktadır. Bu nedenle beton karışım oranları su ihtiyacı üzerinde etkin rol oynar. Uçucu külün puzolanik reaksiyonundan yararlanarak çimento miktarı azaltılarak ve uçucu küllü betonlarda uçucu külsüz betonlarda uçucu külsüz betonla aynı slump değerini elde etmek için su - çimento oranı azaltılır. Diğer taraftan uçucu kül ince agreganın yerine kısmi yerleşim yapılırsa su ihtiyacı yüksek olabilir.

4.1.2. Yüksek Fırın Cürufunun İşlenebilirlik Üzerindeki Etkileri

Yüksek fırın cürufllu betonlar, aynı slump değeri için, Portland çimentoları ile yapılmış betonla kıyaslandıklarında, azaltma miktarı %3'ten fazla olmamasına rağmen, daha düşük su ihtiyacı gösterirler. Bu azalma, çoğunlukla, cüruf partiküllerinin pürüzsüz yüzey dokusuyla ve kimyasal reaksiyonlarda meydana gelen gecikmeyle ilgilidir (Nevman, 2003). Öte yandan, yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi, cüruf katkılı betonların işlenebilirliğinin olumlu yönde etkileneceğinin göstergeleridir.

4.2. Sertleşmiş Beton Sonuçları

Slump deneyinden sonra taze beton TS EN - 206 Beton standardında 15 x 15 cm küp numune kalıplarına bırakılmıştır.

Numune kalıpları su sızdırmaz ve su emmez özellikte olup betonun kalıpla temas edeceği yüzeylere gres yağı sürülüp sertleşen betonun kalıptan rahat çıkartılması sağlanmıştır. TS EN – 206 Standartına uygun şekilde üretilen beton numuneler hazırlanışından 24 saat 20 °C sıcaklıkta rüzgârdan ve nem kaybından korunan bir ortamda sertleşmesi beklendi. Sertleşen beton numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra, deney yapılıncaya su ve magnezyum sülfat çözeltilerinde küre maruz bırakıldı.

4.2.1. Birim Hacim Ağırlığı

Hazır beton üreticisinin hedef değerine göre birim ağırlığa, $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ tolerans getirilmiştir. Örneğin beyan edilen değer 2350 kg/m^3 ise tolerans sınırları $2350 \pm 100 \text{ kg/m}^3$ olmaktadır.

Çizelge 4.2. Küp numunelerin 28 gündeki birim hacim ağırlıklar

Küp numunelerin 28 gündeki birim hacim ağırlıklar			
	% 15 lik Sodyum Sülfat	Su küründe	
	g/cm^3	g/cm^3	
UÇUCU KÜL	2,40	2,39	- 0,9958
MİNERAL KATKISIZ	2,40	2,38	-0,9911

4.2.2. Numunelerin Ağırlık Değişimi

Puzolan katkı malzemeleri çimento'dan daha ince taneli olduklarından agregaların arasını daha iyi doldurabilmekte ve betonun yüzeyinde daha az geçirimli bir tabaka oluşturmaktadırlar. Su kürüne ve sülfat kürüne maruz bırakılan numunelerde puzolan katkı kullanılan beton numunede daha az ağırlık artışı olduğu tespit edilmiş bunun nedeni olarak puzolanların beton permeabilitesini düşürdüğünü söyleyebiliriz. Su kürüne ve $1500 \text{ mg/l Na}_2\text{SO}_4$ çözeltisi etkisinde bırakılan beton örneklerin 28. ve 150. gün sonunda ağırlık değişimleri aşağıdaki çizelge 4.3. 'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelerin ağırlık değişimi

Numune	Su Kürüne maruz numune ağırlığı 28 gün	1500mg/l Na_2SO_4 Çözeltisine Maruz Numune Ağırlığı		Artış %
		28 gün	150 gün	
Uçucu Küllü katkı	8032,7	8108,3	8151,80	0,53
Katkısız	8049,8	8107,3	8170,40	0,77

4.2.3. Basınç dayanımı testleri

Kür havuzundan çıkarılan numuneler doymuş kuru yüzey haline getirilmiş ve TS EN 12390-3'e göre 3 kN/sn yükleme hızında hidrolik yük kontrollü preste kırılarak basınç dayanımları elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Beton Basınç Dayanımları

% 15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki Küp numunelerin 7 Günlük Basınç Dayanımı	
	Mpa=N/mm ²
UÇUCU KÜL	23,71
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	15,92
MİNERAL KATKISIZ	27,88

Numunelerin saklandığı (150 g/l) sülfat çözeltileri 7.gün ve 28. Gün basınç dayanım testleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin sodyum sülfat çözeltisinde bekletilenlerin dayanım değerleri u küründe bekletilenlere göre düşük çıkmıştır. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6. 'da karşılaştırmalı olarak ise Çizelge 4.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. % 15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı

% 15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı	
	Mpa=N/mm ²
UÇUCU KÜL	33,46
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	23,24
MİNERAL KATKISIZ	34,52

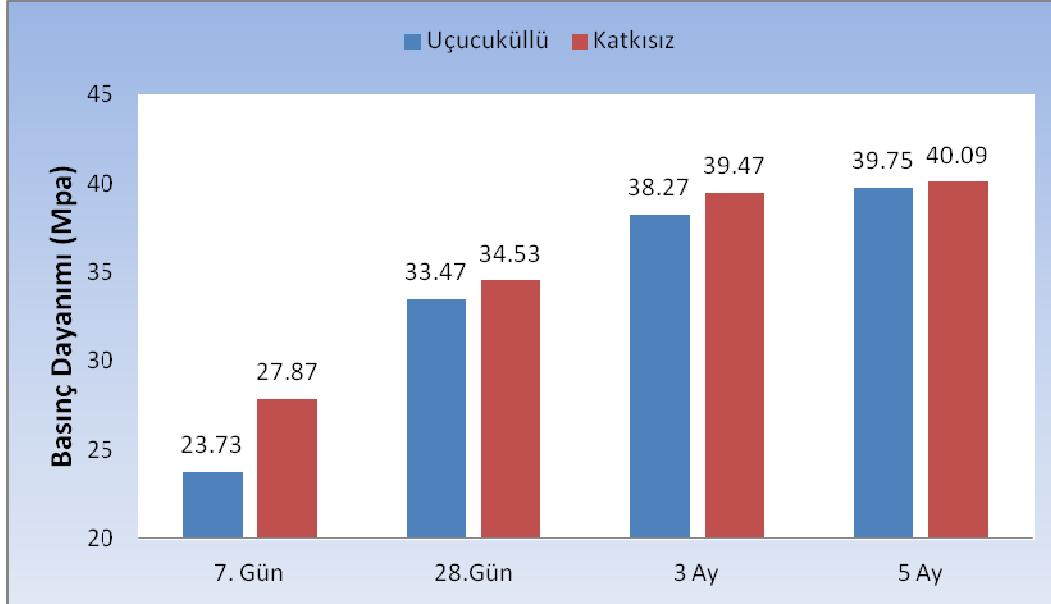
Çizelge 4.6. Su kürüne maruz bırakılmış Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı

Su kürüne maruz bırakılmış Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı	
	Mpa=N/mm ²
UÇUCU KÜL	33,75
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	25,66
MİNERAL KATKISIZ	36,03

Çizelge 4.7. Küp numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı

	Su Küründe Mpa= N/mm ²	% 15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki
uçucu kül	33,75	33,46
yüksek fırın cürufu	25,66	23,24
mineral katkısız	36,03	34,52

Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere katkısız beton numuneler erken yaşta basınç değeri yüksektir fakat kürünü alan uçucu kül katkılı beton ileriki yaşlarda dayanım artışı katkısız göre daha olmuştur.



Şekil 4.3. Beton Basmaç Dayanımları

4.2.4. Numunelerin Birim Hacim ağırlıkları

Numunelerin ağırlık değışimleri bekletildikleri kürlerde farklı değerler verdiği tespit edilmiştir. Numunelerin birim hacim ağırlıkları Çizelge 4.8. ve 4.9.' da verilmiştir.

Çizelge 4.8. %15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki birim hacim ağırlıklar

%15 lik Sodyum Sülfat çözeltisindeki Küp numunelerin 28 gündeki birim hacim ağırlıklar	
	g/cm ³
UÇUCU KÜL	2,40
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	2,35
MİNERAL KATKISIZ	2,40

Çizelge 4.9. Su kürünün çözeltisindeki birim hacim ağırlıklar

Su kürüne maruz bırakılmış Küp numunelerin 28 gündeki birim hacim ağırlıkları	
	g/cm ³
UÇUCU KÜL	2,39
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	2,27
MİNERAL KATKISIZ	2,38

4.3. Uçucu Külün Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkileri

4.3.1 Dayanım Gelişimi

Uçucu kül içeren betonlarda, basınç ve eğilme mukavemetlerinin kazanımı birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan bazıları uçucu külün, betona yerleştirilme şekli (çimentoya ilave edilmesi veya çimentodan bir miktar azaltarak çeşitli miktarlarda kül eklenmesi), puzolanik aktivitesi, kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu, ortam sıcaklığı ve diğer kür koşullarını sayabiliriz (Özturan 1993). Uçucu külün inceliği çeşitli metotlarla artırılarak, beton mukavemet gelişimini etkileyebilmektedir. 1992 yılında Tazawa ve arkadaşları, değişik inceliklerde uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok fazla arttığını gözlemlemişlerdir (Özturan 1993). Joaquin ve arkadaşları F-tipi uçucu küle yaptıkları betonlarda ilk mukavemetlerinin kür şartlarından çok etkilendiğini gözlemişlerdir (Özturan 1993).

C sınıfı küller çoğu zaman erken yaşlarda F sınıfı küllerden daha yüksek reaksiyon hızı gösterirler. F sınıfı küller ile yapılan bir çalışmada, pek çok durumda, 45 μ m elekten geçen malzeme yüzdesi ile orantılı olarak tüm yaşlarda puzolanik aktivitenin arttığı neticesi çıkmıştır. Diğer bir çalışmada, eşit ağırlık esasına göre C sınıfı bazı uçucu küllerin portland çimentosu kadar etkili olduğu ortaya çıkmıştır (ACI Commttee 226 1987). Yapılan bir çalışmada, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiği ve bunun da uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiği belirtilmiştir (Özturan 1993). Diğer bir çalışmada, C tipi uçucu külün % 20, 30 ve 35 kullanım oranlarında 7 günde kontrol betonundan daha düşük mukavemetler elde edilmiş, % 20 ve 35 oranlarında 28 günde kontrol betonun mukavemetine erişilirken, 80 günde % 20 kül içeren karışımın mukavemeti kontrol betonunu

geçmekte, % 50 kül içeren beton ise daha düşük mukavemette kalmaktadır (Özturan 1993). Azaltılan çimento miktarından daha fazla kül kullanıldığı zaman basınç dayanımı katkısız betonunkine eşit ve hatta daha yüksek bir seviyeye getirilebilmektedir. Bu sonuçlar, beton karışımının tipine, kullanılan malzeme cinsine ve fazladan katılan kül miktarına göre değişmektedir (Yeğınobalı 1971).

4.3.2.Elastisite Modülü

Uçucu kül içeren betonların elastisite modülleri, betonların basınç dayanımlarına benzer nitelikte özellikler gösterir. Erken yaşlarda biraz düşük, ilerleyen yaşlarda ise daha büyüktür. Genelde uçucu kül, uçucu küllü ve külsüz aynı dayanımdaki betonlar kıyaslandığı zaman elastisite modülünü artırır. Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de arttırmaktadır (Berry ve Malhotra 1986). Betonun elastisite modülü, büyük miktarda agrega miktarı ve rijitliği ile beton dayanımından (su/çimento oranı ve kür koşulları) etkilenir. Genel olarak dayanım azaldığı zaman elastisite modülü de azalır. Mineral katkı ilavesinden doğrudan etkilenmez. Bilodeau ve Malhotra %58 oranında F tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bunun da hidrate olmayan uçucu kül tanelerinin agrega niteliğinde etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir (Prepared by the University of Wisconsin-Milwaukee).

Betonun basınç dayanımını kontrol eden özellikler az miktarda elastisite modülünü de etkiler. Elastisite modülü, basınç dayanımı gibi, uçucu külsüz beton ile kıyaslandığında erken dayanımlarda düşüktür ve son dayanım değerinde de yüksektir (Mehta 1989).

C sınıfı küller üzerinde yapılan bir çalışmada uçucu küllü betonun elastisite modülü ve basınç dayanımı ilk yaşlarda biraz küçüktür ve daha sonraki yaşlarda ise uçucu külsüz betonlara nazaran bir miktar yükselir. Uçucu külün elastisite modülü üzerine olan etkisi, uçucu külün basınç dayanımı üzerine olan etkisi kadar belirgin değildir. Yine aynı çalışma neticesinde, uçucu kül kullanımından çok, çimento ve agrega karakteristiklerinin elastisite modülü üzerine etkisi olacağı belirtilmektedir (ACI Commttee 226 1987).

4.3.3. Sünme ve Rötme

Yapılan çalışmalara dayanarak, erken yaşlarda mineral katkı içeren betonlar kontrol betonlar ile kıyaslandığı zaman daha büyük, ilerleyen yaşlarda ise daha küçük sünme şekil değiştirmeleri yaptıkları ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, uçucu külün betonun sünmesi üzerinde yaptığı etkinin öncelikle basınç dayanımını etkileme miktarı ile sınırlı olduğu ile ortak bir fikir vardır (Massazza ve Costa 1981). İçerisinde mineral katkı bulunan betonların rötme davranışı genelde sünme davranışına benzerlik göstermektedir. Yapılmış çalışmalarda, %25 oranına kadar yer değiştirilerek uçucu kül kullanılmış ve iyi şekilde kür görmüş betonlarda önemli bir fark görülmemiştir. Bir başka çalışmada ise, pek çok uçucu küllü beton ile kontrol betonu arasında rötme yönünden çok az miktarda fark görülmüştür (Özturan 1993).

4.3.4. Uçucu Küllerin Sülfat Saldırısı Üzerindeki Etkileri

Sudaki, zemindeki ve deniz suyundaki sülfat iyonları beton yapılarında bozulmaya yol açabilir. Sülfat saldırısının zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli (C_3A) ve kalsiyumlu ($Ca(OH)_2$) bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genişleme yaratarak agrega - çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır (ASTM C 1012 1995, Baradan ve ark. 2002).

Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da birçok bölgede rastlanır. Na_2SO_4 , $Ca(OH)_2$ ve C_3A ile, $CaSO_4$ ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer. Deniz suyunda da bulunabilen $MgSO_4$, $Ca(OH)_2$ ve C_3A 'nın yanı sıra kalsiyum - silikat - hidrate (CSH) yapıyla da reaksiyona girebilmektedir (Neville 1997, Baradan ve ark. 2002).

Reaksiyonun gelişimini, sülfatlı ortamın şiddeti, betonun geçirimsizliği, betonda kullanılan çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir. Sülfat dayanıklılığını arttırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanılabilir. Puzolanlar, $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak

sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)_2 ve C_3A oranının azaltılmasını sağlar (Akman 1992, Mehta ve Monteiro 1997, Yeğınobalı 1999).

Monteiro ve diğlerleri tarafından yapılan çalışmada, betonun sülfat saldırısından zarar görmemesi için kritik bir bölgenin bulunduğu, çimentonun C_3A miktarının %8'den az, su/çimento oranının 0.45'in altında olması halinde 40 yıllık maruz kalma süresinde hasar oluşmadığı, çimento yerine %25 ve %45 uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığı belirtilmektedir (Monteiro ve Kurtis 2004).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda Siirt ilinin bazı semtlerinden alınan toprak numunelerinin sülfat değerlerinin TS 12457-4 Standartlarının üst sınır değerlerine yakın veya fazla olduğu saptanmış olup bölgedeki bazı beton ve betonarme yapılarda bu sülfatın yıpratıcı etkisiyle bozulmalar olduğu tespit edilmiş ayrıca betonun dayanımını ve dayanıklılığını da olumsuz etkilediği görülmüştür.

Sülfat; beton ve betonarme yapılara toprak, yer altı suyu, kanalizasyon suyu, deniz suyu vb. etkilerle temasa geçerek beton ve betonarme yapılarda dayanımı, Siirt yöresine ait eski yapılardan çekilmiş fotoğraflarından da görüldüğü üzere olumsuz etkilediği görülmektedir. Bu durum karşısında bölgedeki beton ve betonarme yapılarında sülfat etkisine karşı tedbirli olunması gerekebilir.

Sülfat etkisi betonda yavaş ilerleyen kimyasal bozulma mekanizmasıdır. Kısa süreli çalışmalarda sülfat yoğunluğunun yüksek tutulması sülfatın yıpratıcı etkisini betonda daha kısa sürede görmemizi sağlaması amacıyla hazırlanan %15'lik sülfat çözeltisinin çalışmamız için uygun olacağı düşünülmüştür.

Standart kür havuzunda suda kür edilen numunelerin 28 günde ki basınç dayanımları %15'lik sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerden yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber, mineral katkı malzemelerinin karışıma ikame edilerek üretilen beton numunelerin herhangi bir mineral katkı ikame edilmeden hazırlanan beton numunelerinin basınç dayanımı değerinden daha yüksek olduğu deney sonucunda görülmüştür.

Sodyum sülfat çözeltisi beton numuneler üzerinde basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. 5 ay süreli sülfat kürüne maruz bırakılan numunelerde ise, beton karışımında mineral katkıları(uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi.) portland çimento yerine % 20 oranında ikame edilerek hazırlanan numunelerin basınç dayanımı ve dayanıklılığı, mineral katkıların ikame edilmeden hazırlanan numunelerden daha yüksek çıkmıştır.

Deneyde kullanılan Yüksek Fırın Cürufu (YFC) alındığı ortamdan uygun muhafaza edilmemiş olması ve bu yüzden de yüksek verim vermediği düşünülmektedir. Oysa geçmiş çalışmalarda görüldüğü üzere YFC, mineral katkıları içerisinde en yüksek dayanımı veren mineral katkı malzemesidir.

Mineral katkı malzemelerinden uçucu külün özgül yüzey ağırlığı blaine değeri hesabıyla portland çimentonun değerinden düşük çıktığı ve bu ince taneliği sayesinde beton boşluklarını daha iyi doldurduğu ve bu durumun sayesinde beton yüzeyinde daha az geçirimsizlik sağlayarak ortamda bulunan sülfat etkisiyle oluşabilecek olumsuz etkilere karşı betonun dayanımını arttırabileceği sonucuna varılabilir.

Mineral katkılı numuneler küre maruz bırakıldıklarında mineral katkı ikame edilmeyen numunelerin ilk ağırlıklarına göre daha az ağırlık değişimi gösterdiği bu da mineral katkılı betonun daha az geçirimsizliğe sahip olduğunu ve ortam şartlarından daha az etkilendiğini gösterir.

Monteiro ve Kurtis (2003) tarafından yapılan çalışmalarında, betonun sülfat saldırısından zarar görmemesi için kritik bir bölgenin bulunduğu, çimentonun C_3A miktarının %8'den az, su/çimento oranının 0.45'in altında olması halinde 40 yıllık maruz kalma süresinde hasar oluşmadığı, çimento yerine %25 ve %45 uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığı belirtilmektedir.

Mineral katkı malzemelerinin taze betonun priz süresini geciktirdiği gözlemlenmiştir. Priz süresinin geciktirmesi betonun ani sertleşmesinin önüne geçilmesiyle rötre çatlaklarının önüne geçilmesinde olumlu etkisi vardır ancak özellikle beton prizinin gecikmesindeki bir başka sebep olan soğuk hava koşullarında mineral katkıların kullanılması betonda sertleşmeyi istenmeyen kadar geciktirebilir. Betonun erken günlerdeki dayanımının ileriki döneme göre daha düşük olmasına yol açabilir. Mineral katkıları fazla kullandıkları zaman zararlı da olabilirler, çimentodan daha ince taneli yapıya sahip olduklarından betonun su ihtiyacını artırır, donma çözülmeye karşı direnci düşürürler, prizi geciktirdiklerinden sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltırlar, betonun kuruma büzülmesini arttırırlar (Prince 1975, Şimşek 2004).

Sülfata karşı etkili beton üretmenin mineral katkı karışımının yanı sıra beton permeabilitesini düşük tutmak gerekmektedir. Sülfatın şiddetli görüldüğü bölgelerde C_3A ' sı %5'in altında sınırlandırılmış sülfata dayanıklı çimento kullanılabilir veya mevcut portland çimento yerine beton karışımına belli oranlarda ikame olarak mineral katkı malzemeleri kullanılabilir.

Betonun ucuz üretebilmenin yolu katkı malzemelerinin kullanılması ile mümkün olabilir. Beton karışımında kullanılabilecek katkı malzemelerinin başında da mineral katkı

malzemeleri gelmektedir. Türk Standartları'nda belirtilen normlara uymak şartıyla üretilen ve bilinçli olarak yerli yerinde kullanılan mineral katkılar ile hem daha ucuz hem daha dayanıklı beton elde edebiliriz. Kullanılan bu mineral katkıların demir-çelik fabrikalarının ve termik santrallerinden atık malzeme olduğu düşünüldüğünde % 20 oranında ikame edilerek mineral katkı malzemelerinin kullanılması 1 m³ C 25 betonu üretiminde yaklaşık 60 kg çimento tasarrufunun yanı sıra atık malzemelerin geri dönüşümünü de sağlayarak çevreye katkı sağlayabiliriz.

Siirt-Batman yöresine ait toprağın sülfat değerlerinin TS 12457-4 Standartlarının üst sınır değerlerine yakın veya fazla olduğu saptanmış olup bölgedeki beton veya betonarme yapılarda sülfatın olumsuz etkisi karşısında % 20 oranında çimento ile puzolanik (mineral katkı) malzemelerin yer değişimi betonda dayanımı ve dayanıklılığı arttırabileceği sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

Abdun-nur, E.A. 1961, "Fly Ash in Concrete-an Evaluation", Highway Research Board Bulletin, No. 284, Washington D.C.,

ACI Committee 226, 1987, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Materials Journal, Cilt 83, No 5, 381-409

ACI COMMITTEE 226, 1987, Use of fly ash in concrete, ACI Materials Journal, Seprember-October, pp. 381-409

Aitcin, P.C., Autefage, F., Carles-Gibergues, A. 1986, et. al., "Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes", Proc. of 2nd Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, V. 1, 91-114

Akman M.S. 1992, "Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi", İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.

Al-Amoudi, O.S.B. 2002, Attack on Plain and Blended Cement Exposed to Aggressive Sulfate Environments, Cement & Concrete Composites, 24, 305-316.

Anon, Building REsearch Establishment, Digest 250, London, 1982

Arslan,M., 2001. Beton, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

Arslan, M. 2001, " Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayanıklılığı)", Atlas Yayın Dağıtım, yayın no 3, 1.Baskı, stanbul, Ağustos, 157

ASTM C 125, 1994, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 618, 1991,Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM

ASTM C 618, 1994, 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.

ASTM C 1012-95a; "Standard Test Method for Length Change of Hydroulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", USA.

Atiş, C.D. 2000, "Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımı ile Üretilen Betonun Aşınma Direnci", Teknik Dergi, Cilt 11, Sayı 4,

Baboin,R. 1995,"Environmental Conditions Affecting Transportation Infrastructure" Material Perfmance, Pp:48-52,September

Baradan, B. Yazıcı, H., Ün, H. 2002. Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite), DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir, s. 89-185

Bayazıt, Ö.L.1980, Tunçbilek Uçucu Küllerinin Betonun Fiziko Kimyasal ve Mekanik Özelliklerine Etkileri, Doktora Tezi, ADMMA.

- Baykal, G., Özturan, T., Savaş, M., Ramadan, K.1993, “Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları”, End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 89-102
- Berry, E.E., Malhotra, V.M. 1980, “Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review”, ACI Journal, Proceedings, Cilt 77, No 2, 59-73
- Berry, E.E., Malhotra V.M.,1986, Fly ash in concrete, Mineral Siences Laboratory Canmet, Februrary
- Brown, P., ve Hooton, R.D. 2002, Ettringite and Thaumassite Formation in Laboratory Concretes Prepared Using Sulfate-resisting Cements, Cement & Concrete Composites, 24, 61-370.
- BS 3892-1, 1997, Pulverized Fuel Ash for Use in Concrete, BSI
- Chang, T.P., Shieh, M.M. 1996, “Fracture Properties of lightweight concrete”, Cement and Concrete Research, Cilt 26, No 2, 181-188
- Cook, D. J. 1986, Naturel Pozzolanas, Calcined Clay, Shale and Other Soils, Rice Husk Ash – Cement Replecament Materials, Swamy, R. N. (Edit.)Surrey University Press, 1-70.
- Collivignarelli, C., Sorlini, S. 2001, “Optimisation of Industrial Wastes Reuse as Construction Materials”, Waste Management & Research, Cilt 19, No 6, 539-544
- Davies, D.R., Kitchener, J.N. 1996, “Massive Use of Pulverised Fuel Ash in Concrete for the Construction of a UK Power Station”, Waste Management, Cilt 16, No 1-3, 169-180
- Duda, H. W. 1985, Cement data book, Volume 1: İnternational Process Engineering in the Cement Industry, 656 p., Bauverlag Gmbh-Wiesbaden und Berlin.
- Dunstan, M.R.H., Thomas, M.D.A., Cripwel, J.B. et. al.1992, “Investigation into the Long Term In-Situ Performance of High Fly Ash Content Concrete Used for Structural Applications”, Proc. of 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, İstanbul, V.1, 1-20
- ENV 197-1, 1994, Cement-Composition, Specifications and Conformity Criteria-Part 1: Common Cements, CEN
- Erdoğan, T. Y., 1995, Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 1–13.
- Erdoğan, T.Y., Ar, G., Koman, K.1982, “Türkiye Uçucu Külleri (Üretim, Kullanılma Olanakları, Sorunlar, Öneriler), E.İ.E. Gn. Dir., Yayın no:82-19, Ankara
- Erdoğan, T. Y. 2003, Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741s.
- Ersoy,U. 2004, Betonarme Yapıların Deprem Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme, Beton 2004 Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 16–22.
- Fookes,P. 1995, ” Concrete in Hot Dry Salt Environment” Concrete, Pp:34-39

- Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E.2004, Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates, *Cement and Concrete Research*, Cilt 34, No 7, 1121- 1130,
- Henrichsen, A. 2005, *Design of Concrete for High Performance Structures*, 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 23–32.
- Irassar, E.F., Gonzalez, M. ve Rahhal, V. 2000, Sulfate Resistance of Type V Cement with Limestone Filler and Natural Pozzolana ,*Cem.&Conc. Com.*, 22, 361-368.
- Jueshi, Q., Caijun, S., Zhi, W. 2001, “Activation of Blended Cements Containing Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Cilt 31, No 8, 1121- 1127
- Kayall, O., Haque, M.N., Zhu, B.2003, “Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete”, *Cement&Concrete Composites*, Cilt 25, No 2, 207-213
- Kılıç, R., Şimşek, O.1991, “Maden Şhiri(Karaman) Doğusundaki Ponza Taşı ile Üretilen Hafif Beton Dayanımına Uçucu Kül Oranının Etkisinin İncelenmesi”, *Türkiye Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, Cilt 15, No 3, 283-295
- Kula, I., Olgun, A., Erdoğan, Y., Sevinç, V.2001, “Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement”, *Cement and Concrete Research*, Cilt 31, No 3, 491-494
- Krishnamoorthy, T.S., Gopalakrishnan, S., et. al.2002, “Investigations on the Cementitious Grouts Containing upplementary Cementitious Materials”, *Cement and Concrete Research*, Cilt 32, No 6, 1395-1405
- Lee, C.Y., Lee, H.K., Lee, K.M.2003, “Strength and Microstructural Characteristics of Chemically Activated Fly Ash-Cement Systems”, *Cement and Concrete Research*, Cilt 33, No 3, 425-431
- Manz, O.E.1999, “Coal Fly Ash: a Retrospective and Future Look”, *Fuel*, Cilt 78, No 2, 133-136
- Martin,B.L.and Firlotte,C.,A.1995,,”Protecting Substructures in Marine Environments”’*Material Performance*,Pp:26-29,September
- Mustafa,M.,A. And Yusuf, K.,M. 1994,,”Atmospheric Chloride Penetration into Concrete in Semi Tropical MARine Environment”’ *Cement and Concrete Research*, Vol:4,Pp:661-670
- Montemor, M.F., Simoes, A.M.P., Salta, M.M. 2000, “Effect of Fly Ash on Concrete Reinforcement Corrosion Studied by EIS”, *Cement&Concrete Composites*, Cilt 22, No 3, 175-185
- Monteiro, P.J.M., Kurtis, K.E. 2003,“Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, p. 987- 993.
- Metha P. K.1996, *Pozzolonic and cementitious by products as mineral admixture for concrete*
- Massazza F., Costa U.1981, *Some properties of pozzolonic cements containing fly ashes*

Mehta, P.K, 1989, Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look, *Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway

Mehta P.K., Monteiro P.J.M. 1997, “Concrete Microstructure, Properties and materials”, Indian Edition, India.

Naik, T.R., Singh, S., Ramme, B.1998, “Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Blended Fly Ash”, *ACI Materials Journal*, Cilt 95, No 4, 454-462

Nehdi,M. ve Hayek, M., 2005. Behavior of Blended Cement Mortars Exposed to Sulfate Solutions Cycling in Relative Humidity, *Cement and Concrete Research*, 735-742.

Neville, A.M.1981, *Properties of Concrete*, Longman Scientific & Technical, New York

Onüçyıldız, M. 1991, Konya II. Organize Sanayi Bölgesi Zemin ve Yer altı Suyunun Beton Üzerine Etkisi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya

Özturan, T., 1993, Uluslar Arası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf Ve Doğal Pozolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, Kasım, s. 57-78

Özturan F.U. 1993, Uçucu küllerin betonit, kireç ve çimento katkılarıyla kumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanımı endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması

Özturan, T. and Bastopçu, M.E.2003, “Effect of Curing on Durability of Fly Ash Concrete”, Sixth CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, Thessaloniki-Greece, SP-212, 353-368

Özturan, T. 1991, Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerinin etkinliği, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul

Papadakis, V.G.2000, “Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems Part II. High-Calcium Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Cilt 30, No 10, 1647-1654

Prepared by The University of Wisconsin-Milwaukee, High volume fly ash concrete technology

Prince, W.H. 1975, “Puzolans – A Review”, *ACI Journal*, Detroit, 225 – 232

Postacıoğlu, B.1986, *Beton-Bağlayıcı Maddeler*, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul

Rayzman, V.L., Shcherban, S.A., Dworkin, R.S.1997, “Technology for Chemical-Metallurgical Coal Ash Utilization”, *Energy & Fuels*, Cilt 11, No 4, 761-773

Ravina, D.1997, “Properties of Fresh Concrete Incorporating a High Volume of Fly Ash as Partial Fine Sand Replacement”, *Materials and Structures*, Cilt 30, No 202, 473-479

Rasheeduzzafar,J.,et al.1994,“Influence of Sulfates on Chloride Binding in Cemens” *Cement and Concrete Research*, Vol:24,Pp.28-24

Rebeiz, K.S., Mielich, K.L.1995, “Construction Use of Municipal-Solid-Waste Ash”, *Journal of Energy Engineering-ASCE*, Cilt 121, No 1, 2-13

Swamy, R.N.1984, Lambert, G.H., “Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Made with Fly Ash Coarse Aggregates”, Int. Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Cilt 6, No 3, 189-200

Swamy, R.N. 1986, Cement Replacement Materials, Surrey Univ. Pres, London.

Santhanam,M., Cohen,M.D. ve Olek,J. 2003,Effect of Gypsum Formation on thePerformance of Cement Mortars During External Sulfate Attack, Cement and Concrete Research, 32, 325-332.

Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J. 2001, Sulfate Attack Research- Whither Now?, Cement and Concrete Reserch, 31, 845-851.

Skalny, J., Marchand, J. ve Odler, I. 2002, Sulfate Attack on Concrete, Spon Press, New York.

Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö.2005, “Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a ighvolume coarse fly ash”, Construction and Building Materials, (article in Press).

Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., Fırat, S.2001, “Çayırhan ve Soma-B Termik Santralleri Uçucu Küllerinin Betonun Basınç Dayanımına Etkisi”, Türkiye İnş. Müh. XVI. Teknik Kongresi, Ankara, 1-3 Kasım

Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., Eroltekin, V.1999, “Uçucu Külün Hafif Beton Yapı Elemanı Üretiminde Kullanımı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Z.K.Ü. Teknoloji Dergisi, Cilt 2, No 3-4, 15-23

ŞİMŞEK, O. 2004, ‘‘Beton ve Beton Teknolojisi’’, Seçkin Yayınevi, Ankara.

Tosun K., Yazıcı H., Yiğiter H., Baradan B. 2003, “Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi”, V. Ulusal Beton Kongresi. İstanbul.

TS EN 12457–4, 2004. Atıklarının Nitelendirilmesi-Katıdan. Özütleme Analizi- Granül Katı.

TS EN 12390-3 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleleri-Bölüm 3: Dene Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini

Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Hopkins, D.S. ve Cail, K.1999, Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Reserch, 29, 1207-1214.

Tokyay, M., Erdoğan, K.1998, Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara

Tokyay, M.1987, Effect of a High-Calcium and a Low-Calcium Fly Ash on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars, Doktora Tezi, ODTÜ

Troxell,E.,G.,et al. 1968, Composition and properties of concrete, Second Edition, Pp:278-279, Mc Graw-Hill Book Company, New York

TS 706 EN 12620, 2003, Beton Agregaları, T.S.E, Ankara

TS 3440, Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları

TS EN 206- Beton Sınıflandırma, Özellikler, Performans, Üretim Ve Uygunluk Kriterleri Standardı.

TS 1114, 1986, Hafif Agregalar-Beton için, TSE, Ankara

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2003, Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Ankara

Ulus, H. 2006, Erzincan ve Nevşehir yöresi pomzalarının çimentolu sistemlerde kullanılabilirliği, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, 177 s., Ankara.

Valenti, G.L., Cioffi, R., Sersale, R.1986, "Production and Utilization of Fly Ash in Italy", Proc. of 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete", Madrid, V. 1, 741-762

Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K., et. al. 1998, "Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India", Construction and Building Materials, Cilt 12, No 6-7, 341-346

Wesche, K. 1991, Fly Ash in Concrete: Properties and Performance, E&FN Spon, RILEM, London

Yamashita, T., et al. 1992, "Fly Ash Lightweight Aggregate Sintered in a Circular Grate Kiln", Proc. of 4th Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, İstanbul, SP, 895-915

Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S., Baradan, B. 2006, "Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase", Cement and Concrete Research, Cilt 36, No 7, 481-486

Yazıcıoğlu, S., Gönen, T. ve Çobanoğlu, Ö.C., 2005, Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, 681-685.

Yeğınobalı, A. 1971, Uçucu kül tras ve yüksek fırın cürufunun betonda katkı maddeleri olarak kullanılması ve optimum uçucu kül karışım oranlarının tayini, Tübitak, Proje No. Mag-157/A, Ankara

Yeğınobalı A. 1999, "Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler", TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara.

Zakaria, M., Cabrera, J.G. 1996, "Performance and Durability of Concrete Made with Demolition Waste and Artificial Fly Ash-Clay Aggregates", Waste Management, Cilt 16, No 1-3, 151-158

ÖZGEÇMİŞ

DOĞUM TARİHİ : 03.12.1985

DOĞUM YERİ : Diyarbakır Merkez

OKUDUĞU OKULLAR : 1991-1996 Cemil Özgür İlkokulu
1996-1999 Ali Emiri Ortaokulu
1999-2002 Ziya Gökalp Lisesi

BİTİRDİĞİ ÜNİVERSİTE: 2003-2007 Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS BAŞLAMA TARİHİ: 2008

ÇALIŞTIĞI YER : 2010 mart ayından beri Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde
Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktayım.