

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL SÜLFAT İÇERİĞİ YÜKSEK OLAN
KUMLARLA ÜRETİLEN HARÇLARDA SÜLFAT ETKİSİNİN
İNCELENMESİ VE MİNERAL KATKILARIN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Doğan DİKME**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL SÜLFAT İÇERİĞİ YÜKSEK OLAN
KUMLARLA ÜRETİLEN HARÇLARDA SÜLFAT ETKİSİNİN
İNCELENMESİ VE MİNERAL KATKILARIN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Doğan DİKME
501061028**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hakan N. ATAHAN (İTÜ)

Eş Danışman :

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Fahriye KILINÇKALE (İÜ)

Yrd. Doç. Dr. Bekir Y. PEKMEZCİ (İTÜ)

HAZİRAN 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Sunmuş olduğum bu yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgileriyle bana yol gösteren ve tecrübesiyle yardımcı olan tez hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca eğitim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen ve kritik zamanlarda doğru kararlar almamı sağlayan babam Hüseyin DİKME'ye de teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Doğan Dikme
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Çimento	3
2.1.1 Çimento türleri	3
2.1.1.1 CEM I portland çimentosu	5
2.1.1.2 CEM II portland kompoze çimento.....	5
2.1.1.3 CEM III yüksek fırın cürüflü çimento	6
2.1.1.4 CEM IV puzolanlı çimento	7
2.1.1.5 CEM V kompoze çimento.....	7
2.2 Katkı Maddeleri	8
2.2.1 Uçucu kül	9
2.2.1.1 Uçucu küllerin özellikleri	10
2.2.1.2 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	10
2.2.1.3 Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri	11
2.2.1.4 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi.....	12
2.2.1.5 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	13
2.2.1.6 Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri.....	13
2.2.2 Yüksek fırın cürufu	69
2.2.2.1 GYFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	15
2.2.2.2 Yüksek fırın cürufunun aktivitesi	16
2.2.2.3 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi	17
2.2.2.4 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi.....	17
2.2.2.5 GYFC'nin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri	18
2.2.3 Silis dumanı.....	20
2.2.3.1 Silis dumanının taze beton özelliklerine etkisi.....	21
2.2.3.2 Silis dumanının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	22
2.2.4 Nano silika	25
2.3 Sülfat Etkisi.....	26
2.3.1 Sülfatın kaynağı	29
2.3.2 Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF)	30
2.3.3 Sülfatların betonda oluşturdukları zararlı reaksiyonlar.....	31
2.3.4 Reaksiyonun gelişimini etkileyen faktörler	32
2.3.5 Sülfat etkisine katkı alınacak önlemler.....	33

2.3.6 Sülfata dayanıklılık deneyleri.....	35
2.4 Ultrases.....	36
2.4.1 Cismin içinde ses hızının tayini	37
2.4.2 Ultrases hızını etkileyen faktörler	37
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	39
3.1 Malzemeler.....	39
3.1.1 Çimento	39
3.1.2 Su.....	39
3.1.3 Agregası	39
3.1.4 Mineral katkıları	43
3.1.5 Sülfat çözeltisi.....	43
3.1.6 Kıvam arttırıcı	43
3.2 Numune Boyutları ve Sayıları.....	44
3.3 Harçların Üretilmesi ve Numunelerin Hazırlanması	45
3.4 Deney Yöntemleri	45
3.4.1 Taze harç deneyleri	45
3.4.2 Sertleşmiş harç deneyleri	46
3.4.2.1 Boy değişimi	46
3.4.2.2 Ağırlık değişimi.....	47
3.4.2.3 Ultrases hızı ölçümü.....	48
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	49
4.1 Taze Harç Özellikleri	49
4.2 Numunelerde Boy Değişimi	50
4.3 Ağırlık Değişimi	63
4.4 Ultrases Hızı Değişimleri	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

MS	: Mikro Silika
NS	: Nano Silika
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
REF	: Referans
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Standardı)
C₃A	: 3CaO.Al ₂ O ₃
C₃S	: 3CaO.SiO ₂
C-H	: Ca(OH) ₂
C-S-H	: Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çimento türleri (TS EN 197-1).	4
Çizelge 2.2 : Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinin standart değerleri.....	12
Çizelge 2.3 : Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi.	28
Çizelge 2.4 : TS 3340'a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinli dereceleri. ...	29
Çizelge 3.1 : Çimento deney sonuçları (Kimyasal Analiz)	40
Çizelge 3.2 : Çimento deney sonuçları (Fiziksel Analiz)	40
Çizelge 3.3 : Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları.....	41
Çizelge 3.4 : Elek analizi deney sonuçları.....	41
Çizelge 3.5 : Bağdat kum örneğinin bileşenleri ve oranları	42
Çizelge 3.6 : Kerbela kum örneğinin bileşenleri ve oranları	43
Çizelge 3.7 : Kimyasal analiz sonuçları	43
Çizelge 3.8 : Mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	44
Çizelge 4.1 : Bağdat, Kerbela ve Sakarya kumları ile üretilen harçlarda kullanılan katkı miktarı ve yayılma değerleri	49
Çizelge 4.2 : Bağdat kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak)	64
Çizelge 4.3 : Kerbela kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak)	65
Çizelge 4.4 : Sakarya kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak)	65
Çizelge 4.5 : Bağdat kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri.....	66
Çizelge 4.6 : Sakarya kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri	67
Çizelge 4.7 : Kerbela kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Üretilmiş olan deney numuneleri	45
Şekil 3.2 : Üretimlerin yapıldığı iki hızlı karıştırıcı	46
Şekil 3.3 : Yayılma tablası.....	47
Şekil 3.4 : Boy ölçümlerinin yapılışı	47
Şekil 3.5 : Ultrases ölçümlerinin yapıldığı cihaz.....	48
Şekil 4.1 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Mikro Silika (MS) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları	50
Şekil 4.2 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Nano Silika (NS) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları	52
Şekil 4.3 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Uçucu Kül (UK) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları	53
Şekil 4.4 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları	54
Şekil 4.5 : Bağdat (İç sülfat etkisi), Kerbela (İç sülfat etkisi), Sakarya (Dış sülfat etkisi) ve Sakarya (Suda) kumları ile üretilen katkısız (Referans) harçların % uzama oranları.....	55
Şekil 4.6 : Bağdat kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların 3., 6. ve 10. aylar sonunda belirlenen toplam % uzama oranları	56
Şekil 4.7 : Kerbela kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 3., 6. ve 10. aylar sonunda belirlenen toplam % uzama oranları	57
Şekil 4.8 : Bağdat kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 10. ay sonunda katkısız harç numunelere göre % uzama oranları	58
Şekil 4.9 : Kerbela kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 10. ay sonunda katkısız harç numuneler göre % uzama oranları.....	59
Şekil 4.10 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Mikro Silika (MS) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na ₂ SO ₄ ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.....	60
Şekil 4.11 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Nano Silika (NS) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na ₂ SO ₄ ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.....	61
Şekil 4.12 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Uçucu Kül (UK) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na ₂ SO ₄ ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama.. oranları	62
Şekil 4.13 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na ₂ SO ₄ ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.....	63

DOĞAL SÜLFAT İÇERİĞİ YÜKSEK OLAN KUMLARLA ÜRETİLEN HARÇLARDA SÜLFAT ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE MİNERAL KATKILARIN ETKİSİ

ÖZET

Günümüzde en yaygın bir yapı malzemesi olarak kullanılan beton; çimento, agrega, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve karışım suyundan oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Yalın betonun yapısal özellikleri esas olarak çimento ve su ve bununla birlikte diğer karışım malzemeleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Sertleşmiş beton içerisindeki hidratasyon ürünlerinin kimyası, boşluk yapısı ve betonun mekanik özellikleri üretim aşaması ve bunu izleyen süreç içerisinde betonun maruz kaldığı çevre koşullarından önemli derecede etkilenmektedir.

Sülfatlı ortamlar beton ve betonarme yapıların dürabilitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli dış etkenlerden biri olup, bu konu ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Sülfat etkisi, sülfat iyonları ile çimento hidratasyon ürünleri arasında meydana gelen ve beton içerisinde hacim genişmesine neden olarak betonun stabilitesini bozan bir seri karmaşık kimyasal reaksiyonlar zinciri olarak tanımlanabilir. Sülfat iyonları ise beton içerisine dışarıdan nüfuz edebileceği gibi sülfatın kaynağı, üretimde kullanılan çimento, agrega, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ya da karışım suyu olabilir.

Literatürde mevcut pek çok çalışma, yapı elemanlarına dışarıdan (external) etkiyen sülfat atağını incelemektedir. Beton bileşenlerinden gelebilecek sülfatlardan dolayı normal sıcaklıklarda oluşabilecek etkileri (gecikmiş etrenjit oluşumu hariç) inceleyen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmada, kumlardaki doğal sülfat içerikleri yüksek olarak bilinen ve Ortadoğu'dan temin edilen, suda çözünen sülfat miktarları %1,5 ve %2,0 olan 2 farklı kum numunesi ile üretilen harçlarda sülfat atağının etkisi araştırılmıştır. Deneyler ASTM C 1038 standardı esaslarına göre yapılmıştır. Ayrıca çalışmada nano silika, mikro silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddeleri de kullanılarak bu katkıların sülfat atağından kaynaklanacak deformasyonlara karşı yaratacağı olumlu etkiler de araştırılmış, önerilerde bulunulmuştur. Bunların yanında, Sakarya bölgesinden temin edilen ve sülfat içeriği ihmal edilebilecek düzeyde olan bir kum numunesi ile üretilen harçlar da sülfatlı ortamda bekletilmiş ve numunelerde dış sülfat etkisi gözlenmiştir. Deney sonuçları, mineral katkı ilavesinin, özellikle öğütülmüş cüruf kullanılması durumunda, iç veya dış sülfat etkisinden meydana gelen uzamaları önemli derecede düşürdüğünü göstermiştir.

INVESTIGATION OF SULFATE ATTACK ON MORTARS PRODUCED WITH SANDS CONTAMINATED BY NATURAL SULFATE AND THE EFFECT OF MINERAL ADMIXTURES

SUMMARY

Concrete, which is most widely used construction material today, has a complex structure consisting of cement, aggregate, mineral and chemical admixtures, and mixing water. The properties of plain concrete depend on the chemical reactions mainly between cement particles and water, as well as the reactions between the other components of concrete. The chemistry of hydration products, pore structure and mechanical properties of hardened concrete is significantly affected by the process of production and the environmental conditions in which the concrete is exposed during its service life.

Sulfate contaminated environment is one of the most important factors that significantly affects the durability of plain and reinforced concrete structures negatively. Lots of research can be found regarding to this aspect. Sulfate attack can be defined as a series of complex chemical reactions chain which takes place between the sulfate ions and hydration products of cement and resulting in the deterioration of concrete stability. The sulfate ions can diffuse in concrete from the external environment, however, it is also possible that the source of these ions can also be the concrete mixing materials such as cement, aggregate, and chemical and mineral admixtures.

In concrete literature, most of the investigations have been focused on external sulfate attack. Internal sulfate attack under normal conditions (except Delayed Ettringate Formation) which may caused by the sulfates from concrete ingredients, is not extensively investigated. In this experimental study, the effect of sulfates on the expansions mortar bars mixed with 2 different naturally sulfate contaminated sands (water soluble sulfate amounts of 1.5% and 2.0%) provided from Middle East is being investigated. Moreover, the effect of mineral admixtures such as nano silica, micro silica, fly ash and slag on the expansions caused by internal sulfate attack were studied. Additionally, mortar samples mixed with a sand sample provided from Sakarya region, which has a sulfate content of ignorable level, were also exposed to external sulfate attack and the expansions were observed. Results have shown that inclusion of mineral admixtures, especially ground granulated blast furnace slag, has significantly reduced the expansion of mortars caused by both internal and external sulfate attack.

1. GİRİŞ

Sülfatlı ortamlar beton ve betonarme yapıların dürabilitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli dış etkenlerden biri olup, bu konu ile ilgili pekçok araştırma yapılmıştır ve tartışmalar devam etmektedir. Sülfat etkisi, sülfat iyonları ile çimento hidratasyon ürünleri arasında meydana gelen ve beton içerisinde hacim genişlemesine neden olarak betonun stabilitesini bozan (Na_2SO_4 çözeltisi) veya sertleşmiş çimento hamurunun yumuşamasına neden olan (MgSO_4 çözeltisi) bir seri kompleks kimyasal reaksiyonlar zinciri olarak tanımlanabilir. Sülfat iyonları ise beton içerisine dışarıdan nüfuz edebileceği gibi sülfatın kaynağı, üretimde kullanılan çimento, agrega, kimyasal ve mineral katkı maddeleri yada karışım suyu olabilir. Oluşacak hasarın seviyesini ise ortamda bulunan sülfat konsantrasyonu ve daha da önemlisi bu ortama maruz kalan betonun geçirimsizlik özellikleri belli edecektir. Sodyum sülfatlı ortamlarda bulunan betonlardaki hasarın meydana gelmesi, çimento karma oksitlerinden C_3A 'nın hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum alüminat hidrate (C-A-H) ile sülfat iyonlarının oluşturduğu kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşumudur.

Özellikle Ortadoğu'da bulunan ince agregalardaki (doğal kum) doğal sülfat içerikleri, Ülkemizdeki mevcut kumlar ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Sülfatlar ile doğal olarak kirletilmiş bu kumların beton içerisinde kullanımı ve oluşturacağı riskler özellikle bu bölgelerde iş yapan yüklenicilerin kafalarında soru işaretleri oluşturmaktadır. Özellikle prefabrike elemanların üretimi aşamasında betonun çok erken yaşlarda yüksek ısılarla kür amacıyla maruz bırakılması, çimento hidratasyonu sırasında oluşan ürünlerin form değiştirmesine neden olduğu ve bu değişimin uzun zaman sonra gecikmiş etrenjit oluşumu adı verilen bir reaksiyona neden olarak betona hasar verebildiği bilinmektedir. Literatürde bu konuda pek çok araştırma mevcuttur. Ancak, sülfat ile doğal olarak kirlenmiş bu kumların “geleneksel beton” uygulamalarında meydana getirebileceği olası riskleri deneysel olarak gözlemlemek ve buna dayanarak beton tasarımlarında alınabilecek önlemlerin belirlenmesi, yapıların performansları açısından oldukça önemlidir. Betonda sülfat

atağı konusunda yapılan pek çok çalışma sülfat iyonlarının beton içerisine zemin suyu, fabrika atıkları gibi dış ortamlardan girdiği düşünülerek, üretilen deney numunelerinin sülfat konsantrasyonu yüksek ortamlarda bekletilmesi şeklinde veya sülfatların beton karışım suyu veya agregalardan beton içerisine girdiği düşünülerek de bu kirlenmeyi temsil etmek amacıyla beton karışımı içerisine farklı formlarda sülfatların katılması şeklinde yapılmaktadır. Ancak, doğal olarak sülfat içeriği çok yüksek olan bir kumdaki sülfatların formları, beton içerisindeki çözünübilirlikleri, granül veya toz halinde bulunmaları gibi etkenler mekanizmanın sürecini ve şeklini etkileyebilir.

Bu çalışmanın konusu, bu tür agregalarla üretilmesi planlanan veya kullanılması zorunlu olan betonlarda oluşabilecek riskleri görebilmek ve farklı mineral katkıları ile bu riskleri azaltabilmenin yollarını deneysel olarak incelemek olmuştur. Yapılacak bu deneysel çalışma sonucunda elde edilecek veriler, bu tür kumların kullanımının meydana getirebileceği olumsuzlukları göz önüne serecek ve ne tür mineral katkıların hangi oranlarda betonların performansını artırabileceği konusuna ışık tutacaktır. Çalışmada kullanılan mineral katılardan biri olan “NANO SİLİKA” bir nano teknoloji ürünü olup, ortalama çapı 50 nanometre mertebelerinde olan aktif SiO_2 tanelerinden oluşmaktadır. Bu malzemenin betonda kullanımı ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Ancak, bu nanoteknoloji ürününün sülfat atağı karşısında harçların ve dolaylı olarak da betonların performansını nasıl etkileyeceğine dair bilgilere literatürde rastlanmamış ve ayrı bir merak konusu olmuştur. Özellikle sülfatlı ortamların kaçınılmaz olduğu veya sülfat içeriği yüksek olan beton bileşenlerinin kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda nanosilika malzemesinin performansının belirlenmesi ve bu performansın, beton teknolojisinde çok yaygın olarak kullanılan ve bu çalışmaya da dahil edilen uçucu kül, cüruf ve mikro silika gibi diğer mineral katkı maddelerinin sağlayacağı performans ile karşılaştırılması, bu alana önemli bir katkı ve yeni çalışma alanları sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento

Portland çimentosu, killi ve kalkerli hammaddelerin pişirilmeleriyle elde edilen klinkerin az miktarda (%3-%6 oranında) alçıtaşı ile birlikte çok ince parçacıklar oluşturabilecek derecede öğütülmesi sonucunda elde edilen ve su ile birleştiğinde bağlayıcı özellik kazanan bir üründür.

Portland çimentosu, gerek kendi başına gerekse yanısıra katılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerle birlikte su ile birleştiğinde önce yumuşak, plastik bir karışım elde edilmekte ve zamanla yavaş yavaş sertleşerek katı, taş gibi bir duruma gelmektedir.

Kireç, alümin, demiroksit ve silis bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp yüksek sıcaklıkta, sinterleşmeye kadar (1350-1450 °C) pişirilmeleri sonucunda elde edilen ürüne “klinker” adı verilmektedir.

Klinker, yaklaşık olarak 1-25 mm. Çapında pürüzlü ve gözenekli yüzeye sahip, sert ve yuvarlak şekildedir; karakteristik olarak, parlak ve yeşilimsi-koyu gri (veya gri-siyah) renktedir.

Portland çimentosu, klinkerin küçük bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmüş şeklidir. Alçıtaşı, klinker öğütülmesi safhasında katılır ve klinker ile birlikte öğütülür. Çimento üretiminde, klinker öğütülürken bir miktar alçıtaşı katılmasındaki amaç; çimentonun su ile birleştiğinde göstereceği sertleşme hızını (şimşek piriz) kontrol edebilmektir [1], [2], [3].

2.1.1 Çimento türleri

TS EN 197-1 kapsamındaki 27 farklı genel çimento aşağıdaki beş ana tipte olmak üzere gruplandırılmış ve işaretleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

CEM I Portland çimentosu

CEM II Portland-kompoze çimento

CEM III Yüksek Fırın Cürüflu çimento

CEM IV Puzolanlı çimento

CEM V Kompoze çimento

Çizelge 2.1 : Çimento türleri (TS EN 197-1)

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)		Bileşim (kütlege ^{a)} % olarak)											Minör ilâve Bileşen
			Ana Bileşenler											
			Klinker K	Yüksek Fırın Curufu S	Silis Dumanı D ^{b)}	Puzolan Doğal P Doğal Kalsine Edilmiş Q		Uçucu Kül Silisi V Kalkersi W		Pişmiş Şist T	Kalker L LL			
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Portland-Curufllu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21- 35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Portland-Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Portland-Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 -35	0-5	
	Portland-Kompoze Çimento ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←----- 6 - 20 ----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21 - 35 ----->										0-5
CEM III	Yüksek fırın Curufllu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Puzolanik Çimento ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11 - 35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36 - 55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18 - 30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31 - 50 ----->			-	-	-	-	0-5	
a Çizelgedeki değerler ana ve minör ilâve bileşenlerin toplamı ile ilgilidir. b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır. c Portland Kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik Çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze Çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin yanındaki diğer ana bileşenler çimentoya ait işaretlerle beyan edilmelidir (Madde 8).														

2.1.1.1 CEM I portland çimentosu

Yapay çimento olarak da bilinen portland çimentosunun ilkel bileşenleri kalker (kireçtaşı) ve kil (tebeşir) dir. Portland çimentosu üretiminde belirli miktarda kireç (CaO), silis (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) içeren hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır, erime sıcaklığına kadar pişirilir, fırından çıkan ve klinker denilen fındık veya ceviz büyüklüğündeki malzeme soğutulur ve öğütülür. Öğütme işleminde priz süresini ayarlamak için belirli oranda alçıtaşı eklenir ve Portland çimentosu elde edilir.

Piştirilmek üzere hazırlanan %23-31 oranında kil içeren portland çimentosunun bileşimi;

Silis oksidi (SiO ₂)	% 20 - 23
Alümin (Al ₂ O ₃)	% 6,5 – 8,5
Demiroksit (FeO)	% 2 - 4
Kireç (CaO)	% 60 - 65
Manyezi (MgO)	% 2'den az

Kalsiyum sülfat (anhidrit) (CaSO₄) % 2'den az içerir.

Portland çimentoları, 28 günlük basınç dayanımlarına göre;

Portland çimentosu 32,5 (PÇ 32,5)

Portland çimentosu 42,5 (PÇ 42,5)

Portland çimentosu 52,5 (PÇ 52,5) olmak üzere üç tiptir [1], [2], [3].

2.1.1.2 CEM II portland kompoze çimento

Klinkerle puzolanik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentodur. İçerdikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece % 6-20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, % 21-35 arası kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. 28 günlük basınç dayanımlarına göre CEM II 32,5, CEM II 32,5R, CEM II 42,5, CEM II 42,5R, CEM II 52,5, CEM II 52,5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa Standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir [4].

- **Portland cürüflu çimento**

Belirli oranlarda Portland çimentosu klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı – kalsiyum sülfat dihidrat – ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi ile elde edilen bir bağlayıcıdır.

- **Portland silis dumanlı çimento**

Belirli oranlarda Portland çimentosu klinkeri ile silis dumanının, priz önleyici olarak da alçıtaşı – kalsiyum sülfat dihidrat – ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen çimentodur.

- **Uçucu küllü çimento**

Ağırlıkça karşılıklı olarak % 10 – 30 oranında uçucu kül ve % 90 – 70 oranında Portland çimento klinkerinin bir miktar alçıtaşı – kalsiyum sülfat dihidrat – ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

- **Portland kalkerli çimento**

Belirli oranda Portland çimentosu klinkeri ile kalkerin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı – kalsiyum sülfat dihidrat – ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen çimentodur.

- **Portland kompoze çimento**

Portland kompoze çimento, belirli oranlarda Portland klinkerinin ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da alçıtaşı – kalsiyum sülfat dihidrat – ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) katılarak öğütülmesi neticesinde elde edilen çimentodur [1], [2], [3].

2.1.1.3 CEM III yüksek fırın cürüflu çimento

Cürüflu çimentolar granüle yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Cüruf içinde bulunan bileşikler aşağıda sıralanmıştır.

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

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

Dikalsiyum silikat : 2 CaO SiO_2

Çiftli Silikatlar

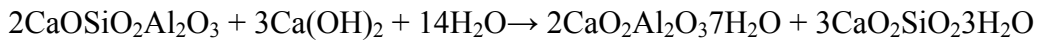
Montisenit : CaO MgO SiO_2

Akemonit : 2 CaO MgO 2SiO_2

Mervinit : 3 CaO MgO 2SiO_2

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

Aşağıda belirtilen reaksiyon cüruf hidrasyonunu göstermektedir:



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

$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O} = \text{Etrenjit}$ (Çözünmüş fazda meydana gelmiştir). Cürufsuz çimentoda az miktarda hekzagonal sistemde kristalleşir. Cürufli çimentoda ise kristalleşme iğnecikler şeklinde olup bunlar bağlayıcı rol oynadıklarından dayanımı yükseltirler. Sonuç olarak Portland çimentosu hidrasyonunda meydana gelen Ca(OH)_2 cürufli çimentoda bulunmamakta veya çok az bulunmaktadır [5].

2.1.1.4 CEM IV puzolanlı çimento

En çok %55 mineral katkı maddeleri (puzolan) ile portland çimentosu klinkerinin belirli miktarda priz düzenleyici (alçıtaşı) ile beraber öğütülmesi sonucu elde edilen; suyla karıştırıldıktan bir süre sonra priz olarak dayanım kazanan üründür.

2.1.1.5 CEM V kompoze çimento

Çeşitli oranlarda portland çimentosu klinkeri ve katkı maddelerinin, priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilen hidrolik bağlayıcılardır [6].

2.2 Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, beton ve harca belirli bazı özellikler kazandırmak veya bazı özelliklerini düzeltmek için bağlayıcı, agrega ve su dışında karışım öncesi ve sonrasında ilave edilen maddelerdir.

a) Kimyasal katkılar

1. Akışkanlaştırıcılar: Su azaltıcı bir katkı kullanılması şu iki olanaktan birini sağlar: Betonun aynı derecede bir işlenebilme özelliğine sahip olması daha az su kullanmak suretiyle elde edilir. Çünkü, bilindiği gibi su miktarının arttırılması betonun işlenebilme özelliğini çok daha iyi bir duruma sokar. Bu itibarla, bu katkı maddesi yardımıyla daha az su kullanarak istenilen işlenebilme özelliğinin elde edilmesi betonun mukavemetini arttırır. Su miktarı azaltılmadan bu katkı maddesi kullanılırsa, betonun işlenebilme özelliğini önemli ölçüde arttırmış oluruz.

Bu katkı maddelerinin esasını sıvıların yüzey gerilimini düşüren tansiyon-aktif elemanlar oluşturur. Bu tür maddeler çimento taneleri tarafından adsorbe edilerek bunların (-) ve (+) elektrik yüklenmesini sağlar. Aynı yüklü çimento tanelerinin birbirini itmesi ve böylelikle birbirinden uzaklaşması ile çimentonun su ile teması kolaylaşır. Bunun sonucunda hidrasyon hızlanır ve betonun akışkanlığı artar. Bu katkı maddesinin kullanılması su miktarını % 5-20 arasında azaltır [2], [7].

2. Priz geciktiriciler: Taze harcın katılaşmaya başlama süresini uzatırlar.

3. Priz hızlandırıcılar: Priz geciktirenlerinin aksine bu katkılar, harcın katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan harcı katılaşmasını sağlamak amacıyla kullanılırlar.

4. Antifrizler: Suyun donmasını zorlaştırır ve don olayı sebebiyle çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamaya engel olurlar. Bu katkıların harç içindeki miktarı hava sıcaklığına göre ayarlanabilir.

5. Hava sürükleyici katkılar: Harç içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini, dona karşı direncini ve işlenebilirliğini arttıırırlar.

6. Su geçirimsizlik katkıları: Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması suyun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır.

b) Mineral katkıları

Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu vb. çeşitli endüstriyel üretimlerin yan ürünü olan maddelere mineral katkı adı verilir. Mineral katkıları tek başına iken çimento gibi bağlayıcı özellik taşımazlar fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoyla benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonların üretiminde de yararlanılır [8], [9], [10], [11].

2.2.1 Uçucu kül

En önemli yapay puzolanlardan biri olan uçucu kül, enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü ya da linyitin yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazlarıyla sürüklenen elektrofiltre ve siklonlarla havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik niteliğe sahip silisli ve alümino silisli atık maddesidir. Uçucu kül termik santrallerin yan ürünü olup kömürün içindeki inorganik maddeler fırın ortamında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak genellikle küresel tanecikler halinde oluşmaktadır [12].

TS EN 450'ye göre uçucu küller, toz halindeki kömürün yakılmasında elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine TS EN 450'ye göre uçucu kül, öğütülmüş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [13].

Bugün dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup bu santrallerden yılda 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir [14].

2.2.1.1 Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu küllerin özellikleri, kömürün özellikleri ve yakılma yöntemine göre farklılıklar gösterebilir. Bileşimi genellikle silisli ve alüminli olduğundan puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirler. İnce ve küresel taneleri nedeniyle betonda işlenebilmeyi artırır ayrıca hidrasyon ısını azaltırlar. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturarak çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betonun durabilitesini arttırırlar. Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen uçucu küllerde ise karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu küller genellikle çimentodan daha ince taneli oldukları için ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilirler [14].

2.2.1.2 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu küllerin tanecik şekli ve büyüklük dağılımında, kömürün kaynağı ve üniform olması, kömürün öğütölme durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın homojenliği ve toz toplama sistemi gibi faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, farklı büyüklüklerde hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklü açısından farklılıkları, uçucu külün düşük veya yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler bulunmaktadır ve bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen ve mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde ise, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunmasıyla heterojen şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyleri de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir.

Uçucu küllerin şekli, inceliği, boyut dağılımları, özgül ağırlığı ve bileşimi; beton karışım oranlarını, taze beton özelliklerini, sertleşmiş beton mukavemetini ve durabilitesini etkilemektedir. Bu etki artan yüzey alanı ile küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliklerine sahip olması, şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olanların ise su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Uçucu külün taneciklerinin çok ince olması ve genelde küresel olmaları puzolanik aktiviteye de olumlu yönde etki etmektedir. Özellikle pürüzsüz yüzeyli ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduklarından kireç-silikat reaksiyonlarına daha

hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit,kireç) ve az camsı faz rol oynamaktayken, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın çokluğu belirleyicidir. Uçucu küllerin özgül ağırlıkları 1,97 ile 3,02 gr/cm³ arasında değişmektedir. Beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları ise 2,2 ile 2,8 gr/cm³ arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler, uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin ise özgül ağırlıkları daha düşüktür. Yüksek özgül ağırlık, ince taneciklerin göstergesidir. C sınıfı uçucu küllerin daha ince taneciklere ve daha az senosfere sahip olmalarından dolayı, özgül ağırlıkları F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksektir [14].

2.2.1.3 Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik kaynağı ve kömür hazırlama, yanma toz kaplama ve desülfirizasyon gibi koşullara bağlıdır. Uçucu küllerin kimyasal yapılarında ana elementler olarak Si, Al, Ca, Fe ve S bulunur. Gene uçucu küllerin kimyasal yapısında bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO ve SO₃ olup MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ ve benzeri oksitler bulunabilir. Bunların miktarları uçucu külün silisli veya kireçli yapıda olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Buna göre SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler (Na₂O+K₂O) %5'in altında bulunmaktadır. SO₃ ise genellikle %2-2,5 arasında bir değerde bulunmakla birlikte, kömürün yapısı ve sürecin koşullarına göre %10'a kadar yükselebilmektedir. Ancak TS EN 450-2 standardı SO₃ değerini en fazla %3 olarak sınırlandırmaktadır. Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar ve karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içine almaktadır. TS EN 450-2 standardında kızdırma kaybı %5 olarak sınırlandırılmıştır [15], [16].

Uçucu külün sınıflandırılmalarında, kimyasal bileşen yüzdesi dikkate alındığında ASTM C618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

Bu standartlardaki kimyasal sınırlar Çizelge 2.2 'de verilmiştir [13], [17].

Çizelge 2.2 : Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerinin standart değerleri

Bileşenler (%)	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
			F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		>70	>70	>50
SO ₃	<3	<5	<5	<5
Nemlilik		<3	<3	<3
C (Kızdırma Kaybı)	<5	<10	<6	<6
MgO		<5		
Alkaliler		<1.5	<1.5	<1.5
Cl ⁻	<0.10			
Serbest CaO	<1			
Reaktif SiO ₂	>25			

2.2.1.4 Uçucu küllerin taze beton özelliklerin etkisi

Hidratasyon ısısı ve sıcaklık yükselmesi

Bağlayıcı maddelerde, priz alma ve sertleşme olayları sırasında ısı açığa çıkar. Bu ısı hidratasyon ısısıdır. Hidratasyon ısısı, bu maddelerin su ile yapmış oldukları reaksiyon sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu artış özellikle büyük kütle betonlarında ortaya çıkar. Hidratasyon ısısına karşı alınacak önlemler; uygun çimento seçimi, yavaş beton dökümü, çimento miktarını azaltma ile betondaki agrega ve suyu soğutma olarak sayılabilir [7], [20]. Ayrıca çimento miktarının azaltılıp, yerine uçucu kül eklenmesiyle de hidratasyon ısısında belirli bir azalma sağlanabilir.

Compton ve McLannis, %30 ikame oranında uçucu kül kullanılarak yaptıkları çalışmada, uçucu küllü betonlarda sıcaklığın kontrol betonuna göre daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [19].

Crow ve Dunstan yaptıkları çalışmada, düşük kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna göre daha az ısı çıkardığını ama yüksek kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna yakın ısı meydana getirdiğini belirtmişlerdir [19].

Kanazowa ve arkadaşları, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı çimento ile üretilen betonlarda sıcaklık artışında azalma gözlemlemişlerdir [18].

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki hidrasyon ısını düşürmek amacıyla çimentonun azaltılması ve F sınıfı uçucu kül kullanımı büyük kütleli betonlarda hem ekonomik açıdan hem de işlev olarak büyük yararlar sağlamaktadır.

2.2.1.5 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Sünme ve rötre

Uçucu küller, kullanıldıkları betonun dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden dolayı, betonda sünme ve rötreye de etki etmektedir. Sünme ve rötre dayanımla ters orantılıdır. Yani dayanım azaldığında artar. Erken yaşlarda yüksek, ileriki yaşlarda ise düşüktür. Betondaki sünme ve rötreye etki eden faktörleri, ortamın sıcaklığı ve nem koşulları, betonun dayanımı, elastisite modülü, agrega miktarı, yükleme anındaki beton yaşı ve yükleme anındaki sünme gerilmesinin dayanıma oranı olarak sayabiliriz [21].

Atiş'in F tipi yüksek miktarda uçucu kül içeren betonlarda yaptığı çalışmalar, uçucu kül kullanımının rötreyi azalttığını göstermektedir [22].

2.2.1.6 Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri

Zararlı kimyasallara dayanıklılık

Betondaki zararlı kimyasal etki ikiye ayrılır. Bunlar; betonun bulunduğu ortamın oluşturduğu zararlı etki ve beton içindeki bileşenlerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan zararlı etki olarak söylenebilir.

Portland çimentosunun reaksiyon sonucu açığa çıkardığı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bir bazdır ve asitlerden zarar görür. Asitler, serbest kireç ile reaksiyona girer ve suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hızlanmaktadır [7].

Mangat ve Khatib, basit ikame metoduyla %22 ve %32 oranlarında ürettikleri F tipi uçucu küllü, %55 nemli ve 20 °C sıcaklığındaki kür koşullarında saklanan betonlarda, sülfata karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. [23].

Tikalsky ve Carrasquillo yaptıkları çalışmalarda, yirmi farklı uçucu külü basit ikame metoduyla beton içerisinde kullanmışlar ve yüksek kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir [24].

Freeman ve Carrasquillo, uçucu kül ile üretilen betonların sülfata dayanıklılıklarının Tip II çimentosu ile üretilenden daha iyi olduğunu söylemişlerdir [18].

Sonuç olarak; uçucu küller serbest kireci kullanıp geçirimsizliği arttırdıkları için zararlı kimyasallara dayanıklılığı da arttırırlar.

Alkali-agrega reaksiyonu

Çimento hammaddesinde bazı alkali oksitler bulunur. Bu alkali oksitler, agrega içinde aktif silis bulunması durumunda zaman içerisinde ortam koşullarına da bağlı olarak silikat jeline dönüşürler. Sodyum, potasyum ve kalsiyum silikası olan bu jel şişme ve genleşme yapar. Bu da betonun hacim sabitliğini bozar ve ağ şeklinde sık çatlaklar meydana getirerek alkali-agrega reaksiyonuna sebep olur. Bu olayın gerçekleşmesi için, çimento alkali oksit içermeli ve agregalar içerisinde aktif silis bulunmalıdır [7].

Dunstan ve arkadaşları, yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda 10 sene sonra bile alkali-agrega reaksiyonu izlerine rastlamadıklarını belirtmişlerdir [18].

Ohga ve Nagataki, uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğunu gözlemlemişler ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğunu söylemişlerdir [18].

Geiker ve Thaulow, doymuş kalsiyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında 20 hafta boyunca uzamaları ölçmüşler, uçucu kül ve silis dumanının alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Sonuç olarak; uçucu küller alkali-agrega reaksiyonundan dolayı betonda oluşan genleşme ve çatlakları azaltmaktadır. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu uçucu kül tarafından seyrekleştirilir. Böylece zararlı reaksiyon riski azalır.

Karbonatlaşma

Portland çimentosu sonucu oluşan serbest kirecin (Ca(OH)_2) dış ortamdaki karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturmaya karbonatlaşma denir [20]. İyi sıkıştırılmış, uygun şekilde kürlenmiş ve düşük su/çimento oranına sahip olan betonlar karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar geçirimsiz olmaktadır [16].

Berry ve Malhotra yapmış oldukları araştırmalarda, katkılı çimentolar ile yapılmış olan betonların normal portland çimentosu ile yapılmış betonlara göre daha çabuk karbonatlaşmaya maruz kaldıkları sonucuna varmışlardır [19].

Sonuç olarak, iyi kalitedeki uçucu küllü bir betonun, normal bir betonla kıyaslanabilecek kadar karbonatlaşmaya karşı koyabildiği söylenebilir [16]. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bunda etkili olduğu da unutulmamalıdır.

2.2.2 Yüksek fırın cürufu

Demir elde edebilmek için demir cevheri yaklaşık 1000-1600 °C sıcaklığındaki fırınlarda kok kömürü yakılarak ısıtılırlar. Bu ham demir üretimi sırasında elde edilen artık maddelere yüksek fırın cürufları denir. Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanması sonucunda oluşan atıklar yüksek fırın cüruflarını meydana getirirler [25]. Yüksek fırın cürufları havada yavaş soğutulduklarında kristal yapıya sahip olurlar. Eğer hızlı bir soğutma işlemine tabi tutulurlarsa irili ufaklı tanelerden oluşan, camsı bir yapıya sahip olurlar. Bu oluşan yapının camsı olmasının temel nedeni hızlı şekilde soğutulan cürufun akışkanlığındaki ani azalmadan dolayı kristal yapının oluşumunun engellenmesidir. Bu tür cüruflara granüle yüksek fırın cürufları denilir. Bu hızlı soğutma işlemleri sırasında esas olarak su kullanılmaktadır. Ayrıca yapılarında CaO bulundurmalarından dolayı bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları beton içinde mineral katkı maddesi olarak kullanıldıklarında, bağlayıcı özelliğe sahip olduklarından su ile reaksiyona girerler fakat bu reaksiyon sonucunda güçlü bir bağ elde edilemez. Portland çimentosu ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri ve kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Cürufun asıl güçlü reaksiyonları alkali ortamda bu CH ile olur. Ortam sıcaklığı arttıkça bu reaksiyonlar daha erken olabilir. Sıcaklığın dışında öğütülmüş yüksek fırın cürufunun aktivitesini ve bağlayıcılığını, cürufun kimyasal kompozisyonu, cürufun yapısının ne kadar amorf olduğu ve cürufun inceliği etkiler [26].

2.2.2.1 GYFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır. Cürufun alkalitesi ne kadar yüksekse hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok

sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir. Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO_2 oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarının artması cürufun aktivitesini arttırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerinin olumsuz etkiler, %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz [27].

Cürufların kimyasal bileşimi demir cevherinin bileşimine bağlı olarak değişir; genel olarak normal portland çimentosuna oranla daha az CaO ve daha fazla SiO_2 ve Al_2O_3 içerir.

2.2.2.2 Yüksek fırın cürufunun aktivitesi

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

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

NaOH çözeltisi ile yapılan aktivite deneylerinde oldukça kısa sürede sonuç alınabilmektedir [28].

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

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik modülleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda daha karmaşık başka modüllerde önerilmiştir. Bu önerilerde, toplam kimyasal analiz sonuçlarının ve kristal faz miktarının cürufun hidrolik özelliklerinin tespiti açısından birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, optimal reaktivite için cürufun tamamıyla camsı yapıya sahip olması zorunluluğunun bulunmadığı saptanmıştır [27].

2.2.2.3 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi

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

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cürufllu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez [27].

Cürufllu çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının daha az olduğu yönündeki genel kaniya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır. Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürufllu çimentolarla portland çimentosu arasında önemli fark bulunmamaktadır [27].

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

2.2.2.4 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

- Dayanımlar

Eşit çimento miktarı ve eşit su/çimento oranları söz konusu olduğunda cürufllu çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Buradan anlaşılağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cürufllu çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda, geç yaşlardaki dayanımlar cürufllu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmaktadır [27].

- Sünme ve rötre

Betonun sünme davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir [27].

Cüruflu çimentolarla üretilmiş betonların rötreleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle farklılıklar göstermekle birlikte bu farkla çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, cüruflu çimento kullanımı rötreyi portland çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir [27].

2.2.2.5 GYFC'nin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri

- Sülfat etkisine dayanıklılık

Regourd tarafından yapılmış bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış %50 C₃S + %15 C₃A + %5 alçı + %30 kuartz içeren numuneler %5 MgSO₄ eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak numunelerde genleşme gözlenmiş ve 7. günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra, bu numuneler X ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde, Mg(OH)₂, CaSO₄.2H₂O etrenjit ve C-M-S-H oluştuğu saptanmıştır. Aynı araştırmada, ikinci seri numuneler kuartz yerine granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak hazırlanmış ve aynı koşullara tabi tutulmuştur. Sonuçta GYFC içeren numunelerde hiçbir bozulma görülmemiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf içeren çimentolarla yapılan beton numuneleri üzerinde de elde edilmiştir. Aynı araştırmadan çıkan bir başka sonuç ise kullanılan cürufun inceliğinin artmasıyla, betonun porozitesini azalttığından dolayı, kimyasal etkilere karşı direncin yükselmesidir.

MgSO₄, CaSO₄ ve Na₂SO₄ eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka araştırmada da 13 değişik çimento kullanılmış ve yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak sülfat direncini arttırdığı saptanmıştır [27].

P.S. Mangat ve J.M. Khatib'in yaptığı araştırma, değişik dozajlarda yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu içeren betonların sülfat dayanımını incelemiştir. Toplam bağlayıcı içeriği 350 ve 450 kg/m³ ve su/çimento oranı 0.45'tir. numunelerin birim hacimdeki poroziteleri ve gözenek yapısı cıva sızma porozimetresi ve karbonatlaşma miktarı hesaplanarak ölçüldü. Örnekler, öncelikle 14 gün boyunca 20 ila 45 °C arasında değişen sıcaklıklarda, nem oranı yaklaşık olarak %25-55 olacak şekilde kür edilmiştir. Daha sonra kürlenmiş bu örnekler sülfat eriyiğine batırılmışlardır.

Sonuçlara göre %22 ila %32 arasında değişen uçucu kül katkısıyla üretilmiş betonlar en fazla sülfat dayanıklılığın gösterdi. Bu arada sülfat direnci, kuru hava kürü

yapılmış numunelerle, ıslak nemli hava kürü yapılmış numuneler karşılaştırıldığında kuru havada kür yapılmış numunelerin sülfat dayanıklılığının daha iyi çıktığı görülmüştür. %5 ila %15 arasında silis dumanı içeren numunelerdeki sülfat direncinde de çok büyük gelişmeler olduğu görülmüş, bununla beraber istenmeyen gözenek hacmi ve çapı 0,177 mm'den büyük gözeneklerin miktarı silis dumanının kullanılmasıyla artmıştır. %80 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da sülfat dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ama %40 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da bunun ters etkisi gözlemlenmiştir. %40 yüksek fırın cürufu katkılı 45 °C'de %25 nem oranında ıslak hava kürü yapılmış betonda daha az gözenek yüzdesi ve daha ince gözenek yapısı gözlemlenmiş olup kontrol betonuyla karşılaştırıldığında daha az sülfat direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir [29].

- Deniz suyu etkisine dayanıklılık

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

- Karbonatlaşmaya dayanıklılık

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

- Alkali-agrega reaksiyonu

Amorf yapıdaki silisli agregaların çimentonun içerdiği alkali oksitlerle yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan ve alkali-silika jeli adı verilen ürünün rutubet alarak aşırı genleşme göstermesi betonda çatlamalar ve bozulmalara neden olur. Cürufli çimentolar kullanılarak yapılan çok sayıda araştırma cüruf miktarının artmasıyla

alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin azaldığını göstermiştir [27].

Young-Jin Kwan [30] tarafından yapılan bir araştırmada yüksek basınç dayanımlı betonlarda alkali-agrega reaksiyonu ve yüksek fırın cürufunun etkinliği incelenmiştir. Bu çalışmaların neticesinde şu sonuçlar çıkmıştır.

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

2.2.3 Silis dumanı

Silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen, endüstriyel bir atık olan silis dumanı'nın değerlendirilmesi konusundaki ilk çalışmalar çevre koruması amacı ile 1950'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı gene Norveç'te 1969 yılında denendi. Bu konudaki uygulamalar ve silis dumanının beton içindeki davranışı ile ilgili araştırmalar daha ziyade iskandinav ülkelerinde olmak üzere 1980'li yılların başına kadar oldukça yavaş gelişti. Beton için akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanıma girmesi, silis dumanının birçok beton özelliği üzerindeki olumlu etkilerinin ortaya çıkması ve çevre kirliliğine karşı endüstriyel atıkların daha sıkı kontrolü gibi faktörler silis dumanı konusundaki çalışmaların son yirmi yıl içerisinde hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur [31].

Eldeki rakamlara göre dünyadaki yıllık silis dumanı üretimi 1 milyon ton civarında olup bunda A.B.D.'nin payı 130,000 ton, Norveç'inki ise 120,000 ton kadardır.

Türkiye'de silis dumanı Antalya'da Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir. Ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozları olarak yıllık üretim miktarları toplam 1,000-2,000 ton arasında değişmektedir. Buradan elde edilen silis dumanı 1980'li yılların sonlarından itibaren özellikle üniversitelerimizde çimento ve beton katkı maddesi olarak çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Silis dumanları inşaat, yalıtım ve ateş tuğlası endüstrilerinden alıcı bulmuştur. Son yıllarda bazı hazır beton üreticileri tarafından kullanılmaktadır.

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur.

Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır.

Silis dumanı çoğunlukla değişik tonlarda gri renktedir. SiO₂ renksiz olduğuna göre rengin koyuluğu karbon miktarına bağlı olarak artar. Demir oksit fazlalığı ise renge hafif kahverengi bir ton verir [31].

2.2.3.1 Silis dumanının taze beton özelliklerine etkileri

- Su ihtiyacı-işlenebilme

Çimentonun %5'i gibi az miktarlarda katılan silis dumanı çimento hamurunun kıvamını ve dolayısı ile taze betonun işlenebilmesini fazla etkilememektedir. Ancak daha yüksek katkı oranlarında belirli bir işlenebilme düzeyi için gerekli su miktarı silis dumanı miktarı ile birlikte artmaktadır. İlave su dayanımı düşüreceğinden silis dumanlı betonlarda akışkanlaştırıcı veya süper-akışkanlaştırıcı katkı kullanılması olağan hale gelmiştir. Katkı dozajı, katkının türüne, silis dumanı miktarına ve istenilen su/bağlayıcı orantısına bağlı olmaktadır.

- Puzolanik reaksiyonlar

Çok ince taneleri yüksek amorf silis içeriği nedeni ile silis dumanı çimento hamurundaki CH ile reaksiyona girerek puzolanik C-S-H jeli oluşturur. Bu konuda yapılan basitleştirilmiş bir çalışmada SD/CH orantısı 2 olan bir çözeltide silis dumanı bütün kalsiyum hidroksiti 7 günde bağlayarak C-S-H jeli oluşturmuş, SD/CH orantısı 1 olan çözeltide ise bu reaksiyon 28 günde tamamlanmıştır. Araştırmacılara göre silis dumanı katkılı hamurdaki puzolanik jel normal olarak oluşmakta olan C-S-H jelinin boşlukları içinde yer almakta ve sonuç olarak çok yoğun bir jel yapısı meydana gelmektedir.

- Priz süreleri

Silis dumanı katkısı çimento hamurunda priz sürelerini uzatır. Benzer etki taze betonda da görülür. İlaveten betonda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların da priz süreleri üzerinde etkileri söz konusudur. Örneğin, çimentonun %15'i yerine silis dumanı katılmış ve süperakışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda priz başlangıç ve bitiş sürelerinde sırası ile 1 ve 2 saatlik uzamalar gözlenmiştir. Diğer taraftan aktivitesi daha az olan puzolanların sebep olduğu priz gecikmeleri silis dumanı ilavesi ile kısmen telafi edilebilmektedir.

- Plastik rötre

Silis dumanı katılmış betonlarda terlemenin çok azalması veya hiç meydana gelmemesi özellikle beton yüzeyinde buharlaşmanın fazla olduğu ortamlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar sürebilir. Bu süre içinde beton yüzeyinin kürüne itina edilmesi veya beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmanın önlenmesi yararlı olur [31].

2.2.3.2 Silis dumanının sertleşmiş beton özelliklerine etkileri

- Geçirgenlik

Silis dumanı katkısı kılcal boşlukları küçülterek süreksiz hale getirdiği için betonda geçirgenliği azaltır. Örneğin, çimento hamurunda $3,8 \times 10^{-13}$ m/s olarak ölçülen su geçirgenliği %10 ve %20 miktarlarında silis dumanı katıldığında sırası ile $0,9 \times 10^{-13}$ m/s ve $<0,1 \times 10^{-13}$ m/s gibi değerlere düşmektedir.

- Basınç dayanımı

Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamalarının yanısıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur arayüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega-hamur arayüzeyinin kuvvetlenmesinden dolayıdır. Zira aynı çimento/silis dumanı orantısında silis dumanı katkılı ve katkısız çimento hamurlarının dayanımları arasında belirgin bir fark görülmemiştir.

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendini gösterir. Ancak su/bağlayıcı orantısını 0,40 civarına indirerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek mümkündür. İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90. günden sonra düşebilmektedir. Diğer taraftan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını bildirenler de vardır.

Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanının genellikle çimentonun %5-20'si oranlarında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı çimentonun ağırlıkça yaklaşık %15'i yerine katılmaktadır. Bu betonlarda çimento dozajını 400-500 kg/m³ sınırının üstüne çıkarmak veya su/bağlayıcı orantısını 0,30'un altına indirmek gibi zorlamalar fazla yarar sağlamamaktadır.

- Aderans

Silis dumanlı betonlarda iç terleme azaldığından agreganın alt yüzeylerinde olduğu gibi çelik donatı çubuklarının altında da su birikimi ve boşluk oluşumu azalır. İlâveten, daha sıkı ve yapışkan olan taze beton, agregayı, donatı çubuklarını ve betonun temasta bulunduğu diğer malzemeyi daha etkin olarak sarar, aradaki aderans kuvvetlenir.

Değişken tip agregalar ve %5'den %30'a kadar silis dumanı katkısı içeren betonlarda hamur-agrega arasındaki aderansın kuvvetlendiği çok sayıda araştırmacı tarafından bildirilmektedir. En az %5 silis dumanı katkısı arayüzeyindeki kırılma enerjisini önemli ölçüde artırmaktadır.

- Kuruma rötresi

Silis dumanlı betonlarda rötre, katkı miktarı, su/bağlayıcı orantısı ve ilk günlerdeki bakım koşullarından etkilenmekte, bu faktörlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar normal betonla elde edilenlerden farklı olabilmektedir. Katkı miktarı %10'dan az olduğunda rötre normal betonlardan farklı değildir. Daha yüksek silis dumanı miktarları, su/bağlayıcı orantısının 0,60'dan büyük olması, yetersiz ıslak bakım ve ileri yaşlar kuruma rötresini göreceli olarak artırmaktadır.

- Zararlı kimyasal maddeler ve sülfatlara karşı direnç

Kimyasal maddelerin betonu yıpratıcı etkileri çeşitli yollardan olabilir. Asitler kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek suda çözünen tuzlar meydana getirirler. Betondan ayrılan tuzlar geçirgenliği artırır ve zararlı etkilere karşı direnci azaltırlar. Sülfatlar katyona bağlı olarak alçı ve etrenjit oluşturarak betonda şişme ve çatlamalara yol açarlar veya C-S-H jelini ayrıştırırlar. Bu yıpratıcı reaksiyonların çoğunda çimentodaki C_3A içeriğinin olumsuz rolü büyüktür. Silis dumanı çimentonun genellikle %15'ine kadar katıldığı için C_3A miktarını daha fazla katılan diğer puzolanlar kadar azaltmaz. Ancak geçirgenliği etkin bir şekilde azaltması ve kalsiyum hidroksiti bağlamadaki yüksek aktivitesi dolayısı ile daha başlangıçtan itibaren betonda zararlı etkilere karşı en az diğer puzolanlar kadar direnç sağlar.

Çimentoya %10-30 oranında katılan silis dumanı ile harçların sodyum, magnezyum ve kalsiyum klorürlere karşı direncinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Klorürü çözeltileri içinde bekletilen harç numunelerinin çeşitli özelliklerinin incelendiği bir çalışmada da silis dumanı katkısının olumlu etkileri ortaya çıkmıştır.

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

Silis dumanı ve silissi uçucu kül katkılarını içeren harç ve betonların sülfat dirençleri ASTM C 452 ve C 1012 metodlarına ilaveten numuneleri %10'luk sodyum ve %8,4'lük magnezyum sülfat çözeltileri içinde bekletilerek araştırılmıştır. Çimento yerine %16 oranında katılan silis dumanı ile sodyum sülfata karşı en iyi direnç elde edilmiştir. Katkı maddeleri ve özellikle silis dumanı magnezyum sülfata karşı direnci olumsuz etkilemişlerdir.

- Alkali-agrega reaksiyonu

Betonda zamanla genleşme ve çatlamalara yol açan alkali-agrega reaksiyonları genellikle alkali-karbonat ve alkali-silika reaksiyonları olarak iki ana grupta ele alınır.

Silis dumanı katkısının alkali-karbonat reaksiyonunun kontrol altına alınmasında fazla etkili olmadığı bildirilmektedir.

Alkali-silika reaksiyonu ise betona silis dumanı gibi bazı puzolanların yeterli miktarda katılması halinde geciktirilebilmekte veya önlenebilmektedir. Puzolanların ince taneleri içindeki silis, çimento hamuru gözenek sıvısındaki alkalileri hızla bağlayarak yoğunlukları ve pH değerini azaltır. Bu durumda gözenek sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmeleri zorlaşır. İleveten, katkılı hamurda geçirgenliğin azalmış olması da olumlu etki yapmaktadır.

Özet olarak, silis dumanı çimentonun yeterli bir bölümü yerine katılması halinde alkali-silika reaksiyonunun kontrolunda genellikle diğer puzolanlardan daha etkili olabilmektedir [31].

2.2.4 Nano silika

Nano silika organik çözücü içinde şekilsiz silika koloid tanecikleri biçiminde bulunur. Ticari olarak sıvı halde ve pH değeri 8-10 arasında olacak şekilde sunulur. Nano silikanın bu pH değerine getirilmesi ve burada sabitlenmesi eriyiğe NaOH, KOH, LiOH veya NH₄OH gibi alkalilerin eklenmesiyle sağlanmaktadır. Nano silika tanecikleri negatif yüklüdür ve nötrlüğü pozitif yüklenmiş Na⁺, K⁺, Li⁺ ve NH₄⁺ gibi iyonlarla sağlanır. Tanecikleri pozitif yüklenmiş nano silikalar da bulunmaktadır. Nano silika taneciklerinin boyutları 5 ila 100 nanometre arasında değişir. Maksimum konsantrasyon tanecik boyutlarına bağlıdır. Taneciklerin ağırlıkça %15'i 5 nm, %30'u 8 nm ve en az %50'sinde ise 100 nm boyutundadır. Nano silikanın görünümü tanecik boyutlarının dağılımına ve konsantrasyonuna bağlıdır. Tanecik boyutları büyük ve konsantrasyonu yüksekse görünümü süte benzemektedir. Tanecik ölçüleri en küçük boyuttaysa neredeyse renksiz bir görünüm alır.

Silis dumanının aksine nano silikanın yüzey alanı çok daha büyüktür, bu sebepten dolayı nano silikanın puzolanik aktivitesinin silis dumanından çok daha fazla olmaktadır. Ultra ince nano silika tanecikleri çimento hamurunu çok çabuk sertleştirir çünkü mevcut suyun büyük bir bölümü nano silikanın yüksek puzolanik aktivitesi dolayısıyla erken safhada tüketilir. Bu çok hızlı jel oluşumu sırasında gözenekli bir yapı oluşur. Bu durum erken dayanımın yüksek olmasını sağlamakla birlikte son dayanımın düşük kalmasına sebebiyet vermektedir. Bu olaylar nano silikanın aşırı yüksek puzolanik aktivitesine bağlanmaktadır. Nano silikanın ağırlıkça % 0,15-0,20 oranında kullanılmasıyla son dayanımın önemli ölçüde arttığı

bildirilmektedir. Ayrıca geçirgenlik düşmekte ve sülfata karşı dayanım artmaktadır [32].

2.3 Sülfat Etkisi

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

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

Yapılan araştırmalar çimento kimyasalının betonda sülfat hücumunu önleyici tek faktör olmadığını göstermektedir. Çimentoda bulunan düşük miktardaki C_3A bileşeninin yanı sıra üretilen betonun geçirimliliğinin düşük olması, sülfat hücumunu engelleyici ve azaltıcı faktörler arasında sayılmaktadır. Bilindiği gibi toprakta ve yer altı sularındaki sülfatlar, betonun içerisine sızan sularla birlikte girebilmektedir. Bu nedenle betonun geçirimliliğinin az olması betona girecek sülfat miktarının az olmasını sağlayacaktır. Sülfat hücumu sonucu oluşabilecek hasarları önleme yollarından bir diğeri ise beton üretiminde mineral katkıların kullanılmasıdır. Mineral katkılar, özelliklerine göre betonu sülfat hücumuna karşı daha dayanıklı hale getirebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda mineral katkı kullanımının çimentonun sülfata karşı direncini arttırmada etkili olduğu bildirilmektedir [33].

Zararlı kimyasallar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girip su içerisinde çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve bu sayede zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hız kazanmaktadır. Sülfatlarda aynı tip reaksiyon sonucunda, genleşen ve betonda çatlaklara sebep olan etrenjit üretirler [20].

Freeman ve Carrasquillo, uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu küllü betona karıştırma sırasında katmaktan daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir [18].

Yapılan deneysel bir çalışma sonucu yüksek miktarda kalsiyum oksit (CaO) ve amorf kalsiyum alüminat içeren uçucu küllerin, betonun sülfat etkisine karşı hassasiyetini arttırdığı, düşük miktarda kalsiyum içeren uçucu küllerin ise betonun sülfat dayanımını geliştirdiği ortaya çıkmıştır [24].

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür.

Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çalılık dışında, bitki ve ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanı sıra, yeraltı suyu ve topraktan örnekler alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır.

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

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

Doğal alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tabakalarındaki sülfat konsantrasyonu oldukça yüksektir. CaSO_4 'ların düşük çözünürlükleri olduğundan etki lokal olarak kalır. Buna karşılık uzun süre açıkta kalmaları halinde bu yataklar, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi daha kolay eriyebilen tuzlara dönüşebilirler.

Beton açısından sülfat etkisinin şiddeti toprak veya suda bulunan sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Zemindeki SO_4^{-2} veya SO_3^{-2} yoğunlukları % veya mg/kg olarak verilir. Yer altı suyundaki sülfat konsantrasyonu ise ppm veya mg/lt olarak gösterilir. Çizelge 2.3'de ACI 201 standardında sülfat etkisi açısından yapılmış sınıflama gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : Zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat yoğunluklarının betona etkisi

Etki derecesi	Zeminde suda çözünen Sülfat SO_4^{-2}	Suda SO_4^{-2} (mg/lt)
İhmal edilebilir	0,00-0,10	0-150
Orta	0,10-0,20	150-1500
Şiddetli	0,20-2,00	1500-10000
Çok şiddetli	2,00 ve üstü	10000 ve üstü

TS 3340 “Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları” standardına göre ise sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinli dereceleri Çizelge 2.4'deki gibi sınıflandırılmıştır. Sülfat iyonu konsantrasyonunu zaman zaman SO_4^{-2} olarak, bazen ise SO_3^{-2} olarak ifade edilmektedir. SO_3^{-2} konsantrasyonunu 1,2 ile çarparak SO_4^{-2} konsantrasyonuna geçmek mümkündür.

Çizelge 2.4 : TS 3340’a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri

Etkinlik derecesi	Suda SO_4^{-2} (mg/l)	Suda SO_4^{-2} (mg/l)
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	>5000
Çok kuvvetli	>3000	-

Standartlarda yapılan sınıflamalar beton ile sürekli temas eden durgun sular için geçerlidir. Suyun basıncının ve sıcaklığının artması, ıslanma-kuruma olayları, çarpma, sürtünme gibi mekanik etkiler etkinlik derecesini artırır. Betonun özellikle doymun hale gelip ardından kuruması ve bu olayın sürekli gerçekleşmesi halinde hasarın boyutu büyür [34].

2.3.1 Sülfatın kaynağı

Sülfat saldırısının kaynağı iç sülfat etkisi ve dış sülfat etkisi olarak ikiye ayrılır.

- **Dış sülfat etkisi:** Sülfat kaynağının betonun dışından geldiği durumdur. Sülfatın kaynağı yer altı suyu, toprak, katı endüstriyel atıklar, gübreler veya sıvı endüstriyel atıklar olabilir.
- **İç sülfat etkisi:** Sülfatın kaynağının betonun içindeki malzemelerden geldiği durumdur. Sülfatın kaynağı çimento, cüruf ve uçucu kül gibi ilave malzemeler, agregası, kimyasal katkıları veya kullanılan su olabilir.

Ulusal ve uluslararası birçok standart çimentolardaki sülfat ve C_3A oranlarını sınırlanmışlardır. Bu sınırlamaların amacı iç sülfat saldırısını önlemektir. Bu sınırlamaların önemi, dış sülfat etkisinin olmadığı durumlarda büyük genişlemelerin olabileceği gözlemlendiğinde itibar görmüştür. ASTM standartlarında Tip V sülfata dayanıklı çimento için limitler; C_3A içeriği için %5, $\text{C}_4\text{AF}+2(\text{C}_3\text{A})$ için %25 ve SO_3 için ise %2,3’tür (ASTM 1995). Sülfatın kaynağı agregası veya diğer beton bileşenleri de olabilir. Karışım suyu dahil betonun tüm bileşenleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Uygun şekilde üretilmiş ve gerekli koşullarda saklanmış olan betonlarda sülfat saldırısı durumu nadir olsa da modern çimentoların nispeten yüksek klinker sülfat içeriği hesaba katıldığında iç sülfat saldırısı potansiyeli yüksektir. Bu durum özellikle

yüksek sülfatlı çimentoların kullanıldığı, buhar kürü ve/veya yükseltilmiş sıcaklığın uygulandığı durumlarda önemlidir.

Sıcaklığın neden olduğu iç sülfat saldırısı literatürde gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) olarak ifade edilmektedir ve üzerinde tartışılması gerekir [37].

2.3.2 Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF)

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

DEF’in oluşma nedeni, prefabrik sektöründe elemanların hızlı priz alması ve dayanım kazanması için uygulanan yüksek sıcaklığa bağlanmaktadır. 60-70°C kür sıcaklıklarının bile DEF’e yol açabildiği bilinmektedir. Bu sıcaklıklarda etrenjitin ($C_3A.3CaSO_4.31H_2O$) normalde hidrasyonun ilk dakikalarında görülen oluşumu engellenir. 60°C civarında hidrasyon sırasında oluşan etrenjit dağılır. 70°C’den sonra ise etrenjit oluşumu durur. Etrenjit oluşumunun stabilitesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar görülür.

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

Oluşan etrenjit çok ince olup, alkali-silika jeline benzer. DEF agrega-çimento harcı ara yüzeylerinde boşluk yaratıp, bu boşluklarda gelişir.

DEF oluşumunu engellemek için aşağıdaki önlemlerin alınması yarar vardır.

1. Özellikle suda yavaş çözünebilen SO_3 içeren çimento klinkerinde sülfat içeriğinin mümkün mertebede düşük olmasına dikkat edilmelidir. %1,5 SO_3 oranının bile reaksiyona yol açtığı belirlenmiştir. Bu nedenle çimentoda SO_3 oranının en alt düzeyde olması tercih edilir.
2. Kür sıcaklığının çok yüksek olmamasına dikkat edilmelidir. 60°C 'lik kür sıcaklıkları bile bazı tür çimentolarda reaksiyona yol açabilmektedir.
3. Kullanılacak olan çimentonun düşük hidratasyon ısısı çıkaran türde olmasında yarar vardır. Örneğin, hızlı dayanım kazanan ince çimentolar yüksek sıcaklıkta (70 - 75°C) kür edilirse DEF açısından daha büyük bir riskten söz edilebilir.
4. Önemli miktarda uçucu kül gibi puzolan içeren çimentoların kullanımı sülfat miktarını azaltacaktır. Ancak bazı puzolanik maddelerin de sülfat içerebildiği unutulmamalıdır.
5. Yapı elemanlarının su ile teması kesilmelidir.
6. Hava sürükleyici katkı kullanımının, kristal genişmesinin oluşturduğu iç gerilmeleri azaltacağı için yararlı olması beklenir.

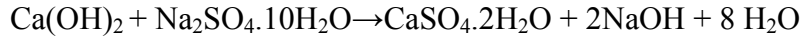
Reaksiyonun oluşup oluşmayacağını önceden belirlemek üzere, değişik araştırmacılar tarafından uygulanan farklı deney yöntemleri vardır. Henüz bu konuda kabul edilmiş standart deney yöntemi geliştirilememiştir [34].

2.3.3 Sülfatların betonda oluşturdukları zararlı reaksiyonlar

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

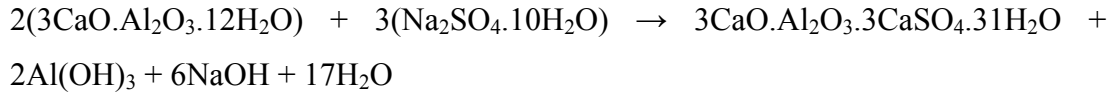
Betonda sülfat etkisi kendini önce yüzeyde oluşan beyazımsı lekelerle gösterir, hasar daha çok köşelerde, sivri noktalarda ve birleşim yerlerinde başlar. Daha sonra ilerleyen çatlaklar ve dökülmeler meydana gelir. İleri düzeyde hasar durumunda ise betonun kırılganlaştığı ve yumuşadığı, dayanımını ve rijitliğini kaybedip dağıldığı görülür.

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



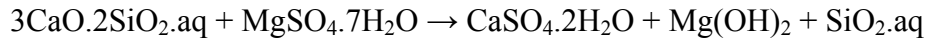
Bu reaksiyon sonucu katı fazın hacmi %124 artmaktadır. Suyun sürekli yıkaması sonucu Ca(OH)_2 tamamen bünyeden uzaklaşabilir. NaOH 'in birikimi sonucu reaksiyon dengeye ulaşıncaya, yalnızca SO_3 'ün bir kısmı alçıtaşına dönüşür.

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



Kalsiyum sülfat ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer ve Kalsiyum sülfoalüminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucu katı fazın hacmi %227 artmaktadır. Candlot tuzu veya etrenjit adı verilen hidrate tuz çok miktarda hidrat suyu içermesi nedeniyle büyük bir hacim kaplar.

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



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

Sülfat etkisi çözeltinin yoğunluğuna bağlı olarak artar. Ancak %0.5 MgSO_4 ve %1 Na_2SO_4 yoğunlukları üzerindeki değerlerde tahribatın artım hızının yavaşladığı görülmüştür. Doygun MgSO_4 çözeltisinde, düşük su/çimento oranlarında bile betonda 2-3 yıl içinde ciddi tahribat gözlenir. C_4AF ve sülfatlar arasındaki reaksiyondan da etrenjit oluşur. Ancak oluşan etrenjitin amorf yapıda olması sebebiyle genleşme hasarı oluşturması beklenemez [34].

2.3.4 Reaksiyonun gelişimini etkileyen faktörler

Reaksiyonun gelişimini doğrudan etkileyen parametreler şöyle sıralanabilir.

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

Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata dayanıklılığı da büyük oranda geçirimsizliğe bağlıdır. Betonun geçirimsizliğini etkileyen malzeme özellikleri, karışım oranları, çatlak durumu, taze betonun sıkıştırılması, kürü vb. tüm parametreler aslında sülfata dayanıklılığını da dolaylı olarak etkilemektedir. Sülfat etkisine maruz kalan betonun boşluk yapısı değişmekte, gözenekliliği artmakta, çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu durum, betonun geçirimsizliğinin artmasını dolayısıyla yıpranma sürecinin kendi kendini hızlandırma özelliğini göstermektedir.

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

Cüruflu çimentoların hidratasyonu sonucu oluşan C_3A yalnızca portland çimentosu klinkerinden geldiği için miktarı çok azdır. Bu nedenle cüruflu çimentolar sülfata çok dayanıklıdır. Bazı standartlarda en az %65 oranında cüruflı içeren çimentolar sülfata dayanıklı tip olarak kabul edilmektedir.

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

Su, sülfat reaksiyonlarında rol almakla kalmaz aynı zamanda bu iyonların beton içine taşınmasını sağlar. Bu bağlamda yer altı suyunu drene ederek beton yüzeylerle temasını önlemek ve temelleri kuru tutmak reaksiyonun gelişimini önlemek için etkili bir önlemdir [34].

2.3.5 Sülfat etkisine karşı alınacak önlemler

Betonun sülfata dayanımını sağlamak için alınacak önlemler, betonun geçirimsizliğinin sağlanması, çimento C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriğinin sınıflandırılması, puzolanik katkı maddeleri kullanılması, gerektiğinde betonun kaplamalarla dıştan sülfatlara karşı izole edilmesi şeklinde özetlemek mümkündür. Bu önlemlerden hangilerinin ne zaman uygulanacağını kararı çevresel etkinin şiddetine göre verilir.

Bir fikir vermesi amacıyla Amerikan ve Avrupa standartlarının konu ile ilgili önerileri aşağıda özetlenmiştir. Ancak standartlarda etki şiddetinin genellikle sülfat konsantrasyonları dikkate alınarak belirlendiğini, tekrarlı ıslanma-kurumaya maruz elemanların ise çok daha şiddetli bir etkiyle karşılaşabileceklerini bir kez daha hatırlamakta yarar vardır.

ACI 318 yapı şartnamesi, orta şiddette sülfat etkisinde ($150-1\ 500\text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $\%0,1-0,2\text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%8$ 'den az olan (ASTM Tip II) bir çimento kullanımını ve betonun su/çimento oranının $0,5$ değerinin altında kalmasını, şiddetli etki durumunda ($1500-10\ 000\text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $\%0,2-2\text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%5$ veya altında olan bir çimento (ASTM Tip V) kullanımını ve betonun su/çimento oranının $0,45$ değerinin altında kalmasını, çok şiddetli bir etki durumunda ise ($>10\ 000\text{ mg/l SO}_4^{-2}$ yer altı suyunda veya $>\%2\text{ SO}_4^{-2}$ zeminde) C_3A oranı $\%5$ ve altında olan bir çimento ile puzolanik katkı maddelerinin birlikte betonun su/çimento oranı $0,5$ değerinin altında olacak şekilde kullanımını önermektedir.

TS EN 206-1 standardına göre ise, az zararlı kimyasal etki XA_1 ($200 \leq \text{SO}_4^{-2} \leq 600\text{ mg/l}$ suda veya $2000 \leq \text{SO}_4^{-2} \leq 3000\text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda, en büyük su/çimento oranı olarak $0,55$, en az çimento oranı 300 kg/m^3 , en küçük dayanım sınıfı C30'un kullanımı şart koşulmaktadır. Bu ortamda sülfata dayanıklı çimento kullanımı zorunlu tutulmamakta ancak önerilmektedir. Orta zararlı kimyasal etki XA_2 ($600 < \text{SO}_4^{-2} \leq 3000\text{ mg/l}$ suda veya $3000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 12\ 000\text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda en büyük su/çimento oranı $0,5$, en az çimento dozajı 320 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı C30 ve sülfata orta derecede dayanıklı ($\text{C}_3\text{A} < \%8$) çimento kullanımı zorunlu kılınmaktadır. Çok zararlı kimyasal ortam XA_3 ($3000 < \text{SO}_4^{-2} < 6000\text{ mg/l}$ suda veya $12\ 000 < \text{SO}_4^{-2} \leq 24\ 000\text{ mg/kg}$ zeminde) durumunda en büyük su/çimento oranı $0,45$, en az çimento dozajı 360 kg/m^3 , en düşük dayanım sınıfı C35 ve sülfata yüksek derecede dayanıklı ($\text{C}_3\text{A} < \%5$) çimento kullanımı zorunlu tutulmaktadır.

Şiddetli etki durumunda C_3A içeriğini sınırlamak yetersiz bir önlem olabilir. Bu durumda sülfata dayanıklı bir çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkılarında kullanımı tavsiye edilir. Sülfatların C_3A 'nın yanı sıra Ca(OH)_2 ve CSH ile de reaksiyona girdikleri yukarıdaki reaksiyon mekanizması açıklanırken ifade edilmişti. Puzolan kullanmanın iki etkisinden bahsedilebilir.

Puzolanlar Ca(OH)_2 'yi bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler. Sadece portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)_2 ve C_3A oranının düşürülmesini sağlarlar. Hidrate çimentonun Ca(OH)_2 içeriği büyük oranda C_3S miktarına bağlı olduğu için, çimentonun C_3A içeriğinin de dayanıklılıkta önemli bir faktör olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Ayrıca, puzolan olarak kullanılan maddenin düşük CaO içerikli olması gereklidir. Bu açıdan C sınıfı uçucu küller yüksek oranda serbest kireç içerebilmeleri nedeniyle sülfata dayanıklılığı arttırmak yerine azaltabilirler.

Çok şiddetli sülfat saldırısında ise, yukarıda sözü edilen önlemler yeterli olmaz. Bu durumda yapıyı dıştan sülfata dayanıklı izolasyon malzemeleri ile izole etmek gerekir. Bu amaçla bitüm veya polimer esaslı kaplamaların kullanımı mümkündür. Ayrıca drenaj önlemleri ile suyun yapıya ulaşması engellenmelidir [34].

2.3.6 Sülfata dayanıklılık deneyleri

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

ASTM C 1012 Standardı sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harç çubuğu numunelerinin boy değişimlerinin tespiti esasına dayanır. Değişik bağlayıcı maddelerin, sülfat dayanıklılığına etkisinin incelenmesinde de kullanılabilir.

Standarta göre hazırlanan harç karışımlarının, 20 MPa basınç değerine ulaştıktan sonra sülfat çözeltisine konulmaları gerekmektedir. Bu amaçla 5 cm ayrıtlı küpler kullanılarak karışımların basınç dayanımlarının gelişimi takip edilir. Bu aşamadan sonra istenen dayanımı sağlayan 25*25*285 mm boyutlu harç çubuğu örnekler 50000 mg/l sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmeye başlanır ve boy değişimleri ölçülür. Ancak, beton yerine harçlarla çalışılması nedeniyle iri agrega-çimento ara yüzeyinin olmaması, silika tozu, fiber gibi betonda kullanılan malzemelerin fiziksel etkisini göstermemesi, ıslanma-kuruma etkisini dikkate almaması ve sonucun uzun sürede elde edilmesi deney yönteminin dezavantajları olarak sıralanabilir.

Bir diğ er deney yöntemi ASTM C 452 standardında tarif edilmiştir. Deney, belli oranlarda alçı eklenerek hazırlanan 25*25*285 mm boyutlu prizmatik harç çubuğu örneklerinin 1 gün sonunda yaptıkları genleşmelerin tespiti esasına dayanır. Karışımda kullanılacak alçı miktarı, çimentonun ve alçının SO₃ miktarı dikkate alınarak %7 SO₃ içeriği elde edilecek şekilde ayarlanır. Örnekler kalıptan çıkartıldıktan sonra (23±1.7 C) su içinde gömülü olarak bekletilmektedir. Katkılı çimentolarda bu yöntemin kullanımı uygun değildir. Çünkü karışıma daha başlangıçta alçı katılması henüz puzolanik reaksiyon gelişmeden sülfata maruz kalmaya yol açmaktadır.

ASTM C 1038 deney yöntemi ile çimentoların zararlı mertebelerde sülfat içerip içermediklerinin tespiti, hazırlanan harçların yaptıkları genleşmelere dayanılarak belirlenebilmektedir. Su içinde bekletilen harç çubuklarının 14 günlük genleşme değerlerinin %0,02'nin altında kalması istenmektedir [34].

2.4 Ultrases

Bilindiği gibi titreşim frekansı 20 Khz'den fazla olan ses dalgalarına ultrases denir. Malzeme testinde kullanılan ultrases, pizzo-elektrik metodu ile elde edilmektedir. Bu metodun esası kuartz kristal dilimini bir alternatif akım alanına yerleştirmektir. Bu durumda kuartz kristali, sahip olduğu bir özellik sayesinde sabit bir frekansta titreşir. Eğer elektriksel alanın frekansı kuartzın titreşim frekansına eşit olur ise rezonans hali meydana gelir [35]. Bu durumda insan kulağının duyabileceği titreşim frekansı 16-16000 Hz (Hertz saniyede titreşim adedi) arasında bulunmaktadır. 16000 üzerine çıkıldığında kulakla duyulmayan ve ultrases denilen ses dalgaları oluşur.

Bu dalgalar boşlukta yayılmazlar. Ancak katı, sıvı veya gaz halde bulunan bir cismin içinde belirli bir V hızıyla yayılırlar.

Ultrases dalgaları ışık dalgalarının özelliklerine sahip bulunmaktadır. Bu dalgalar yansır, kırılırlar ve difraksiyon olayına maruz kalabilirler. Bu dalgalar üzerine, aynen ışık dalgalarına ait belli başlı kanunları uygulamak mümkündür.

Ultrases demetinde    çeşit dalga bulunmaktadır. Boyuna dalga, sesin ilerleme doğrultusunda bulunurlar. Enine dalgalar, sesin yayılma doğrultusuna dik düzlemde bulunurlar.     nc  tip dalgalar cismin yüzeyini takip eden dalgalar dır. Boyuna ses dalgalarının yayılma hızı, enine dalgaların yayılma hızından daha büyüktür [36].

2.4.1 Cismin içinde ses hızının tayini

Prizma şeklinde, L uzunluğundaki bir beton numunesinin bir ucuna ultrases üreten prob, diğer ucuna da bu sesleri toplayan prob altına gres sürülerek yerleştirilir.

Prob tarafından oluşturulan dalgalar bir ossilografa nakledilerek sesin A'dan B'ye ulaşması için geçen zaman saniyenin milyonda biri yani mikro saniye cinsinden tayin edilir. Sesin A'dan B'ye bir t_1 süresinde ulaştığı bulunduktan sonra yayılma hızı [36];

$$V=L/t_1 \quad (2.1)$$

Bu deney metodu uygulanırken verici ve alıcı problar numuneye temas ettirilirken aralarında boşluk bulunmamalıdır. Arada hava boşluğu bulunursa ultrasesin %100'u yansır ve bir sonuç alınamaz. Bu nedenler problar ve numune arasında boşluk olmaması için yüzeylerine gres yağı sürülür.

Numunenin boyu da ultrases ölçümünde önemlidir. Numunenin boyu L, içinde bulunan maksimum dane çaplı agrega D ile simgelenirse, $L_{\min}=3,5D$ olarak alınmalıdır. L uzunluğu $L_{\min}$ 'den küçük ise ses darbeleri numune içinde başlangıçtaki karakteristiklerini kaybetmeyecek ve bundan dolayı ses hızı hakiki değerin %10-22 oranında fazlalık gösterecektir. Deney sonucunda bulunan değerlerde büyük bir dağılma meydana gelecek, aynı betona ait V hızları birbirinden önemli derecede fark edecektir.

Sıcaklık 5-30 °C arasında olduğu zaman V hızına bir etkisi olmaz yalnız 5°C'ın altına düştüğünde hız normalden %1,5 oranında az, 30°C üzerine çıkarsa %5 oranında çıkan hız değerini artırmak gerekir.

2.4.2 Ultrases hızını etkileyen faktörler

Ultrases deneyi ile bulunan hız, malzemenin cinsine ve bünyesine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle ses dalgalarının karşısına bir boşluk çıktığında dalga oradan geçemez ve etrafından dolaşır. Bu da geçiş süresini arttırır ve geçiş hızını düşürür. Bu sayede beton ve doğal taş gibi boşluklu malzemelerdeki ses hızı bize bu malzemelerin boşlukları hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar. Bu hızın çok düşük olması o malzemenin çok boşluklu olduğu gösterir.

Cismin yapısında bir değişiklik olmadıkça, cisme bir gerilmenin etkimesi veya etkimemesi halinde bulunan ses hızları birbirinden fark etmez. Gerilmenin etkisiyle

çatlakların gelişmesiyle meydana gelen yapı değişikliği ses hızının düşmesine sebep olur [36].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, Irak Bağdat ve Kerbela bölgelerinden temin edilen ve sülfat içerikleri standartların çok üzerinde olan doğal kum numuneleri ile üretilen harçlarda iç sülfat etkisi araştırılmıştır. Bazı mineral katkı maddelerinin ve kullanım oranlarının, üretilen harçlarda meydana gelen boy değişimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun yanında, Sakarya bölgesinden temin edilen ve sülfat içeriği düşük olan bir kum örneği ile üretilen harç numuneleri de sülfat içeriği yüksek bir ortamda bekletilerek dış sülfat etkisine maruz bırakılmışlar ve oluşan boy değişimleri sülfat kirliliği yüksek olan kumlarla üretilen harçlar ile mukayese edilmişlerdir.

3.1 Malzemeler

Yapılan bu deneysel çalışma kapsamında kullanılan doğal kum, çimento, mineral ve kimyasal katkılara ait özellikler aşağıda verilmektedir.

3.1.1 Çimento

Numunelerin üretiminde Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Büyükçekmece fabrikası tarafından üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento türüne göre ilgili standartlara uygundur (TS EN 197-1). Çimento ile ilgili deney sonuçları Çizelge 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

3.1.2 Su

Harç üretimi ve kür işleminde şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.3 Agrega

Yapılan bu çalışmada, harç karışımında Sakarya bölgesi kumu, Bağdat’tan getirtilen kum ve Kerbela’dan getirtilen kum kullanılmıştır. Kumlar harç üretiminde kullanılmadan önce laboratuvar ortamında kurutulmuşlardır. Kumlara ait özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çimento deney sonuçları (kimyasal analiz)

Kimyasal analiz	Standartlar	Analiz Sonuçları
Test Metodu: TS EN 196-2		
SiO ₂ Çözünen (%)		20,12
Çözünmez Kalıntı (%)	≤ 5,0	0,49
Al ₂ O ₃ (%)		4,97
Fe ₂ O ₃ (%)		3,30
CaO (%)		63,27
MgO (%)		1,28
SO ₃ (%)	≤ 4,0	3,24
Kızdırma Kaybı (%)	≤ 5,0	2,58
Cl ⁻ (%)	≤ 0,10	0,0443
Na ₂ O/K ₂ O (%)		0,21-0,92
Tayin edilemeyen		0,07
Serbest CaO		1,15
LSF		0,95
Mineralojik Kompozisyon, %		
C ₃ S	52,57	-
C ₂ S	18,11	-
C ₃ A	7,59	-
C ₄ AF	10,04	-

Çizelge 3.2 : Çimento deney sonuçları (fiziksel analiz)

Test Metodu: TS EN 196-3 ve TS EN 196-6		Analiz Sonuçları
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,15
Priz Süresi	Başlama (dak.)	146
	Bitiş (dak.)	193
Hacim Genleşmesi (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3730
	45 µm Elek Kalıntısı (%)	5,2
	90 µm Elek Kalıntısı (%)	0,2

Çizelge 3.3 : Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları

Kum	Özgül Ağırlık (kg/m³)
Sakarya	2650
Bağdat	2640
Kerbela	2560

Kullanılan kumların granülometrilere elek analizi yöntemiyle belirlenmiştir. Kumlardan alınan numuneler sırasıyla 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,50 mm ve 0,25 mm göz açıklı eleklerden elenmişlerdir. Kumların elek analizi deney sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Elek analizi deney sonuçları

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)		
	Sakarya	Bağdat	Kerbela
8	100	100	100
4	96	89	100
2	75	56	90
1	59	35	78
0.50	42	22	54
0.25	17	14	13

Bağdat ve Kerbela bölgelerinden temin edilen doğal kumların petrografik ve kimyasal incelemeleri İ.T.Ü. Maden Fakültesinde yapılmış ve sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Doğal sülfat içeriğinin ihmal edilebilir seviyede olduğu bilinen Sakarya yöresi kum üzerinde petrografik ve kimyasal incelemede bulunulmamıştır.

Bağdat kum örneği:

Makro inceleme: Sarımsı bej renkli, kum ve çakıl boyutlu bileşenlerden meydana gelmiş numunedir. Çakıl ve kum boyutlu elemanların oranı değişkendir. Kum boyutlu malzeme daha ağırlıklıdır. Asit (%10 HCl) ile muamelede reaksiyon izlenmiştir. Manyetik eleman saptanmıştır.

Mikro İnceleme: Binoküler mikroskop altındaki inceleme sonucu numunenin özellikleri şu şekilde belirlenmiştir: Numunenin bileşenleri aşağıdaki Çizelge 3.5'de verilmiştir. Malzeme, kum ve çakıl boyutlu tanelerden oluşur. Çakıl ve kum boyutlu malzemede, elemanların tane biçimleri genelde yarı yuvarlak- yarı köşelidir ve küresellikleri orta ve düşük derecededir. Taneler genelde; bej, gri, sarı, beyaz,

renksiz, yeşil, siyah, bordo gibi çeşitli renklindedir. Kayaç parçaları Magmatik, metamorfik ve sedimanter kökenlidir. Gözlenen mineral parçaları daha çok kuvars ve feldspat gibi mineral parçalarıdır. Mika türü mineral saptanmamıştır. Kil bileşen bulunmaz, ancak marn türü parçalar içinde kil bileşen olabilirse de bunların oranı çok düşüktür. Numunenin jips içerebileceği muhtemeldir ve oranları % 3-4 gibidir. Parçalarda önemli derecede bir alterasyon bulunmaz. Amorf tane saptanmamıştır. Sonuç olarak Kimyasal analiz sonuçlarına göre numune suda çözünen Cl⁻ miktarı açısından problemsiz olup yüksek SO₄ içerir.

Çizelge 3.5 : Bağdat kum örneğinin bileşenleri ve oranları

Mineral / Bileşen	Oran (%)
Kuvars kökenli mineral ve kayaç parçaları	48-50
Feldspatça zengin kayaç parçaları (feldspatoidli siyenit gibi) ve feldspat mineral parçaları	10-12
Granit, meta granit ve diğer granitik, granodioritik kayaç parçaları	12-14
Bazaltik kayaç parçaları	2-3
Sedimanter kayaç (marn, konglomera, kumtaşı, kireçtaşı, jipsli, kil-karbonat taşı) parçaları	24-26
Metamorfik diğer kayaç parçaları (fillat, muhtemel amfibolit)	4-5
Manyetit mineral parçaları	0.5-1

Kerbela Kum Örneği:

Makro İnceleme: Genel görünüm olarak pembemsi bej renkli, çoğunlukla kum boyutlu, daha az oranda çakıl boyutlu elemanlardan oluşan malzemedir. Parçalar genelde mineral parçalarıdır. Asit (%10 HCl) ile muamelede reaksiyon izlenmemiştir. Tanelerde gözle görülür bir alterasyon saptanmamıştır.

Mikro İnceleme: Binoküler mikroskop altındaki inceleme sonucu numunenin özellikleri şu şekilde belirlenmiştir: Taneler yarı yuvarlak ve yuvarlak ve de orta küresel biçimlindedir. Çoğunlukla renksiz kuvars minera taneleridir. Bazı tanelerde rutil gibi inklüzyonlar bulunur ve bazı tanelerde demir oksit izlerinden dolayı pembe renk oluşmuştur. Mineral ve bileşenlerinin kompozisyonu aşağıdaki Çizelge 3.6'da verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre numune suda çözünen Cl⁻ miktarı açısından problemsiz olup yüksek SO₄ içerir.

Çizelge 3.6 : Kerbela kum örneğinin bileşenleri ve oranları

Mineral / Bileşen	Oran (%)
Kuars mineral parçaları + Kuvarsit kayaç parçaları	86-88
Feldspat	7-8
Piroksen + Amfibol + Diğer	5-6

Numunelerin kimyasal analiz ile bulunan klorür, sülfat, çözünen silis ve alkali azalması sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Kimyasal analiz sonuçları

Numune	Cl (Klorür) (%)	SO ₄ (Sülfat) (%)	Çözünen Silis (m mol/lt)	Alkali Azalması (m mol/lt)
Bağdat	0,0098	1,63	33	120
Kerbela	0,0040	1,96	9	83

3.1.4 Mineral katkıları

Harçların üretiminde, mikro silika, nano silika, yüksek fırın cürufu ve tunçbilek termik santralinden elde edilen uçucu kül olmak üzere dört değişik mineral katkı kullanılmıştır. Kullanılan mineral katkıların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.8’de verilmektedir.

3.1.5 Sülfat çözeltisi

İçerdiği sülfat oranı ihmal edilebilir düzeyde olan Sakarya kumu ile üretilen harçlar, %5’lik sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisi içerisinde muhafaza edildi. Çözelti ayda bir defa yenilendi.

3.1.6 Kıvam arttırıcı

Çalışma kapsamında, harçların yayılma miktarlarını sabit tutabilmek amacıyla ticari olarak bulunması mümkün bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı maddesinin yoğunluğu 1,08 gr/cm³ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.8 : Mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit (%)	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu	Mikro Silika	Nano Silika
SiO ₂	58,82	46,12	>85	>99
CaO	2,18	36,14	<1	-
Al ₂ O ₃	19,65	9,21	-	-
Fe ₂ O ₃	10,67	1,25	-	-
MgO	3,92	5,23	-	-
SO ₃	0,48	-	<2	-
K ₂ O	1,9	1,24	-	-
Kızdırma Kaybı	0,9	0,0	-	-
Özgöl ağırlık (gr/cm ³)	2,08	2,91	2,30	2,33
Özgöl Yüzey (m ² /kg)	3812	4370	>15000	>80000

3.2 Numune Boyutları ve Sayıları

Harçlarda Sakarya bölgesinden, Bağdat bölgesinden ve kerbela bölgesinden temin edilen kumlar kullanılmıştır. Çimento ile ağırlıkça ikame metodu kullanılarak üretilen harçlardaki mineral katkı oranları aşağıdaki gibidir.

Mikro silika : %6, %9 ve %12

Nano silika : %2, %4 ve %6

Uçucu kül : %15, %30 ve %45

Yüksek fırın cürufu : %20, %40 ve %60

Kullanılan her kum örneği (Sakarya, Bağdat ve Kerbela) için yukarıdaki oranlardan üçer adet, hiç mineral katkı kullanılmaksızın üçer adet ve sülfatlı ortamda saklanmak üzere sadece Sakarya kumundan üçer adet olmak üzere 40×40×160 mm boyutlarında toplam 120 adet numune üretilmiştir. Şekil 3.1’de üretilmiş olan numuneler görülmektedir.



Şekil 3.1 : Üretilmiş olan deney numuneleri

3.3 Harçların Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması

Harçların üretiminde düşey ekseninde karıştırma yapan ve karıştırma hızı kontrol edilebilen bir laboratuvar mikseri kullanılmıştır. Tüm karışımlarda “Çimento : su : kum” oranları ağırlıkça “1 : 0,5 : 2,75” olacak şekilde belirlendi. Malzemelerin tamamı (kum, çimento ve mineral katkı) mikserin haznesinde bir araya getirilerek önce kuru bir şekilde karıştırıldıktan sonra suyun yarısı (su/çimento oranı tüm numunelerde sabit ve 0.5’tir) ilave edilerek karışıma devam edilmiş kalan su ise yavaş yavaş ilave edilmiştir. Harçların kıvamları bir sarsma tablası (düşürme tablası) ile kontrol edilmiştir ve yayılma 14-16 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Farklı tipteki kumlar ve mineral katkılar kullanıldığından dolayı istenilen kıvamların elde edilemediği durumlarda kıvam arttırıcı katkı kullanılmıştır.

3.4 Deney Yöntemleri

3.4.1 Taze harç deneyleri

250 gr. su, 500 gr. çimento, 1375 gr. kum ve mineral katkı ile üretilen harçlar katılaşmadan önce sarsma tablasıyla yayılma deneyi yapılmış ve yayılmanın 14-16 cm arasında kalması istenmiştir, harçların yayılması bu aralıkta kalmadığı durumlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak bu değerler yakalanmıştır. Şekil 3.2’de numune üretimlerinin yapıldığı iki hızlı karıştırıcı görülmektedir.



Şekil 3.2 : Üretimlerin yapıldığı iki hızlı karıştırıcı.

3.4.2 Sertleşmiş harç deneyleri

Üretilen tüm harç numuneleri üzerinde boy değişimi, ağırlık değişimi ve ultrases hızı deneyleri periyodik olarak yapılmıştır. Boy değişimiyle elde edilen uzamalar deformasyona dönüştürülmüş ve deformasyon-zaman grafiklerinde gösterilmiştir. Ultrases hızı ölçümleri ise km/sn cinsine dönüştürülerek incelenmiştir.

3.4.2.1 Boy değişimi

40×40×160 mm boyutlarında üretilmiş olan harç çubukları, üretimden 24 saat sonra kalıplarından sökölüp 0,01 mm hassasiyete sahip bir komparatör ile (%0,006) ilk ölçüsü alınmış ve ölçümü alınan numuneler 21°C sıcaklığa sahip kür havuzunda bekletilmiştir. İlk ölçümden sonra 3. ve 7. günlerde bundan sonra da haftada bir gün olmak üzere ölçümler alınmaya devam edilmiştir. Şekil 3.3'te yayılma deneyinin yapıldığı düzenek, Şekil 3.4'te ise numunelerin boy ölçümlerinin yapılışı görülmektedir.



Şekil 3.3 : Yayılma tablası



Şekil 3.4 : Boy ölçümünün yapılışı

3.4.2.2 Ağırlık değişimi

Üretimden 24 saat sonra kalıplarında sökülen harç numunelerinin boy ölçümü alındıktan sonra ağırlıkları da 0,1gr. hassasiyetindeki elektronik tartı ile ölçülmüştür ve bu işlem her boy ölçümü yapıldıktan sonra tekrar edilmiştir. Ağırlık değişimlerini bulmak için gerekli bağıntı Denklem (3.1)'de belirtilmiştir.

$$S_a = ((B-A)/A) * 100 \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

S_a Ağırlık değişimi (%)

A Harç numunesinin ağırlığı (g)

B Harç numunesinin ilk ağırlığı (g)

3.4.2.3 Ultrases hızı ölçümü

Ultrases ölçümleri kür havuzu ortamında bekletilen Bağdat ve Kerbela numuneleri ile katkısız Sakarya numuneleri için 2 haftada bir, sülfatlı su ortamında bekletilen Sakarya kumu ile üretilmiş numuneler için ise 4 haftada bir gerçekleştirilmiştir.

Numuneler ölçüme tabi tutulmadan önce kurutulmuşlardır ve ölçümden önce her iki yanı gres yağı ile yağlanmıştır. Ölçümlerden alınan değerler km/sn birimine dönüştürülmüştür. Şekil 3.5'te ultrases ölçümlerinin yapıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 3.5 : Ultrases ölçümlerinin yapıldığı cihaz

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ait değerlendirmeler aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

4.1 Taze Harç Özellikleri

Taze harç üzerinde yapılan yayılma deneyi sonuçları ve buna göre 14-16 cm'lik yayılmayı sağlayacak kıvam arttırıcı miktarı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Bağdat, Kerbela ve Sakarya kumları ile üretilen harçlarda kullanılan katkı miktarı ve yayılma değerleri.

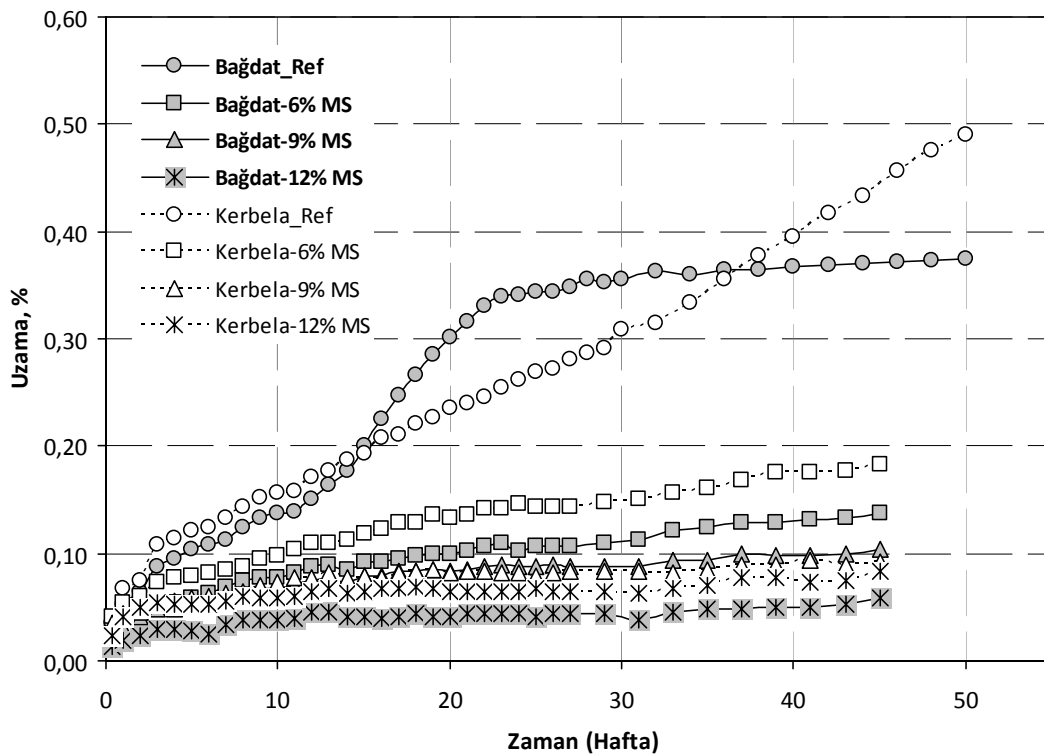
Harç Kodu	Bağdat Kumu (B)		Kerbela Kumu (K)		Sakarya Kumu (S)	
	Katkı (gr)	Yayılma (cm)	Katkı (gr)	Yayılma (cm)	Katkı (gr)	Yayılma (cm)
REF	0	14,0	2,7	14,5	1,0	15,0
MS-%6	1,9	15,0	4,0	15,5	3,0	15,8
MS-%9	1,8	15,0	4,7	15,7	2,5	14,5
MS-%12	2,8	14,0	4,3	14,5	5,0	14,2
NS-%2	1,5	16,0	3,0	15,3	2,7	15,4
NS-%4	2,0	16,0	4,5	14,5	3,5	15,4
NS-%6	4,6	14,5	6,2	15,5	5,2	14,4
UK-%15	0	14,9	2,5	15,4	2,5	16,0
UK-%30	1,0	16,0	2,6	15,5	3,1	16,0
UK-%45	1,5	15,6	3,7	16,0	4,9	15,4
YFC-%20	0	14,4	1,7	15,8	1,4	15,9
YFC-%40	0	14,2	1,1	15,4	1,9	15,6
YFC-%60	0,9	16,0	1,3	15,7	1,6	16,0

4.2 Numunelerde Boy Değişimi

Kür havuzunda ve sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bırakılan numunelerin, üretimden 24 saat sonra yapılan ilk boy ölçüm değerlerine bağlı olarak boy değişim oranları % değerler olarak elde edilmiştir.

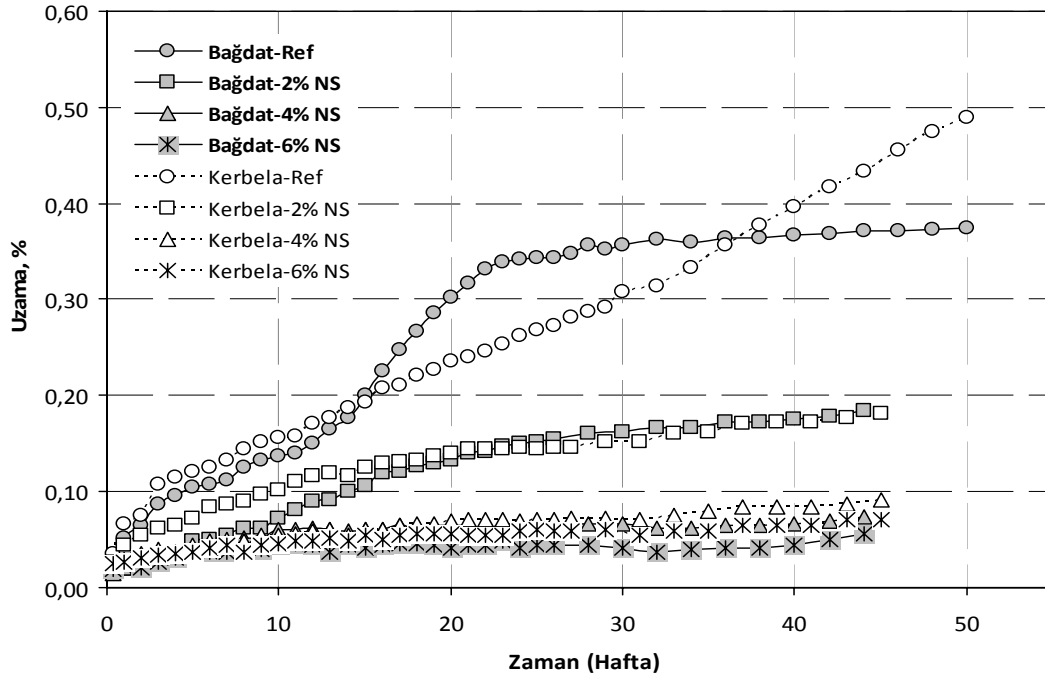
Boy değişim ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzdan ve sülfat çözeltisi içerisinde çıkartılarak yüzeyleri kuru hale getirilmişlerdir. Ölçüm cihazı, her mineral katkı grubu ölçümünden önce kalibrasyon çubuğu ile kalibre edilmiştir.

Bağdat ve Kerbela kumları ile üretilen ve standard kür havuzu içerisinde bekletilen numunelerden elde edilen veriler, her mineral katkı kullanımı için yatay ekseninde zaman (t) ve düşey ekseninde uzama oranı (%) olacak şekilde Şekil 4.1 ile Şekil 4.4 arasında gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Mikro Silika (MS) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları (numuneler su içinde saklanmışlardır).

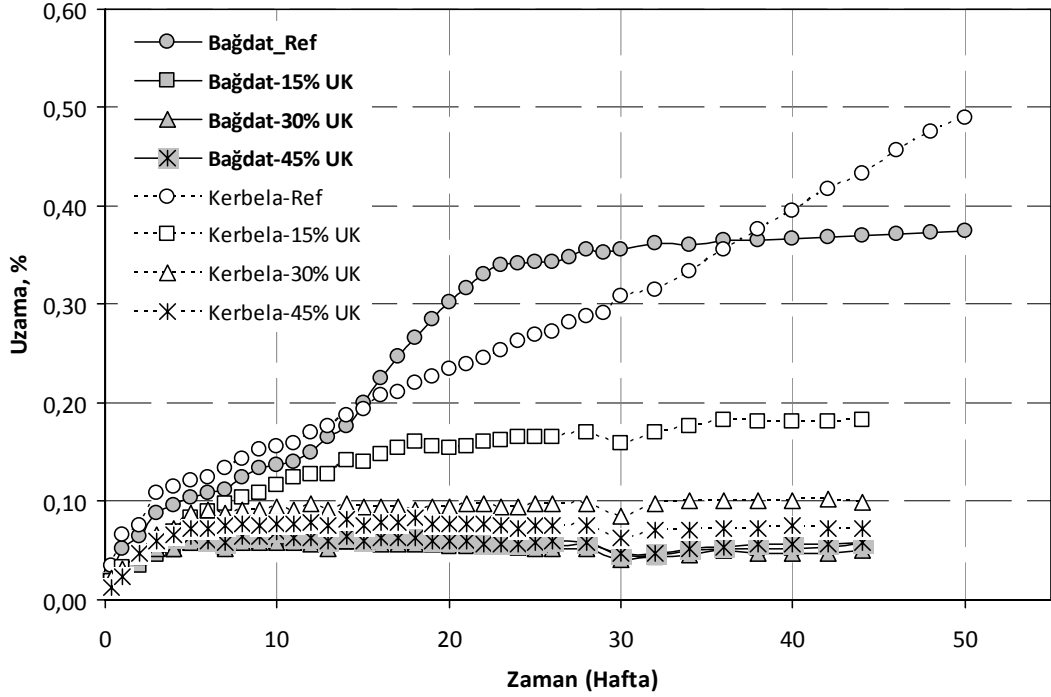
Şekil 4.1’de her iki kum örneği için mikro silikanın kullanıldığı ve kullanılmadığı numunelerdeki boy değişimleri gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi mikro silika katılmış harçlardaki uzama miktarları önemli oranda düşük çıkmıştır. Bazı standartlarda numunelerin sülfat ortam etkilerine karşı dayanıklılığının belirlenmesinde, ilgili ortama maruz bırakıldıkları süre sonunda numuneler üzerinde meydana gelen uzama oranları dikkate alınmaktadır. Genel olarak, yüksek sülfat dayanımı beklenen karışımlarda, 1 yıl sonunda $\leq 0,1$ uzama değeri uygun kabul edilmektedir [32] [38] [39]. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları da $0,1$ uzama oranının, numunelerin sülfata dayanıklılığın belirlenebilmesi açısından kritik bir değer olarak kabul edilebileceği sonucunu çıkarmıştır. Şekil 4.1 ile Şekil 4.4 arasında farklı mineral katkı içeren harçlara ait zaman (t) – uzama (%) grafikleri incelendiğinde, grafiklerin ya zaman içerisinde “farklı eğimlerde” giderek atan bir formda olduğu veya $0,1$ uzama değerinden daha düşük veya civarındaki değerlerde bir plato oluşturduğunu görmek mümkündür. Bu durumda, $0,1$ ’e kadar olan uzamaların güvenlik sınırı içinde kaldığı düşünülürse, yeterli sülfat dayanımının sağlanabilmesi için en az 9 ’luk mikro silika kullanımı gereklidir. 6 , 9 ve 12 ’lik mikro silika kullanımı ile 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri sırasıyla Bağdat kumu için $0,13$, $0,10$ ve $0,05$, Kerbela kumu için $0,18$, $0,09$ ve $0,08$ ’dir.



Şekil 4.2 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Nano Silika (NS) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları (numuneler su içinde saklanmışlardır).

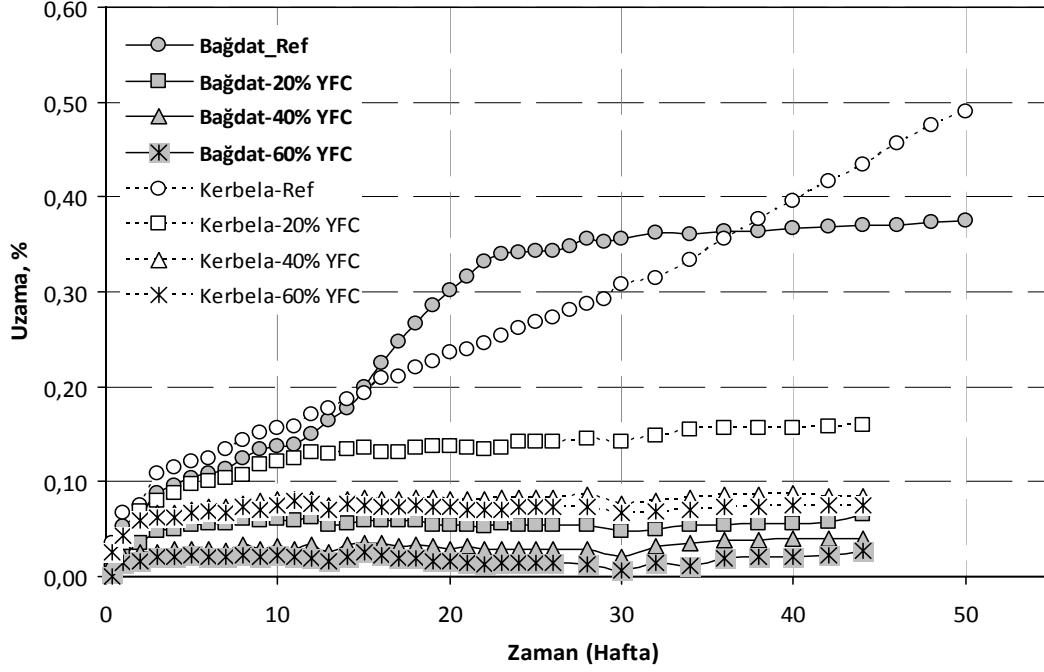
Şekil 4.2 nano silikanın kullanımının harç numunelerinin uzama miktarlarının nasıl etkilediğini göstermektedir. Mikro silikadan alınan sonuçlara benzer şekilde nano silikanın numunelere katılımı ile uzama miktarlarında (özellikle %4 ve %6 oranlarında) önemli düşüşler sağlamıştır. 10 aylık sonuçlara göre Bağdat kumu ile üretilen numunelere %2, %4 ve %6 nano silika katılmasıyla oluşan boy uzama oranları sırasıyla %0,18, %0,07 ve %0,05 olmuştur. Kerbela kumu için bu oranlar ise sırasıyla %0,18, %0,09 ve %0,07'dir.

%0,1'in güvenli sınır olduğunu düşünürsek, ağırlıkça en az %4'lük nano silika kullanımı bize bu değeri sağlayacaktır. Bu değer, mikro silikanın en az kullanılması gereken oranın (%9) yarısından da azdır. Bu durum nano silikanın yüksek yüzey alanına ($>80\ 000\ m^2/kg$) ve saflığa (SiO_2 oranı %99'dan fazladır) sahip olması ile açıklanabilir. Nano silikanın yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, harç karışımı içinde çok daha fazla alana yayılmasını sağlamakta ve çimentonun hidrasyonu ile ortaya çıkan kirecin daha etkin bir şekilde bağlanmasını sağlamaktadır.



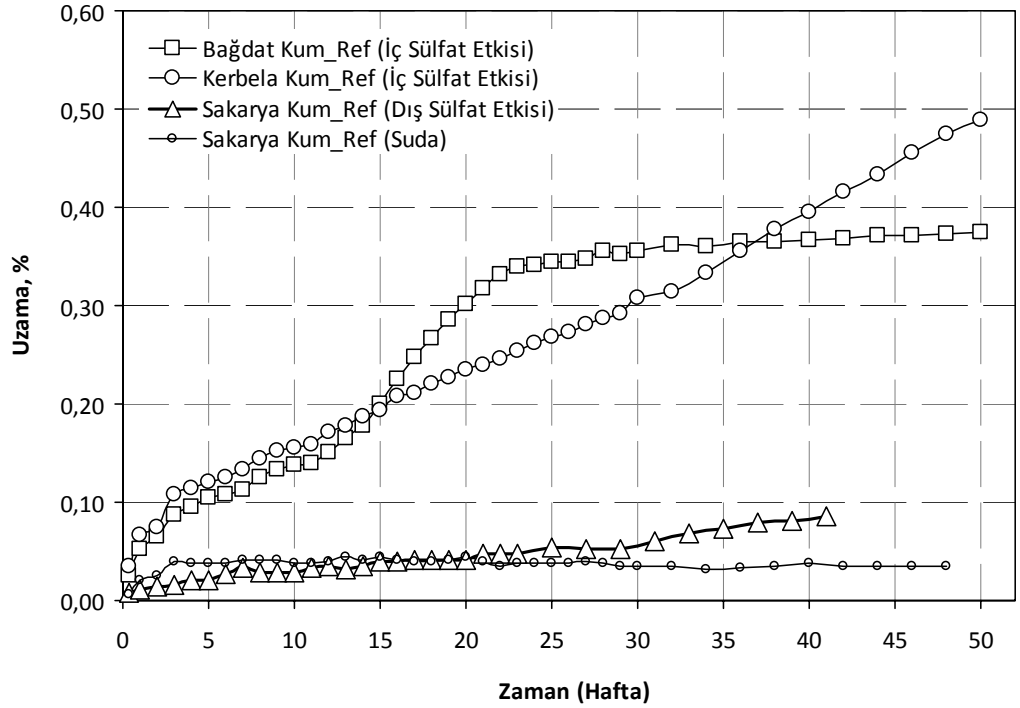
Şekil 4.3 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Uçucu Kül (UK) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları (numuneler su içinde saklanmışlardır).

Şekil 4.3'te Bağdat ve Kerbela kumları ile elde edilen numunelerde uçucu kül kullanımının etkisi gösterilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi uçucu kül ilavesi, boy değişimlerini şahit numunelere göre önemli oranda azaltmıştır. %15 uçucu kül ilaveli Kerbela kumu ile üretilmiş numuneler hariç tutulursa diğer tüm numunelerin uzama oranları 10 ayın sonunda %0,1'in altında kalmıştır. Özellikle Bağdat kumu ile üretilmiş olan harçlarda 2. aydan sonra uzama miktarı sabit kalmıştır. Mikro silika ve nano silika katılan harçlardan farklı olarak uçucu kül katkılı harçlarda, Bağdat kumu ile üretilen numunelerin tamamının uzama miktarları her zaman Kerbela ile üretilenlerin altında kalmıştır. Bu Bağdat kumunun fiziksel özelliklerinin Kerbela kumunkinden daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Agregaların fiziksel özellikleri de, farklı etkilerden dolayı oluşması muhtemel uzamalar üzerinde etkili olabilmektedir. Agrega kalitesi de önemli bir unsur olarak kabul edilebilir. %15, %30 ve %45 uçucu kül kullanımı ile 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri Bağdat kumu için %0,05, %0,05 ve %0,06, Kerbela kumu için %0,18, %0,10 ve %0,07'dir. %0,1'lik güvenli sınırı sağlamak için en az %30 oranında uçucu kül kullanımı gerekmektedir.



Şekil 4.4 : Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılarak üretilen harç çubuklarının boy uzama oranları (numuneler su içinde saklanmışlardır).

Şekil 4.4'te yüksek fırın cürufunun kullanıldığı ve kullanılmadığı numunelerdeki boy değişimi gösterilmektedir. Diğer mineral katkılarda olduğu gibi, yüksek fırın cürufunun katkısı ile tüm numunelerde uzama miktarları önemli oranlarda düşüş göstermiştir. Uçucu kül katkılı harçlara benzer şekilde %20 yüksek fırın cürufu katkılı numune hariç diğerlerinin uzama miktarları %0,1'in altında kalmıştır. Özellikle Bağdat kumu ile üretilen numunelerde 2. aydan itibaren uzamadaki artış durmuş, hatta küçük düşüşler dahi göstermiştir. Bağdat numunelerinde %40 ve üzerindeki numunelerin uzamaları 10. ayda bile % 0,05'in altında kalmıştır. Uçucu kül katkısında olduğu gibi, yüksek fırın cürufunda da ilave edilen katkı Bağdat kumu ile üretilen numunelerde daha yüksek oranlarda etkili olmuştur. Bu numunelerin uzama miktarları başından sonuna kadar Kerbela ile üretilen numunelerin uzama miktarlarının altında kalmıştır. %20, %40 ve %60 yüksek fırın cürufu kullanımı ile 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri Bağdat kumu numuneleri için sırasıyla %0,06, %0,04 ve %0,02, Kerbela kumu numuneleri için ise %0,16, %0,09 ve %0,08'dir.



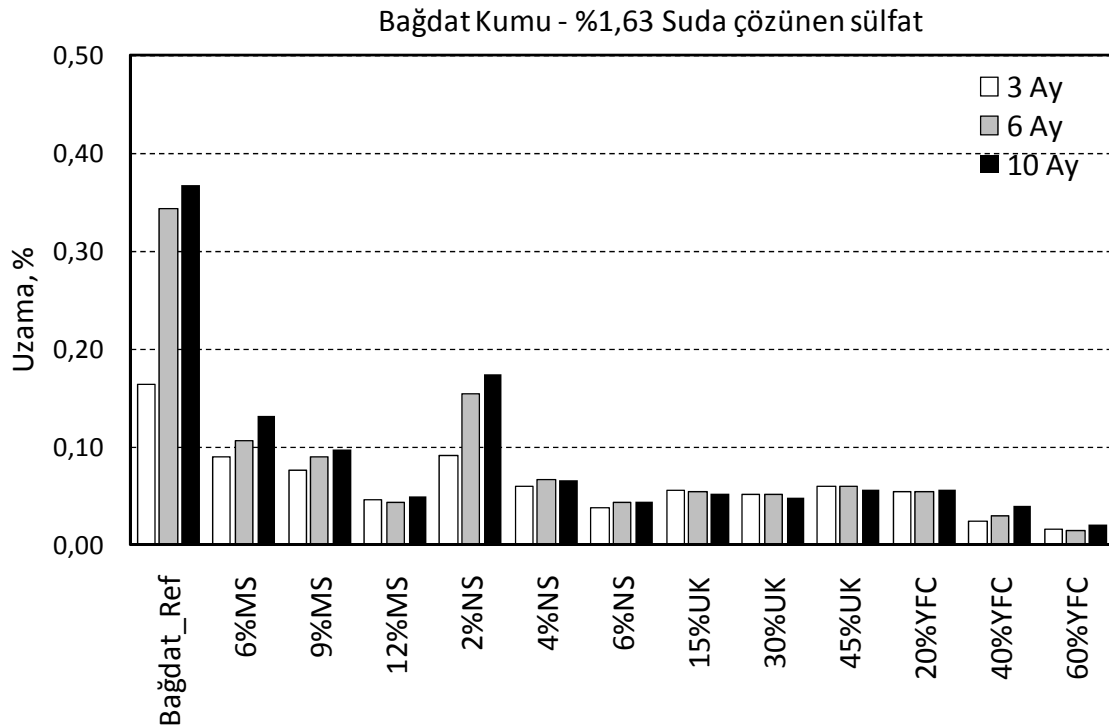
Şekil 4.5 : Bağdat (İç sülfat etkisi) , Kerbela (İç sülfat etkisi), Sakarya (Dış sülfat etkisi) ve Sakarya (suda) kumları ile üretilen katkısız (referans) harçların % uzama oranları.

Şekil 4.5'te iç sülfat etkisindeki Bağdat ve Kerbela kumları ile hiçbir mineral katkı içermeyen üretilen (şahit) harçların ve doğal içeriğinde bulundurduğu sülfat oranı ihmal edilecek düzeyde olan Sakarya kumu ile üretilen harçların (şahit) uzama oranları görülmektedir. Bağdat ve Kerbela numuneleri ile Sakarya numunesinden bir takım kirece doymuş su havuzunda, Sakarya numunesinden diğer bir takım numune ise sülfatlı çözelti içerisinde bekletilmiştir. Bu grafik iç sülfat etkisini göstermesi bakımından oldukça faydalıdır. Bağdat ve Kerbela numunelerindeki uzama oranları Sakarya numunelerine göre oldukça fazladır. Sakarya numunelerinde ise sülfat çözeltisi içerisinde bulunan numunelerdeki uzama oranları, aynı numunelerin standard kür havuzunda bulunanlarına göre yaklaşık ilk 25 hafta çok farklı olmamakla birlikte, bu süre sonunda uzamalar arasındaki fark açılmaya başlamıştır. Bu da tamamen sülfat iyonlarının numunelere nüfuz etmeye başlamasından kaynaklanmaktadır.

Geçen 10 aylık süre dikkate alındığında, sülfat içeriği ihmal edilebilecek mertebelerde olduğu bilinen Sakarya kumu ile üretilen ve sülfat solüsyonu içerisinde bekletilen numunelerde uzama oranları %0,1 değerinden daha az değerlere

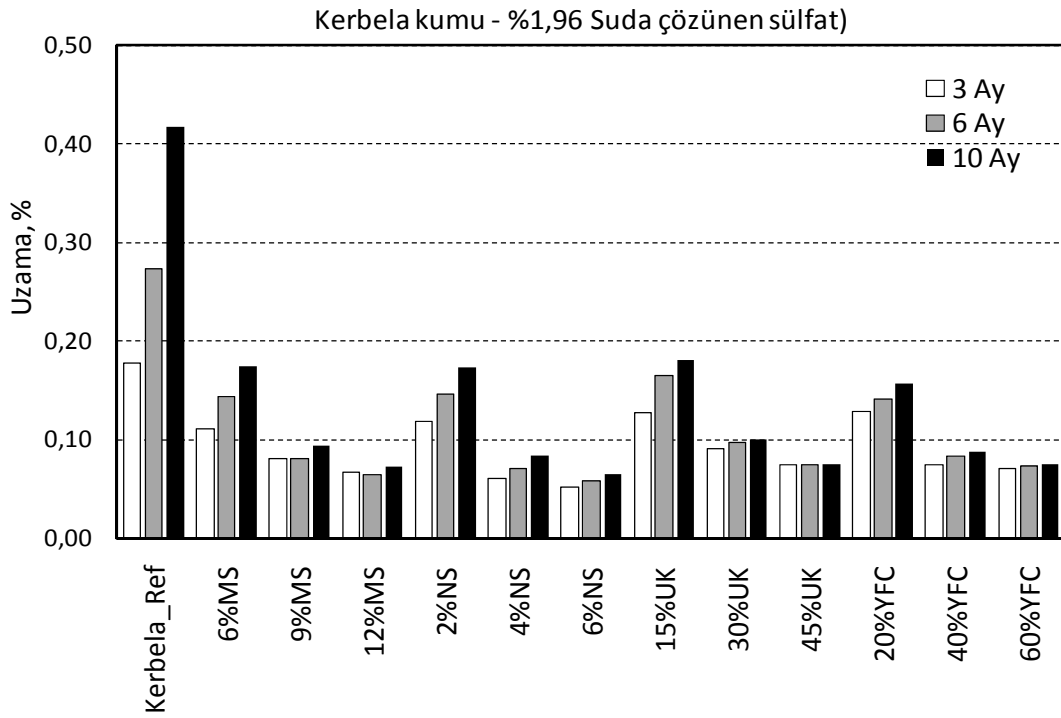
ulaşabilmiştir. Bu numunelerde sülfat iyonlarının numunelerin içine nüfuz etmesi ve harç bileşenleri ile reaksiyona girerek sülfat atağını meydana getirmesi, harcın geçirimsizlik özelliklerine bağlı olarak bir zaman alacaktır. Öte yandan, Kerbela ve Bağdat kumları ile üretilen numunelerde sülfat iyonları karışım içinde hazır olarak bulunmaktadır ve buna bağlı olarak da uzamalar ilk andan itibaren gözlemlenebilmiştir.

Yukarıdaki grafiklerde Bağdat ve Kerbela kumları ile üretilen harçların belirli mineral katkıları kullanıldığında zaman içerisinde % olarak ne kadar uzadıkları, Bağdat, Kerbela ve Sakarya yöresi kumları ile herhangi bir mineral katkı kullanılmadan üretilen harçların % olarak uzama miktarları gösterildi. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de ise, Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte farklı mineral katkıları kullanılarak üretilmiş harçların, 3., 6. ve 10. aylar gibi farklı zaman dilimlerinde yaptıkları uzamalar gösterilmiştir. Şekil 4.8 ve 4.9’da, sadece 10. aydaki uzama oranları dikkate alınmış ve mineral katkı içeren numunelerin, referans (mineral katkı içermeyen) numunesine göre bağıl boy değişim oranları bar grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.6 : Bağdat kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 3., 6. ve 10. aylar sonunda belirlenen toplam % uzama oranları.

Şekil 4.6’da Bağdat kumu ile üretilen harç numunelerinin tamamının 3, 6 ve 10 ay sonunda yapmış oldukları uzamalar bir arada gösterilmektedir. Grafikte dikkati çeken ilk husus kullanılan tüm mineral katkıların numunelerdeki boy uzamalarını önemli ölçüde azaltmış olduğudur. Özellikle yüksek fırın cürufu kullanımı ile elde edilen sonuçlar dikkat çekicidir. %40 ve %60 oranında cüruf kullanılan numunelerdeki uzama oranları tüm numuneler içinde en düşük olanlarıdır. Bu durum cürufun yüksek ikame oranı ve düşük kalsiyum hidroksit içeriği ile açıklanabilir. Cürufun çimento ile yüksek oranlarda yerdeğiştirmesi karışımda bir seğreltme etkisi yaratmakta ve bu durumun, uzamaların düşük olmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

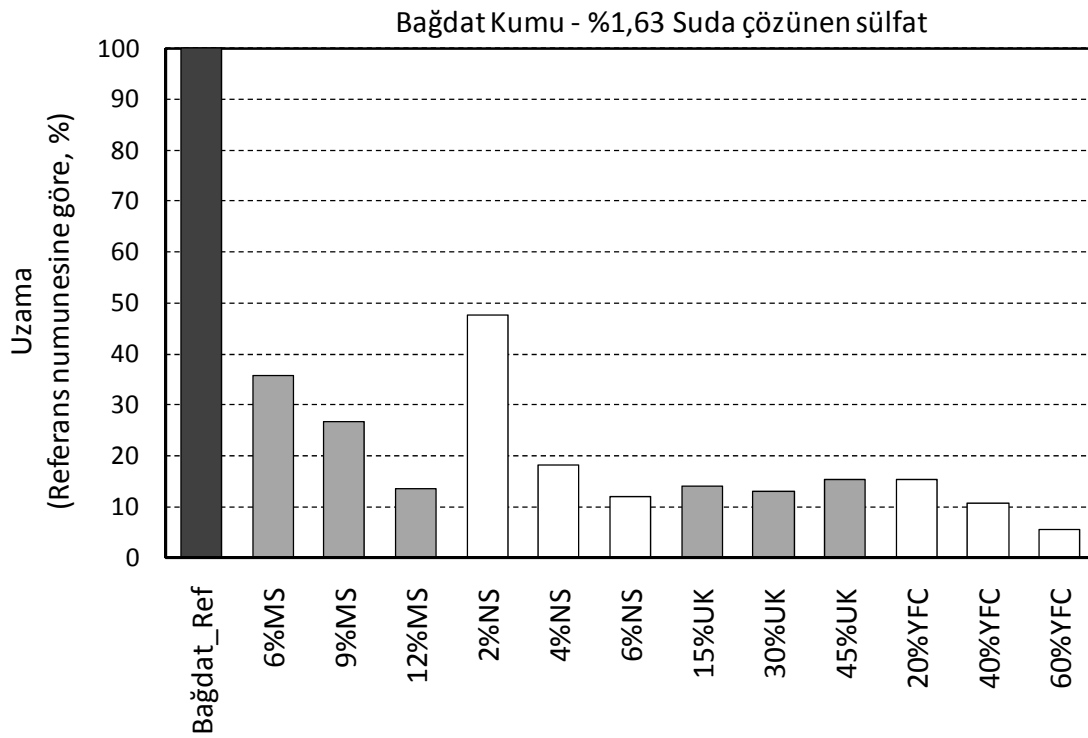


Şekil 4.7 : Kerbela kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 3., 6. ve 10. aylar sonunda belirlenen toplam % uzama oranları.

Şekil 4.7’de ise Kerbela kumu ile üretilen harç numunelerinin tamamının 3, 6 ve 10 ay sonunda yapmış oldukları uzamalar bir arada gösterilmektedir. Kerbela kumu ile üretilen harçlarda da kullanılan mineral katkıların tüm numunelerde boy uzama oranlarını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Grafikte, kullanılan mineral katkıların en düşük oranlarında, şahit harç numunesine göre boy uzamasında önemli düşüş gösterdiği ancak mineral katkı miktarı arttıkça da düşüşün grafiklerde gözle görülür şekilde sürdüğü görülmektedir. Daha önce de tartışıldığı gibi Bağdat kumu

ile elde edilen numunelerden farklı olarak görülen bu sonuç Kerbela kumunun fiziksel özelliklerinin Bağdat kumuna göre daha kötü olmasına bağlanabilir. Bağdat numunelerinde boy uzaması %0,1'in üzerine çıkan 4 numune varken şekil 4.7'de görüldüğü gibi Kerbela numunelerinde bu sayı 12'dir.

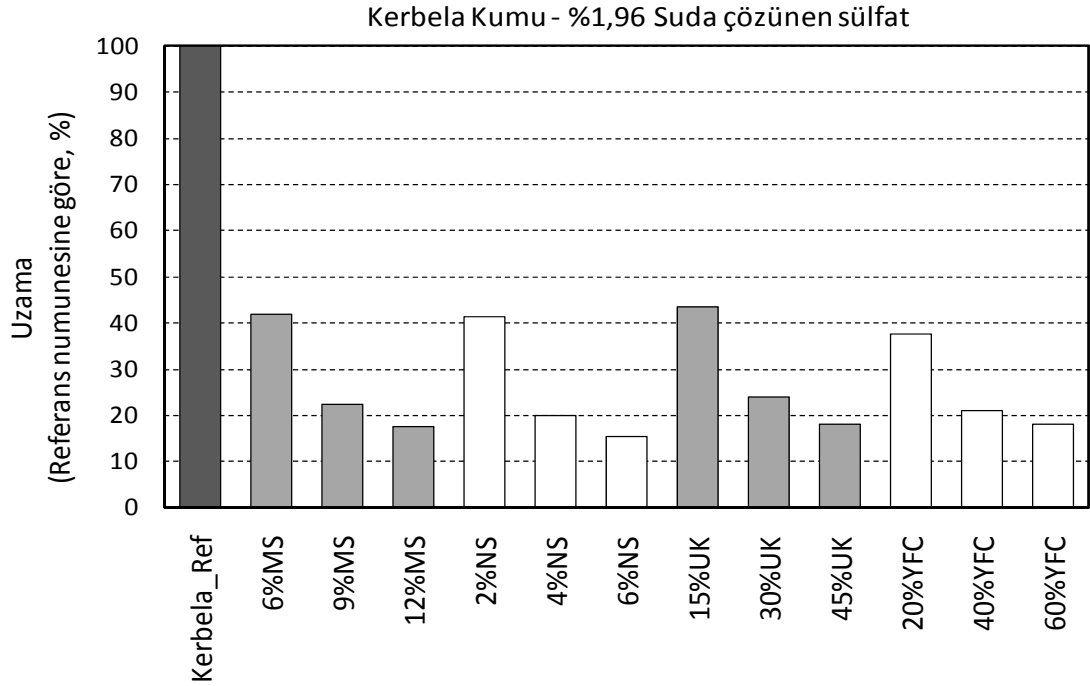
Kerbela kumu ile üretilen harçlarda en yüksek etki nano silika ile elde edilmiştir. Bu durum nano silika'nın yüksek yüzey alanına (80 000 m²/kg) ve saflığına (>%99 SiO₂) bağlanabilir.



Şekil 4.8 : Bağdat kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 10. ay sonunda katkısız harç numunelere göre % uzama oranları.

Şekil 4.8'de, Bağdat kumu ile üretilmiş numuneler için, sadece 10. aydaki uzama oranları dikkate alınmış ve mineral katkı içeren numunelerin, referans (mineral katkı içermeyen) numunesine göre bağıl boy değişim oranları bar grafik halinde verilmiştir. Bunun için katkısız Bağdat numunesi (Referans)'nin uzaması 100 birim kabul edilmiş ve Bağdat kumu ile üretilmiş diğer tüm numunelerin uzamalarının şahit betona göre % oranları verilmiştir. Grafikte ilk göze çarpan husus %2'lik nano silika kullanımıdır. Bu harç numunesinde şahit harcın neredeyse yarısı kadar uzama meydana gelmiştir. %4 ve %6'lık nano silika kullanım oranlarında ise daha düşük değerler elde edilmiştir. Uçucu kül hariç tüm mineral katkılarda ikame oranı arttıkça

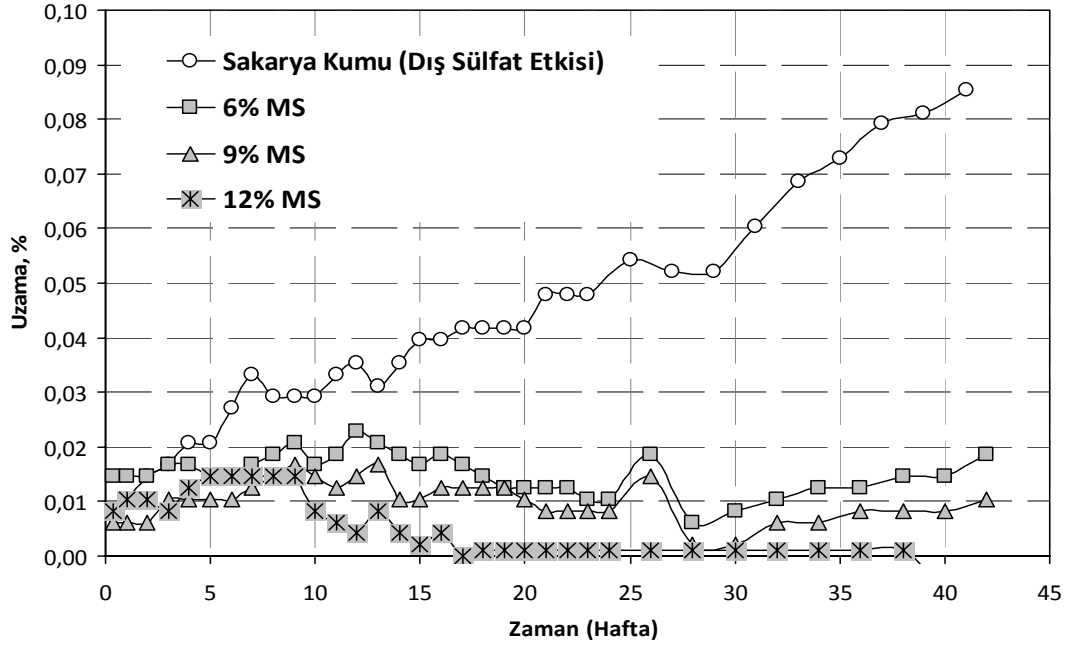
uzama miktarının düştüğü görülmektedir. Uçucu külde ise bu miktar hemen hemen eşit seviyelerde kalmaktadır. Bu sonuç da, uçucu külün en az oranlarda kullanılmasının dahi, harçların sülfatlı ortamlara karşı dayanımını çok iyi derecede artırabildiğini göstermektedir. En düşük uzama oranı %60 yüksek fırın cürufu ilaveli numunede gözlemlenmiştir. En verimli katkı ise %4 ve %6'lık oranlarıyla nano silika olmuştur.



Şekil 4.9 : Kerbela kumu ile üretilen katkısız (referans) ve mineral katkılı harçların, 10. ay sonunda katkısız harç numuneler göre % uzama oranları.

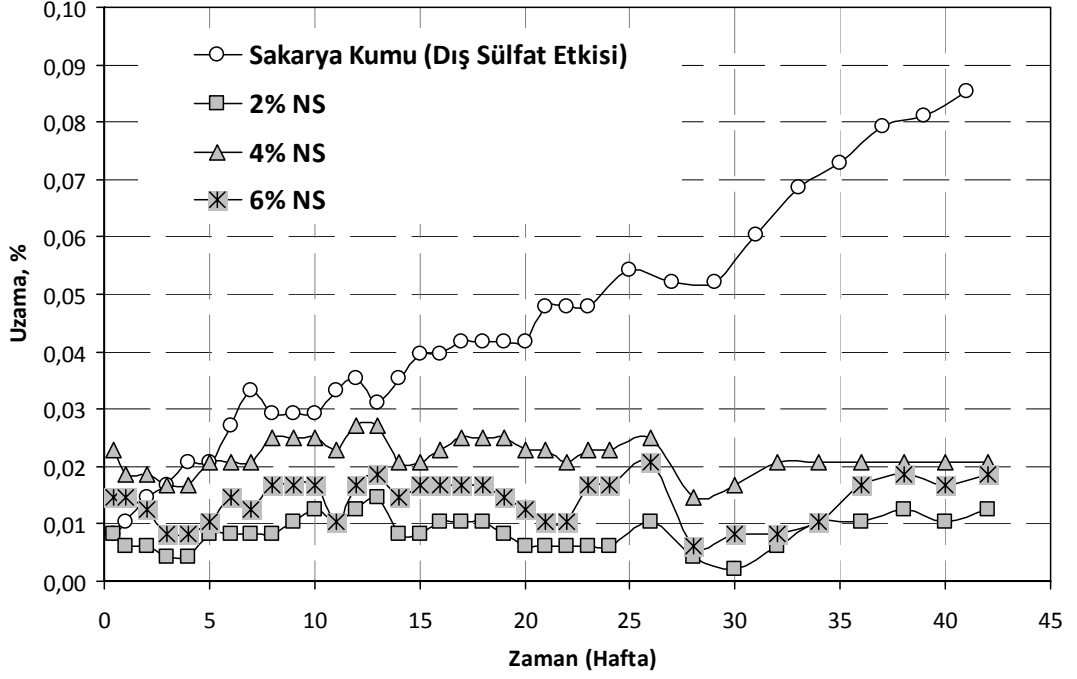
Şekil 4.8’de Bağdat kumu ile üretilen harçlar için çizilen grafiğin benzeri, Şekil 4.9’da Kerbela kumu ile üretilmiş harçlar için verilmektedir. Burada da katkısız Kerbela numunesi (Referans)’nin uzaması 100 birim kabul edilmiş ve Kerbela kumu ile üretilmiş diğer tüm numunelerin uzamalarının şahit betona göre % oranları verilmiştir. Tüm mineral katkı maddelerinde, katkı oranı arttıkça uzamaların düştüğü görülmektedir ve bu durum tüm mineral katkılarda orantılı olarak gerçekleşmektedir, mineral katkıların olumlu etkisi bu grafikte açıkça gözlemlenebilmektedir. En düşük uzama oranı ise %60 ikame oranıyla nano silika’da elde edilmiştir.

İçindeki çözünabilir sülfat oranı ihmal edilebilir oranda olan Sakarya bölgesi kumundan üretilen, karışımı içerisine %6, %9 ve %12 oranlarında mikro silika eklenen ve sülfatlı su ortamında bekletilen harçların uzama oranları Şekil 4.10'da verilmektedir.



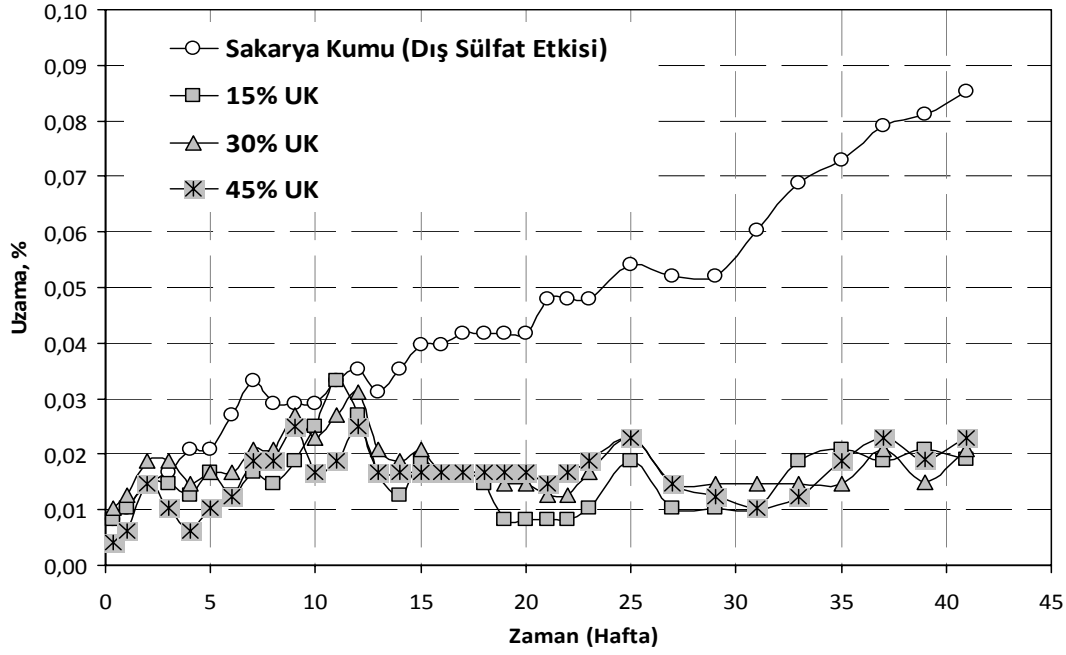
Şekil 4.10 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Mikro Silika (MS) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na_2SO_4 ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.

İçerdiği sülfat oranı ihmal edilecek düzeyde az olan Sakarya kumu ile üretilmiş olan harç numunelerinin boy uzama oranlarını gösteren grafiklerde, uzama oranları çok düşüktür. Bağdat ve Kerbela kumları ile üretilen harçların grafiklerinde en çok %0,60 olan Y ordinatı Sakarya kumu ile üretilen harçların grafiklerinde %0,10 olarak alınmıştır. Şekil 4.10'daki grafikte görüldüğü gibi uzamalar çok düşük değerlerde kalmıştır. Sülfat çözeltisi içinde bekletilen bu numunelerden sadece şahit harcının uzaması %0,09'a yaklaşmıştır. %6, %9 ve %12 mikro silika kullanımı ile Sakarya kumunda üretilen harçların 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri sırasıyla %0,019, %0,010 ve %0,0'dır.



Şekil 4.11 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Nano Silika (NS) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na_2SO_4 ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.

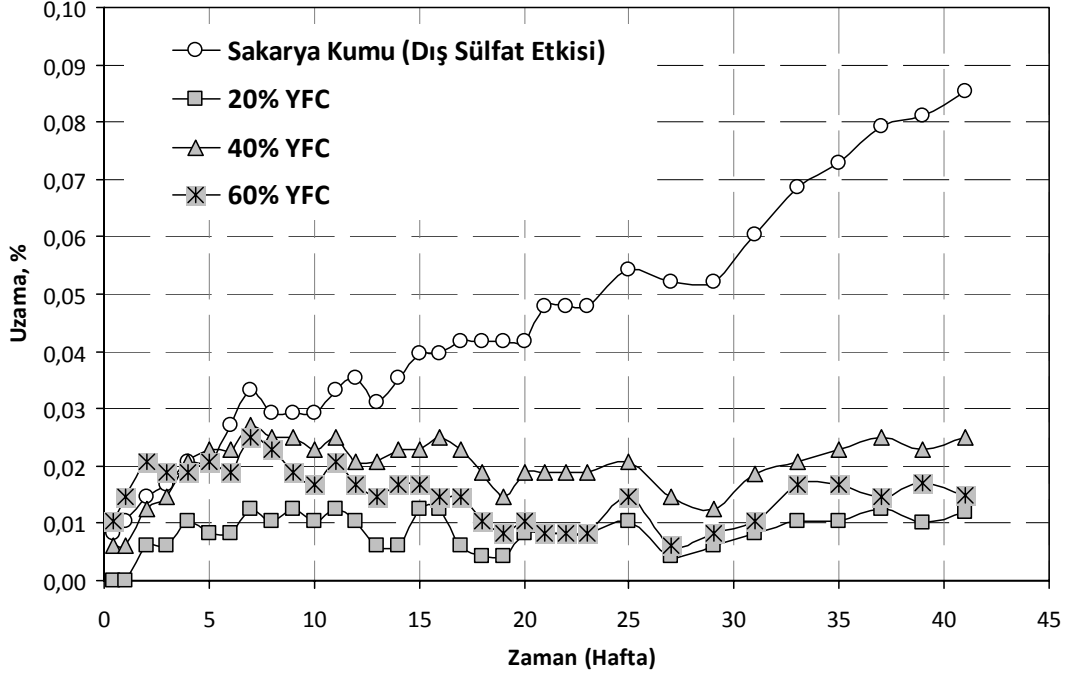
Şekil 4.11’de sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen Sakarya kumu ile üretilmiş şahit harç numunesi ile %2, %4 ve %6 oranlarında nano silika ikamesiyle üretilmiş olan numunelerin uzama miktarları görülmektedir. İlk 3 ay boyunca nano silika katkılı harç numunelerinin uzama oranları şahit harç numunesine yakın seyretmiş, ilerleyen süreçte ise şahit numunesinin uzamasının artması nedeniyle aradaki fark açılmıştır. Mikro silika katkılı numunelerden farklı olarak uzama miktarları birbirine çok yakın olmasına rağmen en yüksek uzamayı %4 katkılı numuneler yapmıştır. En küçük uzama miktarı ise %2 ikame oranlı numunelerde gerçekleşmiştir. %2, %4 ve %6 nano silika kullanımı ile Sakarya kumunda üretilen harçların 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri sırasıyla %0,012, %0,021 ve %0,019 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.12 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda Uçucu Kül (UK) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na_2SO_4 ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.

Şekil 4.12’de sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen Sakarya kumu ile üretilmiş şahit harç numunesi ile %15, %30 ve %45 oranlarında uçucu kül ikamesiyle üretilmiş olan numunelerin uzama miktarları görülmektedir. Aynı nano silika katkılı numunelerde olduğu gibi uçucu kül katkılı harçlarda da ilk 3 ay boyunca mineral katkılı numunelerle şahit harç numunesinin uzama miktarları birbirlerine çok yakın seyretmiş ilerleyen zamanlarda ise aradaki fark giderek açılmıştır.

Grafikten de görüldüğü gibi %15, %30 ve %45 uçucu kül ikameli numunelerin uzama miktarları devamlı olarak birbirine yakın seyretmiştir. %15, %30 ve %45 uçucu kül kullanımı ile Sakarya kumunda üretilen harçların 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri sırasıyla %0,019, %0,021 ve %0,023 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.13 : Sakarya kumu ile birlikte değişik oranlarda granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) kullanılarak üretilen ve sürekli olarak Na_2SO_4 ortamında bekletilen harç çubuklarının boy uzama oranları.

Şekil 4.13’de sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen Sakarya kumu ile üretilmiş şahit harç numunesi ile %20, %40 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu ikamesiyle üretilmiş olan numunelerin uzama miktarları görülmektedir. Cüruf ilaveli numunelerde ilk 2 ay uzamalar görüldükten sonraki 8 ay içerisinde hemen hemen uzama görülmemiştir. Uzamalar birbirine çok yakın olmakla birlikte en yüksek boy uzama oranı %40 cüruf içeren numunelerde, en düşük boy uzama oranı ise %20 cüruf içeren numunelerde elde edilmiştir. %20, %40 ve %60 yüksek fırın cürufu kullanımı ile Sakarya kumunda üretilen harçların 10 ay sonunda elde edilen uzama değerleri sırasıyla %0,012, %0,025 ve %0,015 olarak gerçekleşmiştir.

4.3 Ağırlık Değişimi

Kür havuzu ve sodyum sülfat çözeltisi içerisine bırakılan numunelerin, üretimden 24 saat sonra yapılan ilk ağırlık ölçüm değerlerine bağlı olarak ağırlık değişim oranları % değerler olarak elde edilmiştir ve bu değerler çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4’te verilmiştir. Ağırlık ölçümleri yapılmadan önce numuneler kirece doymun su havuzundan ve sülfat çözeltisi içerisinde çıkartılarak yüzeyleri kuru hale getirilmişlerdir.

Sülfat hasarı oluşumu başladıktan sonra, numune yüzeylerinden parça kopması şeklinde ağırlık azalmalarına neden olabilecektir. Bu nedenle, yapılan deneysel çalışma kapsamında numunelerin ağırlıklarının ölçülmesi ve dolaylı olarak da oluşan hasarın bu şekilde izlenmesi planlanmıştır. Ancak, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, takip edilen süre içinde numunelerde ağırlık kaybı gözlenmemiş, aksine az miktarlarda numune ağırlıklarının arttığı görülmüştür. Ancak, sözkonusu artışların da numunelerin porozitelerine bağlı olarak emdikleri su miktarı ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Ağırlıkça en fazla artış %30 uçucu kül ikamesi yapılmış olan ve Sakarya kumu ile üretilmiş olan numunede (%2,78) görülmüştür. En düşük artış ise %60 yüksek fırın cürufu katkısı yapılmış olan ve Bağdat kumu ile üretilmiş olan numunede (%1,02) gerçekleşmiştir. Genel olarak bakıldığında ise en yüksek artış oranları Sakarya kumları ile üretilen numunelerde gerçekleşmiştir, Sakarya'dan sonra Kerbela kumu ile üretilen numuneler gelmektedir. En düşük artış oranları ise Bağdat kumu ile üretilen numunelerde gerçekleşmiştir. Mineral katkılı tüm numunelerde, herhangi bir mineral katkı katılmayan şahit harçlara göre daha az ağırlık değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Böylece mineral katkıların su emme değerlerinde küçükte olsa olumlu bir etkisi olduğundan bahsedilebilir. Tüm numunelerde en yüksek ağırlık değişimleri uçucu kül katkılı harçlarda gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.2 : Bağdat kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak).

Numuneler	1. Ay (%)	3. Ay (%)	6. Ay (%)	10. Ay (%)
B-M.S.-%6	1,34	1,72	1,81	1,65
B-M.S.-%9	1,34	1,60	1,68	1,74
B-M.S.-%12	1,20	1,36	1,47	1,53
B-N.S.-%2	1,22	1,62	1,81	2,00
B-N.S.-%4	1,26	1,61	1,73	1,88
B-N.S.-%6	1,17	1,41	1,51	1,65
B-U.K.-%15	1,30	1,74	1,89	2,01
B-U.K.-%30	1,46	1,83	1,90	2,03
B-U.K.-%45	1,56	1,79	1,90	2,00
B-Y.F.C.-%20	1,07	1,37	1,51	1,66
B-Y.F.C.-%40	1,08	1,23	1,31	1,44
B-Y.F.C.-%60	0,79	0,85	0,91	1,02
B-ŞAHİT	0,99	1,26	1,80	2,05

Çizelge 4.3 : Kербela kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak).

Numuneler	1. Ay (%)	3. Ay (%)	6. Ay (%)	10. Ay (%)
K-M.S.-%6	1,41	1,90	2,09	2,26
K-M.S.-%9	1,32	1,56	1,68	1,83
K-M.S.-%12	1,21	1,37	1,43	1,58
K-N.S.-%2	1,37	1,91	2,10	1,75
K-N.S.-%4	1,19	1,50	1,66	1,58
K-N.S.-%6	1,46	1,69	1,80	1,80
K-U.K.-%15	1,50	2,01	2,17	1,89
K-U.K.-%30	1,77	2,09	2,22	2,18
K-U.K.-%45	1,69	1,91	2,05	2,05
K-Y.F.C.-%20	1,32	1,58	1,74	1,87
K-Y.F.C.-%40	1,28	1,37	1,47	1,58
K-Y.F.C.-%60	1,13	1,19	1,26	1,33
K-ŞAHİT	1,28	1,61	1,94	2,28

Çizelge 4.4 : Sakarya kumu ile üretilen numunelerin ağırlıklarında meydana gelen artışlar (% olarak).

Numuneler	1. Ay (%)	3. Ay (%)	6. Ay (%)	9. Ay (%)
S-M.S.-%6	1,25	1,53	1,72	1,89
S-M.S.-%9	1,45	1,76	2,03	2,19
S-M.S.-%12	1,22	1,46	1,68	1,82
S-N.S.-%2	1,23	1,70	2,00	2,20
S-N.S.-%4	1,24	1,68	1,98	2,22
S-N.S.-%6	1,26	1,68	1,99	2,18
S-U.K.-%15	1,53	2,03	2,30	2,53
S-U.K.-%30	1,78	2,23	2,54	2,78
S-U.K.-%45	1,81	2,08	2,31	2,55
S-Y.F.C.-%20	1,46	1,91	2,14	2,34
S-Y.F.C.-%40	1,47	1,84	2,05	2,27
S-Y.F.C.-%60	1,14	1,36	1,48	1,67
S-ŞAHİT	1,63	2,14	2,49	2,67

4.4 Ultrases Hızı Değişimleri

Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7’de 5 ay boyunca yapılmış olan ultrases ölçümlerinden elde edilen ultrases hızlarının km/sn cinsine dönüştürülmüş değerleri bulunmaktadır. Numuneler kirece doygun su havuzundan ve sülfat çözeltisinden çıkartılarak kurutulmuş ve sonuçların doğru olarak elde edilebilmesi için numunelerin prob'lara değecek her iki yanı gres yağı ile yağlanmıştır.

Çizelgelerin incelenmesiyle de görülecektir ki, zamanla ölçülen değerlerde genel olarak ufak artışlar meydana gelse de, değişimler ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır.

Çizelge 4.5: Bağdat kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri.

Numuneler	1. Ay (Km/Sn)	2. Ay (Km/Sn)	3. Ay (Km/Sn)	4. Ay (Km/Sn)	5. Ay (Km/Sn)
B-M.S.-%6	4,54	4,50	4,53	4,56	4,57
B-M.S.-%9	4,55	4,57	4,57	4,58	4,60
B-M.S.-%12	4,55	4,57	4,59	4,59	4,67
B-N.S.-%2	4,67	4,68	4,69	4,72	4,73
B-N.S.-%4	4,61	4,63	4,67	4,66	4,70
B-N.S.-%6	4,62	4,67	4,67	4,66	4,68
B-U.K.-%15	4,63	4,68	4,74	4,74	4,76
B-U.K.-%30	4,56	4,63	4,63	4,65	4,70
B-U.K.-%45	4,45	4,48	4,49	4,57	4,60
B-Y.F.C.-%20	4,66	4,75	4,76	4,82	4,89
B-Y.F.C.-%40	4,60	4,68	4,70	4,74	4,82
B-Y.F.C.-%60	4,50	4,56	4,58	4,62	4,67
B-ŞAHİT	4,59	4,62	4,67	4,70	4,75

Çizelge 4.6 : Sakarya kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri.

Numuneler	1. Ay (Km/Sn)	2. Ay (Km/Sn)	3. Ay (Km/Sn)	4. Ay (Km/Sn)	5. Ay (Km/Sn)
S-M.S.-%6	4,37	4,33	4,44	4,44	4,47
S-M.S.-%9	4,37	4,43	4,47	4,48	4,52
S-M.S.-%12	4,30	4,37	4,44	4,44	4,50
S-N.S.-%2	4,32	4,32	4,38	4,38	4,41
S-N.S.-%4	4,32	4,39	4,45	4,43	4,46
S-N.S.-%6	4,29	4,38	4,44	4,45	4,46
S-U.K.-%15	4,37	4,38	4,42	4,44	4,49
S-U.K.-%30	4,29	4,28	4,35	4,36	4,40
S-U.K.-%45	4,31	4,29	4,34	4,36	4,41
S-Y.F.C.-%20	4,38	4,46	4,54	4,54	4,57
S-Y.F.C.-%40	4,37	4,48	4,56	4,56	4,58
S-Y.F.C.-%60	4,34	4,42	4,45	4,45	4,49
S-ŞAHİT	4,29	4,35	4,36	4,36	4,38

Çizelge 4.7 : Kerbela kumu ile üretilen numunelerdeki ultrases hızı ölçümleri.

Numuneler	1. Ay (Km/Sn)	2. Ay (Km/Sn)	3. Ay (Km/Sn)	4. Ay (Km/Sn)	5. Ay (Km/Sn)
K-M.S.-%6	4,45	4,41	4,44	4,45	4,46
K-M.S.-%9	4,45	4,43	4,42	4,44	4,47
K-M.S.-%12	4,40	4,40	4,43	4,44	4,47
K-N.S.-%2	4,47	4,49	4,57	4,56	4,59
K-N.S.-%4	4,45	4,48	4,53	4,56	4,62
K-N.S.-%6	4,46	4,46	4,50	4,55	4,59
K-U.K.-%15	4,32	4,31	4,31	4,35	4,37
K-U.K.-%30	4,33	4,48	4,46	4,52	4,55
K-U.K.-%45	4,29	4,30	4,31	4,35	4,40
K-Y.F.C.-%20	4,56	4,56	4,61	4,66	4,67
K-Y.F.C.-%40	4,53	4,52	4,57	4,61	4,65
K-Y.F.C.-%60	4,50	4,49	4,50	4,52	4,49
K-ŞAHİT	4,42	4,46	4,47	4,51	4,54

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Bağdat ve Kerbela, Irak'tan temin edilen ve doğal sülfat içeriği yüksek olan kumlar kullanılarak üretilen harç numuneler üzerinde “Sülfat etkisi”nin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1- Genel olarak bakıldığında kullanılan tüm mineral katkıları, karışım içindeki kullanım oranlarına da bağlı olarak, sülfat etkisi nedeniyle meydana gelen uzamalarda önemli oranda düşüşe neden olmuşlardır. Harç karışımlarında kullanılan mineral katkı oranı arttıkça uzamalar daha da düşmüştür.

2- Deneylerin sürdürüldüğü 10 aylık süreçte sülfat etkisi nedeniyle numunelerin boylarında uzamalar meydana gelmiş ancak bu sürede numunelerde herhangi bir ağırlık kaybı meydana gelmemiştir. Özellikle, katkısız olarak üretilen harç numunelerinde beklenen dökülmeler ve buna bağlı oluşacak ağırlık kaybı için bu süre yetersiz gelmiştir.

3- İç sülfat etkisinin incelenmesi durumunda, en düşük uzamalar Bağdat kumu ile üretilen harçlar için, %60 yüksek fırın cürufu katkısı ile Kerbela kumu ile üretilen harçlar için ise, %6 nano silika katkısı ile elde edilmiştir. Ancak her iki kum için de bakıldığında en verimli katkı %6 oranında nano silika olduğu görülmektedir.

4- Doğal sülfat içeriği çok yüksek olan Bağdat ve Kerbela kumları ile herhangi bir mineral katkı kullanılmadan üretilen harçlarda meydana gelen iç sülfat atağının etkisi oldukça belirgin olmuştur. Yaklaşık 10 aylık bir süre zarfında, herhangi bir mineral katkı kullanılmadan üretilen bu numunelerin uzamaları Kerbela kumu ile üretilenlerde %0,5 ve Bağdat kumu ile üretilenlerde ise %0,4 gibi kritik değerlere ulaşmıştır.

5- Aynı süre zarfında, sülfat içeriği ihmal edilebilecek mertebelerde olduğu bilinen Sakarya kumu ile üretilen ve sülfat solüsyonu içerisinde bekletilen numunelerde uzama oranları %0,1 değerinden daha az değerlere ulaşabilmiştir. Bu numunelerde sülfat iyonlarının numunelerin içine nüfuz etmesi ve harç bileşenleri ile reaksiyona girerek sülfat atağını meydana getirmesi, harcın geçirimsizlik özelliklerine bağlı

olarak bir zaman alacaktır. Öte yandan, Kerbela ve Bağdat kumları ile üretilen numunelerde sülfat iyonları karışım içinde hazır olarak bulunmaktadır.

6- Doğal sülfat içeriği çok düşük olan Sakarya kumu ile üretilen numunelerde mineral katkıların da kullanılmasıyla çok düşük hatta ihmal edilebilir uzama oranları elde edilmiştir. Bu numunelerde, sülfat etkisinden dolayı oluşacak uzamaların meydana gelmesi, sülfat iyonlarının numune içine difüzyonu ile mümkündür. Mineral katkı kullanımı, daha yoğun ve geçirimsiz bir yapının oluşmasına neden olmuş ve dışarıdan iyon difüzyonunu engellemiştir.

7- Pek çok standard veya şartnamede, numunelerin sülfat ve benzeri ortam etkilerine karşı dayanıklılığının belirlenmesinde, ilgili ortama maruz bırakıldıkları süre sonunda numuneler üzerinde meydana gelen uzama oranları dikkate alınmaktadır. Genel olarak, yüksek sülfat dayanımı beklenen karışımlarda, 1 yıl sonunda $\leq 0,1$ uzama değeri uygun kabul edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları da $0,1$ uzama oranının, numunelerin sülfata dayanıklılığın belirlenebilmesi açısından kritik bir değer olarak kabul edilebileceği sonucunu çıkarmıştır. İlgili zaman (t) – uzama (%) grafikleri incelendiğinde, grafiklerin i) zaman içerisinde “farklı eğimlerde” giderek atan bir formda olduğu veya ii) $0,1$ uzama değerinden daha düşük veya civarındaki değerlerde bir plato oluşturduğunu görmek mümkündür.

8- İç veya dış sülfat etkisine maruz kalabilecek betonlarda mineral katkıların kullanımı, oluşabilecek deformasyonları minimum bir değerde tutabilmek için gereklidir ve koruyucu bir önlem olarak düşünülmelidir. Özellikle Ortadoğu’da iş yapan inşaat firmaları, zaman zaman zorunlu olarak bu tür, sülfat içeriği çok yüksek düzeylerde olan kumları kullanmak zorunda kalmaktadırlar. Bu tür durumlarda beton karışım hesapları yapılırken, mineral katkı kullanımı şantiye mühendisleri tarafından mutlaka hesaba katılması gereken bir konudur.

9- Numunelerde ölçülen ultrases hızlarında sülfat etkisinin kendisini tam olarak gösterememesi sebebiyle önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir. Ultrases hızlarındaki değişimlerin az olması, numunelerde henüz önemli bir hasar oluşumunun başlamadığının bir göstergesi olup, daha ileriki yaşlara kadar ölçümlerin takip edilmesi gerekmektedir.

10- Harç numuneler üretilerek yapılan bu çalışmanın sonuçları, uygulamacılar açısından bir klavuz oluşturabilecektir. Ancak, daha ileri çalışmalar açısından, benzer agregaların sülfat etkisinden dolayı neden olabileceği deformasyonlar, bu kumlarla üretilcek “beton” karışımlarında da kontrol edilmeli ve harçlardan elde edilen sonuçlar ile arasındaki benzerlikler ortaya konulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Mavi Ö**, 2002. Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Prof. Dr. Postacıoğlu B**, 1986. Bağlayıcı Maddeler, Beton Cilt I, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [3] **Erdoğan, T.Y.**, 2007. Beton Oluşturan Malzemeler, Çimentolar, Ankara.
- [4] <<http://www.antepcimento.com/portland.asp>>, 29.05.2006
- [5] <<http://www.cimsa.com.tr/urunler>>, 29.05.2006
- [6] <<http://www.yibitas-lafarge.com.tr/cemhome.nsf>>, 01.06.2006
- [7] **Akman, S.**, 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [8] **Eriç M**, 2002. Yapı Fiziği ve Malzemesi, İstanbul.
- [9] **Erdoğan N**, 2005. Çimento Harçlarının Niteliklerinin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.**, Katkı Malzemeleri Kataloğu
- [11] **TS EN 934-2**, 2002. Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet İçin – Bölüm 2: Beton Katkıları – Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [12] **TSE 639**, 1975. Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [13] **TS EN 450** 1998. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [14] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, 2003. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara.
- [15] **Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A.**, 2003. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [16] **Öner A**, 2005. Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu İçeren Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Açısından Optimum Bileşiminin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi.
- [17] **ASTM C 618**, 1978. Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.

- [18] **Özturan, T.**, 1993. *Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, pp. 57-78.
- [19] **Berry, E. E. And Malhotra, V. M.**, 1986. Fly Ash in Concrete, Ottawa, pp. 223-229.
- [20] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Bağlayıcı Maddeler Cilt-1, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- [21] **ACI Committee**, 1987. Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, 84, pp. 381-409.
- [22] **Atış, C. D.**, 2000. Heat Evolution and Drying Shrinkage of Concrete Containing High Volume Fly Ash, *Proceedings of Second International Symposium in Cement and Concete Technology in the 2000's*, İstanbul, Turkey, September 6-10, pp. 359-369.
- [23] **Mangat, P. S. and Khatib, J. M.**, 1995. Influence of Fly Ash. Silica Fume and Slag on Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 92, pp. 542-552.
- [24] **Tikalsky, P. J. and Carrasquillo, R. L.**, 1992. Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, 89, pp. 69-75.
- [25] **D.G. Mantel**, September-October 1994, Investigation into the Hydraulic Activity of Five Grabulated Blast Furnace Slags with Eight Different Portland Cements *ACI Material Journal*, V91, No.5.
- [26] **Erdogan, T.**, 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- [27] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Mayıs 2001. Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, Ankara.
- [28] **Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği**, 1982, Cürufllu Çimentoların Mikroyapısı, Cilt 19, Sayı 178, sayfa 20-30, Ankara.
- [29] **P.S. Mangat and J.M. Khatib**, 1995. Influnce of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete *ACI Material Journals*, V.91, No.5
- [30] **Young-Jin Kwon**, 2004, A Study on the Alkali-Aggregate Reaction in High-Strenght Concrete with Particular Respect to the Ground Granulated Blast-Furnace Slag Effect Cement and Concrete Research.
- [31] **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, 2005. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Ankara.
- [32] **Stedt, J.-E. O. and Greenwood, P., Chapter 57**, Some İmportant, Fairly New Uses of Colloidal Silica/Silica Sol, **Horacio E. Bergna, William O. Roberts**, Colloidal Silica Fundamentals and Applications.

- [33] **Ilıca, T.**, 2008. Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirirnililiğı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., İstanbul.
- [34] **Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H.**, 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), s 89-200, DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir.
- [35] **Bayazıt, Ö. L.**, 1980. Beton ve Deneyleri, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [36] **Postacıoğlu, B.**, 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt I, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
- [37] **J. Skalny, J. Marchand and I. Odler**, “Sulfate attack on concrete”, Modern Concrete Technology, Series 10, Spon Press, New York, 2002.
- [38] **ASTM C 1157-03**, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.
- [39] **ASTM C 1240-05**, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Doğan Dikme

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 03.08.1982

Adres: Güngören/İstanbul

Lisans Üniversitesi: Kocaeli Üniversitesi

İş: Ekol Teknik Yapı Denetim (2007)

Yayın Listesi:

- Atahan H., N., **Dikme D.**, Improving the Sulfate Resistance of Mortars Produced with Naturally Sulfate Contaminated Sands, *International Conference on Material Science and 64th RILEM Annual Week in Aachen – MATSCI*, September 4-9, 2010 Aachen, Germany. (Accepted).