

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ KALMIŞ MİNERAL VE NANO KATKILI  
HARÇLARIN DURABİLİTESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Koray Mehmet ARSLAN**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Mayıs 2014**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ KALMIŞ MİNERAL VE NANO KATKILI  
HARÇLARIN DURABİLİTESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Koray Mehmet ARSLAN  
501101037**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN**

**Mayıs 2014**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101037 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Koray Mehmet Arslan**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ KALMIŞ MİNERAL VE NANO KATKILI HARÇLARIN DURABİLİTESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Hakan N. ATAHAN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Turan ÖZTURAN**      .....

Boğaziçi Üniversitesi

**Doç. Dr. Hasan YILDIRIM**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **02 Mayıs 2014**

**Savunma Tarihi :**      **26 Mayıs 2014**



*Aileme,*





## **ÖNSÖZ**

Sunmuş olduğum bu yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgileriyle ve tecrübesiyle bana yol gösteren tez hocam sayın Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yardımlarını benden esirgemeyen İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana sonsuz destek sağlayan aileme teşekkürlerimle.

Mayıs 2014

Koray Mehmet ARSLAN  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Sülfat Etkisi .....	3
2.2 Sülfat Etkisine Karşı Önlemler .....	5
2.3 Sülfat Etkisine Karşı Mineral Katkı Maddeleri .....	8
2.3.1 Uçucu kül .....	8
2.3.2 Yüksek fırın cürufu .....	11
2.3.3 Silis dumanı .....	14
2.3.3.1 Mikro silika.....	14
2.3.3.2 Nano silika.....	15
2.4 Sülfat Etkisinin Belirlenmesi .....	16
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>19</b>
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	19
3.1.1 Çimento.....	19
3.1.2 Su .....	21
3.1.3 Agregata.....	21
3.1.4 Mineral katkıları.....	24
3.1.5 Sülfat çözeltisi.....	24
3.1.6 Kıvam arttırıcı .....	25
3.1.7 Numunelerin üretimi ve hazırlanması.....	25
3.2 Deney Yöntemleri.....	26
3.2.1 Sertleşmiş harç deneyleri .....	26
3.2.1.1 Boy değişimi .....	26
3.2.1.2 Ultrases hızı ölçümü .....	27
3.2.1.3 Eğilme ve basınç deneyleri.....	28
3.2.1.4 XRD (X-Ray Diffraction) deneyleri.....	28
<b>4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER</b> .....	<b>29</b>
4.1 Numunelerde Boy Değişimi .....	29
4.2 Dayanım Özellikleri.....	39
4.3 Ultrases Hızı Değişimleri .....	42
4.4 XRD (X-Ray Diffraction) Deneyi Sonuçları .....	42
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>49</b>



## **KISALTMALAR**

<b>MS</b>	: Mikro Silika
<b>NS</b>	: Nano Silika
<b>UK</b>	: Uçucu Kül
<b>YFC</b>	: Yüksek Fırın Cürufu
<b>REF</b>	: Referans
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>C<sub>3</sub>A</b>	: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
<b>C<sub>3</sub>S</b>	: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
<b>C H</b>	: $\text{Ca}(\text{OH})_2$
<b>C-S-H</b>	: Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Sülfata dayanıklı genel çimento sınıfları.....	7
Çizelge 2.2 : Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri.....	10
Çizelge 3.1 : Çimento deney sonuçları (kimyasal analiz).....	20
Çizelge 3.2 : Çimento deney sonuçları (fiziksel analiz).....	20
Çizelge 3.3 : Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları.....	21
Çizelge 3.4 : Elek analizi deney sonuçları.....	21
Çizelge 3.5 : Bağdat kum örneğinin bileşenleri ve oranları.....	23
Çizelge 3.6 : Kerbela kum örneğinin bileşenleri ve oranları.....	23
Çizelge 3.7 : Kimyasal analiz sonuçları.....	24
Çizelge 3.8 : Mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 4.1 : Sakarya kumu ile üretilen referans numunelerinin dayanımları.....	40





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1 : Hazırlanmış numuneler.....	26
Şekil 3.2 : Boy ölçümlerinin yapıldığı cihaz.....	27
Şekil 3.3 : Ultrases ölçümlerinin yapıldığı cihaz.....	27
Şekil 3.4 : Basınç deneylerinin yapıldığı aparat.....	28
Şekil 4.1 : Bağdat, Kerbela ve Sakarya referans numunelerinin boy uzama oranları .....	30
Şekil 4.2 : MS katkılı Bağdat ve Kerbela numunelerinin boy uzama oranları.....	31
Şekil 4.3 : NS katkılı Bağdat ve Kerbela numunelerinin boy uzama oranları .....	32
Şekil 4.4 : UK katkılı Bağdat ve Kerbela numunelerinin boy uzama oranları .....	33
Şekil 4.5 : YFC katkılı Bağdat ve Kerbela numunelerinin boy uzama oranları.....	34
Şekil 4.6 : Dış sülfat etkisindeki referans numunelerin 100. haftadaki durumu.....	35
Şekil 4.7 : Dış sülfat etkisindeki referans numunelerin 110. haftadaki durumu.....	35
Şekil 4.8 : Dış sülfat etkisindeki referans numunelerinin uzama oranları.....	36
Şekil 4.9 : Dış sülfat etkisindeki MS katkılı numunelerin uzama oranları.....	37
Şekil 4.10: Dış sülfat etkisindeki NS katkılı numunelerin uzama oranları.....	38
Şekil 4.11: Dış sülfat etkisindeki UK katkılı numunelerin uzama oranları.....	38
Şekil 4.12: Dış sülfat etkisindeki YFC katkılı numunelerin uzama oranları.....	39
Şekil 4.13: Dış sülfat etkisindeki numunelerin eğilme ve basınç dayanımları.....	41
Şekil 4.14: Dış sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümleri.....	43
Şekil 4.15: Dış sülfat etkisindeki numunelerin XRD sonuçları.....	45
Şekil 4.16: Hasarlı kısımdan alınmış parçalarla yapılan XRD sonuçları.....	46



## SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ KALMIŞ MİNERAL VE NANO KATKILI HARÇLARIN DURABİLİTESİ

### ÖZET

Beton, günümüzde inşaat mühendisliğinin birçok alanında kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Agregata, çimento, mineral veya kimyasal çeşitli katkı maddeleri ve sudan oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Sertleşmiş betonun boşluk yapısı, mekanik özellikleri ve yıllar içerisinde maruz kaldığı çevresel faktörler betonun servis ömrünü etkileyen ana öğelerdir.

Çevresel etki faktörleri içerisinde sülfat etkisi betonun dürabilitesini ve özelliklerini olumsuz yönde etkileyen en önemli etkenlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Betonda sülfat etkisiyle ilgili pek çok araştırma yapıldığı bilinmektedir. Literatürdeki araştırmalar, betonun maruz kaldığı dış sülfat etkisi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, sülfat etkisine maruz kalmış harçlarda bu etki nedeniyle oluşabilecek hasarlar ve iç yapı oluşumlarının incelenmesi araştırılmıştır. Mikro silika (MS), nano silika (NS), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi mineral katkıların sülfat etkisine maruz kalan harçların dürabilite özelliklerini ne yönde etkilediği incelenmiştir.

Yapılan çalışma kapsamında, doğal sülfat içeriği ihmal edilebilir düzeyde olduğu bilinen Sakarya kumu ile üretilmiş çeşitli oranlarda mineral katkı kullanılan numuneler ve bunları kıyaslayabilmek adına katkısız üretilen referans numuneler yüzde 5 oranında sodyum sülfat içeren çözeltide bekletilmiş ve dış sülfat etkisine maruz bırakılmıştır.

Çalışmada ayrıca, Irak'tan temin edilen ve doğal sülfat içeriği yüksek olduğu bilinen iki çeşit kum kullanılarak üretilen ve yine çeşitli oranlarda mineral katkı içeren numuneler ise su küründe bekletilmiş ve maruz kaldıkları iç sülfat etkileri nedeniyle oluşabilecek dürabilite problemleri incelenmiştir.

Yapılan çalışmada 36 ay boyunca numunelerde periyodik olarak boy ölçümleri alınmıştır ve mineral katkı kullanımının sülfat etkisinden kaynaklanan deformasyonları ne derece kısıtladığı tespit edilmiştir.

Literatürde ve birçok teknik şartnamede geçtiği üzere sülfat etkisinde boy uzaması için kritik sınır değer %0,1 kabul edilmektedir. Bu değerden daha fazla boy uzaması olması halinde betonun basınç dayanımında da önemli düşüşlerin olduğu bu çalışmada da tespit edilmiştir. 36 aylık etki süresi sonunda tüm numunelerde ultrases geçiş hızı ölçümleri, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları mineral katkıların, kullanım oranlarına bağlı olarak, sülfat etkisi karşısında mekanik ve fiziksel özellikler bakımından önemli iyileştirici etkilerinin olduğunu göstermiştir.

Dış sülfat etkisine maruz kalmış katkısız numune ve her bir katkı türünden en az ve en çok oranında olmak üzere seçilen numunelerde ise iç yapı oluşumlarını araştırmak

amacıyla XRD (X-Ray Diffraction) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonular, gzlenen hasarın nedenin etrenjit değil, alı kristalleri oluşumundan olduğunu gstermiştir.

## **DURABILITY OF MORTARS PRODUCED WITH NANO AND MICRO MINERAL ADMIXTURES AGAINST SULFATE ATTACK**

### **SUMMARY**

Concrete, which is most commonly used construction material today. It has a complex structure consisting of cement, aggregate, mineral and chemical admixtures, and mixing water. Cement production and concrete are considered to be important indicators of economic growth.

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. Concrete in service is often exposed to aggressive environments but it can be relatively simple and economical to produce durable concrete.

Sulfate contaminated environment is one of the most important factors that significantly affects the durability of plain and reinforced concrete structures negatively.

Sulfate attack is one of the most important factors affecting the durability and service life of concrete structures negatively. As a simplest definition, sulfate attack can be described as a series of complex chemical reaction chains which takes place between the sulfate ions and hydration products of cement. Especially when improper concrete mixture design is used, structural elements exposed to sulfate attack shows significant deterioration diminishing the structural integrity.

It is well known that, one way of enhancing concrete durability against external attacks is to improve its permeability properties. Besides the water to cementitious material ratio of the mixture, mineral admixtures having different chemical and physical characteristic improve micro structure of concrete by refining its internal structure.

There are a lot of reseaches about this aspect but we can see that they are mainly about external sulfate attack. 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 this study, enhanced durability were investigated against internal and external sulfate attack. In order to investigate external sulfate attack, we used sand provided from Sakarya region that know as there aren't any reserved sulfate naturally inside and proced mortar bars by using this kind of sand were subjected to external sulfate attack by using 5% sodium sulfate solution.

On the other hand, in order to investigate internal sulfate attack, we used sands provided from Middle East region that known as these kind of sands reserve sulfate naturally inside (water soluble sulfate amounts of 1.5% and 2.0%) and mortar bars

which are produced by sands from Middle East subjected to water cure. The quality of any aggregate, in addition to its chemical and mineralogical nature, depends on its prior exposure to the environment and during processing. Aggregate properties are also can be effective on sulfate attract.

Chemical and mineral admixtures are accepted components of modern concrete. They are used to enable easier processing of fresh concrete, to better the properties of hardened concrete in a structure, and to improve concrete durability and extend its service life.

Mineral additives such as fly ash, ground granulated blast furnace slag and micro silica have widely been used in concrete technology for improving strength and durability performance of concrete. In order to enhance sulfate resistance of the mixtures, nano silica (NS), micro silica (MS), fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBS) were used with various replacement ratios.

The FA used in this work can be classified as Class F fly ash. As it is a new nano technological material, the role of nano silica for limiting the expansions caused by sulfate attack was shown as well.

As well as the reference mixtures which do not contain mineral additives, three different replacement ratios by weight of cement were selected for each mineral additive. Replacement ratios were selected as 2%, 4% and 6% for NS, 6%, 9% and 12% for MS, 15%, 30% and 45% for FA and, 20%, 40% and 60% for GGBS. These replacement ratios were selected to investigate a certain range which these mineral admixtures would be used in practical applications. For the mixtures of the samples, a commercially available Type I Portland cement with C3A content of 7.6% was used.

All samples' expansions were monitored for 36 months and the effects of mineral admixtures were investigated against length changes. At the end of 36 months, flexural strength, compression strength and ultrasonic pulse velocity of mortars were determined and their results were compared with the reference samples which do not contain mineral additives.

The most important engineering properties of hardened concrete is its strength. In this study, it is measured that the strength losses between the reference samples exposed to sulfate environment and cured in water are approximately 38% for compressive strength and 66% for flexural strength.

Results have shown that, from the mechanical strength point view of, significant improvements against both internal and external sulfate attack were achieved by using mineral admixtures. Practical solutions to protect concrete against sulfate attack are, in most cases, simple and economical. It should be also mentioned that, the dosage of mineral additive is also another important factor which determines the sulfate resistance of the mixtures.

For the micro-structural evaluations, on the other hand XRD tests were also performed on the reference samples exposed to 5% sodium sulfate solution and water cured samples and the samples having the maximum and minimum mineral admixture contents.

In accordance with the XRD test results, it was concluded that the reason for the damage of reference mortar samples exposed to sulfare environment is gypsum

formation. No ettringite formation was observed. As indicated in the literature, ettringite is not stable in high sulfate concentration environments.





## 1. GİRİŞ

Beton, günümüzün inşaat mühendisliğinde kullanılan en önemli yapı malzemesi olarak kabul edilebilir. Betonun maruz kaldığı çevresel etkiler içerisinde ise sülfatlı ortamlar ve sülfat etkisi betonun durabilitesini olumsuz yönde etkileyen önemli etkilerden bir tanesidir. Sülfat atağını iç ve dış sülfat etkisi olarak ikiye ayırmak mümkün olabilir. Sülfat, betonun içerisine dışardan nüfuz edebileceği gibi, üretimde kullanılan agrega veya karışım suyu nedeniyle de etki oluşturabilir. Sülfat atağı, sülfat iyonları ile çimento hidrasyon ürünleri arasında meydana gelen ve betonun stabilitesini bozan bir seri karmaşık kimyasal reaksiyonlar zinciri olarak tanımlanabilir. Bu kimyasal reaksiyonlar zincirinin oluşturduğu hasarın boyutu betonun geçirimsizlik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Öte yandan beton üretiminde kullanılacak çeşitli mineral katkıları da hasarın oluşmasını azaltabilir veya tamamen hasar oluşumunu engelleyebilir. Düşük yoğunluklu iç ve dış ve sülfat etkisinde genel olarak betondaki hasarın meydana gelmesi, çimento karma oksitlerinden C3A'nın hidrasyonu sonucunda oluşan kalsiyum alüminat hidrate (C-A-H) ile sülfat iyonlarının oluşturduğu kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen etrenjit ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) oluşumu olarak bilinmektedir. Ancak ayrıca %5 sodyum sülfat çözeltisi gibi yoğun sülfat atağına maruz kalan betonlarda etrenjitin oluşmadığı veya oluştuğunda stabilitesini koruyamadığı da yapılan araştırmalarda belirtilmiştir. Yüksek yoğunluklu sülfat etkisine maruz harçların durabilitesini bozan yapı olarak alçı kristalleri oluşumu bilinmektedir. Bu durum kalsiyumhidroksit (CH) ortamdaki su (H) ve serbest sülfat iyonlarının ( $\bar{S}$ ) tepkimeye girip alçı kristallerini ( $\bar{C}\bar{S}H_2$ ) oluşturması olarak açıklanabilir.

Geçmişte yapılan araştırmalara bakıldığında genellikle dış sülfat etkisi üzerinde durulduğu görülmüş, zemin suyu, fabrika atığı gibi etkileri modellemek amacıyla üretilen numuneler sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan, Bağdat ve Kerbela gibi şehirlerde yüklenicilik yapan mühendislik firmaları için doğal sülfat içerikli kum kullanmak kaçınılmazdır. Bu mecburiyet nedeniyle uzun vadede betonda oluşacak hasarları önceden önleyebilecek katkı maddeleri kullanmak oradaki mühendisler için kaçınılmazdır.

Yapılan bu çalışma kapsamında, içeriğinde doğal olarak sülfat bulunan Bağdat ve Kerbela (Irak) bölgelerinden temin edilen kumlarla üretilen harçlarda oluşturabilecek “iç sülfat etkisi” ve aynı zamanda, sülfat içeriği düşük olan bir kum ile üretilen harçların sülfatlı bir ortama maruz bırakılmasıyla oluşacak “dış sülfat etkisi” araştırılmıştır. Her iki durumun araştırılmasında, sülfat etkisinden kaynaklanan dürabilite problemlerinin azaltılabilmesi için farklı mineral katkıların kullanımı da incelenmiştir. Bu amaçla, üretilen harçlarda nano silika (NS), mikro silika (MS), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi nano ve mikro boyutlu mineral katkıları belirli oranlarda çimento ile ikame edilerek kullanılmışlardır. Kullanılan mineral katkı maddelerinden mikro silika, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül özellikleri iyi bilinen mineral katkı maddeleridir. Çalışmada kullanılan nano silika, diğerlerine göre daha yeni bir nano teknoloji ürünüdür. Kullanılan nano silika, ortalama çapı 50 nanometre mertebelerinde olan aktif SiO<sub>2</sub> tanelerinden oluşmaktadır. Bu ürünün beton içerisinde kullanıldığı bilinmektedir, ancak uzun vadede sülfat etkisine karşı nasıl bir performans sergileyeceği bu çalışma kapsamında incelenen bir diğer önemli nokta olmuştur.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 2.1 Sülfat Etkisi

Sülfat atağı, sülfat iyonları ile çimento hidratasyon ürünleri arasında meydana gelen ve betonun stabilitesini bozan bir seri karmaşık kimyasal reaksiyonlar zinciridir [1]. Sülfat etkisini iç sülfat etkisi ve dış sülfat etkisi olarak ikiye ayırmak mümkündür. Dış sülfat etkisi kısaca sülfatın kaynağının beton dışında bir ortamdan gelmesi olarak tanımlanabilir. Bu sülfat kaynağı, yer altı suyu, toprak, katı endüstriyel atıklar, gübreler veya sıvı endüstriyel atıklar olabilir. İç sülfat etkisi ise, kısaca sülfatın kaynağının betonun içinde varolması olarak tanımlanabilir. Bu kaynak, çimento, agrega, kimyasal katkıları veya karışım suyu olabilir. Sülfatlı ortamlarda bulunan serbest sülfat iyonlarıyla çimentodan gelen kalsiyum alüminat hidrat ve kalsiyum hidroksit tepkimeye girerek etrenjit ve jips oluşmasına neden olurlar. Bu oluşan yeni kristal yapılar betonda dıştan başlayarak pul pul dökülmeler, çatlamlar, genleşmeler meydana getirirler ve nihayetinde beton dayanım kaybına uğrar ve servis ömrünü önemli ölçüde yitirir. Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Sülfat nedeniyle hasar, sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Sülfata maruz kalmış betonlarda genel olarak köşe kenarlardan başlayarak pul pul dökülmeler, beyaz lekeler gözlemlenir. Betonun bu kısımları kolayca elle ufalanabilir.

Çimento ana bileşenlerinden olan  $C_3A$  ve  $C_4AF$  çimentonun, dolayısıyla betonun sülfata karşı göstereceği direnç karşısında önemli rol oynarlar. Yüksek miktardaki  $C_3A$  zamanla oluşacak olan monosülfoalüminatların önünü açar ve ilerleyen yaşlarda betonda genleşmelere ve dökülmelere neden olan etrenjiti oluştururlar. Ancak tek başına  $C_3A$  miktarını düşük tutmak betonun sülfat etkisine karşı dirençli olmasına yetmemektedir. Betonun geçirimsizliği de sülfat etkisine karşı dirençte, en önemli faktörlerdendir. Zemin suyunda, toprakta veya diğer faktörler nedeniyle betonla buluşan sülfat, geçirimsizliği yüksek betonlarda betonun içlerine kadar nüfuz edebilecek ve sülfatın zararlı etkilerini, dayanım kayıplarını üst seviyelere

çıkacaktır. [2]. Betonun sülfat etkisine karşı direncinin yükseltilebilmesi için mümkün olduğunca geçirimsiz beton üretmek durabilite açısından önemlidir [3]. Dayanım ve dayanıklılık için en önemli gereksinim, olabildiğince az boşluklu ve geçirimsiz beton üretmektir [4]. Erken yaşlardaki kür şartlarının da betonun geçirimliliğine etkisi oldukça fazladır. Bilindiği üzere düşük su/çimento oranı betonun durabilitesini ve servis ömrünü önemli ölçüde arttırmaktadır. Su miktarını azaltarak ve aynı zamanda aynı işlenebilirliği sağlayabilmek, akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak ve doğru agrega granülometrisi sağlanarak elde edilebilir. İnce agrega varlığı yüksek olarak üretilen betonlarda su gereksinimi fazladır, dolayısıyla hedeflenen düşük su/çimento oranını sağlamak mümkün olmaz. Bu nedenle agrega granülometrisi su/çimento oranı için ve betonun dayanıklılığı için büyük öneme sahiptir. Son yıllarda betonun dayanımına göre değil, dayanıklılığa göre tasarlanması gündeme gelmeye başlamıştır. Dayanıklılığa yani durabiliteye göre tasarımda ise sülfat etkisi asla gözardı edilemeyecek hususlardan bir tanesidir. Betona zararlı sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan betona nüfuz edebilir. 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 [5]. Olası sülfat etkisi betonun servis ömrünü kat be kat kısaltabilir. Tüm bu olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla geçirimsiz beton üretilmesi,  $C_3A$ 'nın kısıtlanması yanında betonda puzolanik katkı maddeleri kullanılması tavsiye edilir.

Betonda sülfat etkisi araştırılırken gecikmiş etrenjit oluşumunu da incelemekte fayda vardır. Gecikmiş etrenjit oluşumu genellikle prefabrik yapı elemanlarının imalatında görülür. Prefabrik yapı elemanı üretiminde, dayanımın hızlı gelişmesi amacıyla betona buhar kürü sıkça uygulanır. Ancak uygulanan yüksek sıcaklıklarda (70 – 80 °C) alçıtaşının çözünürlüğünün düşmesiyle  $C_3A$ 'nın ilerleyen yaşlarda reaksiyona girememesi ve bu reaksiyonun beton sertleştikten sonra, zamanla nem varlığında gerçekleşmesi halinde gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) adı verilen ve betonda sülfat saldırısının bir diğer türü olan problem ortaya çıkabilmektedir. Sülfat etkisiyle genişleyen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp, parçalamaktadır. Ancak burada oluşan etrenjit normal hidrasyon sonucu oluşan etrenjit ile karıştırılmamalıdır. Beton taze iken, kristalleşen tuzun genişlemesine izin verecek ortam mevcuttur. 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. Etrenjit oluşumunun stabilitesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Ardından yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar görülür [5].

## 2.2 Sülfat Etkisine Karşı Önlemler

Bilindiği üzere betona karşı zararlı maddelerin, özellikle de sülfatın beton içine taşınımı betonun dürabilitesi açısından çok önemlidir. Gerek iç, gerekse dış sülfat etkisine maruz kalmış betonlarda belli başlı dikkat edilebilecek hususları açıklamak gerekirse betonu mümkün olduğunca geçirimsiz üretmek önleyici tedbir olarak dikkat edilmesi gereken konulardan birisidir. Betonda su/çimento oranını düşük tutmak, aynı işlenebilirlik seviyesi için su yerine akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanmak, süreksiz granülometriye sahip agrega kullanmak betonu mümkün olduğunca geçirimsiz kılmaya yardımcı olacaktır. Yapılan çalışmalarda su/çimento oranı 0,7'nin üzerinde olduğunda betonun geçirimliliğini birinci dereceden etkileyen kapiler boşlukların bloke edilmesinin imkansız olduğu belirtilmiştir [6]. Sülfat içeren suların beton içesine nüfuz etmesi engellenir veya azaltılırsa sülfat saldırılarına karşı beton korunabilir. Erken yaşta betonun düzenli ve uygun kür uygulanması da durabilite açısından önemlidir. Betona kür uygulamanın mukavemete olumlu etkisi bilinir ancak çok daha fazla olumlu etkisi betonun durabilitesi üzerinedir.

Üzerinde konuşulması gereken bir diğer önlem ise betonda kullanılan çimentonun içerisinde yer alan  $C_3A$  fazıdır. Düşük  $C_3A$  oranına sahip çimento kullanmak oluşacak zararlı kimyasal reaksiyonlar zincirinin önüne geçebilir. TS EN 197-1'e göre CEM I SR ibareli çimentolar ile CEM III B ve CEM III C tipi çimentolar sülfata karşı dirençli çimentolardır [7]. Literatür araştırmasına bakıldığında çimento türleri ve çimentoları sınıflandırma açısından mühendisler için klavuz TS EN 197-1 standardıdır. Söz konusu bu standart 2012 yılının şubat ayında revize edilmiş ve bu revizyon özellikle sülfata dirençli çimento kavramının daha bilinçli ele alındığını göstermiştir. Son yayınlanan TS EN 197-1 standardını sülfat etkisine karşı direnç açısından incelediğimizde, 7 adet sülfata dayanıklı genel çimento sınıfı, 3 adet düşük erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento sınıfı ve 2 adet sülfata dayanıklı düşük

erken dayanımlı yüksek fırın cürüflü çimento sınıfının çizelgeye dahil edildiğini görebiliriz. Bu değişikliklerle birlikte “TS 10157 - Sülfata Dayanıklı Çimento Standardı” yürürlükten kaldırılmıştır. Sülfata dayanıklı çimentoların adlandırılmasında SR (sulfate resisting), SR 0, SR 3, SR 5 kısaltmaları kullanılmaktadır. Bu çimento sınıfları ve içerikleri Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir. Sülfata dayanıklı çimento sınıflarında  $C_3A$  ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) içeriğinin yüzdesi sınırlandırılmıştır. Bu sınırlara uyan çimentolar sülfat etkisinin olduğu yerlerde kullanılabilir. Çimentoların  $C_3A$  içeriği ile ilgili sınır değerler de TS EN 197-1 standardında verilmiştir. CEM I-SR tipi çimentolar en fazla kütlece % 5 oranında  $C_3A$  içerebilmektedir. CEM IV-SR tipi çimentolarda ise bu değer %9’un altında olmalıdır. CEM III-SR tipi çimentolarda ise  $C_3A$  içeriği ile ilgili bir sınırlama yoktur.  $C_3A$  içeriği klinker fazında ölçülmektedir ve  $C_3A = 2,65 A - 1,69 F$  formülasyonu kullanılmaktadır (A: Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) % , F: Demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) % [8] .

Sülfat atağına karşı betonun durabiletesini sağlamak adına alınabilecek belli başlı tedbirlerden geçirmsiz beton dizaynı ve doğru çimento türünü seçmek başlıkları irdelendi. Tüm bunların yanında betonda kullanılacak mineral katkı maddelerinin sülfat etkisindeki önemi de büyüktür. Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu... vb. çeşitli maddelere “Mineral Katkı” adı verilir. Mineral katkılar tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar, fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar.

Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanır. Mikro silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betonda katkı maddesi olarak çoğunlukla kullanıldığı bilinmektedir. Ancak yeni bir nano teknoloji ürünü olan nano silika da artık günümüzde kullanılan mineral katkı maddeleri içerisinde yerini almaya başlamıştır. Çalışmamız ana öğesini oluşturan mineral katkı maddelerini daha detaylı açıklamakta yarar vardır.

**Çizelge 2.1 : Sülfata dayanıklı genel çimento sınıfları.**

Tipler			İçerik (kütlece yüzde*)				
			Ana bileşenler				Minör ilave bileşenler
			Klinker (K)	Yük. Fırın Cürufu (S)	Doğal Puzolan (P)	Silisli Uçucu Kül (V)	
CEM I	Sülfata dirençli portland çimentosu	CEM I-SR 0	95-100	-	-	-	0-5
		CEM I-SR 3					
		CEM I-SR 5					
CEM III	Sülfata dirençli yüksek fırın cürufu çimento	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C-SR	5-19	81-95	-	-	0-5
CEM IV	Sülfata** dirençli puzolanik çimento	CEM IV/A-SR	65-79	-	21-35		0-5
		CEM IV/B-SR	45-64	-	36-55		0-5

\*Tablodaki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamını göstermektedir.

\*\*Sülfata dirençli puzolanik çimento olan CEM IV/A-SR ve CEM IV/B-SR tipi çimentolarda klinker dışındaki ana bileşenler belirtilmelidir.

## 2.3 Sülfat Etkisine Karşı Mineral Katkı Maddeleri

Çimento ile birlikte kullanılan mineral katkı maddelerinin betonda sülfat etkisine karşı olumlu yarar sağladığı bilinmektedir. Geçmişte yapılan çoğu çalışmada çeşitli mineral katkı oranlarına sahip betonların sülfat direncinin yüksek olduğu görülmüştür.

### 2.3.1 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 [9].

TS EN 450'ye göre uçucu küller, toz halindeki kömürün yakılmasında elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den meydana gelen, reaktif  $\text{SiO}_2$  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. 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 [9]. Bütün dünyada bir yılda üretilen toplam uçucu külün ancak % 25'den daha azı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Almanya, Hollanda ve Belçika'da üretilen toplam uçucu külün % 95'den fazlası, İngiltere'de ise yaklaşık % 50'si kullanılmaktadır [10]. Diğer taraftan büyük miktarlarda uçucu kül üretilen A.B.D. ve Çin'de sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 40 oranında uçucu kül kullanıldığı görülmektedir. 1990 yılı verilerine göre Türkiye'de uçucu kül kullanım oranı, % 1'den daha azdır. Son yıllara ait yeni veriler ise elde edilememiştir [10]. Uçucu kül, yapısındaki kireç ve  $\text{SO}_3$  miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;



a) Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  (S+A+F) toplamı % 70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu kül.

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

c) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla  $\text{SO}_3$  ve CaO ihtiva eden sülfokalsik uçucu küllerdir [10].

Uçucu kül'ler, ASTM C 618'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla, 1) bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu kül. 2) genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir [10]. Yukarıda belirtilen siliko alüminalı uçucu kül, F sınıfındadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfokalsik uçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilmektedir [10]. Diğer bir sınıflandırma, EN 197-1'e göre yapılmakta ve uçucu kül, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre uçucu küllü çimentolarda kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır [10].

Bu standartlardaki uçucu kül için verilen kimyasal sınırlar ise Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Bir puzolanik malzeme olan uçucu kül betonda mineral katkı olarak kullanılmasıyla hidrasyon ısı azalır, ileri yaşlarda dayanım artar, işlenebilirlik gelişir (silis dumanı dışında), dayanıklılık artar ve atık malzemeler kullanıldığı için hem çevresel açıdan hem de maliyet bakımından önemli derecede fayda sağlanır.

Büyük bir çoğunluğu endüstriyel yan atık ürünlerden oluşan puzolanlar, betonların özellikle dayanıklılık (durabilite) özelliklerinin geliştirilmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Doğal puzolanların yanında, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı beton teknolojisinde olduğu gibi çimento üretiminde de en çok kullanılan puzolanlardır.

**Çizelge 2.2 :** Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri.

Bileşenler (%)	TS EN 450	TS 639	ASTM C 618	
			F	C
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		>70	>70	>50
SO <sub>3</sub>	<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 <sup>-</sup>	<0.10			
Serbest CaO	<1			
Reaktif SiO <sub>2</sub>	>25			

Beton ve çimento teknolojisinde puzolan kullanımı, kazandırdığı tüm özelliklerin yanında CO<sub>2</sub> emisyonunun da azalmasını, böylece kalkınmanın sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Bilindiği gibi, çimentonun C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S bileşenlerinin hidratasyonu sırasında esas hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, betonun en zayıf kısmını oluşturan Ca(OH)<sub>2</sub> de açığa çıkar. Puzolanlar işte bu zayıf kısım ile reaksiyona girerek hem kendi bağlayıcılık özelliğini kazanır, hem de daha yoğun ve dayanıklı beton elde etme olanağı sağlar.

Uçucu külün zararlı kimyasallara karşı özellikle de sülfat atağına karşı özellikleri açısından incelendiğinde direncin yüksek olduğu görülür. 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 Ca(OH)<sub>2</sub> 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 [9].

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. [9].

Tikalsky ve Carrasquillo yaptıkları çalışmalarda, yirmi farklı uçucu küllü basit ikame metoduyla beton içerisinde kullanmışlar ve yüksek kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir [9].

Freeman ve Carrasquillo, uçucu kül ile üretilen betonların sülfata dayanıklılıklarının Tip II çimentosu ile üretilenden daha iyi olduğunu söylemişlerdir [9].

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

### **2.3.2 Yüksek fırın cürufu**

Mineral katkı maddeleri içerisinde sıklıkla kullanılan, dayanım ve dayanıklılığa etkisi bilinen bir diğer katkı ise yüksek fırın cürufudur. Bu madde esas itibariyle demir cevherinden elde edilir. Demir cevheri, esas olarak demir oksit bileşenlerinden oluşmaktadır. Hematit ( $Fe_2O_3$ ), magnetit ( $Fe_3O_4$ ), limonit ( $Fe_3O_4.nH_2O$ ) ve siderit ( $FeCO_3$ ), doğada en yaygın olarak yer alan cevherlerdir. Demir cevherlerinde, demir oksitin yanısıra, küçük miktarlarda silika ve kil gibi yabancı maddeler de bulunmaktadır. Demir elde etme işlemi, “yüksek fırın” denilen fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Cevherdeki demir oksit, demir durumuna dönüşmektedir. Eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde toplanmaktadır. Yine sıcaklığın etkisiyle, kalkerdeki kalsiyum oksit ve demir cevherindeki silika ve alumina gibi yabancı maddeler, eriyik durumda bir topluluk oluşturarak fırının alt bölümünde (eriyik demirin hemen üstünde) yer almaktadır. Yüksek fırından çıkartıldığı zaman yaklaşık 1500 – 1600 °C sıcaklıkta ve eriyik durumda olan curuf, su içerisine dökülerek veya bir başka yöntemle çok çabuk soğutulduğu takdirde, iri kum taneleri gibi granüle duruma gelmektedir. Çok çabuk soğutulma işlemi nedeniyle, curufun yapısı amorf durum kazanmaktadır. Curufun bu haline “granüle yüksek fırın curufu” denilmektedir. Puzolanik özellik göstermektedir. Granule yüksek fırın cürufu, demir cevheri fırınında eritilip arıtılırken elde edilen uygun bileşimdeki ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilir, kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eder

ve uygun bir şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir. Granüle yüksek cürufun kütlece enaz %66'sı kalsiyum oksit, magnezyum oksit, ve silisyum dioksit toplamında meydana gelmelidir. Geri kalan kısmı bir miktar alüminyum oksit ihtiva eder. Kütlece (magnezyum oksit + kalsiyum oksit)/silisyum dioksit miktarı 1.0'den fazla olmalıdır. TS EN 197'de S harfi ile kısaltılmıştır.

Endüstriyel bir atık olarak oluşan yüksek fırın cürufu depolanmasının zor olması nedeni ile beton sektöründe kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması bakımından önem taşır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süreksiz boşluk oluştuğu, agrega - çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının yani dürabilitesinin arttığı gözlenmiştir [12].

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 [9].

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliğinin yanı sıra dayanıklılık ve sülfat etkisine karşı direnci de araştırılmıştır. Regourd tarafından yapılmış bir çalışmada sentetik olarak hazırlanmış %50 C<sub>3</sub>S + %15 C<sub>3</sub>A + %5 alçı + %30 kuartz içeren numuneler %5 MgSO<sub>4</sub> eriyiğine batırılmıştır. İlk günden başlayarak numunelerde genişleme gözlenmiş ve 7. günde tüm numuneler dağılmıştır. Daha sonra, bu numuneler X ışınları difraksiyonu ve tarayıcı elektron mikroskop kullanılarak incelendiğinde,

$Mg(OH)_2$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  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. Sonuğa GYFC iğerren numunelerde hişbir bozulma görülmemiştir. Benzer sonuçlar %60 cüruf iğerren 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.

$MgSO_4$ ,  $CaSO_4$  ve  $Na_2SO_4$  eriyiklerinin kullanıldığı benzeri bir başka araştırmada da 13 değişik imento kullanılmış ve yüksek fırın cüruflarının, miktarlarıyla orantılı olarak sülfat direncini arttırdığı saptanmıştır [9].

P.S. Mangat ve J.M. Khatib'in yaptığı araştırma, değişik dozajlarda yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu iğerren betonların sülfat dayanımını incelemiştir. Toplam bağlayıcı iğerriği  $350$  ve  $450$   $kg/m^3$  ve su/imento 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  $45$   $^\circ C$  arasında değişen sıcaklıklarda, nem oranı yaklaşık olarak %  $25.55$  olacak şekilde kr edilmiştir. Daha sonra kürlenen 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 kr yapılmış numunelerle, ıslak nemli hava kr yapılmış numuneler karşılaştırıldığında kuru havada kr yapılmış numunelerin sülfat dayanıklılığının daha iyi çıktığı grlmştr. %5 ila %15 arasında silis dumanı iğerren numunelerdeki sülfat direncinde de çok büyük gelişmeler olduğu görülmüş, bununla beraber istenmeyen gözenek hacmi ve çapı  $0,177$  m'den büyük gözeneklerin miktarı silis dumanının kullanılmasıyla artmıştır. %80 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da sülfat dayanımının arttığı gözlenmiştir. Ama %40 yüksek fırın cürufu katkılı betonda da bunun ters etkisi gözlenmiştir. %40 yüksek fırın cürufu katkılı  $45^\circ C$ 'de %25 nem oranında ıslak hava kr yapılmış betonda daha az gözenek yüzdesi ve daha ince gözenek yapısı gözlenmiş olup kontrol betonuyla karşılaştırıldığında daha az sülfat direncine sahip olduğu gözlenmiştir [13].

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı betonların sülfat dayanıklılığı Li ve Zhao tarafından incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, en iyi performansı yüksek fırın cürufu kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir [14].

Sülfat etkisine karşı yüksek fırın cürufunun direncinin araştırıldığı bir çok çalışmada, cüruf ikameli üretilen numunelerin erken yaşta dayanımı göreceli az olduğu, fakat ilerleyen yaşlarda dayanımın ikamesiz numunelerle aynı seviyeye geldiği, hatta cüruf ikameli numunelerin daha yüksek dayanım seviyelerine eriştiği gösterilmiştir.

### **2.3.3 Silis dumanı**

Betonda kullanılan mineral katkı maddelerinden uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan sonra silis dumanı kullanımı da önemli yer tutmaktadır. Silis dumanını genel kullanımı olan mikro silika ve henüz günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte kullanımı başlanan nano silika olarak iki başlık altında incelemekte fayda vardır.

#### **2.3.3.1 Mikro silika**

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'de başlamıştır. Bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı gene Norveç'de 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 [9]. 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. Yoğun mikro silika çok yüksek puzolanik özelliğe sahip bir

maddedir. Yüksek dayanımlı beton üretilebilmek için, süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte mikro silika da betonda mineral katkı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu iki kimyasal ve mineral katkının birlikte kullanımı betonda su-çimento oranını azaltırken daha kaliteli bir içyapı elde edilmesini sağlamıştır. Mikro silikanın beton özellikleri üzerinde sağladığı olumlu katkı yanında ekonomik ve ekolojik yararları da göz ardı edilemez [15]. Mikro silika kullanımının özellikle yüksek mukavemetli beton üretiminde çok büyük yararı vardır.

### **2.3.3.2 Nano silika**

İnşaat mühendisliğinde kullanılan bağlayıcı malzemeler tarihsel süreçte çok eskilere dayansa da günümüzde kullanılan hazır beton ve çimento ürünleri tüm bu süreçte göre henüz yeni sayılabilir. Dahası henüz yeni olarak tanımlanan bu bağlayıcı malzemelerden yüzey alanı açısından en yenileri mikro ölçekte dir. Nanoteknoloji birçok alanı kapsayan bir bilim dalıdır. Aygıt fiziği, malzeme bilimi, elektronik, kimya, biyoloji gibi dallardan bilim araştırmacıları, nanoteknoloji çalışmaları yapmaktadır. Metrenin milyarda biri mertebesinde olan nm, yüzey alanı açısından beton teknolojisinin gelişmesinde çok büyük potansiyele sahiptir.

Mikro, mezo veya makro ölçekli malzemelerin aksine nanosilika silikanın yüzey alanı çok daha büyüktür, bu sebepten dolayı nano silikanın puzolanik aktivitesi silis dumanından çok daha fazla olmaktadır. Ultra ince nano silika tanecikleri çimento hamurunu çok çabuk setleştirir 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.

Günümüzde beton ve çimentoda nanoteknoloji konusunda araştırma yapan bilim insanları daha çok hidrasyon reaksiyonuna ve nanopartiküllerin beton özellikleri üzerindeki etkilerine yoğunlaşmıştır [16]. Ancak bu yeni teknoloji ürünün betonda sülfat etkisine karşı direnci konusunda henüz araştırmaya bakır olduğunu belirtmekte yarar vardır. Öte yandan nano katkılı betonların geçirgenliğin düşük olduğu

bilinmekte ve düşük geçirgenliği olan betonların sülfata karşı direncinin yüksek olduğu bilinmektedir.

#### **2.4 Sülfat Etkisinin Belirlenmesi**

Betonda sülfat etkisinin mertebesinin tesbiti amacıyla daha çok ASTM standartları yol gösterici olmuştur. Deneylerin esası, üretilen numunelerin sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmesine dayanır. Hasar gelişimi takip edilir ve dayanım, elastisite modülü veya ağırlık kaybı parametrelerine göre hasarın şiddeti tespit edilir.

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

Standarda göre hazırlanan harç karışımlarının, 20 MPa basınç değerine ulaştıktan sonra sülfat çözeltisine konulmaları gerekmektedir. Bu amaçla 5 cm ayrıtlı küpler kullanılarak karışımların basınç dayanımlarının gelişimi takip edilir. Bu aşamadan sonra istenen dayanımı sağlayan 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 diğer 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 SO<sub>3</sub> miktarı dikkate alınarak %7 SO<sub>3</sub> 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 pozolanik 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 [9].

Sülfat etkisinin belirlenmesinde, sülfata maruz kalmış beton numunelerinin iç yapılarını da incelemekte fayda vardır. Günümüz teknolojisinin geldiği noktada beton içerisindeki tüm bileşenleri moleküler boyutta tespit etmek veya görüntülemek mümkündür. Bu yöntemlerden başlıcaları CEM görüntülemeleri ve XRD yöntemidir. Bu çalışmada da kullanılması nedeniyle XRD yöntemini açıklamak faydalı olacaktır.

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınları karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi (sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki) analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir.

Çalışma prensibi açısından XRD, her bir kristal fazın atomik dizilimlerine bağlı olarak üzerlerine gönderilen X ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır.



### **3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışma, daha evvel Irak Bağdat ve Kerbela bölgelerinden temin edilen ve sülfat içerikleri standartların çok üzerinde olan doğal kum numuneleri ve sülfat içeriği düşük olduğu bilinen Sakarya bölgesinden temin edilen kum ile çeşitli oranlarda muhtelif mineral katkıları kullanılarak üretilmiş harçlarda iç ve dış sülfat etkisi araştırılmıştır. Daha evvelden başka bir çalışmada üretilmiş olan ve yaklaşık 50 hafta ölçümleri alınmış numunelerin üzerine 110 hafta boyunca boy uzama ölçümleri alınmıştır. Toplamda bu numuneler için yapılan boy uzama ölçümleri yaklaşık 160 hafta olmuştur.

Bazı mineral katkı maddelerinin ve kullanım oranlarının, üretilen harçlarda meydana gelen boy değişimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ortadoğu'dan temin edilen ve agrega içeriğinde sülfat olduğu bilinen numuneler suda bekletilmiş, ayrıca Sakarya bölgesinden temin edilen, sülfat içeriği düşük olduğu bilinen kumla üretilmiş harç numuneleri sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmiş ve maruz bırakılan bu dış sülfat etkisine karşı, hangi mineral katkıların hangi oranda koruyucu etkisi olduğu mükayese edilmiştir.

#### **3.1 Kullanılan Malzemeler**

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

##### **3.1.1 Çimento**

Daha önceden üretilmiş numunelerin üretiminde Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Büyükçekmece fabrikası tarafından üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanıldığı bilinmektedir. Kullanılan çimento türüne göre ilgili standart olan TS EN 197-1 standardına uygundur [17]. Çimento ile ilgili yapılan deney sonuçları Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir [9].

**Çizelge 3.1 : Çimento deney sonuçları (Kimyasal Analiz).**

Kimyasal analiz	Standartlar	Analiz Sonuçları
Test Metodu: TS EN 196-2		
SiO <sub>2</sub> Çözüne (%)		20,12
Çözünmez Kalıntı (%)	≤ 5,0	0,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		4,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		3,30
CaO (%)		63,27
MgO (%)		1,28
SO <sub>3</sub> (%)	≤ 4,0	3,24
Kızdırma Kaybı (%)	≤ 5,0	2,58
Cl <sup>-</sup> (%)	≤ 0,10	0,0443
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O (%)		0,21-0,92
Tayin edilemeyen		0,07
Serbest CaO		1,15
LSF		0,95
Mineralojik Kompozisyon, %		
C <sub>3</sub> S	52,57	-
C <sub>2</sub> S	18,11	-
C <sub>3</sub> A	7,59	-
C <sub>4</sub> 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 <sup>3</sup> )		3,15
Priz Süresi	Başlama (dak.)	146
	Bitiş ( dak.)	193
Hacim Genleşmesi (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3730
	45 µm Elek Kalıntısı (%)	5,2
	90 µm Elek Kalıntısı (%)	0,2

### 3.1.2 Su

Harç üretimi sırasında şehir şebeke suyu kullanıldığı bilinmektedir. Sülfat içerdiği bilinen harçların kütleme işlemi için de kirece doygun şehir şebeke suyu ve sülfat içermeyen harçların dış sülfat etkisi maruz bırakmak amacıyla kullanılan çözeltilerde de şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

### 3.1.3 Agregata

Yapılan bu çalışmada, deney numuneleri üretilirken sülfat içeriği az olduğu bilinen ve dış sülfat etkisini araştırmak amacıyla Sakarya bölgesi kumu, iç sülfat etkisini araştırmak amacıyla ise doğal sülfat içeriği yüksek olduğu bilinen Bağdat'tan 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 [9].

**Çizelge 3.3 :** Agregalara ait özgül ağırlık deney sonuçları.

<b>Kum</b>	<b>Özgül Ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Sakarya	2650
Bağdat	2640
Kerbela	2560

Kullanılan kumların granülometreleri 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 [9].

**Çizelge 3.4 :** Elek analizi deney sonuçları.

<b>Elek Göz Açıklığı (mm)</b>	<b>Elekten Geçen Malzeme (%)</b>		
	<b>Sakarya</b>	<b>Bağdat</b>	<b>Kerbela</b>
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 daha önceki çalışmada yapılmış ve sonuçları incelendiğinde bu kumlarda yüksek oranda SO<sub>4</sub> içerdiği tespit edilmiştir. Sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Doğal sülfat içeriğinin ihmal edilebilir seviyede olduğu bilinen Sakarya yöresi kumu 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<sup>-</sup> miktarı açısından problemsiz olup yüksek SO<sub>4</sub> içerir.

#### **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.

**Çizelge 3.5:** Bağdat kum örneğinin bileşenleri ve oranları.

Mineral / Bileşen	Oran (%)
Kuars 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

**Mikro İnceleme:** Binoküler mikroskop altındaki inceleme sonucu numunenin özellikleri şu şekilde belirlenmiştir: Taneler yarı yuvarlak ve yuvarlak ve de orta küresel biçimlerde. Çoğunlukla renksiz kuvars mineral 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  $SO_4$  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 <sub>4</sub> (Sülfat) (%)	Çözünen Silis (m mol/l)	Alkali Azalması (m mol/l)
Bağdat	0,0098	1,63	33	120
Kerbela	0,0040	1,96	9	83

### 3.1.4 Mineral katkıları

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerinde, 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 [9].

**Çizelge 3.8 : Mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri.**

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

### 3.1.5 Sülfat çözeltisi

İçerdiği sülfat oranı ihmal edilebilir düzeyde olan Sakarya kumu ile üretilen harçlar, daha evvelki çalışmada %5’lik sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi içerisinde muhafaza



edildiği bilinmekteydi, aynı yoğunluktaki çözeltiyle çalışmaya devam 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  $1,08 \text{ gr/cm}^3$  olarak belirlenmiştir.

### 3.1.7 Numunelerin üretimi ve hazırlanması

Harçların üretiminde düşey ekseninde karıştırma yapan ve karıştırma hızı kontrol edilebilen bir laboratuvar mikseri kullanılmıştır. Tüm karışımlarda “Çimento : su : kum” oranları ağırlıkça “2 : 1 : 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 yayılmaları 14-16 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Farklı tipteki kumlar ve mineral katkılar kullanıldığından dolayı istenilen kıvamların elde edilemediği durumlarda kıvam arttırıcı katkı kullanılmıştır [8].

Numuneler Sakarya bölgesinden, Bağdat bölgesinden ve Kerbela bölgesinden temin edilen kumlar kullanılarak imal edilmiştir. 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  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarında toplam 120 adet numune üzerinde ölçümler ve deneyler yapılmıştır [8].



**Şekil 3.1** : Hazırlanmış numuneler.

## **3.2 Deney Yöntemleri**

### **3.2.1 Sertleşmiş harç deneyleri**

Gerek dış sülfat gerekse iç sülfat etkisine maruz kalmış tüm harç numuneleri üzerinde periyodik olarak ASTM C 1038 standardı [18] esaslarına göre boy değişimi ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca numune üretimlerinin üzerinden yaklaşık 160 hafta geçtikten sonra km/s cinsinden TS EN 12504-4 standardı [19] esaslarına göre tahribatsız olarak karakteristik özellik belirlemek amacıyla ultrases geçiş hızı ölçümleri, TS EN 12390-5 standardı [20] esaslarına göre eğilme dayanımı ve TS EN 12390-3 standardı [21] esaslarına göre basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Sodyum sülfat çözeltisi içerisinde dış sülfat etkisine maruz bırakılmış numunelerde ise üstte bahsedilen deneylere ek olarak XRD (X-Ray Diffraction) yöntemi ile iç yapı incelemesi deneyleri yapılmış, sonuçlar numuneler arası kıyaslanmıştır.

#### **3.2.1.1 Boy değişimi**

Daha evvelden 40x40x160 mm boyutlarında üretilmiş olan harç numuneleri ASTM C 1038 standardının tariflerine uyarak 0,01 mm hassasiyete sahip bir uzunluk ölçüm cihazı ile periyodik olarak numunelerin boy değişimleri ölçülmüştür ve bu ölçümler 160 hafta boyunca devam etmiştir. Ölçüm öncesi numuneler kür havuzundan veya sudan çıkarılarak yüzeyleri kuru hale getirilmiştir. Boy ölçümlerinde kullanılan kompratör ise her ölçüm öncesi kalibrasyon çubuğu ile kalibre edilmiştir. Çalışmada boy ölçümlerindeki değişim ilk yapılan ölçüme göre yüzde (%) olarak ifade edilmiştir.



**Şekil 3.2** : Boy ölçümlerinin yapıldığı cihaz.

### 3.2.1.2 Ultrases hızı ölçümü

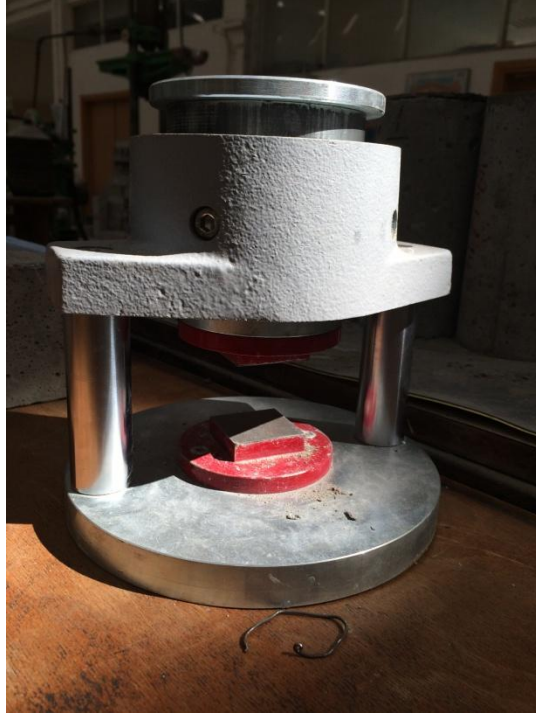
Yaklaşık 160 hafta boyunca boy değişim ölçümleri yapılan tüm numunelerin bu sürenin sonunda TS EN 12504-4 standardında tariflenen yöntemle göre ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Numuneler deney öncesi kurutulmuş ve her iki yanına gres yağı sürülmüştür. Çalışmada ölçümü alınan değerler km/sn cinsinden ifade edilmiştir.



**Şekil 3.3** : Ultrases ölçümlerinin yapıldığı cihaz.

### 3.2.1.3 Eğilme ve basınç deneyleri

Boy değişimi ve ultrases geçiş hızı ölçümü gibi tahribatsız deneylerden sonra tüm numuneler üzerinde TS EN 12390-5 standardına göre eğilme ve 12390-3 standardına göre basınç deneyleri yapılmıştır. Eğilme cihazının hassasiyeti 10 kg ve basınç cihazının hassasiyeti 0,1 kN'dur. Çalışmada elde edilen sonuçlar ve dayanım hesaplamaları MPa cinsinden ifade edilmiştir.



Şekil 3.4 : Basınç deneylerinin yapıldığı aparat.

### 3.2.1.4 XRD (X-Ray Diffraction) deneyleri

160 haftalık dış sülfat etkisine maruz kalmış Sakarya kumu ile üretilen numunelerden seçilen bazılarında İTÜ Maden Fakültesi ve İTÜ Kimya Metalurji Fakülteleri laboratuvarında iç yapıdaki oluşumları görme amacıyla XRD deneyleri yapılmıştır. X ışınların kırılma açlarına karşılık gelen yoğunluk grafikleri sayesinde numunelerde oluşan hasarların sebepleri tespit edilmiştir.

## **4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER**

Tahribatsız ve tahribatlı deney yöntemleri ile iç yapı incelemesine yönelik çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ait değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

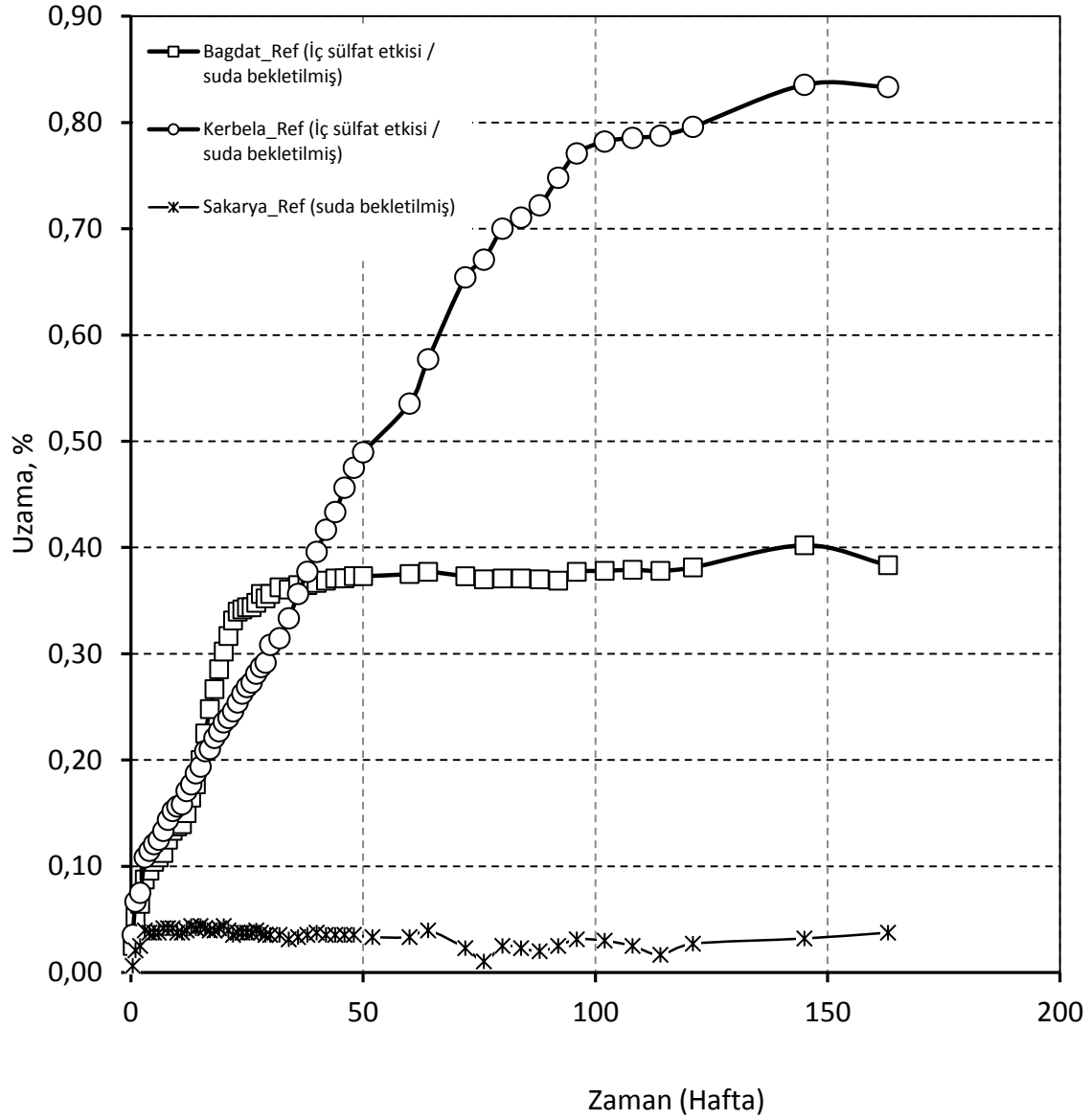
### **4.1 Numunelerde Boy Değişimi**

ASTM C1038 standardı (Standard Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water) sülfat etkisine maruz kalmış harç numunelerinin deformasyonlar nedeniyle kritik bir değere ulaşp ulaşmadığının kontrolü amacıyla geliştirilmiştir.

Ölçülen boy değişimleri ilk değişimlere göre % olarak ifade edilmiştir. Daha evvel yapılmış çalışmalarda ve standartlarda gösterildiği üzere bu çalışmada da kritik boy uzama sınır değeri % 0,1 kabul edilmiştir [22]. Sonuçları değerlendirirken iç ve dış sülfat etkilerini ayrı ayrı incelemek daha yararlı olacaktır.

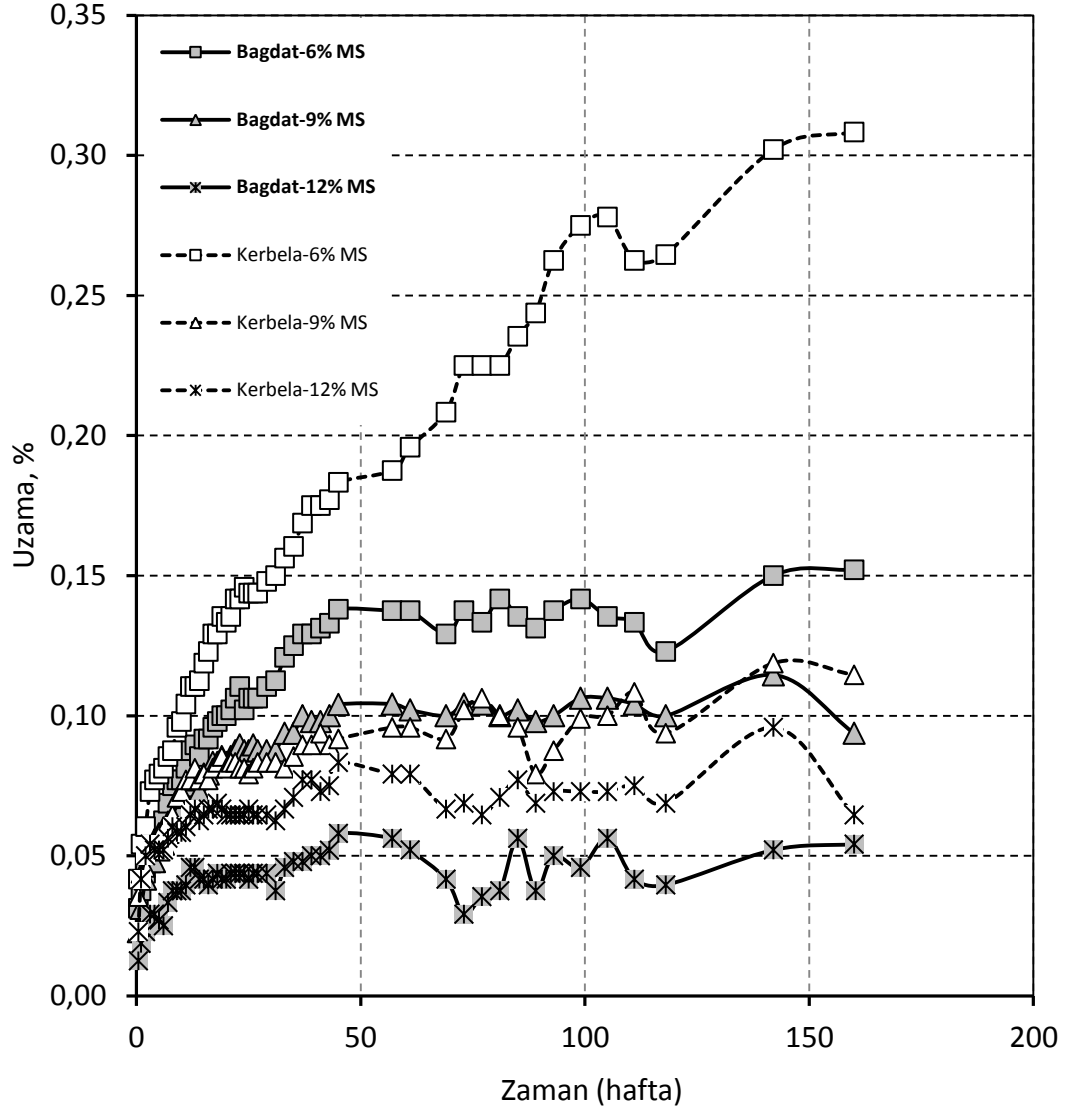
Bağdat, Kerbela ve Sakarya kumlarıyla katkısız olarak üretilmiş ve iç sülfat etkisine maruz kalmış referans numuneler incelendiğinde, Sakarya kumunun limitler dahilinde performans sergilediği ancak Bağdat ve özellikle Kerbela kumunun boy uzamalarına etkisinin büyük olduğu görülür. Bunun sebebi şüphesiz ki Bağdat ve Kerbela kumlarının içeriğinde bulunan doğal sülfat ve maruz kaldıkları iç sülfat etkisidir.

İç sülfat etkisine maruz kalmış katkısız numunelerin aşırı boy uzaması yaptığı görülmüştür. Numunelerin zamana bağlı periyodik olarak ölçülen boy değişimleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



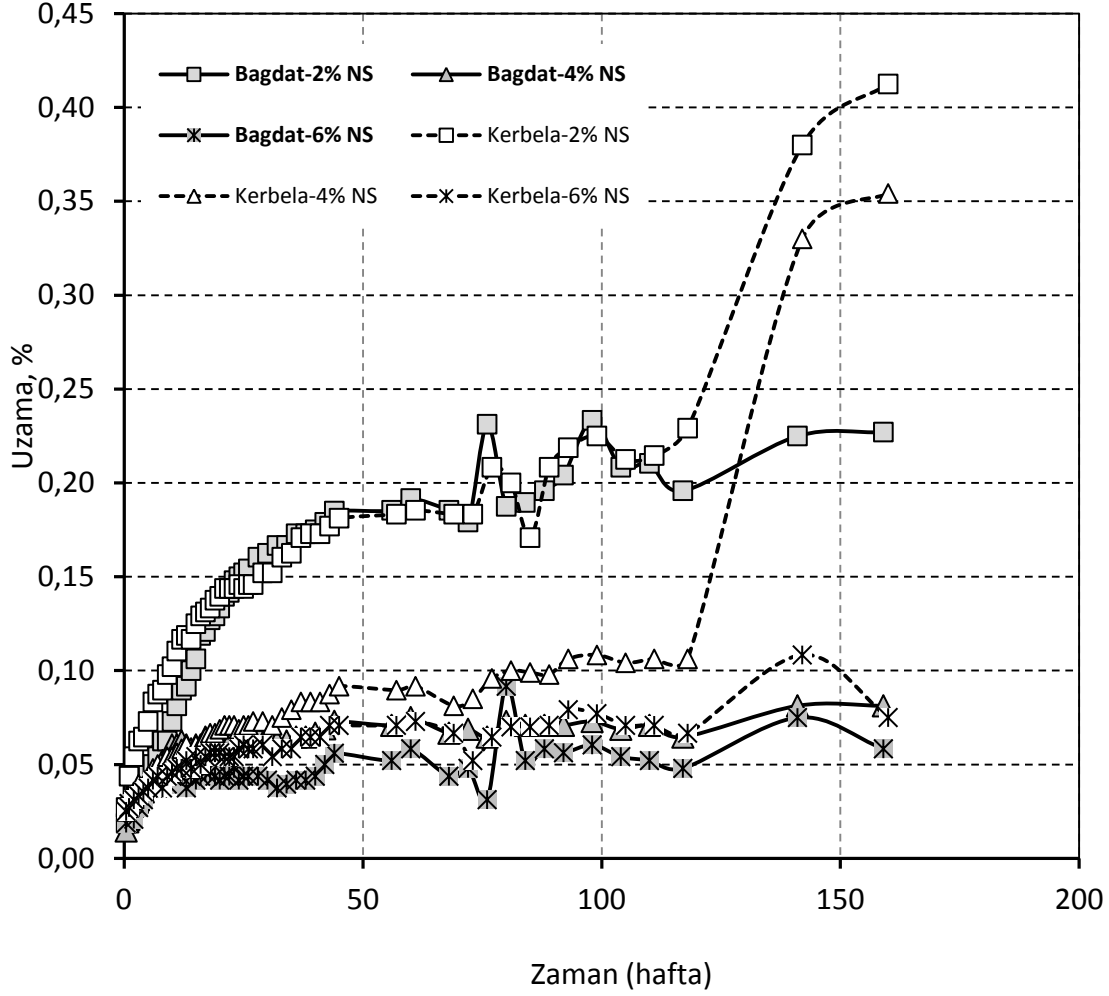
**Şekil 4.1 :** Bağdat, Kerbela ve Sakarya kumları referans numunelerinin boy uzama oranları (numuneler su içinde muhafaza edilmişlerdir).

Mikro silikanın iç sülfat direncine karşı performansında bakıldığında benzer şekilde bir etkiye maruz kalan ancak %6, %9 ve %12 oranlarında mikro silika kullanılarak üretilen numunelerde 160 hafta sonunda ancak %12 oranında mikro silika katkısı kullanılırsa boy uzamalarının sınır değer kabul edilen %0,1 değerinin altında kalabildiği görülmüştür.



**Şekil 4.2 :** Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Mikro Silika (MS) kullanılan numunelerin boy uzama oranları (numuneler su içinde muhafaza edilmişlerdir).

Şekil 4.3'te gösterildiği üzere benzer şekilde %2, %4, %6 nano silika (NS) katkıli numunelerin iç sülfat etkisine karşı performansı incelendiğinde boy uzamalarını kısıtlayabildiği ancak Kerbela kumunun yüksek sülfat konsantrasyonu nedeniyle bu yapıda bir kumda nano silika katkısının yetersiz olduğu ancak Bağdat kumunda %4 ve %6 oranında nano silika katkı kullanmanın iç sülfat etkisine karşı boy uzamalarını limitler dahilinde tutmayı başardığı görülmüştür.

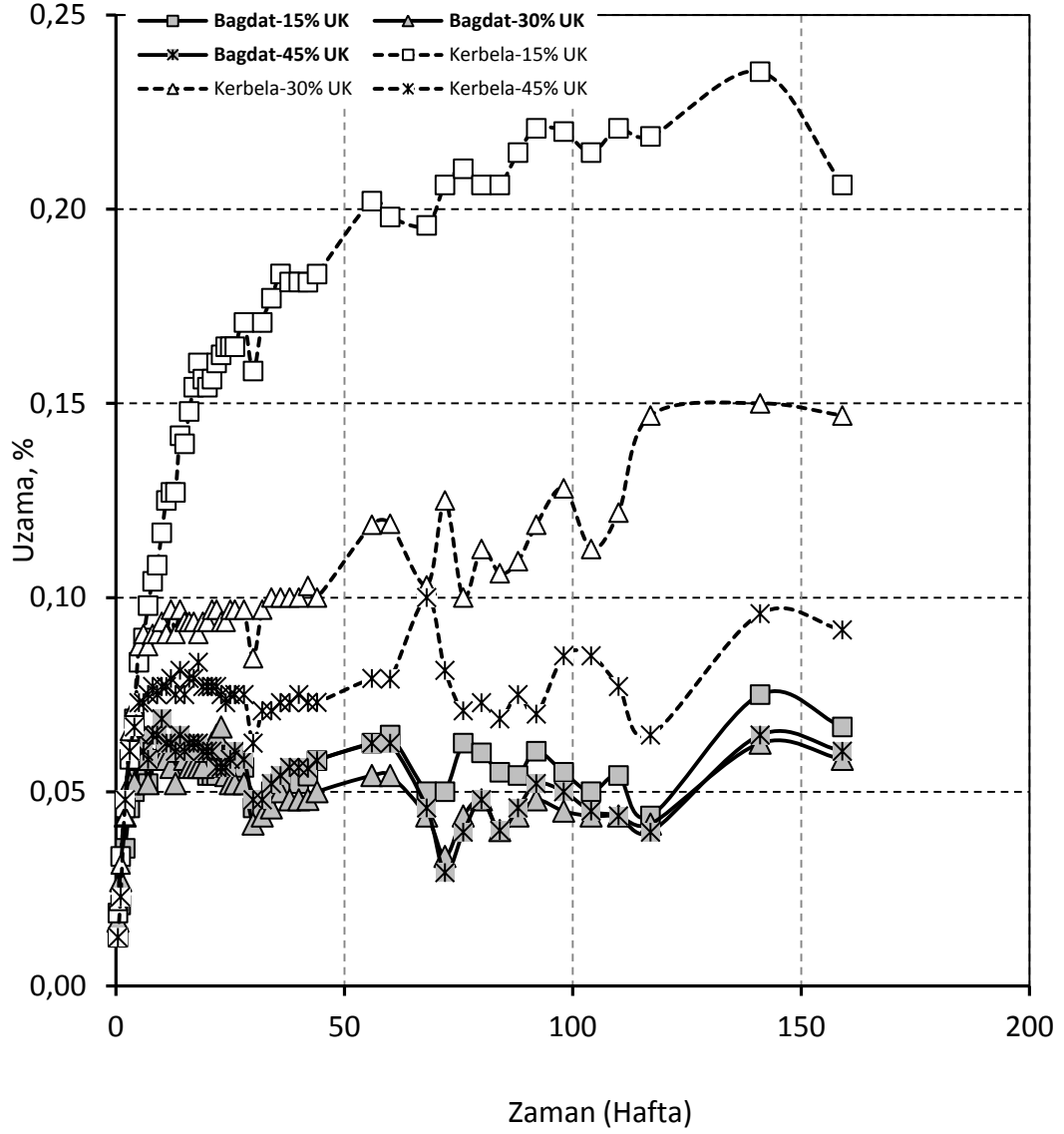


**Şekil 4.3 :** Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Nano Silika (NS) kullanılan numunelerin boy uzama oranları (numuneler su içinde muhafaza edilmişlerdir).

İç sülfat etkisinde mineral katkılardan %15, %30 ve %45 oranında uçucu kül numuneler incelendiğinde, bağdat kumu bu oranlarda sınırlar dahilinde performans sergilemiş ancak Kerbela kumunda yüksek sülfat direnci ancak %45 oranında uçucu kül kullanılarak sağlanabilmiştir.

Şekillerden de anlaşılacağı üzere, Kerbela kumunun Bağdat kumuna göre sülfat etkisinde çok fazla boy uzaması yapmasının sebebi, Kerbela kumunun içerdiği yüksek sülfat konsantrasyonu ve özgül ağırlığının Bağdat kumuna göre görece düşük olmasıdır.

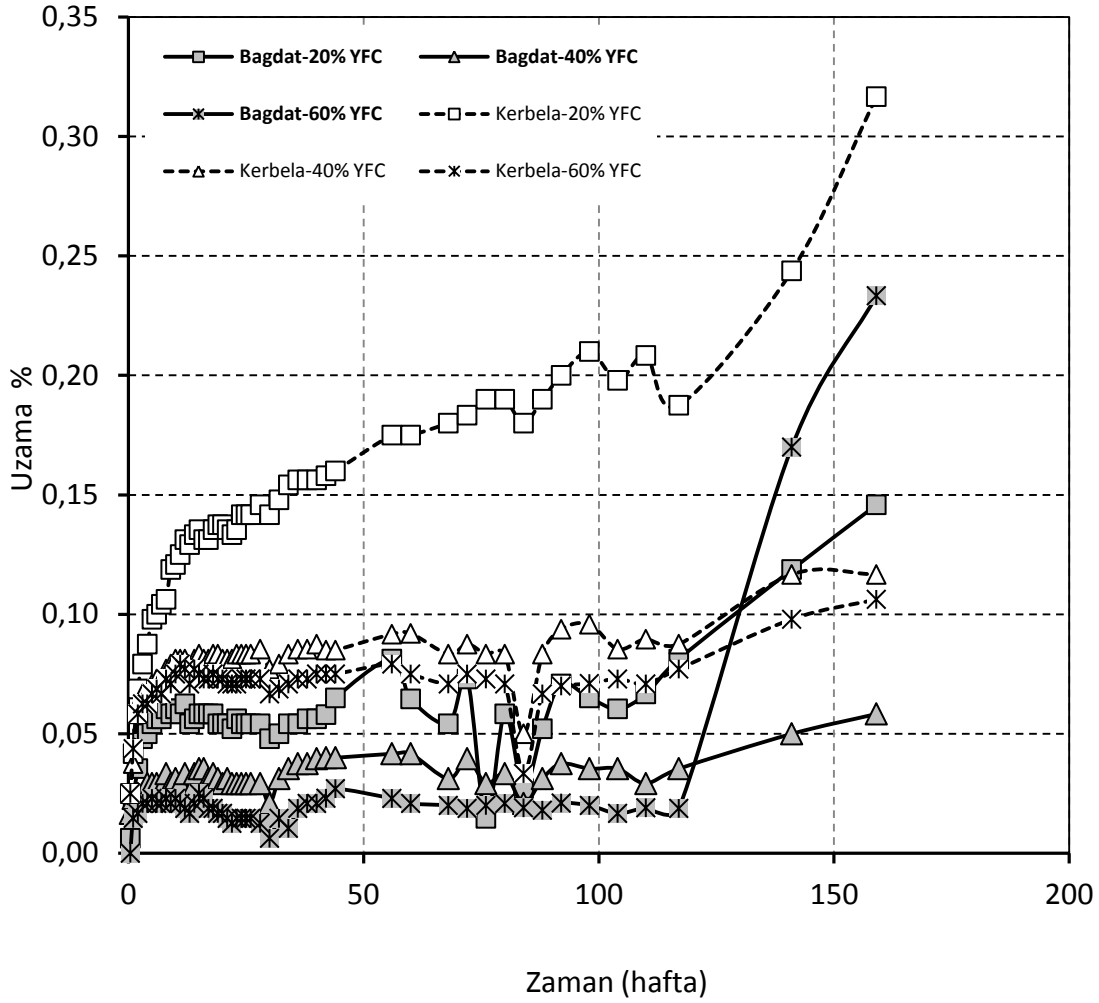




**Şekil 4.4 :** Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda Uçucu Kül (UK) kullanılan numunelerin boy uzama oranları (numuneler su içinde muhafaza edilmişlerdir).

Son olarak mineral katkılardan piyasada sıklıkla kullanılan yüksek fırın cürufunun %20, %40 ve %60 oranlarında kullanıldığında iç sülfat etkisine karşı performansı incelediğinde ancak Bağdat kumuyla üretilen ve %40 oranında yüksek fırın cürufu kullanıldığında limitler dahilinde bir performans sergilediği görülmüştür.

Bu durum şekil 4.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5 :** Bağdat ve Kerbela kumları ile birlikte değişik oranlarda yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılan numunelerin boy uzama oranları (numuneler su içinde muhafaza edilmişlerdir).

Dış sülfat etkisini araştırma amacıyla doğal sülfat içeriği az olduğu bilinen Sakarya kumu ile üretilmiş çeşitli oranlarda çeşitli mineral katkıları kullanılarak üretilmiş numuneler %5 sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Bu numunelerin uzama oranları periyodik olarak 160 hafta boyunca ölçülmüştür.

Ancak katkısız olarak üretilen referans numune 100. Haftada şiddetli bir biçimde dökülmeye başlamış ve nihayetinde 110. Haftada aldığı hasar nedeniyle artık ölçüm alınamaz duruma gelmiştir. Diğer numunelerde ölçüm alınmaya devam edilmiş ancak referans numune 100 haftadan sonraki süre boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

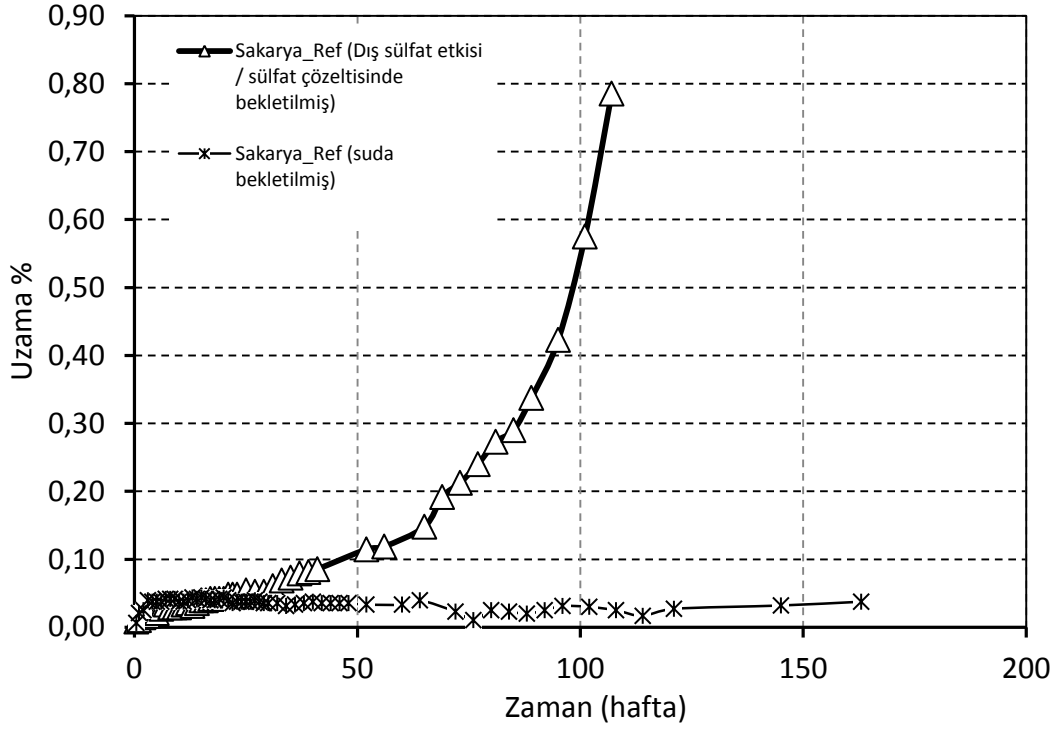


Şekil 4.6 : Dış sülfat etkisinde referans numunelerin 100. Haftaki durumu.



Şekil 4.7 : Dış sülfat etkisinde referans numunelerin 110. Haftaki durumu.

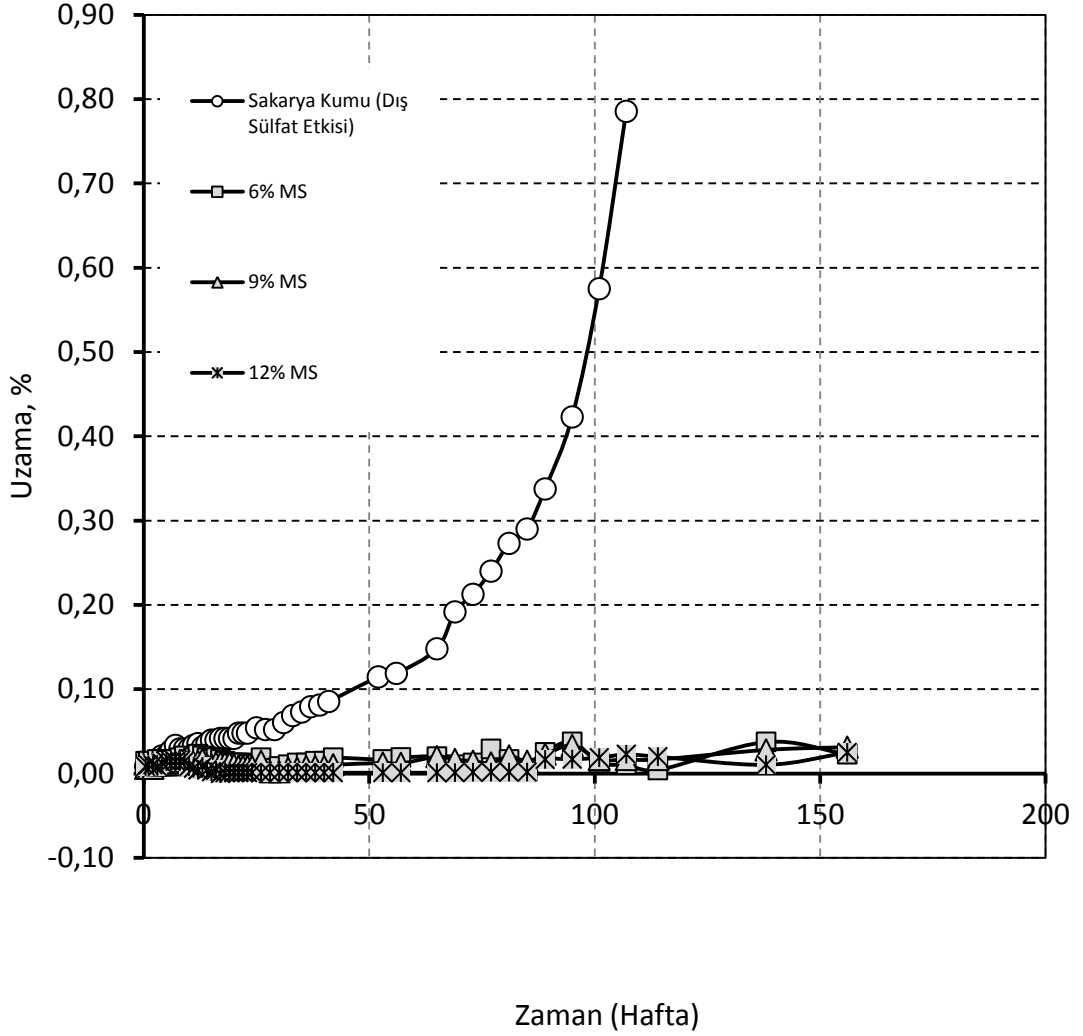
Şekil 4.8’de dış sülfat etkisine maruz kalmış ve suda bekletilmiş numunelerin boy uzama oranları görülebilir. Dikkat edileceği üzere, dış sülfat etkisine maruz kalan numuneler yaklaşık bir yıldan sonra kritik boy uzama değeri olan %0,1 değerini aşmıştır, o numuneler 110 haftadan sonra ise ölçüm alınamayacak kadar hasar görmüş durumdadır. Suda bekletilen numunenin ise üç yılı aşkın bir süre boyunca boy uzamasının sabit kaldığı görülmüştür.



**Şekil 4.8 :** Dış sülfat etkisindeki referans numunelerin zamanla uzama oranları.

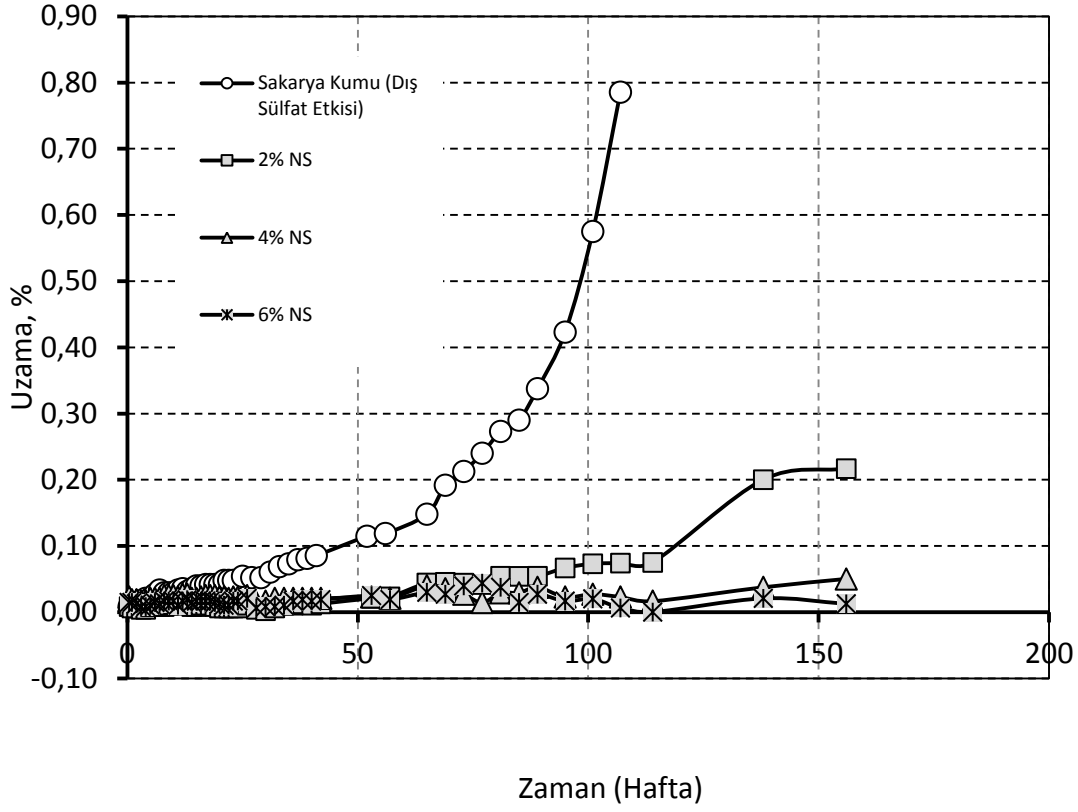
Dış sülfat etkisine karşı mineral katkılı harçların dirençlerinde katkıların kayda değer bir etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 9,10,11,12 ve mikro silika, nano silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının zamana karşı boy değişimleri gösterilmiştir. Boy değişimleri açısından bakıldığında %2 nano silika ve % 15 uçucu kül katkılı harçların 160 haftalık sürede yüzde 0,1 sınır değer kabul edilen uzama oranını aştığı ancak diğer tüm oranlarda bu sınırın altında kaldığı görülmektedir. %2 nano silika kullanımında boy değişimi % 0,22 mertebesinde, nano silika oranı %4’e çıkarıldığında ise nano silikanın etkisinin çok yüksek olduğunu ve boy değişim oranını %0,05 mertebelerine düşürdüğünü görmekteyiz.

Şüphesiz ki bu etkinin bu denli güçlü olmasının nedeni, nano silikanın çok yüksek yüzey alanına (area (>80000m<sup>2</sup>/kg) sahip olmasıyla açıklanabilir. Eğer sadece uzama oranlarını baz alırsak bu konuda en verimli katkının mikro silika olduğunu söylemek mümkündür.

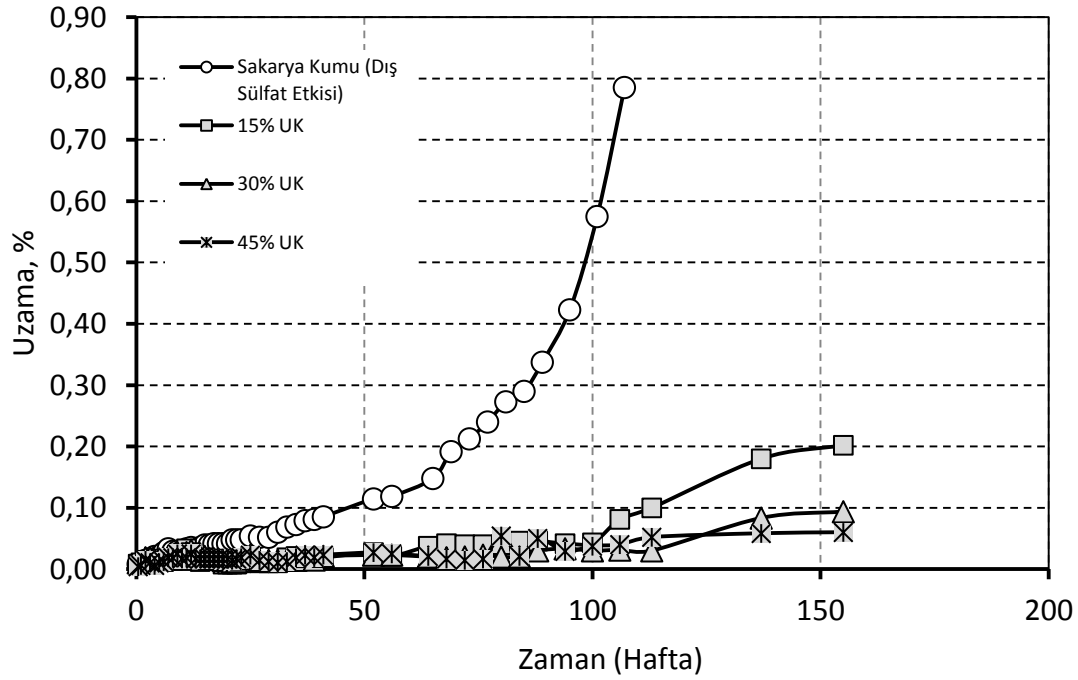


Şekil 4.9 : Dış sülfat etkisindeki mikro silika katkılı numunelerin zamanla uzama oranları.

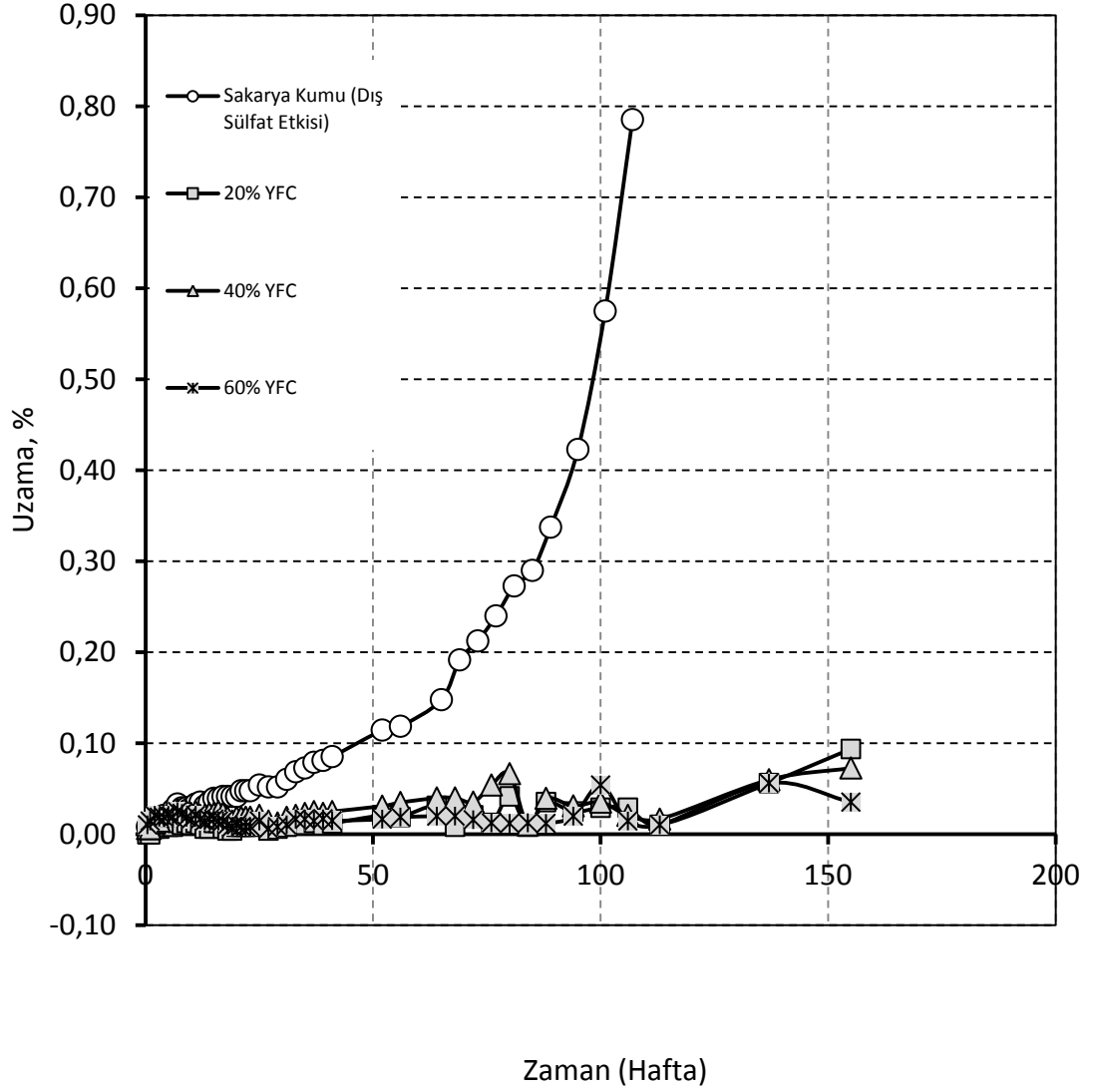
Uçucu kül katkılı numunelerde ise yüzde 15 oranının pratikte kullanılan oranın altında olduğunu belirtmek gerekir, zaten çalışmamızda kaydedilen değer, yüzde 15 uçucu kül oranının boy uzamaları açısından artırılması gereken bir değer olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.10 :** Dış sülfat etkisindeki nano silika katkılı numunelerin zamanla uzama oranları.



**Şekil 4.11 :** Dış sülfat etkisindeki uçucu kül katkılı numunelerin zamanla uzama oranları.



Şekil 4.12 : Dış sülfat etkisindeki yüksek fırın cürufu katkılı numunelerin zamanla uzama oranları.

#### 4.2 Dayanım Özellikleri

Suda ve sülfat çözeltisinde bekletilmiş referans numunelerin dayanım özelliklerine bakıldığında, dış sülfat etkisine maruz kalmış harçların 160 hafta sonunda basınç dayanımının % 38'ini, eğilme dayanımının ise % 66'sını yitirdiği görülmüştür.

Eğilme dayanımındaki aşırı kayıp numunelerde oluşan çatlaklar ve eğilmeye karşı aşırı hassasiyet oluşması nedeniyle açıklanabilir.

Sülfat çözeltisinde bekletilmiş numunelerin bünyelerinde alçı taşı kristallerinin oluşumu nedeniyle dayanımlarını önemli ölçüde yitirdikleri anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.1** : Sakarya kumu ile üretilen referans numunelerin dayanımları.

Numune	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Sakarya referans suda bekletilmiş	6,7	60,8
Sakarya referans sülfatta bekletilmiş	2,9	37,8

Sülfat çözeltisinde bekletilmiş mikro silika, nano silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı numuneleri dayanım özelliklerine bakıldığında da katkısız numunelere göre iyi bir performans gösterdiği görülebilir.

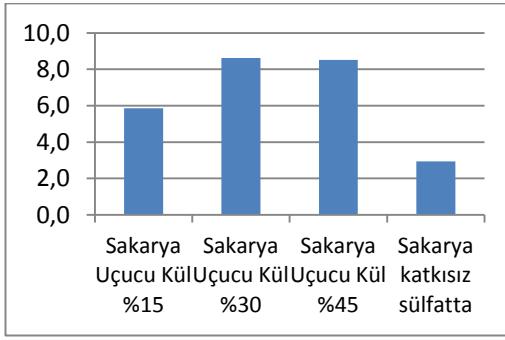
Suda bekletilen referans numunenin dayanımı baz alındığında sülfatta bekletilmiş tüm katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımı kaybı %13 mertebesindedir. Eğilme dayanımı açısından ise mikro silika ve yüksek fırın cürufu kullanımının eğilme dayanımını arttırdığı, nano silikanın ise harçlarda gevrekliği arttırması nedeniyle eğilme dayanımında kayba neden olduğu görülmektedir.

Uçucu kül katkısının eğilme dayanımına etkisi ise % 15 oranında kullanıldığında dayanım kaybı olduğu, %30 ve % 45 oranında kullanıldığında ise eğilme dayanımını koruduğu görülmektedir.

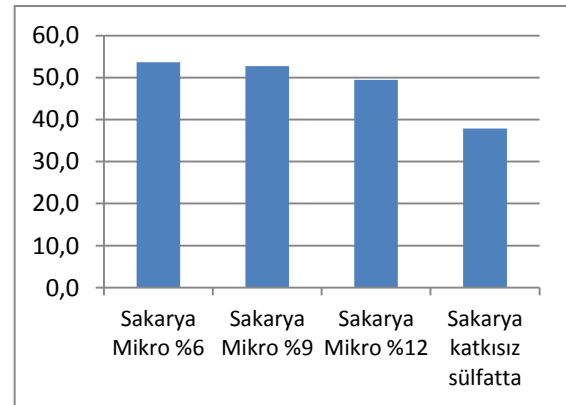
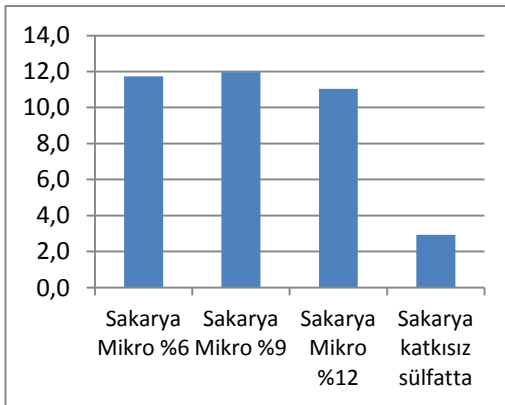
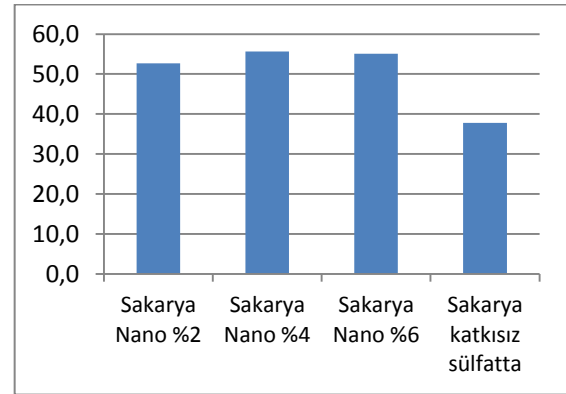
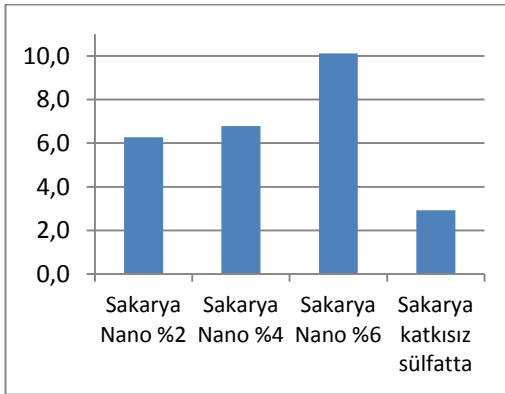
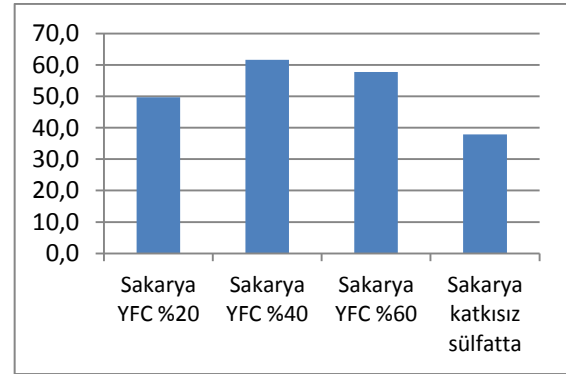
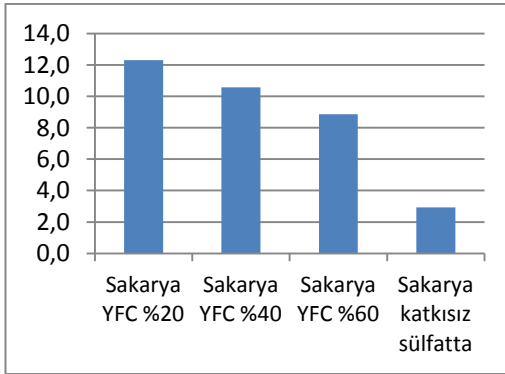
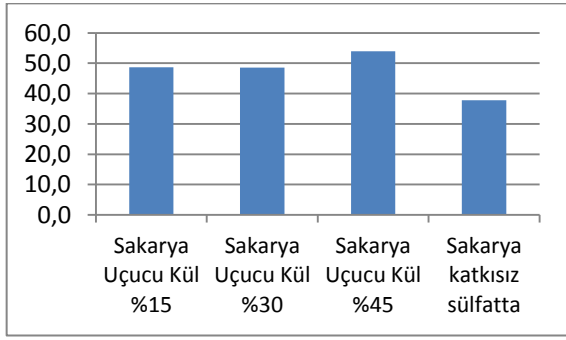
Şekil 4.13'te sülfat etkisine maruz karkılı ve katkısız harçların eğilme ve basınç dayanımları görülmektedir.



### Eğilme Dayanımları (MPa)



### Basınç Dayanımları (MPa)



Şekil 4.13 : Dış sülfat etkisindeki numunelerin eğilme (sol kolon) ve basınç (sağ kolon) dayanımları.

### **4.3 Ultrases Hızı Değişimleri**

Ultrases geçiş hızı ölçümleri 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelerde boyuna ses geçişi olacak şekilde yapılmıştır. Sülfat etkisinde, hasarın çoğunlukla dış yüzeyde meydana geldiği, numunenin iç kısımlarında sesin geçiş hızını etkileyecek önemli bir faktör oluşmadığı düşünülse de sonuçlar değerlendirildiğinde basınç dayanımlarına paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

160 hafta sonunda hasarlı olan dış sülfat etkisindeki katkısız numunenin ultrases geçiş hızı 4,03 km/sn olarak ölçülmüştür. Bu değer suda bekletilmiş hasarsız referans numunede 5,10 km/sn olarak ölçülmüştür ki bu durum ultrases geçiş hızının %21 azaldığını göstermektedir.

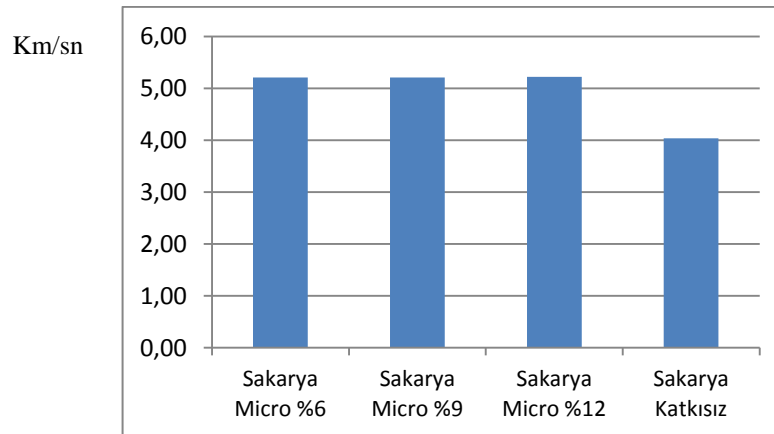
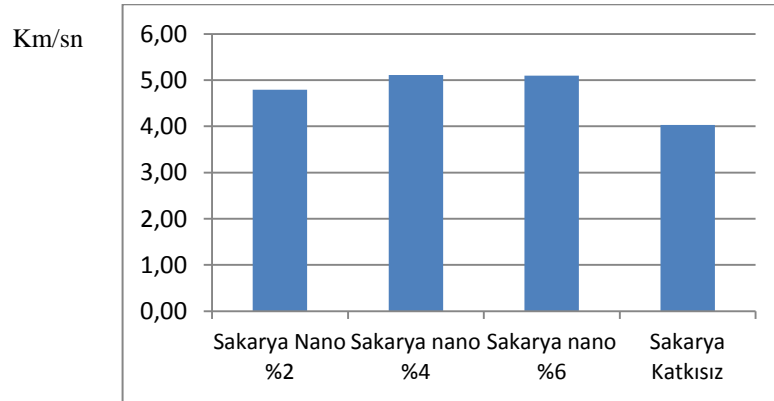
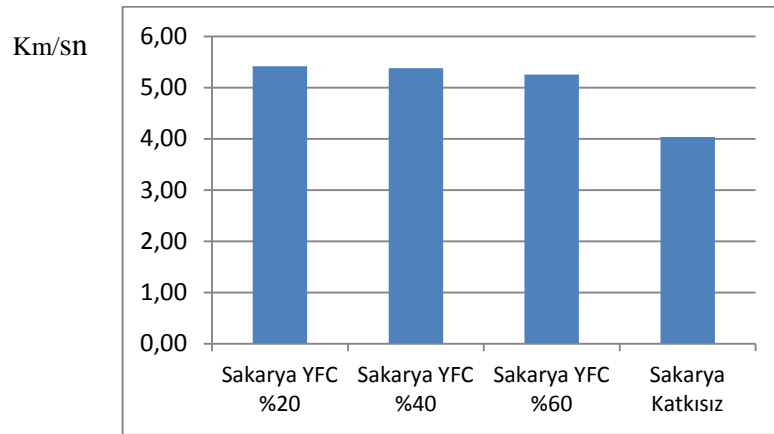
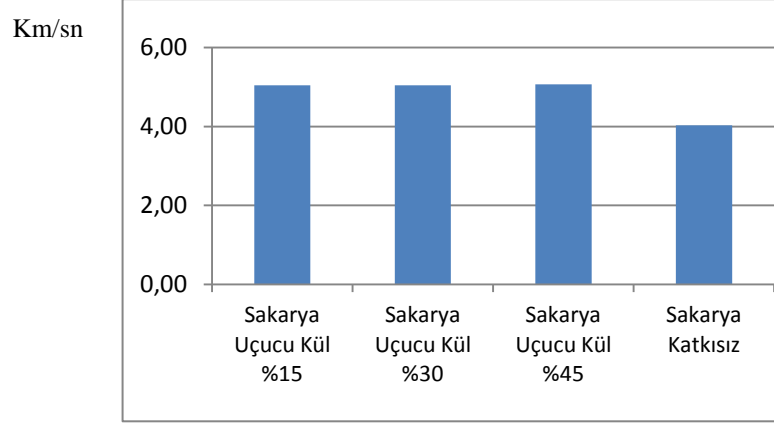
Öte yandan sülfat etkisine maruz kalmış mineral katkılı numunelerin, basınç dayanımında olduğu gibi ultrases geçiş hızı değerleri de referans numuneden yüksektir. Şekil 4.14'te dış sülfat etkisindeki numunelerin ölçüm değeri gösterilmiştir.

### **4.4 XRD (X-Ray Diffraction) Deneyi Sonuçları**

Sülfat etkisine maruz kalmış betonlarda etrenjit kristalinin oluştuğu bilinmektedir. Ancak giriş kısmında da belirtildiği üzere sülfat konsantrasyonu yüksek olduğunda etrenjitin oluşmadığı veya oluştuğunda stabilitesini koruyamadığı da yapılan araştırmalarda belirtilmiştir.

Yüksek yoğunluklu sülfat etkisine maruz harçların durabilitesini bozan yapı olarak alçı kristalleri oluşumu faktörlerden bir tanesidir.

Çalışmamızda dış sülfat etkisine maruz kalmış harçlardan her bir katkı için katkı oranı en az ve en çok olanları seçilmiş ve iç yapıda meydana gelen oluşumlar XRD yöntemiyle açıklanmaya çalışılmıştır.



**Şekil 4.14 :** Dış sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümleri.

Şekil 4.15’de söz konusu numunelere ait XRD sonuçları verilmiştir. Bu numunelerden hasarı en yüksek olan referans numunede dahi etrenjit oluşumu gözlenmemiştir ancak alçı taşı kristalleri hasarı meydana getiren en önemli yapı olarak karşımıza çıkmaktadır.

XRD sonuçlarında, puzolanik katkı olmayan referans numunedeki CH konsantrasyonu net bir şekilde görülmektedir. Puzolanik katkı bulunan numunelerdeki CH konsantrasyonu ise katkı oranı arttıkça konsantrasyon azalmaktadır veya kaybolmaktadır. Bu durum mineral katkıların CH ile tepkimeye girip C-S-H jelini oluşturması olarak açıklanabilir.

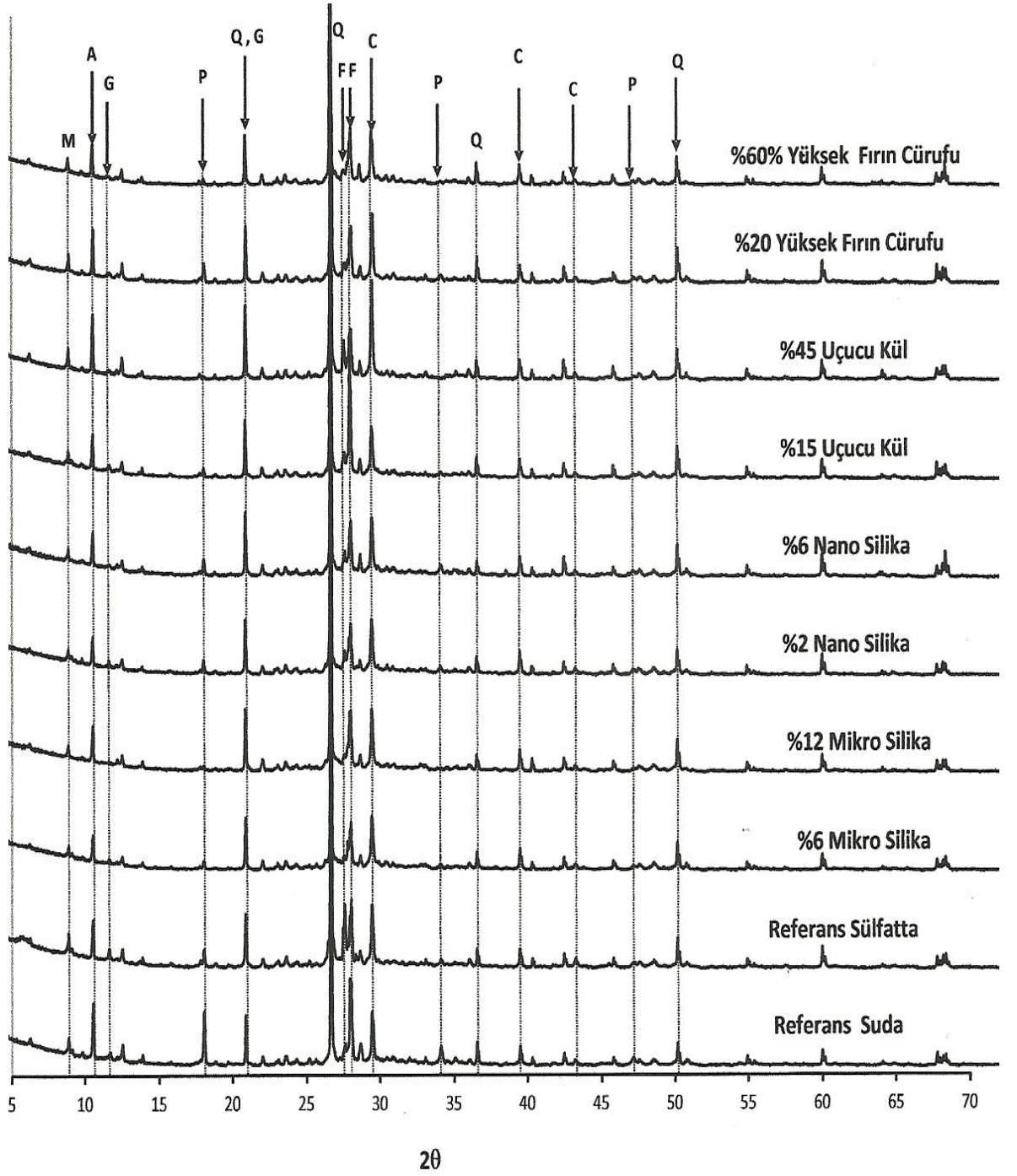
Öte yandan, katkısız numunedeki hasarın sebebi ise kalsiyumhidroksitin (CH) ortamdaki su (H) ve serbest sülfat iyonlarının ( $\bar{S}$ ) tepkimeye girip alçı kristallerini ( $C\bar{S}H_2$ ) oluşturması olarak açıklanabilir.

Bu çalışmada yer yer bahsedildiği üzere, sülfat etkisine maruz betonlarda hasar dış yüzeyden itibaren başlar ve çoğu kez betonun içlerine nüfuz edemeyebilir.

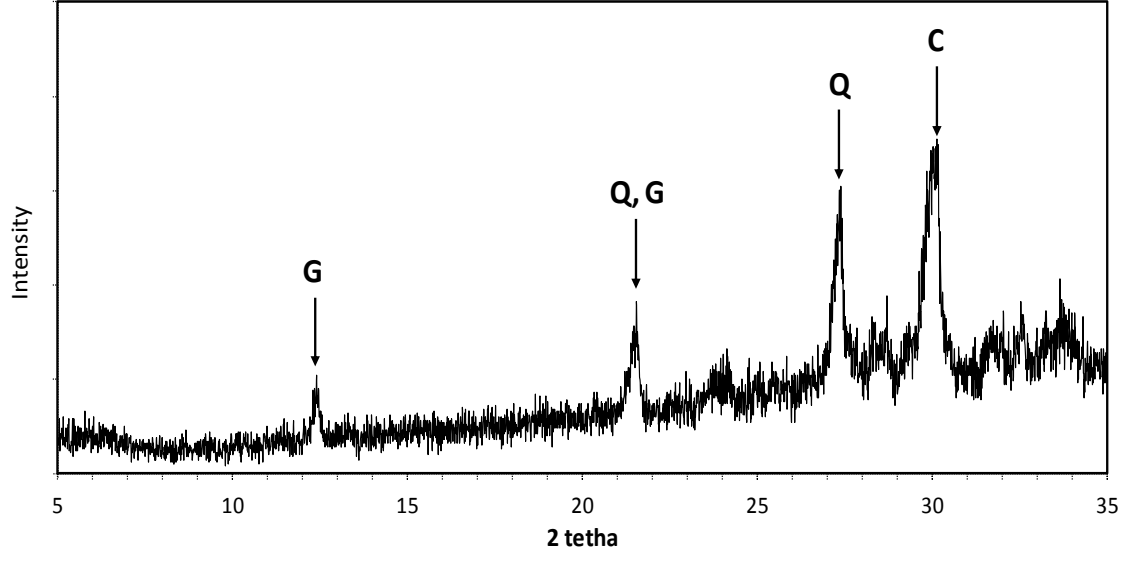
Şekil 4.15’te hasar görmüş referans numunedeki alçı oluşumu diğer numunelere kıyasla fark edilebilir. Ancak durumu daha iyi izah edebilmek adına çoğunluğu dış yüzeydeki dökülmeler olmak üzere yeni bir XRD çalışması daha yapılmıştır.

Durumu daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla tekrarlanan XRD deneyinde, ilk başta numunenin orta kısmından alınan parça yerine çoğunluğu dış yüzeydeki dökülmeler olmak üzere yeni bir XRD çalışması daha yapılmıştır.

Şekil 4.16’te daha net olarak görülecektir ki alçı kristallerinin dağılım oranı çok daha yüksektir.



**Şekil 4.15 :** Dış sülfat etkisindeki numunelerin XRD sonuçları (A: Amfibol, C: Kalsit, F: Feldispat, G: Alçı, M: Muskovit, P: Portlandit, Q: Kuvars).



**Şekil 4.16 :** Hasarlı kısımdan alınmış parçalarla yapılan XRD sonuçları.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında sülfat konsantrasyonu yüksek olan kumlarla üretilmiş harçlarda iç sülfat etkisi ve doğal sülfat konsantrasyonu düşük olan kumlarla üretilmiş harçlardaki dış sülfat etkisinin ve bu etkiye karşı mineral katkıların faydalarının araştırıldığı deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1- Kullanım oranlarına bağlı olarak mineral katkıların sülfat etkisinde boy uzamalarını önemli ölçüde azaltmaktadır.
- 2- Yaklaşık 160 haftalık deney sürecinde sadece uzama oranları dikkate alındığında kullanılan mineral katkıların içerisinde mikro silikanın faydası en yüksek katkı olduğu görülmüştür.
- 3- Zamana bağlı olarak katkı kullanılmayan ve dış sülfat etkisine maruz bırakılmış numunede yaklaşık 110 haftadan sonra ciddi hasar ve dökülmeler gözlemlenmiştir.
- 4- Çok düşük oranlarda arttırma yapıldığında yüksek yüzey alanı özelliği nedeniyle nano silikanın etkisi katlanarak artmaktadır.
- 5- 160 haftalık süre sonunda yapılan dayanım deneylerine göre dış sülfat etkisindeki numunenin suda bekleyen numuneye göre basınç dayanımı kaybı %38, eğilme dayanımı kaybı % 66 olarak bulunmuştur.
- 6- Pek çok standart ve teknik şartnamede geçtiği üzere uzama oranları %0,1'i geçtiğinde basınç dayanımının da azaldığı görülmüştür.
- 7- Sülfat etkisi reaksiyonlarının dış yüzeyde meydana gelmesi ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin numunelerin boyuna ortadan yapılması nedeniyle, mineral katkılı numunelerde sülfat etkisinde ultrases geçiş hızının önemli bir değişiklik göstermediği saptanmıştır.
- 8- Yapılan XRD deneyleri sonuçlarına göre, sülfat etkisinde hasarın sebebinin etrenjit kristali olmadığı görülmüştür.

9- XRD sonuçlarına göre, mineral katkılı numunelerde kalsiyum hidroksit (CH) piklerinin kaybolduğu ve mineral katkı kullanım oranı arttıkça azaldığı görölmüştür. Bunun nedeni, puzolanik reaksiyonlarla C-S-H jeline dönüşmesidir.

10- Ek yapılan XRD sonuçlarına göre, CH'in ortamdaki serbest sülfat iyonlarıyla tepkimeye girip alçı kristallerini oluşturduğu görölmüştür.



## KAYNAKLAR

- [1] **Skalny, J., Marchand, J., Odler, I.**, 2002. Sulfate Attact on Concrete. Modern Concrete Technology Series, sf. 43-45
- [2] **Erdoğdu, Ő., Karakaő, E.**, 2003. Sulfat İyonu Konsantrasyonu Düşük Ortamlara Maruz Betonun Durabilitesinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, *5. Ulusal Beton Kongresi*, sf. 555-565, İstanbul.
- [3] **Uygunoğlu, T., Yücel, K. T., Yurtçu, Ő.**, 2006. Betonun Zararlı Ortamlardaki Durumu: Yeraltı Suyu Etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, sf. 29-35.
- [4] **Taşdemir, M. A.**, (2002). Betonun Dayanım ve Dürabiliteye Göre Tasarım ve Üretimi, *İmo İstanbul Şubesi Sürekli Eğitim Seminerleri*, İstanbul
- [5] **Baradan B., Aydın S.**, 2013. Betonun Durabilitesi, *THBB 2013 Bildiriler*, İzmir
- [6] **Yazıcı H.**, (ty). Betonarme Yapılarda Dayanıklılık, *THBB Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık*, İzmir.
- [7] **Çimsa Çimento Araştırm ve Uygulama Merkezi** (ty). Betonda Dayanıklılık Sorunları ve Çözümleri – Çiçeklenme, Mersin
- [8] **Engin Y., Tarhan M.**, 2012. TS EN 197-1:2012 Standardı'ndaki Değişiklikler, İstanbul
- [9] **Dikme D.**, 2010. Doğal sulfat İçeriği Yüksek Olan Kumlarla Üretilen Harçlarda Sulfat Etkisinin İncelenmesi ve Mineral Katkıların Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Aruntaő H. Y.**, 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt No:21, No:1*, sf. 193-203, Ankara.
- [11] **Doğan Ü. A., Özkul H.**, 2009. Mineral Katkılı Betonlarda Bileşimin Basınç Dayanımı ve Geçirimsizliğe Etkisi, *İTÜ Dergisi/D Mühendislik, Cilt:8, Sayı:6*, sf. 121-132, İstanbul.
- [12] **Okyay Ö., Akkaya Y.**, 2011. Yüksek Dayanım ve Yüksek Performanslı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı, *Beton 2011 Hazır Beton Kongresi Bildirileri*, sf. 388-394, İstanbul.
- [13] **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
- [14] **Li G., Zhao X.**, 2003. Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag, Cement and Concrete Composites, V. 25, sf. 293-299.

- [15] **Topçu İ. B., Canbaz M.,** 2008. Silis Dumanının Betonda Mekanik Çatlak Oluşumlarına Etkisi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi C.XXI*, sf. 17-26, Eskişehir.
- [16] **Özbora A. A., Tarhan M., Engin Y.,** 2013. Nano Teknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri*, İstanbul.
- [17] **BS EN 197-1,** 2011. Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements.
- [18] **ASTM C1038,** 2014. Standart Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water.
- [19] **BS EN 12504-4,** 2004. Testing Concrete – Determination of Ultrasonic Pulse Velocity.
- [20] **TS EN 12390 – 5,** 2000. Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini.
- [21] **TS EN 12390 – 3,** 2003. Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini.
- [22] **Ouyang, C., Naani, A., Chang, W.F.,** 1988. Internal and external sources of sulfate ions in Portland cement mortar: Two types of chemical attack. *Cement and Concrete Research*, V.18, sf. 699-709.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Koray Mehmet ARSLAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Mersin 17.12.1985

**Adres:** Göktürk / İstanbul

**E-posta:** arslank@itu.edu.tr

**Lisans Üniversite:** İstanbul Teknik Üniversitesi