T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# SÜLFATLI SU İÇERİKLİ KUM ZEMİNLERDE PORTLAND ÇİMENTOSU VE SÜLFATA DAYANIKLI ÇİMENTO KULLANILARAK OLUŞTURULAN JET-GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜNE SÜLFATIN ETKİSİ

**Tuba Özge DEMİRAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak-2017**
**KONYA**
**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## SÜLFATLI SU İÇERİKLİ KUM ZEMİNLERDE PORTLAND ÇİMENTOSU VE SÜLFATA DAYANIKLI ÇİMENTO KULLANILARAK OLUŞTURULAN JET-GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜNE SÜLFATIN ETKİSİ

**Tuba Özge DEMİRAL**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç.Dr. Mustafa YILDIZ**
**2017, 108 Sayfa**

**Jüri**
**Doç.Dr. Mustafa YILDIZ**
**Prof.Dr. Özcan TAN**
**Yrd.Doç.Dr. İ. Hakkı ERKAN**

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grout yöntemi, zeminin taşıma kapasitesini artırmak, yeni ve mevcut temellerin oturmalarını azaltmak, açık kazı ve yer altı kazılarını desteklemek ve kum zeminlerin sıvılaşma potansiyelini azaltmak, vb. gibi mühendislik problemlerinin çözümünde bütün dünyada etkin olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile yüksek basınçlı çimento-su karışımı enjeksiyon malzemesi mevcut zemini parçalar ve zemin taneleri ile enjeksiyon malzemesi karışımından oluşan zemin içerikli beton kolonlar oluşturulur.

Sülfatlı ortamlarda oluşturulan jet-grout kolonları, sülfat içerikli zemin ve sülfatlı yeraltı suyu ile enjeksiyon malzemesinin karıştırılması ile oluşturulmakta ve uzun dönem performansları bilinmemektedir. Jet-grout kolonları birer zemin içerikli beton (soilcrete) kolonlar olduklarından dolayı bu kolonların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmeleri gerekmektedir. Aynı zamanda jet-grout kolonları zemin içerikli beton kolon olma özelliklerinden dolayı beton dayanımını etkileyen faktörlerden etkilenmektedir. Beton içerikli bu kolonların uzun süreli dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biri sülfattır. Sülfat etkisi, ortamdaki sülfat ile hidrate Portland Çimentosu harcındaki mineraller arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak betonun bozulması olarak tanımlanabilir. Sülfat, betonun zamanla bozularak dayanım kaybına uğramasına neden olmaktadır. Ancak saha koşullarında bu kolonların bozulma miktarlarını ve dayanım kayıplarını belirlemek oldukça zordur.

Literatürde yer alan birçok makale ve tez çalışmasında prizini tamamlamış normal koşullarda kür edilen beton elemanların daha sonra sülfatlı ortama maruz kalmaları durumunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar incelenmiş ve dayanım kayıpları araştırılmıştır. Zeminde oluşturulan jet-grout (soilcrete) kolonlar, eğer ortamda sülfat veya sülfatlı su varsa oluşturulmaları aşamasında ve kür koşulları da dâhil olmak üzere servis ömürleri boyunca sülfata maruz kalacaktır. Bu durumda sülfatın jet-grout (soilcrete) kolonlarında ne tür bir değişikliğe neden olacağı bilinmemektedir.

Bu tez kapsamında, laboratuvarda belirli bir rölatif sıkılıkta hazırlanmış kum zemine içinde normal musluk suyu ve Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nden getirilen sülfat içerikli yeraltı suyu ve 2 farklı tip Portland çimentosu kullanılarak jet-grout kolon numuneleri oluşturulmuştur. Her bir numune için kür süresinin sonunda (1 ay, 3 ay ve 6 ay) jet-grout kolonlar kalıplardan çıkarılmıştır ve kolonlardan alınan numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı testi, SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Zamana bağlı olarak sülfatın, oluşturulan bu kolonların taşıma gücü üzerindeki etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Jet-grout yöntemi, sülfat etkisi, Portland çimentosu, sülfata dayanıklı çimento, Konya II. Organize Sanayi Bölgesi.

# ABSTRACT

## MS THESIS

## THE EFFECT OF SULFATE ON THE BEARING CAPACITY OF JET-GROUT COLUMNS CONSTRUCTED BY USING PORTLAND CEMENT AND SULFATE RESISTING CEMENT THROUGH THE SAND SOILS CONTAINING SULFATED WATERS

**Tuba Özge DEMİRAL**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY**
**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY IN CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc.Prof.Dr. Mustafa YILDIZ**
**2017, 108 Pages**

**Jury**
**Advisor Danışmanın Unvanı Adı SOYADI**
**Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI**
**Diğer Üyenin Unvanı Adı SOYADI**

Jet-grouting, one of the ground treatment methods, is widely used all over the world. This method is used to solve lots of engineering problems such as increasing the bearing capacity of soils, reducing settlements of new and existing foundations, supporting open-cut and underground excavation and reducing the liquefaction potential of sandy soils, etc. With this method, high pressure cement grout breaks up the injected soil structure, and then soilcrete columns are formed as a result of soil grains and injected cement grout mixture.Jet-grout columns formed in sulphated environment are installed by mixing sulphated soil and sulphated ground water with cement grout, and their long-term performances are not known.

Since the jet-grouting columns are soilcrete columns, they should be capable of preserving their functions without any problem throughout their service lives. At the same time, soilcrete columns are also affected from the factors influencing the compressive strength and durability of concrete. One of the most important factors affecting the long-term durability of the concrete content of this column is sulphate. Sulphate attack can be defined as the deterioration of concrete as a result of physical-chemical interaction between the hydrated Portland cement mortar with the sulphate minerals in the environment. Sulfate induces the deterioration of concrete and the loss of compressive strength of concrete in time. However, the process for the determination of concrete deterioration amount and the loss in compressive strength is so difficult at the site.

Many thesis and articles can be seen in the literature in which concrete mortars were cured under normal conditions, and then the physical and chemical deteriorations and strength losses of these mortars were investigated after they were subjected to sulphated environment. If jet-grout columns are installed into sulphated environment such as sulphated soil and sulphated ground water, these columns will be subjected to sulphate during the curing time and also throughout the service life. In this case, as a result of sulphate attack, what kind of change occurs in the jet-grout columns is unknown.

Within the scope of this thesis, jet grout columns were installed in sandy soils have certain relative density and involving tap water and sulphated ground waters taken from Konya 2$^{nd}$ Organized Zone which were prepared in the laboratory. Jet-grout columns were prepared by using tap water and sulphated water and two kinds of Portland cement. For each column, at the end of each curing period (1 month, 3 months and 6 months), the jet-grout columns were removed from the molds, and the samples were taken from these columns for unconfined compressive strength test (UCS), SEM and XRD analyses.

The effect of sulfate on the bearing capacity loss of jet-grout columns was determined experimentally depending on time.

**Keywords:** Jet-grouting method, sulfate attack, Portland cement, sulfate resisting cement. Konya Second Organized Zone.

# ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince, benden her konuda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, tezin hazırlanması aşamasında ise göstermiş olduğu yoğun ilgi ve destekten dolayı danışmanım Sn. Doç. Dr. Mustafa YILDIZ'a ve tez çalışması sırasında bilgi paylaşımlarından dolayı Sn. Yrd. Doç. Dr. İ. Hakkı ERKAN ve Sn. Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı zamanda yüksek lisans eğitimim boyunca verdikleri destek ve yardımlarından dolayı Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Sn. Prof. Dr. Özcan TAN ve Sn. Doç. Dr. Murat OLGUN'a saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin laboratuvar çalışması kısmında bana yardımcı olan Sn. Sinan AKBAY, Sn. Arş. Gör. Murat SAYDAN ve Sn. Yüksel ÇİFTCİ'ye ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca gerek maddi ve gerek manevi olarak her zaman yanımda olan, beni her zaman cesaretlendiren ve bütün kahrımı çeken aileme gösterdikleri sevgi ve anlayıştan dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Tuba Özge DEMİRAL
KONYA-2017

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖNSÖZ** ..... **vii**

**İÇİNDEKİLER** ..... **viii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **ix**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **4**

**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **21**

3.1. Zemin İyileştirmesi ..... 21
3.1.1. Jet-Grout Yöntemi ..... 22
3.1.2. Jet-Grout Uygulama Yöntemleri ..... 25
3.1.3. Jet-Grout Yöntemini Etkileyen Parametreler ..... 29
3.1.4. Jet-Grout Yönteminin Uygulamadaki Yeri ..... 36
3.1.5. İmalat Esnasında ve Sonrasında Kalite Kontrol ..... 36
3.2. Sülfatın Beton Üzerindeki Etkisi ..... 39
3.2.1. Sülfat Etkisi Sonucu Oluşan Yeni Ürünler ..... 41
3.2.2. İç Sülfat Etkisi ..... 45
3.2.3. Dış Sülfat Etkisi ..... 46
3.2.4. Sülfat Etkisi Esnasında Meydana Gelen Kimyasal Reaksiyonlar ..... 47
3.2.5. Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler ..... 53
3.2.6. Sülfat İçerikli Suların Beton Üzerindeki Etkisini Belirlemede Kullanılan Deneyler ..... 55
3.3. Deneysel Çalışma ..... 58

**4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA** ..... **66**

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER** ..... **84**

5.1. Sonuçlar ..... 84
5.2. Öneriler ..... 90

**KAYNAKLAR** ..... **91**

**EKLER** ..... **94**

EK-1 Şekiller Tablosu Listesi ..... 94
EK-2 Tablolar Listesi ..... 97

**ÖZGEÇMİŞ** ..... **98**

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

| | | |
|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | : | Alümina |
| Al/Ca | : | Alüminyum/Kalsiyum |
| $CaCO_3$ | : | Kalsiyum Karbonat |
| $Ca_6[AlOH)_6]_2.(SO_4)_3.26(H_2O)$ | : | Etrenjit |
| $CaCO_3.CaSO_4.CaSiO_4.15H_2O$ | : | Tomasit |
| $CaSO_4.2H_2O$ | : | Alçıtaşı |
| $Ca_4[AlOH)_6]_2.(SO_4).6(H_2O)$ | : | Monosülfat |
| CaO | : | Kalsiyum Oksit |
| $C_3A$ | : | Trikalsiyum Alüminat, Alüminat |
| $C_4AF$ | : | Tetrakalsiyum Alüminoferrit, Ferrit |
| $C_2S$ | : | Dikalsiyum Silikat, Belit |
| $C_3S$ | : | Trikalsiyum Silikat, Alit |
| $C_u$ | : | Üniformluk Katsayısı |
| $C_c$ | : | Derecelenme Katsayısı |
| D | : | Çap |
| Dr | : | Rölatif Sıkılık |
| $e_{max}$ | : | Maksimum Boşluk Oranı |
| $e_{min}$ | : | Minimum Boşluk Oranı |
| e | : | Doğal Boşluk Oranı |
| $Fe_2O_3$ | : | Demir Oksit |
| Gs | : | Güvenlik Sayısı |
| L | : | Yükseklik |
| $Mg(OH)_2$ | : | Magnezyum Hidroksit (Brüsit) |
| NaCl | : | Sodyum Klorür |
| S/Ca | : | Silisyum/Kalsiyum |
| S/Ç | : | Su/Çimento Oranı |
| $SiO_2$ | : | Silisyum Dioksit, Silika |
| $SO_4^{-2}$ | : | Sülfat İyonu |
| $\gamma_s$ | : | Dane Birim Hacim Ağırlığı |

**Kısaltmalar**

| | |
|---|---|
| CSH | : Kalsiyum-Silika-Hidrate Jeli |
| E | : Etrenjit |
| EDS | : Elektron Dağılım Spektrometresi |
| GEO | : Gecikmiş Etrenjit Oluşumu |
| JG | : Jet-Grout |
| JET-1 | : Tek Akışkanlı Jet-Grout Sistemi |
| JET-2 | : Çift Akışkanlı Jet-Grout Sistemi |
| JET-3 | : Üç Akışkanlı Jet-Grout Sistemi |
| MSH | : Magnezyum-Silika-Hidrate |
| NMS | : Normal Musluk Suyu |
| NP | : Normal Portland Çimentosu |
| OSB | : Organize Sanayi Bölgesi |
| POAŞ | : Petrol Ofisi Anonim Şirketi |
| SDÇ | : Sülfata Dayanıklı Çimento |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskop |
| SYS | : Sülfat İçerikli Yeraltı Suyu |
| XRD | : X-Işını Difraktometresi |

# 1. GİRİŞ

Günümüzde, kentleşmedeki düzensizlikler mevcut yapı alanlarının hızla tükenmesine ve teknolojideki gelişmeler ile birlikte insan gereksinimlerindeki artış sanayi bölgelerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için her geçen gün yeni yapılaşma alanlarına ve sanayi bölgelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni yapılaşma alanları ve sanayi bölgeleri geoteknik açıdan incelendiğinde, bir kısmının geoteknik açıdan uygun olmayan temel zemininden oluştuğu, bir başka deyişle taşıma gücü açısından zayıf, oturma potansiyeli yüksek, tekrarlı yükler altında sıvılaşma potansiyeli yüksek, vb. olan zemin tabakalarından oluştuğu görülebilir. Ayrıca teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak, yüksek katlı binaların yapılması ile zemine aktarılan yükler artmakta ve bunun sonucunda zemin içinde meydana gelen gerilmelerde artış meydana gelmekte ve buna bağlı olarak yapının toplam oturma miktarı artmaktadır. Mevcut ya da yeni yapılaşma alanlarında inşa edilecek olan yapılardan dolayı, temel tabanında oluşan ve zemine aktarılan gerilmelerin, yapı servis ömrü boyunca, zemin tarafından taşıma gücü ve oturma kriterleri açısından güvenle taşınması istenir. Son yıllarda, taşıma gücü açısından yetersiz zeminlerin taşıma kapasitelerini artırmak; yapı yükleri altında zeminde meydana gelen toplam ve aşırı oturmaları azaltmak; deprem gibi dinamik yükler altında zeminde sıvılaşma potansiyeli varsa ortadan kaldırmak; temel kazısı esnasında zemin göçmesini önlemek (iksa sistemi); şev stabilitesini sağlamak; vb. için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grout yöntemi geoteknik tabanlı mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Jet-grout yöntemi, özel delgi ekipmanları kullanılarak, farklı su/çimento oranlarında hazırlanan enjeksiyon malzemesinin yüksek basınçla zemine enjekte edilmesi ve enjeksiyon esnasında yüksek basınçla mevcut zeminin ayrıştırılıp, enjeksiyon malzemesi ile zemin karıştırılarak zemin içerikli beton kolon oluşturulmasıdır. Jet-grout kolonları, birer zemin içerikli beton kolon (soilcrete) olma özelliklerinden dolayı, beton dayanımını etkileyen fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik faktörlerden etkilenmektedir. Jet-grout kolonlar, bu etkiler sebebiyle zamanla bozulabilir ve bunun sonucunda dayanım kaybına uğrayabilirler. Jet-grout kolonları, kolon dayanımı etkileyen bu faktörlere karşı, işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelidir. Beton içerikli bu kolonların uzun süreli dayanımını etkileyen en önemli

faktörlerden biri sülfattır. Eğer ortam zemininde veya yeraltı suyunda sülfat iyonları bulunuyorsa, jet-grout kolonlarda zamanla bozulmalar meydana gelecek ve dayanım kayıpları oluşacaktır.

Sülfatlı yeraltı suyu içerikli zeminler Orta Anadolu'da özellikle Konya ve Aksaray Bölgesi'nde yaygın şekilde bulunmaktadır. Bu tür zeminlerde çorak (sülfatlı) toprak yapısından dolayı tarım yapılamamakta, bu bölgeler sanayi gelişim alanı olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda bu bölgelerde, zeminin taşıma gücü düşük ve oturma potansiyeli fazla olduğundan dolayı, derin temel sistemi gerektiren ağır sanayi yapılarında, yapı yükleri kazıklar veya jet-grout kolonlar ile daha derindeki sağlam tabakalara aktarılmaktadır. Konya'da II. ve III. Organize Sanayi Bölgesi yukarıda belirtilen sülfatlı yeraltı suyu içerikli zeminler üzerine kurulmuştur. II. ve III. Organize Sanayi Bölgesi, yapısı itibariyle yumuşak kil ve ince kum zeminlerden meydana gelmekte olup, içerisinde bol miktarda jips bulunmaktadır. Yeraltı suyu zemin yüzeyinden itibaren 5-9 m derinlikte olup sülfat oranı yüksektir. Zemin, konsolide olmamış çok yumuşak ve oturma potansiyeli çok yüksek olan bir yapıdadır. Organize Sanayi Bölgeleri'nde oluşturulan jet-grout kolonları, sülfat içerikli zemin ve sülfatlı yeraltı suyu ile enjeksiyon malzemesinin karıştırılması ile oluşturulmakta ve bu kolonların uzun dönem performansları bilinmemektedir.

Sülfat etkisi, ortamdaki sülfat ile hidrate Portland çimentosu harcındaki mineraller arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak betonun bozulması olarak tanımlanabilir. Bu etkileşim sonucu ortamdaki sülfat kaynağına bağlı olarak, betonda hacim artışına neden olan, alçıtaşı, etrenjit, tomasit, brüsit, vb. gibi yeni ürünler meydana gelmektedir. Betondaki bozulma mekanizması, sülfat katyon tipi, sülfat konsantrasyonu, kullanılan çimento bileşenleri, ortam koşulları, vb. faktörlere bağlı olarak gerçekleşmektedir ve zaman içerisinde beton dayanımında kayıplar meydana gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı, laboratuvar ortamında plastik variller içerisine belirli bir sıkılıkta yerleştirilen kum zemin içerisinde küçük ölçekli jet-grout kolonları imal edilerek bu kolonlar üzerindeki sülfat etkisini araştırmaktır. Kolonların bulunduğu ortamın, saha koşullarına uygun olması için varil içinde hazırlanan kum zemin Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nden getirilen sülfat içerikli yeraltı suyu ile doygun hale getirilmiştir. Oluşturulan jet-grout kolonlar 1 ay, 3 ay ve 6 ay kür süreleri boyunca sülfata maruz bırakılmıştır ve kür süreleri sonunda varillerden çıkarılan jet-grout kolonlarından alınan karotlar üzerinde yapılan serbest basınç testleri ile bu jet-grout

kolonlarının dayanımları uzun dönemde incelenmiştir. Ayrıca jet-grout kolonlarındaki sülfat etki mekanizmasını belirlemek için morfolojik yapı analizleri yapılmıştır. Deney ve analiz sonuçları değerlendirilerek jet-grout kolon dayanımı üzerindeki sülfat etkisi belirlenmiştir.

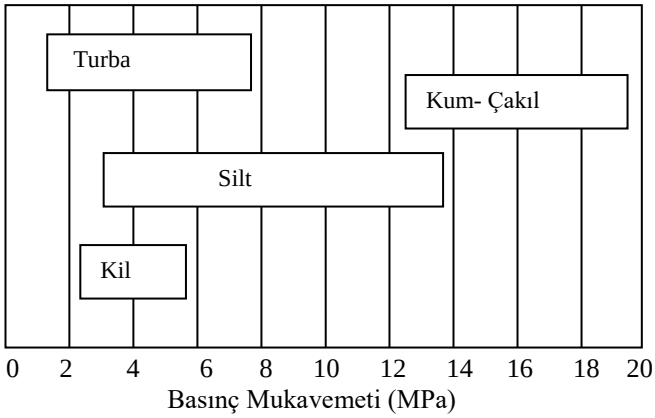
Bu tez çalışması temel olarak beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tez çalışmasının amacı ve kapsamı ile ilgili genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, jet-grout yöntemi ve sülfat etki mekanizması ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde jet-grout yöntemi, uygulamada kullanılan jet-grout sistemleri, jet-grout parametreleri, jet-grout yönteminin kullanıldığı yerler, imalat aşamasında kullanılan ekipmanlar, jet-grout yönteminin avantaj ve dezavantajları, imalat sonrasında yapılan kontroller, vb. kısımlar ele alınarak anlatılmıştır. Bu bölümün devamında sülfat etki mekanizması detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Akabinde ise deney programı ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde laboratuvar deney sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde deney sonuçları ve öneriler maddeler halinde özetlenmiştir.

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yıllarda mühendislik yapı temellerinin tasarımında ve temel zemininin iyileştirilmesi amacıyla zemin içerisinde jet-grout (JG) kolonu teşkil edilmektedir. Jet-grout yöntemi uygulanarak zeminlerin taşıma gücü, elastisite modülü ve sıvılaşmaya karşı direnci artmakta, oturma ve geçirimlilik değerleri ise azalmaktadır. Jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi, özel ekipmanlar kullanılarak belirli derinliğe indirilen tijin ucunda bulunan nozullarda yüksek basınçla enjekte edilen çimento enjeksiyonunun zemini parçalaması ve karıştırması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile zeminde, zemin içerikli beton kolonlar (soilcrete) oluşturulmaktadır. Jet-grout kolonlar, soilcrete olma özelliklerinden dolayı, sülfat içerikli zemin ya da sülfat içerikli yer altı suyunun bulunduğu ortamda oluşturulması durumunda, bu kolonların uzun dönem performansları bilinmemektedir. Sülfat etkisi üzerinde 60 yıldan fazla süredir çalışmalar yapılmasına rağmen, etki mekanizmasının karmaşıklığından dolayı mekanizmanın bazı detayları hala bilinmemekte ve sülfat etkisine bağlı beton bozulmaları hala meydana gelmektedir. Dahası beton durabilitesini artırmak için kullanılan ilave ve yeni çimentolaşma malzemelerinin kullanımı bu mekanizmayı daha karmaşık hale getirmektedir (Xu ve ark., 1998). Etkinin karmaşıklığı, bu mekanizmayla ilgili sayısız çalışmanın yapılmasına neden olmuştur.

Bu bölümde, jet-grout kolonların tasarımı, uygulama yöntemleri ve kullanıldığı yerler ile ilgili literatürde yer alan çalışmaların bir kısmı özet olarak verilmiştir. Ek olarak, jet-grout kolonların sülfata maruz kalması durumunda etki mekanizmasını değerlendirmek için, sülfat etki mekanizmasıyla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara da yer verilmiştir.

**(Lunardi, 1997)** tarafından yapılan çalışmada jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirmesinde kullanılan makinalar, uygulama türleri ve parametreleri, çalışma prensipleri, elde edilen kolon çapları hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Bu çalışmada yer alan, jet-grout yönteminin farklı zemin tiplerinde uygulanabilirliği ve tasarım parametreleri Şekil 2.1 ve Tablo 2.1'de verilmiştir. Ayrıca yapım aşamasındaki kontroller, en son gelişmeler ve jet-grout yönteminin uygulandığı istinat duvarı, şev stabilitesi, temeller, tüneller, hidrolik çalışmalar gibi inşaat ve çevre mühendisliği çalışmalarına ait bazı vaka analizlerine yer verilmiştir.




**Şekil 2.1.** Jet-grout yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin basınç dayanımları (Lunardi, 1997)

**Tablo 2.1.** Jet-grout yönteminin uygulama parametreleri(Lunardi, 1997)

| Sistem | Akışkan | Basınç (bar) | Nozul Sayısı ve Çapı | Çıkış Hızı (cm/dk) | Dönme Hızı (rpm) | Su/Çimento Oranı | Boşaltma (l/dk) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Akışkanlı | Çimento | 400-550 | 1-2 x 2-5 | 15-100 | 5-15 | 1.0-1.5 | 70-600 |
| Çift Akışkanlı | Çimento | 400-550 | 1-2 x 2-5 | 10-30 | 4-8 | 1.0-1.5 | 70-600 |
| | Hava | 10-12 | - | 10-30 | - | - | 4,000-10,000 |
| Üç Akışkanlı | Çimento | 50-100 | 1-2 x 4-5 | 6-15 | 4-8 | 1.2-1.5 | 80-200 |
| | Hava | 10-12 | | 6-15 | - | - | 4,000-10,000 |
| | Su | 400-500 | 1-2 x 2-3 | 6-15 | - | - | 40-100 |

**(Durgunoğlu ve ark., 1998)** tarafından yapılan çalışmada, Migros/Ankara (GİMAT) Hipermarket ve Alışveriş Merkezi inşaat sahasının jet-grout yöntemiyle zemin iyileştirmesi yer almaktadır. Bölge zeminin arazi ve laboratuvar deneyleri ile modellenmesi sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve jet-grout yöntemi ile ilgili olarak uygulama türü, parametreleri (Tablo 2.2), ekipman ve çalışma düzenleri alınmıştır.

**Tablo 2.2.** Jet-grout kolon uygulama parametreleri (Durgunoğlu ve ark., 1998)

| | | |
|---|---|---|
| Enjeksiyon Basıncı | bar | 500 |
| Nozul Sayısı | adet | 2 |
| Nozul Çapı | mm | 2.4 |
| Tij Dönme Hızı | RPM | 24 |
| Tij Çekme Hızı | cm/dk | 34 |

Yapı yüklerinin ($q_t$=110 kPa) fazla olması nedeniyle temel zeminin yapacağı aşırı oturmaları (s=22.5 cm) azaltmak için düşük maliyet ve hızlı imalat avantajları nedeniyle jet-grout kolon ile iyileştirme yöntemi tercih edilmiştir. Jet-grout yöntemi olarak, tek akışkanlı jet-grout yöntemi- monojet uygulanmıştır ve çapı (D)=80 cm ve

boyu (H)= 14 m olan toplam 2,233 adet kolon imal edilmiştir. Uygulamanın kalite kontrolü için, kolon çapları, uygulama sonrası deneme kazısı yapılarak yerinde ölçülmüş ve jet-grout kolonlardan alınan karot örnekler üzerinde basınç dayanım testleri yapılmıştır. Jet-grout kolonların taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için bir seri yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu uygulamada jet-grout kolonlar ekonomik yönden ve uygulama hızı bakımından istenilen sonuçları verdiği ve jet-grout kolonların her tip zemin için uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Yapılan kalite kontrol deneyleriyle, bu yöntem teknik yönden incelenmiş olup, elde edilen sonuçların son derece olumlu olduğu belirtilmiştir.

**(Sağlamer ve ark., 2001)** yaptıkları çalışmada Türkiye'de yakın zamanda uygulanan jet-grout uygulamalarından örnekler vermişlerdir. Ayrıca jet-grout kolonların uygulamasında kullanılan jet-grout tipleri, detayları, enjeksiyon basınçlarını, nozul sayısı ve boyutunu, dönme ve çekme hızlarını da sunmuşlardır. Yapılan araştırmalardan saha uygulamalarında jet-grout kolonların kullanım amacının, zemindeki oturmaları azaltmak ve sıvılaşma riskini azaltmak olduğunu belirtmişlerdir.

Deprem gibi tekrarlı yükler etkisi ile suya doygun gevşek kumlu ve siltli zeminlerde aşırı boşluk suyu basıncında hızlı bir artış meydana gelir. Meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı, zeminin başlangıç efektif gerilme değerine eşit olduğunda zeminde mukavemet kaybının meydana gelir ve zemin bir sıvı gibi davranmaya başlar. Bu olay sıvılaşma olarak tanımlanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılabilmektedir.

Saha uygulamalarında jet-grout kolonlar kum zeminlerde sıvılaşma potansiyelini azaltmak için kullanılmaktadır ve rölatif sıkılık sıvılaşma potansiyelini etkileyen faktörlerden biridir. Sıvılaşma potansiyeli ile rölatif sıkılık arasındaki ilişki Tablo 2.3'te verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Rölatif sıkılık ve boşluk oranı kriterleri (Seed ve Idriss, 1971)

| **Max Yüzey İvmesi** | **Sıvılaşma Potansiyeli** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Çok Yüksek** | **Yüksek** | **Orta** | **Düşük** |
| 0.10 g | Dr<17 (%) | 17 (%)≤Dr≤33 (%) | 33 (%)≤Dr≤54 (%) | Dr>54 (%) |
| 0.15 g | Dr<22 (%) | 22 (%)≤Dr≤48 (%) | 48 (%)≤Dr≤73 (%) | Dr>73 (%) |
| 0.20 g | Dr<28 (%) | 28 (%)≤Dr≤60 (%) | 60 (%)≤Dr≤85 (%) | Dr>85 (%) |
| 0.25 g | Dr<37 (%) | 37 (%)≤Dr≤70 (%) | 70 (%)≤Dr≤92 (%) | Dr>92 (%) |

**(Durgunoğlu ve ark., 2002)** tarafından yapılan çalışmada İzmir/Tire Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilen sigara fabrikası sahasının sıvılaşma riskine karşı jet-grout yöntemiyle zemin ıslahına ait bir vaka analizi sunulmuştur. Bölgenin konumu, jeolojisi ve 1.derece deprem bölgesi içinde yer alan bölgeye yapılacak tesis hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Yapılan zemin etütleri incelemesi sonucunda, projede fabrika temelleri için kazıklı temel, diğer hafif yapı temelleri için ise jet-grout kolonlar önerildiği belirtilmiştir. Alüvyon tabakaların sıvılaşma riskine (Gs=0.4) karşı jet-grout kolon uygulaması yapılması önerilmiştir. Çalışmada yapılan jet-grout kolonlardan karot alınması, deneme kazısı ile çap kontrolü, yükleme deneyleri, jet-grout kolonlardan alınan numuneler üzerinde mukavemet deneyleri gibi kalite kontrol deneylerine ait sonuçlara yer verilmiştir. Jet-grout yöntemine teknik parametreleri belirlemek için özel deneme bölgesi testlerinden çift akışkanlı jet-grout yöntemi (Jet-2) ile oluşturulan kolonların tek akışkanlı jet-grout yöntemiyle (Jet-1) oluşturulan kolonlara göre daha heterojen olduğu ve kolon çaplarının daha büyük olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Aynı zamanda Jet-1 yöntemi ile oluşturulan kolonlarının dayanımının Jet-2 yöntemiyle oluşturulan kolonların dayanımına oranla daha yüksek dayanıma sahip olduğu ve benzer koşullardaki yükleme deneylerinde daha az oturmalar elde edildiği belirtilmiştir. Sıvılaşma riskini azaltmanın projenin asıl amacı olduğu için daha büyük çaplı kolon oluşturmaya olanak sağlayan saha için uygun yöntem olarak seçilen Jet-2 yöntemi kullanılarak gerekli yer değiştirme oranının sağlanacağı belirtilmiştir.

**(Düzceer ve Gökalp, 2003)** yaptıkları çalışmada POAS Depolama Tesisinin (Antalya) ve Aliağa Doğalgaz Yakıtlı Santralin jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi yer almaktadır. POAS Depolama Tesisi ve Aliağa Doğalgaz Yakıtlı Santralinin bulunduğu bölge için yapılan oturma ve sıvılaşma analizlerinden, her iki bölge için meydana gelecek oturmaların sınır değeri aştığı ve ayrıca POAS Depolama Tesisi tank sahasında bulunan 3 m kalınlığında bir gevşek kum tabakasının sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu belirtilmiştir. Bu problemlerin çözümü için, POAS Depolama Tesisinde çapı 800 mm ve efektif boyu 30 m, toplam 3,127 adet kolon ve Aliağa Doğalgaz Yakıtlı Santralinde çapı 600 mm, efektif boyu 12 m olan 6,498 adet kolon yapılmıştır. Her iki sahada da yapılan deneme kolonlarının değerlendirilmesi ile jet-grout kolonları Jet-1 sistemi seçilerek imal edilmiştir. Kalite kontrolü için deneme kazısı, kolonların bütünlük testi, çekme testi ve jet-grout kolonlardan alınan karot numuneler üzerinde serbest basınç testi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda iki önemli husus yer almaktadır.

- Önceden yapılan deneme kolonları, kullanılacak ekipmanların etkinliğinin değerlendirilmesine, uygun ve optimum enjeksiyon parametrelerin seçimine yardım etmektedir.
- Düzgün bir şekilde planlanan ve gerçekleştirilen kalite kontrol programı, potansiyel problemlerin erkenden belirlenmesine ve bu problemlerin çözümü için gerekli düzenleme ve/veya değişikliklerin yapılması için yükleniciye izin verilmesine olanak sağlamaktadır.

Kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelini azaltmak ve yumuşak killerde deformasyon problemlerinin çözümünde jet-grout zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanıldığı **(Durgunoğlu ve ark., 2004)** tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışmada İzmit Körfezi'nin güney kıyısındaki Karamürsel'de yer alan, zemini jet-grout kolonlarla iyileştirilmiş İpekkâğıt Fabrikası'nın performansı incelenmiştir. Belirtilen saha, ana fay hattının sadece 4 km güneyinde yer almaktadır. Bu sahanın zemin profili üste 3 m kalınlığında sert kil tabakası, altında ise bir seri gevşek ve orta sıkı kum ve silt tabakalarından oluşmaktadır. 9 m'nin altında ise araştırma derinliği olan 32 m'nin aşağı kısımlarına da yayılan bir orta sert ve sert kil tabakaları mevcuttur. Yeraltı su seviyesi 1.5-2.0 m derinliktedir. Bölgedeki önceki sismik olaylar göz önüne alınarak oluşturulan jet-grout kolonlar, kil zeminde statik ve deprem yükü altında meydana gelen oturmaları azaltmak, kum ve silt zeminde sıvılaşmayı ortadan kaldırmak için oluşturulmuştur. Fabrika bünyesinde bir depolama binası, iki su tankı ve bir kâğıt makinası binasının temel sistemleri ve temel altında oluşturulan jet-grout kolon boyutları Tablo 2.4'te yer almaktadır.

**Tablo 2.4**. Bina temel sistemleri ve jet-grout kolon boyutları (Durgunoğlu ve ark., 2004)

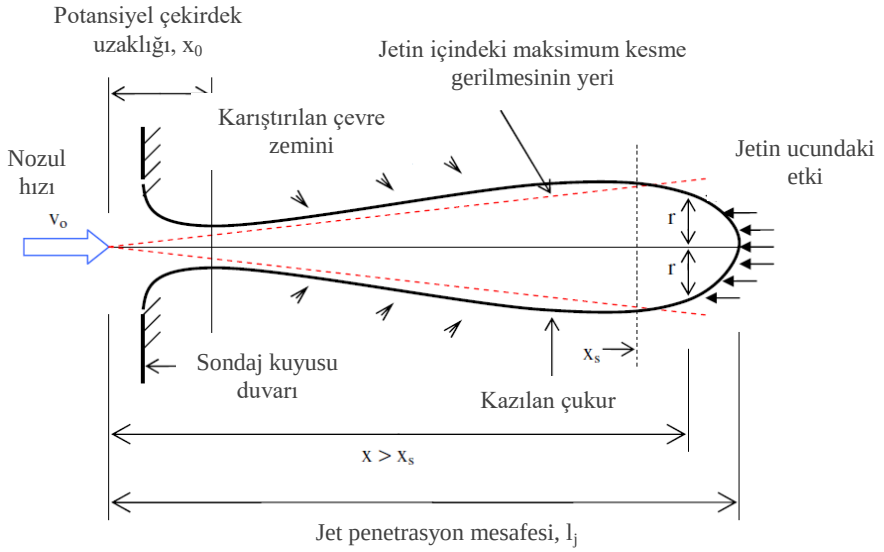
| Bina Tipi | Temel Sistemi | Jet-Grout Kolon boyutları |
|---|---|---|
| Kağıt Makinası Binası | Radye Temel | L=12 m, D=0.6 m, 1.2-2.4 m ara mesafeli dikdörtgen grid form, P=600 kN |
| Su Tankları | Radye Temel | L=10.5 m, D=0.6 m, 2.0 m ara mesafeli kare grid form, P= 700kN |
| Depolama Binası | 4 m Genişliğinde Şerit Temeller | L=8.0 m, D=0.6 m, 1.2-2.4 m ara mesafeli, P= 450 kN |

Kullanılacak olan jet-grout kolon parametreleri önceden yapılan deneme kolonları ve kalibrasyon testleri ile belirlenmiş olup nozul çapı 2.0 mm, su/çimento oranı 1:1, çekme hızı 55 cm/dk, dönme hızı 21 devir/dk olarak verilmiştir. Yazarlar deprem sonrası, saha ve yakındaki yapıların başlıca zemin iyileştirme etkisi odaklı

geoteknik saha performansını belgelemek için iyileştirilmiş bölgeyi araştırmıştır. Gözlemler sonucunda sadece zemin iyileştirmesi yapılmamış eski bir yapının hafif yapısal hasar gördüğünü ve jet-grout yöntemiyle zemin iyileştirmenin depremle ilgili hasarı ortadan kaldırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

**(Modoni ve ark., 2006)** tarafından yapılan çalışmada jet grout kolonların teorik olarak modellenmesi araştırılmıştır. Bunun için önceki deneysel çalışmalar değerlendirilerek değişik zemin tipleri için farklı olası jet-zemin etkileşim yöntemleri geliştirilmiştir. Çalışmada, farklı zemin tipleri için elde edilen teorik sonuçlar, mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmıştır ve geriye dönük çözümleme analizi yardımıyla yöntemler kalibre edilmiştir.

Jet-grout yöntemini tanımlamak için **(Ho, 2007)** tarafından, jet hidrodinamiğinin ve zemin mekaniğinin ana kabullerinin kullanıldığı matematiksel bir model önerilmiştir. Önerilen bu modelde püskürtme jeti içindeki hız dağılımı Şekil 2.2'de yer almaktadır. Jetin zemine penetrasyon mesafesinin, nozul çapı ve nozul boyunca basınç farkının zemin direncine oranı tarafından kontrol edildiği bulunmuştur. Matematiksel model ile deneme kolonlarından elde edilen veriler karşılaştırıldığında, bu modelin ince taneli zeminler için daha uygun olduğu önerilmiştir.

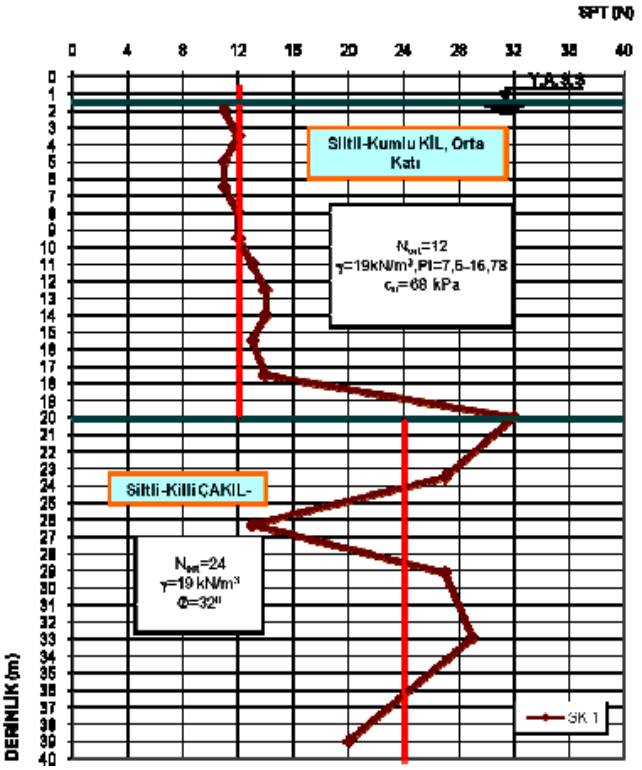



**Şekil 2.2.** Zemindeki jet penetrasyon modeli (Ho, 2007)

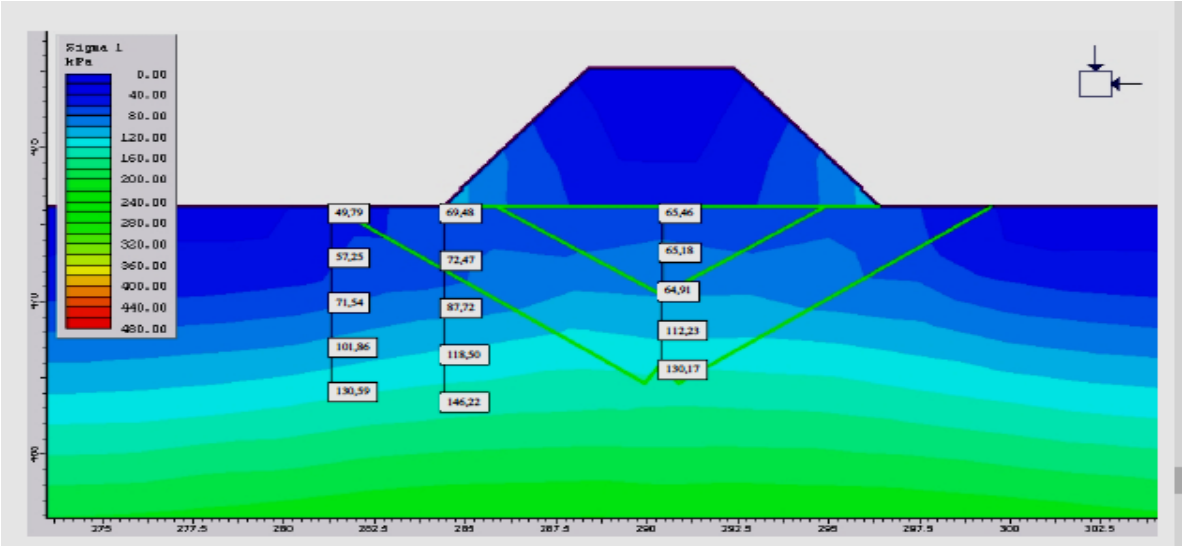
**(Küçükali, 2008)** tarafından yapılan tez çalışmasında, Ulukışla-Gümüş demiryolu hattına ait bir vaka analizi ele alınmıştır. Çalışma alanında yapılan sondajlarla bölgenin silt, kil, kum ve çakıl içerisinde anhidrit ve jipslerin bulunduğu belirlendiği ve yeraltı su seviyesinin yaklaşık 1.0 m'de olduğu belirtilmiştir. Yeraltı

suyu akışı nedeniyle bölgede bulunan anhidrit ve jipslerin yıkanarak eridiği ve bu erimenin bölgede zemin tabakaları arasında boşluklar yarattığı ve buna bağlı olarak zeminde ani ve büyük çaplı göçmeler meydana geldiği vurgulanmıştır. Demiryolu hattının tabanında, 1,000 m'lik bölgede ani göçmeyi önlemek amaçlı (V) şeklinde birbirini kesen 80 cm çaplı, 125 adet 6-8 m uzunluğunda jet-grout kolon yapılmıştır. Jet-grout yöntemi olarak tek akışkanlı sistem kullanılmıştır.

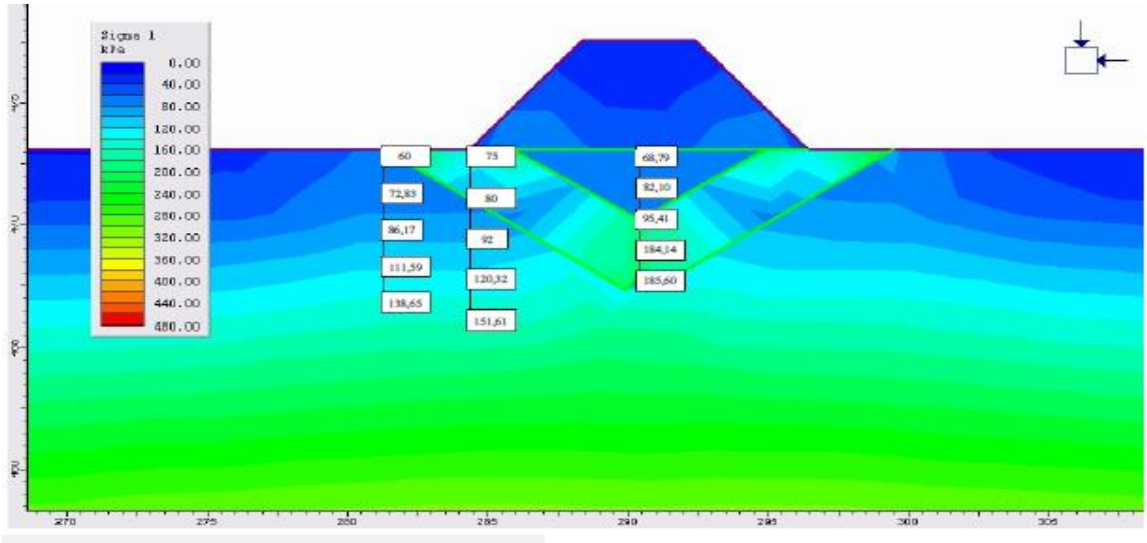
İyileştirme öncesindeki ve sonrasındaki zemin performansını belirlemek için Phase 6.018 sonlu elemanlar yöntemi programı kullanılmıştır. Bu program için zemin profili Şekil 2.3'teki gibi idealize edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda iyileştirme öncesi ve sonrasında yer değiştirmelerde önemli bir değişiklik olmadığı belirlenmiş ve bunun nedeni yapılan jet enjeksiyonunun sadece zemindeki boşlukları doldurmaya yetecek derinlik boyunca yapılmasına ve uygulamanın bölgesel olmasına bağlanmıştır. Gerilme analizlerinde ise Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'teki görüldüğü gibi jet-grout kolonlarda daha yüksek gerilmelerin oluştuğu belirlenmiştir. Yapılan jet-grout uygulaması ile temel altı zeminde oluşan göçmelerin engellendiği belirtilmiştir.




**Şekil 2.3.** Phase 6.018 programı için kullanılan idealize zemin profili ve mühendislik parametreleri (Küçükali, 2008)



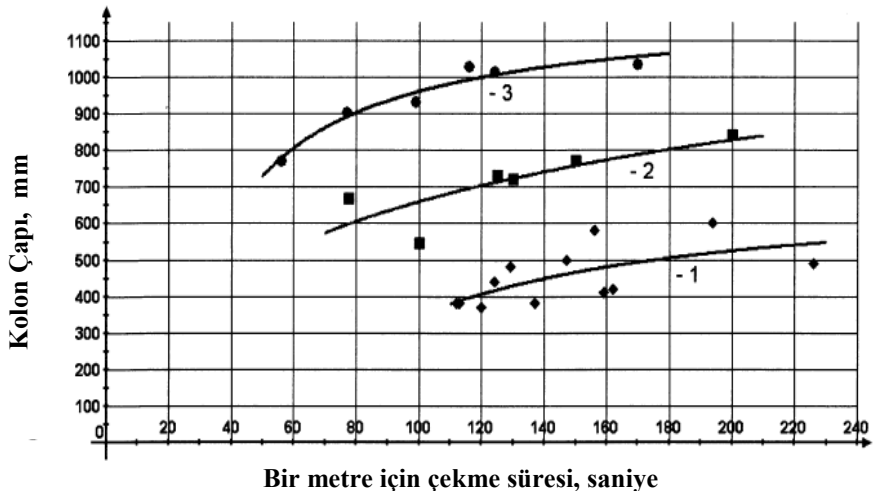

**Şekil 2.4**. İyileştirme öncesi zeminde oluşan düşey gerilmeler (Küçükali, 2008)




**Şekil 2.5.** İyileştirme sonrasında zeminde oluşan düşey gerilmeler (Küçükali, 2008)

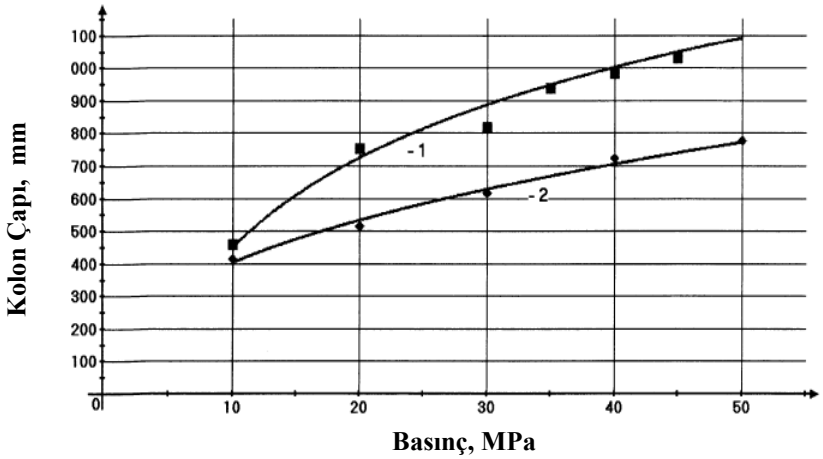
**(Malinin ve ark., 2010)** jet-grout yönteminin etkinliğini belirleyen en önemli parametrenin kolon çapı olduğunu, kolon çapının da enjekte edilen enjeksiyon hacmi, nozul çapı ve basınca bağlı olduğu kadar zemin tipi, tij çekme ve dönem hızına da bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu araştırmacılar yaptıkları çalışmada jet-grout parametrelerinin ve zemin koşullarının, jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bunun için farklı kohezyon değerine sahip zeminlerde üç seri deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, ilk deney grubu kohezyonlu zeminlerde oluşturulan jet-grout kolonlardır. Bu kolonlar oluşturulurken enjeksiyon basıncı, tij dönme ve çekme hızları sabit tutulurken,

enjeksiyon süresi değiştirilmiştir (Şekil 2.6(1)). Enjeksiyon süresi 110 sn ile 230 sn aralığında değiştirildiğinde, kolon çapı 370 mm ile 600 mm aralığında değişmiştir.



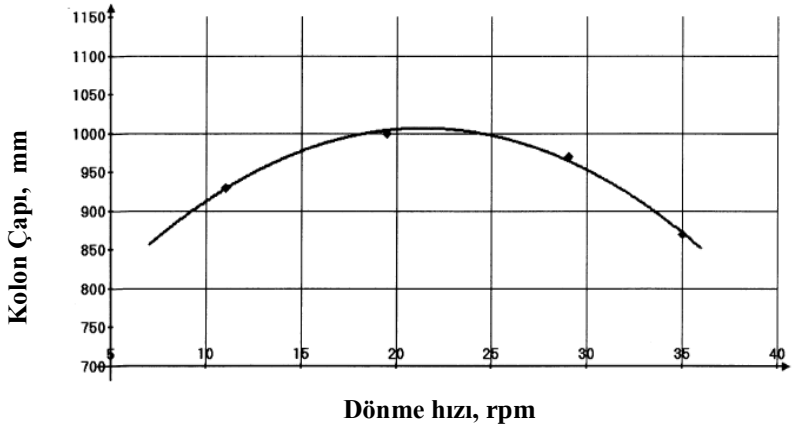

**Şekil 2.6.** Zemin iyileştirme süresinin **j**et-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010)
1- kohezyonlu zemin (c= 47 kPa), 2- düşük kohezyonlu zemin (c= 7kPa),
3- kohezyonsuz zemin (c= 1 kPa)

İkinci deney grubu kohezyonsuz zeminlerde oluşturulan jet-grout kolonlar ve üçüncü deney grubu ise düşük kohezyonlu zeminde oluşturulan jet-grout kolonlardır. Bu kolonlar oluşturulurken enjeksiyon basıncı, tij dönme ve çekme hızları değiştirilmiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi basınç değeri 10 MPa ile 50 MPa arasında değiştirilmiştir. Enjeksiyon basıncı artarken kolon çapının da arttığı görülmektedir.




**Şekil 2.7.** Enjeksiyon basıncının jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010)
1- kohezyonsuz zemin (c=1 kPa), 2- düşük kohezyonlu zemin (c= 7kPa)

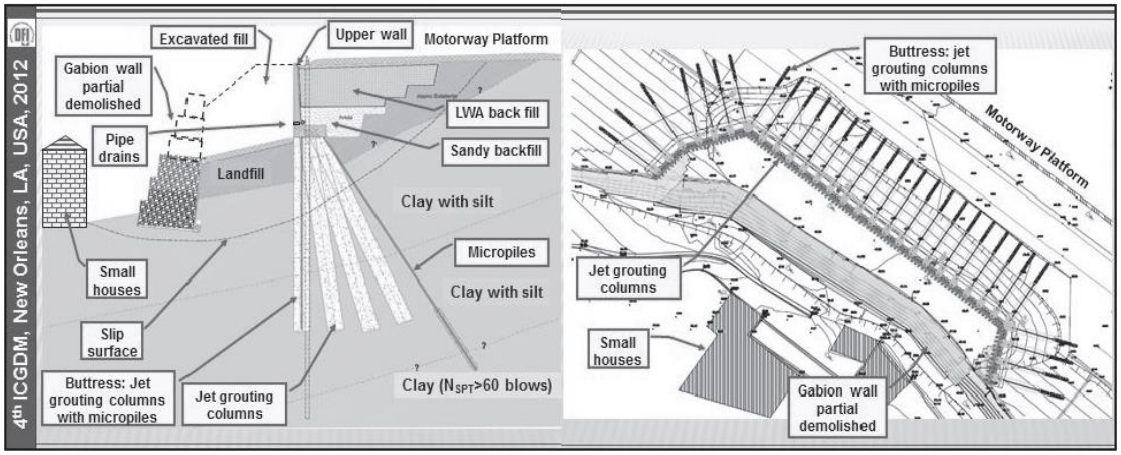
Farklı dönme hızları ile jet-grout kolonlar da bu deneysel çalışmada oluşturulmuştur. Dönme hızı 11-35 rpm aralığında değiştirilmiş ve optimum dönme hızı Şekil 2.8'te görüldüğü gibi 20 rpm olarak elde edilmiştir.



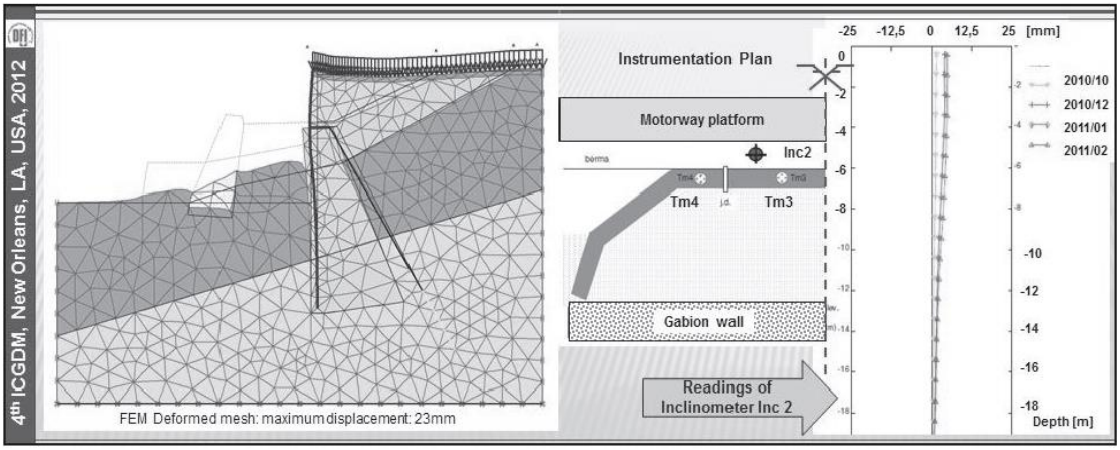

**Şekil 2.8.** Dönme hızının jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010)

Bu çalışmada jet-grout kolon uygulamasında öncelikli olarak zeminin kohezyon değerinin belirlenmesi önerilmiştir. Zemin tipinin %50 oranında kolon çapı değişimine neden olduğu belirtilmiştir. Kohezyonlu zeminlerde enjeksiyon süresindeki iki kat artış kolon çapını %70 oranında artırırken, kohezyonsuz zeminlerde bu etkinin çok az belirtilmiştir. Aynı şekilde zemin tabakalanma durumunun jet-grout kolon çapı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

**(Pinto ve ark., 2012)** yaptıkları çalışmada şev stabilitesine ait vaka analizi ele alınmıştır. Şev stabilitesi için Portekiz'de Lisbon ile Leiria'yı bağlayan A8 Otoyolu'nu ele alınmıştır. Otoyol platformu 8 yıl önce dolgu ve kazı yapılarak inşa edildiği ve platform çevresinde bulunan küçük evleri korumak için gabion duvarlarla stabilizasyonun sağlandığına çalışmada değinilmiştir. Kohezyonu ve dayanımı derinlikle artan killi ve siltli zemin üzerine dolgu tabakası inşa edilmiştir. Toprak kaymasından sonra, gabion duvar altından geçen dairesel bir kayma yüzeyinde oluşan çatlaklar ve deformasyonların analiziyle teyit edilmesi mümkün olmuştur. Zemin hareketi 3 şeritli otoyolu içine alan 12 m yüksekliğinde ve 60 m genişliğinde bir zemin kitlesiyle kesişmektedir. Mevcut koşullar göz önünde bulundurulduğunda jet-grout yöntemi ile zemin stabilizasyonu çözüm olarak önerilmiştir. Uygulanan jet-grout kolonların (1.2 m çapında, 1.0 m aralıklı) plan ve en kesiti Şekil 2.9'de verilmiştir. Uygulanan iyileştirmenin dizaynı için denge limit analizleri Slide ve Plaxis programları ile yapılmıştır (Şekil 2.10).




**Şekil 2.9.** Uygulanan iyileştirmenin plan ve en kesiti (Pinto ve ark., 2012)




**Şekil 2.10.** Uygulanmış FEM analizi görünüşü ve yanal deplasmanlar (Pinto ve ark., 2012)

**(Erkan, 2013)** tarafından yapılan doktora tez çalışması kapsamında, enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı, tij çekme hızı ve tij dönme hızının jet-grout kolonların performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvar ortamında jet-grout kolonu üretebilecek sistem tasarlanarak imal edilmiştir. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında ilk kez parametrik olarak jet-grout kolonların davranışı incelenmiştir. Deney tasarımı ve sonuçların değerlendirilmesi bir optimizasyon tekniği olan Taguchi Yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan analiz ve değerlendirmeler sonucunda geliştirilen sistem ile laboratuvarda jet-grout kolonların başarılı bir şekilde üretilebileceği ve parametrik çalışmaların yapılabileceği gösterilmiştir. Kolon çapı üzerinde en etkili parametrenin %43 ile enjeksiyon basıncı olduğu, dönme hızı %36, S/Ç oranı %12 ve çekme hızı %10 oranında etkili olduğu

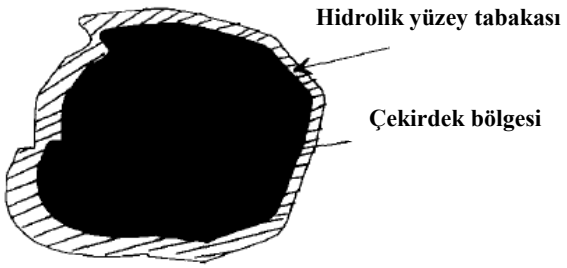
belirlenmiştir. Kolonların serbest basınç mukavemeti üzerinde ise en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı (%36) olduğu saptanmıştır. Dayanım üzerinde S/Ç oranının etkisi %27, çekme hızının etkisi %23 ve dönme hızının etkisi %14 olarak belirlenmiştir. Laboratuvarda oluşturulan kolonlarda kolon çapının maksimum olması için enjeksiyon basıncı 40 bar, S/Ç oranı 1.5, çekme hızı 15 cm/dak ve dönme hızı 5 dev/dak olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde oluşturulan kolonlarda basınç mukavemetinin maksimum olması için enjeksiyon basıncı 20 bar, S/Ç oranı %1 ve çekme hızı 15 cm/dak ve dönme hızı 10 dev/dak olarak belirlenmiştir.

**(Fidan, 2015)** tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, laboratuvarda yapılan model deneylerle jet-grout kolonlarının performansını etkileyen faktörlerden çimento tane çapı ve su/çimento oranı uygun bir optimizasyon tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ultra ince taneli (ultrafin 12) çimento kullanılarak, değişik su/çimento oranlarında ve değişik basınç altında ayrı ayrı yapılmıştır. Kolonlardan 28 gün sonunda alınan karot numuneler serbest basınç deneyine tabi tutularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ince taneli çimentonun jet-grout kolonların performansına uygun parametrelerin seçilmesiyle katkıda bulunacağı öngörülmüştür.

Jet-grout kolonlar yapısı itibariyle zemin içerikli beton kolon olma özelliklerinden dolayı olumsuz çevre koşullarından etkilenmektedir. Bu kolonların uzun dönem performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri sülfat etkisidir. Sülfat etkisi betonda dayanım kaybına yol açmakta, beton bünyesinde genleşmeye buna bağlı olarak çatlamaya ve sonuçta betonun ayrışmasına neden olmaktadır.

**(Yang ve ark., 1996)** tarafından çimento harcındaki sülfat etkisi, harç ile agrega ara yüzey zonu etkileri araştırılarak değerlendirilmiştir. Ara yüzey zonu, yüksek poroziteye sahip ve hidrate kristallerin çokça bulunduğu bir bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı, bu çalışmada ara yüzey zonu sülfat etkisinin değerlendirilmesinde önemli bir faktör olarak gösterilmektedir. Sülfat etkisinin, ara yüzey zonunun içeriği ve yapısıyla ilgili olduğunu araştırmak için farklı agregalar ve farklı hacimsel agrega oranları kullanılarak harç numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada, ara yüzey zonunun içeriği, agrega hacimsel oranıyla ilişkili olduğu için farklı agrega hacimsel oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Ara yüzey zonu yapısını iyileştirmek için ise önceden işlenmiş kuvars kumu kullanılmıştır. Bu kum, kuvars kumu ile kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) tozunun kalsinasyonu ile elde edilmiştir. Bu

nedenle önceden işlenmiş kuvars kumu Şekil 2.11'de de görüldüğü gibi, hidrolik yüzey tabakası ve normal kuvars kumuna benzer etkisiz çekirdek bölgesinden oluşmaktadır.




**Şekil 2.11.** Önceden işlenmiş kuvars kumunun taslağı (Yang ve ark., 1996)

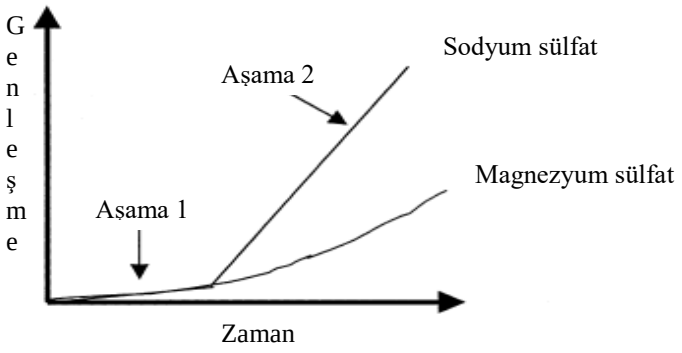
Sonuçlar, sülfat etkisi üzerinde ara yüzey zonunun önemli bir etki faktörü olduğunu göstermiştir. Hacimsel agrega oranı örneklerin genleşmesini büyük ölçüde etkilemiştir. Hacimsel agrega oranı arttıkça genleşme hızlanmıştır. Agrega tipi harç numunelerin genleşmesini etkilemiş, işlenmiş kuvars kumu ile hazırlanan numunelerin genleşmesi normal kuvars kumu kullanılan numunelerden daha az olduğu deney sonuçlarından belirlenmiştir. İşlenmiş kuvars kumunun hidrolik yüzey tabakasının hidratasyon etkisi nedeniyle ara yüzey zonunun porozitesi azalacağı ve bu bölgede daha fazla silika hidrateleri bulunacağı belirtilmiştir. Buna bağlı olarak bu harçların sülfat direnci artmıştır.

**(Cao ve ark., 1997)** tarafından çimento kompozisyonu ve ortam pH'ının Portland çimentosu ve katkılı çimentoların sülfat direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, farklı karakteristikte 4 farklı Portland çimentosu ve uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içerikli çimentolar kullanılmıştır. Harçların performansları, 3-12 pH seviyelerinde hazırlanan sülfat çözeltilerinde harçların genleşme ve dayanım gelişimleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çimentolaşma malzemesinin sülfat direncinin, çimentolaşma malzemesinin kompozisyonuna ve ortam pH'ına bağlı olduğunu göstermiştir. Düşük $C_3S$ ve $C_3A$ içerikli Portland çimentosu bütün sülfat çözeltilerinde iyi performans göstermiştir. Çimento ile %40 oranında yer değiştirilen uçucu küllü çimento, %5 oranında yer değiştirilen silis dumanlı çimento veya %80 oranında yer değiştirilen yüksek fırın cüruflu çimento kullanımı geniş bir pH aralığında iyi bir dayanım sağlamıştır.

**(Cohen ve Tian, 2000)** tarafından sülfat etkisi esnasında betonda alçıtaşı oluşumunun genleşmeye neden olup olmadığı araştırılmıştır. Portland çimentolu betondaki sülfat etkisinin, iki önemli sülfat reaksiyonundan birinden kaynaklandığı

söylenilmektedir. (1) Trikalsiyumalüminat ($C_3A$) ve onun hidratasyon ürünleri ile sülfat iyonlarının etrenjit oluşturmak için reaksiyona girmesi, (2) kalsiyum hidroksit ile sülfat iyonlarının alçıtaşı oluşturmak için reaksiyona girmesidir. Alçıtaşı oluşumu genellikle zararlı kabul edilmesine rağmen doğruluğunu ortaya koyan özel bir mekanizma yoktur. Özellikle de alçıtaşı oluşumunun genleşmeye neden olduğu tartışmalı bir konudur. Bu nedenle, bu çalışmada, etrenjit oluşumunu elimine etmek için trikalsiyum silikat ($C_3S$) ve dikalsiyumalüminat ($C_2S$) içerikli çimento ve silis dumanlı çimento kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar sülfat etkisi mekanizmasının karmaşıklığını ve Portland çimentolu betonun genleşme ve çatlamasının büyük bir olasılıkla sadece etrenjit oluşumundan kaynaklanmadığını göstermiştir. Çünkü alçıtaşı oluşumu esnasında oluşan çekme gerilmelerinin, genleşme ve çatlamada büyük bir rol oynayabileceği söylenilmiştir.

**(Santhanam ve ark., 2002)** tarafından sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinin farklı tip Portland çimentolarının mikro yapıları ve genleşmeleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, Type I tip çimento ile silis dumanı ve metakaolin içerikli çimentolar kullanılmıştır. Sonuçlar, sodyum sülfat çözeltisindeki numunelerin genleşmelerinin iki aşamada gerçekleştiğini göstermiştir. Birinci aşamada, Aşama 1, zamanla artan küçük bir genleşme gözlenmiştir. İkinci aşamada, Aşama 2, ani ve hızlı bir genleşme meydana gelmiştir. Yapılan mikroyapısal çalışmalarda, Aşama 2'nin başlangıç noktasının numunelerin kimyasal olarak değişmeyen iç zonunda çatlakların meydana gelmesine karşılık geldiği saptanmıştır. Bu noktadan sonra, numune tamamen bozulana kadar, genleşme hemen hemen sabit bir oranda artmıştır. Şekil 2.12'de idealize genleşme mekanizması yer almaktadır.




**Şekil 2.12.** $Na_2SO_4$ ve $MgSO_4$ çözeltisine maruz Portland çimentolu numunelerin idealize genleşme davranışı (Aşama 1 ve Aşama 2 $Na_2SO_4$ çözeltisi için) (Santhanam ve ark., 2002)

Magnezyum sülfat çözeltisinde ise genleşme sürekli olarak artan bir oranda meydana gelmiştir. Yapılan mikroyapısal analizler, numunelerin çözeltiye maruz

kalmasından hemen sonra yüzeyde brüsit tabakasının oluştuğunu, daha sonraki süreçte ise betona bağlayıcılık sağlayan kalsiyum silika hidrate jelinin (CSH), bağlayıcılık özelliği olmayan magnezyum silika hidrate (MSH) jeline dönüştüğünü göstermiştir. Bu çalışmanın devamında, Araştırmacılar tarafından sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz numunelerle yapmış oldukları çalışmanın değerlendirilmesi ile sülfat mekanizması için bir model önerilmiştir.

**(Lee ve ark., 2005)** tarafından Portland çimentolu harçların sülfat etkisi ve sülfat etkisinden kaynaklı zararı azaltmada silis dumanının etkililiği hakkında detaylı bir deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmada, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri kullanılmıştır. Çalışmadaki ana değişkenler su/çimento oranı ve çimentonun yer değiştirme seviyesidir. Test sonuçları, silis dumanı varlığının sodyum sülfat etkisinden kaynaklı dayanım kaybı üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğu ve % 5-10 silis dumanı kullanımının en iyi dayanımı verdiği elde edilmiştir. Diğer taraftan magnezyum sülfat ortamında silis dumanı kullanımının harçlara ciddi derecede zarar verdiği ve silis dumanı içeriğindeki artışla basınç dayanımı kaybının arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle, magnezyum sülfat çözeltisine maruz betonda silis dumanı kullanımı önerilmemektedir. Ayrıca test sonuçları, sülfat etkisine karşı beton direncini etkileyen en önemli parametrenin su/çimento oranı olduğunu göstermiştir.

**(Tosun, 2007)** tarafından yapılan doktora tezi kapsamında, bazı çimento özelliklerinin ve agrega tipinin gecikmiş etrenjit oluşumuna (GEO) etkileri ile bu olayı tespit etmeye yönelik deney yöntemleri incelenmiştir. Hazırlanan harç örneklerine farklı buhar kürü yöntemleri (farklı ön bekleme süresi, buhar kürü süresi, çıkış hızı, tepe sıcaklığı) uygulanmıştır. Farklı hızlandırma yöntemlerinin (Duggan, Fu vb.) reaksiyon hızı ve oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, hidratasyon ürünlerinin mikroyapı ve kompozisyonlarının incelenmesi için, SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. SEM analizinde, hem kırılmış harçlar üzerinde (SEI modunda), hem de hazırlanan parlak kesitlerde (BSE modunda) incelemeler yapılmıştır. Bunların yanı sıra ince kesitler ile de optik mikroskopta analizler gerçekleştirilmiştir.

**(Dehwah, 2007)** tarafından sülfat konsantrasyonun ve katyon tipinin beton bozulması üzerindeki etkisi ve çimento hidratelerindeki morfolojik değişimleri değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, 4 yıllık bir periyod için, değişik konsantrasyonlardaki sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri ile %5 NaCl çözeltisine maruz beton numuneler hazırlanmıştır. Bu çalışmada sülfat etkisinden dolayı beton bozulma mekanizmasının iki şekilde ortaya çıktığına değinilmiştir. Bunlar, beton

yüzeyinde alçıtaşı oluşumuna bağlı aşınma ve betonun etrenjit oluşumuna bağlı olarak genleşmesi ve çatlamasıdır. Yapılan çalışma sonucunda, sodyum klorür veya sodyum klorür+sodyum sülfat çözeltilerine maruz beton numunelerde herhangi bir bozulma gözlenmediği belirlenmiştir. Fakat sodyum klorür+magnezyum sülfat çözeltisine maruz katkısız beton numunelerde ve uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu çimentolu beton numunelerde bozulma gözlendiği sonuçlar arasında yer almaktadır.

**(Ustabas, 2008)** tarafından farklı sıcaklıkta magnezyum sülfata maruz harçlarda yeni madde oluşumu araştırılmıştır. Bu çalışmada, 0.52 ve 0.625 su/bağlayıcı oranına sahip mineral katkılı ve mineral katkısız harç numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler ortam sıcaklığında, 5°C ve 40°C sıcaklıklarda bekletilmiştir. Numunelerin 28 günlük su emme, kılcal su emme, eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerde magnezyum sülfat çözeltisinden dolayı oluşan yeni ürünler, mikroskop ve taramalı elektron mikroskobuyla ölçülmüştür. Bu çalışmada sülfat etkisini önlemek için geçirimsiz beton üretiminin en önemli parametre olduğu ve uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların betonun geçirimliliği üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, su emme ve kılcal su emme değerleri yüksek olan harçlarda sülfatlı ortamda daha çabuk bozulma gözlenmiştir. Ortam ısısının harçların bozulmasını ve yeni madde oluşumunu farklılaştırdığı ve mineral katkılı harçların geçirimlilikleri değiştiğinden dolayı sülfat etki mekanizmasının farklı şekilde gerçekleştiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıkta magnezyum sülfata maruz harçlarda etrenjit oluşumunun daha belirgin ve fazla olduğu belirlenmiştir.

**(Yıldız ve Ürün, 2010)** tarafından yapılan çalışmada, Portland çimentosu ve yüksek fırın cüruflu çimento kullanılarak oluşturulan ve sülfat içerikli yer altı suyu koşullarında ve uzun dönemde, kazıkların beton taşıma gücünde ne tür değişiklik olduğu araştırılmıştır. Bu çalışmada, sülfat etkisine karşı ASTM tip II veya tip V çimento kullanımı veya çimentonun içerisine uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi puzolanların katılması önerilmiştir. Aynı zamanda sülfat penetrasyonunu önlemek için beton yoğunluğunu artırılması, su/çimento oranının azaltılması, uygun kür koşulları ve prefabrik beton kullanımı önerilmiştir. Deney sonuçlarından, sülfat içerikli ortamda prizini alan ve mukavemet kazanması sağlanan beton, literatürde yer alan mukavemetini kazandıktan sonra sülfatlı ortamlara maruz bırakılan betonlara göre daha fazla hasar gördüğü, önemli mukavemet kayıpları oluştuğu tespit edilmiştir.

**(Müllauer ve ark., 2013)** tarafından çözelti sülfat konsantrasyonunun ve çimentonun $C_3A$ içeriğinin, sülfat etkisinden kaynaklı genleşme mekanizması

üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, dış sülfat etkisi nedeniyle ince duvarlı silindirik çimento harçlarında oluşan gerilmeleri ölçmek için sınırlandırılmış gerilme hücreleri oluşturulmuştur. Sonuçlar, 10-50 nm boyutundaki küçük boşluklardaki etrenjit oluşumunun, harcın çekme dayanımını aşan 8 MPa'a ulaşan çekme gerilmeleri meydana getirmesinin, betona zarar verdiğini göstermiştir. Yüksek sülfat konsantrasyonlarında ve $C_3A$ içeriklerinde yüksek gerilmeler meydan gelmiştir.

**(Rahman ve Bassuoni, 2014)** tarafından sülfat etkisi nedeniyle betonda tomasit oluşum mekanizması araştırılmıştır. Bu çalışmada, mevcut saha ve laboratuvar çalışmalarından konu hakkındaki araştırma ve bilgiler derlenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, tomasitin düşük sıcaklık ve yüksek su içeriğine sahip çimento harcında karbonat ve bikarbonatların varlığından kaynaklı meydana gelen, sülfat etkisinin özel bir türü olduğuna dair bir fikir birliği olduğu ortaya çıkmıştır. Tomasit oluşumunun, betonu herhangi bir bağlayıcılığı ve taşıyıcılığı olmayan kohezyonsuz bir yapıya dönüştürdüğü söylenmiştir. Normal sıcaklıkta, betonda sülfat etkisi ile beraber donma olayı veya ıslanma-kuruma çevriminin bulunması da tomasit oluşumuna yol açabileceği ifade edilmiştir.

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grout yöntemi ve sülfatın beton üzerindeki etkisi ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Jet-grout kolonlar, zemin içerikli (soilcrete) beton kolon olma özelliklerinden dolayı betonun etkilendiği ortam koşullarından etkilenmektedir. Bu nedenle sülfatın beton üzerindeki etkisi ve bozulma mekanizması bu bölümde incelenmiştir. Son olarak, tez çalışmasında yapılan deneysel çalışma programı bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

## 3.1.Zemin İyileştirmesi

Mühendislik yapıları, zemin üstünde ya da içinde inşa edilmektedir. Yapı temel zemini parametrelerinin laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenmesi ve deney sonuçlarının derinlemesine incelenip, yapı için uygun temel sistemine karar verilmesi gerekmektedir. Yapılan deneyler ve statik analizler sonucunda, yapı temel zeminleri her zaman istenilen özellikleri sağlamayabilir. Bu durumda,

- Mevcut zemin parametreleri ile yapı temelini yeniden boyutlandırmak,
- Derin temel sistemi kullanmak,
- Zayıf tabaka kalınlığı az ise, zayıf zemini kaldırmak ve temeli sağlam zemine oturtmak ya da zayıf zemini kaldırmak ve yerine taşıma gücü yüksek zemin yerleştirmek,
- Zayıf zemin parametrelerini, zemin iyileştirme yöntemlerini kullanarak artırmak,

gibi önlemler alınabilir (Özdemir ve Özdemir, 2006).

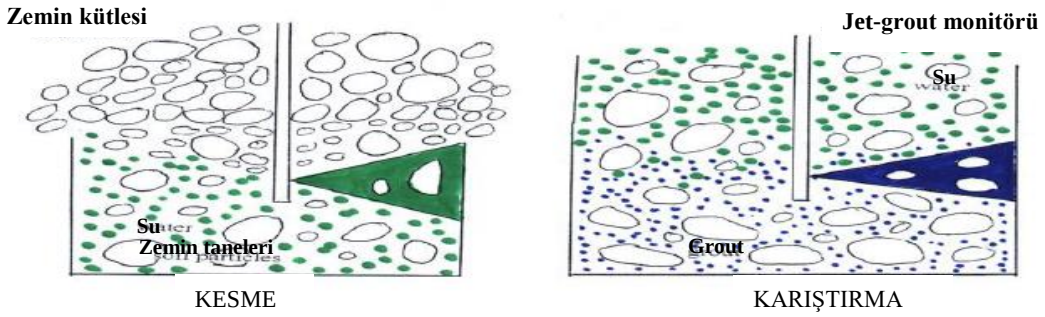
Zemin iyileştirmesi, zemine ait laboratuvar ve arazi deney sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda, yapı temel zemininin geoteknik açıdan uygun olmayan zemin parametrelerinin fiziksel, kimyasal ve dinamik yöntemlerle iyileştirilmesidir. İyileştirme sonucunda zeminin özellikle basınç dayanımı ve elastisite modülü artarken, oturma miktarı ve geçirgenliği azalmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden bazıları, katkı maddeleri ile stabilizasyon, enjeksiyon, dinamik kompaksiyon, vibroflatosyon ya da vibrokompaksiyon, taş kolonlar, düşey drenler, kum drenler, fore kazıklar, mini kazıklar, jet-grout, ön yükleme ve aşırı yükleme olarak sayılabilir. Tez çalışması kapsamında, zemin iyileştirme yöntemlerinden jet-grout yönteminden bahsedilmiştir.

### 3.1.1. Jet-Grout Yöntemi

Jet-grout yöntemi ilk olarak 1960'larda geliştirilmiş olup, 70'li yılların başında Japonya'da denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. 70'li yılların sonunda ise ilk olarak Avrupa'da uygulanmış olup, daha sonra Kuzey ve Güney Amerika'ya, Uzak Doğu, Asya ve Afrika'ya yayılmıştır (Brill ve ark., 2003). Ülkemizde ise ilk olarak 1986 yılında Haliç Kollektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında kullanılmıştır (Küsin ve ark., 2009).

Jet-grout yöntemi, sondaj yardımıyla iyileştirme yapılacak derinlik boyunca zemine indirilen bir tij takımının, özel ekipmanlar kullanılarak, belirli bir çekme ve dönme hızıyla zemin yüzeyine çekilmesi esnasında, tijin ucunda bulunan nozul/nozullardan değişik karışım oranlarında hazırlanan çimento esaslı enjeksiyon malzemesinin yüksek basınçla zemine enjekte edilmesidir. Yüksek enjeksiyon basıncı ile nozullardan çıkan grout bir hız kazanır ve yüksek basınç nedeniyle enjeksiyon malzemesi zemini parçalar (Şekil 3.1). Eş zamanlı olarak grout malzemesi ile zemin tanelerinin karıştırılması ile zemin içerisinde, zemin tipi, boşluk yapısı ve tabakalanma durumuna bağlı olarak değişen çapta ve dayanımda zemin içerikli beton kolonlar oluşturulur.



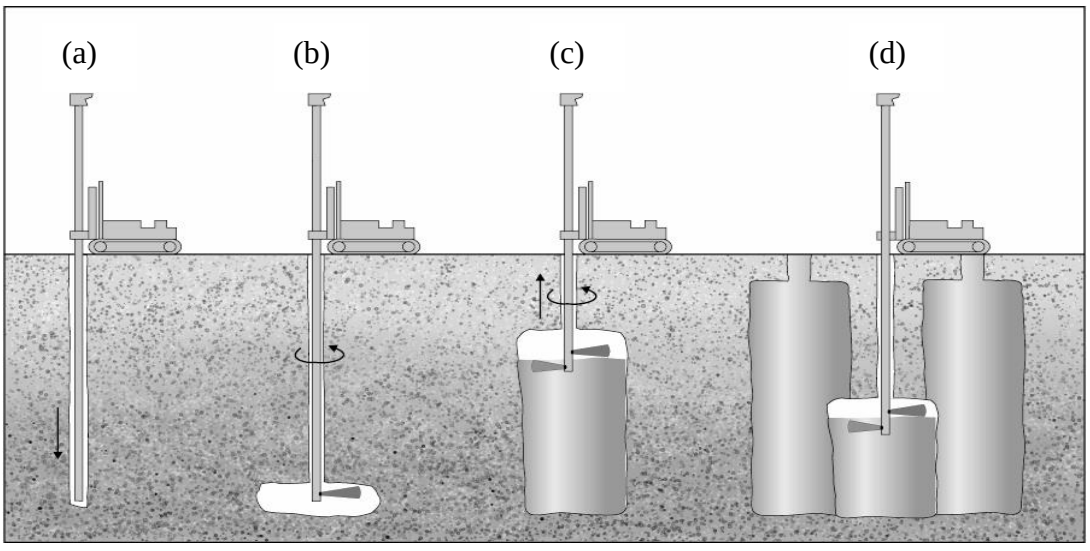

**Şekil 3.1.** Jet-grout enjeksiyonu ile zemin kütlesinin parçalanıp, karıştırılmasının şematik gösterimi (Chan, 2005)

Jet-grout yöntemi, diğer iyileştirme yöntemleri ile kıyaslandığında daha hızlı, güvenilir ve ekonomik bir çözüm olması nedeniyle her geçen gün gelişmekte, yeni uygulama yöntemleri ortaya çıkmakta ve buna bağlı olarak mühendislik problemlerinde uygulama alanı her geçen gün artmaktadır. Jet-grout yöntemi kullanılarak iyileştirilen zeminlerin taşıma gücü ve sıvılaşmaya karşı direnç artarken, oturmaları ve geçirimlilik

değerleri azalmaktadır. Jet-grout yönteminin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayan diğer avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

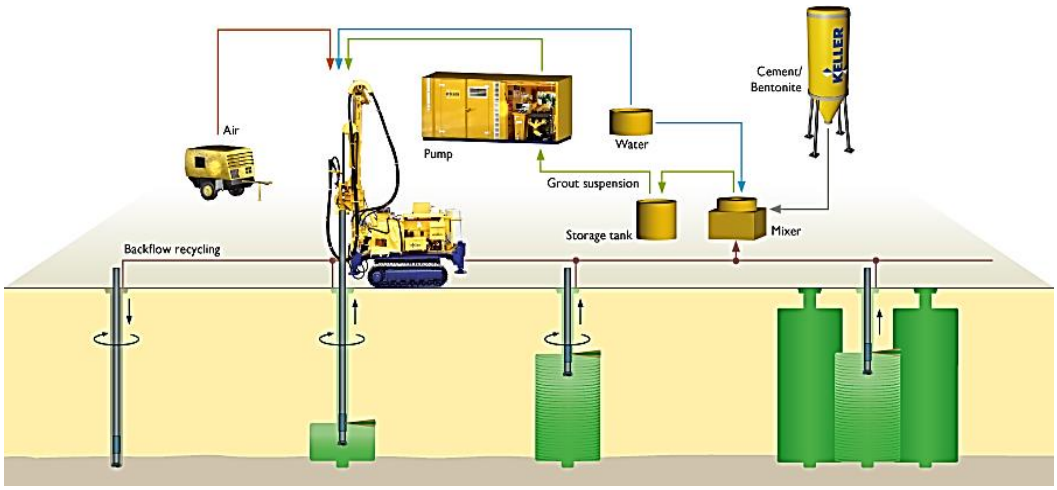
- Killerden, iri taneli çakıllara kadar her türlü zemine uygulanabilir olmasıdır (Lunardi, 1997).
- Bütün uygulamaların zemin yüzeyinden başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi,
- Oluşturulacak kolon boyutlarına bağlı olarak malzeme miktarının önceden belirlenebilmesi ve buna bağlı olarak yaklaşık maliyetin önceden hesaplanabilmesi ve diğer yöntemlere göre ekonomik olması,
- İstenilen çapta ve istenen derinlik boyunca tasarım kriterlerine uygun kolonlar elde edilebilmesi (sürekli kolonlar, yarım kolonlar, eğimli kolonlar, vb.),
- Diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasla hızlı inşa süresi,
- Mevcut yapı temellerinin alttan desteklemede temelle pozitif etkileşim elde edilebilmesi,
- Dar bölgelerde ve sınırlı alanlarda, küçük ve hafif ekipmanlarla uygulanabilmesi,
- Çevre kirliliği ve titreşim oluşturmadan, yakın yapılara zarar vermeden zemin iyileştirmesi yapılabilmesi,
- Büyük alanların ekonomik bir şekilde iyileştirilmesi,

Jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirme Şekil 3.2'de görüldüğü gibi başlıca iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlar delgi aşaması ve enjeksiyon aşamasıdır. Bu aşamaların gerçekleştirebilmesi ve ideal bir jet-grout uygulaması için, iyileştirme yapılacak bölgede Şekil 3.3'te yer alan ekipmanların bulunması gerekmektedir.




**Şekil 3.2.** Jet–grout yöntemini aşamalarının şematik gösterimi: (a) Tijin sondaj ile belli derinliğe indirilmesi (delgi aşaması), (b), (c) ve (d) Enjeksiyon ile kolon imalatı (Burke, 2004)

Jet-grout uygulamasının ilk aşaması olan delme işleminin türü zemin tipine bağlı olarak değişmektedir. İdeal bir jet-grout ünitesinde delgi makinası, delici uç, matkap ve delgi takımını soğutmak için su başlığı kullanılmaktadır. Delme işleminde tüm rotary ve darbeli rotary metotları kullanılmaktadır.




**Şekil 3.3.** Jet-grout ekipmanlarının şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering)

Delgi esnasında delici ucun belirli derinliğe indirilmesi için tij takımları kullanılmaktadır. Delgi aşamasında tij takımı istenen derinliğe ulaştığında delme işlemi durdurulur. Delme borusunun ucu kapatıldıktan sonra hazırlanan enjeksiyon malzemesi, monitör olarak adlandırılan kısımdan pompa ünitesi yardımıyla istenilen çapta jet grout kolonu teşkil etmek için yeterli basınçta zemine enjekte edilmektedir. Bu nedenle seçilen pompa ünitesi maksimum enjeksiyon basıncına ayarlanabilir olmalıdır. Aynı zamanda kullanılan tij ve bağlantı manşonları enjeksiyon esnasında uygulanan yüksek basınca dayanıklı olmalıdır.

Enjeksiyon aşamasının kesintisiz olarak gerçekleştirilmesi için, enjeksiyon malzemesinin ve kullanılacak suyun depolanmasını sağlamak amacıyla çimento silosu, dinlendirme kazanları ve su tankı bulunmalıdır. Jet-grout enjeksiyon malzemesinin istenilen su/çimento oranında elektronik olarak karıştırılıp hazırlanması için mikser bulunmalıdır. Karıştırma ünitesinde hazırlanan enjeksiyon malzemesi dinlendiriciye aktarılır. Bu ünite, jet grout pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede olmalıdır. Ek olarak uygulanan jet-grout sistemine bağlı olarak enjeksiyon aşamasında basınçlı hava kompresörü de kullanılabilir.

Enjeksiyon aşamasında tij takımı belli bir dönme hızı ve çekme hızı ile yukarı çekilir. Tij takımının dönme ve geri çekilme hızı delgi makinasının kontrol panelinden

ayarlanmaktadır. Tij takımının dönmesi bu yapının dairesel formda oluşmasını sağlar. Tij takımının belli bir hızla zemin yüzeyine çekilmesi ise zemin içerinde sürekli düşey kolonlar oluşturulmasını sağlar. Eğer tij takımına dönme hareketi verilmezse zemin içerisinde paneller de elde edilebilir.

Bu aşamalarda zemin yüzeyine bir miktar çamur kusması meydana gelebilir. Bu atık malzemenin de depolanması için bir depolama ünitesi de bulundurulmalıdır. Bunların dışında jet-grout uygulaması esnasında meydana gelebilecek bir elektrik kesintisi göz önünde bulundurularak tesis bölgesinde bir jeneratör ünitesi bulunmalıdır. Bu sayede kesintisiz bir uygulama gerçekleştirilebilir.

### 3.1.2. Jet-Grout Uygulama Yöntemleri

İlk olarak 1960'larda kullanılmaya başlayan jet-grout yöntemi günümüzde hala etkin olarak kullanılmaya devam edilmektedir. Bu nedenle jet-grout yöntemleri, elde edilen kolon kalitesini artırmak, maliyeti azaltmak ve üretim hızını artırmak için her geçen gün geliştirilmektedir (Burke, 2004). Jet-grout yöntemleri kullanılan akışkan sayısına bağlı olarak başlıca üç gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.4). Bunlar;

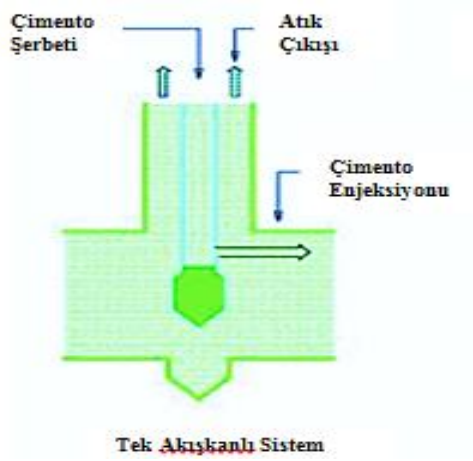
- Tek akışkanlı sistem-Jet1 (sadece çimento enjeksiyonu)
- Çift akışkanlı sistem-Jet2 (hava ve çimento enjeksiyonu)
- Üç akışkanlı sistem-Jet3 (hava-su ve çimento enjeksiyonu)




**Şekil 3.4.** Temel jet-grout sistemleri (Püsküllüoğlu, 2010)

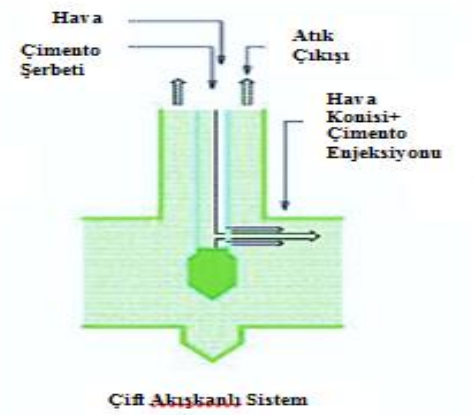
Tek akışkanlı sistemde, yüksek basınçla zemine sadece çimento esaslı enjeksiyon malzemesi enjekte edilmektedir (Şekil 3.5). En basit yöntem olması sebebiyle, uygulamada en çok kullanılan yöntemdir. Bu sistemde genel olarak bir veya iki nozul kullanılmaktadır. Kullanılan enjeksiyon basıncı 300-600 bar aralığındadır.

Çimento enjeksiyonu, zeminin hem ayrıştırılmasında hem de karıştırılarak zemin içerikli beton kolon oluşturulmasında kullanılmaktadır. Tek akışkanlı sistem genellikle gevşek kohezyonsuz zeminler ile düşük kohezyonlu yumuşak killerde uygulanmaktadır. Bu yöntem ile gevşek kumlarda ve çakıllarda 100 cm civarında, yumuşak killerde ise 60-80 cm civarında kolonlar oluşturulur (Erkan, 2013).




**Şekil 3.5.** Tek akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering)

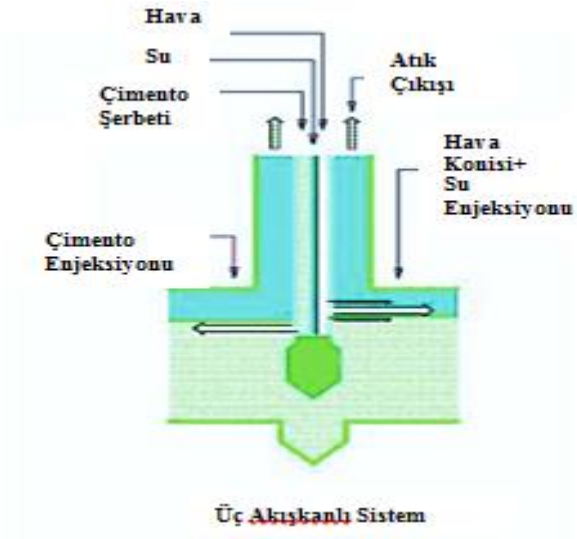
Çift akışkanlı sistem, iki adet iç içe geçirilmiş tij takımı kullanılarak basınçlı hava konisi içinde yüksek basınçlı çimentonun enjekte edilmesidir. Bu sistemde, içteki tij takımından basınçlı enjeksiyon malzemesi, iki tij arasından ise basınçlı hava geçmektedir. Kullanılan 8-12 bar basınçlı hava konisi ile ayrıştırma mesafesi artmaktadır (Şekil 3.6).




**Şekil 3.6.** Çift akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering)

Bu sistemde, kullanılan hava konisi nedeniyle enjeksiyon malzemesinde hapsolmuş havanın bulunması ile mekanik dayanım azalmakta, elde edilen kolon çapı ise hava konisinin aşındırıcı etkisinden dolayı tek akışkanlı sistemde elde edilen kolon çapından %30-70 daha büyük olmaktadır (Lunardi, 1997). Bu sistemde olası nozul tıkanıklıklarını fark etmek için tek nozul kullanımı önerilmektedir. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde tek akışkanlı sisteme göre daha etkilidir.

Üç akışkanlı sistemde, iç içe geçirilmiş üç adet tij kullanılarak yaklaşık 8-12 bar basınçlı hava konisi içinde 300-600 bar basınçlı su jeti ile zemin ayrıştırılmaktadır. Eş zamanlı olarak bu su jetinin hemen altında bulunan nozuldan 30-80 bar basınçlı çimento esaslı enjeksiyon malzemesi enjekte edilmektedir (Şekil 3.7) (Yağızatlı, 2012). Bu yöntem ile elde edilen kolonlar 2 m'nin üzerine çıkabilmektedir. Gevşek granüler zeminlerde 2.5 m, sıkı zeminlerde ise 1.5 m ye kadar kolon çapı elde edilebilir.

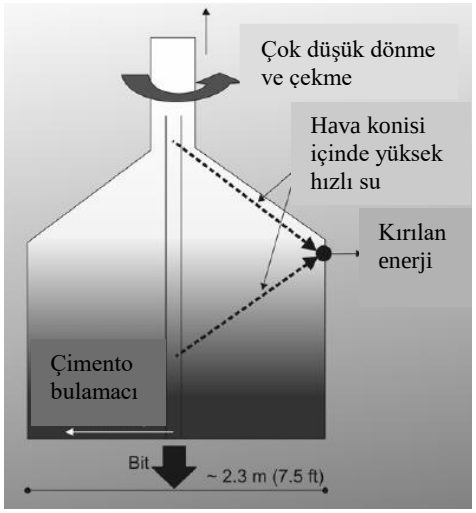



**Şekil 3.7.** Üç akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering)

Aynı su/çimento oranı ve çimento dozajı kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarında, tek akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun mukavemeti çift akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun mukavemetinden daha yüksektir. Bunun sebebi kullanılan hava konisine bağlanmaktadır. Aynı şekilde üç akışkanlı sistem kullanılarak oluşturulan kolonun mukavemeti diğer iki sistem kullanılarak oluşturulan kolonların mukavemetinden daha düşüktür. Bu ise üç akışkanlı sistemde çok miktarda su kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Bu üç sistemin dışında yeni geliştirilen SüperJet ve X-Jet sistemleri gibi jet-grout yöntemleri de vardır. SüperJet sistemi, erozyon kapasitesini 5.0 m'ye kadar

artırmak için özel ekipmanların ve yüksek enjeksiyon enerjisinin kullanıldığı çift akışkanlı bir sistem iken X-Jet sistemi, daha kontrollü ve üniform iyileştirme çapı elde etmek için Şekil 3.8'deki gibi bir çift çarpışan erozyon jeti kullanılan üç akışkanlı bir sistemdir (Burke, 2004).




**Şekil 3.8.** X-Jet sisteminin şematik gösterimi (Burke, 2004)

SüperJet yöntemi, büyük çaplı kolonların yüksek hızla ve düşük maliyetle elde edilebilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu sistemde büyük çaplı nozuldan enjeksiyon malzemesi ve hava yüksek basınçla püskürtülür. Bu yöntemde tij dönme ve çekme hızı düşüktür (Yağızatlı, 2012). (Bell ve ark., 2003) tarafından yapılan çalışmada 3–4 dvr/dk dönme hızı, 7.0 mm/dk çekme hızı, 40 MPa enjeksiyon basıncı kolon parametreleri ile 4.0 m çapa ulaşan jet-grout kolonlar elde edilmiştir.

X-jet yönteminde nozuldan 1 m uzaklıkta kesişecek şekilde konumlanmış bir çift hava-su nozulunun, 2.0-2.5 m çapındaki zemini parçalamak için kullanıldığı bir yöntemdir. Karşılaşma noktasında çarpışmadan dolayı aşındırma enerjisi dağılmakta ve kesme enerjisini büyük ölçüde azalmaktadır. Çimento enjeksiyonu aşındırma nozullarının altında yer alan nozuldan jet-grout kolonunu oluşturmak için zemine enjekte edilir. Çok yumuşak, değişken dayanımda ve tabakalı zeminlerde, bu yöntem belirli geometride kolon oluşturmak için önemli bir avantaj sağlar (Stoel, 2001). Tablo 3.1'de farklı zemin tipleri için jet-grout yöntemine bağlı olarak elde edilebilecek kolon çapları verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Beklenen jet-grout kolon çapları (Burke, 2004)

| Sistem | Yumuşak Killer | Siltler | Kumlar |
|---|---|---|---|
| Tek Akışkanlı | 0.4-0.9 m | 0.6-1.1 m | 0.8-1.2 m |
| Çift Akışkanlı | 0.9-1.8 m | 0.9-1.8 m | 1.2-2.1 m |
| SüperJet | 3.0-4.3 m | 3.3-4.6 m | 3.5-5.0 m |
| Üç Akışkanlı | 0.9-1.2 m | 0.9-1.4 m | 0.9-2.5 m |
| X-Jet | 2.3 m | 2.3 m | 2.3 m |

Uygulanacak jet-grout yönteminin seçimi için ise sistemin avantajları ve dezavantajları beraber değerlendirilmelidir. Bunun için (Burke, 2004) yaptığı çalışmada jet-grout sistemlerini ve imalat parametrelerini analiz etmiş ve jet-grout sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarını Tablo 3.2'deki gibi sıralamıştır.

**Tablo 3.2.** Jet-grout sistemlerinin avantaj ve dezavantajları (Burke, 2004)

| Sistem | Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|---|---|
| Tek Akışkanlı | • En kolay sistem olası ve ekipman kullanılması,<br>• Kohezyonsuz zeminler için uygundur. | • En küçük geometride kolon elde edilir.<br>• Kabarma kontrolü çok zordur.<br>• Kohezyonlu zeminlerde kalite kontrol zordur. |
| Çift Akışkanlı | • En kolay değerlendirilen sistem,<br>• Ekipman ve takımları kullanılabilirliği,<br>• Yüksek enerji ve iyi geometri elde edilmesi,<br>• En iyi tecrübe,<br>• Genellikle en ekonomik sistem, | • Kohezyonlu zeminler kabarma kontrolü çok zordur.<br>• Atık tutma zor olabilir.<br>• Genellikle alttan desteklemede kullanılmaması, |
| Üç Akışkanlı | • En kontrol edilebilir sistem,<br>• Zor zeminlerde en yüksek kalite,<br>• En iyi temel destekleme sistemi,<br>• En kolay kabarma ve atık kontrolü, | • Karmaşık sistem ve ekipmanlar,<br>• Özel tecrübe gereklidir. |
| SüperJet | • İyileştirilen birim hacim için en ucuz,<br>• En iyi karıştırma sağlanır. | • Özel ekipman ve araçlar,<br>• Kohezyonlu zeminlerde kabarma kontrolü zordur.<br>• Atık tutma zordur.<br>• Desteksiz yüzeye yakın çalışılamama,<br>• En yüksek lojistik problem, |
| X-Jet | • Geometri emniyeti,<br>• Yumuşak kohezyonlu zeminler için en uygun, | • Günlük kalibrasyon gereken çok özel ekipmanlar,<br>• Sınırlı tecrübe, |

### 3.1.3. Jet-Grout Yöntemini Etkileyen Parametreler

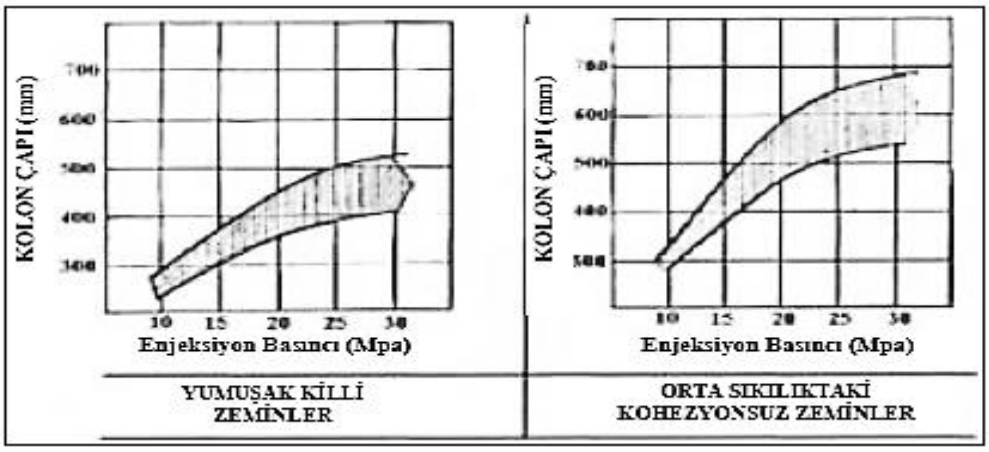
Jet-grout kolonlar kullanılarak yapılan zemin iyileştirmesinde imalat aşamasında seçilen parametreler son derece önemlidir. Projede belirtilen çap, boy ve dayanımda kolonlar elde etmek için zemin koşullarına uygun jet-grout yönteminin ve

parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Jet-grout yönteminin bağlı olduğu ana parametreler enjeksiyon basıncı, enjeksiyon malzemesinin özellikleri, tij takımının dönme ve çekme hızı, nozul çapı ve sayısı olarak sayılabilir.

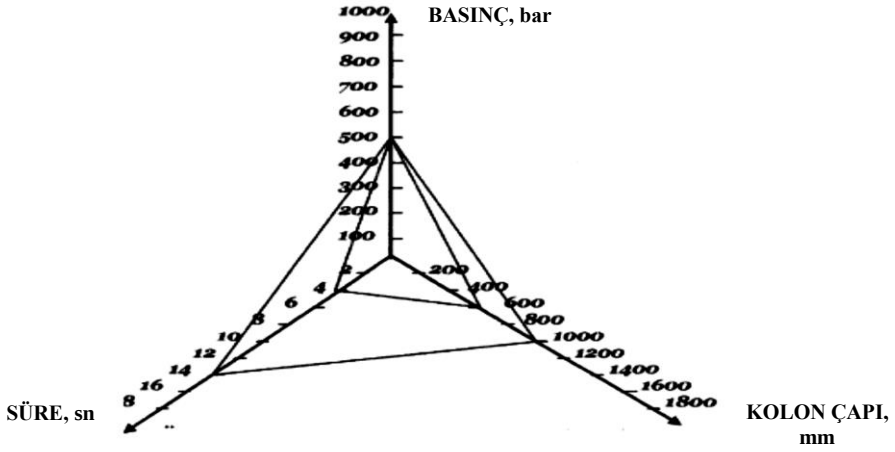
### a) Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncı jet-grout kolonların etkinliğini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Enjeksiyon basıncı ile elde edilen kolon çapı arasında doğrudan bir ilişki olduğu yapılan araştırmalarla belirlenmiştir. Genellikle enjeksiyon basıncındaki artış, kolon çapında artışa neden olmaktadır. (Shibazaki, 2003) tarafından yapılan çalışmada seçilen enjeksiyon basıncının, zemini parçalamak için zeminin serbest basınç dayanımını aşması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun dışında seçilen enjeksiyon basıncı çok yüksek olursa bu basınç üzerindeki yapıları kaldırabilir veya zeminde yırtılmalara neden olabilir. Tam tersi eğer enjeksiyon basıncı yetersiz kalırsa bu durumda da yetersiz kolonlar elde edilebilir. Bu nedenle maksimum enjeksiyon basıncı yapısal dayanım parametreleri göz önünde bulundurularak seçilmelidir.

(Xanthakos ve ark., 1994) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen zemin tipine bağlı olarak enjeksiyon basıncı ile kolon çapı ilişkisi Şekil 3.9'da verilmiştir. Bunun dışında aynı çap ve süreklilikte jet-grout kolonlar elde etmek için enjeksiyon uygulama süresi de etkili olmaktadır (Şekil 3.10).




**Şekil 3.9.** Zemin tipine bağlı olarak oluşturulan kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos ve ark., 1994)




**Şekil 3.10.** Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi (Melegari ve Garassino, 1997)

Kullanılan enjeksiyon basıncına bağlı olarak jet-grout imalatı üç sınıfa ayrılabilir (Yağızatlı, 2012). Bunlar;

- Düşük basınçlı enjeksiyonlar (150-200 bar),
- Orta basınçlı enjeksiyonlar (250-350 bar),
- Yüksek basınçlı enjeksiyonlardır (400-650 bar).

### b) Su/Çimento Oranı ve Dozaj

Jet-grout imalatı için saha uygulamalarında en çok kullanılan su/çimento oranı 1.0'dir. Enjeksiyon su/çimento oranındaki artış dayanımda azalmaya neden olmaktadır. Ancak seçilen su/çimento oranı zemin tipine, uygulanan jet-grout yöntemine ve istenilen kolon dayanımına bağlı olarak değişebilir. (Baumann, 1984) tarafından yapılan çalışmada farklı zemin tiplerinde oluşturulan jet-grout kolonlarının, su/çimento içeriğine bağlı olarak, serbest basınç mukavemetlerindeki değişim Tablo 3.3'te yer almaktadır. Bu tabloya göre jet-grout kolonların basınç dayanımı 3-20 MPa aralığında değişmekte olduğu görülmektedir.

**Tablo 3.3.** Su/çimento oranı bağlı olarak kolon dayanım değerleri (Baumann, 1984)

| Kolon Basınç Dayanımı, Mpa | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zemin Tipi** | **Çakıl** | **Kum** | **Silt,Kil** | **Organik Zemin** | **Çakıllı Kumlu** | **Kumlu Siltli** | **Siltli Killi** |
| S/Ç Oranı= 0.67 | ≤20 | ≤15 | ≤12 | ≤3 | 12-18 | 10-14 | 6-10 |
| S/Ç Oranı= 1.00 | ≤20 | ≤15 | ≤12 | ≤3 | 6-10 | 5-7 | 3-5 |

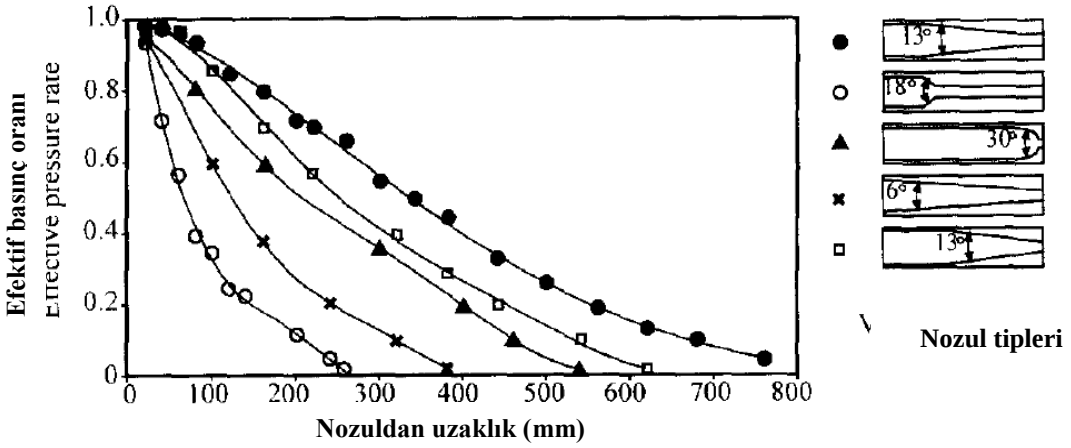
Saha uygulamalarında enjeksiyon malzemesinin özgül ağırlığı genellikle 1,410-1,570 kg/$m^3$ alınmaktadır. Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu oluşturulan kolon geometrisini etkilemektedir. Yüksek viskoziteli akışkanlar, düşük viskoziteli akışkandan daha fazla dağılmaktadır. Bu da akışkanın odaklanmasını azaltmakta ve aşındırma enerjisini etkilemektedir. İyileştirilmiş 1 $m^3$ zemin içindeki çimento miktarı ise 350-700 kg arasında değişmektedir (Yağızatlı, 2012).

**c) Hava konisi**

Akışkan malzemenin basınçlı hava konisi içinde enjekte edilmesi kesme enerjisini 5 kat artırır (Burke, 2004). Bu durumda elde edilen kolon çapında artış gözlemlenirken, enjeksiyon malzemesinin içinde bulunan hapsolmuş hava nedeniyle dayanımda kayıplar meydana gelebilir.

**d) Nozul çapı, şekli ve sayısı**

Nozul şekli ve çapı başarılı bir jet-grout yöntemi için önemli faktörlerdir. Nozul, jet akışkanın olabildiğince uzun dağılmadan kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Çünkü jetin dağılması jetin etkinliğini azaltır ve istenen çapın hassaslığını bozar. (Shibazaki, 2003) yapmış olduğu çalışmada farklı geometrilere sahip nozulların etkinliğini karşılaştırmıştır ve Şekil 3.11'de yer alan 13º daralma açısına ve çıkış noktasında nozul çapının 3 katı uzunluğunda doğrusal parçası bulunan nozul kullanımını tavsiye etmiştir. Nozul sayısı, zemin tipine ve jet-grout yöntemine bağlı olarak seçilmelidir. Nozulların tıkanma olasılığı bulunduğu zeminlerde eğer çift nozullu tij kullanılırsa imalat esnasında tıkanıklığı belirlemek mümkün olmayabilir. Bu da projede istenilen kolon parametrelerin elde edilememesine neden olur. Tıkanıklık durumunun kolay fark edilebilmesi için bu tür zeminlerde tek nozul kullanımı önerilmektedir.

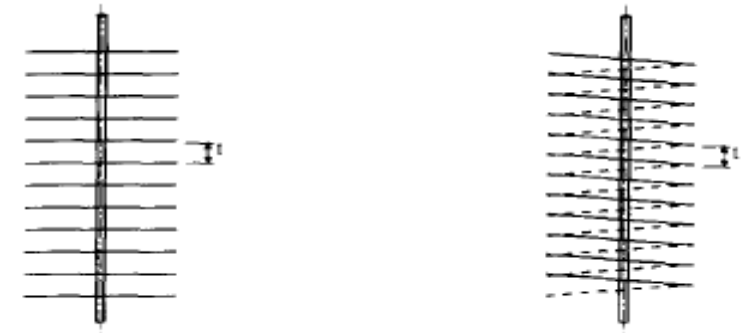



**Şekil 3.11.** Jet ekseninde nozul daralma açısının dinamik basınç üzerindeki etkisi (Shibazaki, 2003)

### e) Tij Dönme Hızı ve Çekme Hızı

Jet-grout kolonların homojen olması ve belirli bir çapta olması için tijin belirli bir dönme hızına sahip olması; istenilen derinlik boyunca sürekli olması için ise belirli bir çekme hızı ile zemin yüzeyine çekilmesi gerekmektedir. Tij dönme hızı genellikle 5-30 devir/dk arasında değişmektedir (Erkan, 2013).

Jet-grout kolonların sürekliliği için tij ne çok hızlı ne de çok yavaş çekilmelidir. Tijin çekilmesi için kademeli çekme ve sürekli çekme olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır (Şekil 3.12).



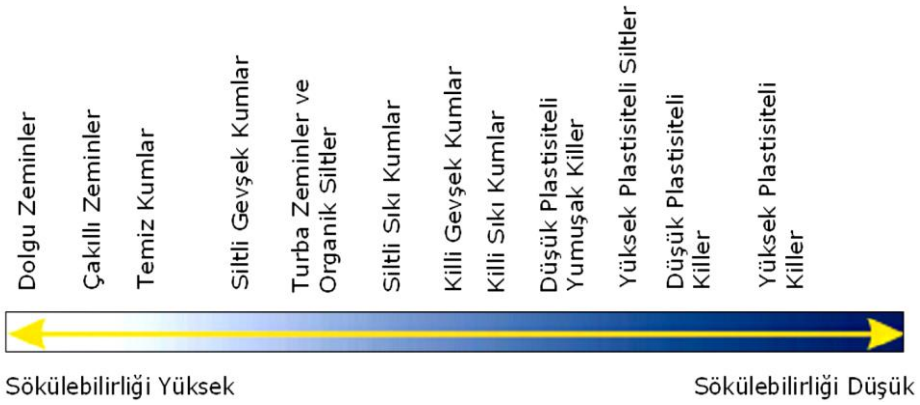

**Şekil 3.12.** Çekme metotları (Shibazaki, 2003)

Kademeli çekmede en iyi sonuç tijin her kademede 4 cm ilerlemesi ve 5-11 sn beklemesi ile elde edilmektedir. Sürekli çekmede ise tij sabit bir çekme hızı ile yukarı çekilmektedir. Eğer tij çok hızlı yukarı çekilirse spiral kolon oluşabilir. Çok yavaş çekilmesi durumunda ise enjeksiyon malzemesinin fazla kullanımı nedeni ile gereksiz maliyetler doğmaktadır. Enjeksiyon tijinin çekme ve dönme hızları zemin tipine bağlı

olarak değişmektedir. Kohezyonsuz zeminler kolay ayrışma özelliklerinden dolayı kolon oluşturma süresi kısalırken, kohezyonlu zeminlerde bu süre artmaktadır. (Okyay, 1987) yaptığı çalışmada enjeksiyon tijinin çekme hızını, zemin tipine bağlı olarak gevşek kum, çakıl içeren zeminlerde 5 sn/4 cm, orta sıkılıkta çakıl içeren zeminlerde 12-17 sn/4 cm, siltli zeminlerde ise 18-120 sn/4cm olarak belirtmiştir.

### f) Zemin tipi ve tabakalanma durumu

Zemin tipi ve tabakalanma durumu jet-grout sisteminin uygunluğunun belirlenmesinde etkili olan parametrelerdir. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi farklı zemin tipleri farklı aşınabilme özelliği sergilemektedir. (Burke, 2004) tarafından yapılan çalışmada kohezyonsuz zeminlerin kohezyonlu zeminlere göre daha kolay aşındırılabileceği belirtilmiştir. Aynı zamanda yüksek plastik killerin kohezyon etkisi nedeniyle daha zor aşındığı belirtilmiştir.



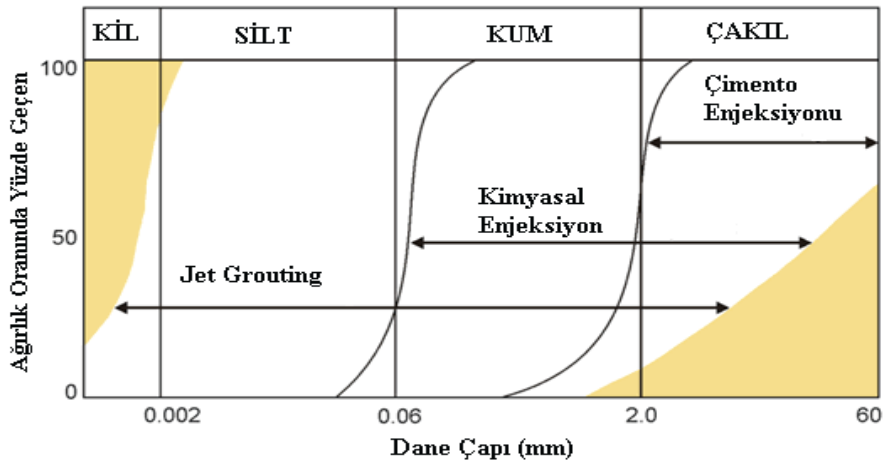

**Şekil 3.13**. Zeminlerin aşınabilme özellikleri

Farklı zemin tiplerinin aşındırabilme özellikleri birbirinden farklı olduğu için zeminin tabakalanma durumu, jet-grout kolon parametrelerinin ve kolon kalitesinin değişimine neden olur. Örneğin, kohezyonsuz zeminlerde taneler arasında bağlayıcılık özelliği bulunmadığından kolay parçalanırken, plastik killer ise genellikle küçük parçalara ayrılırlar. Bunun sonucunda ise nozul ağzında tıkanma meydana gelebilir ve kolon geometrisi kontrol edilemeyebilir. Farklı zemin tiplerinde oluşturulan su/çimento oranı 1.0 ve çimento dozajı 450 kg/m$^3$ olan jet-grout kolonların taşıma güçleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3.4.** Farklı zemin tiplerinde oluşturulan jet-grout kolon taşıma kapasiteleri (Melegari ve Garassino, 1997)

| Zemin Türü | Jet-grout Kolon Taşıma Kapasitesi ($kg/cm^2$) |
|---|---|
| Organik içeriği çok olan zeminler | 3 |
| Kil | 18-30 |
| Silt | 30-45 |
| Kum | 60-90 |
| Çakıl | 100 |

Şekil 3.14'te zemin tipine bağlı olarak kullanılan iyileştirme yöntemleri yer almaktadır. Buradan da görüldüğü gibi jet-grout yöntemi hemen hemen bütün zemin tiplerinde uygulanabilmektedir. Ancak iyileştirme yapılacak zemin özelliklerinin SPT, CPT, vb. arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ile detaylı olarak belirlenmesi gerekmektedir.




**Şekil 3.14**. Zemin cinslerine göre enjeksiyon uygulama aralığı (Keller)

Arazide uygulama projesinde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için proje bölgesinde önceden deneme kolonları yapılmalıdır. Oluşturulan deneme kolonlarının üzerinde yapılan basınç testleri ile dayanım kontrolleri yapılmaktadır. Deneme kolonlarının yapıldığı sahada yapılan kazı ile kolon çapı, boyu ve süreklilik durumu belirlenmektedir. Bu kontrollerden elde edilen veriler ile projede istenilen değerlerin karşılaştırılması ile seçilen parametrelerin uygunluğu belirlenmektedir. Ayrıca deneme kolonları ile uygunluğu belirlenen parametrelerin seçiminde son olarak maliyetin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

### 3.1.4. Jet-Grout Yönteminin Uygulamadaki Yeri

Jet-grout yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar ve vaka analizleri incelendiğinde bu yöntemin bütün dünyada etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntem ile zeminin mekanik mukavemet değerlerinin arttırılmasını yani taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artırılması, geçirgenliğin azaltılması hedeflenmektedir.

Başlıca kullanım alanları zeminin taşıma kapasitesini artırmak, yeni ve mevcut temellerin oturmalarını azaltmak, şev stabilitesini sağlamak, açık kazı ve yer altı kazılarını desteklemek ve barajlarda sızdırmazlık perdesi oluşturmak, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini azaltmak olarak sayılabilir (Malinin ve ark., 2010). Bunların dışında olarak kullanım alanları aşağıdaki maddeler halinde genişletilebilir.

- Mevcut veya yeni temellerin takviyesinde ve tarihi bina temellerinin güçlendirilmesi,
- Kesişen kolonlar oluşturarak geçirimsizlik perdesi oluşturulması ve temel tabanında kazı alanına gelecek yeraltı suyunun kontrolünü sağlamak,
- Yumuşak zeminlerdeki tünel inşaatlarının desteklenmesi,
- Kazı çevresindeki zeminin desteklenmesi ve kazı tabanında yeraltı suyunun kazı alanına girmesinin engellenmesi,
- İstinat duvarlarının takviyesi,
- Atık sahalarında geçirimsizliğin sağlanmasıdır.

### 3.1.5. İmalat Esnasında ve Sonrasında Kalite Kontrol

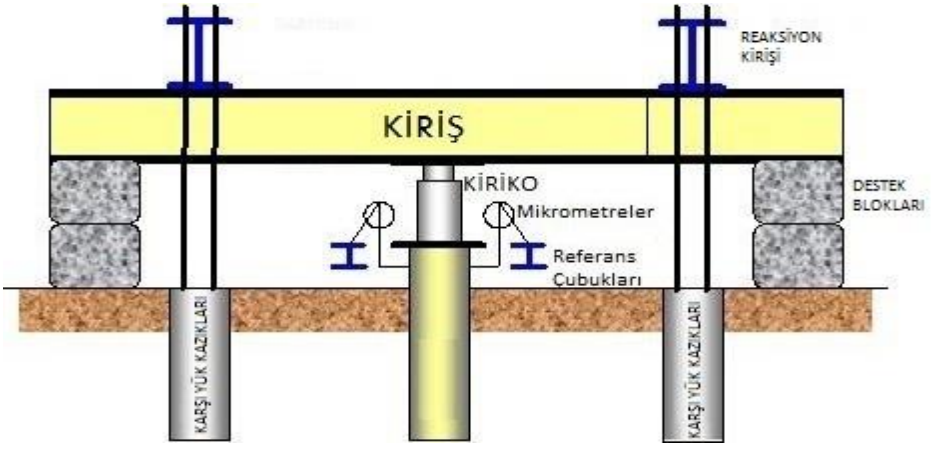
Jet-grout yönteminin iyi bir şekilde belirlenebilmesi için imalat öncesinde zemin parametrelerinin arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ile detaylı bir şekilde belirlenmesi, zeminin mekanik olarak modellenmesi, zemine gelecek yüklerin ve yükleme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra uygulanacak jet-grout kolonlarının zemin iyileştirme elemanı olarak ya da taşıyıcı yapısal eleman olarak tasarlanacağı belirlenmelidir. Bu aşamalardan sonra jet-grout kolon imalat parametrelerinin belirlenmesi ve saha uygulaması gerçekleştirilmelidir.

İmalat esnasında bir miktar enjeksiyon malzemesinin tij takımının etrafından zemin yüzeyine taşması görülebilir. Bu durum zemin içerisinde aşırı basınç oluşmadığını gösterir. Aşırı basınç oluşması halinde basıncın fazlası delme borusu çapı

ile delinen delik çapı farkından oluşan boşluklardan dışarı kaçar. Aşırı basınç zeminde kırılmalara neden olurken, kolonlarda süreksizlik ve üst yapıda problemler meydana gelir. Bu da kolonlardan beklenen performansın alınamamasına neden olur. Bu sorunun yaşanmaması için debi miktarının azaltılması ve enjeksiyon basıncının düşürülmesi gibi önlemler alınabilir (Erkan, 2013).

İmalat sonrasında jet-grout kolonlarının proje kriterlerine uygun olup olmadığının kontrolü için deneme kolonları üzerinde yapılan kalite kontrol testleri önemli bir etmendir. Bunun için öncelikli olarak jet-grout kolonlardan en az 28 gün sonra karot numuneler alınmalıdır. Bu karot numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri ile kolonların mukavemeti ve elastisite modülü belirlenebilir. Ayrıca kolon tüm boyundan alınan karotlar ile kolon süreklilikleri belirlenebilir.

Eğer bu kolonlar geçirimsizlik sağlamak için yapılmış ise, kolonlardan alınan karot deliklerinde sabit seviyeli permeabilite deneyi yapılabilir. Taşıyıcı eleman olarak tasarlanan jet-grout kolonları üzerinde kolon yükleme ve çekme deneyleri yapılmaktadır (Şekil 3-15). Yükleme deneyinde test kolonlarına proje yükünün en az 1.5 katı kadar deney yükü uygulanmalıdır. Kolonlar göçene kadar ya da maksimum kabul edilebilir oturma miktarı meydana gelene kadar deneye devam edilir. Kolon göçme yükü olarak, yük artmadığı halde oturmaların devam ettiği yük değeri ya da kolon çapının %10'u kadar toplam oturma oluşturan yük değeri alınabilir. Bu deney esnasında kolona ait yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilebilir (Yağızatlı, 2012).




**Şekil 3.15.** Jet-grout kolon yükleme deneyi şematik gösterimi (http://www.zeminarastirma.com)

Kolonun boy ve kesitindeki düzensizlikleri tespit etmek amacıyla Pile Integrity test yapılır (Şekil 3.16). Bu yöntem ile zemini açmadan yeraltındaki kolonun yapısı ve problemleri belirlenebilmektedir. Kazık süreklilik deneyi, kazığın üst kesimine küçük

bir çekiç ile vurarak kazığın üstüne yerleştirilmiş olan ivmeölçerle bir yansıma sinyali kaydı alınması esasına dayanır. Aynı deney jet-grout kolonlar üzerinde de uygulanabilir. Bu yöntem ile kolonda düzensizlik tespit edilmez ise kolon boyu da belirlenebilir (Küçükali, 2008).



**Şekil 3.16.** Pile integrity test (https://diskmal.wordpress.com/tag/loading-test/)

Jet-grout kolon çapının projede öngörülen kolon çapını sağlayıp sağlamadığının kontrolü için jet-grout kolonların etrafı açılarak kolon çap ölçümleri yapılarak belirlenmektedir. Aynı zamanda zeminin tabakalanma durumuna bağlı olarak kolon çapındaki değişim de bu deneme kazısı ile belirlenebilir (Şekil 3.17).



**Şekil 3.17.** Deneme kazısı ile çap ve süreklilik kontrolü (Keller-Ground-Engineering)

### 3.2.Sülfatın Beton Üzerindeki Etkisi

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur. Beton, agrega, çimento, su ve mineral katkılardan oluşan bir yapı malzemesidir. Ucuz maliyet, dayanım ve imalat üstünlükleri betonun yapı malzemesi olarak çok tercih edilmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, son yıllarda beton üretim yöntemlerindeki ve kullanılan katkı malzemelerindeki önemli gelişmeler ile beton dayanımında önemli artışlar elde edilmiştir. Böylece kullanım yeri ve amacına bağlı olarak farklı tiplerde beton üretilebilmektedir.

Beton bileşim malzemelerinden agrega, çimento ve su ile beraber beton yapımında kullanılan kum, çakıl, kırma taş gibi daneli malzemedir. Agrega, beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturmakta ve beton dayanımına katkı sağlamanın yanında, büzülme çatlaklarını önlemektedir. Bu nedenle kullanılacak agreganın sert, dayanıklı ve temiz olmasına dikkat edilmelidir.

Betonun en önemli bileşeni ise çimentodur (Erdoğan, 2003). Çimento, kalker ve kil karışımı hammaddelerin 1,300-1,500 °C pişirilmesi ile ortaya çıkan klinkerin çok az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonucu elde. Çimento hammaddeleri, kireç (CaO), silika ($SiO_2$), alümina ($Al_2O_3$) ve demir oksittir ($Fe_2O_3$). Yüksek sıcaklıkta bu hammaddeler trikalsiyum silikat ($C_3S$, Alit), dikalsiyum silikat ($C_2S$, Belit), trikalsiyum alüminat ($C_3A$, Alüminat) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF$, Ferrit) gibi daha karmaşık ürünler meydana getirir.

Beton üretiminde bir diğer önemli malzeme ise karışım suyudur. Karışım suyu, kuru haldeki çimento ve agreganın karıştırılıp plastik ve işlenebilir bir yapı haline getirilmesi ve çimento ile etkileşim sonucu betonun dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle kullanılan karışım suyunun temiz olması ve beton yapısına zarar verecek iyonlar bulundurmaması gerekmektedir. Kullanılacak karma suyunun özellikleri (TS-EN-1008, 2003) kriterlerine uygun olmalıdır.

Çimentonun su ile etkileşimi sonucunda hidratasyon reaksiyonları meydana gelir ve bu reaksiyonlardan oluşan ürünler nedeniyle beton bağlayıcılık ve dayanım kazanmaya başlar. Çimento ve suyun oluşturduğu karışım malzemesi çimento hamuru olarak adlandırılmaktadır. Çimento hamurunun görevi, agrega yüzeyini kaplamak, boşlukları doldurmak ve bağlayıcılık sağlamaktır.

Beton dayanımı başlıca su/çimento oranı, karma suyu özellikleri, kullanılan çimento miktarı ve çimento bileşenleri ve beton yaşı gibi parametrelere bağlıdır.

Su/çimento oranındaki artış, beton porozitesini artırır. Buna bağlı olarak betonun dayanımı düşer ve beton içerisine boşluk suyunda ya da ortamda bulunan zararlı maddelerin girişi kolaylaşır. Kullanılan agreganın dane boyutu, dane şekli, danelerin yüzey dokusu, dayanımı ve agregada bulunan zararlı maddeler de aynı şekilde beton dayanımını etkilemektedir. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi ve inceliği, çimentonun hidratasyon hızına ve oluşan hidratasyon ürünü miktarına etki ederek dayanımı etkilemektedir.

Bunlara ek olarak, beton dayanımı, bulunduğu ortam koşullarından etkilenen bir yapı malzemesidir. Betonun durabilitesini ve servis ömrünü etkileyen önemli faktörlerden biri sülfat etkisidir. Sülfat etkisi, ortamdaki sülfat iyonları ile hidrate çimento harcındaki mineraller arasındaki fiziko-kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak betonun bozulması olarak tanımlanabilir. Sülfat etkisi mekanizması oldukça karmaşık olduğu için tam olarak anlaşılamamakta ve beton içerisinde kimyasal reaksiyonlar farklı şekillerde meydana geldiği için sülfat etki mekanizması ile ilgili sayısız teori ortaya atılmaktadır.

Başlıca sülfat kaynakları deniz suyu ve yer altı suyudur. Yer altı suyundaki sülfat, çoğunlukla zemindeki doğal minerallerden kaynaklanır ve sıcak mevsimlerde buharlaşma nedeniyle sülfat konsantrasyonunda artışı meydana gelebilmektedir. Ayrıca zeminde bulunan bazı bakteriler, zemine atılan gübreler, endüstride yüksek sülfür yakıtların yakılması ile oluşan asit yağmurları, bazı kimyasal fabrikalardan çevreye atılan sülfat tuzları, atık depolama alanları, lağım suları, vb. diğer sülfat kaynaklarıdır (Xu ve ark., 1998).

Sülfat etkisi, çimento kimyası, çimento inceliği, su/çimento oranı, puzolan ya da çimentolaşma malzemesi kullanımı, betonla etkileşimdeki sülfat konsantrasyonu, sülfat katyon tipi, kimyasal katkı kullanımı, kür tipi ve ortam sıcaklığı gibi etkilere bağlıdır (Santhanam ve ark., 2001). Çimento hidratasyon ürünleriyle sülfatın reaksiyonu ile betonda hacim artışına neden olan yeni ürünler meydana gelir. Hacim artışı, sertleşmiş betonda çatlak oluşumuna neden olur. Betonda oluşan bu yeni çatlaklar, betonun geçirgenliğini artırarak daha fazla zararlı maddenin beton içerisine girmesine yol açar. Böylece betonun sülfatla etkileşimi sonucunda betondaki bağlayıcılık özelliği gösteren maddelerin başka ürünlere dönüşmesi ve beton içerisine yeni zararlı madde girişinin hızlanması ile betonun servis ömrünü azalır (Shalky ve ark., 2002).

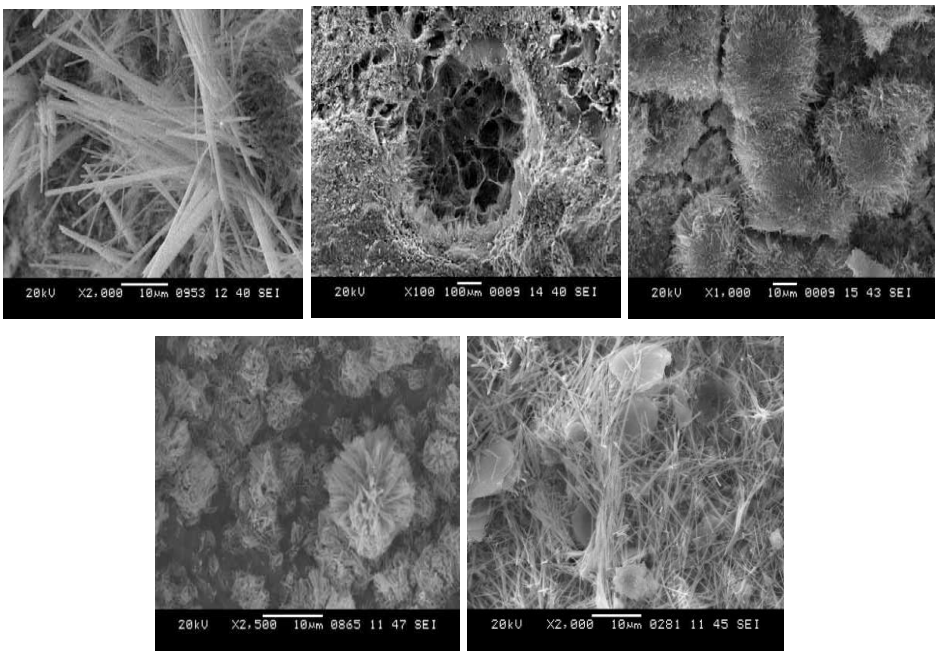
Bu nedenle beton elemanın oluşturulacağı ortam koşullarının derinlemesine araştırılması ve eğer ortamda sülfat bulunuyorsa beton karışım malzemesi olarak kullanılacak malzeme seçiminin dikkatli yapılması gerekmektedir.

### 3.2.1. Sülfat Etkisi Sonucu Oluşan Yeni Ürünler

Çimento hidratasyon ürünleri ile sülfat iyonları arasındaki reaksiyon sonucunda, betonda sülfat kaynağına bağlı olarak alçıtaşı, etrenjit, tomasit, brüsit, vb. ürünler meydana gelmektedir. Bu ürünlerin ortak özelliği, betonda hacimsel artışa sebep olmaları ve hacim artışına bağlı olarak betonda bozulmaya ve ayrışmaya yol açmalarıdır.

Alçıtaşı, taze betonda hidratasyon reaksiyonları esnasında prizi ayarlamak için klinkerle beraber öğütülerek kullanılmaktadır. Sertleşmiş betonda ise sodyum sülfat ve magnezyum sülfat içerikli suyun varlığıyla sülfat iyonları beton içine penetre olur ve alçıtaşı oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer. Sodyum sülfat çözeltisinde yüksek sülfat iyonu konsantrasyonlarında (>8,000 ppm $SO_4^{-2}$) sülfat etkisinin başlıca ürünü alçıtaşıdır. Alçıtaşı oluşumuna bağlı bozulma, yüzey soyulması ve genleşme olarak meydana gelmektedir. Beton yüzeyin yumuşaması ve dağılmasından dolayı betonda kütle kaybı meydana gelmesi sülfat etkisine maruz yapılarda gözlenen yaygın zarar türleridir (Santhanam ve ark., 2001).

Etrenjit, çimento hidratasyon reaksiyonun ve betondaki klasik sülfat etkisinin karakteristik bir reaksiyon ürünüdür. AFt ($Al_2O_3$-$Fe_2O_3$-tri) faz grubunun bir üyesi olarak tanımlanan etrenjitin genel formülü $[Ca_3(Al,Fe)(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot X_3 \cdot nH_2O$'dır. Bu formüldeki X'in, $SO_4^{-2}$ veya $CO_3^{-2}$ olmasına göre etrenjit veya karbonatlaşmış etrenjit olarak isimlendirilmektedir. İğneli veya uzun çubuk şeklinde kristal yapılıdır. Etrenjit morfolojisi, su/çimento oranına, oluştuğu boşluk boyutuna ve yapısına, sülfat konsantrasyonuna, oluşum zamanına ve yaşına, ortam sıcaklığı ve nem durumuna bağlıdır. Şekil 3.18'de farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristalleri yer almaktadır (Tosun, 2007).



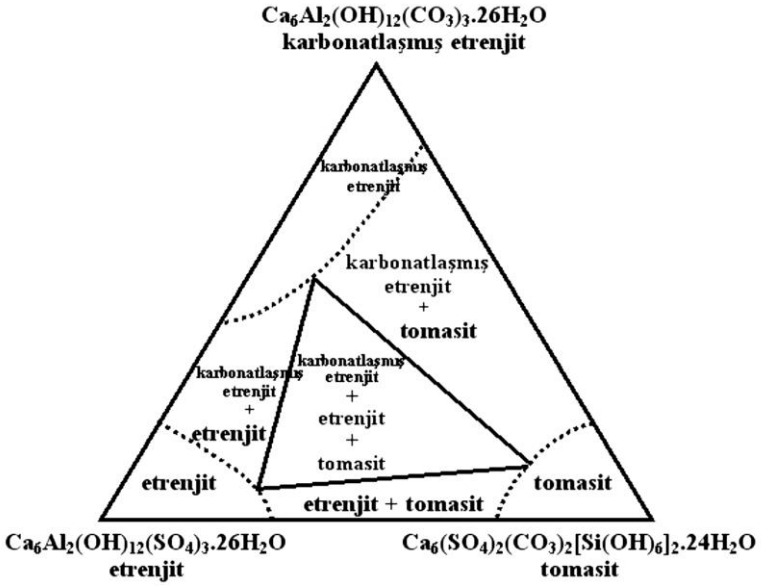

**Şekil 3.18.** Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristallerinin SEM görüntüsü (Tosun, 2007)

Hidratasyon aşamasında çimentonun trikalsiyum alüminat ($C_3A$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF$) bileşenlerinden ayrılan kalsiyum ($Ca^{+2}$) ve alüminyum hidroksit ($AL(OH)_4^-$) iyonları ile alçıtaşından çözünen sülfat ($SO_4^{-2}$) iyonunun reaksiyonu ile taze betonda oluşan etrenjit sertleşmiş betona herhangi bir zarar vermemektedir (erken etrenjit oluşumu, birincil etrenjit). Ancak sonradan beton bünyesine giren sülfat iyonları nedeniyle sertleşmiş betonda oluşan etrenjit, genleşme etkisi nedeniyle betonda bozulmalara sebep olur.

Etrenjit oluşum mekanizması çimentonun alüminatlı bileşenleri etrafındaki pH değeri ile değişmektedir. Düşük pH değerlerinde (pH<10.7) alüminat bileşenlerinin etrafında $Al(OH)_4^-$ açısından zengin ince bir sıvı çözelti oluşur. Alçıtaşından çözünen $SO_4^{-2}$ ile $Al(OH)_4^-$ reaksiyonu ile etrenjit oluşur (Tosun, 2007).

Yüksek pH değerlerinde (pH>10.7) ise bu sıvı çözelti tabakası çok incedir ve etrenjit $C_3A$ bileşenlerinin etrafında oluşur. Bunun sonucunda katı bir tabaka oluşarak alüminanın reaksiyonu engellenir. Böylece $C_3A$'nın hidratasyonu gecikir ve çimento hamurunun işlenebilirliği korunur. Bu yolla oluşan reaksiyon *topokimyasal* olarak adlandırılır (Tosun, 2007).

Etrenjit kristali oda sıcaklığında stabildir. Ancak uygun ortam koşullarının oluşması durumunda, Şekil 3.19'da görüldüğü gibi diğer fazlara dönüşebilmektedir. Bu durumun meydana gelmesinde sıcaklık ve nem durumu, boşluk suyu bileşimi ve karbonatlaşma önemli rol oynamaktadır.




**Şekil 3.19.** 20°C'de Etrenjit Yapılı Fazların Stabilite Diyagramı (Tosun, 2007)

Yukarıda bahsedilen durumların dışında, dışarıdan sülfat girişi olmaksızın, sertleşmiş betonda zaman içinde etrenjit oluşumu meydana gelebilir. Bu durum *gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO)* olarak adlandırılmaktadır. Gecikmiş etrenjit oluşumu buhar kürü görmüş veya servis süresi boyunca yüksek sıcaklığa maruz kalmış yapılarda meydana gelmektedir. Buhar kürü esnasında yüksek sıcaklık nedeniyle etrenjit ayrışmakta ve açığa çıkan sülfat kalsiyum silika hidrate (CSH) yapısı tarafından tutulmaktadır. Sonradan normal koşulların oluşması suyun varlığı ile sülfat iyonları CSH yapısından ayrılarak sertleşmiş betonda etrenjit oluşturur. Bunun sonucunda ise sertleşmiş betonda heterojen genleşmeye bağlı çatlaklar ve parçalanmalar meydana gelmektedir.

Sülfat etkisi sonucunda oluşan bir diğer ürün ise tomasittir. Tomasit ($CaCO_3.CaSO_4.CaSiO_4.15H_2O$), genellikle 15°C'den düşük sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Etrenjit yapısındaki alüminyum (Al) ile silisin (Si) yer değiştirmesi ile etrenjit tomasite dönüşmektedir. Tomasit, etrenjit kristaline çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın yapısında $Al_2O_3$ yerine $SiO_2$ bulunmaktadır. Tomasit oluşumu kalsiyum silika hidrate (CSH) jeli ile $SO_4^{-2}$, $CO_2$ veya $CO_3^{-2}$ ve su arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelir (Santhanam ve ark., 2001).

Eğer sülfat iyonları betona dışarıdan etki ediyorsa, bozulma beton yüzeyinden başlar ve içeriye doğru ilerler. Genleştirici etkisi etrenjite kıyasla daha az olup, yaklaşık %45'i kadardır. Fakat tomasit oluşumu CSH jelini tükettiği için alçıtaşı ve etrenjit

oluşumundan daha zararlıdır ve betonun bağlayıcılık özelliğinin ortadan kalkmasına neden olmaktadır (Şekil 3.20).



**Şekil 3.20.** Tomasit oluşumuna bağlı betonda ve prefabrik istinat duvarında oluşan bozulma (Rahman ve Bassuoni, 2014)

Tomasit normal ortam koşullarında ender görülen bir sülfat etkisi ürünüdür. Tomasit oluşumu için gerekli olan silika, mika ve feldispar gibi ayrışmış agregadan veya CSH jelinden gelebilir. İnce toz kalsiyum ve magnezyum karbonat içeren beton, sülfat etkisi sonucu tomasit oluşumuna daha yatkındır. Karbonat tozları reaksiyon için karbon iyonlarını sağlamaya yardım eder (Xu ve ark., 1998). Tomasit oluşumu için iki olası yol vardır: doğrudan ve dolaylı. (3.1)'de yer alan doğrudan oluşumda tomasit, nem ve serbest sülfat iyonları varlığında kalsit ile CSH arasındaki reaksiyon sonucunda oluşur (Rahman ve Bassuoni, 2014).

$$SO_4^{-2} + 3Ca^{+2} + CO_3^{-2} + SiO_3^{-2} + 15H_2O \rightarrow 3CaO.SiO_2.CO_2.SO_3.15H_2O \quad \textbf{(3.1)}$$

Dolaylı oluşumda, etrenjit tomasit oluşumunda öncü olarak davranır. Sülfat iyonları taşıyan nemin varlığında önce etrenjit oluşur ve sonra (3.2)'deki gibi etrenjit ile CSH ve karbonat/bikarbonat reaksiyona girer ve tomasit oluşur (Rahman ve Bassuoni, 2014).

$$\underset{\text{(Etrenjit)}}{C_3S_2H_3} + C_6AS_3H_{32} + 2CC + 4H \rightarrow \underset{\text{(Tomasit)}}{2C_3S.CSH_{15}} + CSH_2 \quad \textbf{(3.2)}$$

Betonun maruz kaldığı ortamda magnezyum iyonunun bulunması halinde ise, beton yüzeyinde ilk olarak brüsit tabakası oluşur. Brüsitin düşük çözünürlüğünden dolayı magnezyum iyonlarının harcın içine geçişi sınırlanmış olur. Fakat brüsit

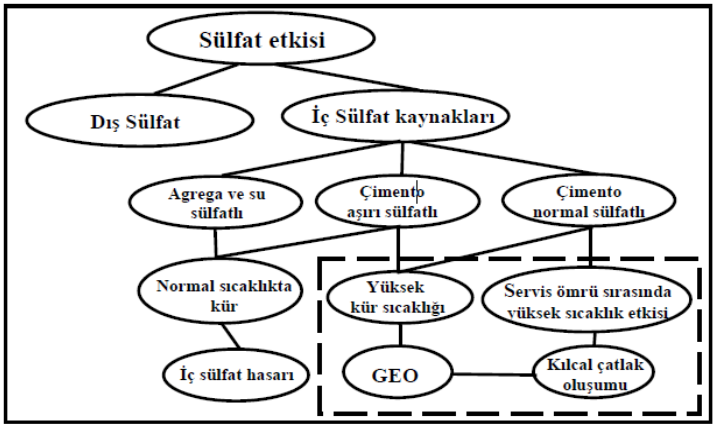
oluşumu, hidrate harçtan sağlanan kalsiyum hidroksitin büyük miktarını tüketir. Kalsiyum hidroksitin azalması ortamın pH'ı düşer ve stabiliteyi sağlamak için CSH jelindeki kalsiyum hidroksitler serbest kalır ve tekrarda pH artar. Bunun sonucunda CSH jelindeki kalsiyum iyonları magnezyum iyonları ile yer değiştirir ve bağlayıcılık etkisi olmayan magnezyum silika hidrate (MSH) jeli oluşur (Santhanam ve ark., 2001).

Monosülfat, çimento hamurunda bulunan $C_3A$'nın çözünmesi ile açıkta kalan $Al(OH)_4^-$ iyonlarının etrenjit ile reaksiyona girmesi ile oluşmaktadır. Kristal yapısı ($C_3A.CaSO_4.13H_2O$) etrenjitten farklı, hekzagonal ince plaka formda, oda sıcaklığında yarı kararlı bir kristaldir. AFm ($Al_2O_3$-$Fe_2O_3$-mono) faz grubunun bir üyesi olan monosülfatın genel formülü $[Ca_2(Al,Fe)(OH)_6]\cdot X\cdot nH_2$'dir. Buradaki X'in, $SO_4^{-2}$ ve $CO_3^{-2}$ olmasına göre monosülfat ya da karbonatlaşmış monosülfat olarak adlandırılmaktadır. Monosülfat oda sıcaklığında ortamda ilave sülfat kaynağı (alçıtaşı veya sülfat iyonları) ve nem bulunması halinde, etrenjit kristaline dönüşebilir (Tosun, 2007).

Betonda bozulmalara sebep olan sülfat saldırısı, iç ve dış kaynaklı sülfatların çimento bileşenleri ile reaksiyonun neden olduğu kimyasal ve fiziksel süreçtir. Bu nedenle sülfat etkisi iç sülfat etkisi ve dış sülfat etkisi olarak iki gruba ayrılmaktadır.

### 3.2.2. İç Sülfat Etkisi

İç sülfat etkisi, sertleşmiş çimento harcında etrenjit oluşumu ve etrenjit kristalinin büyümesi ile meydana gelmektedir. İç sülfat etkisi çimento ve agreganın beton teknolojisine uygun olarak seçilerek üretildiği betonda görülmemektedir (Tosun, 2007). İç sülfat etkisinin kaynakları, genelde çimentonun ani prizini önlemek amacıyla çimentoya %3 ile %6 oranında katılan alçıtaşı ($CaSO_4.2H_2O$) ve/veya agregada bulunan sülfat ya da bazı mineral katkıları ile karışıma eklenen sülfattır (Xu ve ark., 1998). Çimentolaşma malzemesinde bulunan aşırı sülfat dışında, betonun erken dönemde yüksek sıcaklıklara maruz kalması iç sülfat etkisine neden olmaktadır. Bu nedenle iç sülfat etkisi Şekil 3.21'deki gibi iki kısma ayrılabilir. Bunlardan birincisi normal sıcaklık altındaki beton ve harçlarda meydana gelen iç sülfat etkisidir. İkincisi beton üretimi sırasında buhar kürü gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlardaki iç sülfat etkisidir.




**Şekil 3.21.** Klasik iç sülfat etkisi ve GEO gruplandırılması (Tosun, 2007)

Çimento ürünleri ile suyun etkileşimi sonucunda, çimentodaki alüminatlı bileşenler ile sülfat bulunduran elemanlar arasında gerçekleşen reaksiyonlar taze betonda birincil etrenjit oluşturmaktadır. Çimentonun hidratasyonu sırasında arta kalan $SO_3$ ve $Al_2O_3$ betonun sertleşmesinden sonra uygun çevre şartları altında kimyasal reaksiyonlara girerek çimento hamurunda ve agrega ara yüzeyinde etrenjit oluşturmaktadır. Betona çimento ile katılan sülfat, alüminatlı bileşenler ($C_3A$, $C_2A$ ve $C_4AF$) ile reaksiyona girerek tüketilirler. Geriye kalan sülfat iyonları, sertleşmiş betona sonradan giren suyun etkisiyle yavaşça çözünerek etrenjit (ikincil etrenjit) oluşturabilir. İkincil etrenjit oluşumu yavaş gerçekleşmektedir ve zamanla yüksek oranda sülfat bulunduran betonlar için zararlı gerilme artışları meydana getirebilir (Ustabas, 2008).

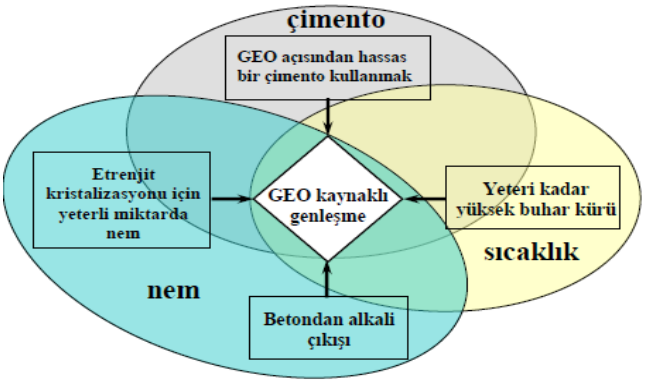
Buhar kürü gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda ve yüksek sülfat içerikli çimentolarla üretilen betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisine rastlanmaktadır. Hidratasyonun ilk zamanlarında oluşması gereken etrenjit kristalleri oluşmayıp, monosülfatlar CSH jelinin kristalleri arasına yerleşmektedir. Yüksek ısıda kararlı yapıda olan monosülfat, beton elemanın normal sıcaklık şartlarında soğumaya bırakılması ile dışarıdan gelen su ve nemin etkisiyle sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşturmaktadır. Bu etrenjit kristalleri hava boşluklarında ve çatlaklarda oluşup, betonda hacim artışına ve betonun aşırı çatlamasına sebep olmaktadır.

### 3.2.3. Dış Sülfat Etkisi

Dış sülfat etkisi, sülfatça zengin zemin veya su ile çimento hamurunun kimyasal reaksiyonu sonucunda meydana gelmektedir. Dış sülfat etkisi geleneksel sülfat etkisi olarak adlandırılmaktadır. Betonda dış kaynaklı sülfat etkisine neden olan başlıca

kaynaklar yeraltı suyu, deniz suyu ve sülfatlı zeminlerdir. Zeminde bulunan sodyum, potasyum, magnezyum ve kalsiyum, yer altı suyundaki sülfat iyonlarının ana kaynağıdır. Dış sülfat etkisinin meydana gelmesi için Şekil 3.22'de yer alan ve aşağıda maddeler halinde yer alan üç koşulun beraber bulunması gerekmektedir (Collepardi):

- Yüksek geçirimli beton;
- Sülfatça zengin ortam;
- Suyun varlığı.




**Şekil 3.22.** Dış sülfat etkisi ile ilgili GEO (Gecikmiş Etrenjit Oluşumu) mekanizması (Tosun, 2007)

Dış ortamda mevcut sülfat, uygun ortam koşullarında çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girerek ortam şartlarına göre alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşturmaktadır. Oluşan bu ürünler sabit kalmayarak çevre koşullarına bağlı olarak sürekli değişim göstermektedir.

### 3.2.4. Sülfat Etkisi Esnasında Meydana Gelen Kimyasal Reaksiyonlar

Sülfat ile çimento harcı bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyon beton bozulmasının asıl nedeni olarak gösterilmektedir. Sudaki sülfat iyonları, kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), kalsiyum silika hidrate (CSH) jeli ve kalsiyum alüminat hidrate, vb. çimento hidrateleri ile reaksiyona girme eğilimindedir. Reaksiyonlar sülfat kaynağının türüne, reaksiyon ürünlerine ve çözeltinin pH değerinin bir fonksiyonu olarak her bir bileşenin çözünürlüğüne bağlı olarak gerçekleşir (Xu ve ark., 1998).

### 3.2.4.1.Sodyum Sülfat Etkisi

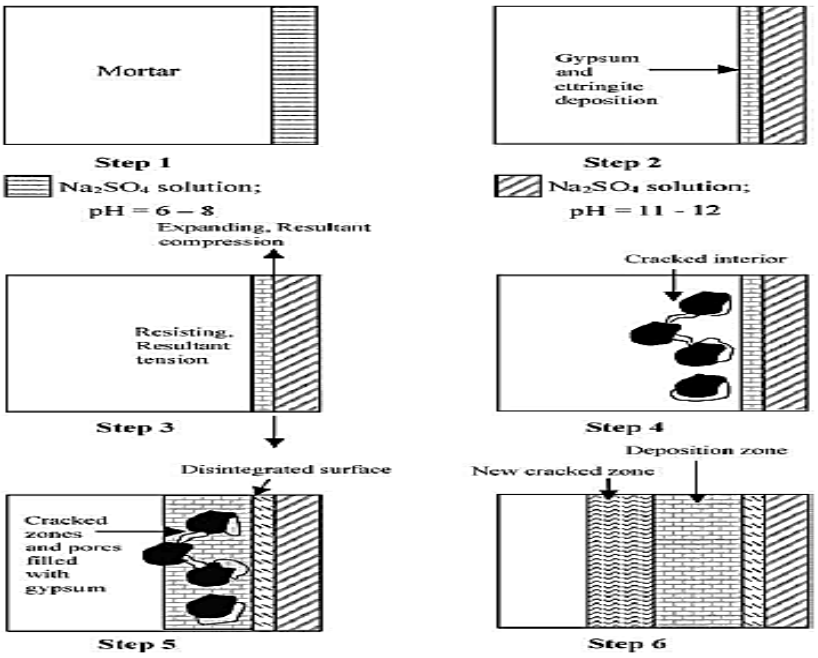
Betona dış kaynaklı olarak giren sodyum sülfat, hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturur. Çimento hidratasyon ürünlerinden alçıtaşı oluşturmak için sülfat ile reaksiyona girmeye en yatkın olan *Portlandit*'tir. (3.3)'te portlandit ile sodyum sülfatın reaksiyonu yer almaktadır.

$$\underset{\text{(Portlandit)}}{Ca(OH)_2} + 2Na^+ + SO_4^{-2} + 10H_2O \rightarrow \underset{\text{(Alçı taşı)}}{CaSO_4.2H_2O} + 2Na^+ + 2OH^- + 8H_2O \qquad \textbf{(3.3)}$$

Alçı taşı, $Ca(OH)_2$ den daha az çözünürlüğe sahiptir. Bu nedenle kalsiyum iyonu takviyesi için $Ca(OH)_2$ çözünür ve alçı taşı oluşur. Eğer oluşan sodyum hidroksit su akışıyla ortamdan uzaklaştırılırsa, bu reaksiyon ortamdaki $Ca(OH)_2$ bitene kadar devam eder. Aksi takdirde boşluk suyundaki alkali birikimi, ortak iyon etkisinden dolayı, $Ca(OH)_2$'nin çözünürlüğünü bastırır ve reaksiyon durur. Bu reaksiyonun sülfat ile CSH jeli arasında meydana gelmesi olası değildir. Çünkü CSH jelinin çözünürlüğü alçıtaşından daha düşüktür (Xu ve ark., 1998).

(Biczok, 1967) tarafından yapılan çalışmada, sodyum sülfat çözeltisi için düşük sülfat konsantrasyonlarında (<1,000 ppm $SO_4^{-2}$) başlıca oluşan ürünün etrenjit olduğu, 1,000-8,000 ppm $SO_4^{-2}$ konsantrasyonunda hem etrenjit hem de alçıtaşının beraber oluştuğu, yüksek sülfat konsantrasyonlarında (>8,000 ppm $SO_4^{-2}$) ise başlıca oluşan ürünün alçıtaşı olduğu belirlenmiştir.

(Santhanam ve ark., 2003) sodyum sülfat etkisi mekanizmasını Şekil 3.23'te görüldüğü gibi altı adımda açıklamıştır. 1. adım, numunenin 6.0-8.0 aralığında bir pH değerine sahip sodyum sülfat çözeltisine henüz konulduğu, sürecin ilk durumunu anlatmaktadır. Numune yerleştirildikten birkaç dakika sonra ortam çözeltisinin pH değeri 11-12 arasında bir değere yükselir. Eğer ortam suyu durgunsa (laboratuar testindeki durum), pH bu aralıkta kalır. Eğer ortam suyunda akış varsa (yeraltı suyu gibi), pH düşük seviyede, 6.0-8.0 arasında, kalabilir. Düşük pH seviyelerinde, genleşmenin başladığı zaman, yani 1. kademenin uzunluğu, azalır. Fakat çözeltinin pH değeri düşükken başlangıçtan sonraki genleşme oranı, 2. kademe, farklı değildir.




**Şekil 3.23.** Sodyum sülfat saldırısı için önerilen mekanizma şeması (Santhanam ve ark., 2003)

2. adımda yüzeye yakın bölgelerde etrenjit ve alçıtaşı oluşumu başlar. Etrenjit ve alçıtaşı oluşurken, numunenin yüzey zonu genleşmeye çalışan bir deri gibi davranır. Kimyasal olarak deşişime uğramayan harcın iç kısmı bu genleşmeye direnmeye çalışır. Böylece çimentonun iç kısmı çekme kuvvetine maruz kalırken, yüzey bölgesi içinde, 3. adımda tarif edilen, net basınç kuvveti meydana gelir. Bu harcın içinde çatlaklar oluşmasına neden olur (4. adım).

Zaman geçtikçe, çözelti penetrasyonun devam etmesinden dolayı yüzey zonu bozulur. Çözelti çatlaklı iç zona ulaştığı zaman hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girer ve çatlakların içinde ve çimento pastasında saldırı ürünlerinin birikmesine neden olur. Alçıtaşı öncelikle çatlaklarda ve boşluklarda oluşur, çünkü buralar çekirdekleşme için en iyi bölgelerdir. Böylece harcın içinde 5. adımda birikme zonu olarak gösterilen yeni bir bölge oluşur. Bu bölge harcın içindeki net çekme kuvvetlerinden dolayı genleşmeye çalışır. Harcın içinde yeni çatlaklar meydana gelir. Bu adımda (6. adım) harcın içinde ayrışmış yüzey, saldırı ürünlerinin birikme zonu ve kimyasal olarak değişime uğramamış iç çatlak zonu olarak üç belirgin bölge vardır. Ayrışmış yüzey zonu tomasit oluşumuna yatkındır, çünkü sülfat çözeltisi bu bölgedeki dekalsifikasyona uğramış CSH ve etrenjite doğrudan ulaşabilir. Saldırı, numune tamamen ayrışana kadar sabit bir oranda devam eder.

### 3.2.4.2.Magnezyum Sülfat Etkisi

Magnezyum sülfat etkisi ile sodyum sülfat etkisi kıyaslandığında, magnezyum sülfata maruz beton numunelerde daha çok hasar ortaya çıkmaktadır. Çünkü sodyum sülfat etkisinde etrenjit, monosülfat ve kalsiyum hidroksitin reaksiyonları ile oluşmaktadır. Magnezyum sülfat etkisinde, sülfat iyonları ilk olarak $Ca(OH)_2$ ve CSH ile reaksiyona girerek ikinci alçıtaşı ve silika jeli oluşumuna neden olur (3.4 ve 3.5) (Xu ve ark., 1998).

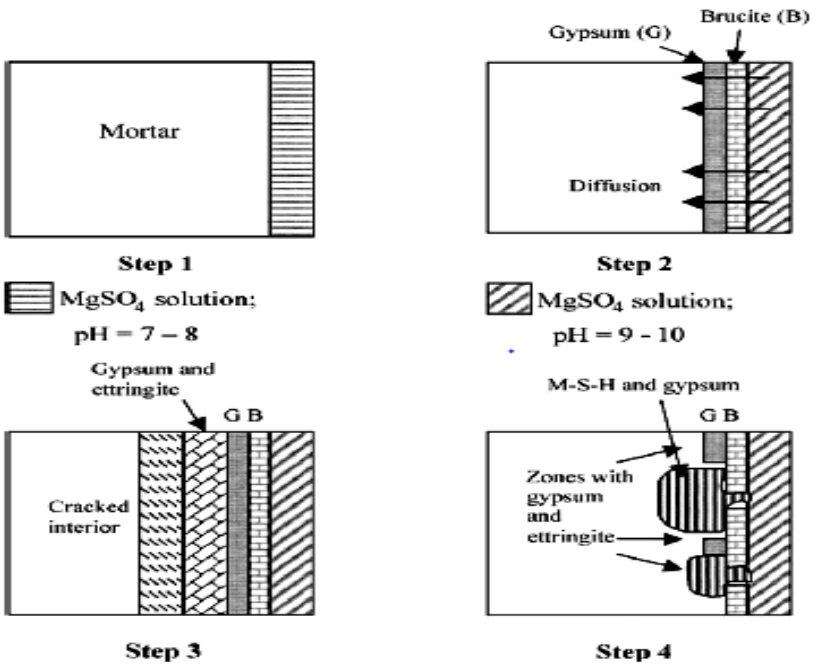
$$Mg^{+2} + SO_4^{-2} + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow \underset{\text{(Brüsit)}}{Mg(OH)_2} + \underset{\text{(İkincil Alçıtaşı)}}{CaSO_4.2H_2O} \quad \textbf{(3.4)}$$

$$3CaO.SiO_2 + 3MgSO_4 + 9H_2O \rightarrow \underset{\text{(Brüsit)}}{3Mg(OH)_2} + \underset{\text{(İkincil Alçıtaşı)}}{3(CaSO_4.2H_2O)} + \underset{\text{(Silika Jel)}}{2SiO_2} \quad \textbf{(3.5)}$$

Sülfat iyonu etkisi devam etmesi halinde sülfat iyonları ile betonda bağlayıcılığı sağlayan kalsiyum silika hidratları (CSH) arasındaki reaksiyon sonucunda magnezyum silika hidrata (MSH) oluşur. MSH yapısı bağlayıcılık özelliği olmayan bir yapıdır. Magnezyum sülfat etkisinde ilk olarak betonun yüzeyinde brüsit ve alçıtaşı tabakası oluşmakta ve beton yüzeyi beyazlamaktadır. Etkinin devam etmesi halinde ise, beton bağlayıcılık özelliğini kaybederek çamurumsu bir yapıya dönüşür.

(Biczok, 1967) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen verilere göre magnezyum sülfat çözeltisinde <4,000 ppm $SO_4^{-2}$ konsantrasyonlarında etrenjit oluştuğu, 4,000-7,500 ppm $SO_4^{-2}$ konsantrasyonu aralığında etrenjit ve alçıtaşının beraber oluştuğu, >7,500 ppm $SO_4^{-2}$ konsantrasyonunda is magnezyum korozyonu gerçekleştiği belirlenmiştir.

(Santhanam ve ark., 2003) tarafından önerilen mekanizmaya ait şematik gösterim Şekil.3.24'te yer almaktadır. 1. adım, numunenin 7-8 arasında pH değerine sahip magnezyum sülfat çözeltisine henüz konulduğu, sürecin ilk durumunu göstermektedir. Birkaç dakika içinde ortamın pH değeri 9-10 arasında değişir. Numunenin yüzeyinde çözeltinin kalsiyum hidroksit ile reaksiyonu sonucu brüsit tabakası hızlı bir şekilde oluşur.




**Şekil 3.24.** Magnezyum sülfat saldırısı için (Santhanam ve ark., 2003) tarafından önerilen mekanizma şeması

Brüsit tabakası, bu tabakanın iç kısmında aynı reaksiyonlar sonucu oluşan alçıtaşı ile beraber oluşur (2. adım). Bu yüzey tabakalarının oluşumundan sonra sülfat çözeltisi difüzyonla harcın içine penetre olur. Bu olay, magnezyum sülfat çözeltisinde gözlenen bozulma oranını sabit artışı ve genleşme oranında keskin bir artış olmaması için bir nedendir.

Yüzeye yakın bölgelerde alçıtaşı ve etrenjit oluşumu genleşmeye neden olur. Sodyum sülfat çözeltisi mekanizmasında bahsedilen genleşen deri analojisiyle, çatlakların harcın değişmemiş iç zonlarında meydana gelmesi beklenmektedir (3. adım).

Magnezyum sülfat çözeltisinde gözlenen gözle görünür fiziksel bozulma ve ölçülen genleşme açısından bozulma seviyesi, sodyum sülfat çözeltisindeki bozulma kadar yüksek değildir. Kısmen geçirimsiz brüsit tabakasının varlığı, çözeltinin iç zonlara penetrasyonunu azaltır. Fakat brüsit tabakası, harcın genleşmesinden dolayı bazı bölgelerde kırılır ve çözelti difüzyona devam eder. Yüzey brüsit tabakası boyunca bir akış kanalı oluşur ve çözelti doğrudan CSH ile reaksiyona girebilir. Bunun sonucunda bağlayıcılık özelliği olmayan MSH oluşumu ve ikincil etrenjit oluşumu meydana gelir (4. adım). CSH fazının MSH fazına dönüşümünden dolayı numunede bütünlük ve dayanım kaybı meydana gelir.

### 3.2.4.3.Kalsiyum Sülfat Etkisi

Zeminde mevcut bulunan veya $Ca(OH)_2$ ile sodyum sülfatın reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum sülfat, taze çimento harcında ya da betonda bulunan kalsiyum alüminat hidratelerle reaksiyona girerek etrenjit oluşturabilir (3.6). Ancak etrenjit oluşumu kaynaklı hacim artışı betona taze olduğundan dolayı bir zarar vermez, sadece harcın hacmini artırır (Xu ve ark., 1998).

$3(CaSO_4.2H_2O) + 4CaO.Al_2O_3.19H_2O + 17H_2O$
(İkincil Alçıtaşı) (Kalsiyum Alüminat Hidrate)

$$\rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + Ca(OH)_2 \quad \textbf{(3.6)}$$
(Etrenjit)

### 3.2.4.4.Amonyum Sülfat Etkisi

Çözeltideki amonyum sülfat ile betondaki $Ca(OH)_2$ arasında reaksiyon (3.7) meydana gelir ve alçıtaşı oluşurken çözeltide serbest amonyum iyonları birikir. Ortama salınan $NH_4^+$ iyonları çözeltideki $OH^-$ iyonları ile reaksiyona girer ve reaksiyon (3.8) görülen $NH_3$ ve $H_2O$ oluşur (Xu ve ark., 1998).

$$(NH_4)_2SO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NH_4^+ \quad \textbf{(3.7)}$$
(Alçıtaşı)

$$2NH_4^+ + 2OH^- \rightarrow 2NH_3 + 2H_2 \quad \textbf{(3.8)}$$

Bu işlem beton boşluk çözeltisini nötralize eder ve çimento hidratasyon ürünlerinin stabil olmadığı ve ayrıştığı bir ortam oluşturur (Xu ve ark., 1998).

### 3.2.4.5.Karbonik Asit ve Klor Etkisi

Beton içine sızan suda bulunan veya beton boşluk suyunda atmosferik $CO_2$'in çözünmesi ile oluşan karbonik asit, kalsiyum, silika ve sülfat ile reaksiyona girer ve tomasit oluşur. Çimento harcındaki etrenjit, $CO_2$ ve karbonasyonla serbest bırakılan silika varlığında tomasite dönüşür (3.9). Tomasit genellikle etrenjitle beraber bulunur. Fakat düşük pH değerlerinde ($pH<7$) etrenjit stabil olmadığından dolayı, etrenjit olmadan da tomasit bulunabilir (Xu ve ark., 1998).

$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + 3CO_2 + 2SiO_2 + 2\ Ca^{+2}$
(Etrenjit) (karbon iyonları kaynağı)

➔ $2CaSiO_3.CaCO_3.CaSO_4.15H_2O + Al_2O_3 + CaCO_3 + CaSO_4.2H_2O$ **(3.9)**
(Tomasit)

Sıklıkla sülfat iyonları ile beraber bulunan diğer bir iyon klor iyonlarıdır. Sülfat etkisinde klorun etkisi tartışmalı bir konudur. Bazı araştırmacılar, klor iyonlarının sülfat etkisini hafiflettiği ve sülfat direncini artırdığını rapor ederken, bazıları tam tersi yönünde görüş bildirmektedir. Yapılan bazı araştırmalar sülfat çözeltisinde yüksek konsantrasyonda klor iyonlarının bulunmasının beton ayrışmasını azalttığını göstermiştir. Çünkü $Cl^-$ iyonları alçıtaşı ve portlandit oluşumunu engeller. Bu, Portland çimentosundan yapılan beton üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilirken, katkılı çimentolar için bu yarar sınırlıdır. Domidot ve Glasser (1997) yaptıkları çalışmada, $Ca(OH)_2$'in yüksek klor konsantrasyonlarında stabil olmadığını ve elektron nötralizasyonunu sağlamada çözeltideki $Ca^{+2}$ iyonu konsantrasyonunu artırmak için çözünüp, $3CaO.CaCl_2.15H_2O$'ya dönüştüğünü göstermiştir. Al-Amoudi (1995) çalışmasında klor iyonlarının varlığında, betonda ne fiziksel ne de kimyasal bozulma meydana gelmediğini doğrulamıştır. Klor ve sülfat iyonlarının beraber bulunduğu durumda, hem sülfat hem de klor iyonları $C_3A$ ile reaksiyona girer. Hjorth (1983) sülfat iyonlarının öncelikli olarak $C_3A$ ile reaksiyona girdiğini ve kalsiyum sülfo-alüminat hidratelerinin, trisülfo-alüminat hidrate ($C_3A.3CaSO_4$ sulu) ve monosülfo-alüminat hidrate ($C_3A.CaSO_4$ sulu) şeklindeki iki bileşenini oluşturduğunu belirtmiştir. Holden vd. (1983) de sülfat iyonlarının $C_3A$ ile öncelikli reaksiyonunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları, sülfat ve klor iyonları beraber bulunduğu zaman çimentonun klor bağlama kapasitesinde önemli bir azalma olduğunu göstermiştir (Dehwah, 2007).

### 3.2.5. Sülfat Etkisine Karşı Alınacak Önlemler

- **Beton İmalatı Esnasında Alınacak Önlemler**

✓ Betonun geçirimsiz olarak üretilmesi yani su/çimento oranının düşük seçilmesi gerekmektedir. Bu durumda beton işlene bilirliği katkı maddeleri kullanılarak elde edilebilir.

- ✓ Dış sülfat etkisine karşı alınacak ilk önlem çimentonun $C_3A$ miktarını sınırlandırmaktır. Ancak yapılan çalışmalar sadece $C_3A$ miktarını kısıtlamanın bu etkiyi azaltmaya yetmediğini göstermiştir. Aynı zamanda çimentonun $C_3S$ miktarının da sınırlandırılması gerekmektedir (Cohen ve Tian, 2000; Tosun, 2007).
- ✓ Su/çimento oranını azaltmak ve kireci bağlamak için mineral katkı kullanımı önlemi alınabilir. Ancak bu maddelerin kullanımında ortamda bulunan sülfat katyon tipine dikkat edilmesi gerekmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı sodyum sülfat çözeltisine karşı beton direncini artırırken, magnezyum sülfat saldırısına karşı direnci düşürebilir. Çünkü silis dumanı gibi mineral katkılar kullanıldığında, puzolanik reaksiyonlar kalsiyum hidroksiti tüketir ve sülfat etkisi kalsiyum silika hidrate jelinin hızlı dekalsifikasyonuna yol açar. Tam tersi olarak bu tip katkıların kullanımı betonun permeabilitesini azaltıp, boşluk yapısını düzenlediğinden dolayı kullanılacak dozajın araştırılması, magnezyum sülfat etkisini minimize edecek ve yararları maksimize edecek miktarda seçilmesi gerekmektedir (Santhanam ve ark., 2001).

- **Beton Bakımında Alınacak Önlemler**

- ✓ Drenaj ve geçirimsiz perde önlemi: Yer altı su seviyesi etkin bir drenaj sistemi ile kontrol altına alınmalı ve beton ile teması kesilmelidir. Ayrıca sülfat içerikli zemin ortamında yapıların zemine oturacak olan kısımlarına geçirimsiz perde yapılmalıdır.
- ✓ Yalıtım önlemi: Betona dışarıdan girebilecek, yapıya zarar veren su ve zararlı maddelerin yapıdan uzaklaştırma işlemine yalıtım denir. Yalıtım malzemesi olarak geçirimsiz kabul edilen ‘’jeomembran’’ olarak adlandırılan jeotekstil malzemeleri kullanılabilir. Bu malzemeler beton ile sülfatlı zemin arasına serilerek sülfatın betona etkisi önlenmiş olur.
- ✓ Yer altı su seviyesi yüksek olan zeminlerde şevli bir kazı yapılarak yan yüzeylerin, yapının tabanına serilen geçirimsiz dolgu malzemeleri ile yapı tabanının yer altı suyu teması önlenir. Dolgu malzeme sıkıştırılarak üzerine yalıtım malzemesi serilir. Yapılacak olan asıl yapı ise yalıtım malzemesi üzerine dökülen grobeton üzerine inşa edilir. Yapının zeminle temas eden kenarları zeminin üst kotundan aşağıya kadar Şekil 3.25’te görüldüğü gibi özel bitümlü

geçirimsiz sıvı veya epoksi boya ile boyanabilir veya beton yüzey yalıtım malzemesi ile kaplanabilir.



**Şekil 3.25.** Yüzeyi özel bitümlü sıvı ile boyanmış beton

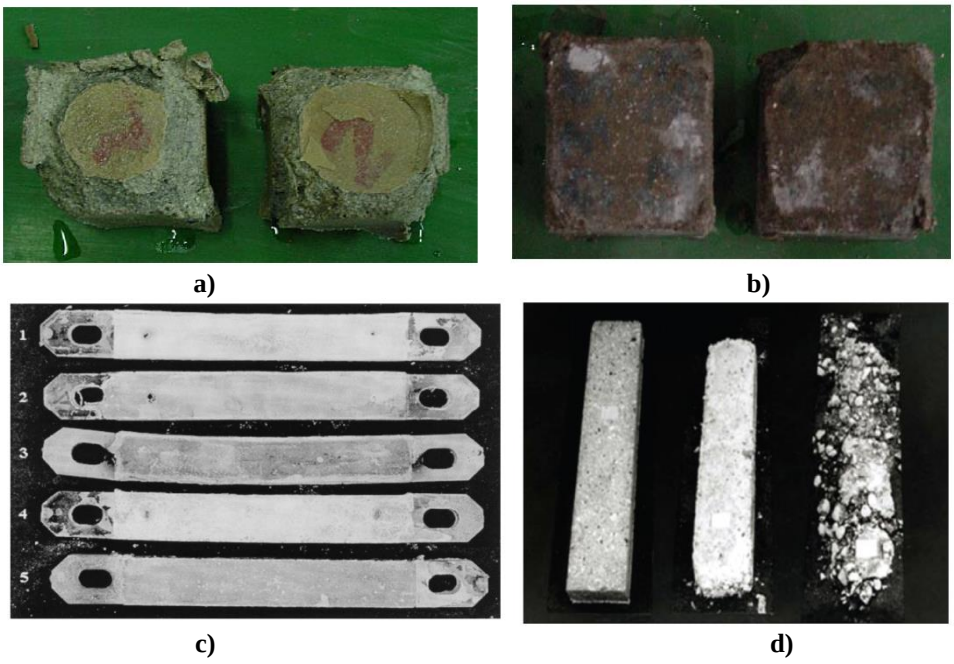
Ancak yapıştırılan yalıtım malzemesinde oluşacak küçük bir yırtılma veya hasardan dolayı, su beton ile yalıtım malzemesi arasına girerek ve beton yüzeyindeki bütün çatlak veya gözeneklerden beton içerisine taşınacaktır. Bu da betonun durabilitesini etkileyebilir. Betonun hasar görme derecesi artmakta ve hasar görme süresi de azaltmaktadır.

### 3.2.6. Sülfat İçerikli Suların Beton Üzerindeki Etkisini Belirlemede Kullanılan Deneyler

Betonda sülfatlı suların neden olduğu fiziksel ve kimyasal bozulmaları belirlemek için literatürde birçok test metodu yer almaktadır. Beton elemanların sahada maruz kaldığı koşulların laboratuvar ortamında oluşturulması ile sülfatın beton üzerindeki etkisi ve zamana bağlı olarak betonun bozulma seviyesi belirlenebilir. Bunun için laboratuvarda genellikle küp ve silindirik numuneler oluşturulmaktadır. Bu numuneler saha koşullarını yansıtan sülfat ortamına maruz bırakılarak belirli aralıklarla deneylere ve görsel incelemelere tabi tutulmaktadır.

Laboratuvar deneyleri, fiziksel ve mekanik olarak iki kısma ayrılmaktadır. Genleşme ölçümleri, kütle kaybı ve görsel bozulma derecesi gibi fiziksel testler sülfat etkisinden kaynaklı bozulma seviyesini belirlemede sıklıkla kullanılmaktadır. Görsel bozulma oranı, deneysel çalışmalarda sıkça kullanılan bir yöntemdir. Sülfata maruz numunelerdeki zamana bağlı olarak renk değişimi, çatlak oluşumu gibi fiziksel

değişimlerin gözlenmesi ile bozulma derecesi belirlenmektedir. Sülfat etkisinin araştırılmasında kütle kaybı önemli bir parametredir. Şekil 3.26'da sülfata maruz kalmış numuneler üzerinde yapılan kütle kaybı ve çatlak oluşumunun belirlenmesi için yapılan fiziksel testlerden örnekler yer almaktadır.




**Şekil 3.26.** Beton bozulma mekanizmasının fiziksel incelemesine ait literatürde yer alan fotoğraflar: **a)** ve **b)** (Lee ve ark., 2005), **c)** (Tian ve M.D., 2000) ve **d)** (Hartell, 2008)

Mekanik testler ise, sülfat etkisindeki beton numunelerin mühendislik özelliklerindeki kayıpların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Laboratuvarda oluşturulmuş küp veya silindirik beton numuneler üzerinde belirli aralıklarla basınç dayanımı testleri yapılmaktadır ve zamana bağlı olarak dayanımdaki kayıplar belirlenmektedir (Şekil 3.27).



**Şekil 3.27**. Sülfata maruz silindirik numuneler ve basınç dayanımı testi (Hartell, 2008)

Laboratuvar deneyleri ile beton numunelerin dayanım kayıpları, fiziksel bozulma oranları, genleşme miktarları ve kütle kayıpları belirlenirken, görüntüleme yöntemleri ile bu numunelerdeki morfolojik değişimler belirlenmektedir. Morfolojik yapıyı incelemede optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), vb. cihazlar kullanılmaktadır. SEM, yüksek büyütmelerde yüksek çözünürlüklü görüntü alma tekniğidir. Bunun için, önceden belirlenen günlerde beton numunelerin yüzeyinden ve iç kısmından örnekler alınır ve bu örnekler inceleme için ince kesitler haline getirilip, elektron mikroskobunda incelenir. Böylece, zamana bağlı olarak sülfat reaksiyonu sonucu oluşan ürünler ve yapıdaki değişimler belirlenmektedir.

Beton numunelerin kimyasal kompozisyonundaki değişimler için X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmaktadır. XRD analizi, her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içinde kırması esasına dayanır. Her kristalin, faz için bir kırınım profili vardır. Bu profillere bağlı olarak numunelerin yapısı belirlenmektedir. Şekil 3.28'de S.Ü. İLTEK Laboratuvarında yer alan ve deneysel çalışma analizlerimizde kullanılan SEM ve XRD cihazları yer almaktadır.




**Şekil 3.28. a)** SEM cihazı, **b)** XRD cihazı ile morfolojik yapı analizi (İleri-Araştırma-ARGE-Merkezi)

### 3.3.Deneysel Çalışma

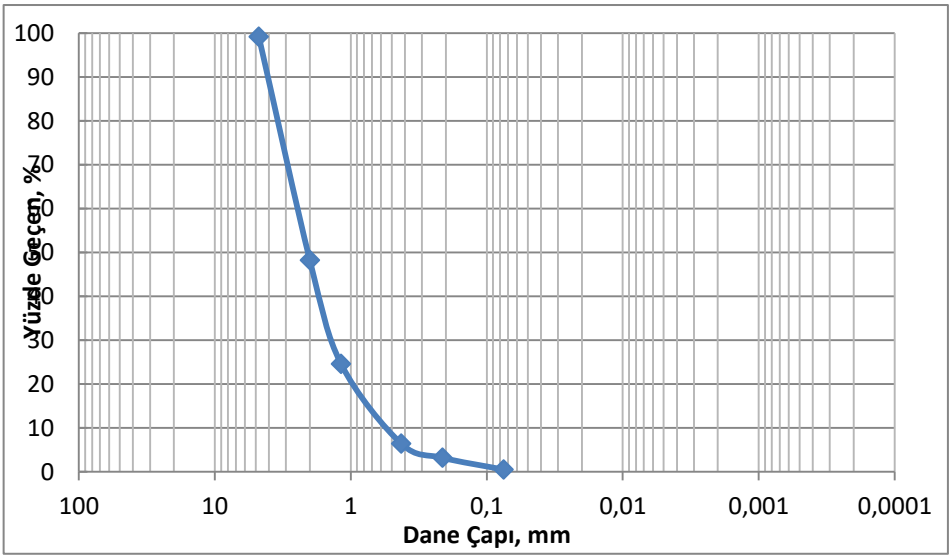
Bu tez çalışmasında yeraltı suyunda bulunan sülfatın jet-grout kolonların dayanımı ve morfolojik yapısı üzerinde etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda bulunan ve (Erkan, 2013) doktora tezi çalışması için tasarlanan laboratuvar tipi özel jet-grout deney seti kullanılarak laboratuvar ortamında jet-grout kolonlar oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan laboratuvar tipi özel jet-grout deney seti Şekil 3.29'da yer almaktadır. Bu deney seti bir adet sondaj tiji, 1.5 mm çapında üzerinde tek nozul bulunan konik uç, 12 lt hacminde enjeksiyon haznesi, pompa, tije dönme ve çekme hızı verilmesini sağlayan 2 adet motor ve kontrol panelinden oluşmaktadır. Tek nozul kullanılmasındaki amaç, deney anında olası tıkanıkları anında fark etmek ve anında müdahale ederek enjeksiyon malzemesinin jet-grout deney setinin içinde donmasını önlemektir.



**Şekil 3.29.** Laboratuvar tipi jet-grout deney seti

Tez çalışması kapsamında, laboratuvarda jet-grout kolonların oluşturulacağı zemin ortamını oluşturmak için kullanılan doğal kum, bir kum ocağından temin edilmiştir. Doğal kum zemin üzerinde yapılan elek analizi ve Şekil 3.30'da yer alan granülometri eğrisinden elde edilen kum zemine ait bazı indeks özellikleri aşağıda yer almaktadır.

- % Çakıl= 0.8
- % Kum= 98.7
- % Kil+Silt= 0.5
- Üniformluk Katsayısı, $C_u$= 1.92
- Derecelenme Katsayısı, $C_c$= 1.16




**Şekil 3.30**. Doğal kum zemine ait granülometri eğrisi

Elek analizinden elde edilen bu veriler değerlendirildiğinde doğal kumun zemin sınıfı kötü derecelenmiş temiz kum (SP) olarak belirlenmiştir. Plastik varillerde hazırlanan deney kumuna ait dane birim hacim ağırlık ve maksimum ve minimum boşluk oranı deney sonuçları Tablo 3.5'te yer almaktadır.

**Tablo 3.5.** Hazırlanan kum numunelerinin indeks özellikleri

| | |
|---|---|
| $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | 27.1 |
| $e_{max}$ | 0.950 |
| $e_{min}$ | 0.419 |
| e | 0.731 |
| Dr | % 41 |

Tez çalışmasında sülfat içerikli yeraltı suyu veya sülfatlı zemin ortamında oluşturulan jet-grout kolonların uzun dönem performansı araştırmak için Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nde kuyu açılarak sülfat içerikli yeraltı suyu çekilip laboratuvara getirilmiştir. Sülfat etki mekanizmasını belirlemek ve jet-grout kolon enjeksiyon malzemesi hazırlamak için karışım suyu ve kür suyu olarak Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nden getirilen sülfat içerikli yeraltı suyu ve normal musluk suyu kullanılmıştır. Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nden alınan sülfat içerikli yeraltı suyuna ait analiz sonuçları Tablo 3.6'da yer almaktadır.

**Tablo 3.6.** Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi'nden alınan yeraltı suyunun analiz sonuçları

| **Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Parametreler** | **Formülasyon** | **Birim** | **Analiz Sonuçları** | **Analiz Yöntemi** |
| pH (25 ºC) | | | 7.7 | TS-3440 |
| Kireç Sökücü (Serbest karbondioksit) | CO2 | mg/l | 66 | TS-3440 |
| Amonyum | $NH^{4+}$ | mg/l | 0.03 | TS-3440 |
| Magnezyum | $Mg^{++}$ | mg/l | 2,775 | TS-3440 |
| Sülfat | $SO4^{=}$ | mg/l | 11,484 | TS-3440 |
| Klor | $CL^{-}$ | mg/l | 12,702 | TS-3440 |

Analiz sonuçları, (TS-EN-3440, 2014) standardında yer alan sınır değerler ile karşılaştırıldığında yeraltı suyunun zararlı etkinlik derecesi çok kuvvetli olarak belirlenmiştir (Tablo 3.7).

**Tablo 3.7.** Beton temas sularının zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerleri (TS-EN-3440, 2014)

| **Parametreler** | | **Zayıf** | **Kuvvetli** | **Çok kuvvetli** |
|---|---|---|---|---|
| pH | | 6.5-5.5 | 5.5-4.5 | <4.5 |
| Kireç Çözücü | mg/l | 15-30 | 30-60 | >60 |
| Amonyum | mg/l | 15-30 | 30-60 | >60 |
| Magnezyum | mg/l | 100-300 | 300-1,500 | >1,500 |
| Sülfat | mg/l | 200-600 | 600-3,000 | >3,000 |

Ayrıca, çimento tipinin sülfat etki mekanizması üzerindeki etkisini belirlemek için Normal Portland çimentosu (42.5) ve Sülfata Dayanıklı Portland çimentosu (42.5) olmak üzere iki tip çimento kullanılmıştır.

Deneysel çalışmaya başlamadan önce jet-grout deney setinde yer alan tij takımının dönme ve çekme hızının kalibrasyonu, (Erkan, 2013) doktora tez çalışmasında verilen değerler referans alınarak tekrar yapılmıştır. Şekil 3.31'de jet-grout deney setinin kontrol panel ünitesi yer almaktadır.



**Şekil 3.31.** Jet-grout deney setinin kontrol paneli ünitesi

Deneysel çalışmada kullanılacak jet-grout kolon parametrelerini belirlemek için ilk olarak deneme kolonları yapılmıştır. Yapılan ilk deneme kolonlarında kum zemin kuru olarak belirli yükseklikten elenerek eşit sıkılıkta plastik varillere yerleştirilmiştir. Ancak jet-grout kolon imalatı için kum zemin içerisine indirilen tij belirli bir derinlikten sonra zemin içerisine batmamıştır. Sonraki denemelerde doğal kum bir miktar ıslatılarak (≈%5-6 su içeriği) ve belirli yükseklikten elenerek eşit rölatif sıkılıkta plastik variller içerisine yerleştirilmiştir ve tijin zemin içerisine batmasında herhangi bir problem yaşanmamıştır. Kum zemin ortamının hazırlanma aşamaları Şekil 3.32'de verilmiştir.

Enjeksiyon basıncı, tij dönme hızı ve çekme hızı gibi jet-grout kolon parametreleri ve kullanılacak plastik varil boyutları değiştirilerek deneme kolonları oluşturulmuştur. Deneme kolonları için kullanılan farklı boyutlardaki kalıplar Şekil 3.33'de yer almaktadır. Deneme kolonlarından elde edilen kolon çap ve boylarının değerlendirilmesi ile kullanılacak plastik varil boyutları çap (D)= 80 cm ve yükseklik (H)= 120 cm olarak belirlenmiştir. Deneme kolonları ile belirlenen ve tez çalışmasında kullanılan jet-grout kolon parametreleri Tablo 3.8'da yer almaktadır.

**Tablo 3.8.** Deneysel çalışmada kullanılan jet-grout kolon parametreleri

| **Parametreler** | **Kullanılan Değerler** |
|---|---|
| Su/çimento oranı | 1 |
| Enjeksiyon basıncı | 20 bar |
| Tij dönme hızı | 10 dv/dk |
| Tij çekme hızı | 30 cm/dk |




**Şekil 3.32 a), b), c), d).** Doğal kum kullanılarak kum zemin ortamının hazırlanma aşamaları



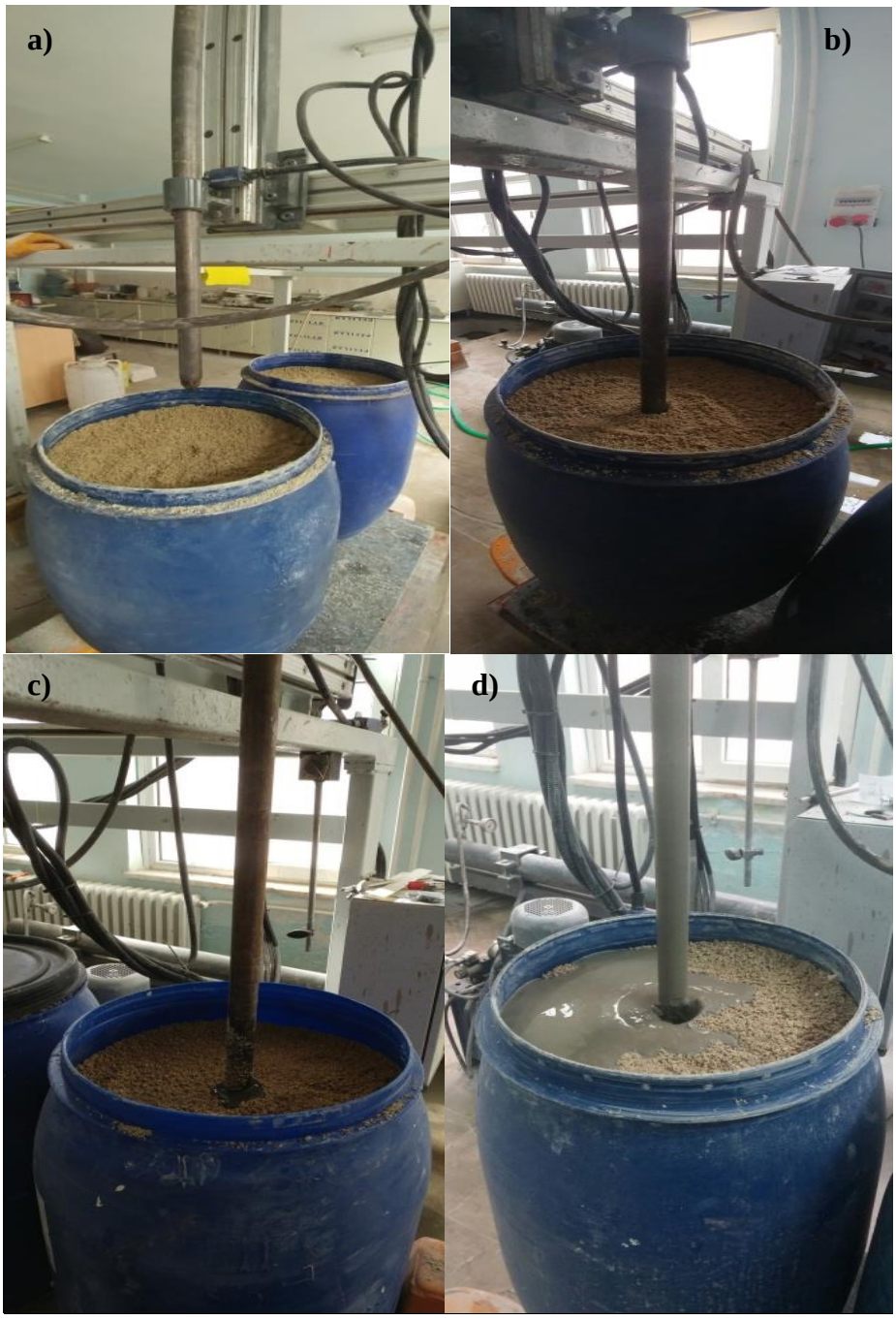
**Şekil 3.33.** Deneme kolonu oluşturmak için kullanılan kalıplar

Jet-grout kolon dayanımını etkileyen parametrelerden biri enjeksiyon malzemesinin su/çimento oranıdır. Enjeksiyon malzemesinin hazırlanmasında kullanılan su/çimento oranı için saha uygulamalarında en çok kullanılan 1.0 değeri seçilmiştir. Deney grubuna bağlı olarak normal musluk suyu ya da sülfat içerikli yeraltı suyu ile normal portland çimentosu ya da sülfata dayanıklı çimento bir mikser ile karıştırılarak jet-grout deney seti haznesi hacmine eşit olacak şekilde 12 lt hacminde enjeksiyon malzemesi hazırlanmıştır. Hazırlanan enjeksiyon malzemesi çimentonun çökelmesini engellemek için hemen jet-grout deney seti haznesine doldurulmuştur. Şekil 3.34'te enjeksiyon malzemesinin hazırlanma aşamaları yer almaktadır.




**Şekil 3.34 a), b), c).** Enjeksiyon malzemesinin hazırlanması ve hazneye doldurulması

Enjeksiyon malzemesi hazneye doldurulurken, deney setinde yer alan ve ucunda tek nozullu konik başlık yer alan tij takımı kum zemin içerisine 10 dv/dk dönme hızı ile döndürülerek indirilmiştir. Tij takımı kum zemin içinde istenilen derinliğe indirildikten sonra 30 cm/dk çekme hızı ve 20 bar enjeksiyon basıncı ile jet-grout kolon imalatına başlanılmıştır. Şekil 3.35'te jet-grout kolon imalat aşamaları yer almaktadır.




**Şekil 3.35 a), b), c), d).** Jet-grout kolon imalat aşamaları

Çalışmada, sülfat içerikli yeraltı suyu ile normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak 1 ay, 3 ay ve 6 ay kür sürelerinde deneye tabi tutulmak üzere 6 adet jet-grout kolon oluşturulmuştur. Jet-grout kolonlar üzerindeki sülfat etki mekanizmasını belirlemek için aynı çimento tipleri ve aynı kür süreleri için normal musluk suyu kullanılarak 6 adet referans jet-grout kolon oluşturulmuştur. Böylece tez çalışması kapsamında toplamda 12 adet jet-grout kolon oluşturulmuştur. Oluşturulan jet-grout kolonların prizini alması için 24 saat beklenilmiştir. Bu süre sonunda, deney grubuna bağlı olarak normal musluk suyu veya sülfat içerikli yeraltı suyu ile jet-gout kolonların oluşturulduğu kum zemin doygun hale getirilmiştir ve jet-grout kolonların kür koşulları sağlanmıştır. Numunelerden buharlaşma etkisiyle su kaybını önlemek amacıyla plastik varillerin üzerleri plastik örtüler ile kapatılmıştır (Şekil 3.36).




**Şekil 3.36. a)** Jet-grout kolonların çap kontrolü, **b)** Kolonların oluşturulduğu kum zeminin doygun hale getirilmesi ve **c)** Kalıpların üzerinin kapatılması

# 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında jet-grout kolon üretmek için enjeksiyon malzemesi su/çimento oranı 1.0, enjeksiyon basıncı 20 bar, tij dönme hızı 10 dv/dk ve tij çekme hızı 30 cm/dk jet-grout kolon parametreleri kullanılmıştır. Oluşturulan her jet-grout kolon kür süresi sonunda kalıplardan çıkarılarak bu kolonların çap ve yükseklik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.1). Ölçüm sonuçları toplu olarak Tablo 4.1'de verilmiştir. Tez çalışmasında, Normal Portland Çimentosu NP, Sülfata Dayanıklı Çimento SDÇ, musluk suyu NMS ve sülfat içerikli yeraltı suyu SYS olarak kısaltılmış, kür süreleri ise ay olarak parantez içerisinde Tablo 4.1'de verilmiştir.




**Şekil 4.1. a)** Oluşturulan jet-grout kolonların kalıplardan çıkarılması, **b)** Kolonların çap-yükseklik ölçümleri

**Tablo 4.1.** Oluşturulan jet-grout kolonların çap ve yükseklikleri

| Kolon Adı | Kolon Çapı (cm) | Kolon Yüksekliği (cm) |
|---|---|---|
| NP-NMS (1) | 28 | 48 |
| NP-SYS (1) | 25 | 47 |
| SDÇ-NMS (1) | 29 | 51 |
| SDÇ-SYS (1) | 24 | 53 |
| NP-NMS (3) | 25 | 49 |
| NP-SYS (3) | 25 | 42 |
| SDÇ-NMS (3) | 27 | 51 |
| SDÇ-SYS (3) | 27 | 46 |
| NP-NMS (6) | 27 | 47 |
| NP-SYS (6) | 24 | 47 |
| SDÇ-NMS (6) | 36 | 44 |
| SDÇ-SYS (6) | 35 | 45 |

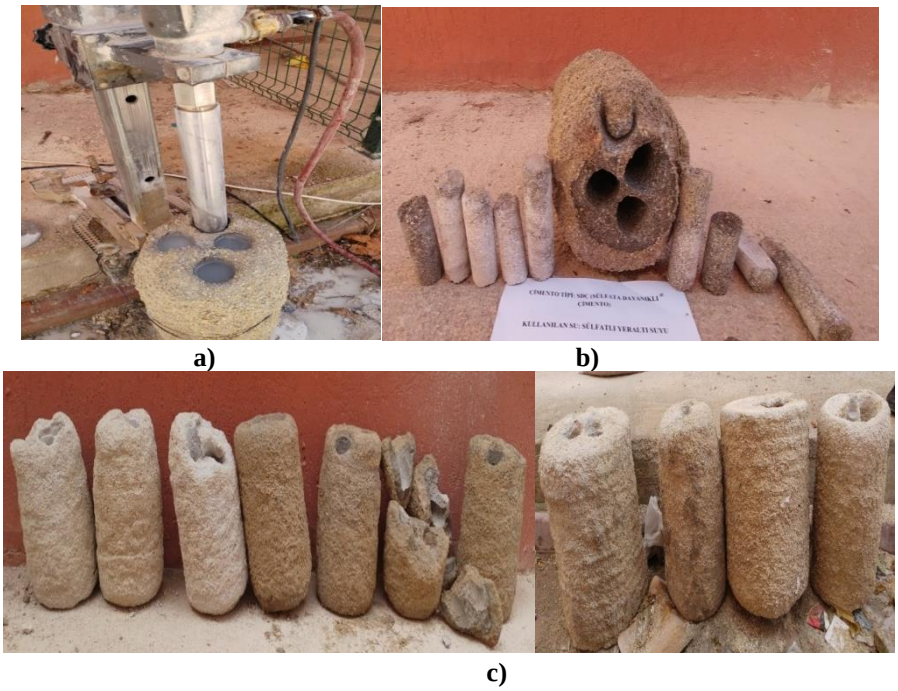
Tablo 4.1'de yer alan ölçüm sonuçları incelendiğinde iki kolon hariç tüm kolonların çap ve boylarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da kum zeminin hazırlanması esnasında hemen hemen tüm kolonlarda eşit sıkılığın elde

edildiğini göstermektedir. SDÇ-NMS (6) ve SDÇ-SYS (6) jet-grout kolonlarının çapları diğer kolonlardan fazla olduğu ve bu kolonların düşey kesiti incelendiğinde spirallenme meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.2). Bunun sebebi kum zeminin oluşturulması aşamasında herhangi bir değişiklik yapılmadığından, fark edilemeyen bir aksaklık sebebiyle jet-grout deney setinde istenilen basıncın elde edilememesine bağlanmaktadır.



**Şekil 4.2.** SDÇ-NMS (6) ve SDÇ-SYS (6) kolonlarında meydana gelen spirallenme

Çap ve yükseklik ölçümlerinden sonra jet-grout kolonlar Mühendislik Fakültesi Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'na taşınarak bu kolonlardan en az 3 adet olacak şekilde karot numuneler alınmıştır (Şekil 4.3).



**a)** **b)**

**c)**

**Şekil 4.3. a)** Jet-grout kolonlardan karot alınması **b)** Jet-grout kolondan alınan karot numuneler **c)** Karot alınmış jet-grout kolonlar

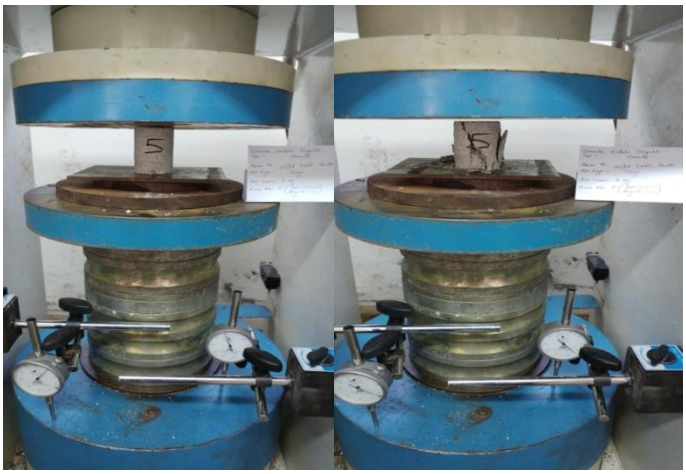
Jet-grout kolonların enine ve boyuna kesitleri incelendiğinde literatür çalışmalarına uygun olarak iyi çimentolaşmış bölge ve az çimentolaşmış bölgeler elde edilmiştir. Jet-grout kolonlardan alınan karot numunelerin olabildiğince iyi çimentolaşmış bölgeden alınması özen gösterilmiştir (Şekil 4.4). SDÇ-NMS (6) ve SDÇ-SYS (6) jet-grout kolonlarında spirallenme olması ve kolon süreksizlikleri nedeniyle, bu kolonlardan istenilen boyutlarda karot alınamamıştır.



**a)** **b)**

**Şekil 4.4 a), b).** Enine ve boyuna kesit alınan jet-grout kolonda iyi çimentolaşmış ve az çimentolaşmış bölgeler

Alınan karot numuneler 6.5 cm yüksekliğinde ve 4.3 cm çapında, yani yükseklik/çap oranı yaklaşık 1.5 olacak şekilde, kesilerek alt ve üst yüzeyleri düzeltildikten sonra, üzerlerinde Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda serbest basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5.** Karot numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi

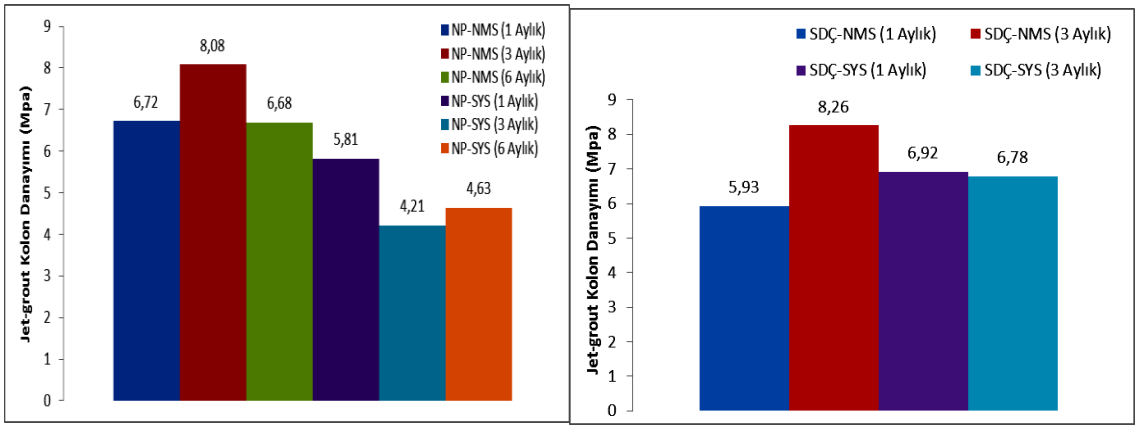
Şekil 4.6'da 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık kür süreleri sonunda jet-grout kolonlardan alınan ve yükseklik/çap oranı 1.5 olacak şekilde kesilip düzeltilen karot numuneler yer almaktadır. Bu karot numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları ise Tablo 4.2 ve Şekil 4.7'de toplu olarak verilmiştir.




**Şekil 4.6. a), b), c) ve d)** 1 aylık kür süresi, **e), f), g) ve h)** 3 aylık kür süresi ve **ı), i), j) ve k)** 6 aylık kür süresi sonunda jet-grout kolonlardan alınan karot numuneler

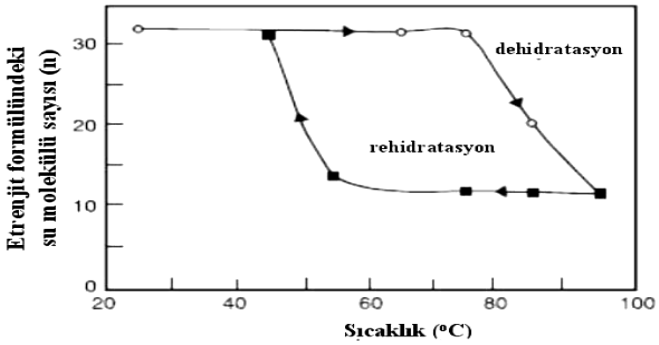
**Tablo 4.2.** Jet-grout kolonlardan alınan karot numunelerin serbest basınç mukavemetleri

| *Kolon Adı* | *Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)* | | |
|---|---|---|---|
| | **1 Aylık Karotlar** | **3 Aylık Karotlar** | **6 Aylık Karotlar** |
| NP-NMS | 6,72 | 8,08 | 6,68 |
| NP-SYS | 5,81 | 4,21 | 4,63 |
| SDÇ-NMS | 5,93 | 8,26 | - |
| SDÇ-SYS | 6,92 | 6,78 | - |




**Şekil 4.7.** Normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolon dayanımlarının kullanılan kür suyu ve kür süresine bağlı değişiminin grafik gösterimi

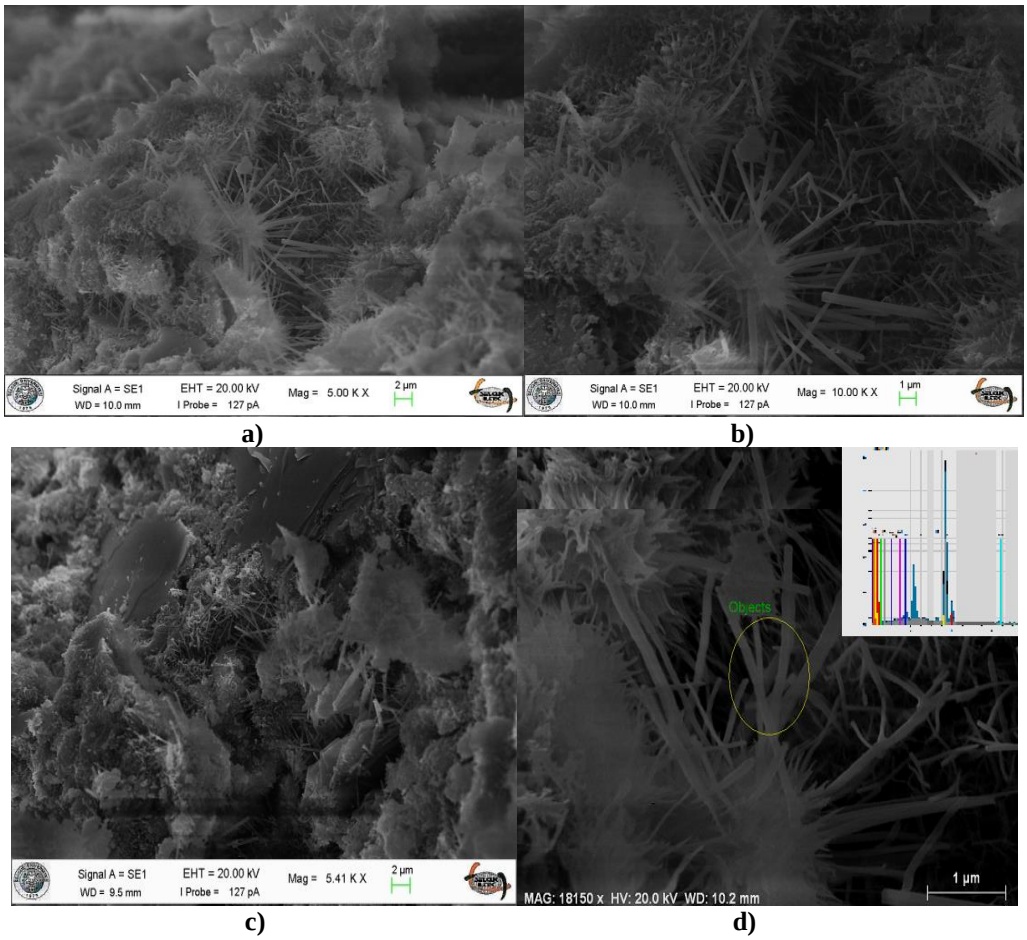
Oluşturulan jet-grout kolonların bir kısmı musluk suyu ile kür edilmiş, bir kısmı ise sülfat içerikli yeraltı suyu ile kür edilerek sülfata maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisi ile kolonun içyapısında oluşan etrenjit kristalleri bu kolonların zamanla içyapıdaki hacim artışına bağlı olarak çatlamasına, dağılmasına ve dayanım kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle serbest basınç deneyine tabi tutulan karot numunelerden alınan küçük parçalar ve toz numuneler üzerinde S.Ü. İLTEK Merkezinde SEM ve XRD analizleri yapılmış, sülfat etkisine maruz kalan jet-grout kolon yapısındaki morfolojik değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılacak SEM analizi için numuneler öncelikli olarak 80 ºC'nin altında kurutulmuştur. Numunelerin bu sıcaklıkta kurutulma sebebi etrenjitin kristal yapısının sıcaklık artışına bağlı su kayıpları ile değişmesidir. 80 ºC'den sonra etrenjit kristali su kaybederek meta-etrenjite dönüşmektedir. Meta-etrenjit kristali amorf yapıya sahip olduğu için XRD analizinde etrenjit açılarında pik vermemektedir. Şekil 4.8'de etrenjit kristalinin yapısındaki su molekülünün sıcaklığa bağlı değişimi yer almaktadır.




**Şekil 4.8.** Etrenjit kristalinin su molekülü sayısının sıcaklıkla değişimi (Zhou ve Glasser, 2001)

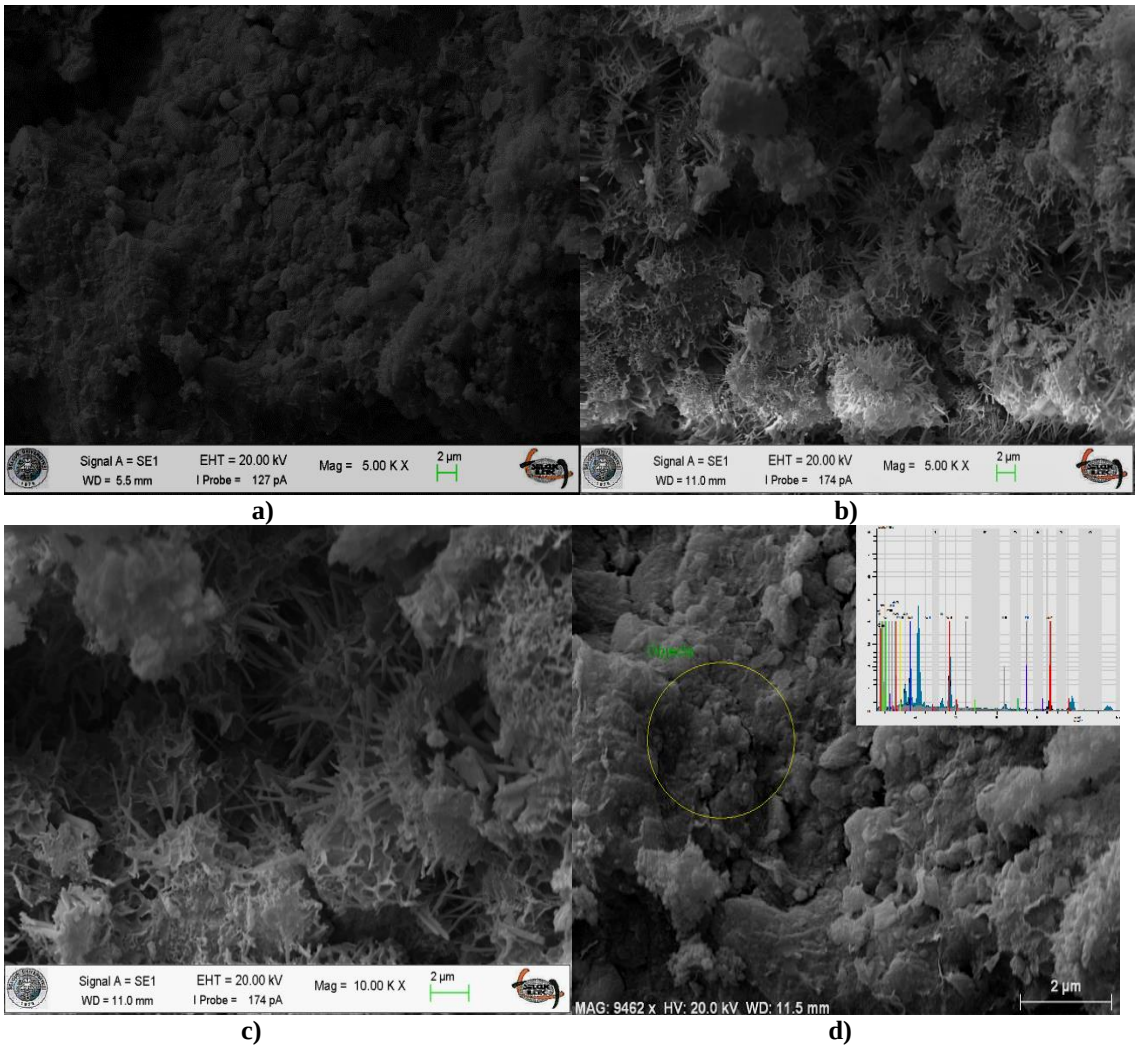
SEM (Scanning Electron Microscope) analizi için kurutulan numuneler altın kaplanarak cihaza yerleştirilmiştir. Bu analizde olası etrenjit oluşumları incelenmiştir. Bazı bölgelerde etrenjit oluşumunu belirlemek için ek olarak EDS analizi yapılarak element kompozisyonu belirlenmiştir. Literatürde EDS analizi sonuçlarından elde edilen S/Ca (Silisyum/Kalsiyum) ve Al/Ca (Alüminyum/Kalsiyum) oranları ve S/Al oranı etrenjit oluşumunu belirlemede kullanılmaktadır. Etrenjit kristali farklı yapılarda oluşabildiği için literatürde etrenjit kristal tipine bağlı olarak bu oranlarla ilgili bazı ilişkiler yer almaktadır. Örneğin S/Ca oranı 0.3-0.55 aralığında ve Al/Ca oranı 0.15-0.30 aralığında olması oluşan bu yapının masif etrenjit olduğu, S/Ca oranı 0.1-0.55 aralığında ve Al/Ca oranı 0.05-0.30 aralığında olması ise oluşan bu yapının top etrenjit olduğunu göstermektedir. Genel olarak ise S/Ca ve Al/Ca oranının 0.10 den fazla olması yapının etrenjit olduğunu göstermektedir (Tosun, 2007).

Normal portland çimentosu ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu ile 1 ay kür edilen jet-grout kolonlardan (NP-NMS (1)) alınan numuneler üzerinde yapılan SEM analizinde Şekil 4.9(a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi iğneli yapıda kristal oluşumları gözlenmiştir. Şekil 4.9(d)'de yer alan işaretli bölgede iğneli yapı üzerinde yapılan EDS analizi sonucunda bu yapının S/Ca oranının 0.22 ve Al/Ca oranının ise 0.03 belirlenmiştir. Ancak burada oluşan etrenjit, dışarıdan herhangi bir sülfat girişi olmadığından dolayı, hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan etrenjittir ve beton dayanımına olumsuz bir etki yapmayacaktır.



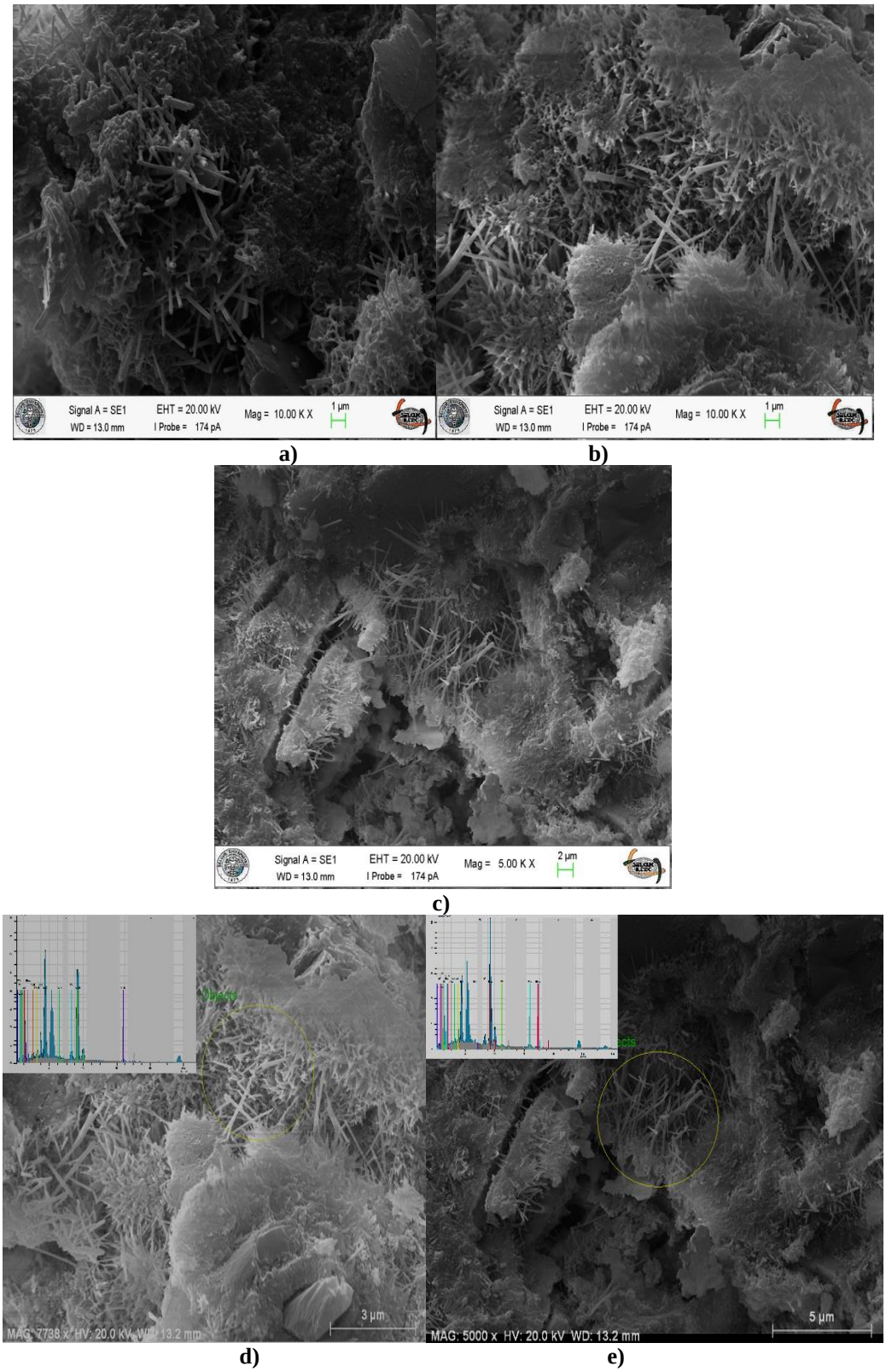

**Şekil 4.9. a), b), c)** NP-NMS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ve **d)** SEM analizi esnasında yapılan EDS analizi

Şekil 4.10(a), (b), (c) ve (d)'de normal portland çimentosu ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan ve sülfat içerikli yeraltı suyu ile 1 ay kür edilen jet-grout kolonlardan (NP-SYS (1)) alınan numuneler üzerinde yapılan SEM analizi görüntüleri yer almaktadır. Şekil 4.10 (d)'de işaretlenen bölgede yapılan EDS analizi ile bu yapının S/Ca oranının 0.85 ve Al/Ca oranının ise 0.38 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen görüntülerin yoğun bir etrenjit kümelenmesine ait olduğu belirlenmiştir. Burada oluşan etrenjit ise hidratasyon reaksiyonlara ek olarak sülfat etkisi sonucunda beton içyapısında oluşan hacim artışı ile betonun dağılmasına ve uzun dönemde beton dayanımının olumsuz etkilenmesine yol açan etrenjit oluşumu olduğu düşünülmektedir.

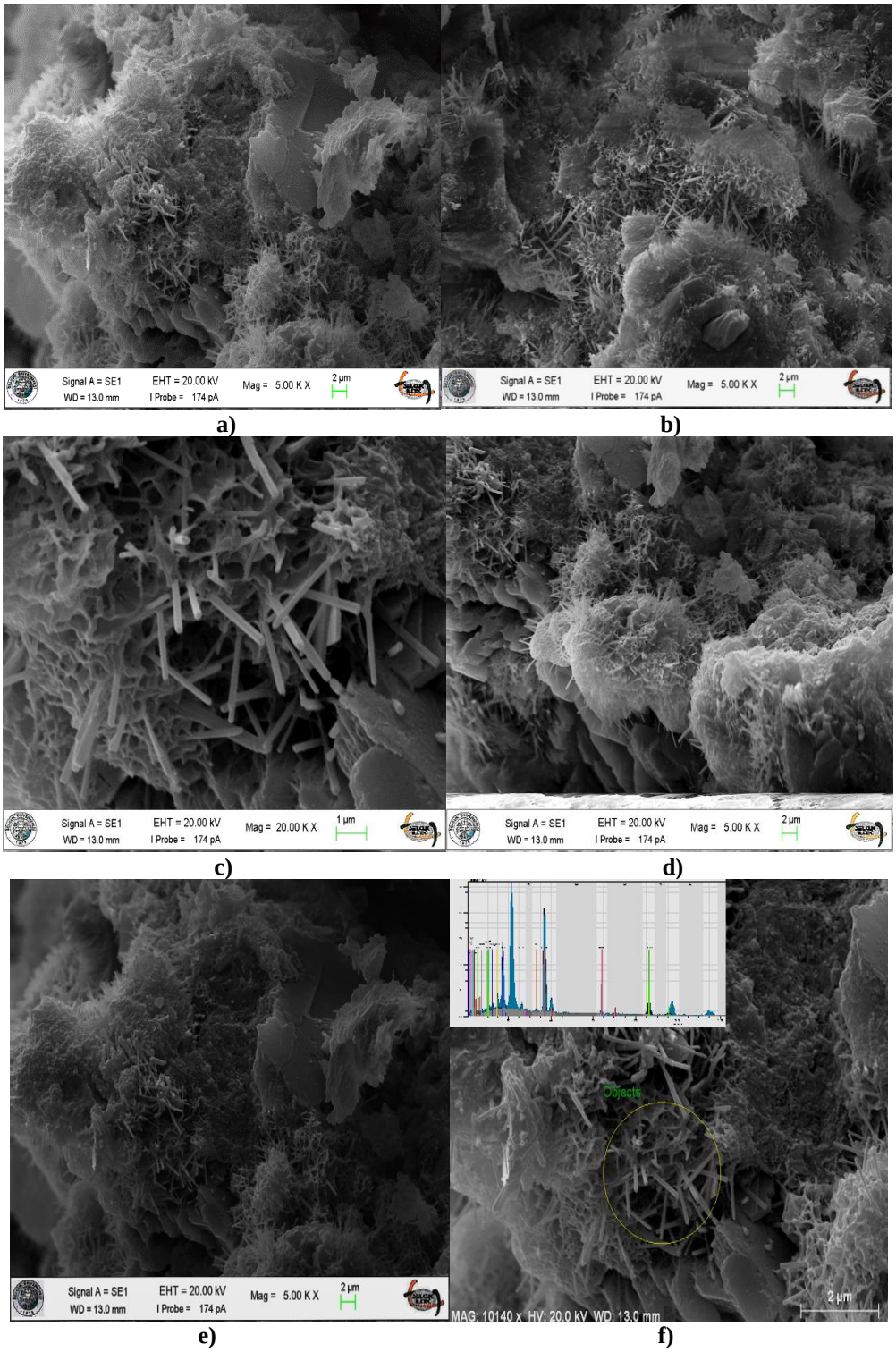



**Şekil 4.10.** NP-SYS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sırasıyla NP-NMS (3) jet-grout kolonlarına ve NP-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numuneler üzerinde yapılan SEM analizi görüntüleri yer almaktadır. Şekil 4.11(d), (e) ve Şekil 4.12(f)'de yer alan işaretli bölgelerde yapılan EDS analizi ile elde edilen S/Ca oranları sırasıyla 0.41, 0.31 ve 0.92 ve Al/Ca oranları ise sırasıyla 0.17, 0.11 ve 0.26 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar değerlendirildiğinde oluşan yapıların etrenjit kristali olduğu belirlenmiştir. Ancak NP-SYS (3) jet-grout kolonlarında sülfat etkisine bağlı oluşan etrenjit kümelenmesinin ve etrenjit boylarının daha fazla olduğu görülmektedir.



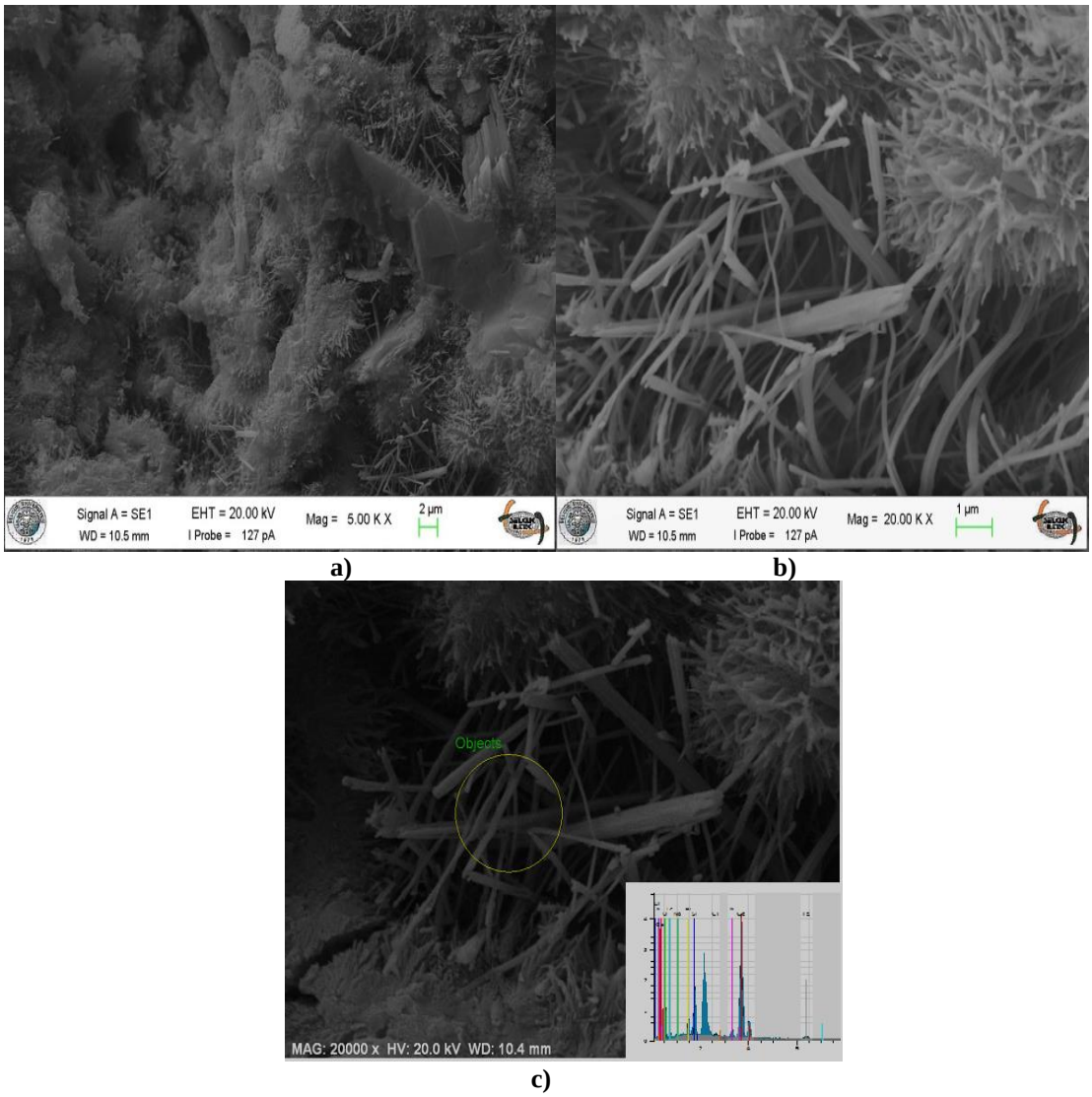

**Şekil 4.11.** NP-NMS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri




**Şekil 4.12.** NP-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

Şekil 4.13'de sülfata dayanıklı çimento ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu ile 1 ay kür edilen jet-grout kolonlardan (SDÇ-NMS (1)) alınan numunelere ait mikroyapı incelemesi yer almaktadır. Şekil 4.13(a) ve (b)'de yer alan SEM görüntülerinde etrenjit oluşumuna rastlanmıştır. Ayrıca Şekil 4.13(c)'de

işaretlenen bölgede yapılan EDS analizi sonuçlarından bu yapının S/Ca oranının 0.32 ve Al/Ca oranının 0.13 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar bu yapının hidratasyon reaksiyonları ile oluşan etrenjit olduğunu göstermektedir.

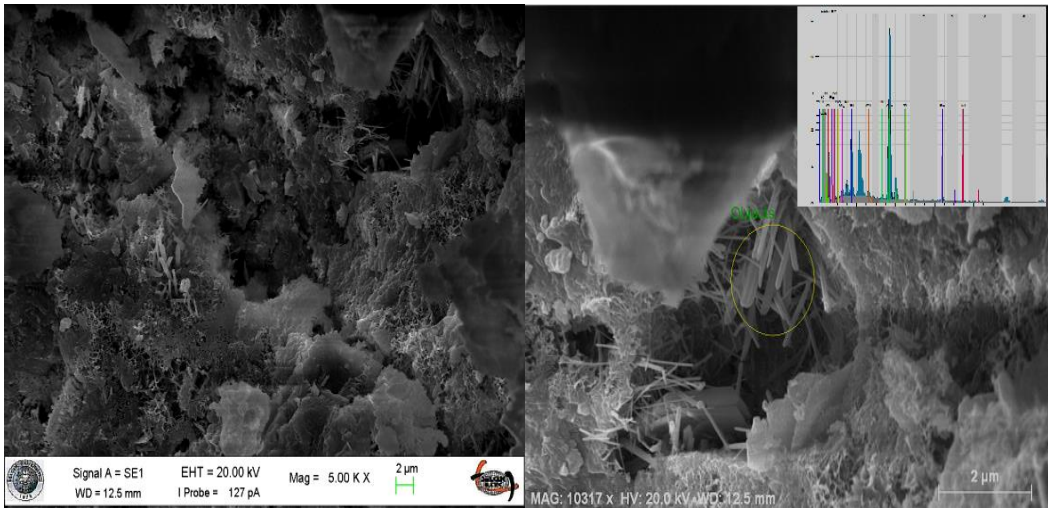



**a)** **b)**

**c)**

**Şekil 4.13.** SDÇ-NMS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

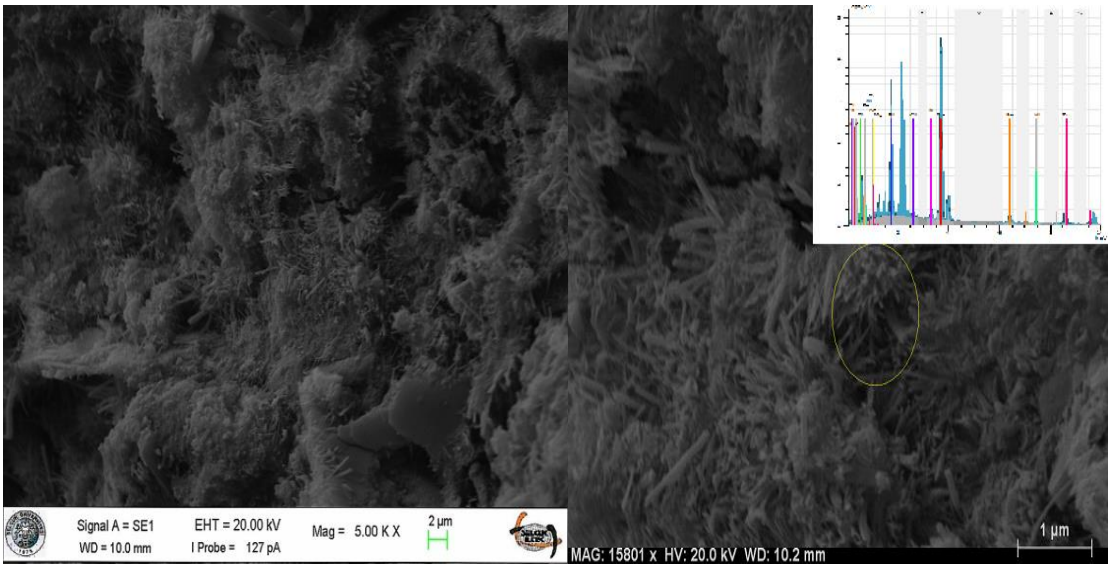
Şekil 4.14'te sülfata dayanıklı çimento ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan ve sülfat içerikli yeraltı suyu ile 1 ay kür edilen jet-grout kolonlarından (SDÇ-SYS (1)) alınan numunelere ait mikroyapı incelemesi yer almaktadır. Şekil 4.14(b)'de işaretlenen bölgede yapılan EDS analizi ile S/Ca oranının 0.24 ve Al/Ca oranının 0.1 olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar etrenjit oluşumunu göstermektedir ancak bu numunelerde oluşan etrenjit kristali kümelenmesi NP-SYS (1) numunelerine kıyasla daha azdır.




**a)** **b)**

**Şekil 4.14.** SDÇ-SYS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

Şekil 4.15'te ise SDÇ-NMS (3) jet-grout kolonlarından alınan numunelere ait mikroyapı incelemesi yer almaktadır. Bu numunelere ait EDS analiz sonuçlarından S/Ca oranının 0.49 ve Al/Ca oranının 0.13 olduğu belirlenmiştir. SEM analizinden elde edilen görüntüler ve işaretlenen bölgelerde yapılan EDS analizi sonuçlarının beraber değerlendirilmesi ile oluşan ürünlerin etrenjit olduğu belirlenmiştir.

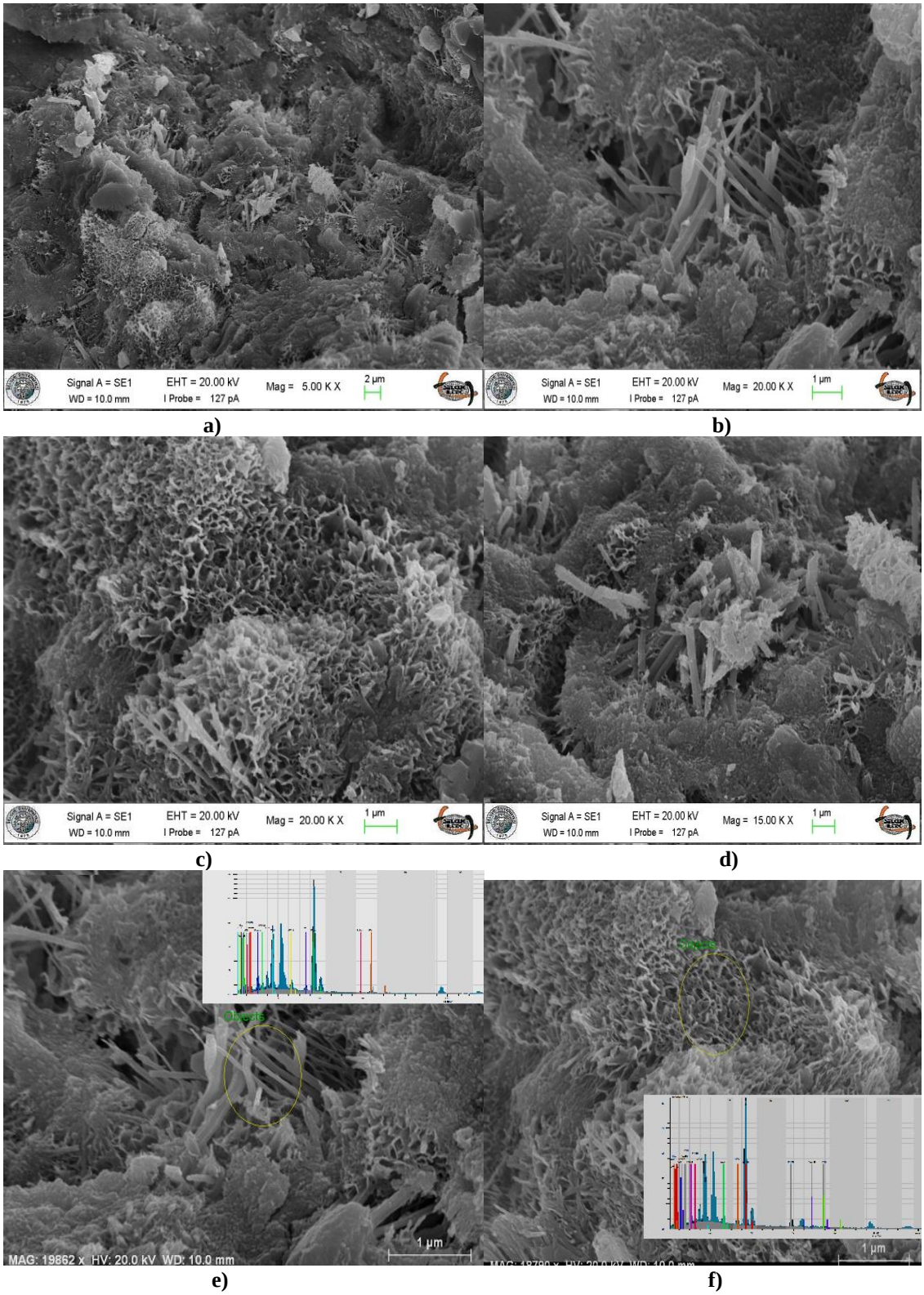



**a)** **b)**

**Şekil 4.15.** SDÇ-NMS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

Şekil 4.16'da SDÇ-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numuneler üzerinde yapılan SEM analizinden elde edilen görüntülerde farklı yapılanmalar belirlenmiştir. Bu bölgelerde EDS analizi yapılarak element kompozisyonu belirlenmiştir. Yapılan analiz

sonuçlarından Şekil 4.16(e) ve (f)'de yer alan iki yapının S/Ca oranlarının sırasıyla 0.37 ve 0.34 ve Al/Ca oranlarının sırasıyla 0.15 ve 0.11 olduğu ve elde edilen oranların bu yapıların etrenjit oluşumuna ait olduğunu işaret ettiği belirlenmiştir.




**a)** **b)**

**c)** **d)**

**e)** **f)**

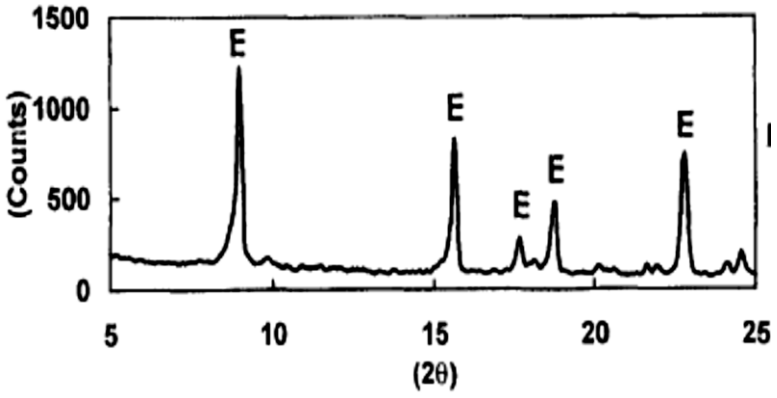
**Şekil 4.16.** SDÇ-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri

Tablo 4.3'de SEM-EDS analizlerinden elde edilen S/Ca ve Al/Ca oranları toplu olarak verilmiştir. Ayrıca SEM analizi ile jet-grout kolon yapısında oluşumu gözlenen etrenjit kristallerinin olası oluşum reaksiyonları bu tabloda yer almaktadır.

**Tablo 4.3.** SEM-EDS analiz sonuçları ve etrenjit oluşumları

| JG Kolon Adı | S/Ca Oranı | Al/Ca Oranı | Etrenjit Oluşumu Gözlenen Morfolojik Analiz | Etrenjit Oluşum Mekanizması |
|---|---|---|---|---|
| NP-NMS (1) | 0.22 | 0.03 | SEM-EDS | Hidratasyon |
| NP-SYS (1) | 0.85 | 0.38 | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| NP-NMS (3) | 0.41 | 0.17 | SEM-EDS | Hidratasyon |
| NP-SYS (3) | 0.92 | 0.26 | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| SDÇ-NMS (1) | 0.32 | 0.3 | SEM-EDS | Hidratasyon |
| SDÇ-SYS (1) | 0.24 | 0.1 | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| SDÇ-NMS (3) | 0.49 | 0.13 | SEM-EDS | Hidratasyon |
| SDÇ-SYS (3) | 0.37 | 0.15 | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |

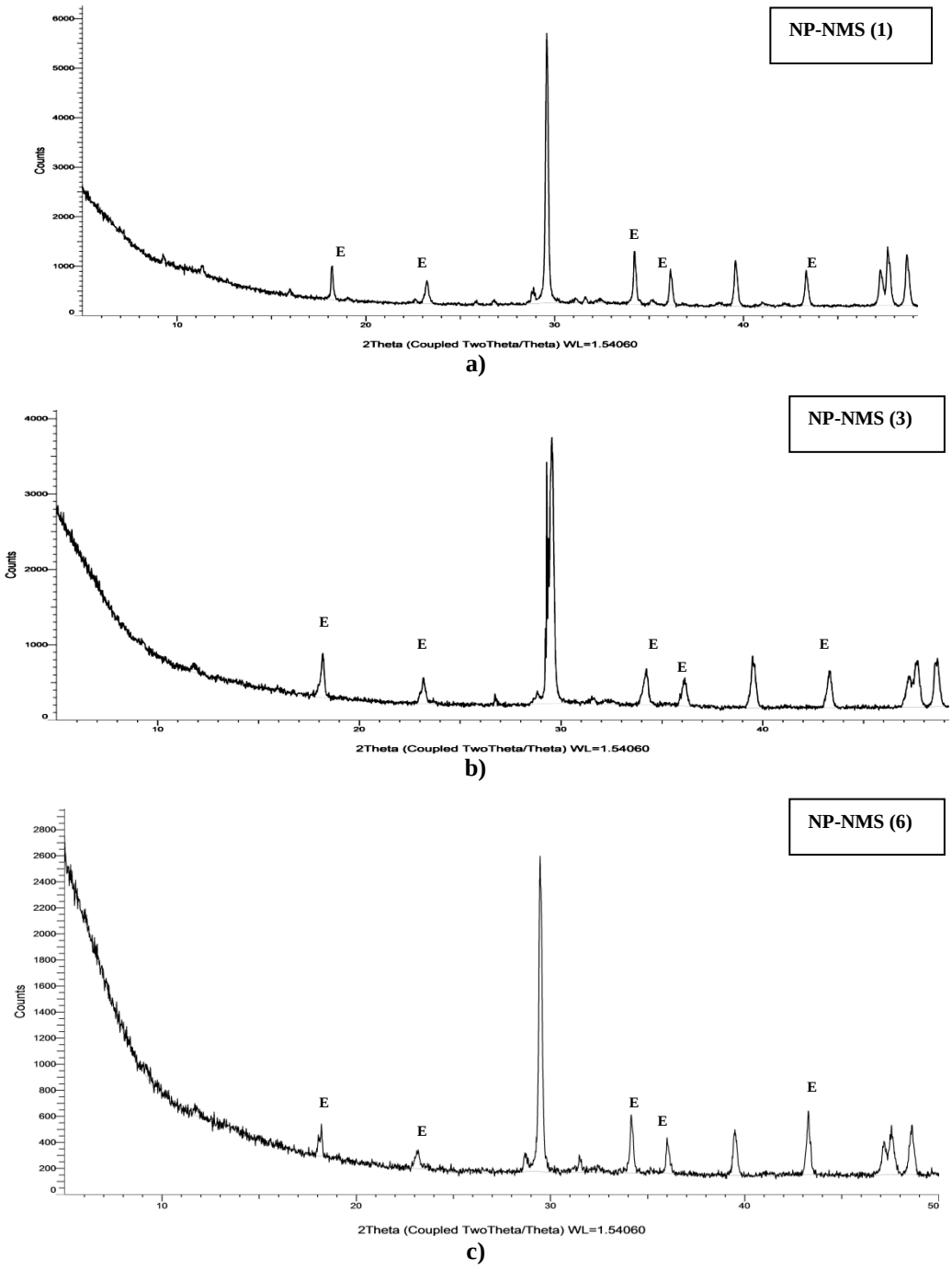
Yukarıda SEM-EDS analizi ile kristal yapısı belirlenmeye çalışılan numuneler üzerinde bir de XRD analizi yapılmıştır. EDS analizi ile mineralojik yapı tam olarak belirlenememekte sadece oluşan ürünlerin ne olabileceği belirlenmektedir. Bu nedenle bu numuneler üzerinde XRD analizi yapılması ve analiz sonuçlarının beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde etrenjit piklerine ait açılar Şekil 4.17'de görüldüğü gibi 9.1º, 15.8º, 18.1-18.8º ve 23º olarak belirtilmektedir (Tosun, 2007; Felekoğlu, 2008). Bu nedenle hazırlanan toz numuneler üzerinde yapılan XRD analizleri 2Ɵ 5-50º arasında 2 º/dk tarama hızı ile yapılmıştır.



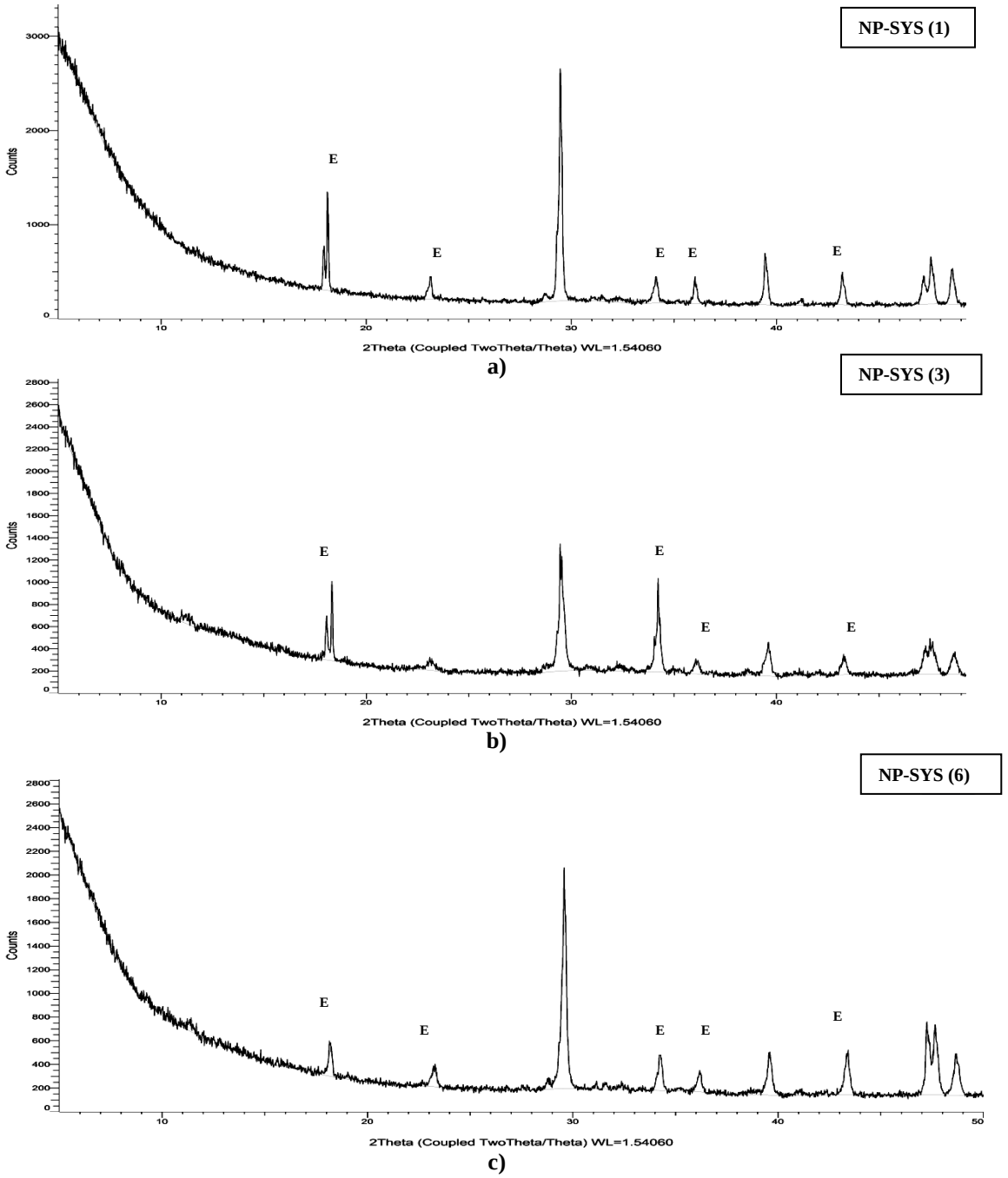

**Şekil 4.17.** Etrenjit mineralinin XRD pikleri (Felekoğlu, 2008)

Yapılan XRD analizi sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21) etrenjit mineralinin en önemli pik değeri olan 9.1º derecede etrenjit piki numunelerin tümünde gözlenmemiştir. Yapılan araştırma sonuncunda bunun sebebinin

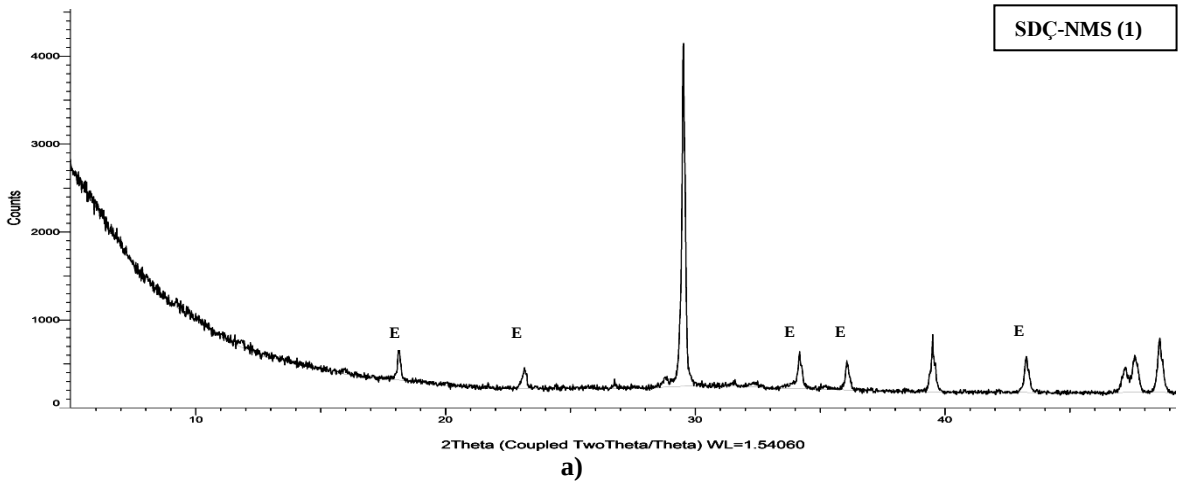
kullanılan kumun piklerinin etrenjit piklerini baskılaması ve kurutma nedeniyle etrenjitin karbonatlaşması olabileceği belirlenmiştir. Bu sebeplerden ikincisi üzerinde durulmaktadır. Çünkü XRD analizi yapılana kadar karot alınması aşamasında numuneler birkaç gün dışarda bekletilmiş ve numunelerin hava ile teması tam olarak kesilememiştir.



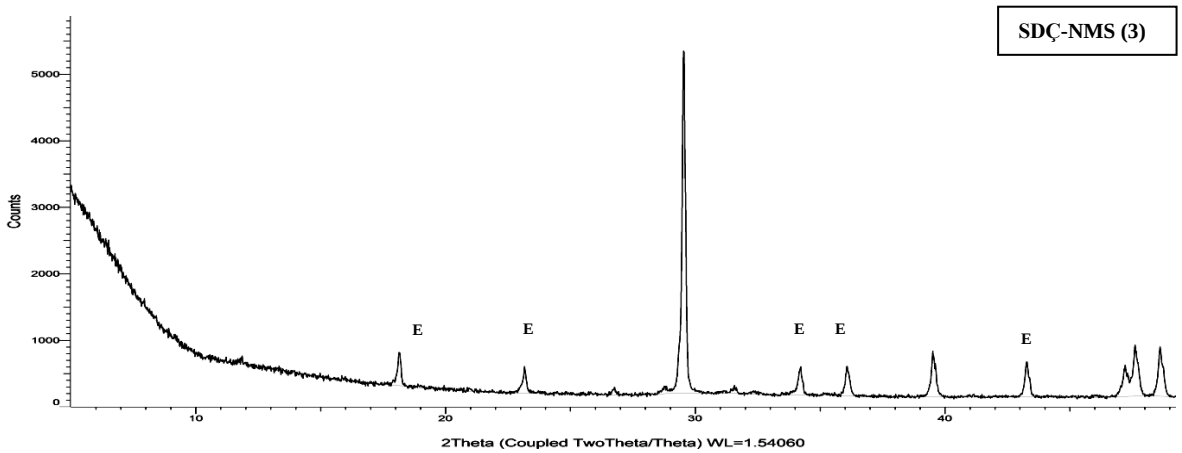

**Şekil 4.18. a), b) ve c)** Normal portland çimentosu ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları



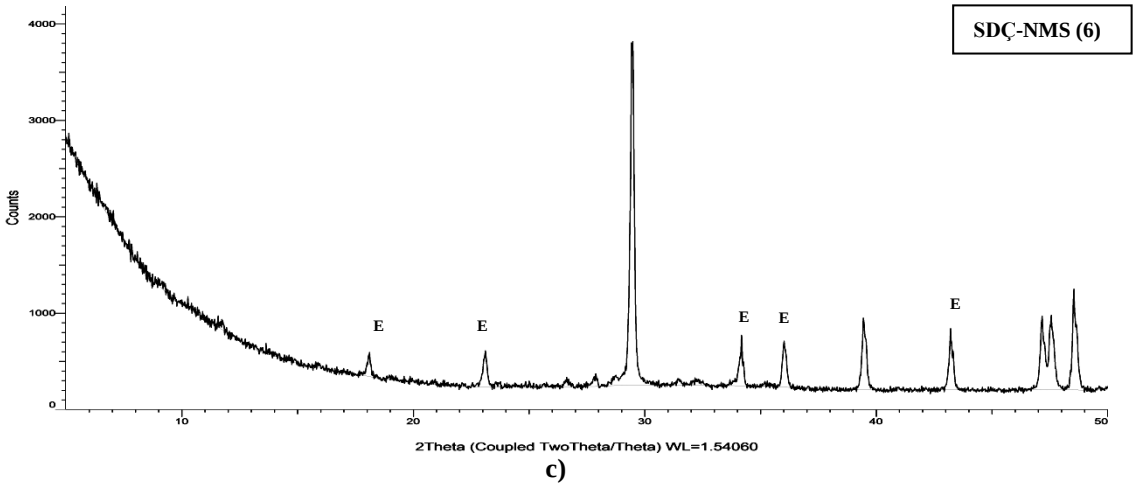

**Şekil 4.19. a), b) ve c)** Normal portland çimentosu ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları




**a)**

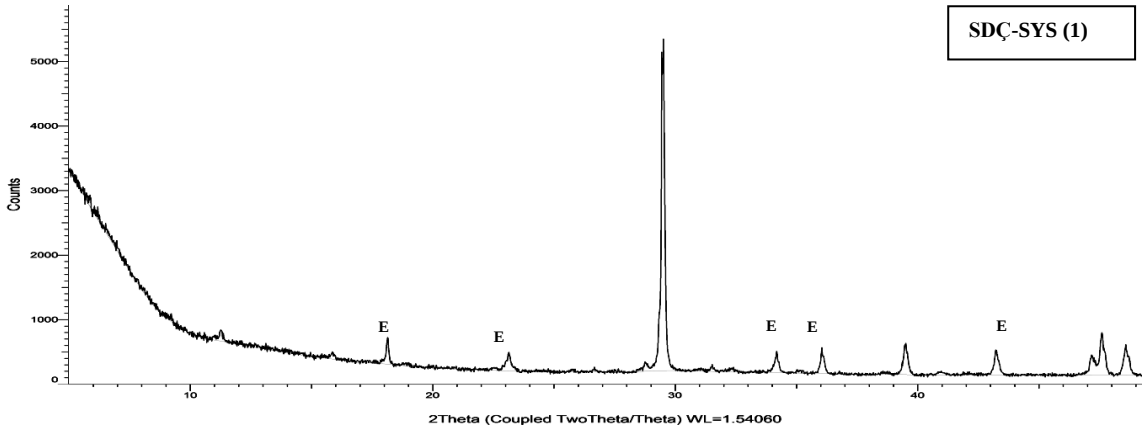



**b)**

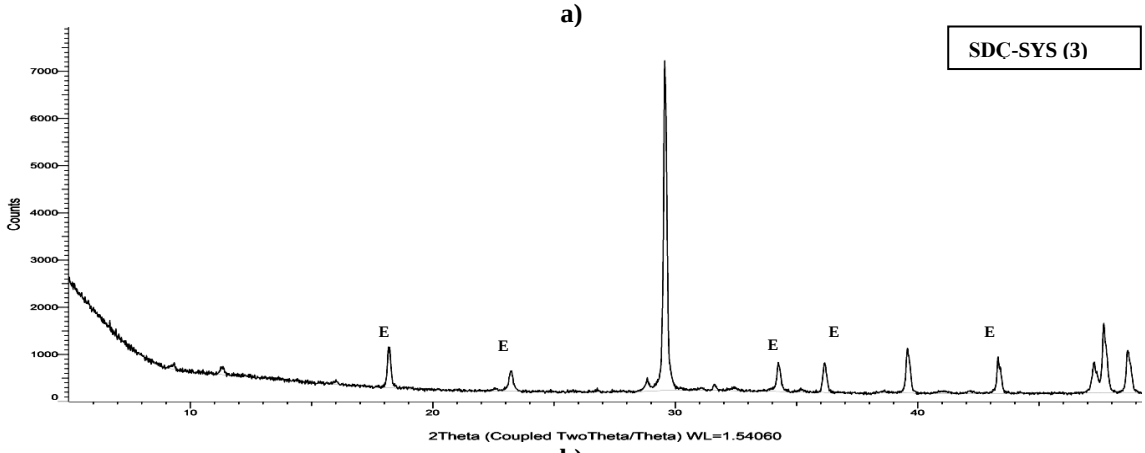



**c)**

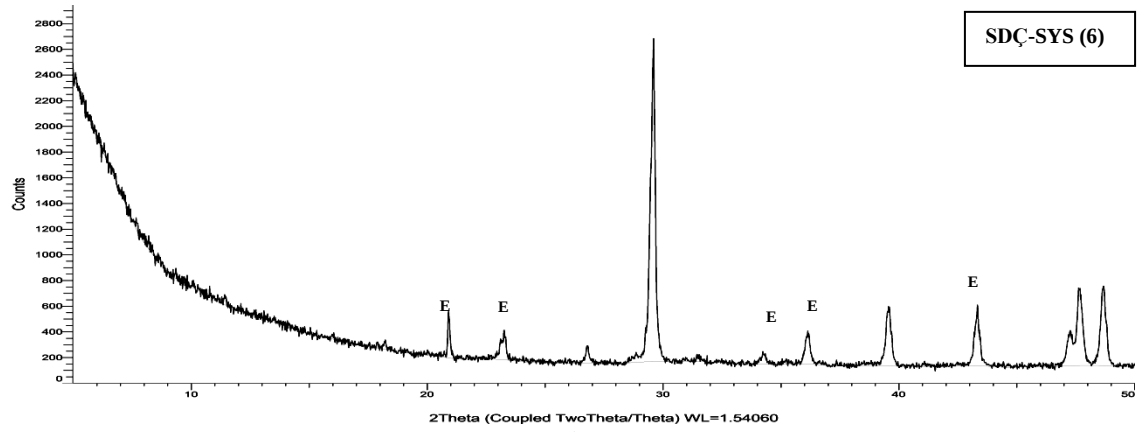
**Şekil 4.20. a), b) ve c)** Sülfata dayanıklı çimento ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları




**a)**




**b)**




**c)**

**Şekil 4.21. a), b) ve c)** Sülfata dayanıklı çimento ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 5.1.Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında jet-grout kolonların oluşturulduğu kum zemin ortamındaki yeraltı suyunda bulunan sülfatın jet-grout kolon dayanımı üzerindeki etkisi mekanik ve morfolojik analizler yapılarak araştırılmıştır.

- Tez çalışmasında laboratuvar tipi özel jet-grout deney seti kullanılarak laboratuvar ortamında jet-grout kolonlar oluşturulmuştur. Jet-grout kolon parametrelerinden su/çimento oranı, enjeksiyon basıncı, tij dönme ve çekme hızı ile zemin koşulları sabit tutularak laboratuvar ortamında %41 rölatif sıkılıkta hazırlanan kum zeminde jet-grout kolonlar oluşturulmuştur. Jet-grout kolonları oluşturmak için enjeksiyon malzemesi saha uygulamalarında en çok kullanılan su/çimento oranı değeri olan 1.0 oranında hazırlanmıştır.
- Jet-grout kolon enjeksiyon malzemesini hazırlamak için karışım suyu olarak ve sülfat etki mekanizmasını belirlemek için jet-grout kolonların kür suyu olarak Konya II. Organize Sanayi Bölgesi'nden getirilen sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılmıştır. Kullanılan yeraltı suyunun analiz sonuçları değerlendirildiğinde, bu suyun beton üzerindeki zararlı etkinlik derecesi "çok kuvvetli" olarak belirlenmiştir. Sülfat etki mekanizmasını belirlemek için oluşturulan referans kolonlarda ise hem kür suyu hem de karışım suyu olarak normal musluk suyu kullanılmıştır.
- Ayrıca çimento tipinin sülfat etki mekanizması üzerindeki etkisini belirlemek için normal portland çimentosu (42.5) ve sülfata dayanıklı çimento (42.5) olmak üzere iki tip çimento kullanılmıştır. Her çimento tipi için, kür suyu ve karışım suyu olarak sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak 3 adet, normal musluk suyu kullanılarak 3 adet olmak üzere 6 adet jet-grout kolon oluşturulmuştur. Toplamda tez çalışmasında 12 adet jet-grout kolon oluşturulmuştur.
- Laboratuvar çalışmasında, amaçlanan jet-grout kolonların elde edilmesi için laboratuvarda enjeksiyon basıncı, tij dönme hızı, tij çekme hızı ve plastik varil boyutları değiştirilerek deneme kolonları oluşturulmuştur. Deneme kolonlarının oluşturulmasında yaşanan zorluklardan dolayı, ilk olarak kullanılan kumun % 5-6 su içeriğinde ve % 41 rölatif sıkılıkta kalıplara yerleştirilmesi sağlanmıştır.

- ✓ Kumun belirli bir su içeriğinde kalıplara yerleştirilmesindeki amaç tijin istenilen derinliğe rahat bir şekilde indirilmesidir.
- ✓ Kumun sabit rölatif sıkılıkta yerleştirilmesi oluşturulan jet-grout kolon çap ve yüksekliklerinin hemen hemen eşit olmasına olanak sağlamıştır.

- Farklı boyutlardaki plastik varillerde hazırlanan kum zeminde oluşturulan jet-grout kolonların çimentolaşma durumu değerlendirildiğinde, deneysel çalışmada kullanılacak plastik varilin 80 cm çapında ve 120 cm yüksekliğinde seçilmiştir.
- Oluşturulan deneme kolonları ile jet-grout kolon parametrelerinin belirlenmesinde deneme kolonlarının önemi tecrübe edilmiş olup, saha çalışmalarında da ilk olarak deneme kolonları yapılarak uygun jet-grout kolon parametrelerinin seçilmesi gerektiği deneysel olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan jet-grout kolon parametreleri saha uygulamaları ve laboratuvarda yapılan deneme kolonlarının değerlendirilmesi ile aşağıdaki gibi seçilmiştir.

  Enjeksiyon basıncı 20 bar,
  Tij dönme hızı 10 dv/dk,
  Tij çekme hızı 30 cm/dk,
  Su/çimento oranı 1

- 1 ay, 3 ay ve 6 ay kür süresi için oluşturulan her bir jet-grout kolon çifti kür süresi sonunda kalıplardan çıkarılarak bu kolonların çap ve yükseklik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde oluşturulan jet-grout kolonlarının çap ve yüksekliklerinin hemen hemen birbirine çok yakın olduğu ve kolon çapları 24-29 cm aralığında, yükseklikleri ise 42-53 cm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen bu ölçüm değerlerinden kum zemin ortamının hazırlanması aşamasında hemen hemen eşit sıkılığın elde edildiğini, zemin ortamının hazırlanma aşamasının başarılı olduğunu göstermektedir.
- Elde edilen iki jet-grout kolonun çapının diğer kolonlardan fazla olması ve kolon yapısında spirallenmenin meydana gelmesi kumun kalıplara yerleştirilmesinde ve seçilen jet-grout kolon parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmadığı için jet-grout deney setinde fark edilemeyen bir sebepten dolayı yüksek basınç uygulanmasına bağlanmaktadır.

- Oluşturulan jet-grout kolonlardan enine ve boyuna alınan kesitlerde literatürde yer alan çalışmalara uygun olarak iyi çimentolaşmış ve az çimentolaşmış bölgeler elde edilmiştir.
- Çap ve yükseklik ölçümlerinden sonra jet-grout kolonlardan 6.5 cm yüksekliğinde ve 4.3 cm çapında (yükseklik/çap=1.5) alınan en az 3 adet karot numune serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarından normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonların (NP-NMS) ortalama dayanımları 1 ay kür süresi için 6.72 MPa, sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonların (NP-SYS) ortalama dayanımları 5.81 MPa, NP-NMS jet-grout kolonlarının ortalama dayanımları 3 ay kür süresi için 8.08 MPa, NP-SYS jet-grout kolonlarının ortalama dayanımları 4.21 MPa ve NP-NMS jet-grout kolonlarının ortalama dayanımları 6 ay kür süresi için 6.68 MPa, NP-SYS jet-grout kolonlarının ortalama dayanımları 4.63 MPa olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarından, her bir kür süresi için normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu ile kür edilen jet-grout kolonlarından alınan karot numunelerin ortalama basınç dayanımının, sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonlarından alınan karot numunelerin ortalama basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ek olarak sülfat etkisine bağlı olarak normal portland çimentosu kullanımında zamana bağlı olarak basınç dayanımında azalma meydana geldiği belirlenmiştir.
- Sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu ile kür edilen jet-grout kolonlarından alınan karot numunelerin ortalama basınç dayanımı 1 ay ve 3 ay kür süresi için 5.93 MPa'dan 8.26 MPa'a artmıştır. Ancak sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonlarından alınan karot numunelerin ortalama basınç dayanımında önemli bir değişim gözlenmemiştir (1 ay kür süresi için 6.92 MPa, 3 ay kür süresi için 6.78 MPa). Buradan sülfata dayanıklı çimento kullanımının sülfat etkisini azalttığı söylenebilir. 3 ay kür süresi için normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan ve kür edilen jet-grout kolonlarının ortalama basınç dayanımının sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan ve kür edilen jet-grout kolonlarının ortalama basınç dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonlarında, tüm kür süreleri için normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının ortalama basınç dayanımlarının sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout ortalama basınç dayanımından daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- 6 ay kür süresi için sülfata dayanıklı çimento kullanılarak normal musluk suyu veya sülfat içerikli yeraltı suyu ile oluşturulan jet-grout kolonların yapısında meydana gelen spirallenme nedeniyle karot numuneler alınamamıştır. Bu nedenle bu kolonlara ait ortalama basınç dayanımı belirlenememiştir.
- Sülfat etkisi ile kolonun içyapısında oluşan etrenjit kristalleri, zamana bağlı olarak jet-grout kolonlarının içyapısında hacim artışına sebep olarak dayanım kayıplarına yol açabilir. Bu etkiyi belirlemek amacıyla serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulan karot numunelerden alınan küçük parçalar ve toz numuneler üzerinde S.Ü. İLTEK Merkezi'nde SEM ve XRD analizleri yapılarak jet-grout kolonlarının içyapısındaki morfolojik değişimler belirlenmiştir.
- SEM analizi ile oluşturulan bütün jet-grout kolonlarının içyapısında etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Ancak hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan etrenjit ile dış sülfat etkisi ile oluşan etrenjitin birbirine karıştırılmamalıdır. Hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan etrenjit taze betonda oluştuğu için zaman bağlı olarak beton içyapısında genleşmeye yol açmayacak ve jet-grout kolon dayanımda olumsuz etki yaratmayacaktır. Dış sülfat etkisi ile oluşan etrenjit ise sertleşmiş betonda oluştuğu için ve hacim artışına bağlı olarak zamanla beton içyapısında ekstra gerilmeler oluşturarak betonun çatlamasına, dağılmasına ve dayanım kayıplarına yol açacaktır.
- Oluşturulan tüm jet-grout kolonların SEM-EDS analizinde elde edilen görüntüler ve Tablo 5.1'de yer alan S/Ca ve Al/Ca oranları incelendiğinde jet-grout kolon yapısında etrenjit oluşumuna rastlanılmıştır. EDS analizinden portland çimentosu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarında normal musluk suyundan sülfat içerikli yeraltı suyuna geçildiğinde S/Ca ve Al/Ca oranlarında bir artış gözlenmiştir. Örneğin NP-NMS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0.41 ve 0.17 iken, NP-SYS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları 0.92 ve 0.26 dır. Buradan sülfatlı suların normal portland

çiemntosu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının iç yapısında oluşan etrenjit miktarını artırdığı görülmektedir.

**Tablo 5.1.** SEM-EDS analiz sonuçları ve etrenjit oluşumları

| JG Kolon Adı | S/Ca Oranı | | Al/Ca Oranı | | Etrenjit Oluşumu Gözlenen Morfolojik Analiz | Etrenjit Oluşum Mekanizması |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NP-NMS (1) | 0.22 | + | 0.03 | + | SEM-EDS | Hidratasyon |
| NP-SYS (1) | 0.85 | | 0.38 | | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| NP-NMS (3) | 0.41 | + | 0.17 | + | SEM-EDS | Hidratasyon |
| NP-SYS (3) | 0.92 | | 0.26 | | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| SDÇ-NMS (1) | 0.32 | | 0.3 | | SEM-EDS | Hidratasyon |
| SDÇ-SYS (1) | 0.24 | - | 0.1 | - | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |
| SDÇ-NMS (3) | 0.49 | | 0.13 | | SEM-EDS | Hidratasyon |
| SDÇ-SYS (3) | 0.37 | - | 0.15 | - | SEM-EDS | Hidratsyon+Sülfat Etkisi |

- Sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarında normal musluk suyundan sülfat içerikli yeraltı suyuna geçildiğinde S/Ca ve Al/Ca oranlarında bir miktar azalma meydana gelmiştir. Örneğin SDÇ-NMS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları sırasıyla 0.49 ve 0.13 iken, SDÇ-SYS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları 0.37 ve 0.15'tir. Bu durum sülfata dayanıklı çimentodaki alüminatlı bileşiklerin miktarının normal portland çimentosundan az olması bağlı olarak jet-grout kolonlarının içyapısında oluşan etrenjit miktarının azalmasını sağladığını göstermektedir.
- EDS analizlerinin sonuçlarından sülfata dayanıklı çimento ve normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan ve sülfat içerikli yeraltı suyu ile kür edilen jet-grout kolonlardan alınan numuneler üzerinde yapılan karşılaştırıldığında, tüm kür süreleri için S/Ca ve Al/Ca oranlarının normal portland çimentolu numunelerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Örneğin NP-SYS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları 0.92 ve 0.26 iken SDÇ-SYS (3 aylık) numunelerin S/Ca ve Al/Ca oranları 0.37 ve 0.15'tir. Bu da normal portland çimentolu jet-grout kolonlarının yapısında oluşan etrenit miktarının sülfata dayanıklı çimento kullanılana jet-grout kolonlarından fazla olduğunu göstermektedir.
- SEM/EDS analizlerine gözlenen kristal yapısının etrenjit olduğunu doğrulamak için ek olarak tüm jet-grout kolon numunelerden alınan toz numuneler üzerinde 2Θ 5-50º arasında 2 º/dk tarama hızı ile XRD analizi yapılmıştır. Literatür çalışmalarında XRD analizlerinden elde edilen etrenjit pikleri 9.1º, 15.8º, 18.1-

18.8º ve 23º olarak belirlenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarından 9.1º yer alan belirgin etrenjit pikleri gözlenmemiş ancak diğer açı değerlerine karşılık gelen etrenjit pikleri gözlenmiştir. Bunun sebebi ise jet-grout kolonlar kalıplardan çıkarıldıktan hemen sonra karot alınamaması ve jet-grout kolonların bu süre zarfı içinde hava ile temasının tam olarak kesilememesi nedeniyle yapıda karbonatlaşma meydana gelmesine bağlanabilir.

- Ek olarak XRD analizinde normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan ve normal musluk suyu kullanılarak kür edilen jet-grout kolonları için elde edilen pik değerlerinin sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılan jet-grout kolonlarından daha az olduğu belirlenmiştir. Örneğin NP-NMS (1 ay) jet-grout kolonlarında 18.1º'ye karşılık gelen etrenjit pik değeri 1100 iken NP-SYS (1 ay) için 1400'dür. Bu da sülfat içerikli yeraltı suyunda oluşan etrenjit miktarının arttığını göstermektedir. Fakat sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarda ise normal musluk suyu ve sülfat içerikli yeraltı suyunda elde edilen pik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.
- Sülfat içerikli yeraltı suyu ile kür edilen sülfata dayanıklı çimento ve normal portland çimentosu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlardan alınan numunelerin XRD analiz sonuçları karşılaştırıldığında, normal portland çimentosu kullanılan numunelerden elde edilen etrenjit piki değerleri sülfata dayanıklı çimento kullanılan numunelerden elde edilen etrenjit piki değerlerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Örneğin NP-SYS (1 ay) için etrenjit pik değeri 1400 iken SDÇ-SYS (1 ay) için 700'dür. Bu durumun da aynı şekilde normal portland çimentolu jet-grout kolonlarının yapısında oluşan etrenjit miktarının sülfata dayanıklı çimento kullanılana jet-grout kolonlarından fazla olduğunu gösterdiği söylenebilir.

## 5.2.Öneriler

- Literatür çalışmaları incelendiğinde sülfatın beton üzerindeki etki mekanizmasının uzun dönemde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu nedenle sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların en az 2 yıl kür süresi sülfata maruz bırakılarak dayanımı incelenebilir. Bu amaçla BAP projesi kapsamında 1 ve 2 yıllık numuneler hazırlanmış olup çalışma devam etmektedir.
- Sülfat etki mekanizmasını belirlemek için birçok çalışmada kullanılan kür suyunun yenilendiği görülmektedir. Çalışmada kür suyu değişimine olanak sağlayacak kalıplar kullanılarak sülfat etki mekanizması detaylı incelenebilir.
- Bu çalışmada tek tip zemin ortamında oluşturulan jet-grout kolonların performansı incelenmiştir. Arazi durumunu yansıtmak için tabakalı zemin ortamında ya da silt ve kil zemin ortamında oluşturulan jet-grout kolonlar için jet-grout kolon parametrelerinin belirlenmesi ve kolon dayanımları araştırılabilir.

**KAYNAKLAR**


Baumann, V., 1984, Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis, *Baugrundtagung-DGEG*, 49 - 83.

Bell, K., Clemente, R., Gularte, F. ve Lopez, R., 2003, Superjet grouting reduces foundation settlement for La Rosita Power Plant in Mexicalli, Mexico, *Grouting and Ground Treatment*, 354-364.

Biczok, I., 1967, Concrete corrosion concrete protection, *Chemical Publishing*.

Brill, G., Burke, G. ve Ringen, A., 2003, A-ten year perspective of jet-grouting: Advancements in applications and technology, *Grouting and Ground Treatment*, 218-235.

Burke, G. K., 2004, Jet-Grouting Systems: Advantages and Disadvantages, *Geo-Support 2004*.

Cao, H. T., Bucea, L., Ray, A. ve Yozghatlian, S., 1997, The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of portland cements and blended cements, *Cement & Concrete Composites*, 19 (2), 161-171.

Chan, M. P., 2005, Analysis And Modeling of Grouting And Its Application, Bachelor Degree, *University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying*.

Cohen, M. D. ve Tian, B., 2000, Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?, *Cement and Concrete Research*, 30, 117-123.

Collepardi, M., A State-art-of-art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete.

Dehwah, H. A. F., 2007, Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates, *Construction and Building Materials*, 21 (1), 29-39.

Durgunoğlu, H. T., Kulaç, H. F., Oruç, K., Öge, C. E. ve Eker, F. Ş., 1998, Jet-Grout Yöntemi İle Zemin İyileştirmesi Üzerine Bir Uygulama. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Durgunoğlu, H. T., Kulaç, H. F., Oruç, K., Yıldız, R., Altugu, T. ve Emrem, C., 2002, Sıvılaşmaya karşı jetgrout yöntemi ile zemin ıslahına ait bir vaka analizi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi. Eskişehir.

Durgunoğlu, H. T., Emrem, C., Chinchelli, M., Hurley, T., İkiz, S. ve Çatalbaş, F., 2004, Soil Improvement with Jet-Grout Columns: A Case Study From The 1999 Kocaeli Earthquake, *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York.

Düzceer, R. ve Gökalp, A., 2003, Construction and Quality Control of Jet Grouting Applications in Turkey, *Grouting and Ground Treatment*, 281-293.

Erdoğan, T. Y., 2003, Beton, *Ankara,Turkey*, ODTU Yayıncılık p.

Erkan, İ. H., 2013, Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması, Doktora tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Felekoğlu, B., 2008, Portland Kalkerli Çimento Üretiminde Mekanik Performans ve Sülfat Kaynaklı Durabilite Problemleri Açısından Optimum Kalker Oranının Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir.

Fidan, B., 2015, İnce taneli çimentonun jet-grout kolonların performansı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Hartell, J. A., 2008, Sodium sulphate attack on concrete: Effect on mechanical properties, Master Thesis, *McGill University*.

Ho, C. E., 2007, Fluid-Soil Interaction Model For Jet Grouting. Grouting for Ground Improvement: Innovative Concepts and Applications, ASCE**:** 1-10.

İleri-Araştırma-ARGE-Merkezi, S. Ü., https://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5877/tr:

Keller-Ground-Engineering, Soilcrete Jet-Grouting, http://www.keller.com.au/techniques/#soilcrete-jet-grouting:

Keller, http://www.haywardbaker.com/:

Küçükali, N., 2008, Demiryolu altyapısının jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi, Yüksek lisans tezi, *Karadeniz Tekniz Üniversitesi*, Trabzon.

Küsin, C. C., Yıldız, A. ve Örnek, M., 2009, Jet-grout kolonları ile iyileştirilen zeminlerin homojenleştirme yöntemi ile sayısal analizi, *Çukurova Üniversitesi Müh.Mim.Fak. Dergisi*, 24 (1-2), 121-131.

Lee, S. T., Moon, H. Y. ve Swamy, R. N., 2005, Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss, *Cement & Concrete Composites*, 27 (1), 65-76.

Lunardi, P., 1997, Ground İmprovement by means of jet-grouting, *Ground İmprovement*, 1, 65-85.

Malinin, A., Gladkov, I. ve Malinin, D., 2010, Experimental Research of Jet-grouting Parameters in Different Soil Conditions, *Deep and Underground Excavations*, 49-54.

Melegari, C. ve Garassino, A. L., 1997, Seminar on Jet Grouting, *CI_Premier Pte. Ltd., Singapore*.

Modoni, G., Croce, P. ve Mongiovi, L., 2006, Theoretical modelling of jet grouting, *Geotechnique*, 56 (5), 335-347.

Müllauer, W., Beddoe, R. E. ve Heinz, D., 2013, Sulfate attack expansion mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 52, 208-215.

Okyay, S., 1987, Yüksek Basınçlı Enjeksiyon, *İstanbul*.

Özdemir, A. ve Özdemir, M., 2006, Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri, *Sondaj Dünyası Dergisi* (3), 34-38.

Pinto, A., Tomasio, R., Pita, X. ve Pereira, A., 2012, Ground Treatment Solutions Using Jet-Grouting, *Grouting and Deep Mixing 2012*, 2112-2121.

Püsküllüoğlu, A., 2010, Ceyhan Hidroelektrik Santrali Projesi (Cevdetiye-Osmaniye) Regülatör Yapılarındaki Geçirimsizleştirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.

Rahman, M. M. ve Bassuoni, M. T., 2014, Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation, *Construction and Building Materials*, 73, 652-662.

Sağlamer, A., Düzceer, R., Gökalp, A. ve Yılmaz, E., 2001, Recent Applications of Jet Grouting For Soil Improvement in Turkey, *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1839-1842.

Santhanam, M., Cohen, M. D. ve Olek, J., 2001, Sulfate attack research- whither now?, *Cement and Concrete Research*, 31, 845-851.

Santhanam, M., Cohen, M. D. ve Olek, J., 2002, Mechanism of sulfate attack: A fresh look part I: Summary of experimental results, *Cement and Concrete Research*, 32, 915-921.

Santhanam, M., Cohen, M. D. ve Olek, J., 2003, Mechanism of sulfate attack: A fresh look part II: Proposed mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 33, 341-346.

Shalky, J., Marchand, J. ve Odler, I., 2002, Sulfate attack on concrete, *London*, Spon Press, p.

Shibazaki, M., 2003, State of Practice of Jet Grouting. International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans.

Stoel, A., 2001, Grouting for Pile Foundation Improvement, PhD Thesis, *Delf University*, Amsterdam, Netherlands.

Tian, B. ve M.D., C., 2000, Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?, *Cement and Concrete Research*, 30, 117-123.

Tosun, K., 2007, Farklı çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri, Doktora tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi*.

TS-EN-1008, 2003, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Ankara, Türk Standardları Enstitüsü.

TS-EN-3440, 2014, Betona zararlı etkileri olan su, zemin ve gazların değerlendirilmesi-Prensipler, sınır değerler, su ile zemin numunelerinin alınması ve analizleri, *Türk Standardları Enstitüsü*.

Ustabas, İ., 2008, Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi, Doktora tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi*.

Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. ve Bruce, D. A., 1994, Ground Control And Improvement, *New York*, John Wiley, p.

Xu, A., Shayan, A. ve Baburamani, P., 1998, Test methods for sulfate resistance of concrete and mechanism of sulfate attack: A state-of-the-art-review.

Yağızatlı, E., 2012, Jet-grout kolonların SEM analizi ve etkin parametrelerin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi*, Şanlıurfa.

Yang, S., Zhongzi, Z. ve Mingshu, T., 1996, The process of sulfate attack on cement mortars, *Advanced Cement Based Materials*, 4, 1-5.

Yıldız, M. ve Ürün, E., 2010, Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde sülfatlı su içeren zeminlerde oluşturulan betonarme kazıklarda beton taşıma gücüne sülfatın etkisi, *Selçuk Üniversitesi Müh.-Mim. Fakülte Dergisi*, 25 (2).

Zhou, Q. ve Glasser, F. P., 2001, Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at<120ºC, *Cement and Concrete Research*, 31 (9), 1333-1339.

# EKLER

## EK-1 Şekiller Tablosu Listesi

Şekil 2.1. Jet-grout yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin basınç dayanımları (Lunardi, 1997) ..... 5
Şekil 2.2. Zemindeki jet penetrasyon modeli (Ho, 2007) ..... 9
Şekil 2.3. Phase 6.018 programı için kullanılan idealize zemin profili ve mühendislik parametreleri (Küçükali, 2008) ..... 10
Şekil 2.4. İyileştirme öncesi zeminde oluşan düşey gerilmeler (Küçükali, 2008) ..... 11
Şekil 2.5. İyileştirme sonrasında zeminde oluşan düşey gerilmeler (Küçükali, 2008) .. 11
Şekil 2.6. Zemin iyileştirme süresinin jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010) ..... 12
Şekil 2.7. Enjeksiyon basıncının jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010) ..... 12
Şekil 2.8. Dönme hızının jet-grout kolon çapı üzerindeki etkisi (Malinin ve ark., 2010) ..... 13
Şekil 2.9. Uygulanan iyileştirmenin plan ve en kesiti (Pinto ve ark., 2012) ..... 14
Şekil 2.10. Uygulanmış FEM analizi görünüşü ve yanal deplasmanlar (Pinto ve ark., 2012) ..... 14
Şekil 2.11. Önceden işlenmiş kuvars kumunun taslağı (Yang ve ark., 1996) ..... 16
Şekil 2.12. $Na_2SO_4$ ve $MgSO_4$ çözeltisine maruz Portland çimentolu numunelerin idealize genleşme davranışı (Aşama 1 ve Aşama 2 $Na_2SO_4$ çözeltisi için) (Santhanam ve ark., 2002) ..... 17
Şekil 3.1. Jet-grout enjeksiyonu ile zemin kütlesinin parçalanıp, karıştırılmasının şematik gösterimi (Chan, 2005) ..... 22
Şekil 3.2. Jet–grout yöntemini aşamalarının şematik gösterimi: (a) Tijin sondaj ile belli derinliğe indirilmesi (delgi aşaması), (b), (c) ve (d) Enjeksiyon ile kolon imalatı (Burke, 2004) ..... 23
Şekil 3.3. Jet-grout ekipmanlarının şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering) ... 24
Şekil 3.4. Temel jet-grout sistemleri (Püsküllüoğlu, 2010) ..... 25
Şekil 3.5. Tek akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering) ..... 26
Şekil 3.6. Çift akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering) ..... 26
Şekil 3.7. Üç akışkanlı jet-grout sisteminin şematik gösterimi (Keller-Ground-Engineering) ..... 27
Şekil 3.8. X-Jet sisteminin şematik gösterimi (Burke, 2004) ..... 28
Şekil 3.9. Zemin tipine bağlı olarak oluşturulan kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos ve ark., 1994) ..... 30
Şekil 3.10. Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi (Melegari ve Garassino, 1997) ..... 31
Şekil 3.11. Jet ekseninde nozul daralma açısının dinamik basınç üzerindeki etkisi (Shibazaki, 2003) ..... 33
Şekil 3.12. Çekme metotları (Shibazaki, 2003) ..... 33
Şekil 3.13. Zeminlerin aşınabilme özellikleri ..... 34
Şekil 3.14. Zemin cinslerine göre enjeksiyon uygulama aralığı (Keller) ..... 35
Şekil 3.15. Jet-grout kolon yükleme deneyi şematik gösterimi (http://www.zeminarastirma.com) ..... 37

Şekil 3.16. Pile integrity test (https://diskmal.wordpress.com/tag/loading-test/) ..... 38
Şekil 3.17. Deneme kazısı ile çap ve süreklilik kontrolü (Keller-Ground-Engineering) 38
Şekil 3.18. Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristallerinin SEM görüntüsü (Tosun, 2007) ..... 42
Şekil 3.19. 20$^{o}$C'de Etrenjit Yapılı Fazların Stabilite Diyagramı (Tosun, 2007) ..... 43
Şekil 3.20. Tomasit oluşumuna bağlı betonda ve prefabrik istinat duvarında oluşan bozulma (Rahman ve Bassuoni, 2014) ..... 44
Şekil 3.21. Klasik iç sülfat etkisi ve GEO gruplandırılması (Tosun, 2007) ..... 46
Şekil 3.22. Dış sülfat etkisi ile ilgili GEO (Gecikmiş Etrenjit Oluşumu) mekanizması (Tosun, 2007) ..... 47
Şekil 3.23. Sodyum sülfat saldırısı için önerilen mekanizma şeması (Santhanam ve ark., 2003) ..... 49
Şekil 3.24. Magnezyum sülfat saldırısı için (Santhanam ve ark., 2003) tarafından önerilen mekanizma şeması ..... 51
Şekil 3.25. Yüzeyi özel bitümlü sıvı ile boyanmış beton ..... 55
Şekil 3.26. Beton bozulma mekanizmasının fiziksel incelemesine ait literatürde yer alan fotoğraflar: ..... 56
Şekil 3.27. Sülfata maruz silindirik numuneler ve basınç dayanımı testi (Hartell, 2008) ..... 56
Şekil 3.28. a) SEM cihazı, b) XRD cihazı ile morfolojik yapı analizi (İleri-Araştırma-ARGE-Merkezi) ..... 57
Şekil 3.29. Laboratuvar tipi jet-grout deney seti ..... 58
Şekil 3.30. Doğal kum zemine ait granülometri eğrisi ..... 59
Şekil 3.31. Jet-grout deney setinin kontrol paneli ünitesi ..... 61
Şekil 3.32 a), b), c), d). Doğal kum kullanılarak kum zemin ortamının hazırlanma aşamaları ..... 62
Şekil 3.33. Deneme kolonu oluşturmak için kullanılan kalıplar ..... 62
Şekil 3.34 a), b), c). Enjeksiyon malzemesinin hazırlanması ve hazneye doldurulması 63
Şekil 3.35 a), b), c), d). Jet-grout kolon imalat aşamaları ..... 64
Şekil 3.36. a) Jet-grout kolonların çap kontrolü, b) Kolonların oluşturulduğu kum zeminin doygun hale getirilmesi ve c) Kalıpların üzerinin kapatılması ..... 65
Şekil 4.1. a) Oluşturulan jet-grout kolonların kalıplardan çıkarılması, b) Kolonların çap-yükseklik ölçümleri ..... 66
Şekil 4.2. SDÇ-NMS (6) ve SDÇ-SYS (6) kolonlarında meydana gelen spirallenme ... 67
Şekil 4.3. a) Jet-grout kolonlardan karot alınması b) Jet-grout kolondan alınan karot numuneler ..... 67
Şekil 4.4 a), b). Enine ve boyuna kesit alınan jet-grout kolonda iyi çimentolaşmış ve az çimentolaşmış bölgeler ..... 68
Şekil 4.5. Karot numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi ..... 68
Şekil 4.6. a), b), c) ve d) 1 aylık kür süresi, e), f), g) ve h) 3 aylık kür süresi ve ı), i), j) ve k) 6 aylık kür süresi sonunda jet-grout kolonlardan alınan karot numuneler ..... 69
Şekil 4.7. Normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolon dayanımlarının kullanılan kür suyu ve kür süresine bağlı değişiminin grafik gösterimi ..... 70
Şekil 4.8. Etrenjit kristalinin su molekülü sayısının sıcaklıkla değişimi (Zhou ve Glasser, 2001) ..... 71
Şekil 4.9. a), b), c) NP-NMS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ve d) SEM analizi esnasında yapılan EDS analizi ..... 72
Şekil 4.10. NP-SYS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 73

Şekil 4.11. NP-NMS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 74
Şekil 4.12. NP-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 75
Şekil 4.13. SDÇ-NMS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 76
Şekil 4.14. SDÇ-SYS (1) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 77
Şekil 4.15. SDÇ-NMS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 77
Şekil 4.16. SDÇ-SYS (3) jet-grout kolonlarına ait numunelerden elde edilen SEM görüntüleri ..... 78
Şekil 4.17. Etrenjit mineralinin XRD pikleri (Felekoğlu, 2008) ..... 79
Şekil 4.18. a), b) ve c) Normal portland çimentosu ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları ..... 80
Şekil 4.19. a), b) ve c) Normal portland çimentosu ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları ..... 81
Şekil 4.20. a), b) ve c) Sülfata dayanıklı çimento ve normal musluk suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları ..... 82
Şekil 4.21. a), b) ve c) Sülfata dayanıklı çimento ve sülfat içerikli yeraltı suyu kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonların XRD analiz sonuçları ..... 83

**EK-2 Tablolar Listesi**

Tablo 2.1. Jet-grout yönteminin uygulama parametreleri(Lunardi, 1997) ..... 5
Tablo 2.2. Jet-grout kolon uygulama parametreleri (Durgunoğlu ve ark., 1998)..... 5
Tablo 2.3. Rölatif sıkılık ve boşluk oranı kriterleri (Seed ve Idriss, 1971) ..... 6
Tablo 2.4. Bina temel sistemleri ve jet-grout kolon boyutları (Durgunoğlu ve ark., 2004) ..... 8
Tablo 3.1. Beklenen jet-grout kolon çapları (Burke, 2004)..... 29
Tablo 3.2. Jet-grout sistemlerinin avantaj ve dezavantajları (Burke, 2004)..... 29
Tablo 3.3. Su/çimento oranı bağlı olarak kolon dayanım değerleri (Baumann, 1984)... 31
Tablo 3.4. Farklı zemin tiplerinde oluşturulan jet-grout kolon taşıma kapasiteleri (Melegari ve Garassino, 1997)..... 35
Tablo 3.5. Hazırlanan kum numunelerinin indeks özellikleri ..... 59
Tablo 3.6. Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi'nden alınan yeraltı suyunun analiz sonuçları..... 60
Tablo 3.7. Beton temas sularının zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerleri (TS-EN-3440, 2014)..... 60
Tablo 3.8. Deneysel çalışmada kullanılan jet-grout kolon parametreleri..... 61
Tablo 4.1. Oluşturulan jet-grout kolonların çap ve yükseklikleri..... 66
Tablo 4.2. Jet-grout kolonlardan alınan karot numunelerin serbest basınç mukavemetleri ..... 70
Tablo 4.3. SEM-EDS analiz sonuçları ve etrenjit oluşumları..... 79
Tablo 5.1. SEM-EDS analiz sonuçları ve etrenjit oluşumları..... 88

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | | |
|---|---|---|
| **Adı Soyadı** | **:** | Tuba Özge DEMİRAL |
| **Uyruğu** | **:** | T.C. |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **:** | Adıyaman/ 20.11.1989 |
| **Telefon** | **:** | 0507-367-06-97 |
| **Faks** | **:** | |
| **e-mail** | **:** | tozgedemiral@selcuk.edu.tr |


## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lise | : | **Adıyaman Anadolu Lisesi, Adıyaman** | **2007** |
| Üniversite | : | **Dokuz Eylül Ünivesitesi, İzmir** | **2013** |
| Yüksek Lisans | : | | |
| Doktora | : | | |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2014-… | **S.Ü. Müh. Fakültesi İnşaat Müh. Böl.** | **Araştırma Görevlisi** |

## UZMANLIK ALANI

## YABANCI DİLLER
**İngilizce (YDS-70)**

## YAYINLAR


1. Demiral, T.Ö., Yıldız,M., 2016, ‘’The Effect Of Sulfated Water On The Bearing Capacity Of Jet-Grout Columns With Portland Cement’’,2nd International Conference on Science, Ecology and Technology-2016 (ICONSETE’2016), Barselona/İspanya.(Yüksek Lisans Tezinden)