



**T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SÜLFATLI SU İÇERİKLİ KUM ZEMİNLERDE PORTLAND
KOMPOZE (TRASLI) ÇİMENTO VE PORTLAND UÇUCU
KÜL ÇİMENTO KULLANILARAK OLUŞTURULAN JET-
GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜNE SÜLFATIN
ETKİSİ**

Sinan AKBAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Sinan AKBAY tarafından hazırlanan “Sülfatlı Su İçerikli Kum Zeminlerde Portland Kompoze (Traslı) Çimento ve Portland Uçucu Kül Çimento Kullanılarak Oluşturulan Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücüne Sülfatın Etkisi” adlı tez çalışması 16/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Zülküf KAYA

Danışman

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Üye

Doç. Dr. Murat OLGUN

İmza


.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üni. BAP Koordinatörlüğü tarafından 16401087 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.


Sinan AKBAY

Tarih:16/07/2019

ÖZET

SÜLFATLI SU İÇERİKLİ KUM ZEMİNLERDE PORTLAND KOMPOZE (TRASLI) ÇİMENTO VE PORTLAND UÇUCU KÜL ÇİMENTO KULLANILARAK OLUŞTURULAN JET-GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜNE SÜLFATIN ETKİSİ

Sinan AKBAY

**Konya Teknik Üniversitesi Lisanüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

2019, 112 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Doç. Dr. Zülküf KAYA

Doç. Dr. Murat OLGUN

Mühendislik özellikleri geoteknik açıdan elverişsiz olan zeminlerin, gerekli özelliklerini artırmak için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Jet-grout yöntemi son yıllarda etkin olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Jet-grout yöntemi ile yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu mevcut zemini parçalar ve zemin daneleri ile enjeksiyon malzemesi karışımından oluşan zemin içerikli beton kolonlar oluşturulur. Jet-grout kolonları sülfat içerikli zeminlerde veya sülfat içeren yeraltı suyunun bulunduğu ortamda oluşturulduğunda, sülfat bu kolonlara nüfuz eder ve kolonlar servis ömürleri boyunca sülfata maruz kalır. Sülfat etkisine bağlı olarak kolonlarda bozulmalar ve dayanım kayıpları meydana gelir. Jet-grout kolonlarda meydana gelebilecek hasarların arazi koşullarında belirlenmesi oldukça zor ve maliyetlidir.

Bu çalışmada, laboratuvarında belirli sıklıkta hazırlanan kum zemin ortamında, Uçucu Küllü Çimento (UKÇ) ve Kompoze Çimento (KÇ) kullanılarak, küçük ölçekli jet-grout kolonları oluşturulmuştur. Karışım suyu ve kür suyu olarak normal musluk suyu (NMS) ve Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde açılan kuyulardan çekilen sülfatlı yeraltı suyu (SYS) kullanılmıştır. 1 ay, 3 ay ve 6 ay kür süreleri sonunda jet-grout kolonlardan karot numuneler alınmıştır. Karot numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti testi yapılmıştır. Aynı zamanda kolonların iç yapısında dış sülfat etkisine bağlı olarak meydana gelen değişimleri belirlemek için morfolojik yapı analizleri (SEM-EDS ve XRD) yapılmıştır.

Serbest basınç dayanımı deney sonuçlarından, sülfatlı ortamda KÇ kolonlarının dayanımının UKÇ kolonlarının dayanımından yüksek olduğu belirlenmiştir. 6 ay sonunda ise NMS ve SYS kür ortamlarındaki kolon dayanımları karşılaştırıldığında KÇ kolonlarındaki dayanım kayıplarının yaklaşık olarak %30, UKÇ kolonlarında ise %60 civarında olduğu belirlenmiştir. SEM analizinde elde edilen görüntüler, EDS analizinden elde edilen S/Ca ve Al/Ca oranları ve XRD analizinde elde edilen pik değerleri değerlendirildiğinde tüm kolonlarda, sülfat etkisine bağlı olarak etrenjit oluşumuna rastlanılmıştır. Tüm deney sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde dış sülfat etkisine bağlı olarak kolon dayanımlarında zamana bağlı azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Sülfat etkisine karşı katkılı çimento kullanımında ortamdaki sülfat katyon tipinin ve konsantrasyonunun iyi değerlendirilip, katkı tipinin ve kullanılacak dozajının doğru seçilmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Sülfat Etkisi, Jet grout kolonlar, Zemin iyileştirme teknikleri, SEM-EDS-XRD analizi, Uçucu küllü çimento, Portland kompoze çimento.

ABSTRACT

MS THESIS

THE EFFECT OF SULPHATE ON THE BEARING CAPACITY OF JET-GROUT COLUMNS CONSTRUCTED BY USING PORTLAND COMPOSITE (POZZUOLANA) CEMENT AND PORTLAND FLY ASH CEMENT ON SAND SOILS WITH SULPHATE WATER CONTENT

Sinan AKBAY

**KONYA TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
THE DEGREE OF MASTER OF
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

2019, 112 Pages

**Jury
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Zülküf KAYA
Doç.Dr. Murat OLGUN**

Ground improvement methods are used to increase the required properties of the ground where engineering properties are not geotechnically favorable. Jet-grouting is one of the ground improvement methods that have been used effectively in recent years. With jet-grouting, high pressure cement injection breaks the existing floor forming concrete columns with ground content consisting of a mixture of ground grains and injection material. When the jet grout columns are formed on sulphate-containing grounds or in the presence of groundwater containing sulphate, the sulfate penetrates these columns and the columns are exposed to sulphate during their service life. Depending on the effect of the sulphate, deterioration and strength losses occur on the columns. Determining the damage to jet-grout columns is difficult and costly in land conditions.

In this study, small-scale jet-grout columns have been formed by using Fly Ash Cement (FAC) and Composite Cement (CC) in sand ground environment prepared in certain laboratory conditions. As mixing water and curing water, normal tap water (NTW) and Sulfate containing groundwater (SCG) drawn from wells drilled in Konya Second Organized Industrial Zone was used. Core samples were taken from jet-grout columns at the end of first month, third months and sixth months. Unconfined compressive strength test was performed on core samples. At the same time, morphological structure analyses (SEM-EDS and XRD) have been conducted to determine the changes in the internal structure of the columns due to the effect of external sulfate.

From the results of the unconfined compressive strength test, it was determined that the strength of the CC columns in the sulfated environment was higher than the strength of the FAC columns. At the end of 6 months, strength losses in the CC columns were found to be approximately 30%, and around 60% in the FAC columns based on the comparison of column strengths in NTW and SCG curing environments. Having evaluated the images obtained in SEM analysis, S/Ca and Al/Ca ratios obtained from EDS analysis and peak values obtained in XRD analysis, ettringite formation was observed in all columns due to the effect of sulfate. When all the experimental results were evaluated collectively, it was determined that there would be a time-dependent decrease in column strengths due to the effect of external sulfate. While using blended cement against the effect of sulphate, the sulfate cation type and concentration in the environment should be well assessed, and the blend type as well as the dosage to be used should be selected correctly.

Keywords: Sulfate attack, Jet grout columns, Soil improvement methods, SEM-EDS-XRD analysis, Fly ash cement, Portland composite cement.



ÖNSÖZ

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimim boyunca her konuda bana destek olan, bilgi ve birikimini benden esirgemeyen, tezin hazırlanması sırasında gösterdiği yoğun ilgi ve sabırdan dolayı danışman hocam Sn. Prof Dr Mustafa YILDIZ'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmasının laboratuvar kısmında benden yardımlarını eksik etmeyen Arş. Gör. Sn. Tuba Özge DEMİRAL, Sn. Yüksel Çiftçi ve arkadaşlarım Sn. Ahmet SÜNGÜ ve Sn. Aydın Özgür AKIN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana her konuda yardımcı olan, gerek manevi gerekse maddi desteklerini benden hiç eksik etmeyen, beni her konu da teşvik ederek bu günlere gelmemde büyük payları olan AİLEM'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Sinan AKBAY
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Jet grout Yöntemi ile İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları.....	4
2.2. Sülfatın Beton Üzerine Etkisi ile İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Zemin Enjeksiyon Yöntemleri.....	16
3.1.1. Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu Yöntemi	17
3.1.2. Çatlatma Enjeksiyon Yöntemi	18
3.1.3. Kompaksiyon Enjeksiyonu Yöntemi	19
3.2. Jet Grout Enjeksiyon Yöntemi.....	20
3.2.1. Jet Grout Yönteminin Tarihçesi.....	22
3.2.2. Jet Grout Kullanım Alanları	23
3.2.3. Jet Grout Ekipmanları.....	24
3.2.4. Jet Grout Yönteminin Uygulanması	26
3.2.5. Jet Grout Kolon İmalat Teknikleri.....	27
3.2.7. Jet Grout Kolonlarının Kontrol Edilmesi.....	36
3.3. Beton Üzerinde Klasik Sülfat Saldırısı ve Etkileri	38
3.3.1. İç Kaynaklı Klasik Sülfat Etkisi	41
3.3.2. Dış Kaynaklı Klasik Sülfat Etkisi.....	43
3.3.3. Sülfat Saldırı Sonucu Oluşan Zararlı Reaksiyonlar ve Ürünleri.....	45
3.3.4. Beton Üzerinde Sülfat Etkisinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	50
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
5.1. Sonuçlar	87
5.2. Öneriler	91
KAYNAKLAR	93
EKLER	98
EK-1 Tablolar Listesi.....	98
EK-2 Şekiller Listesi.....	99



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	: Alümina
CO_2	: Karbondioksit
CaO	: Kalsiyum oksit
$CaCO_3$: Kalsiyum karbonat
$Ca(OH)_2$: Portlandit
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$: Alçıtaşı
$CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaSiO_4 \cdot 15H_2O$: Tomasit
$Ca_6(Al(OH)_6)_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$: Etrenjit
$3CaO \cdot Al_2O_3$: Trikalsiyum alüminat
$Ca_4(Al(OH)_6)_2(CO_3)_{0.5}(OH) \cdot 5,5H_2O$: Hemikarbonat
$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$: Hidrate kalsiyum alüminat
$Ca_4(Al(OH)_6)_2 \cdot (SO_4) \cdot 6H_2O$: Monosülfat
$CaSO_4$: Kalsiyum sülfat
C_4ASH_{12}	: Monosülfat
C_3A	: Trikalsiyum alüminat
C_4AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit
C_2S	: Dikalsiyum silikat
C_3S	: Trikalsiyum silikat
C_u	: Üniormluk katsayısı
C_c	: Derecelenme katsayısı
D_r	: Rölatif sıkılık
E	: Boşluk oranı
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
Fe_2O_3	: Demir oksit
$Mg(OH)_2$: Magnezyum hidroksit, brüst
$MgSO_4$: Magnezyum Sülfat
$NaCl$: Sodyum Klorür
Na_2SO_4	: Sodyum Sülfat
$(NH_4)SO_4$: Amonyum sülfat
SiO_2	: Silisyum oksit
$SiO \cdot H_2O$: Silika jel
Y_s	: Dane birim hacim ağırlığı

Kısaltmalar

C-S-H	: Kalsiyum silika hidra jel
EDS	: Elektron dağılım spektrometresi
GEO	: Gecikmiş etrenjit oluşumu
D	: Çap
H	: Boy
JET-1	: Tek akışkanlı jet grout tekniği
JET-2	: Çift akışkanlı jet grout tekniği
JET-3	: Üç akışkanlı jet grout tekniği
M-S-H	: Magnezyum silika hidre jel
NMS	: Normal musluk suyu
SYS	: Sülfatlı yeraltı suyu
XRD	: X-ışını difraktometresi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
S/Ç	: Su çimento oranı
KÇ	: Kompoze çimento
UKÇ	: Uçucu küllü çimento
S/Ca	: Silisyum kalsiyum oranı
Al/Ca	: Alüminyum kalsiyum oranı

1.GİRİŞ

İnşaat mühendisliği bilim dalları içerisinde kökeni en eskiye dayanan, insanların hayatını kolaylaştırıp, dünyanın insanlar için daha güvenli ve daha yaşanılır bir alan olması için gelişim süreçlerini sürekli devam ettiren bir bilim dalıdır. İnsan nüfusunun sürekli artışı günümüzde insanlar daha büyük, daha kullanışlı ve mekanik açıdan da daha sağlam yapılara ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde, kullanışlı ve sağlam yapıların inşa edilebilmesi için inşaat mühendisliğinin de yeni alt ve üst yapı teknikleri geliştirilmektedir. Yapılaşmanın çok hızlı artışı bu yüzyılda yaşam alanlarına inşa edilen yapılar dışında sanayi alanlarına inşa edilen tesislere, köprü ve demir yolu gibi insanların yaşamlarını kolaylaştıran diğer yapı türlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu yapı çeşitlerinin inşası sırasında karşılama en büyük problemlerden birisi ise yapıların oturtulduğu zeminlerin mekanik açıdan yetersizliğinden kaynaklı problemlerdir.

Zeminler, üzerine inşa edilen yapı yükünden veya diğer dış etmenlerden (deprem, zemin suyu, sıvılaşma) dolayı üzerindeki yapıları her zaman güvenli bir şekilde taşıma potansiyeline sahip değildir. Mühendislik özellikleri açısından; emniyetli olmayan, kararlılığı düşük, sıvılaşmaya müsait, taşıma gücü yetersiz zeminlerde oturumlarının önüne geçmek temelleri takviye etmek vb. durumlar için zeminlerin güçlendirilerek yapı ile uyumlu, yeterli taşıma gücüne sahip, hale getirilmesi gerekmektedir.

Zemin mühendisliğinde, mühendislik teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak birçok zemin güçlendirme tekniği kullanılmaktadır. Tüm bu zemin iyileştirme teknikleri içerisinde, hemen hemen her zemin tipinde etkin bir şekilde uygulanabilirliği, ekonomikliği, hızlılığı ve kullanışlı olmasından dolayı en çok tercih edilen zemin iyileştirme yöntemi ise jet-grout yöntemidir.

Jet-grout yöntemi, zeminin bir delgi aparatı (tij) ile belli bir çapta delinerek su, çimento ve tercihen katkı maddeleri ile hazırlanan enjeksiyon şerbetinin (genellikle su-çimento karışımı) yüksek basınç yardımı ile zemin içerisine enjekte edilip zemin içerisinde beton (soilcrete) kolonlar elde edilmesi olarak tarif edilebilir. Bu yöntemde amaç, zemin içerisinde oluşturulan jet-grout (beton) kolonlar sayesinde zeminin

mekanik özelliklerini artırıp, geçirimsizliğini azaltmaktadır. Üretilen bu zemin-çimento içerikli jet-grout beton kolonlar oluşturulduktan sonra zemin içerisinde kalmaktadır.

Zemin içerisinde kalan bu beton kolonlar zeminden kaynaklı betonun performansını etkileyen tüm kimyasal, fiziksel ve mekanik etmenlerden etkilenmektedir. Ömür, dayanım ve performans açısından zemin içerisinde jet-grout tekniği ile imal edilen beton kolonları en çok etkileyen faktör ise zemin suyu veya zeminde bulunan sülfat iyonu içeren bileşiklerden kaynaklı sülfat etkisidir.

Sülfat içerikli kum zeminlerde farklı dayanımlara ve farklı kimyasal bileşimlere sahip iki cins çimento ve sülfatlı yeraltı suyu kullanılarak laboratuvar ortamında jet grout tekniği ile imal edilen beton kolonlarının dayanımlarına sülfatın etkisinin deneysel olarak araştırması için bu tez çalışması hazırlanmıştır. Sülfatlı yeraltı suyu açısından çok zengin olan Konya II. Sanayi Bölgesi'nde açılan bir sondaj kuyusundan (derinlik 15 metre) sülfatlı yeraltı suyu temin edilmiştir. Temin edilen bu sülfatlı içerikli su ve temiz musluk suyundan farklı iki tip çimento kullanılarak enjeksiyon şerbeti hazırlanıp, laboratuvar ortamında oluşturulan bir jet-grout kolon imalat düzeneği ile Dr ~ % 40 rölatif sıklığa sahip kum zemin ile doldurulan büyük hacimli plastik kalıplar içerisinde jet-grout kolonlar imal edilmiştir. İmal edilen kolonlar enjeksiyon karışımında kullanılan su cinsine göre suya doymun hale getirildikten sonra 1 ay, 3 ay, 6 ay kür süreleri boyunca bekletilmiştir.

Kür süreleri dolan jet kolonlar, plastik kalıplardan çıkarıldıktan sonra karot numuneler alınarak basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Sülfatın etkisinden kaynaklanan basınç dayanım kayıpları, kür sürelerine ve çimento tiplerine göre karşılaştırılmıştır. Jet kolonlardan, alınan karotlardan basınç dayanım testinden sonra ince kesitler ve toz numuneler alınarak SEM-EDS ve XRD analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analizler sayesinde sülfat etkisinden kaynaklı jet-grout kolonların içyapılarında oluşan yeni ürünler, oluşum mekanizmaları ve morfolojik yapıları incelenmiştir.

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışması temel olarak 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tez çalışmasının amacı ve içeriği hakkında genel bir bilgilendirme yapılmıştır. İkinci bölümde tez çalışmasında kullanılan jet grout yöntemi ve tezin temelini oluşturan beton üzerindeki sülfat etkisi hakkında daha önce yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde tezin deneysel çalışmasında kullanılan metod

olan jet grout tekniği hakkında detaylı bilgilendirme yapıldıktan sonra beton üzerindeki sülfat etki mekanizması ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Devamında laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmadan bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, yapılan deneysel çalışmanın sonuçları verilerek irdelenmiştir. Son olarak ise beşinci bölümde çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar sıralanarak ileride yapılacak olan çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında, günümüzde zemin mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan geoteknik uygulamalarından biri olan jet grout yöntemi ile ilgili olarak laboratuvar ortamında farklı çimento tipleri ve sülfatlı yeraltı suyu kullanılarak jet grout kolon imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan bu beton kolonların performansı üzerinde sülfatlı yeraltı suyunun etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Kaynak araştırması kapsamında, jet grout yöntemi ile ilgili olarak daha önceki dönemlerde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Tez çalışması sırasında dikkat edilecek hususlar ve uygulanacak yöntem hakkında bir altlık oluşturması amacı ile detaylı bir şekilde incelenen bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Kaynak araştırması iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda jet grout yöntemi ile ilgili olan çalışmalara, ikinci kısımda ise sülfatın betona üzerindeki etkisi anlatan çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. Jet grout Yöntemi ile İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları

Lunardi (1977) tarafından jet grout yönteminin zemin problemlerinin çözümüne yönelik yapılan çalışmalarda, yöntemin; zeminlerin fiziksel özelliklerine göre kullanılabilceği zemin cinsleri, uygulamanın tasarımı, kullanışlı olması açısından kullanılacak jet tekniği, yöntemin hangi zemin problemlerinin çözümünde kullanılmasının uygun olacağı hakkında bilgi vermektedir (Tablo 2.1). Lunardi'nin yaptığı bu çalışmalar vaka analizleri ile desteklenmiş olup, jet grout yönteminin referans çalışmalarından biri olması açısından literatürde önemli bir yer tutmaktadır.

Tablo 2. 1. Jet grout saha uygulamasında tercih edilen parametreler (Lunardi, 1997)

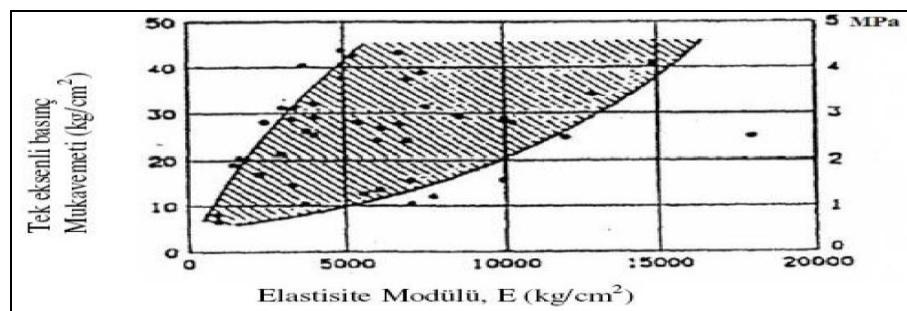
Sistem	Enjk. Tipi	Basınç (Bar)	Nozul Adet Sayı	Tij Çekme Hızı (cm/dk)	Tij Dönme Hızı (rpm)	S/Ç Oranı
Jet 1	Çimento	400 - 550	1-2 x 2-5	15 -100	5-15	1.0-1.5
Jet 2	Çimento	400 - 550	1-2 x 2-5	10 - 30	4-8	1.0-1.5
	Hava	10 - 12	-	10 - 30	-	-
Jet 3	Çimento	50 - 100	1-2 x 4-5	6 - 15	4-8	1.2-1.5
	Hava	10 - 12	-	6 - 15	-	-
	Su	400 - 500	1-2 x 2-3	6 - 15	-	-

Baumann (1984) yaptığı jet enjeksiyonu çalışmalarını yayınladığı bu çalışmada yöntemin uygulaması sırasında kullanılan enjeksiyon karışım malzemesinin oranlarında (su/çimento oranında) değişiklikler yapılarak birden fazla zemin tipinde kolon imalatı yapılmıştır (Tablo 2.2). Yapılan imalat sonucunda kolonlara tek eksenli basınç dayanım testi uygulanarak iri taneli zeminlerde üretilen kolonlardan, ince taneli organik zeminlerde üretilen kolonlara göre daha yüksek dayanım elde edildiği ortaya konmuştur.

Tablo 2. 2. S/Ç oranına göre kolon dayanımları (Baumann, 1984)

Zemin Tipi	Kolon Basınç Dayanımları (Mpa)						
	Çakıl	Kum	Kil-Silt	Org. Zemin	Çakıllı Kum	Kumlu Silt	Siltli Kil
Kolon No	1	2	3	4	5	6	7
S/Ç Oranı 0.67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12-18	10-14	6-10
S/Ç Oranı 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6-10	5-7	3-5

Trevi (1994) tarafından jet grout yönteminin deneysel olarak incelenmesine yönelik inci taneli zeminlerde (siltli, kumlu-siltli) çalışma yapılmıştır. Çalışma neticesinde üretilen yüksek modüllü kolonlara yapılan dayanım testleri ile elastisite modülleri arasındaki ilişki ortaya konmaya çalışılmıştır. Şekil 2.1’de ki çalışma sonuçlarının irdelenmesinden de anlaşılacağı gibi tek eksenli basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasında doğru bir orantının olduğu ortaya konmuştur.



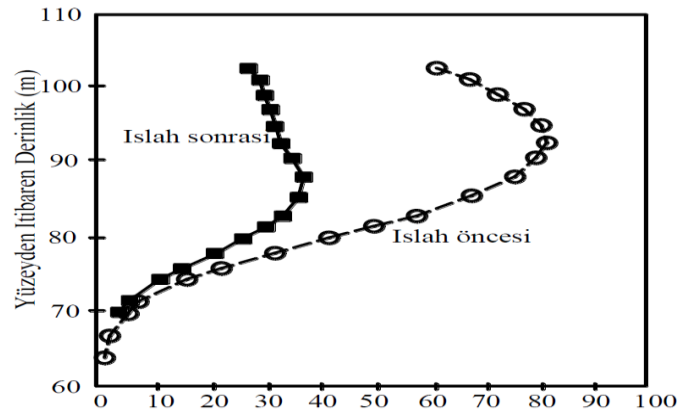
Şekil 2. 1 Tek eksenli basınç dayanımı – elastisite odülü arasındaki ilişki (Trevi, 1994)

Melegary ve Garassina (1997) tarafından jet grout yöntemi kullanılarak yapılan zemin iyileştirme çalışmalarında yöntemin ana hatları ve temel prensipleri hakkında bilgi verilmektedir. Kullanılan jet tekniğine göre elde edilen kolonlardan farklı taşıma gücüne sahip, boyutları farklı olan kolonların elde edilebileceği vurgulanmıştır. Bu tespitler yapılırken jet kolon imalat parametreleri değiştirilerek (nozul sayısı-çapı,

dönme-çekme hızının değiştirilmesi, enjeksiyon basıncının değiştirilmesi vb.) kolon imalatı gerçekleştirilmiştir. Yöntemin saha uygulaması sırasındaki;

- Her türlü zemin tepinde uygulanabilir olması,
- Zeminde açılan küçük çaptaki bir enjeksiyon sondajı ile çok büyük çaplarda rijit kolonların imal edilebileceği,
- Üretimi yapılacak kolonların uygulama öncesinde fiziksel özelliklerinin ve maliyetinin belirlenebilmesi,
- Hızlı ve pratik olması,
- Temel takviyesinden geçirimlilik perdesi oluşturulmasına kadar birçok geoteknik uygulamasında kullanılabileceği,
- Çevreci bir yöntem olması,
- Uygulamalarında istenilen başarının elde edilip güvenilirliği yüksek bir enjeksiyon metodu olması gibi avantajları ortaya konmuştur.

Wong ve ark, (1999) yaptığı çalışmada, Uzak Doğu'da (Singapur) oldukça büyük bir temele sahip deniz kilinden ve alüvyon malzemeden oluşan bir yapının temel kazıları yapılırken temele ait yan yüzey duvarları iki akışkanlı jet grout yöntemi ile iyileştirilmiştir. Zemin suyu probleminin de olduğu zeminde jet grout yöntemi oldukça başarılı olmuş, Temelin yan duvarlarında jet grout iyileştirmesinden sonra drenajsız kayma dayanım değerleri ile elastisite modülü ilk durumuna göre oldukça yüksek çıkmıştır. Kazı yan duvarlarında yapılan inklinometre ölçümleri sonucunda zemin iyileştirmesinin ardından yan duvarlarda oluşan deplasman değerlerinde derinlikle büyük oranda iyileşmenin gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.2).



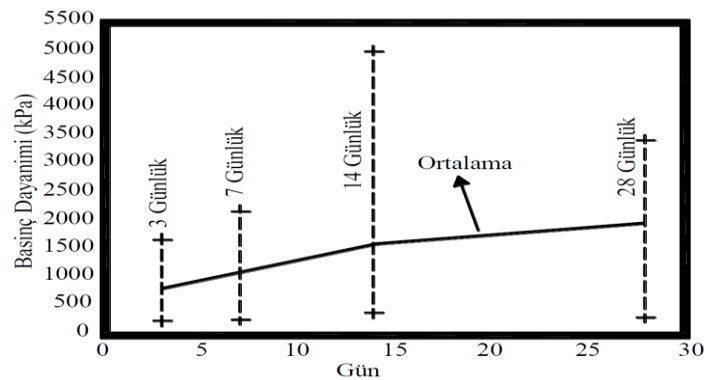
Şekil 2. 2 Kazı yan yüzeyinde jet uygulaması sonucunda sehim değerleri (Wong vd, 1999)

Sağlamer ve ark, (2002) yaptığı çalışmada, yöntemin uygulamaları ile alakalı daha önceki vaka analizlerinden yola çıkılarak, jet grout yönteminin zeminlerin taşıma gücünü artırarak, oturmaların önüne geçilmesi ve zemin sıvılaşmasına karşın etkin bir yöntem olduğu belirtilmiştir. İmalatı yapılan jet kolonlarını performanslarını etkileyen faktörler sıralanmıştır.

Kirsch ve Sondermann (2001) tarafından yapı temellerinde düşey yönde farklı aralıklara sahip jet grout kolonları teşkil edilerek ıslah edilmesi ve oluşturulan jet grout kolonların yapılan zeminin ıslahına etkisi, matematiksel bağıntılar ile ifade edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ile zemin deformasyonlarının önlenmesine yönelik uygulaması yapılan jet kolon tasarımları nümerik yöntemlerle irdelenmiştir. Bu çalışma ile zemin ıslahında jet grout kolonların kullanımının ne kadar uygun ve güvenilir olduğunu ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Gökalp ve Düzceer (2002) tarafından İzmir ilinin sanayi bölgesi olan Aliağa ilçesinde inşaatı gerçekleştirilecek bir ağır sanayi tesisinin yapı temellerinde jet grout yöntemi ile temel takviye çalışmaları yapılmıştır. Taşıma gücü düşük bir zemine sahip olan inşaat sahasında oturmaların önlenmesi ve zemin taşıma gücünün artırılmasına yönelik yapılan uygulamadan önce yöntemin parametrik değerlerinde değişiklikler denenerek projede istenilen kolonların imalatı için en uygun tij çekme-dönme hızı, enjeksiyon basıncı, nozul çap-sayında değişiklikler yapılmıştır. Daha sonra imalatı yapılan kolonlarda istenilen niteliklerin elde edilip edilmediğinin görülmesi için kolon kalite testleri yapılmıştır.

Bell vd (2003) yaptığı çalışmada, imalatı yapılan jet grout kolonlarından çap boy oranı $\frac{1}{2}$ olan farklı prizlenme süresinde alınan karot numunelere serbest basınç dayanım testleri yapılarak süreye göre basınç mukavemetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 İmalatı yapılan kolonlar üzerinde gün esaslı basınç test sonuçları (Bell ve ark, 2003)

Shibazaki (2003) tarafından yapılan çalışmada, jet grout tekniğinde kullanılan enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine kolayca enjekte edilmesinden dolayı diğer geoteknik uygulamalarına göre geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu belirtmiştir.

Jet grout yöntemi ile üretilen jet grout kolonların fiziksel özelliklerinin sadece tasarım ve jet grout parametrelerine bağlı olmadığını belirterek enjeksiyon sırasında kullanılan jet grout tekniğine göre kullanılan su jetinin, su-hava jetinin veya sadece hava jetinin zemin parçalanıp zemin içerisine enjeksiyonunda önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kullanılan nozullar ve nozulların yapısal özelliklerinin de jet grout kolon çapını etkilediğini belirterek nozullardan aynı basınç ile 13^0 açı ile enjeksiyon yapıldığında grout malzemesinin daha uzağa iletilebildiğini belirtip akışkan jet grout malzemesinin nozul uçundan çıkarken türbülanslı ya da odaklı olmasının da kolon çapında etkili olduğunu ifade etmiştir.

Durgunoğlu ve ark, (2004) tarafından yapılan çalışmada ülkemizin en aktif depremsellik alanlarından birine olan Marmara Bölgesindeki İzmit Körfezi kıyısında bulunan Karamürsel'deki bir kâğıt fabrikasının binalarının bulunduğu alanda jet grout enjeksiyon tekniği kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Fabrikanın bulunduğu saha zeminde yeraltı suyu seviyesi 2 metre civarındadır. Zemin, yapısal olarak yüzeyden 3 metre derinliğe kadar sert killi bir tabakadan, bu tabaka ile 9 metrelik derinlik arası gevsek bir karaktere sahip kumlu siltli tabaka ve çalışmanın yapıldığı maksimum derinlik olan 32 metre ve altı ise yine sert bir kil katmandan oluştuğu belirtilmiştir. Fabrika zeminin karakteristik özelliğinden dolayı zeminde meydana gelecek oturmaların ve zemin sıvılaşma potansiyelinin ortadan kaldırılması için jet grout uygulaması yapılmıştır. İlk olarak deneme kolonları imal edilerek nihai kolon parametreleri ($s/\phi=1$, tij çekme-dönme hızının 55 cm/dk-21 devir/dk, nozul çapı=2 mm) belirlenerek kolon imalatı gerçekleştirilmiştir.

Burke (2004) yazarın jet grout yöntemi ile alakalı olarak yaptığı çalışmada sistemim uygulaması sırasında göz önünde bulundurulması gereken avantajları ve dezavantajları vurgulanmıştır. Jet grout sistemleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Zeminin parçalanması sırasında kullanılan akış tipi (tek akışkan, çift akışkan, üç akışkan, süper jet) sahada sağladığı avantajları ve dezavantajları ile birlikte iri taneli kohezyonsuz zeminler ile ince taneli kohezyonlu zeminlere kadar zemin cinsinde dikkat edilmesi gereken hususlar ortaya konmuştur. Ayrıca yöntemin uygulaması esnasında

kullanılan enjeksiyon basıncının, nozul çap-sayısının ve enjeksiyon karışım malzemesinin dozajının enjeksiyon enerjisini doğrudan etkilediğini belirtilmiştir. Yazar zemin parçalanarak doğal yapısının bozulmasında kullanılan bu enerjinin jet grout tekniği ile ilişkilendirerek çok büyük çaplarda jet grout kolonların imal edilebileceğini göstermiştir.

Sert ve ark, (2007) tarafında yapılan çalışmada İstanbul'da yapılması düşünülen bir köprünün zeminin iyileştirilmesi ve köprü yapıldıktan sonra oturmalarının önüne geçilmesi jet grout kolonlarının kullanılabilceği sayısal yöntemlerle ortaya konulmuştur. Köprü inşa alanında zeminde 65 cm çapında 15 m boyunda jet kolonların imal edilerek ilerde meydana gelmesi gereken oturumlara karşın zeminin taşıma gücünün artırılabilceği belirtilmiştir.

Küçükali (2008) yüksek lisan tezi çalışmasında Niğde Ulukışla-Gümüş demir yolunun geçeceği bir alanda yeraltı suyunu akışından kaynaklı zemini oluşturan kum, kil ve siltler arasında bulunan jipslerin erimesi sonucu oluşan boşlukların ani oturma ve göçmelere neden olmasının önüne geçmek için jet grout kolonlarla zemin iyileştirmesi yapılması önerilmiştir.

Çalışma alanında jet-1 tekniği kullanılarak boyları 8 metre civarında çapları 0.8 metre olan 125 adet kolon imalatı yapılmış. Çalışma öncesinde ve sonrasında zemin sayısal olarak bilgisayar ortamında modellenerek imal edilen kolonlar sayesinde zeminde meydana gelen göçmeler engellenmiştir.

Küsin (2009) tarafından yüksek lisans çalışması kapsamında zemin sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu alanlarda inşa edilen farklı yapıların temellerinin güçlendirilmesi amacı ile jet grout yöntemi kullanılarak imal edilen kolonların taşıma güçleri irdelenmiştir. Yapılan çalışmada plaxis programı kullanılarak kolonların taşıma gücü 2 ve 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sayısal analiz yöntemleri (sonlu elemanlar yöntemi) kullanılarak yapılan bu çalışma ile zemin sıvılaşma potansiyelinin yüksel olduğu alanlarda jet grout yönteminin kullanılmasının etkinliği ve ekonomik bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur. Jet grout kolonlar kullanılarak imal edilen; duvarlar, bir otoparkın temel güçlendirilmesi ve farklı büyüklükte ki temellere sahip tankların inşasından önce jet grout yöntemi kullanılarak yapılan iyileştirmeler, dayanım gücü ve tasarım açısından irdelenmiştir. Ayrıca tez çalışmasında jet kolonların taşıma gücünün

sayısal analiz yöntemi ile incelenmesinden önce yöntemin ekipmanları, uygulanması ve imal parametreleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Doğanışık (2010) tarafından yayınlanan çalışmada, iri taneli (kohezyonlu) zeminlerde imal edilen jet grout kolonların dayanımları ve kolon içinde oluşan gerilmeler nümerik yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda jet grout tekniği ile imal edilen kolonlar üzerine etki eden yükler neticesinde kolon davranışının modellenmesinin nasıl yapılacağı konusunda bir açıklama yapılmıştır.

Alkaya ve ark, (2011) tarafından yapılan çalışmada jet grout tekniği kullanılarak yapılan saha uygulamalarının tasarımları sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar incelenmiştir. Geliştirilen bir program yardımı ile jet grout çalışmasının yapılacağı alanda imal edilmesi gereken kolon sayısı belirlenmiştir. Zeminin sıvılaşmasına karşı yöntemin etkin olarak kullanılabilen bir yöntem olduğu vurgulanmış, sıvılaşmaya karşı yapılacak çalışmalarda jet kolonların sayıca yeterliliğinin yapılacak analizlerle ortaya konmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Pinto ve ark, (2012) yaptığı çalışmada Portekiz’de son yirmi yılda jet grout metodu kullanılarak yapılan saha uygulamalarından örnekler verilmiştir. Temel takviyesinden, şev stabilizasyonuna, oturma potansiyeli olan zeminlerin taşıma gücünün artırılmasına kadar yöntem kullanılarak yapılmış farklı örnekler plaxis programı kullanılarak sayısal analiz metodları ile irdelenerek kolon teşkilinin modellenmesi yapılmıştır. Farklı uygulamalardan yola çıkılarak yöntemin;

- Tüm zemin tiplerinde uygulanabilirliği
- Saha uygulamasının kolay ve kullanılan ekipmanların uygun olmasından dolayı zor geoteknik problemlerin çözümünde etkin olduğu
- Uygulamanın hem çevreye zarar vermeyen hem de ekonomik bir zemin iyileştirme tekniği olduğu ortaya konmuştur.

Essler (2012) tarafından yapılan çalışma da jet grout yönteminin uygulamasını 3 bileşende incelenmiştir. Bu bileşenler yöntemin tasarımı, uygulamanın gereksinimlerinin belirlenmesi ve uygulama esnasında tasarlanmış kolonların sayısal metodlar ile modellenmesi olarak belirtilmiştir. Yazar makalesinde belirttiği bu aşamaları Amsterdam’daki metro sisteminin merkez istasyonunun tünel inşaatında uygulayarak göstermiştir. Yazar inşaat sırasında yanal ve düşey yüklerden kaynaklanan

yüklerin taşınması için jet grout kolonlar tasarlamış daha sonra tasarımını daha da detaylandırılarak uygulama alanın sınırlarını, uygulamadan sonra beklenen maksimum ve minimum geçirimsizliği, istenilen dayanım aralığını, kullanılacak jet grout tekniğini vb. gibi hususları belirleyerek tasarımını açıklamıştır.

Erkan (2013) doktora tezi kapsamında laboratuvar ortamı için hazırlanmış bir jet grout düzeneği kullanarak jet grout kolon imalatı yapılarak jet grout kolonlarının performansını etkileyen faktörler deneysel olarak irdelenmiştir. Yapılan bu çalışma jet grout kolonların laboratuvar ortamında imal edilmesi açısından ilk çalışma olması sebebi ile önem arz etmektedir. Çalışma ile jet grout kolonların dayanımını etkileyen enjeksiyon basıncı, tij dönme-çekme hızı, su/çimento oranı istatistiksel olarak Taguchi optimizasyon tekniği yardımı ile irdelenmiştir. Enjeksiyon basıncı (20, 30, 40 bar), su/çimento oranı (1.00, 1.25, 1.50), tij dönme hızı (5, 10, 15 dev/dk), tij çekme hızı (15, 30, 45 cm/dk) değiştirilerek kolonlar imal edilmiştir. İmalatı yapılan kolonların çapı üzerinde etkili olan parametreler sıra ise % 43 ile enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı % 12 tij dönme hızı % 36 tij çekme hızı ise % 10 olarak belirlenmiştir. Üretilen kolonların basınç dayanımlarına ise % 36 ile enjeksiyon basıncının en fazla etki ettiği belirlenmiştir. En büyük çapa sahip kolonlar 40 bar basınç altında 5 dev/dk dönme, 15 cm/dk çekme hızında 1.5 su/çimento oranına sahip jet parametreleri ile imal edilmiştir. En yüksek dayanımına sahip kolonlar ise 20 bar enjeksiyon basıncının kullanıldığı su/çimento oranının 1.00 olduğu 10 dev/dk dönme ve 15 cm/dk çekme hızı kullanılarak imal edilen kolonlar olmuştur.

2.2. Sülfatın Beton Üzerine Etkisi ile İlgili Yapılan Literatür Çalışmaları

Uyan ve ark, (1996) tarafından yapılan çalışmada, normal portland çimentosuna farklı oranlarda (%0 %10 %30) tras ilave edilerek elde edilen çimentolardan kübik beton numuneler yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 4, 8, 12 hafta boyunca sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve amonyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılarak betonda meydana gelen ağırlık kayıpları ve dayanım kayıpları ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda betonu en fazla amonyum sülfatın en az ise magnezyum sülfatın etkilediği belirlenmiştir.

Shen ve ark, (1996) yaptığı çalışmada beton harcının en önemli elemanlarından biri olan agrega ara yüzeylerinde sülfatın etkisini incelemiştir. Çalışmada beton üzerindeki sülfat etkisinin agrega ara yüzey alanlarının yapısı ve hacmi ile alakalı olduğu ortaya konularak farklı agrega hacimsel oranlara sahip örnekler hazırlanmıştır. Farklı ara yüzey alanları elde etmek için daha önce işlenmiş olan kuartz kumu kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. Sonuç olarak beton harçlarında sülfata karşı direncin agrega ara yüzey alan içeriği ile azalırken, ara yüzey alanının yapısının geliştirilmesi ile arttığı ortaya konulmuştur.

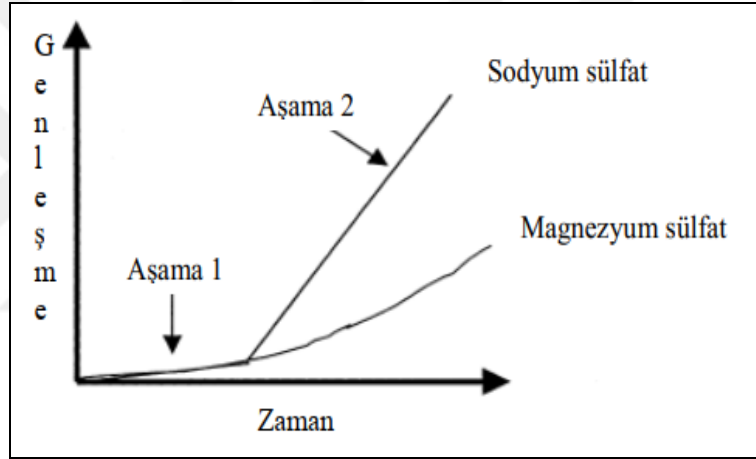
Cao ve ark, (1997) arkadaşları tarafından yapılan çalışmada farklı özelliğe sahip çimentolar kullanılarak ortamın pH dereceleri de değiştirilerek örnekler hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında 4 farklı içeriğe sahip portland çimentonun yanı sıra uçucu küllü, silis dumanlı ve fırın curufllu çimentolardan pH'ları 3-12 arasında değişen sülfat çözeltileri kullanılarak hazırlanan örnekler incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda beton içerisindeki sülfat direncinin, kullanılan çimentonun kimyasal bileşenleri ve ortam pH'na bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Kimyasal bileşen açısından trikalsiyum silikat ve trikalsiyum alüminat (C_3S , C_3A) oranı az olan portland çimentolar sülfat etkisine karşı daha iyi performans göstermiştir. % 40 oranında uçucu kül, % 5 oranında silis dumanı ve % 80 oranında fırın curufu içeren çimentolar ile hazırlanmış beton numuneler ise geniş bir aralığa sahip pH değerlerinde sülfata karşı iyi bir dayanım sergiledikleri ortaya konulmuştur.

Cohen ve ark, (2000) yaptığı çalışma ile sülfat etkisine maruz kalmış betonlarda alçıtaşı oluşumunun beton üzerinde çatlamalara neden olup olmadığı incelenmiştir. Sülfat etkisine maruz kalan betonların hidrasyonu sırasında sülfat ile etkileşime giren trikalsiyum alümina (C_3A) beton yapısında sülfat iyonlarının etkisi ile etrenjit oluşumuna sebep olurken, $Ca(OH)_2$ ise sülfat iyonları ile reaksiyona girerek alçıtaşına sebep olmaktadır. Genel olarak beton yapısında oluşan alçı taşının oluşumu beton için zararlı kabul edilse de bu durum kesin olarak ispatlanamadığı gibi betonun genişleşerek çatlamasına neden olduğu hali hazırda belirsiz bir durumdur. Bundan dolayı yapılan bu çalışma ile etrenjit oluşumunun elemine etmek için trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum alüminat (C_2A) ve silis dumanı içeren çimentolar kullanılarak yapılan çalışma ile sülfat iyonlarına maruz kalan betonlarda meydana gelen etrenjit oluşumunun tek başına betonda çatlamalara ve genişlemeye neden olmadığı belirtilmiştir. Betonda oluşan

çatlama ve genişmeye beton yapısında oluşan alçı taşının oluşumu sırasından meydana gelen gerilme ve çatlamların etken olduğu belirtilmiştir.

Santhannam ve ark, (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile Na_2SO_4 (sodyum sülfat), MgSO_4 (magnezyum sülfat) içeren çözeltiler ve farklı tip çimentolar kullanılarak sülfat etkisinin betonun genişmesine etkisi zamana göre değerlendirilmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi kullanılarak yapılan çalışmadan betonun gelişmesi iki aşamalı, önce yavaş sonra daha hızlı gerçekleşmiştir.

Magnezyum sülfat çözeltisi kullanılan çalışmada ise betonda meydana gelen genişme kademeli olmayıp sürekli olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.4). MgSO_4 içeren çalışmada sülfat etkisinden kaynaklı olarak brisit oluşumunun ve bağlayıcı özelliği olmayan magnezyum silika jellerin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. 4 MgSO_4 ve Na_2SO_4 içeren çözeltilerde zamana göre genişme (Santhanam vd 2002)

Akman (2003) tarafından yapılan çalışmada betonda meydana gelen gecikmiş etrenjit oluşumunun tarihçesi hakkında bilgi verilmiştir. Gecikmiş etrenjit (GEO) oluşumunun sülfattan kaynaklandığı belirtilerek etrenjit oluşumu çimentolarda bulunan sülfatlı bileşiklerin zamanla çözülmesine betondan oluşan mikro çatlaklara ve bu mikro çatlakların zamanla sülfat iyonu içeren sulara maruz kalmasına bağlamıştır. GEO oluşumunun önüne geçilmesi için çimentolarda kullanılan sülfat içerikli bileşiklerin belli oranda tutulması gerektiğini vurgulayarak gelişen SEM teknolojisi ile konunun daha ayrıntılı olarak irdelenmesi gerektiğini belirtilmiştir.

Uyan ve ark, (2003) yılında yaptığı çalışmada farklı su/çimento (0.60 ve 0.75) oranlarına sahip MgSO_4 (magnezyum sülfat) ve Na_2SO_4 (sodyum sülfat) içeren karışım suyundan hazırlanan beton numunelerde meydana gelen dayanım kayıpları

karşılaştırılmıştır. Normal şartlarda karışım suyunda bulunması gereken en fazla $MgSO_4$ oranı % 4, Na_2SO_4 oranı ise % 1 olması gerektiği belirtilerek çalışmada sodyum sülfatın betona etkisi % 0.5 magnezyum sülfatın etkisi ise % 6 da kendini gösterdiği tespit edilmiştir. Betonun yapısal olarak $NaSO_4$ ' ten daha fazla etkilendiği gözlenmiştir.

Dehwash (2007) tarafından yapılan çalışmada; farklı oranlarda sülfat iyonu içeren ortamda uzun süre bekletilen (4 yıl) betonlarda meydana gelen yapısal bozulmalar incelenmiştir. Yapılan çalışma ile içerinde katkı malzemesi olmayan silis dumanlı, uçucu küllü ve fırın curufllu çimentodan hazırlanan beton örneklerde $NaCl^+$ ve $NaSO_4$ içeren karışımlarda beklmeleri sonucunda yüksek miktarda bozulmalar tespit edilmişken, Na_2SO_4 ve $NaCl$ iyonu içeren karışımlara maruz bırakılan betonlarda ise bozulmalar gözlenmemiştir.

Tosun (2007) doktora tezi kapsamında yaptığı çalışmada farklı yüzey alanlarına ve farklı kükürt trioksit (SO_3) içeriğine sahip çimentolar ile farklı buhar kücü ortamında hazırlanan beton numuneler üzerinde gecikmiş etrenjit oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Çalışma yapılırken Duggan vb. gibi farklı hızlandırma tekniklerinin reaksiyon oluşum zamanı ve oluşum mekanizması nasıl etkilediği irdelenmiştir. Beton oluşumu sırasında ortaya çıkan hidrasyon ürünlerinin yapısal oluşumları ve kompozisyonlarının belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kristalografisi (XRD) ve enerji dağılım (EDS) analizleri yapılmıştır. Ayrıca örnek numunelerden ince kesitler alınarak optik mikroskop altında mineralojik yapıları incelenmiştir.

Ustabaş ve ark, (2008) yaptığı çalışma ile farklı sıcaklı değerlerine ($5^{\circ}C$ ve $40^{\circ}C$) maruz bırakılmış 0.52 ve 0.625 su/çimento oranının kullanıldığı mineral katkılı ve mineral katkısız çimentolardan hazırlanmış beton numuneler hazırlamıştır. Bu numuneler magnezyum sülfat içeren çözeltilerde 3, 6, 9, 12, ve 20 aylık kür sürelerinde bekletilerek basınç dayanları ve sülfat etkisi ile betonda oluşan yeni ürün mekanizmaları incelenmiştir. Beton oluşumunda kullanılan mineral katkılı çimentoların betonun geçirimliliğini etkilediğinden sülfatın beton üzerindeki etki mekanizmasının değiştiğini ve ortam sıcaklığının betonda oluşan etrenjitin oluşumunu tetiklediğini ortaya koymuştur.

Yıldız ve ark, (2010) tarafından yapılan çalışmada, Konya 2.Organize Sanayi Bölgesi'nden temin edilen yüksek oranda sülfat iyonu içeren sülfatlı yeraltı suyu ve

metal kübik kaplarla belli bir derinlikten örselenmemiş kil zemin örnekleri temin edilmiştir. Doğal ortamdan temin edilen sülfatlı yeraltı suyu içeren zemin içerisinde ve silindirik kalıplar içerisinde 15 cm çapında 30 cm boyunda normal portland çimento ve yüksek fırın cürüflü çimento ile farklı dozajlar kullanılarak beton numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sülfatlı yeraltı suyunda ve normal suda numune çeşidine göre 7, 28, 90, 180 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Kür süreleri sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler basınç dayanımlarına tabi tutulmuştur. Portland çimento ve yüksek fırın cürüflü çimento ile hazırlanmış sülfatlı yeraltı suyu içeren zeminde hazırlanan, sülfatlı su küründe bekletilen numuneler normal su küründe bekletilerek hazırlanan numunelere göre büyük oranda dayanım kayıplarına uğradığı tespit edilmiştir.

Müllauer ve ark, (2013) yaptığı çalışmada farklı konsantrasyon oranında sülfat iyonu içeren karışımlar ve kalsiyum alüminat (C_3A) miktarı farklı olan çimentolar ile oluşturulmuş beton numuneler hazırlanmıştır. Sülfat etkisinin hazırlanan beton numunelerde meydana getirdiği genleşme miktarına bu farklı nitelikteki sülfat derişimin ve C_3A 'nın etkisi irdelenmiştir. Yapılan çalışmada belli nitelikteki gerilme hücreleri hazırlanarak dış sülfattan kaynaklı, silindirik örneklerde meydana gelen gerilmeler belirlenmeye çalışılmıştır. Nano boşluklarda oluşan etrenjitin meydana getirdiği çekme gerilmelerinin betona zarar verdiği belirlenmiştir. Oluşan bu gerilmelere yüksek sülfat konsantrasyon ve kalsiyum alüminatın sebep olduğu ortaya konmuştur.

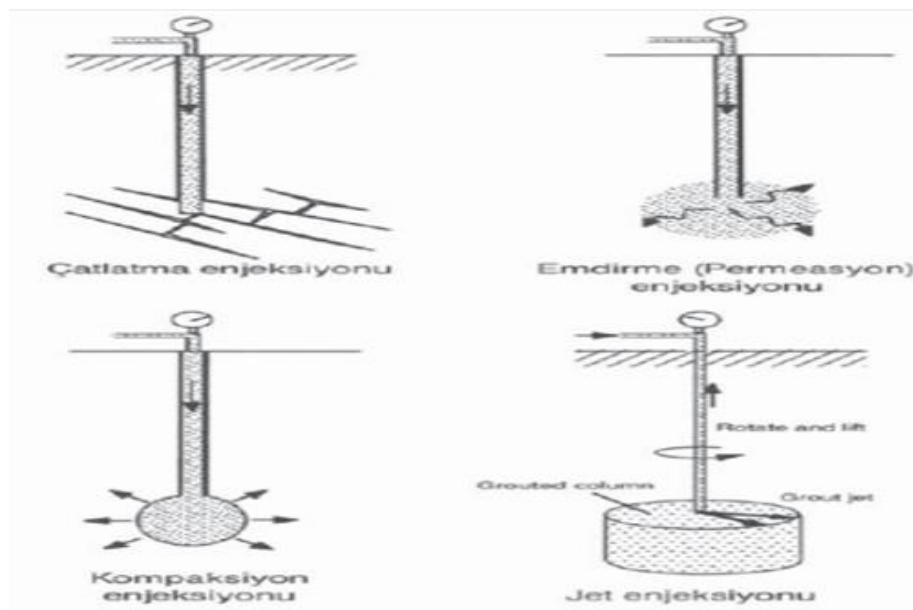
Rahman ve ark, (2014) tarafından yapılan çalışmada betonda oluşan tomasit oluşumunu üzerinden sülfat kaynaklı etki mekanizması irdelenmiştir. Çalışma ile daha önce laboratuvar ortamında ve sahada yapılan çalışmalar incelenerek analiz yapılmıştır. Betonda oluşan tomasit oluşumunu su oranının fazla olduğu düşük sıcaklığa sahip ortamlardaki karbonat içerikli bileşiklerin sülfatın etkisini tetiklediği belirtilmiştir. Betonda oluşan tomasitin betonun kararlılığını bozarak, kohezyonsuz bir yapıya dönüştüğü belirtilmiştir. Ortam sıcaklığının normal olduğu durumlarda tomasit oluşumuna sülfatla birlikte kuruma, ıslanma, donma gibi durumlarında hızlandırdığı ortaya konmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında bu bölümde zemin enjeksiyon tekniklerinden biri olan jet grout yöntemi ve beton üzerindeki sülfat etkisi hakkında bilgi verilmiştir. İlk olarak zemin enjeksiyon yöntemleri hakkında kısa bilgi verilmiş, sonra tez çalışması kapsamında laboratuvar ortamında kullanılan jet grout tekniğinin prensipleri ve uygulaması anlatılmıştır. Daha sonra beton üzerindeki sülfatın etkisinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

3.1. Zemin Enjeksiyon Yöntemleri

Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak zemin mühendisliğinde zemin yapı uyumunun artırılıp her zemin tipi üzerine yapıların inşa edilebilmesi için zemin enjeksiyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler emdirme, çatlatma, kompaksiyon ve jet enjeksiyon yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.1). Zemin enjeksiyon yöntemleri ile zemin içerisine yüksek basınç yardımı ile enjeksiyon malzemesi yollanarak zeminin fiziksel özellikleri değiştirilmektedir. Bu yöntemler sayesinde istenilen boşluk oranında, permeabilitede, mukavemette ve taşıma gücünde zeminler elde edilmektedir. Zemin enjeksiyon yöntemleri uygulama tekniklerine göre konutlardan barajlara, karayollarından tünellere kadar birçok yapı tipinde kullanılmaktadır.

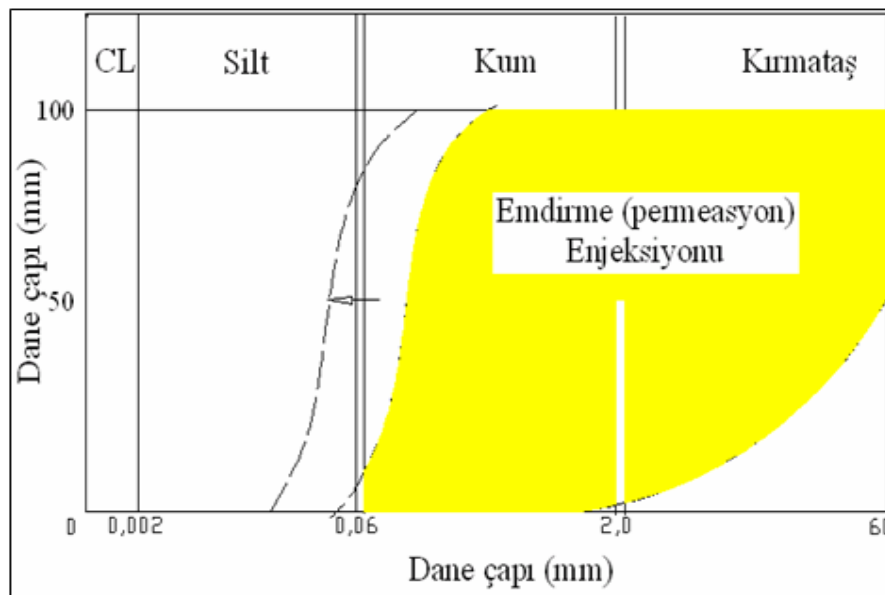


Şekil 3. 1 Zemin enjeksiyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Tunçdemir, 2004)

Zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan bu yöntemlerden istenilen sonuçların elde edilebilmesi için hangi zeminde hangi yöntemin kullanılacağı, kullanılacak malzeme cinsinin yanı sıra enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, kullanılan enjeksiyon malzemesinin dozajı ile birlikte uygulama yapılacak zeminin fiziksel özelliklerine de dikkat edilmelidir.

3.1.1. Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu Yöntemi

Permeasyon enjeksiyon tekniğinde zeminin hacminde ve yapısında değişimler meydana getirmeden düşük basınç yardımı ile akışkanlığı yüksek olan enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşlukları doldurması sağlanmaktadır. Bu yöntemde zemin içerisindeki boşluklar ya minimize edilir ya da tamamen doldurularak zeminin dayanımı artırılır. Zemin içerisine enjekte edilen malzemenin boşluklara tamamen nüfuz edebilmesi için iç kayma direncinin düşük akışkanlığının ise yüksek olması gerekmektedir. Yüksek viskoziteli enjeksiyon karışımlarının kullanılması durumunda enjeksiyon malzemesi zemin içerisindeki boşlukları tam olarak doldurmayacağından enjeksiyon basıncında artışa gerek duyulmaktadır. Enjeksiyon basıncındaki artış zemin malzemesinin kabarmasına ve zemini çatlatarak boşlukların artmasına sebep olduğundan zeminde istenilen dayanım kazancı sağlanamamaktadır.

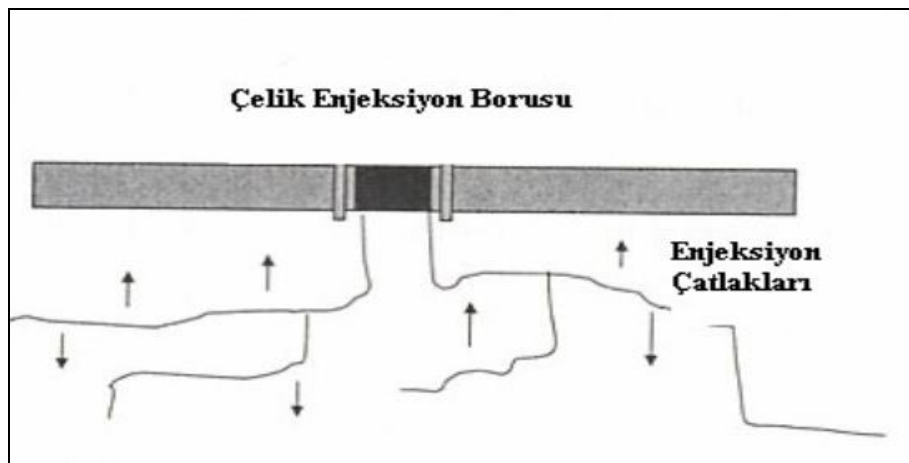


Şekil 3. 2 Permeasyon enjeksiyonu uygulama alanları

Emdirme enjeksiyon tekniği genellikle kumlu çakıllı zeminlerin yanı sıra kötü derecelenmiş dolgu zeminlerde başarı ile kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Bu enjeksiyon yönteminde enjeksiyon karışımında katkı malzemelerin çimento ile karışımı sonucu elde edilen malzemeler kullanılmaktadır. Emdirme enjeksiyonunda hem çimento-kum hem çimento-kil karışımları ile hazırlanmış enjeksiyon şerbetlerinin yanı sıra koloit (ara karışım) yapıda oluşturulan kimyasal çözeltiler enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Permeasyon enjeksiyon yöntemi kademeli ve yüzeysel olarak iki şekilde uygulanmaktadır. Yüzeysel uygulamada bir kuyu açılarak enjeksiyon malzemesi zemine belli bir basınç ile enjekte edilerek sertleşmesi sağlanır. Kademeli uygulamada ise belli bir derinlikte açılan enjeksiyon kuyusuna karışım enjekte edildikten sonra enjeksiyon malzemesinin zemin içerisinde sertleşmesi beklenir daha sonra enjeksiyon kuyusu derinleştirilerek kuyu içine yeni enjeksiyon malzemesi enjekte edilerek istenilen derinliğe kadar bu işlem tekrarlanır.

3.1.2. Çatlatma Enjeksiyon Yöntemi

Çatlatma enjeksiyonu yönteminde, emdirme enjeksiyonunun mümkün olmadığı az geçirimli kil-silt gibi ince taneli zeminlerde uygulamanın yapılacağı zeminin yüksek basınç az viskoziteli çimento malzemesi ile zeminin çatlatılarak boşluklar oluşturulur. Bu çatlakların yine enjeksiyon malzemesi ile doldurularak zeminin sağlamlaşması sağlanır (Şekil 3.3). Bu enjeksiyon yöntemi en çok tünel ve kazı çalışmalarında oturumların önlenmesini sağlamak için uygulanır.

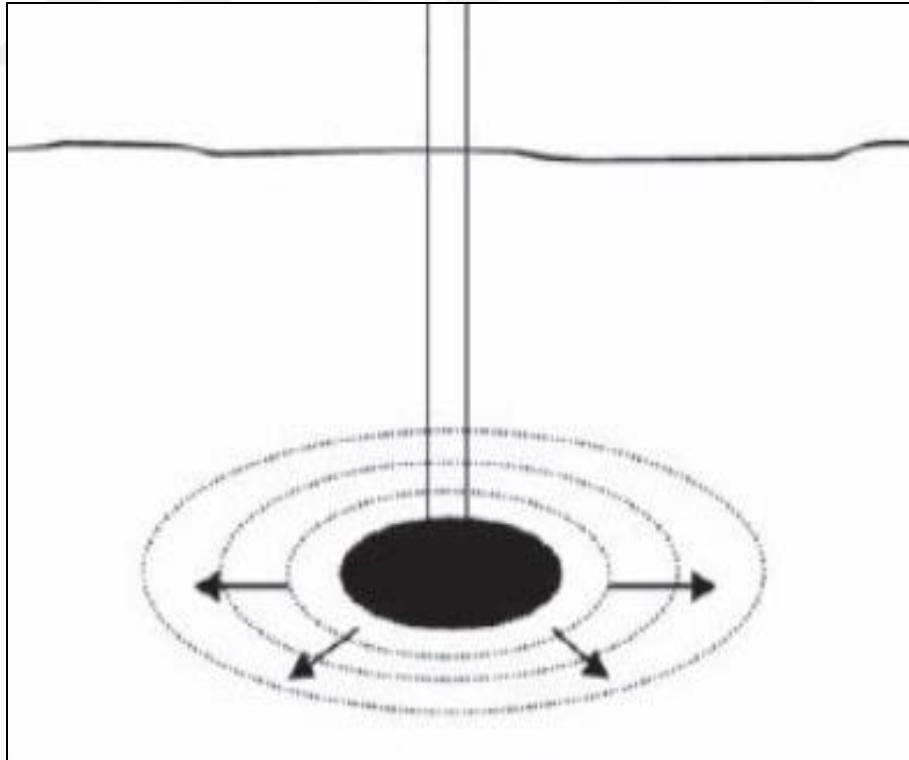


Şekil 3:3 Çatlatma enjeksiyonunun şematik gösterimi (Gallavresi, 1992)

Tekniğin uygulaması esnasında basınçtan dolayı zeminde yaprak damarları şeklinde ince kanal yapıları oluşur. Oluşan kanallar düşük viskoziteli enjeksiyon şerbeti ile dolup sertleşmesi sonucunda zeminin mukavemeti artar. Tekniğin denendiği saha uygulamalarına bakıldığında enjeksiyon malzemesi için hazırlanan çimento şerbetinde su/çimento oranının yüksek olduğu gözlenmekte olup, daha akışkan malzemeler oluşturmak için bentonit benzeri katkı malzemelerinin kullanıldığı gözlenmektedir.

3.1.3. Kompaksiyon Enjeksiyonu Yöntemi

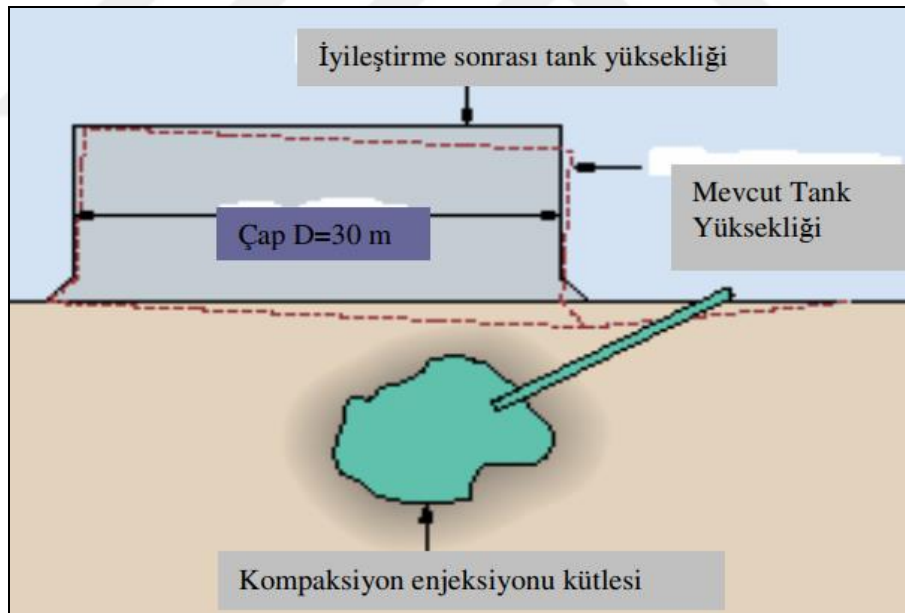
Kompaksiyon enjeksiyon tekniği; yüksek kıvamlı enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yüksek basınçla enjekte edilerek enjeksiyonun yapıldığı nokta etrafında stabil olmayan yumuşak zeminin yerinin değiştirilerek daha stabil ve taşıma gücü yüksek zeminlerin oluşturulmasını amaçlayan bir yöntem olarak tanımlanabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Kompaksiyon enjeksiyonunun temsili gösterimi (Essler, 2000)

Bu yöntem yaygın olarak oturmuş ya da yan yatmış yapıların temellerinin tekrardan eski hallerine getirmek için kullanılan temel enjeksiyon yöntemidir. Yöntemin uygulaması sırasında kullanılan enjeksiyon şerbeti çimento, kum, kille birlikte malzemenin daha kolay enjekte edilebilirliğini sağlamak için katkı malzemelerinden oluşabilmektedir. Kompaksiyon enjeksiyon tekniğinde sıklığı az, iyi derecelenmemiş zemin içerisine yüksek basınçla viskozitesi yüksek enjeksiyon malzemesi basılarak daha üniform ve zemin birim hacim ağırlığı yüksek zeminler elde edilmektedir (**Essler ve ark, 2000**). Her zemin türünde uygulanabilirliği olduğundan son yıllarda en çok tercih edilen temel enjeksiyon yöntemlerinden biri haline gelmiştir.

Yöntem uygulanırken enjeksiyon malzemesi alttan yukarı enjekte edilebildiği gibi yukardan aşağı olacak şekilde de enjeksiyon yapılabilir. Zayıf ve yumuşak zeminlere oturtulmuş yapılarda meydana gelen temel oturmalarının önüne geçilmesi, yapının oturtulduğu temellerin desteklenerek oturmaların önlenmesinde bu yöntem başarılı sonuçlar vermektedir (Şekil 3.5).



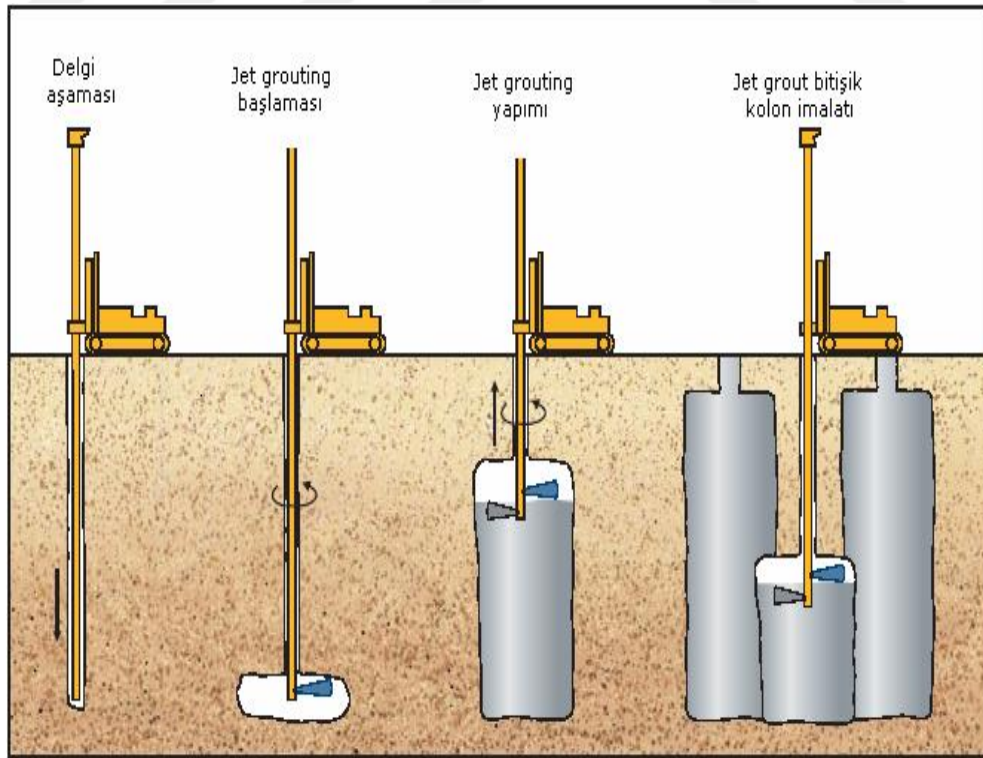
Şekil 3.5 Bir akaryakıt tankında kompaksiyon enjeksiyonu ile zemin iyileştirilmesi (Bakım, 2007)

3.2. Jet Grout Enjeksiyon Yöntemi

Jet grout yöntemi ülkemizde son yıllarda en çok tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem ekonomik, hızlı ve tüm zemin tiplerine

uygulanabilirliği ile öne çıkmakta olup iş güvenliği ve çevreye zarar vermemesi gibi özellikleri ile de diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden daha çok tercih edilen bir enjeksiyon yöntemi haline gelmiştir. Nüfus artışına paralel olarak kentlerde daha büyük ve yüksek katlı yapılara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Bu yapıların inşası sırasında zeminlerinde büyük problemlerle karşılaşılmaya başlanmıştır. Zeminden kaynaklanan bu problemlerin çözümünde kullanılan en etkin zemin iyileştirme yöntemlerinden biri de jet grout yöntemidir.

Jet grout yöntemi çimento ve türevlerinden hazırlanan enjeksiyon karışım malzemesinin, zeminin doğrudan tij veya hava ya da su yardımı ile delinmesi sonucunda tijin ucundaki nozullardan yüksek basınçla (300-600 bar) belli çekme ve dönme hızında zemin içerisine enjekte edilmesi sonucunda silindirik biçimde beton kolonların imalat edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.6). Bu yöntemle zeminin doğal yapısı bozularak ve zemin içerisine enjeksiyon şerbetinin karışması sağlanarak daha rijit bir zemin elde edilmektedir (Sağlamer ve ark, 2001). Yöntem taşıma gücü açısından zayıf olan tüm zemin tiplerinin yanı sıra kum-kil-çakıl malzemeden oluşmuş doğal daneli zeminlerin de tümünde uygulanabilmektedir.



Şekil.3.6 Jet grout yönteminin şematik gösterimi

Yöntem sahada hızlı uygulanması, maliyetinin önceden hesaplanabilmesi kalıcılığı, uygulamadan sonra elde edilen zemin parametrelerinin güvenilirliği açısından diğer enjeksiyon metodlarına göre daha tercih edilebilir bir enjeksiyon metoddur. Enjeksiyon aşaması sırasında jet grout parametrelerinin kontrol ediliyor olması istenilen boy ve çapta beton kolonların oluşturulmasını sağlamaktadır (Lunardi, 1977). Diğer kullanılan zemin enjeksiyon yöntemlerinde zeminin özellikleri değiştirilmezken jet grout enjeksiyon metodu ile enjeksiyon malzemesinde kullanılan su/çimento oranında değişimler yapılarak zeminin temel özelliklerinde istenilen değişimler yapılabilmektedir.

Jet grout yöntemi diğer enjeksiyon metodlarına olduğu gibi, sahada mekan ve zaman açısından uygulanabilirliği çok kolay olduğundan da kazık ve diğer temel takviye sistemlerine de alternatif bir zemin iyileştirme metodudur. Sahada uygulama yapılırken diğer yapı sistemlerine zarar vermeden hızlı bir şekilde en kısa zamanda uygulanabilmektedir (Durgunoğlu, 2004).

3.2.1. Jet Grout Yönteminin Tarihçesi

Literatürde jet grout yöntemin ilk uygulamalarına İngiltere'deki bazı araştırmalar ile ABD'deki kömür yataklarından zeminin su ile kesilmesi şeklinde rastlanılmaktadır. Daha sonra zeminin yüksek basınçlı su ile kesilmesine ek olarak çimento-su karışımı ile hazırlanan enjeksiyon malzemesinin de eklenerek zemine enjekte edilmesi 1960'lı yıllarda Japon araştırmacılar Yakakoda Kardeşler tarafından geliştirilmiştir. İlerleyen yıllarda bu yöntem "Chemical Churning Plant" (CCP) olarak Nakanishi ve arkadaşları tarafından kimyasal enjeksiyon malzemesi kullanılarak 1.0-2.00 mm çapındaki deliklerden yüksek basınçla delme borusunun uçundan yüksek hızla püskürtülerek delme borusunun kendi eksenine etrafında dönmesi ve yukarı çekilmesi şeklinde modifiye edilmiştir. Kullanılan kimyasal enjeksiyon şerbetinin çevreye zarar vermesinin önlenmesi için çimento bazlı enjeksiyon malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır (Nicholson, 1963), (Nakanishi, 1984), (Xanthokas ve ark, 1994), (Doğanışık, 2010).

Yöntem daha sonraki yıllarda enjeksiyon malzemesinde kullanılan çimento bazlı karışımın hızının artırılıp bir kılıf içerisinde zemine enjekte edilerek 80-200 cm çapında

jet kolonların elde edileşi şeklinde gelişimini sürdürmüştür. 1980 yıllarda ise zemin bir delgi aparatı yardımı ile delindikten sonra yüksek hıza sahip su jeti ile zemin parçalandıktan sonra çimento malzemesi yüksek basınçla zemine yanal yönde pompalanarak iri daneli zeminlerde çap açısından büyük kolonların elde edilmesi şeklinde gelişimini sürdürmüştür. Yöntem teknolojinin gelişimine paralel olarak gelişimine hala devam etmekte olup uygulama esnasında kullanılan parametrelerden enjeksiyon basıncı, kullanılan tijin çekme ve dönme hızı, kullanılan enjeksiyon malzemesinin dozaj oranının değiştirilmesi, kullanılan nozulların modifikasyonu vb. parametrelerde yapılan yeniliklerle birlikte insan gücünün azaltılarak sahada daha hızlı ve ekonomik uygulanabilirlik açısından gelişimine devam etmektedir (Moseley ve ark, 2004), (Erkan, 2013).

3.2.2. Jet Grout Kullanım Alanları

Jet grout zemin enjeksiyon metodu sağlam olmayan tüm ince ve iri taneli zeminlerde ve bu zeminler üzerine inşa edilmiş yapı temellerinin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Kullanım alanları;

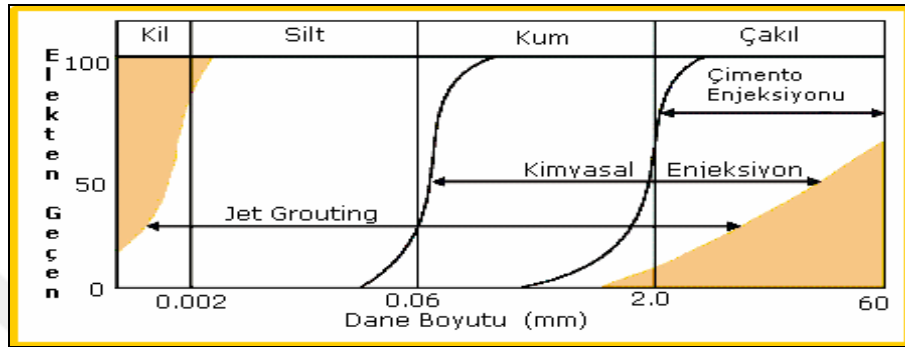
- Yeni inşa edilecek yapılar için temellerinin taşıma gücünün artırılmasında,
- İnşa edilmiş olan yapıların temellerinin iyileştirilmesinde,
- Düşük geçirimsizliğe sahip bariyerlerin oluşturulmasında,
- Destek yapılarının oluşturulmasında,
- Zemin güçlendirilmesinde,
- Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zemin tiplerinde sıvılaşmanın önlenmesi vb.

gibi birçok geoteknik mühendisliği uygulamasında jet grout metodu ile zemin iyileştirmesine başvurulmaktadır.

Jet grout yönteminin ince daneli zeminlerden iri daneli farklı dane boyuna sahip birçok zemin türünde (Şekil 3.7) başarılı uygulamalarına rastlanmaktadır. Fakat zemin türünün ve dane boyutunun farklı olması uygulamanın yapılacağı sırada kullanılacak jet grout parametrelerinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

İnce taneli zeminlerde yapılan jet enjeksiyonu sırasında kullanılacak nozullarının 2 adet, çapların 1.6-2.00 mm arasında, enjeksiyon basıncının ise 400-600 bar arasında

seçilmesi önerilmektedir. Enjekte edilecek enjeksiyon karışımının özelliğinin, kullanılan yüksek basınçtan dolayı zeminin parçalanıp kırılarak delme aparatı etrafında oluşacak olan birikmelerin azaltılması için gerekmektedir. İnce taneli zeminde çalışılırken zemin özelliğinden dolayı zorlanma ile karşılaşılıyor ise kullanılan nozul sayı bire düşürülerek 250-300 bar basınçla çalışılarak enerji kaybının önüne geçilerek imal edilecek kolonlardan istenilen performansı elde edilmesi sağlanmalıdır.

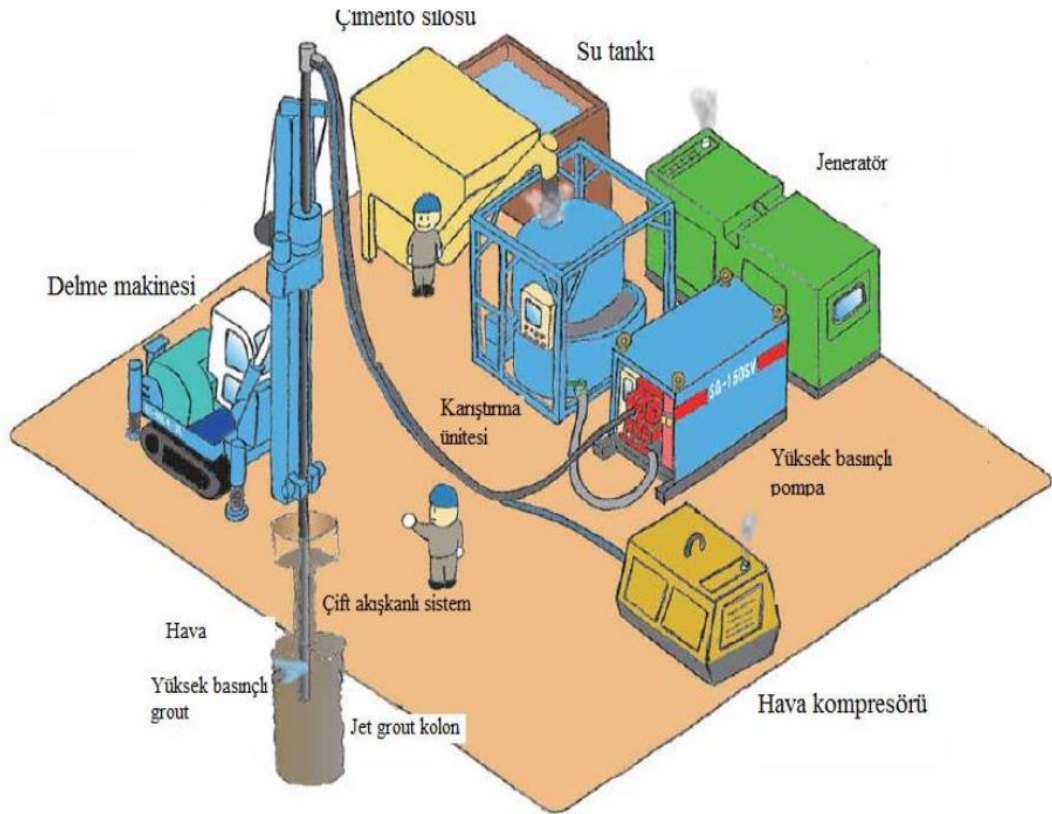


Şekil.3.7 Zemin tipi ve dane boyutuna göre jet grout yönteminin kullanım aralığı

Yöntemin kum, çakıl gibi iri taneli zeminlerdeki uygulaması sırasında ise tercih edilen parametreler daha farklıdır. Kullanılacak enjeksiyon basıncının 400-500 bar arasında nozul çaplarının 2.5-3.0 mm arasında tercih edilmesi önerilmektedir. Seçilen basınç ve nozul çapının büyük olmasından dolayı zemine istenilen miktarda enjeksiyon malzemesi enjekte edilerek istenilen çap ve boyda kolon imalatı yapılabilmektedir (Baş, 2006), (Erdil, 2008).

3.2.3. Jet Grout Ekipmanları

Jet grout yönteminin saha uygulamasının gerçekleştirilmesi sırasında enjeksiyon sistemini meydana getiren; istenilen derinlik ve çapta sondaj delgisi yapacak bir delgi makinası, oluşturulan sondaj delgisinde istenilen çap ve boyda kolonların oluşturulması için yaklaşık 600 Mpa basınç, 400-500 litreye kadar enjeksiyon malzemesini basabilecek pompa ünitesi gerekmektedir. Enjeksiyon karışımının hazırlanması ve dinlendirilmesi için karıştırıcı ve dinlendirici kazanlar ile birlikte çimento silosunada ihtiyaç duyulmaktadır. Delgi işlemi ardından zemine basılacak enjeksiyon malzemesinin yüksek hızlı jete dönüştürülmesi için sondaj tijinin sonuna yerleştirilen monitör adı verilen bir ekipmana da uygulama sırasında gerek duyulmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Jet grout enjeksiyon ekipmanları (Erkan,2010)

Sistemin uygulama sırasında sorunsuz çalışabilmesi ve istenilen jet kolonlarının elde edilmesi adına nozulların zemine enjekte edilecek akışkan enjeksiyon malzemesinin daha iyi bir şekilde enjekte edebilecek biçimde tasarlanması çok önemlidir (Şekil 3.9). Jet kolonların imalatı sırasında basılan enjeksiyon karışımının parçalanmış zemin içerisinde düzgün bir şekilde dağılması, yanal olarak istenilen noktaya iletilebilmesi ve istenilen boyut vs. özellikle yüksek modüllü kolon teşkili için bu gereklidir (Küsin, 2009), (Erkan, 2013).



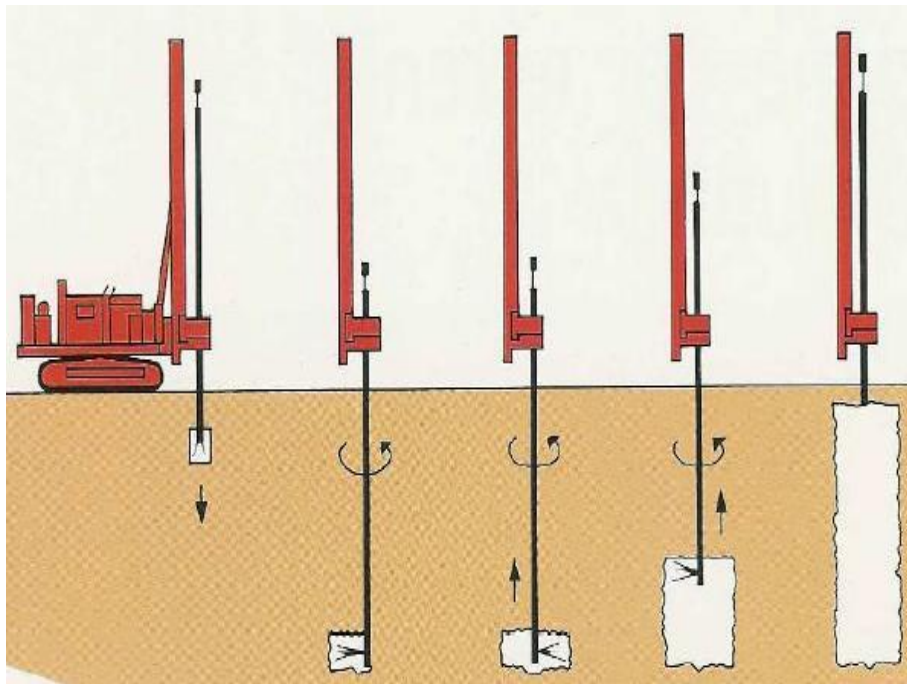
Şekil 3.9 Jet enjeksiyon ekipmanlarından monitör ve nozullar

3.2.4. Jet Grout Yönteminin Uygulanması

Jet grout tekniğinin saha uygulaması iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birinci aşama zemin bir tij yardımı ile belli çapta delinmesi, ikinci aşama ise delinen zemine enjeksiyon malzemesinin enjekte edilmesidir. Yöntemin saha uygulaması sırasında Türk Standartları'nın 12716 numaralı yönetmeliği referans alınmaktadır.

Delgi aşaması sırasında istenilen derinliğine kadar zemin delinerek delgi tijindeki nozullar kolonların imalatının başlanacağı alt seviyeye getirilir (Şekil 3.10). Delme aşamasında kullanılan tijlerin fiziksel özellikleri zemin cinsine göre seçilir. Bu aşamada tijin zeminde daha rahat hareket etmesi ve tijde meydana gelecek ısınmaların önlenmesi için çeşitli soğutucu akışkanlar kullanılabilir. Kullanılan delme ekipmanları çok sağlam olup 500-600 bar basınca dayanacak malzemelerden tercih edilir.

Jet grout yönteminde enjeksiyon aşaması ise; jet kolon imalatının başlanacağı seviyeye ulaşıldıktan sonra büyük bir karıştırıcı yardımı ile hazırlanan çimento bazlı enjeksiyon malzemesinin enjeksiyon pompaları yardımı ile yüksek basınçla zemine enjekte edilmesi ile başlar. Enjeksiyon aşaması devam ederken yeni hazırlanan enjeksiyon malzemesinin karıştırılmasına ve dinlendirilmesine devam edilir. Zemin içerisine basılan enjeksiyon karışım malzemesine, tijin ucunda bulunan ve kendi eksenini



Şekil.3.10 Jet grout yöntemi saha uygulama aşamaları

etrafında dönen monitördeki nozullar yardımı ile yüksek hız ve enerji kazandırılarak zeminin yırtılıp doğal yapısının bozulması sağlanır. Zemine karışan jet akışkan malzemesi zemin ile bütünleşerek jet grout kolonların oluşmasını sağlar. Bu işlem neticesinde yüksek dayanıma sahip istenilen mekanik özelliklerde ve istenilen boyutta dairesel kolonlar imal edilmiş olunur. Bu işlemlerin yapılması sırasında sahada üretilen kolonların projede belirlenen niteliklerde olması için zemini delen tij takımının dönme ve çekme hızı daha önceden belirlenmelidir. Uygulama sırasında enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine basılmasını sağlayan tij takımının dönme davranışında kısmi değişiklikler yapılarak dairesel kolonlar dışında perde şeklinde geçirimsiz yapılarda elde edilebilir.

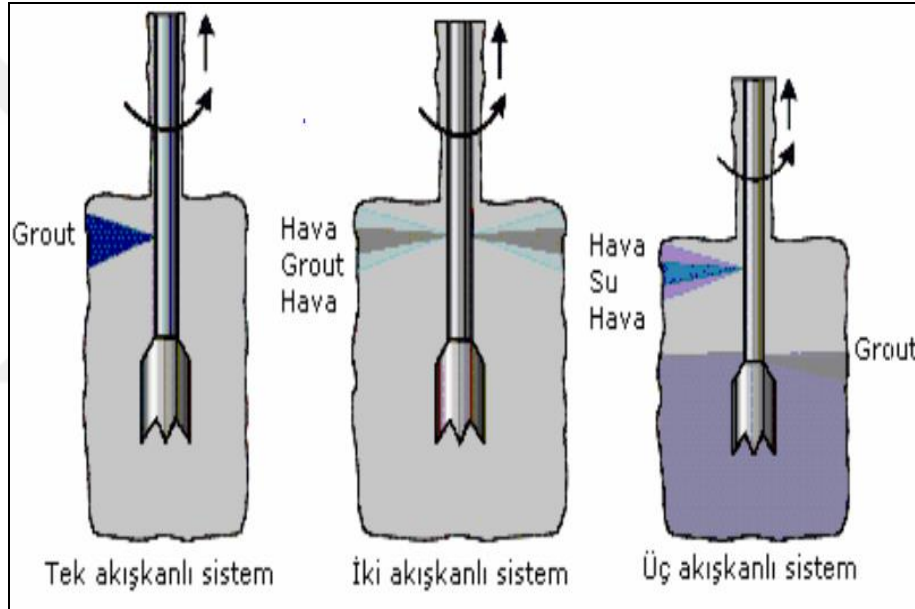
Yöntemin uygulaması esnasında imal edilen beton kolonların mekanik özellikleri ile dayanım gücünü etkileyen en önemli jet grout imal parametreleri tij takımının dönme ve çekme hızı, monitörde mevcut olan nozulların çap ve sayısı, hazırlanan karışım malzemesindeki çimento/su oranı, enjeksiyon basıncı ve jet groutun debisidir. Jet grout yönteminin uygulaması sırasında enjeksiyon karışım malzemesinin yüksek basınç yardımı ile zemin içerisine enjekte edilirken, delme işlemini yapan tijin etrafından belli miktarda zemin malzemesinin yüzeye çıkması istenir. Bunun sebebi parçalanmış zeminde aşırı basıncın oluşmamasının istenmesidir. Eğer zeminde aşırı basınç oluşur ise zeminde yapısal bozukluklar birlikte kabarmalar oluşurken imal edilen kolonlarda da süreksizliklerin ortaya çıkmasına sebep olunur. Jet grout işlemi sırasında bu veya buna benzer sorunların önüne geçilmesi için dane boyu küçük (killi-siltli) zemin tiplerinde ön yıkamalı delme işlemi yapılarak, jet akışkanının debisinin azaltılıp düşük basınçla uygulamanın yapılması önerilmektedir (Melegary ve Garassino, 1997). Jet akışkanının enjeksiyonu sırasında belli miktarda enjeksiyon malzemesinin de delme aparatı etrafından yüzeye taşması da gözlenebilir. Bu durum zemin cinsi ile alakalı olup ince taneli zeminlerde fazla iken kaba taneli zeminlerde daha azdır. İmal edilen kolonların istenilen mekanik performansın elde edilebilmesi için taşan grout miktarının % 10 geçmemesi istenir.

3.2.5. Jet Grout Kolon İmalat Teknikleri

Jet grout yöntemi ile sahada kolon imalatı, çalışmanın yapılacağı zemin tipine ve zeminin indeks özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Hazırlanan projenin amacı, üretilmek istenen kolonun boy ve çapı, çalışmanın yapılacağı sahanın fiziksel

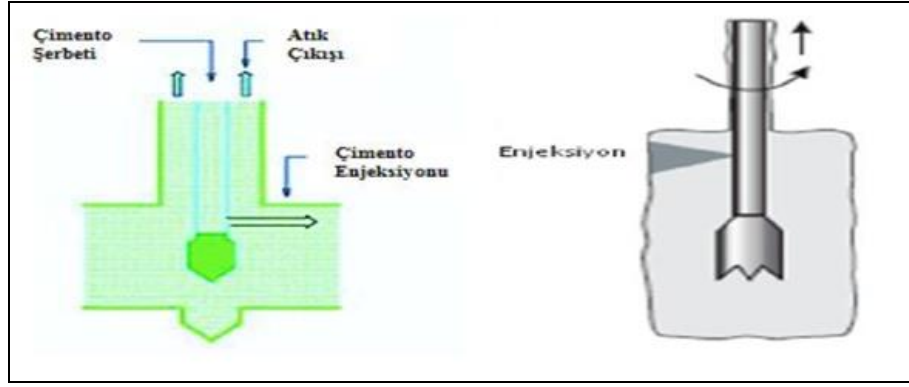
durumu, maliyeti ve kolon imalat hızı seçilecek jet grout tekniğinin belirlenmesinde ana unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde bu yöntemin saha uygulamalarında 5 farklı jet enjeksiyon tekniğine rastlanmaktadır. Bu teknikler esas olarak birbirine benzeselerde tercih edilen akışkan sayısına ve tij yapılarına göre farklılık göstermektedirler (Burke, 2004). Bu teknikler şöyle tanımlanmaktadır (Şekil 3.11).

- Jet 1 tek akışkanlı (sadece su-çimento enjeksiyonu) sistem
- Jet 2 iki akışkanlı (su-çimento ve hava enjeksiyonu) sistem
- Jet 3 üç akışkanlı (su-çimento, hava ve su enjeksiyonu) sistem
- Süper-jet enjeksiyonu
- X-jet enjeksiyonu



Şekil 3.11 Jet grout enjeksiyon teknikleri

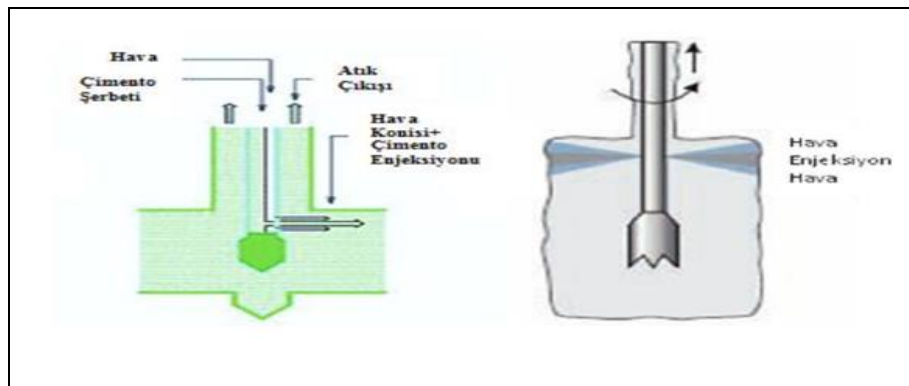
Uygulamada en çok tercih edilen ve en basit jet grout tekniği tek akışkanlı (jet 1) yöntemidir. Sahada uygulaması kolay ve hızlı olmasından dolayı tercih edilmektedir. Bu yöntemde zemin içerisine sadece çimento bazlı enjeksiyon karışımı 300-600 bar arasındaki basınç yardımı ile enjekte edilmektedir. Kullanılan çimento bazlı jet akışkanı hem zeminin parçalanması hem de zeminle karışarak jet grout kolonların oluşmasını sağlamaktadır. Jet 1 tekniği en çok kohezyonsuz iri taneli zeminlerde tercih edilmekte olup yaklaşık 1.0-1.2 m çapında kolonların oluşturulması bu teknikle mümkün olmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Tek akışkanlı (jet 1) sistemi (Keller-Groud)

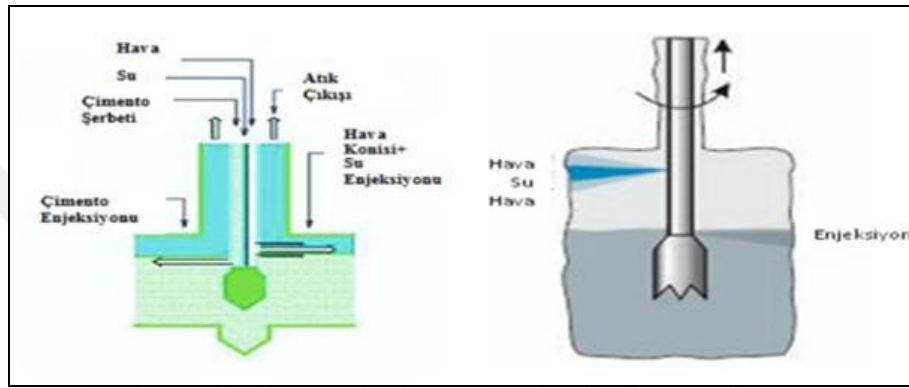
Jet akışkanı olarak çimento bazlı enjeksiyon malzemesinin yanı sıra havanın da kullanıldığı birbiri içerisine geçirilmiş iki adet tij sisteminden oluşan jet grout yöntemi, çift akışkanlı (jet 2) yöntem olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.13). İç içe geçmiş tij takımlarından içte olanından çimento esaslı enjeksiyon malzemesi pompalanırken iki tij arasında da 5-12 barlık basınçlı hava geçirilerek zeminin yanall olarak daha fazla bozuşmasını sağlanmaktadır.

Yöntemde kullanılan havanın yardımı sayesinde zemin yanall yönde daha fazla yırtıldığından jet 1 yöntemine göre daha büyük çaplı (% 30-70 oranında) kolonlar imal edilebilmektedir. Sistemin doğru çalışması açısından nozul tıkanıklarının önü geçilmesi adına sistemde tek nozullu ve nozul çapı daha büyük monitörlerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Lunardi, 1997), (Stark ve ark, 2009). Çift akışkanlı sistem tane boyu küçük (killi-siltli) zeminlerden iri taneli zeminlere kadar tüm zemin tiplerinde kullanılabilinmektedir.



Şekil 3.13 Çift akışkanlı (jet 2) sistemi (Keller-Groud)

Jet 3 (üç akışkanlı) jet grout sisteminde ise tij aparatı içinde 3 adet iç içi geçmiş boru sistemi bulunmaktadır. Bu borulardan en dışta olanında 5-12 bar basınçla hava ile orta kısımdaki borudan 300-600 bar arasında değişen basınçla su tek nozuldan, en iç kısımda bulunan borudaki nozuldan da çimento bazlı enjeksiyon karışım malzemesi tek başına belli bir basınçla zemin içerine enjekte edilmektedir (Şekil 3.14). Bu yöntemle imal edilen kolonların çap boyutları 2 metrenin üzerine çıkmaktadır. Kolonun çap boyutu çalışılan zemin tipine göre farklılıklar göstermektedir. İri taneli gevşek zeminde ince taneli kohezyonlu zeminlere göre daha büyük çapta kolonlar elde edilmektedir.



Şekil 3.14 Üç akışkanlı (jet 3) sistemi (Keller-Groud)

Sistemin aynı tip zeminde yapılan uygulamaları sırasında bu üç sisteminden biri ve aynı su/çimento oranına sahip enjeksiyon malzemesi kullanılarak oluşturulan jet grout kolonlarına yapılan basınç dayanım testleri farklı sonuçlar vermektedir. En yüksek dayanım jet1 yöntemi ile üretilen kolondan elde edilirken en düşük dayanım ise jet3 yöntemi ile üretilen kolondan elde edilmiştir. Bu dayanım farklılıklarının sebebi jet2 ve jet3 sisteminde kullanılan hava ve suyun zeminin doğal yapısını daha fazla bozduğuna bağlanmaktadır.

Uygulaması yapılan bu üç sisteme ek olarak ekipman teknolojisinin gelişmesine paralel olarak Super-jet ve X-jet yöntemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Süper jet yönteminde, çok büyük çaplara sahip kolonlar (5.0-6.0 m), özel tij ekipmanları kullanılarak enjeksiyon malzemesine yüksek hız ve enerjinin çift akışkanla kazandırılması ile üretilmektedir. Bu yöntem kullanılan tijin dönme ve çekme hız çok düşük kullanılan nozulların çapı ise büyüktür. Düşük maliyeti ve uygulamasının hızlı olması sayesinde tercih edilir duruma gelmiştir. Büyük çaplı, dayanımı yüksek, rijit kolonlar elde etmek için düşük dönme ve çekme hızının tercih edildiği bir tij

mekanizmasında 2 adet çarpışma jeti barındıran X-jet yöntemi kullanılmaktadır. X-jet yönteminde kullanılan çarpışma nozulları sayesinde yumuşak nitelikteki farklı tabakalardan oluşan yumuşak zemin tiplerinde istenilen geometride yüksek modüllü jet kolon üretimi mümkündür (Bell ve ark, 2003), (Burke, 2004).

Saha uygulamaları esnasında kullanılacak jet grout sisteminin belirlenmesinden önce literatürde kabul görmüş jet yöntemleri kendi içlerinde değerlendirilerek avantaj ve dezavantajlarına göre karar verilmelidir (Tablo 3.1). Yöntemde kullanılacak grout parametreleri belirlenerek projenin hızını artırıp maliyetini düşürerek, zemin tipine göre de en uygun kolon imalatının yapılmasını sağlayacaktır.

Tablo 3.1 Saha uygulamalarında jet yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Burke,2004)

Sistem	Avantajları	Dezavantajları
Jet-1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uygulaması en kolay jet tekniği ▪ İri taneli zeminler için daha uygun ▪ Basit teçhizat 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En küçük boyutta kolon imalatı yapılır ▪ Zemin enjeksiyon basıncından kaynaklı kabarma oluşabilir ▪ İnce taneli zeminlerde kalite problemi oluşur
Jet-2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genellikle en ekonomik sistem ▪ En iyi boyutta kolon imalatı ▪ Ekipmanları en elverişli jet yöntemi ▪ Fazla uygulama mevcut 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temellerin takviyesinde tercih edilmemesi ▪ İnce taneli zeminlerde tij çekimi zor ▪ Zemin kalıntı malzemesi atma işlemi zor
Jet-3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontrolü en zor jet grout tekniği ▪ Kalıntı, atık kontrolü en kolay ▪ En kontrol edilebilir zemin kabarması ▪ Problemlili zeminler için en uygun kolon ▪ Temel güçlendirilmesi için en uygun 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Özel deneyim ister ▪ Karmaşık teknik ve araç gereç
Süper-Jet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enjeksiyon malzemesini zemine en iyi karıştıran teknik ▪ Birim hacimde en düşük maliyetli yöntem 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En zor lojistik ▪ Atık problemi ▪ İri taneli zeminlerde tij çekim zorluğu ▪ Temel duvar çalışmalarda test gerekliliği
X-Jet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ İnce daneli yumuşak zeminlerde en uygun teknik ▪ İstenilen boyutta kolon imalatı en kolay sistem 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Az uygulama ▪ Sık ölçümleme isten takım

3.2.6 Jet Grout Kolonların İmalat Aşamasında Performansını Etkileyen Faktörler

Jet grout yönteminin uygulanması esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur uygulamanın gerçekleştirileceği zemin tipine ve proje özelliklerine göre kolon imalat parametrelerin belirlenmesidir. Uygulamanın yapılacağı sahada parametrelerin doğru belirlenmesi için öncelikle farklı jet parametreleri kullanılarak deneme kolonları imal edilmelidir. Deneme kolonlarında kullanılan parametreler neticesinde üretilen kolonlardan yola çıkılarak projede kullanılacak asıl jet grout işletim parametreleri belirlendikten sonra kolon üretimine başlanmalıdır. Jet grout kolonların üretiminde kolonların performans ve fiziksel özelliklerini belirleyen ana unsurlar şöyle sıralanmaktadır.

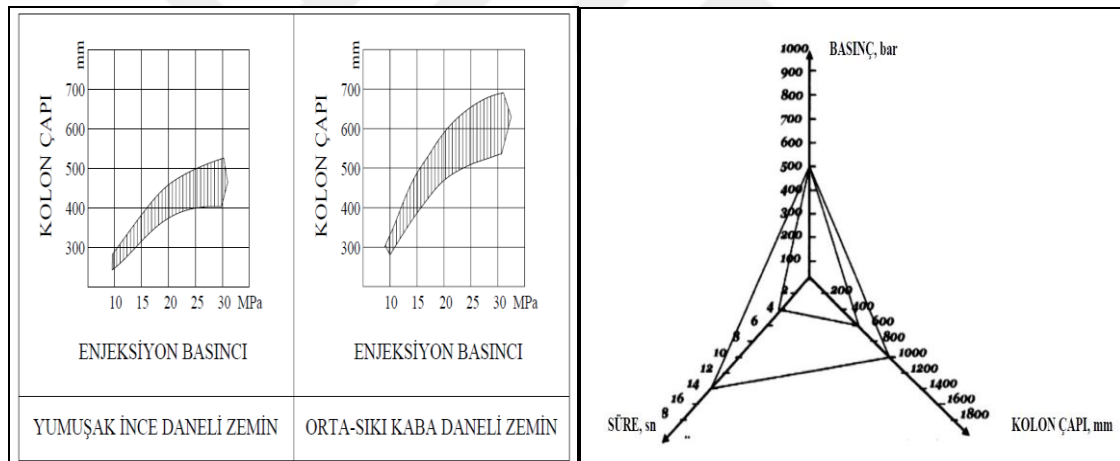
- Enjeksiyon Sistemi (Jet 1, Jet 2, Jet 3)
- Enjeksiyon Basıncı (Bar)
- Nozzle Sayısı ve Çapı
- Tij Dönme Hızı (rpm)
- Tij Çekme Hızı (cm / dak)
- Su / Çimento Oranı
- Pompa Kapasitesi (lt / dak)

Enjeksiyon basıncı üretimi yapılan jet grout kolonların performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Uygulamanın yapılacağı projede seçilen basınç değeri aralıkları;

- Düşük : 200 ~ 250 bar
- Orta : 300 ~ 400 bar
- Yüksek : 400 ~ 700 bar arası basınç

olarak sınıflandırılmaktadır. Jet grout malzemesinin zemin içine enjekte edilmesini sağlayan basınç değeri ile imal edilen kolonların çapları arasında doğrudan bir ilişki olduğu daha önceki çalışmalarda ortaya konmuştur. Kolon üretimi sırasında yüksek basıncın tercih edilmesi daha büyük çaplı kolonların oluşmasını sağlayacaktır. Fakat

yüksek basınçtan dolayı zeminde kabarmaların oluşarak zeminin doğal yapısının gereğinden fazla bozulmasından dolayı düşük dayanımlı kolonların oluşacağı unutulmamalıdır. Kolon üretiminde kullanılan basıncın düşük olması da istenilen boyutta kolonların üretilmemesine yol açacaktır. Çalışmalarda zemin cinsine göre en uygun basınç değerinin belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 3.15). Seçilen basınç değerinin yanında kolon çapının, kolon üretimi için geçen zamanında bir fonksiyonun olduğu her zaman göz önünde bulundurularak imalat yapılmasıdır (Şekil 3.15). Jet grout kolonların üretimi sırasında enjeksiyon basıncı seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise pompadan çıkan enjeksiyon karışım malzemesinin basıncının borular içerisindeki sürtünmeden ve çıkış uçlarından kaynaklanacak basınç kaybıdır. Bu basınç kayıpları % 5-10 arasında değişmekte olup enjeksiyon basıncı seçilirken sürtünmeden kaynaklanan bu kayıplarında hesaba katılarak belirlenmesi gerekmektedir (Xanthakos, vd, 1994).



Şekil 3.15 Jet kolon üretiminde kolon üretim zamanının ve enjeksiyon basıncının kolon çapına etkisi

Tij takımının dönme ve çekme hızı; jet grout yönteminde zemin içerisinde oluşturulmak istenen kolonun sürekliliği ve rijit olması açısından tij sisteminin dönme hızının yavaş çekme hızının ise enjeksiyon malzemesinin zemin ile en ideal sürede karışmasını sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Uygulama sırasında oluşturulmak istenilen kolonların boyutları, tij sisteminin hareketi esnasında belli bir yüksekliğe düşen devir sayısı ile alakalıdır. İmalatı yapılan jet kolonlarda istenilen dayanım değerinin elde edilebilmesi için bir etken olan karışım malzemesindeki su/çimento oranını tij sisteminin yukarı çekilme hızı büyük oranda etkilemektedir. Tij takımının enjeksiyon sırasında yukarı çekilirken sahip olduğu çekme hızı ve devir sayısı

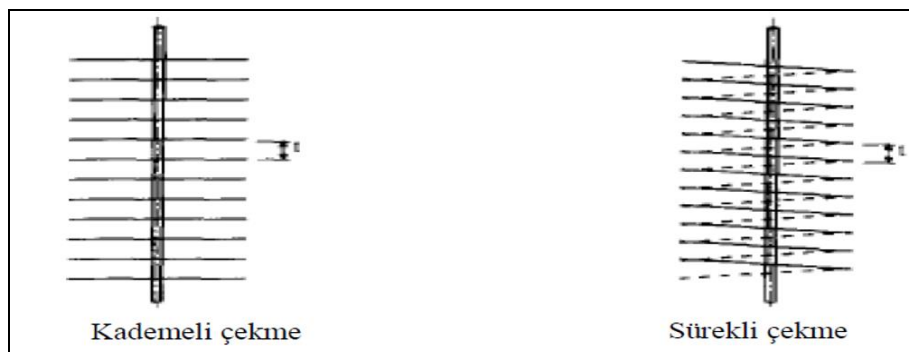
uygulamanın yapıldığı zeminin granülometrik eğrisine ve enjeksiyon miktarına göre farklılık göstermektedir. Bu tij takımının dönme devir sayısı zemin cinsine göre:

- İri daneli gevşek kum ve çakıl zemin tiplerinde 8-12 dev/dak
- İri daneli orta sıkılıktaki çakıl zemin tiplerinde 12-20 dev/dak
- İnce dane boylu siltli killi zeminlerde 10-50 dev/dak

alınmaktadır. Tij sisteminin yukarı çekilme hızı ise genel olarak 2-8 dk/cm arasında değişen kademeler şeklinde ayarlanmaktadır. Literatürde bahsi geçen en uygun tij çekme hızı ise 4 cm olarak belirtilmektedir. Zemin cinsine göre tij sisteminin enjeksiyon işlemi sırasında yukarı çekilme hızı kolon kalitesini etkilemekte olup bu hız ise zeminin karakteristik özelliğine bağlı olarak;

- İri dane boylu gevşek kum ve çakıl zemin tiplerinde 5 sn/4 cm
- İri dane boylu orta sıkılıkta ki çakıl zemin tiplerinde 12-17 sn/4 cm
- İnce dane boylu siltli killi zeminlerde 18-20 sn/4 cm

olarak değişmektedir. Tij sisteminin zemin içerisinde yukarı çekme işlemi kullanılan tij ekipmanına bağlı olarak kademeli olarak da gerçekleştirilebilir (Şekil 3.16). Bu kademeli çekme işlemi özellikle killi zeminlerde 4 cm geçmeyecek şekilde yapılmalıdır. Eğer bu çekme miktarı bu değerün üstüne çıkarsa enjeksiyon malzemesi zemin ile iyi karışmayıp tabakalanmalar meydana gelebilmektedir (Kuleli, 2011), (Erkan, 2013).



Şekil 3.16 Kademeli ve sürekli tij çekme teknikleri

Jet grout kolon imalatı sırasında tij sisteminin zemin içerisinde çekilirken dönme ve çekme hızı uygulamada kullanılan jet grout yöntemi ile de doğrudan alakalıdır. Tek akışkanlı yöntemde iki ve üç akışkanlı yöntemde göre üretilen kolon çapı daha küçük olduğundan daha az zemin iyileştirildiğinden uygulama daha kısa sürmektedir. Diğer

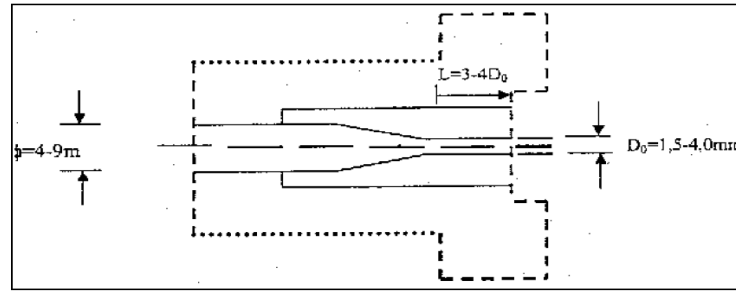
zemin iyileştirme metodlarına göre jet grout enjeksiyon yönteminin bir avantajı da uygulama işlemine başlanılmadan kullanılacak enjeksiyon miktarının önceden hesaplanabilir olmasıdır. Kullanılan enjeksiyon miktarı ve grout malzemesinin nozullardan çıkış hızından yararlanılarak da tij sisteminin yukarı çekiş hızı hesaplanabilmektedir.

Su/çimeto oranı; diğer enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirme yöntemlerinde olduğu gibi jet grout enjeksiyon yönteminde de çimento bazlı enjeksiyon malzemesinin hazırlanması sırasında kullanılacak su/çimento oranının belli bir değerin üstünde olması gerekmektedir. Daha önce yapılan jet grout çalışmalarında yaygın olarak, su/çimento oranının 1 olduğu enjeksiyon şerbetinin grout malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalara rastlanmaktadır. Bu oranın 0.7 değerinin altına inmemesi tavsiye edilmektedir. İmalatı yapılacak jet grout kolonlarda istenilen taşıma gücü performansının elde edilebilmesi için doğal zemin türlerinde $350-700 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen çimento miktarları kullanılmaktadır. Hazırlanan enjeksiyon karışımının özgül yoğunluğu, hazırlanırken kullanılan su ve çimento miktarını ile direk ilişkili olduğundan yüksek akışkanlığa sahip grout malzemesi düşük akışkanlığa sahip grout malzemesinden daha kolay dağıldığından jet malzemesinin enerjisini etkilenmekte olup üretilecek kolonların fiziksel özelliklerine doğrudan etki edecektir.

Yöntemin saha uygulaması esnasında enjekte edilen grout malzemesi sayesinde enjeksiyonun yapıldığı zeminin hacmi dışında etrafındaki işlem yapılmamış zemini de iyileştirdiğinden artı bir avantaj sağlamaktadır. Jet grout metodunun sağladığı bu avantaj sayesinde iyileştirmesi yapılmamış zeminlerde %20-25 arasında değişen dayanım kazancı sağlanmaktadır (Yağızatlı, 2012).

Enjeksiyon sistemi; uygulamada benzer su/çimento oranı sahip enjeksiyon malzemesi kullanılarak tek akışkanlı jet grout yönetimi ile imal edilen kolonların dayanımları iki akışkanlı jet grout yöntemi ile imal edilen kolonlardan dayanımlarına göre %10-15 oranında daha yüksek çıkmaktadır. Bu dayanım farkına jet 2 sisteminde kullanılan havadan kaynaklanmaktadır. Su/çimento oranı aynı olan enjeksiyon malzemesi kullanılarak çift akışkanlı jet grout sistemi ile imal edilen kolonların performansları, üç akışkanlı kullanılan jet grout sistemi ile imal edilen kolonların performanslarından daha yüksektir bunun sebebi ise 3 akışkanlı sistemde hava yanında kullanılan suyun enjeksiyon karışımının dozajını etkilemesidir.

Nozul çapı, biçimi ve sayısı; jet grout enjeksiyon yöntemin uygulandığı projede imal edilen kolonlardan yüksek dayanımın ve istenilen fiziksel özelliklerin (boy, çap) elde edilebilmesi için uygulamanın yapılacağı zeminin cinsi ve jet grout enjeksiyon tekniğine uygun seçilmesi gerekmektedir. Jet grout ekipmanlarından tij aparatındaki monitörde bulunan nozulların çapı kullanılacak jet grout tipine göre 1.5 ile 4 mm arasında, sayısı ise 1 ile 4 adet arasında değişebilmektedir. Nozul sayısı ve çapı sistemdeki grout malzemesinin pompalanmasını sağlayan enjeksiyon basıncının neden olduğu jet grout hızını doğrudan etkilediği için enjeksiyon malzemesinin dağılmasını ve zemin içine penetrasyonunu etkilemektedir (Shibaziki, 2003). Uygulamada kullanılan nozulların sayısı azaldıkça enerji kaybıda azalmaktadır. Ayrıca ince taneli zeminlerde kullanılan jet grout sistemine göre birden fazla nozulun kullanılması zemin cinsinden dolayı tıkanıklığa sebep olup fazla basınçtan dolayı bunun fark edilemeyeceğinden bu tür çalışmalarda tek nozullu tij ekipmanlarının kullanılması önerilmektedir



Şekil.3.17 Jet enjeksiyon nozulunun kesit görünümü

3.2.7. Jet Grout Kolonlarının Kontrol Edilmesi

Zemin enjeksiyon tekniklerinden jet grout metodu kullanılarak yapılan zemin güçlendirmelerinde yapılan uygulamanın uygulanan projeye uygunluğu ve imal edilen kolonlarda beklenen fiziksel özelliklerin mevcut olup olmadığının bir takım yöntemlerle test edilmesi gerekmektedir. Kolon imalatına başlanmadan sahada tüm etüt işlemlerinin yapıp, yapı cinsine göre zeminin modellenerek taşınması gereken tüm yük potansiyelinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamaların ardından deneme kolonları üretilerek performans değerlendirmeleri yapılmalıdır.

İmalatı yapılan örnek kolonlardan karot numuneler alınarak dayanımlarına bakılmalı, çapları ölçülmeli, süreklilikleri kontrol edilmelidir. Yapılan bu işlemler sonucunda asıl jet grout kolon üretimine başlanmadan, üretilecek kolonların proje

uygunluğu test edilmiş olunur. Byolece tercih edilen jet grout yöntemine göre kullanılan enjeksiyon parametrelerinde gerekli düzenlemelere gidilmelidir (Bakım, 2007), (Erkan 2013).

Sahada jet grout yöntemi ile imal edilen yüksek modüllü beton kolonların performanslarının değerlendirilmesi için kolonlardan boy çap oranı en az 1.5 olan karot numuneler alınmalıdır. Numuneler alınırken betonun 28 günlük nihai dayanıma ulaşacağı prizlenme süresine dikkat edilmelidir. Prizlenme süresi dolan kolonlardan alınan karotlara serbest basınç dayanım testi yapılarak kolonlardan beklenen mukavemetin elde edilip edilmediği kontrol edilmeli, elastisite mdlleri hesaplanmalıdır.

Jet grout kolonların performansına bakılmak için imal edilen deneme kolonlarından bazılarında da kazık yükleme-çekme deneyi yapılmalıdır. Yükleme deneyi sırasında kolonlara projede daha önce her kolondan taşıması beklenen yükün en az 1.5 katı kadar yük yükleme yapılmalıdır. Kolon gene kadar ya da maksimum oturmanın gerçekleştiğinin düşünüldüğü değere kadar bu yükleme işlemi yapılmalıdır. Yapılan bu yükleme işlemi sonucunda kolona ait yük-zaman, oturma-zaman ve yük-oturma değerleri için grafikler çizilmelidir. Kolonda oluşan göçme yükü, kolona uygulanan toplam yükün artmamasına rağmen oturmaların devam ettiği ya da kolon çapının %10 kadar oturmayı meydana getiren yük değeri olarak kabul edilir. Deneme kolonlarına uygulanan yükleme deneyi sırasında, yüklenen yükün kaldırılmasından sonra kolonda meydana gelen kalıcı deplasman değerinin uygulanan toplam yükün %50 sini, kolon başlığında meydana gelen oturmanın ise 10 mm geçmemesi beklenir (Düzceer, 2004), (Yağızatlı, 2012).

Jet grout yöntemi ile imal edilen yüksek modüllü beton kolonlara ait çap ve boy sürekliliği saha şartlarına göre kazık süreklilik deneyi ile de yapılabilir. Bu deneyde imalatı yapılan kolonların yzeeye yakın u kısmına eki benzeri bir ekipmanla vurularak kolonların gövdesinde titreşimlerin oluşması sağlanır (şekil 3.18). Yapay olarak oluşturulan bu titreşimlerin hareket ve yansımaları bir akselometre yardımı ile llp, sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılır. Sayısallaştırılması sağlanan bu yapay titreşimler zaman ve hızın birer fonksiyonu olduğundan faydalanarak grafiklenir. Grafiklenmesi yapılan bu sinyallerin analiz edilmesi sonucunda imal edilen kolonların boy ve şekilleri hakkında bilgi edinilebilmektedir.



Şekil.3.18 Kazık Süreklilik Deneyi

Son olarak da çalışmanın yapıldığı alanda imalatı gerçekleştirilen bazı jet kolonlar kazılıp ortaya çıkarılarak kolondan projede istenilen fiziksel özelliklerin mevcut olup olmadığına (boy, çap vb.) bakılarak kolonlardan beklenen nitelikler kontrol edilmelidir (Şekil.3.19).



Şekil.3.19 Jet Grout Kolonlorunda Çap Kontrolü

3.3. Beton Üzerinde Klasik Sülfat Saldırısı ve Etkileri

Zemin mühendisliğinde yapıların temelleri, arazideki yeraltı suları ve zemini oluşturan toprak malzemenin içindeki birçok bileşimin etkisi altında kalmaktadır. Yapı temellerine etki eden bu su ve diğer malzemeler temeli oluşturan beton malzemenin yapısını bozarak büyük zararlara neden olmaktadır.

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşp, istenilen kalıbın şeklini alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesi olup en çok tercih edilen yapı malzemelerinden birisidir. Temel yapılarında en çok faydalanılan malzemelerin başında gelmekle birlikte yapıda en çok dış ve iç etkiye maruz kalan yapı malzemesidir. Betona etki eden birçok etmen bulunmakla birlikte bu etmenlerden bazıları betonun hem iç yapısının hem de dış yapısının zarar görmesine neden olmaktadır (Baradan, ve ark, 2002), (Akman, 1990).

Beton malzemenin zarar görmesine neden olan en tehlikeli etkilerden biriside sülfat etkisidir (Şekil 3.20). Sülfat, betonun sertleşmesi sırasında çimentonun bazı bileşenleri ile etkileşime girerek betonun zamanla bozulmasına neden olduğu gibi dışardan da betonun yüzeylerine etki ederek betonun hızlı bozulmasına ve betonda çatlaklar oluşmasına neden olmaktadır.

Sülfat içeren iyonlar sertleşmiş betondaki hidrate bileşenlerle kimyasal etkileşime girmesi sonucunda yeni ürünler (etrenjit, tomasit, vb.) oluşturmaktadır.



Şekil 3.20 Sülfat etkisine maruz kalmış yapı elemanları

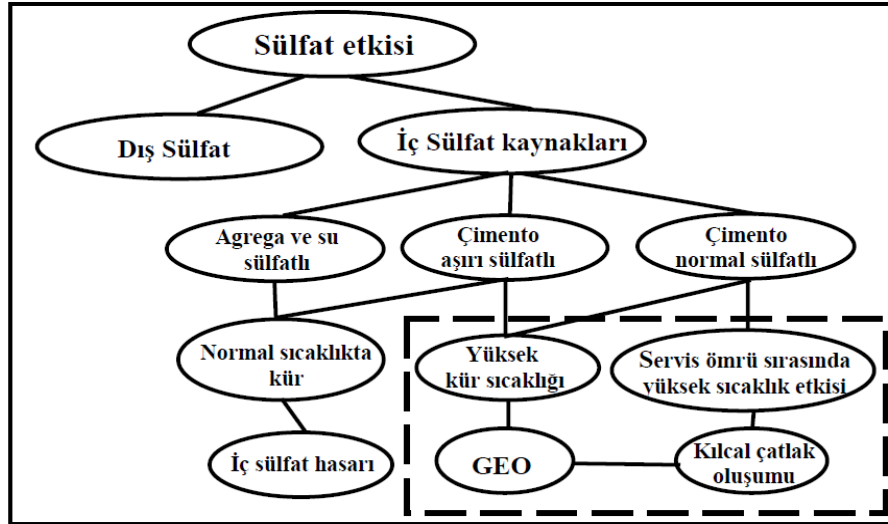
Etkileşim sonucunda oluşan bu ürünler betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-çimento bütünlüğünü etkilenmesiyle beton dayanımının azalmasına sebep olur. Sülfat saldırısına uğramış betonun klasik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve

dökülmeler ile birlikte betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak beton yüzeyinin tabaka, tabaka büyük parçalar halinde parçalanması şeklindedir. Sülfat saldırısının sonucunda ise betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülmektedir

Betonun ana bileşeni olan çimentonun üretimi sırasında trikalsiyum alümina (C_3A) bileşeninin ani prizini önlemek için çimentoya az miktarda alçı taşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genleşmenin ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemek için genelde çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının belli oranında sınırlandırmıştır. Ancak zemini oluşturan malzeme içerisinde mevcut olan minerallerden olan tuzlar ise katı durumda betona doğrudan zarar vermezken su ile birlikte bulunmaları sonucunda ise çözünerek çimento harcı ile reaksiyona girerler. Bazı killer ise içeriklerinde alkali, magnezyum ve kalsiyum sülfatlar gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yeraltı suyu ile birleşip su ile birlikte çözünmesi sonucunda olumsuz etkinin oluşmasına neden olurlar.

Zeminde oluşan tuz birikintileri, arasında sodyum sülfata (Na_2SO_4) rastlanabildiği gibi magnezyum sülfatada ($MgSO_4$) rastlanılmaktadır. Bu tür birikimlerin, nispeten kuru iklimlerde fazla buharlaşma sonucu, yeraltında bulunan tuz tabakalarındaki çözünabilir sülfatların yukarıya emilip, tırmanması sonucu oluştuğu sanılmaktadır (Erdoğan, 2003), (Ilıca, 2008). Doğal alçı taşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) tabakalarındaki sülfat içeriği oldukça yüksektir. $CaSO_4$ 'ların çözünürlükleri düşük olduğundan etki daha kısıtlı ve yerel kalır fakat uzun süre açıkta kalmaları halinde bu tabakalar, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat gibi daha kolay eriyebilen tuzlara dönüşebilirler. Suda çözüldükten sonra beton için çok zararlı çözeltiler haline gelmektedirler.

Sülfat etkisine maruz kalan betonlarda etki, iç kaynaklı veya dış kaynaklı olmak üzere iki farklı etkileşim sistemi şeklinde meydana gelmektedir (Şekil 3.21). İç kaynaklı sülfat etkisi, agregalarda bulunan veya erken yaşlardaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle çimento hamurunda oluşan alçının reaksiyona girmesiyle oluşurken, dış kaynaklı sülfat etkisi ise yeraltı suları, deniz suyu, atık sular gibi kaynaklarda bulunan sülfatların betona nüfuz etmesi sonucunda oluşur. İç kaynaklı sülfat etkisi betonun oluşturan kütlede her bölgesinde oluşabilirken dış kaynaklı etki daha çok yüzeyde ve yüzeye yakın kısımlarda oluşur.



Şekil 3.21 Klasik sülfat etkisinin şematik olarak gruplandırılması

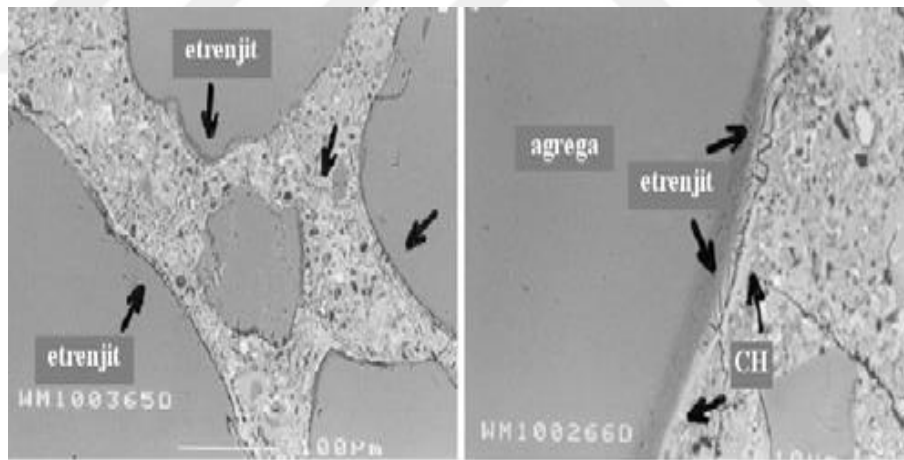
3.3.1. İç Kaynaklı Klasik Sülfat Etkisi

Genel olarak beton malzemede iç sülfat etkisinin meydana gelebilmesi, kullanılan çimentonun kimyasal bileşim özelliklerine bağlı olarak gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) şeklinde kendini göstermektedir. Gecikmiş etrenjit oluşumu; çimento kullanılarak oluşturulan beton mekanizmanın prizlenmesi sırasında veya sertleşmesini tamamladıktan sonra oluşmakta olup tamamen iç kaynaklı sülfatların sebep olduğu, etrenjit oluşumdur. GEO genel olarak belli bir derecenin ($60 - 70 < ^\circ\text{C}$) üzerinde sıcaklığa maruz kalmış beton sistemlerinde görülmektedir.

Beton sistemleri oluşturulurken kullanılan çimentonun hidrasyonu sırasında çimento karışımının içinde belli bir miktarın üzerinde SO_3 ve C_3A bulunması sonucunda betonun sertleşmesinden sonra uygun ortam şartlarının etkisi ile oluşan kimyasal reaksiyonlar çimento harcında ve agrega etrafında etrenjit meydana getirmektedir. Beton oluşum mekanizmasına çimento ile birlikte katılan sülfatlar, alitlerle (C_3A ve CA) ve az kısmı da ferritlerle (C_4AF) etkileşim oluşturarak tüketilirler. Fazla orandaki SO_3 sertleşmiş betonun hidrasyon ürünü kristalleri arasında kalarak sonradan gelen suyunda etkisiyle yavaşça çözünerek yeni etrenjit grupları oluşturmaktadır (İllica 2008), (Tekin, 2010).

Diğer bir GEO sebebi ise çimento üretimi sırasında buhar kürü veya yüksek sıcaklıkta bakım uygulanan fazla sülfat içeren çimentolar ile yapılan betonlarda iç kaynaklı sülfatın nüfuzu sebebiyle etrenjit oluşmasıdır (Şekil 3.22). Buna benzer durumların oluşum sebebi betonun üretimi sırasında yüksek ortam sıcaklığından veya betonun hidrasyonu ile açığa çıkan ısıdan da kaynaklanabilir. Üretimi sırasında yüksek sıcaklıkta küre maruz betonlarda, kürden sonra rutubetli ve kuru olmayan ortamlarda buldukları zaman betonda iç kaynaklı sülfat atağı ile etrenjit oluşmaktadır (Ilıca 2008), (Tekin, 2010).

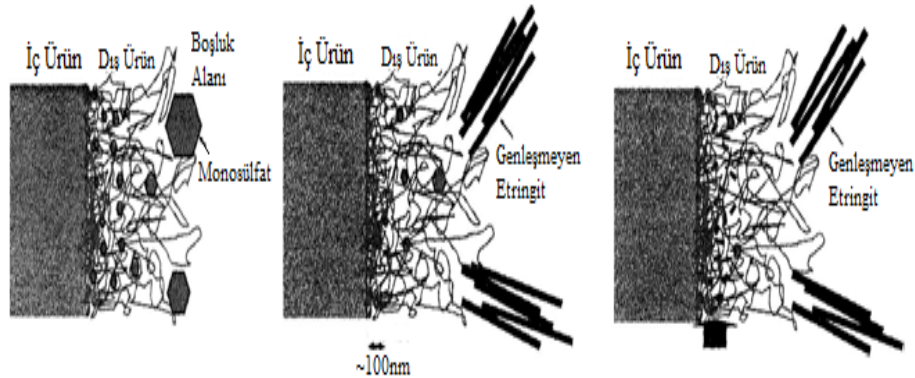
Isı kaynaklı bozuşmanın sebep olduğu GEO 1980’li yıllarda bazı yapı elemanlarında (örneğin kirişlerde) rastlanan çatlakların incelenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Buhar kürü gibi fazla sıcaklığa etkisine altında kalan betonlarda, ilk anlarda oluşması gereken etrinjit kristalleri oluşmayıp, etrinjit oluşumuna neden olan monosülfatlar C-S-H jelinin kristalleri arasına nüfuz etmektedir. Belli bir sıcaklığın üzerinde üretilen beton normal sıcaklıkta soğumaya bırakıldığında daha sonra dışarıdan gelen su ve rutubetin etkisiyle sertleşmiş betonda etrinjit kristalleri oluşturmaktadır.



Şekil 3.22 Buhar kürü geçirdikten sonra bir yıl suda bekleyen örneklerde agrega çimento hamuru ara yüzeyinde etrenjit birikimi

İç kaynaklı sülfat etkisinde GEO esnasında tepkime mekanizması kalsiyum silika (C-S-H) jelinden, monosülfatlardan ve boşluk suyumum içindeki iyonlardan kaynaklanmaktadır. C-S-H tepkime mekanizmasına Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- , H_2O monosülfat tepkime mekanizmasına Ca^{2+} , SO_4^{2-} , $Al(OH)_4^-$, OH^- , H_2O ; boşluk suyu ise tepkime mekanizmasına H_2O ve SO_4^{2-} katkısı sağlamaktadır. Bu ürünlerle birlikte gelişen

tepkime mekanizması neticesinde ürün olarak etrinjit oluşmaktadır (Şekil 3.23) (Ilıca 2008), Tekin, 2010).



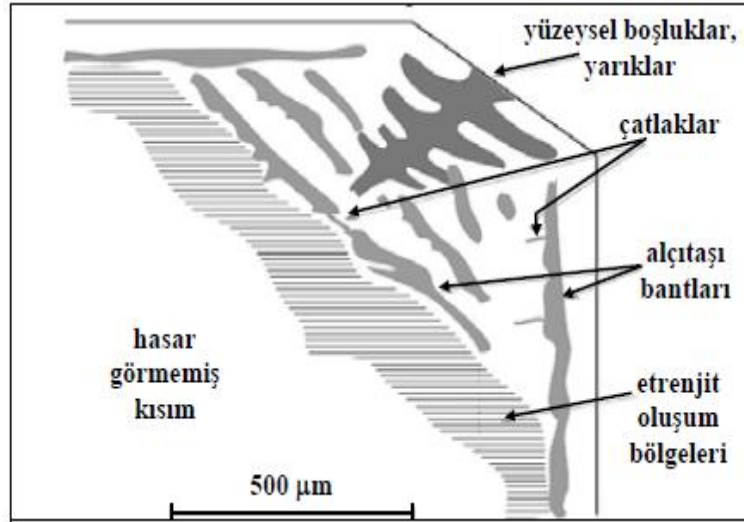
Şekil 3.23 Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nem etkisiyle etrinjit oluşumu

Sonuç olarak bir beton sisteminde klasik iç sülfat etkisinin oluşabilmesi için çimentonun üretiminin sorunlu olması (yüksek oranda C_3A ve SO_3 içermesi); bileşenlerin sonradan reaksiyonu için uygun şartların ve rutubet koşullarının olması gerektiği gibi ortamın sıcaklığında belli bir sıcaklığın üstünde olması gerektiği unutulmamalıdır (Cohen, 2000).

3.3.2. Dış Kaynaklı Klasik Sülfat Etkisi

Doğada farklı kaynalarından gelen sülfat iyonlarının sertleşmiş beton mekanizmasına nüfuz etmesinden sonra çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal etkileşime girmesi dış kaynaklı sülfat etkisinin ana sebebi olarak tanımlanmaktadır. Bu etkileşim beton sisteminde bazı yeni ürünler meydana getirmektedir. Oluşan bu ürünlere tomasit alçıtaşı ve etrenjit örnek olarak gösterilebilir. Betonda oluşan yeni ürünlerin beton sistemine etkisi ise hacimsel artış, kütleli değişimler, kohezyon kaybı ile birlikte çatlama durumunun ortaya çıkmasıdır. Beton sisteminde dış kaynaklı sülfat etkisi kimyasal bozulma ile kendini göstermekte olup fiziksel bozulumlarda bu kimyasal bozulmalar sonucunda kendini göstermektedir. Bu bozulmalarının sonucu ise beton sisteminin ömrünün kısalması olarak kendini göstermektedir. Doğada en çok dış sülfat etkisine sebep olan kaynaklar.

- Yeraltı suları



Şekil 3.24. Dış sülfat etkisinin ortaya çıkardığı heterojen içyapı hasarı

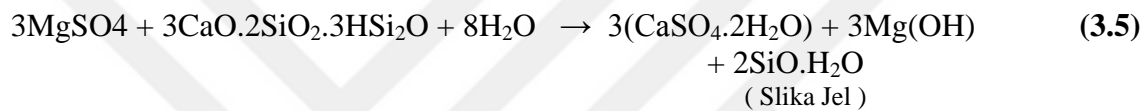
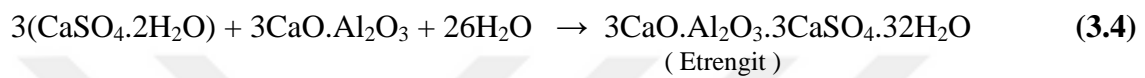
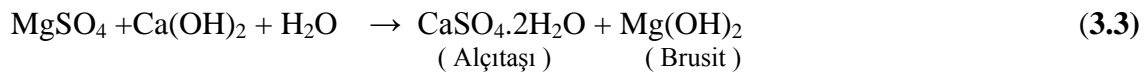
3.3.3. Sülfat Saldırısı Sonucu Oluşan Zararlı Reaksiyonlar ve Ürünleri

Tez çalışmasının bu kısmında ise yukarıdaki bölümlerde de bahsi geçen zemin içerisindeki veya beton oluşum mekanizması sırasında çimento hamurunun boşluk suyunda bulunan sülfat iyonlarının (H_2SO_4 , $MgSO_4$, $(NH_4)SO_4$, $NaSO_4$, $CaSO_4$ vb.) neden olduğu zararlı reaksiyonlar açıklanmıştır. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler (alçıtaşı, brusit, etrenjit, tomosit, silika-jel, vb.) ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyona girip hidrasyon ısısı veya betonun dayanımı hızlandırmak için betona uygulanan buhar kürü sıcaklığının da etkisi ile betonun hidrasyonu sırasında ya da beton serleştikten betonun dış çeperlerinde oluşan bu reaksiyonlar ve ürünleri ortamın pH'nın ve betonun geçirimsizliğinin bir fonksiyonudur. Betonun bağlayıcı özelliğini sağlayan C-S-H jelinden kalsiyum eksilmesine neden olan bu reaksiyonlar sonucunda betonda adezyon kuvveti azalır, betonda bozulmalar hızlanır ve dayanım kaybına sebep olur.

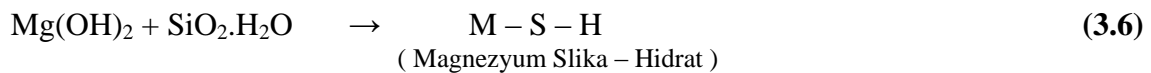
3.3.3.1. Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Etki Mekanizması

Yeni oluşturulan beton sistemlerinde çimento hamurunun hidrasyonu sırasında oluşan portlandit ($Ca(OH)_2$) ilk önce magnezyum sülfat ile etkileşime girmektedir (Formül 3.3). Oluşan bu etkileşimin sonucunda betonda brusit ($Mg(OH)_2$) ile birlikte alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) oluşmakta olup ortamın pH değeri düşer. Daha sonra oluşan bu alçıtaşı hidrate uğramamış kalsiyum alimünat ile tepkimeye girerek (Formül 3.4) ile

gösterilen etrenjitin oluşmasını sağlar. Ama oluşan bu etrenjit taze beton yapısına zarar vermez fakat hacimsel artışa sebep olur. Magnezyum sülfat sertleşen betonda alçıtaşı oluşturmaya devam eder sonucunda ise şişme oluşarak ilk zararlı etkinin oluşmasına sebep olur. Buna rağmen etrenjit oluşumu durur. Bunun nedeni ise ilk reaksiyonda brusit meydana gelmesi ve ortamın pH'nın düşmesi etrenjit oluşumunu durdurup C – S – H (kalsiyum silika-hidrat) stabilitesini bozmasıdır. Kalsiyum silika-hidrata çimentonun ana bağlayıcı etmenidir. Magnezyum sülfat C – S – H ile tepkimeye girerek (Formül 3.3) deki tepkime oluşturur.

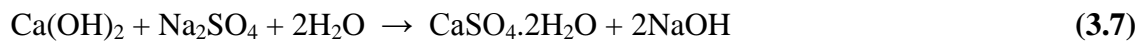


Yukardaki tepkime sonucunda (formül 3.5) oluşan $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ silika jelidir. Oluşan bu jelin dayanıklılık ve bağlayıcılığı kalsiyum silika-hidrata göre daha azdır. Bu reaksiyonlar gerçekleşirken çimento hamurunda brusit ve alçıtaşının oranı fazlalaşırken C – S – H'nin kireci azalarak betonun dayanımının azalmasına sebep olur. Daha sonra ki reaksiyonlarda artan brusit, silika jeli ile (formül 3.6) reaksiyona girmesi sonucunda bağlama ve dayanım özelliği olmayan Magnezyum silika-hidranın (M – S – H) oluşmasını sağlar. Brusitin miktarı magnezyum slika-hidra jele dönüştükçe azalır. Tüm bu tepkime mekanizmaları sonucunda betonda yumuşama ve bozulma meydana gelir (Taylor, 1999), (Collepari, 2003), (Kılınç, 2003).

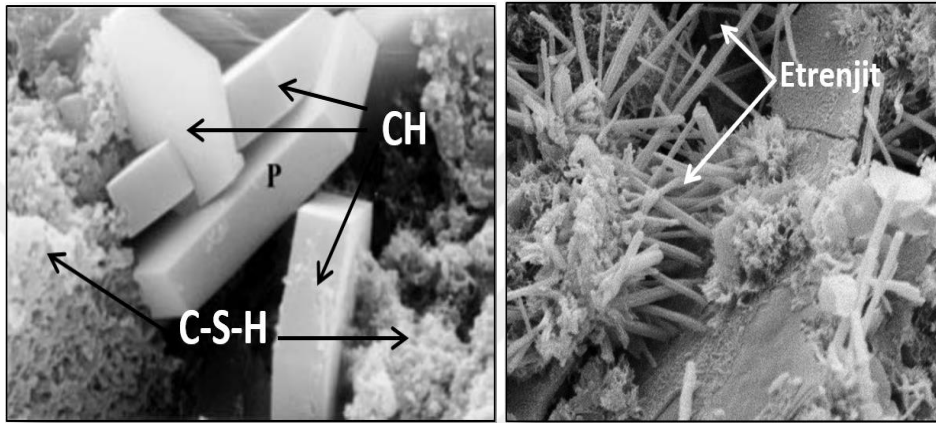
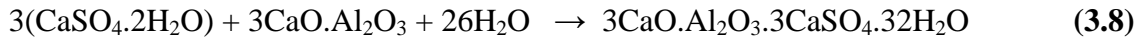


3.3.3.2.Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) Etki Mekanizması

Beton sistemleri için yeni hazırlanan çimento hamurunda sodyum sülfatın ilk olarak portlantit (Ca(OH)_2) ile tepkimeye girmesi sonucunda (Formül 3.7) deki reaksiyonu meydana gelmektedir.

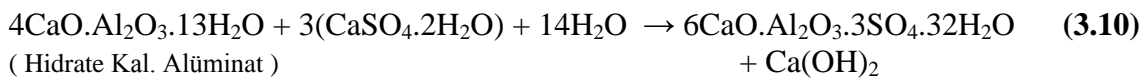
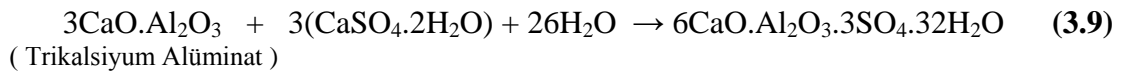


Formül 3.7 de oluşan sodyum hidroksil (NaOH) çimento hamurunun pH değerinin artmasını sağlar. Bununla birlikte tepkime sonucunda oluşan alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) hidrate olmamış kalsiyum alimünat ile tepkimeye girerek ilk etrenjit ürününün oluşmasına neden olur (Formül 3.8). Magnezyum sülfat etkisinde olduğu gibi ilk olarak oluşan bu etrenjit (Şekil 3.25) ürünü taze çimento hamuruna zarar vermeyip hacimsel artışına neden olmaktadır.



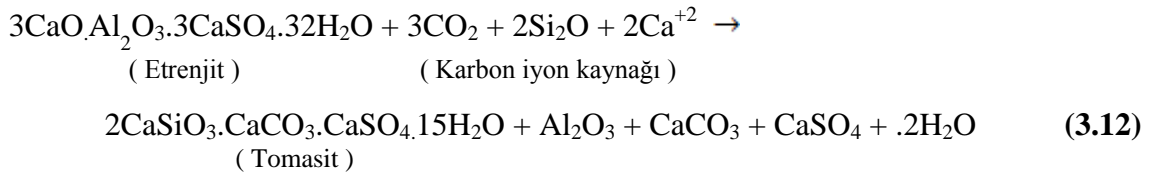
Şekil 3.25 Etrenjit kristalinin beton hamurundaki görünümü (Akçansa)

Daha sonra sodyum sülfat; çimento hamurunda sertleşme başlaması ile birlikte alçıtaşı üretimine devam etmekte olup, artan alçıtaşı miktarı sonucunda şişme meydana getirerek ilk zararlı etkisini ortaya koymaktadır. Bunundan sonra ise sertleşmiş betonda oluşan alçıtaşı hidrite kalsiyum alimünatlarla, hidrate kalsiyum sülfalimünatlarla ya da anhidrite trikalsiyum alimünatlarla tepkimeye girerek betonun sertleşme başlangıcından itibaren etrenjit üretmeye devam etmektedir (Formül 3.9 ve 3.10).



Sonuç olarak beton sertleştiğçe oluşan bu etrenjit betonda şişmelere ve dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Sodyum sülfatın, betonda etrenjit oluşturarak neden olduğu bu zararlı mekanizmaları önlemenin en etkin yöntemi ise çimentolarda kullanılan C_3A miktarını belli bir orandan fazla kullanmamaktır (Omar, 2002), (Collapardi, 2003), (Kılınç,2003).

kalsiyum, silika ve sülfat ile reaksiyona girerek tomasit oluşumuna sebep olur bu oluşumun reaksiyonu ise formül 3.12 de gösterilmiştir.

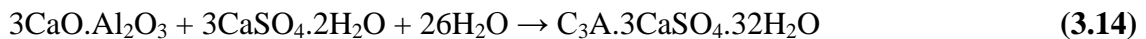
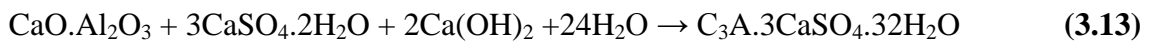


Klor iyonlarının sülfat ile birlikte beton üzerindeki etkisi karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Bu konuda birçok araştırma yapılmış ve birçok farklı görüş ortaya atılmıştır. Bazı araştırmacılar klor iyonlarının sülfat atağını azalttığını belirtse, bazı araştırmacılar ise sülfat atağını artırıcı etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Klorun konsantrasyondaki oranına göre tomasit atağını azalttığı veya hızlandırabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre %0.5'lik klor çözeltisinde tomasit saldırısının artırdığı, %2'lik klor çözeltisinde ise tomasit oluşumunun azaldığı gözlemlenmiştir (Abdalkader ve ark, 2015).

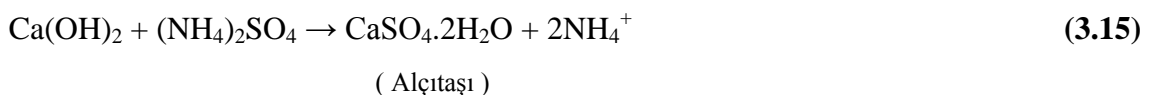
3.3.3.4 Kalsiyum Sülfat Etki Mekanizması

Beton hamurunda kalsiyum sülfat etkisi, kalsiyum alimünatlı çimento harcının kalsiyum sülfat ile etkileşime girmesi sonucunda etrenjit oluşumu şeklinde kendini gösterir. Kalsiyum sülfat tipine göre etrenjit oluşumunun morfolojisi ve miktarı farklılık göstermektedir (Formül 3.13-14). Oluşan etrenjitin betondaki etkisi ise hacim artışı şeklinde kendini gösterir fakat oluşum yeni olduğundan betona hacim artışı dışında zarar vermez (Xu ve ark 2018).



3.3.3.5 Amonyum Sülfat Etki Mekanizması

Amonyum sülfatın betonda bulunan portlantid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tepkimeye girmesi sonucunda ortamda alçıtaşı ve amonyum iyonları oluşur (Formül 3.15).



Amonyum sülfat bulunduran ortamlarda amonyum iyonları bir çeşit asit atağı kombinasyonu meydana getirir. Bu iyonlara maruz kalan betonda çatlama, yumuşama ve etrengit gibi geniş bir ürün çeşidi oluşur. Amonyum sülfat ((NH₄)₂SO₄) saldırısına maruz kalan betonda yumuşama ile çatlama arasındaki etkileşime bağlı olarak bozulma hızında artma görünmektedir (Xiong vd, 2016).

3.3.4. Beton Üzerinde Sülfat Etkisinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Betonda meydana gelen sülfat kaynaklı zararlı fiziksel ve kimyasal etkinin belirlenmesi için günümüzde birçok kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Beton malzeme üzerinde sülfattan kaynaklı etkinin belirlenebilmesi için yapılması gereken en önemli şey doğal şartlarda betona etki eden sülfat ortamının laboratuvar ortamında da oluşturulabilinmesidir. Sülfat etkisinden dolayı beton yapı elemanlarında meydana gelen bozulmaların kontrol edilmesi için belirli şekillerde numuneler hazırlanarak, zamana bağlı olarak görsel ve deneysel olarak incelenmelidir.

Laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan incelemeler fiziksel ve mekanik deneyler şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Numunenin kütlesinde meydana gelen kaybın, hacimsel değişimin, beton üzerinde meydana gelen görsel bozulmaların ve renk değişimlerinin tespit edilmesi sülfata maruz kalan betonda meydana gelen bozulma derecesinin belirlenmesi için sıkça başvurulan fiziksel deneylerdir. Sülfat etkisinin irdelenmesi sırasında betonda meydana gelen kütle kaybının ve hacimsel değişimin belirlenmesi yapılan çalışma için önemli bir parametredir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Beton üzerinde sülfat etkisi ile oluşan bozulmalar

Sülfat etkisinden dolayı betonda meydana gelen basınç dayanım kayıpları, betonun geçirimsizliğinde meydana gelen artmalar gibi, mühendislik özelliklerinde oluşan değişimlerin belirlenmesi için yapılan testler ise beton üzerinde sülfattan kaynaklı etki için yapılan mekanik testlerdir. Laboratuvar ortamında sülfat etkisine maruz bırakılarak hazırlanan numuneler üzerinde kür süresi gözetilerek yapılan basınç dayanım testleri ile zamana bağlı olarak sülfat etkisinden dolayı oluşan dayanım kayıpları ölçülmektedir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Sülfat maruz bırakılmış silindirik beton numunelere yapılan basınç dayanım testi (Yıldız, 2010)

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile sülfat etkisine maruz kalan betonda dayanım ve kütle kayıpları ile birlikte görsel bozulmalar tespit edilirken ileri teknoloji görüntüleme teknikleri ile de betonun içyapısında meydana gelen morfolojik değişiklikler tespit edilmektedir. SEM-EDS (taramalı elektron mikroskobu), optik mikroskop vb. araçlardan faydalanılarak beton üzerinde morfolojik ve içyapı değişiklik analizleri yapılmaktadır (Şekil 3.29). Taramalı elektron mikroskobu numunelerden alınan ince kesitlerdeki belirli noktaların yüksek oranda büyütülüp yüksek çözünürlükte haritalanarak mikro yapısal ve morfolojik karakterlerin belirlenmesini sağlarken EDS analizi sayesinde elementel kompozisyonu belirlenmektedir.

Hazırlanan beton numunelerin içyapısında meydana gelen kimyasal değişimler X-ışını kırınım analizi (XRD) sayesinde belirlenir. Bu analizde her bir kristalin yapının kendine özgü atomik dizilimine bağlı olarak X-ışınlarının karakteristik bir düzen içinde kırılması esasına dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım profilleri sayesinde o kristaller tanımlanır.



Şekil 3.29 SEM-EDS ve XRD analiz cihazları (TÜBİTAK)

3.4 Deneysel Çalışmalar

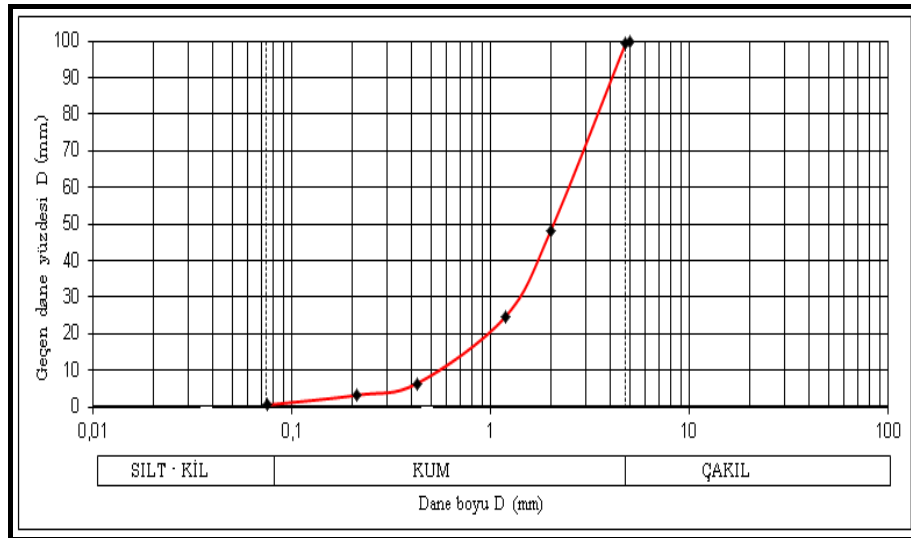
Bu tez çalışması kapsamında zemin iyileştirme tekniklerinden biri olan jet grout tekniği ile laboratuvarında farklı çimento tipleri kullanılarak kum zeminde oluşturulan kolonların dayanımı ve morfolojik yapısına yeraltı suyunun içinde bulunan sülfat iyonlarının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İnceleme yapılırken Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Laboratuvarında bulunan (Erkan, 2013) doktora tezi için oluşturulmuş laboratuvar tipi jet grout deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 3.30).



Şekil 3.30 Tez çalışmasında kullanılan jet grout düzeneği

Laboratuvar ortamı için tasarlanan bu deney düzeneği bir adet sondaj tiji, üzerinde 1.5 mm çapında bir adet nozul barındıran konik uç, 12 litre hacme sahip enjeksiyon haznesi, tjinin çekilme ve dönmesini sağlayan 1 adet motor, enjeksiyon haznesindeki karışımın pompalanmasını sağlayan hidrolik bir pompa ve kontrol panelinden meydana gelmektedir. Deney düzeneğinde tek adet nozulun tercih edilmesinin nedeni (Erkan, 2013) doktora tezi sırasında deneme kolonları oluşturulurken birden fazla nozulun kullanılması durumunda nozul tıkanıklığının fark edilemeyip enjeksiyon harcının homojen olarak zemine enjekte edilememesi ve tizde tıkanıklıklarının meydana gelmesidir.

Tez çalışması için oluşturulan jet grout kolonların yapımında ideal zemin ortamına en yakın zeminin oluşturulması için bir kum ocağından temin edilen doğal kum kullanılmıştır. Bu doğal kuma elek analizi yapılmış olup analiz sonucunda elde edilen değerlerden granülometri eğrisi çizilerek (Şekil 3.31) kumun indeks özellikleri belirlenmiştir (Tablo 3.2).



Şekil 3.31 Deneyde kullanılan doğal kum zemine ait dane boyu dağılım eğrisi

Granülometri eğrisinden kullanılan kumun kötü derecelenmiş temiz bir kum olduğu tespit edilmiş olup üniformluk katsayısı ve derecelenme katsayısı hesaplanmıştır (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 Hazırlanan kum zemine ait indeks değerleri

Çakıl Oranı	% 0.8
Kum Oranı	% 98.2
Kil – Silt Oranı	% 0.5
Zemin Sınıfı	SP
C_u	1.92
C_c	1.16

Jet grout kolonlarının oluşturulması için plastik variller içerisinde hazırlanan kum zeminine ait dane birim hacim ağırlığı, rölatif sıkılık, boşluk oranı, maksimum ve minimum boşluk oranları Tablo 3.3 de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Plastik varillerde hazırlanan kum zeminin fiziksel özellikleri

e_{max}	0.950
e_{min}	0.419
e	0.731
D_r	%41
γ_s	27.1

Tez çalışması kapsamında kum zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlarında kullanmak için gerekli olan sülfat iyonları içeren yeraltı suyu Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde temel sondaj makinası ile açılan bir adet kuyudan temin edilmiştir. Kuyudan sülfat içerikli su pompa ile çekilerek büyük su bidonlarına konularak laboratuvar ortamına taşınmıştır. Laboratuvara getirilen bu su, oluşturulan jet grout kolonlarındaki sülfatlı suyun etki mekanizması belirlemek için hazırlanan enjeksiyon harcında, normal çeşme suyu ile birlikte karışım suyu ve kolonlar oluşturulduktan sonra kür suyu olarak kullanılmıştır (Tablo 3.4).

Tablo 3.4 Konya II Organize Sanayi Bölgesinden alınan yeraltı suyunun analiz sonuçları

Tez Çalışmasında Kullanılan Sülfat İçerikli Suyun Analiz Sonuçları				
Parametreler	Simge	Birim	Değer	Analiz Yöntemi
pH (25 ⁰ C)			7.7	TS 3440
Çözünmüş Karbondioksit	CO ₂	mg/l	66	TS 3440
Amonyum	NH ₄ ⁺	mg/l	0.03	TS 3440
Magnezyum	Mg ⁺²	mg/l	2775	TS 3440
Sülfat	SO ₄ ⁻²	mg/l	11484	TS 3440
Klor	Cl ⁻	mg/l	12702	TS 3440

Yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında (TS-EN-3440, 2014) sülfat iyonları içeren yeraltı suyunun içeriğinde bulunan iyonların zararlı etkinlik derecesinin çok kuvvetli olduğu saptanmıştır. (Tablo 3.5)

Tablo 3.5 Beton temas sularının zararlı etkinlik dereceleri için (TS-EN-3440, 2014) sınır değerleri

Parametreler	Birim	Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
Sülfat	mg/l	200 - 600	600 - 3000	>3000
Magnezyum	mg/l	100 - 300	300 - 1500	>1500
Amonyum	mg/l	15 - 30	30 - 60	>60
pH	-	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5	<4.5
Kireç Çözücü	mg/l	15 - 30	30 - 60	>60

Tez çalışmasının kapsamında hazırlanan jet grout kolonlarının taşıma gücüne sülfat iyonlarının etki mekanizmalarının karşılaştırılması için Portland Kompoze (traslı) çimento (32.5 Mpa) ve Portland Uçucu Küllü çimento (42.5 Mpa) olmak üzere iki farklı

çimentodan hazırlanmış, farklı dayanımdaki çimentolar enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tez kapsamında jet grout kolonların imalatına başlanmadan önce çap ve süreklilik açısından en ideal kolonların oluşturulabilmesi için deney düzeneğindeki tijin dönme ve çekme hızlarının kalibrasyonları (Erkan 2013) doktora tezi baz alınarak yapılmıştır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Jet grout deney düzeneğinin kontrol paneli

Deneyisel çalışmada sülfat etkisinin ve dayanım değerlerinin inceleneceği asıl jet grout kolonların imalatına geçilmeden önce daha sağlıklı kolonlar elde etmek için deneme kolonları imalatı yapılmıştır.

Deneme kolonları hazırlanırken kuru kum belirli yükseklikten plastik varillerin içine elenmiştir. Eleme işleminden sonra kolun imalatı için deney düzeneğinin tiji varillerin içine batırılırken, belirli bir derinlikten sonra varil içerisindeki kuru kum zemine tijin batmadığı tespit edilmiştir. Bu sorun, doğal kum zemin ıslatılarak (% 5-6 su içeriği) aynı rölatif sıkılığı ($D_r = \%41$) elde edecek şekilde belirli yükseklikten elenerek plastik varillerin içine yerleştirilerek giderilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 Doğal kum kullanılarak plastik varillerin içinde kum zemin ortamının hazırlanması

Deneme kolonları farklı enjeksiyon basıncı, tijn dönme ve çekme hızı gibi kolon imalatını etkileyen farklı jet grout imalat parametreleri denenerek değişik ebatlardaki plastik variller içinde üretilmiştir (Şekil 3.34). Deneme kolonlarının imalatından sonra en ideal plastik varil boyutu ($D=80$ cm, $H=120$ cm) ve sülfat etkisinin ve dayanım değerlerinin inceleneceği asıl jet grout kolonlarının imal edileceği jet grout imalat parametreleri belirlenmiştir (Tablo 3.6).



Şekil 3.34 Farklı ebatlardaki plastik variller kullanılarak imal edilen deneme kolonları

Jet kolonlarının üretilmesi sırasında kolonların dayanımı etkileyen diğer bir parametre ise enjeksiyon harcının hazırlanması sırasında kullanılan su ve çimentonun oranıdır. Daha önce sahada yapılan jet grout çalışmalarında en çok kullanılan su/çimento oranının 1 olduğu kaynak araştırması sırasında tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu tez çalışmasında da su/çimento oranı 1 olan enjeksiyon harçları hazırlanmıştır.

Tablo. 3.6 Deneysel çalışmalarda kullanılan kolon imalat parametreleri

Parametreler	Tez Çalışmasında Kullanılan Değer
Enjeksiyon Basıncı	20 bar
Tij Çekme Hızı	30 cm/dk
Tij Dönme Hızı	10 dv/dk
Su/Çimento	1

Kolon imalatı için portland kompoze çimento ve uçucu küllü çimentodan sülfatlı ve normal musluk suyu kullanılarak bir karıştırıcı yardımıyla 12 litre hacminde enjeksiyon malzemesi hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan bu enjeksiyon malzemesi içindeki çimentonun çökmesini önlemek için hızlıca deney düzeneğinin haznesine doldurulmuştur (Şekil 3.35).

**Şekil 3.35** Enjeksiyon karışımının hazırlanması ve deney düzeneğinin haznesine konması

Enjeksiyon harcı jet grout deney düzeneğinin haznesine konduktan sonraki deney setinin tiji variller içindeki kum zeminin taban seviyesine kadar batırıldıktan sonra 10 devir/dakika dönme, 30 cm/dakika çekme hızı ve 20 bar basınç ile kum zemin içerisine enjekte edilerek jet grout kolonların imalatları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Üretilen jet grout kolonların üretim aşaması

Bu tez çalışması kapsamında normal musluk suyu ve sülfatlı yeraltı suyu kullanılarak uçucu küllü portland çimentosundan 1, 3, 6 aylık kür süreleri için 1'er adet olmak üzere 6 adet jet kolon imal edilmiştir. Farklı çimento tiplerinde sülfatın etki mekanizmasının ve dayanımının karşılaştırılması için portland kompoze çimentodan da

1, 3 ve 6 aylık kr süreleri için 1'er adet olmak üzere 6 adet kolon imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan bu 12 adet jet grout kolonu 24 saat bekletilip prizini alması sağlanmıştır. Prizlenme sresinin ardından deney grubuna bağlı kalınarak doğadaki normal zemin şartlarına yaklaşmak için plastik variller içindeki kum zemin kolon imalatında kullanılan su cinsine göre doygun hale getirilmiştir. Doygun hale getirilen jet grout kolonlar plastik varillerin içindeki jet grout kolon düzenekleri buharlaşmanın ve su kaybının önlenmesi için ağızları kapatılarak korunaklı bir hale getirilmiştir (şekil 3.37).



şekil 3.37 Jet grout kolonların imalatından sonra kum zeminin doygun hale getirilmesi ve su kaybının önlenmesi için ağızlarının kapatılması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında deney grubu oluşturulurken jet grout kolon imalatına geçilmeden deney düzeneği için kalibrasyon çalışmaları ve incelemesi yapılacak asıl jet grout kolonlardan önce deneme kolon imalatı yapılmıştır. Bu çalışmalardan sonra üretilcek jet grout kolonları için çalışma parametreleri enjeksiyon harcında su/çimento oranının 1, enjeksiyon basıncı 20 bar tijin çekme hızı 30 cm/dk, tijin dönme hızı ise 10 dv/dk olarak belirlenmiştir. İmal edilen her kolon çeşidi kür süresi sonunda plastik varillerden çıkarılarak boy ve çap ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.1). Ölçülen boy ve çap değerleri Tablo 4.1 de gösterilmiştir. Tez kapsamında Portland Kompoze Çimento (KÇ), Uçucu Külli Çimenro (UKÇ), sülfatlı yeraltı suyu SYS, normal musluk suyu ise NMS olarak ifade edilmiştir. İmal edilen jet grout kolonlarının kür süreleri de Tablo 4.1’de parantez içinde belirtilmiştir.



Şekil 4.1 İmal edilen jet grout kolonların plastik varillerden çıkarılması boy ve çap kontrollerini yapılması

Tablo 4.1 İmal edilen jet grout kolonların boy, çap değerleri ve kür süreleri

Kolon Cinsi/Süre (Ay)	Kolon Çapı (cm)	Kolon Boyu (cm)
KÇ NMS (1)	25	47
KÇ SYS (1)	35	51
KÇ NMS (3)	25	44
KÇ SYS (3)	26	49
KÇ NMS (6)	25	44
KÇ SYS (6)	22	43
UKÇ NMS (1)	26	51
UKÇ SYS (1)	24	50
UKÇ NMS (3)	23	45
UKÇ SYS (3)	27	46
UKÇ NMS (6)	24	44
UKÇ SYS (6)	25	48
ORT	25.58	46.83

Tablo 4.1 deki kolonların fiziksel özellikleri incelendiğinde tüm kolon çeşitlerine ait boy ve çap değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Bu değerler ışığında plastik variller içerisinde hazırlanan kum zeminler hazırlanırken aynı rölatif sıklığın yakalandığı sonucuna varılmaktadır. Fakat KÇ-SYS (1 ay) kullanılarak hazırlanan kolonun çapının diğerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise kolonun incelenmesi sonucunda yüzeyinde spirallenmelerin (Şekil 4.2) meydana geldiği buna da kolon imalatı sırasında plastik varillerin içinde hazırlanan kum zeminde ideal rölatif sıklığın yakalanamamasının olduğu düşünülmektedir.

**Şekil 4.2** KÇ-SYS (1 Ay) kullanılarak hazırlanan kolonun yüzeyinde oluşan spirallenme

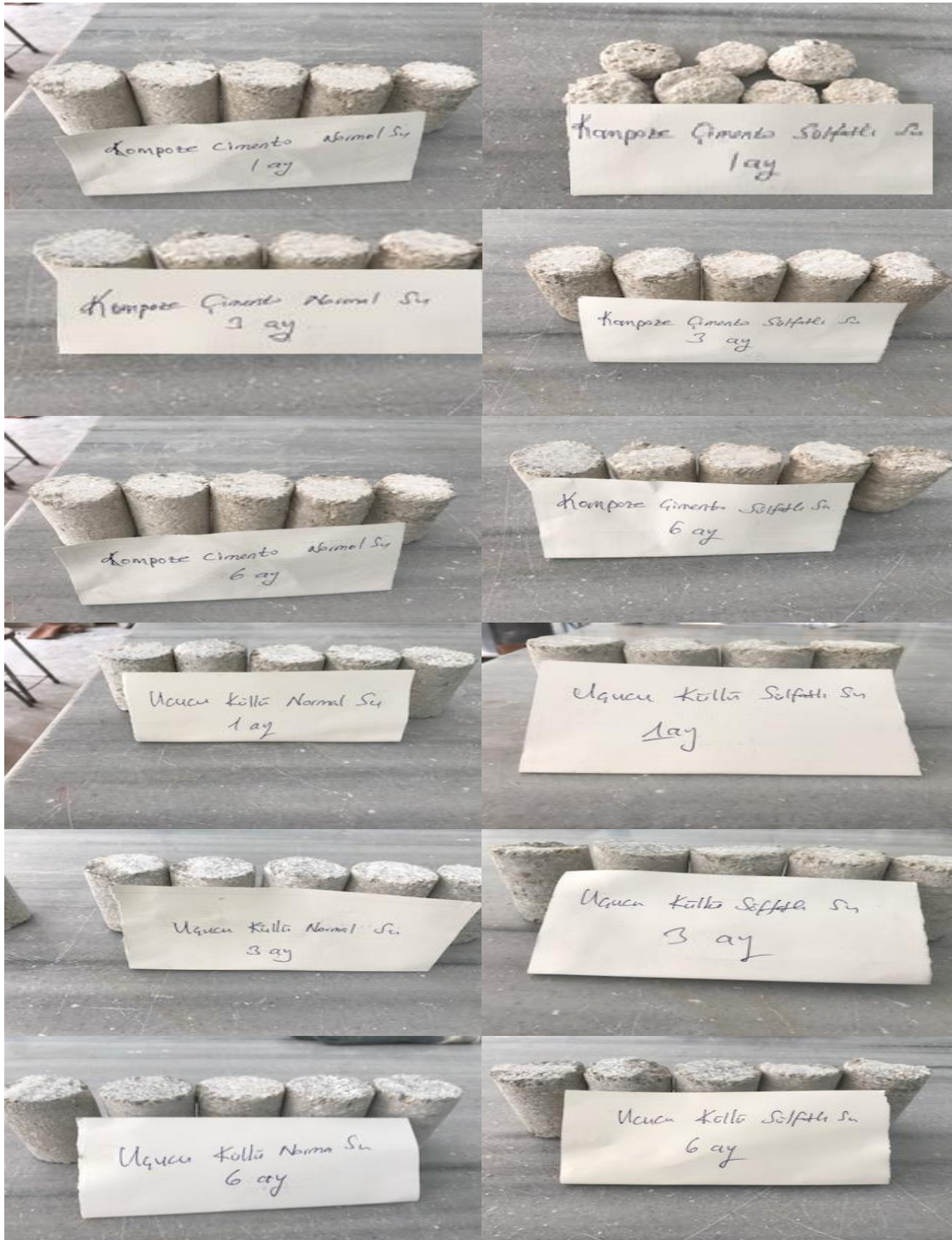
Çap ve boy kontrolleri yapılan jet grout kolonlardan dayanım testlerinin yapılabilmesi için her kolondan en az 2 adet olmak şartıyla çeşitli boylarda silindirik

karot numuneler alınmıştır (Şekil 4.3). İmal edilen kolonlardan sadece PKÇ-SS 1 ay için hazırlan kolonun çapının genişliğinden ve spirallenmelerden dolayı yeterince rijit olmadığından karot numune alınamamıştır. Kolonlardan biri kırılarak enine ve boyuna kesitleri incelendiğinde daha önce yapılan çalışmalarda (Demiral, 2017) da bahsedildiği gibi iyi çimentolaşmış bölge ve az çimentolaşmış bölgeler tespit edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 İmal edilen jet grout kolonlardan silindirik karot alma işlemleri, jet grout kolonlaraki iyi ve az çimentolanmış bölgelerin tespiti

Kolonlardan alınan silindirik numunelerin boylarının 6.5 cm çapları ise 4.3 cm olması tercih edilmiştir. Böylece boy/çap oranı yaklaşık 1.5 değerine denk gelmiştir (Şekil 4.4). Alınan korotlara daha sonra K.T.Ü Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda basınç dayanımı testleri yapılmıştır (Şekil 4.5). Basınç dayanımı sonuçları ise Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 KÇ ve UÇK ile hazırlanan jet grout kolonlardan alınan karot numuneler

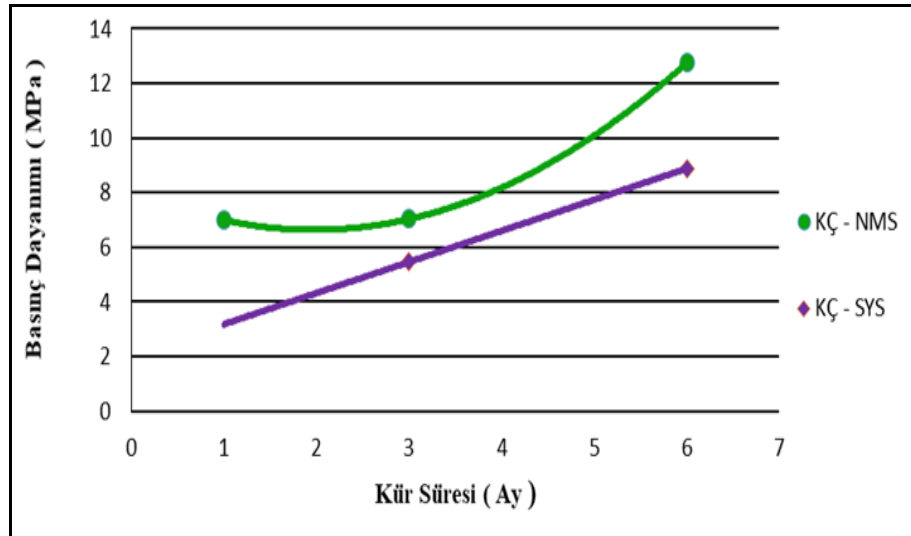


Şekil 4.5 Karot numunelere uygulanan serbest basınç dayanım testi

Tablo 4.2 İmal edilen jet grout kolonların çimento cinslerine ve kür sürelerine göre basınç dayanımları

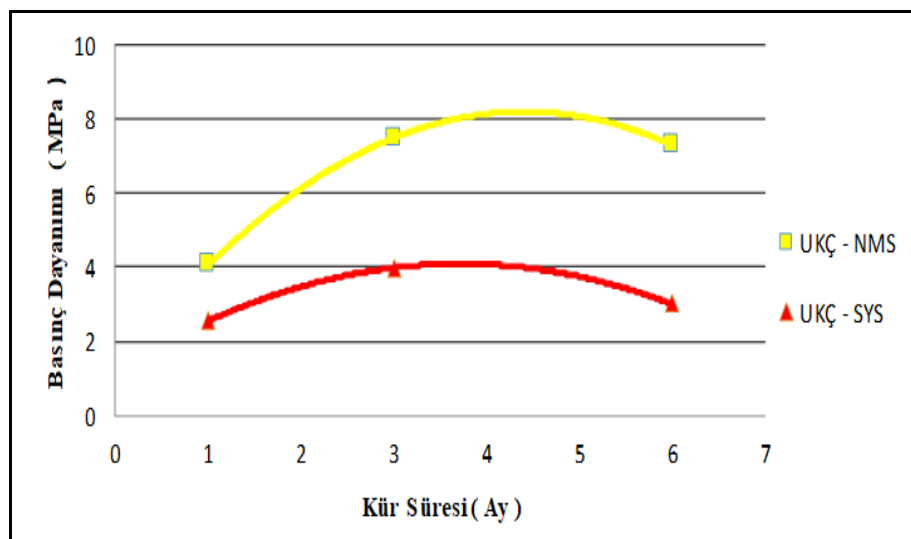
Kolon Cinsi / Süre (Ay)	Serbes Basınç Dayanımları (Mpa)				
	Karot 1	Karot 2	Karot 3	Ort	Kayıp Ort (%)
KÇ NMS (1)	7.40	-	6.57	6.99	
KÇ SYS (1)	-	-	-	-	-
KÇ NMS (3)	7.62	6.44	-	7.03	
KÇ SYS (3)	3.35	-	7.56	5.45	22.47
KÇ NMS (6)	13.56	12.92	11.76	12.75	
KÇ SYS (6)	8.08	9,67	-	8.88	30.35
UKÇ NMS (1)	4.40	3.68	4.11	4.06	
UÇK SYS (1)	3.39	2.95	-	3.17	21.92
UÇK NMS (3)	6.64	-	5.56	6.09	
UÇK SYS (3)	-	3.75	3.17	3.46	43.18
UÇK NMS (6)	7.58	7.65	6.71	7.14	
UÇK SYS (6)	3.03	2.95	3.03	3.01	57.84

Şekil 4.6 da normal musluk suyu ve sülfatlı yeraltı suyu kullanılarak kompozite çimento ile hazırlanan jet grout kolonların basınç dayanımları kür süresine göre karşılaştırılmıştır. KÇ-NMS ile hazırlanan jet grout kolonlardan alınan karotların basınç dayanımları 1 aylık numunelerde ortalama 6.99 Mpa 3 aylık numunelerde 7.03 Mpa 6 aylık numunelerde 12.75 Mpa olarak hesaplanmıştır. KÇ-SYS ile hazırlanan kolonlardan alınan numunelerin basınç dayanımları ise 1 aylık karotlarda dayanım elde edilmezken 3 aylık numunelerde ortalama 5.45 Mpa 6 aylık numunelerde ise ortalama 8.88 Mpa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri kolonlar hazırlanırken enjeksiyon malzemesinde ve kür suyunda kullanılan su cinsine göre karşılaştırıldığında çalışmadan beklenildiği gibi NMS ile hazırlanan kolonların dayanımı SYS ile hazırlanan kolondan dayanımından her kür süresi için daha yüksek çıkmıştır.

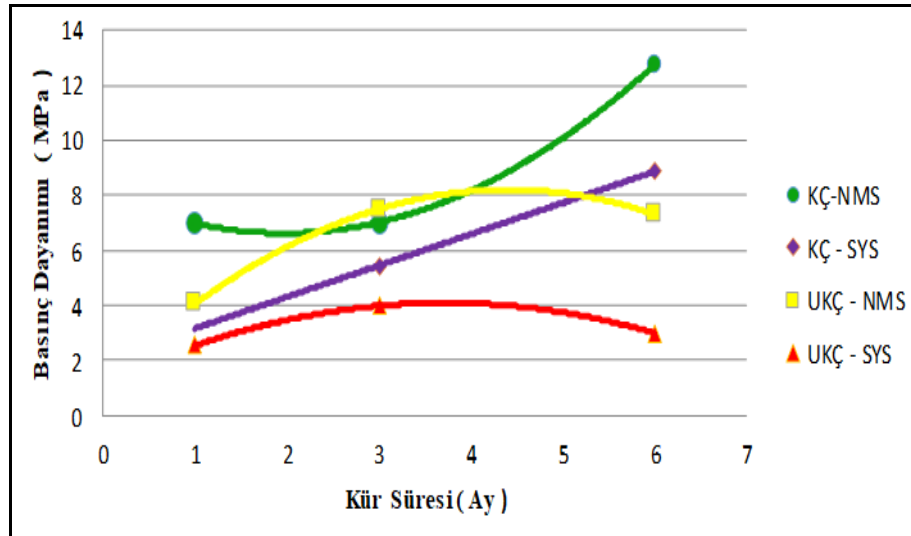


Şekil 4.6 KÇ-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.7’de ise normal musluk suyu ve sülfatlı yeraltı suyu kullanılarak uçucu küllü çimento ile hazırlanan jet grout kolonların basınç dayanımları kür sürelerine göre karşılaştırılmıştır. UÇK-NMS ile hazırlanan kolonlarda ortalama dayanımlar 1 ay için 4.06, 3 ay için 6.09, 6 ay için 7.14 Mpa hesaplanmıştır. UÇK-SYS ile hazırlanan kolonda ise 1 ay için 3.17, 3 ay için 3.46, 6 ay için 3.01 Mpa olarak hesaplanmıştır. Uçucu küllü çimento ile hazırlanan kolonlarda da portland kompoze çimentoda olduğu gibi kür süreleri baz alındığında normal musluk suyu ile hazırlanan kolonların dayanımlarının sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan kolonlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7 UÇK-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.8 KÇ-UÇK-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması

İmal edilen kolonlardan alınan karot numuneler kullanılan çimento cinslerine göre karşılaştırıldığında ise (Şekil 4.8) portland kompoze çimento ile hazırlanan kolonların performanslarının uçucu küllü çimentoya göre daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Kullanılan sülfatlı yeraltı suyunun uçucu küllü çimentoya etkisinin daha olumsuz olduğu tespit edilmiştir. 3 aylık ve 6 aylık kolonlarda sülfatlı yeraltı suyu KÇ ile hazırlanan kolonlarda sıra ile % 22.47 ve % 30.35 performans kaybına sebep olurken bu değerler UÇK ile hazırlanan kolonlarda 3 ay için % 43.18 hesaplanırken 6 aylık kolonlarda ise % 57.84 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında serbest basınç dayanımı yapılan jet grout kolonlardan alınan karot numunelerdeki sülfat etkisinin daha ayrıntılı araştırılması için özel olarak ince kesit ve toz numuneler alınarak S.Ü İLTEK Merkezinde taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve X-ışını kırınım (XRD) analizleri yaptırılmıştır. Yapılan analizler ile sülfat etkisi ile meydana gelen kimyasal reaksiyonların oluşum mekanizmaları ve bu reaksiyonlar sonucu oluşması muhtemel etrenjit yapıları incelenmiştir.

Bütün numuneler üzerinde yapılan SEM-EDS analizleri sonuçları incelendiğinde jet grout kolonların içyapılarında etrenjit oluşumları tespit edilmiştir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken, betonun hidratasyonu sonucu oluşan etrenjit ile dış sülfat etkisinden kaynaklanan etrenjitin birbirine karıştırılmamasıdır. Betonun hidratasyon reaksiyonları sırasında oluşan etrenjit; çimento harcının sertleşmesi sırasında oluşur ve betona zarar vermediği gibi, genişlemeye sebep olmaz ve betonun dayanımını artırır. Dış

kaynaklı sülfat etkisinden kaynaklanan etrenjit oluşumu ise beton sertleşme sürecini tamamladıktan sonra ki zamanda oluştuğundan, beton hacminde gereksiz artışa, dayanım kayıpları ile birlikte çatlamlar ve bozulmalara neden olduğundan betonun servis ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

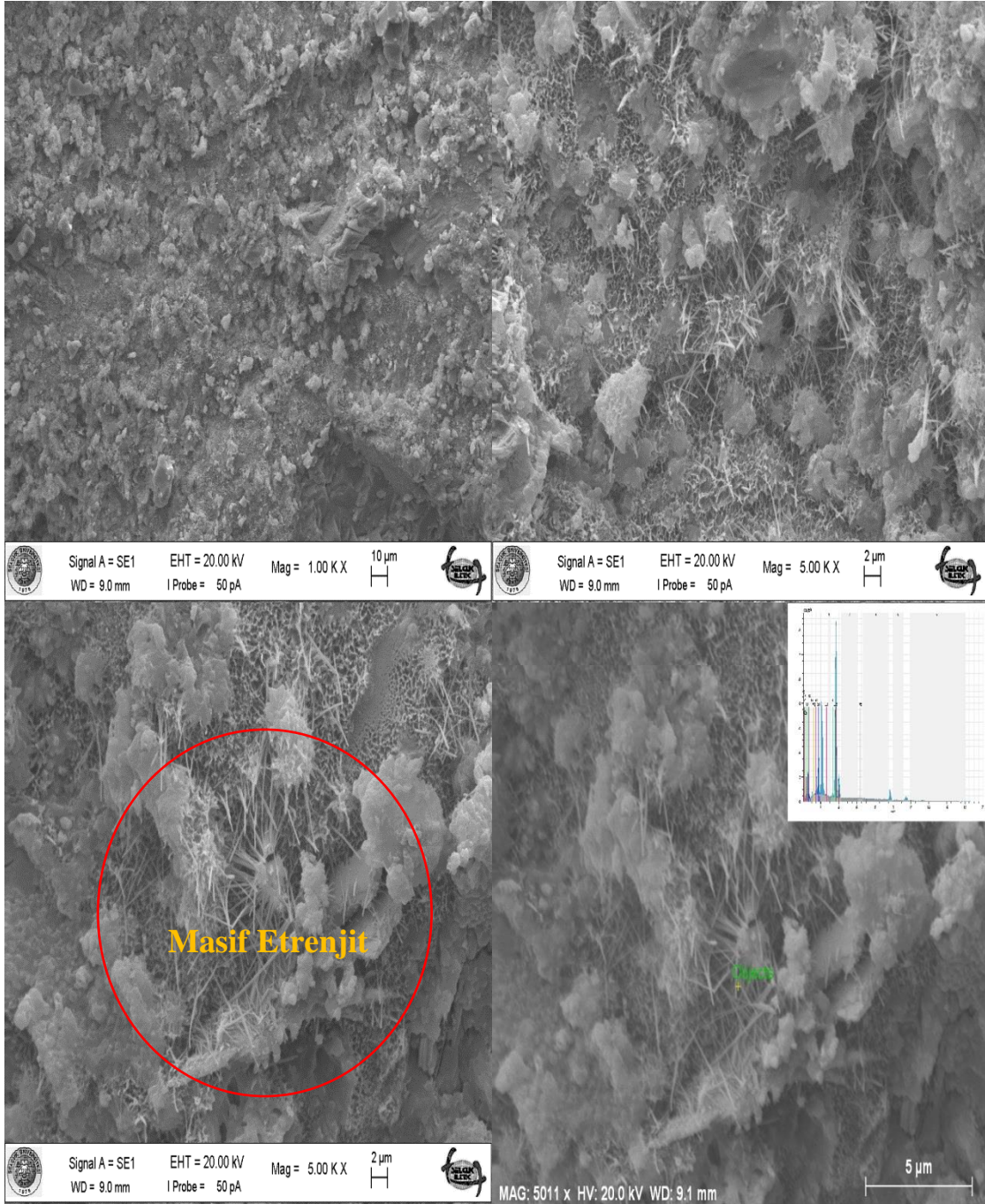
Çalışma kapsamında yapılan SEM-EDS analizleri incelendiğinde özellikle sülfatlı su ile hazırlanan jet grout kolonlardan alınan örneklerin SEM görüntüleri normal musluk suyu ile hazırlanan kolonlardan alınan SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında oluşan etrenjit çubuklarının boyutları ve miktarının çok fazla olduğu tespit edilmiştir. SEM analizlerinin yapıldığı bölgelerde EDS analizleri de yapılarak çimentonun hidrasyon sürecinde etrenjit oluşumunu tetikleyen mekanizmanın sülfatlı yeraltı suyunun neden olduğu dış sülfat etkisinden mi yoksa çimento hidrasyonundan mı kaynaklandığı tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda çimento malzemesinde kullanılan silisyum, kalsiyum ve alüminyum oranlarının betonun sertleşmesi sırasında etrenjit oluşum mekanizmasını tetikleyen neden olarak gösterilmiştir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde beton yapısında oluşan etrenjitin masif (doğal yolla oluşan) etrenjit mi yoksa top (dış kaynaklı sülfatla etkisi ile oluşan) etrenjit mi olduğunun anlaşılabilmesi için analiz yapılan bölgedeki S/Ca, Al/Ca oranlarına bakılmaktadır. Bu oranlar değerlendirildiğinde masif etrenjit oluşan bölgelerdeki S/Ca, Al/Ca oranlarının top etrenjit oluşan bölgelerdeki S/Ca, Al/Ca oranlarından daha düşük çıktığı tespit edilmiştir (Felekoğlu, 2008), (Tosun, 2007).

Tablo 4.3 İmal edilen jet grout kolonlara yapılan EDS analiz sonuçları

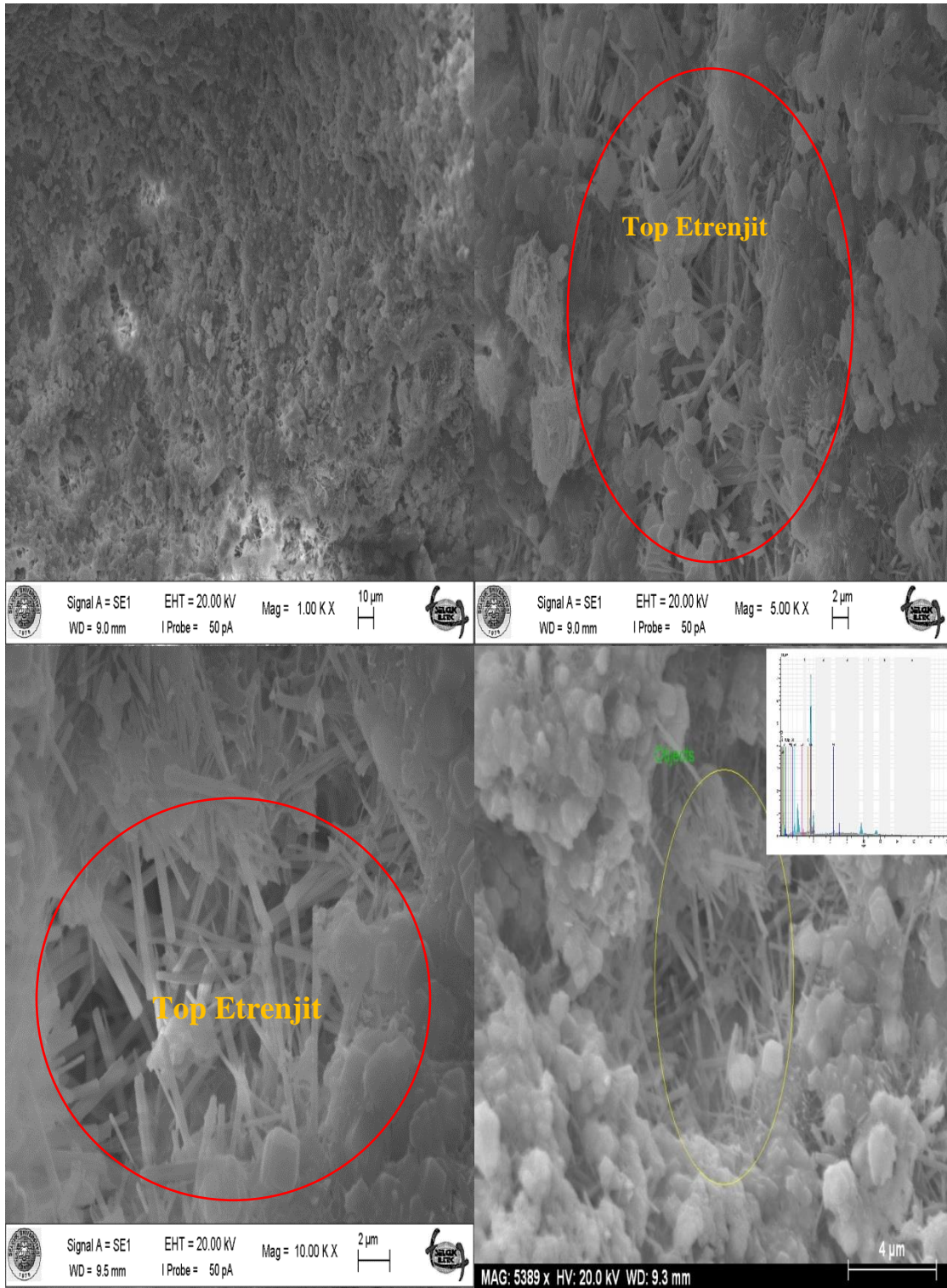
JG Kolon Cinsi	S/Ca Oranı	Al/Ca Oranı	Morfolojik Analiz	Etrenjit Oluşum Mekanizması
KÇ NMS (1)	0.040	0.007	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (1)	0.124	0.067	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
KÇ NMS (3)	0.235	0.062	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (3)	0.260	0.063	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
KÇ NMS (6)	0.253	0,060	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (6)	0.177	0.074	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (1)	0.085	0.012	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (1)	0.370	0.115	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (3)	0.252	0.240	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (3)	0.663	0.168	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (6)	0.115	0.053	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (6)	0.259	0.220	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi

Kompoze çimento NMS-SYS ile hazırlanan 1 aylık kolonlardan alınan karotlara farklı büyütme oranlarında SEM-EDS analiz uygulandığında masif ve top etrenjit

yapılarına rastlanmıştır. SEM analizlerinde (Şekil 4.9, Şekil 4.10) etrenjit çubukları rastlanmakla birlikte NMS ile oluşturulan jet grout kolondaki etrenjit miktarlarının SYS ile hazırlananlara göre daha az ve küçük olduğu anlaşılmaktadır. EDS analizi incelendiğinde ise NMS ile hazırlanan kolonda S/Ca oranı 0.040, Al/Ca oranı ise 0.007 olarak, SYS ile hazırlan kolonda daha büyük olan bu oranlar 0.124 ve 0.067 olarak hesaplanmıştır.



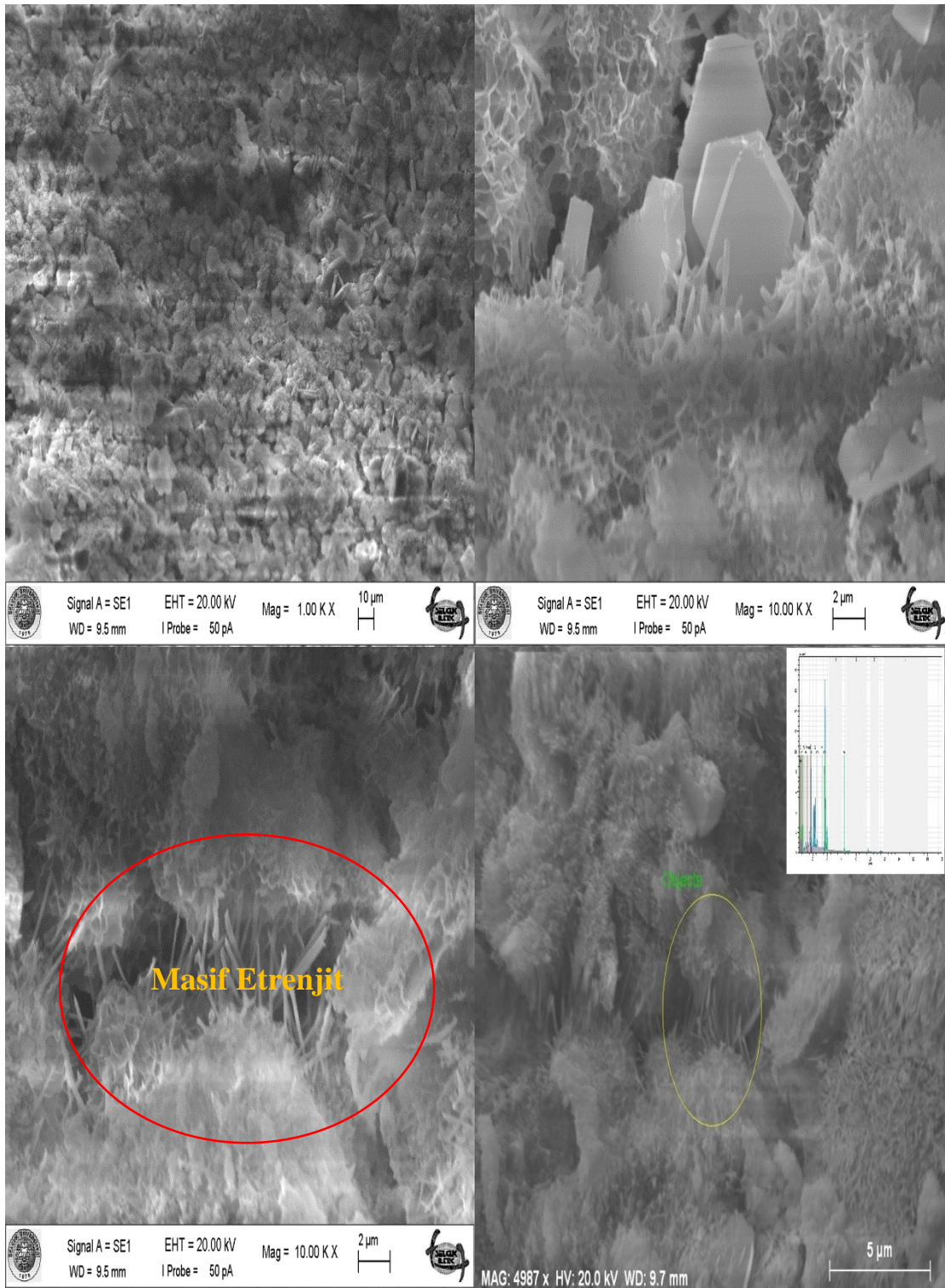
Şekil 4.9 KÇ-NMS ile hazırlan 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları



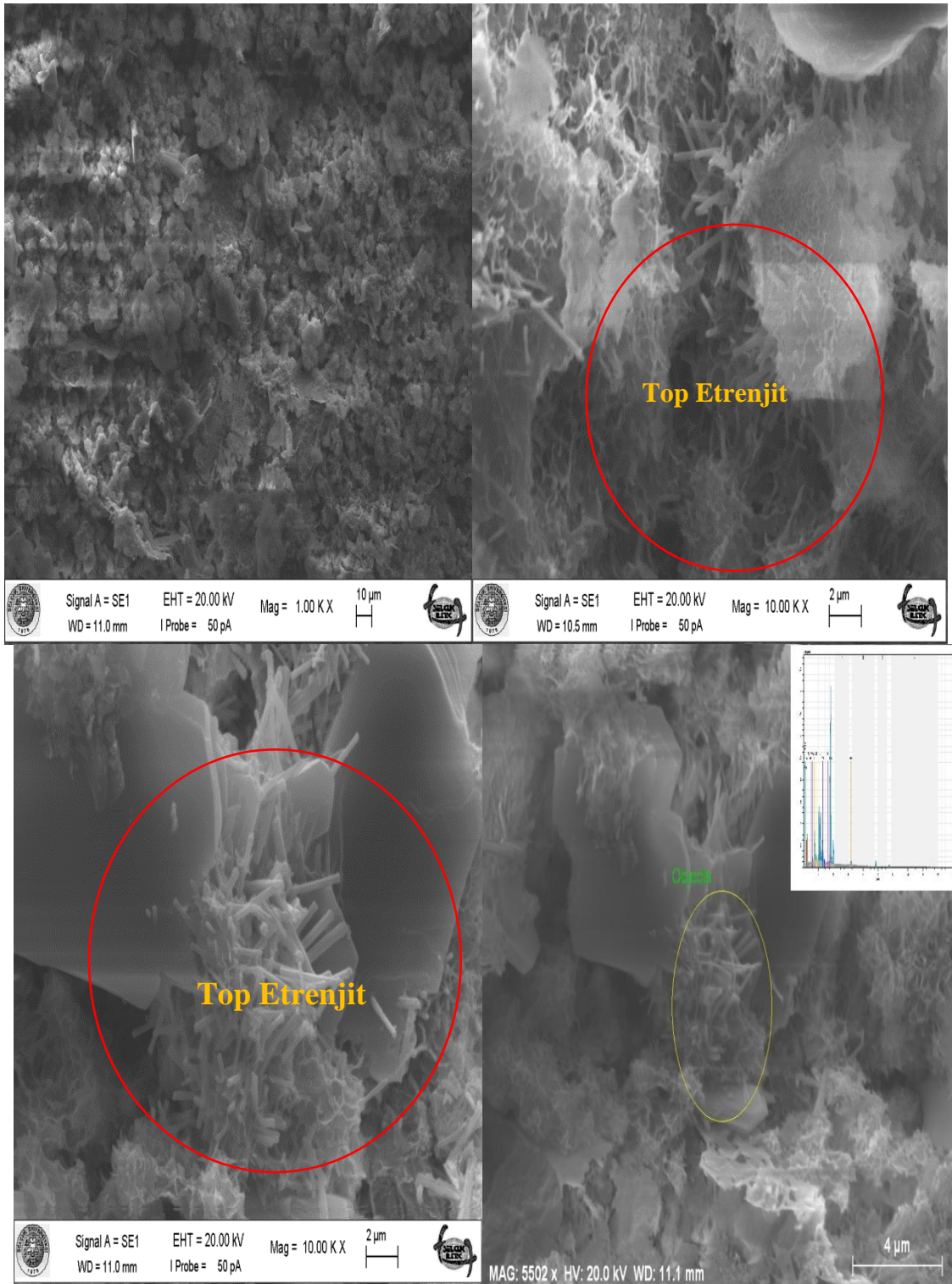
Şekil 4.10 KÇ-SYS ile hazırlanan 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

Kompoze çimento NMS-SYS ile hazırlanan 3 aylık jet grout kolonlardan alınan karotlara uygulanan SEM-EDS analiz sonuçları incelendiğinde etrenjit yapıları gözlenmektedir. Etrenjit çubukları sülfatlı suyun etkisinden dolayı SYS hazırlanan kolondan alınan numunelerde daha fazla ve büyüktür (Şekil 4.11, Şekil 4.12). EDS

analizi incelendiğinde ise NMS ile hazırlanan kolonda S/Ca oranı 0.235, Al/Ca oranı ise 0.062 olarak, SYS ile hazırlan kolonda daha büyük olan bu oranlar 0.260 ve 0.063 olarak hesaplanmıştır.



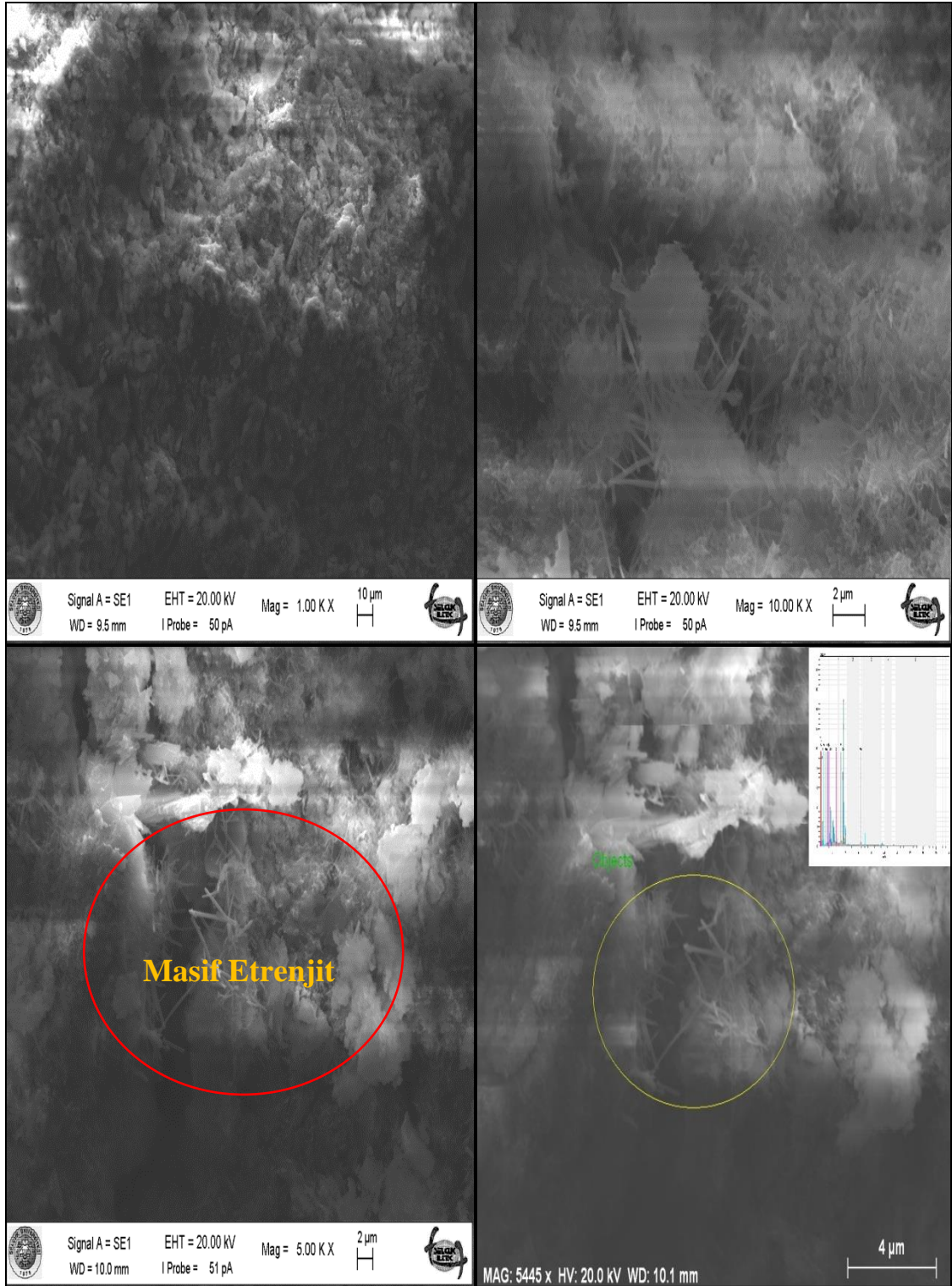
Şekil 4.11 KÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları



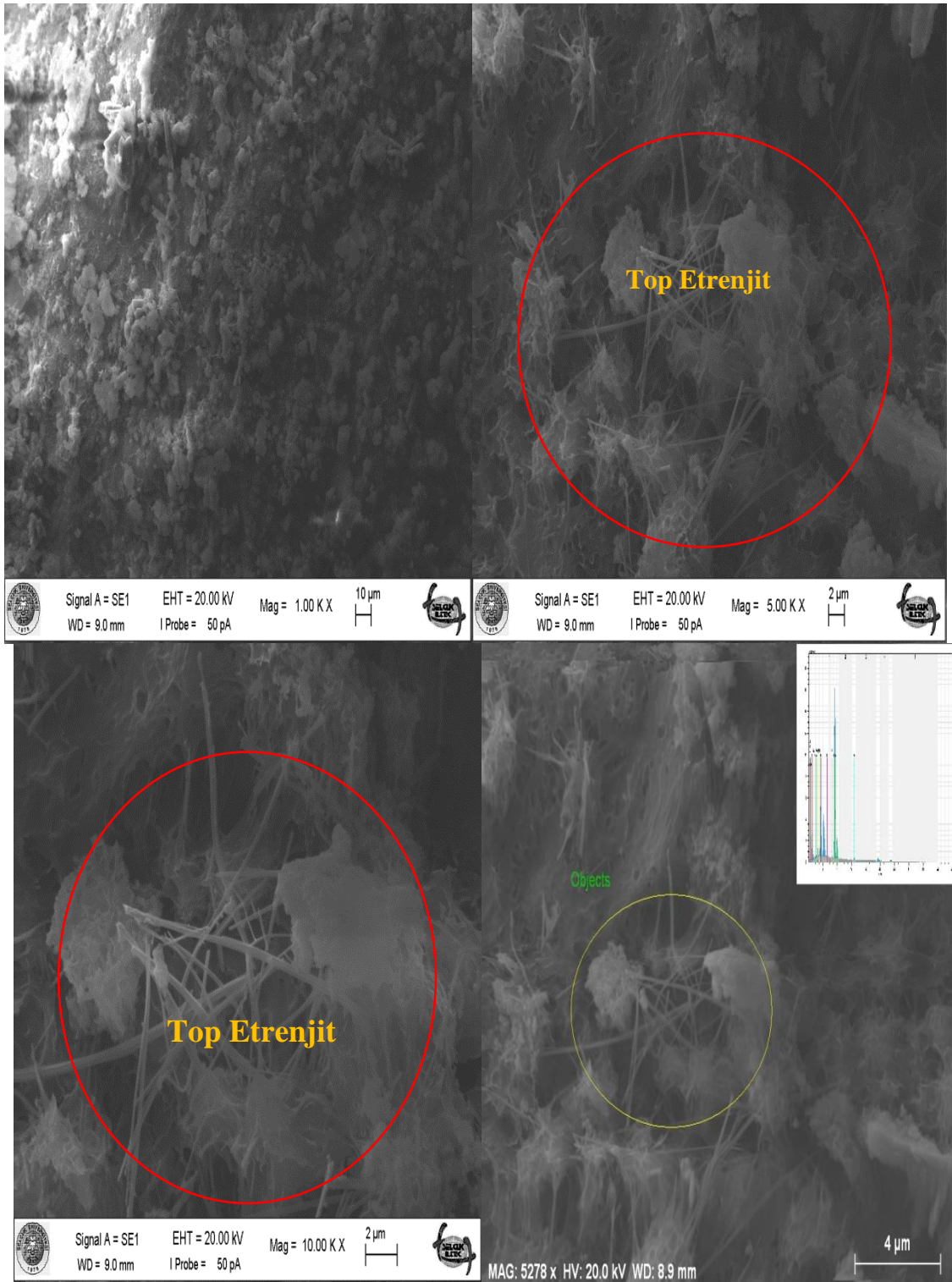
Şekil 4.12 KÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

KÇ-NMS-SYS 6 aylık kür süresi için hazırlanan jet grout kolonlardan alınan karot numuneler üzerine uygulanan SEM analiz sonuçlarında hem masif hem de top etrenjit çubuklarına rastlanmıştır (Şekil 4.13, Şekil 4.14). SEM analizi incelendiğinde sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan kolonun içyapısındaki etrenjit çubuklarının normal

musluk suyu ile hazırlanan kolondan alınan numunedeki ve diğer kür süreleri için analizi yapılan numunelerdeki etrenjit çubuklarına göre çok daha uzun oldukları tespit edilmiştir. EDS analizi sonuçlarında ise NMS için S/Ca oranı 0.253, Al/Ca oranı 0.060 SYS için ise 0.177 ve 0.074 olarak hesaplanmıştır.



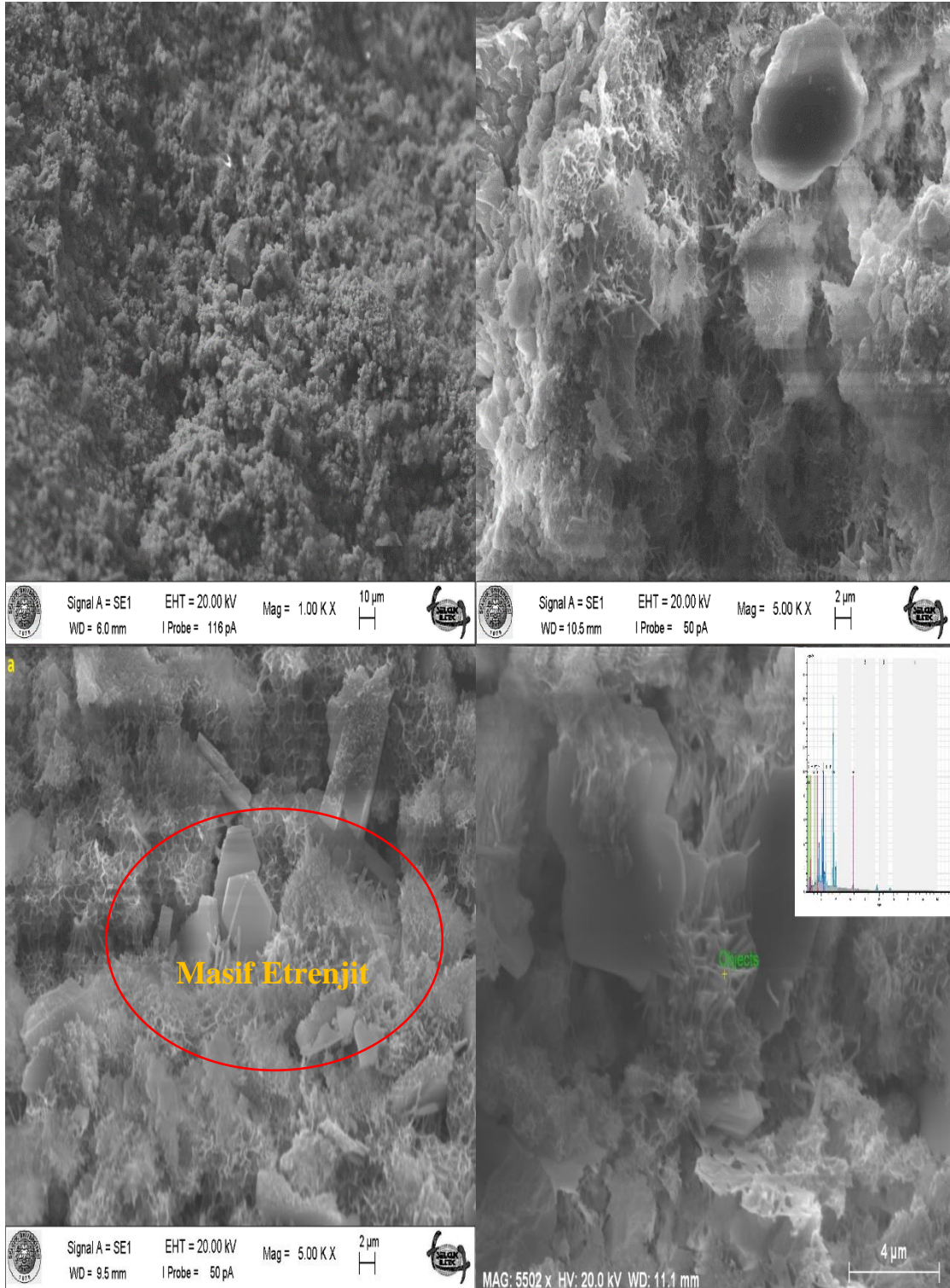
Şekil 4.13 KÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları



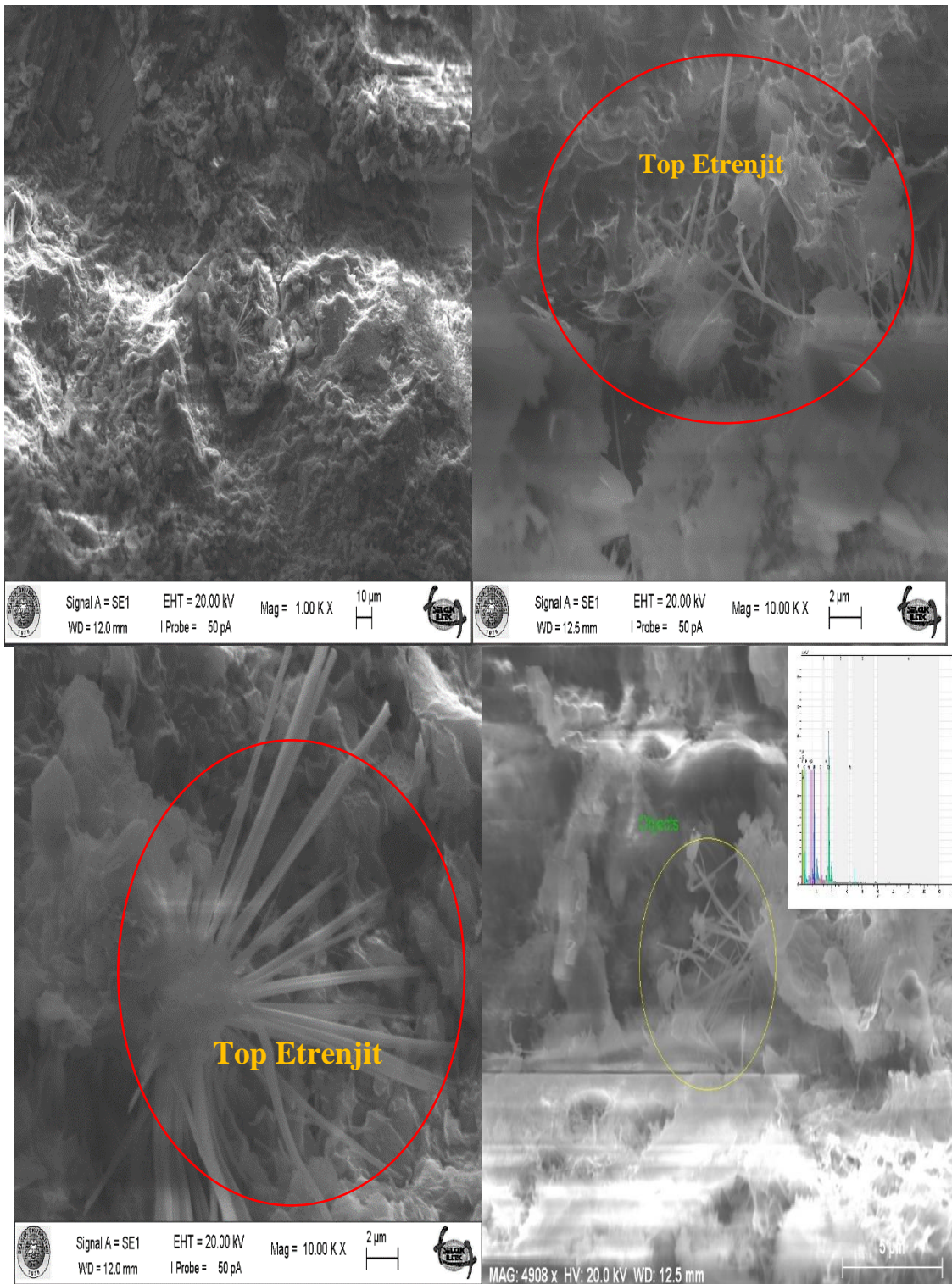
Şekil 4.14 KÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

Uçucu küllü çimento kullanılarak normal musluk suyu ve sülfatlı yeraltı suyu ile 1 aylık kür süresi için hazırlanan jet grout kolonlardan alınan numunelerde yapılan SEM analiz sonuçlarına bakıldığında masif etrenjit miktarının top etrenjit miktarından az olduğu görülmektedir (Şekil 4.15, Şekil 4.16). EDS analizlerine bakıldığında ise S/Ca,

Al/Ca oranı normal musluk suyunda 0.085, 0.120 sülfatlı yeraltı suyunda 0.370 ve 0.115 olarak hesaplanmıştır. SYS ile hazırlanan kolondan alınan numunedeki silisyum-kalsiyum ve alüminyum- kalsiyum oranı daha büyük çıkmıştır.



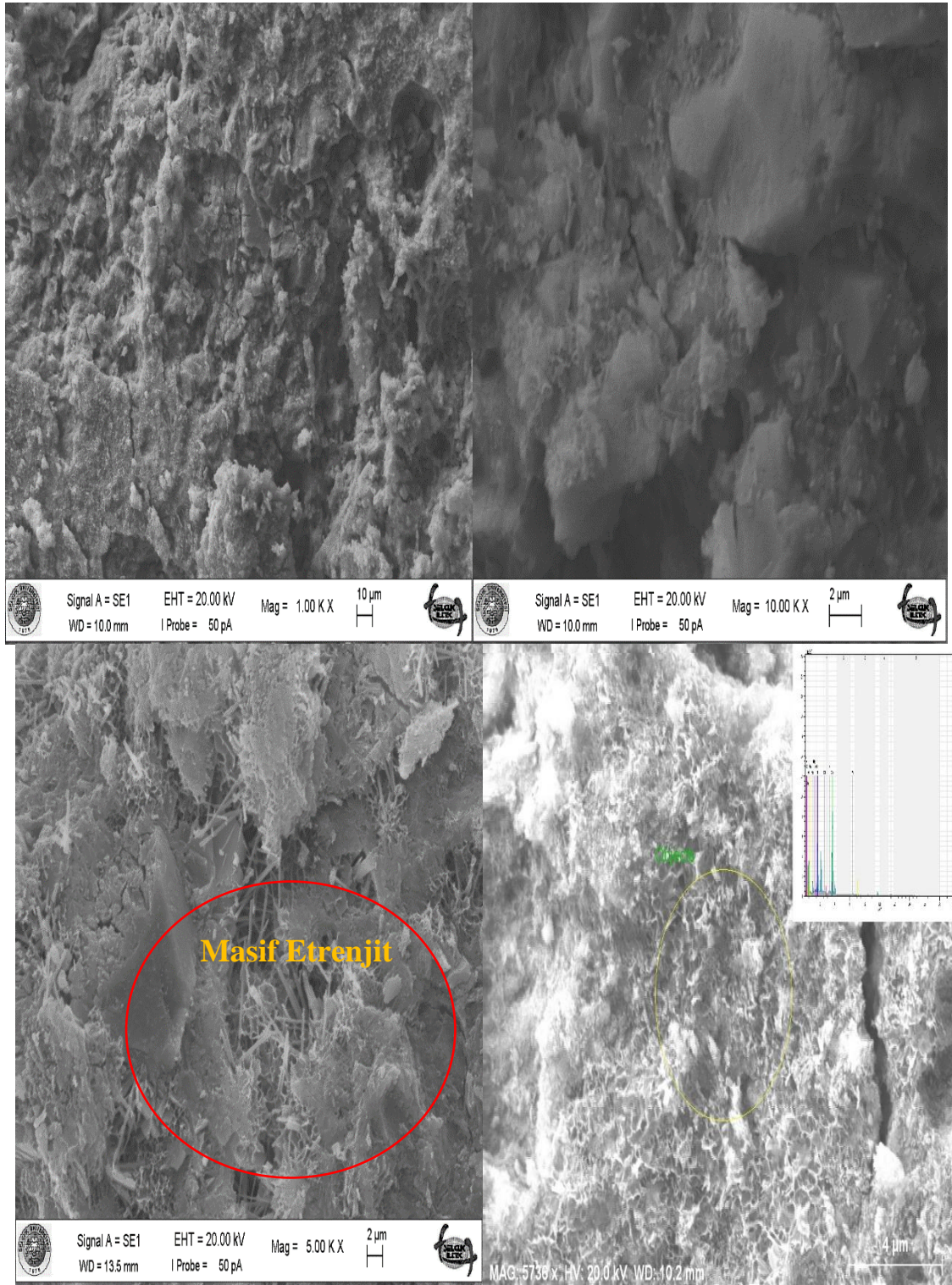
Şekil 4.15 UKÇ-NMS 1 aylık jet grout kolonlarının SEM-EDS analiz sonuçları



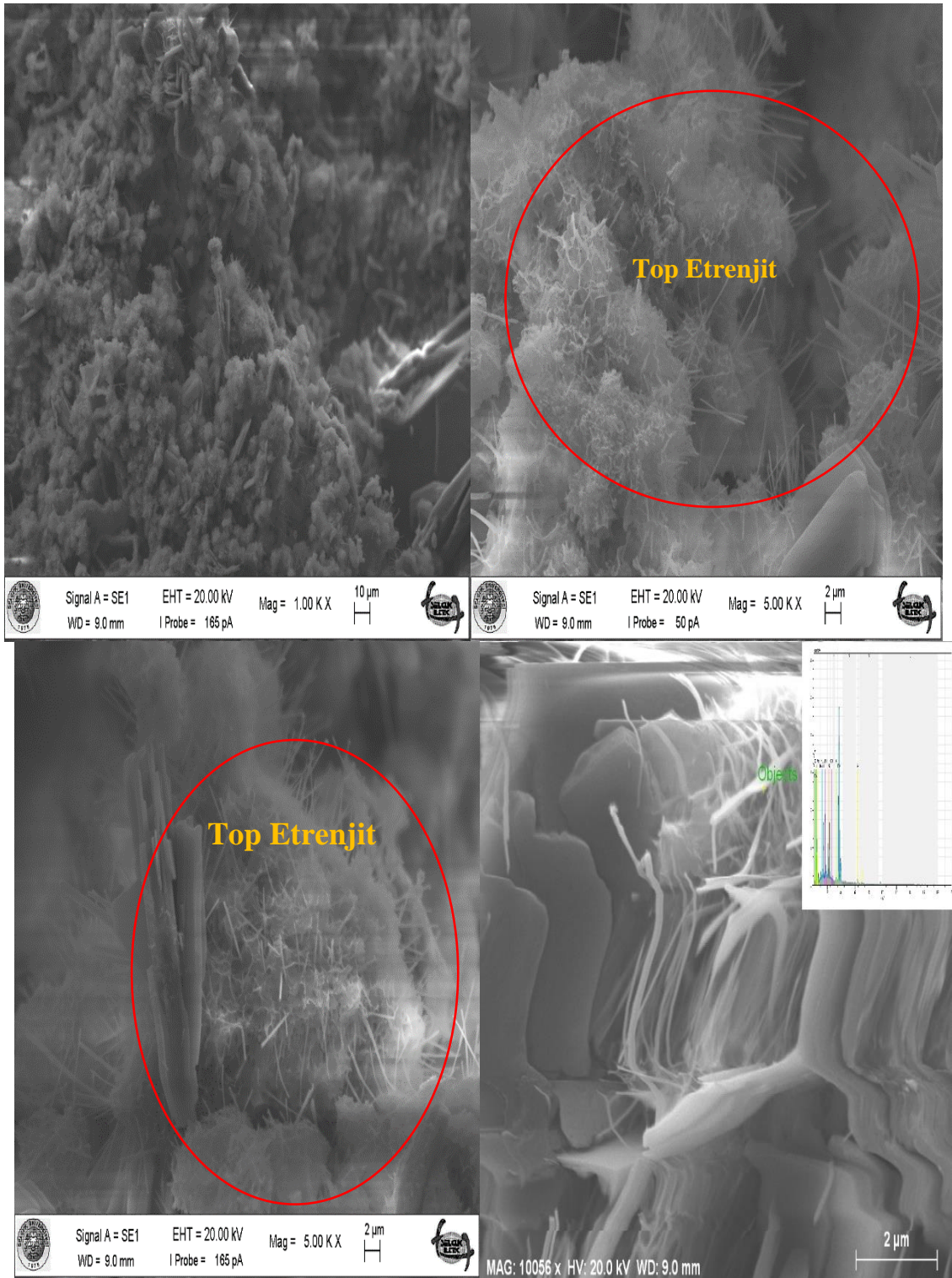
Şekil 4.16 UKÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

UKÇ-NMS-SYS 3 aylık kür süreleri için hazırlanan kolonların EDS analiz sonuçları değerlendirildiğinde normal musluk suyu için silisyum/kalsiyum oranı 0.252 alüminyum/kalsiyum oranı 0.240 olarak bulunurken, bu oranlar sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan jet grout kolondan alınan numunede 0.663 ve 0.168 olarak hesaplanmıştır.

SEM görüntüleri farklı büyütme oranlarında karşılaştırıldığında SYS ile hazırlanan kolonda tespit edilen etrenjit çubuklarının daha büyük ve fazla olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.17, Şekil 4.18). Sülfatlı yeraltı suyu etrenjit oluşumunu tetiklemiştir.



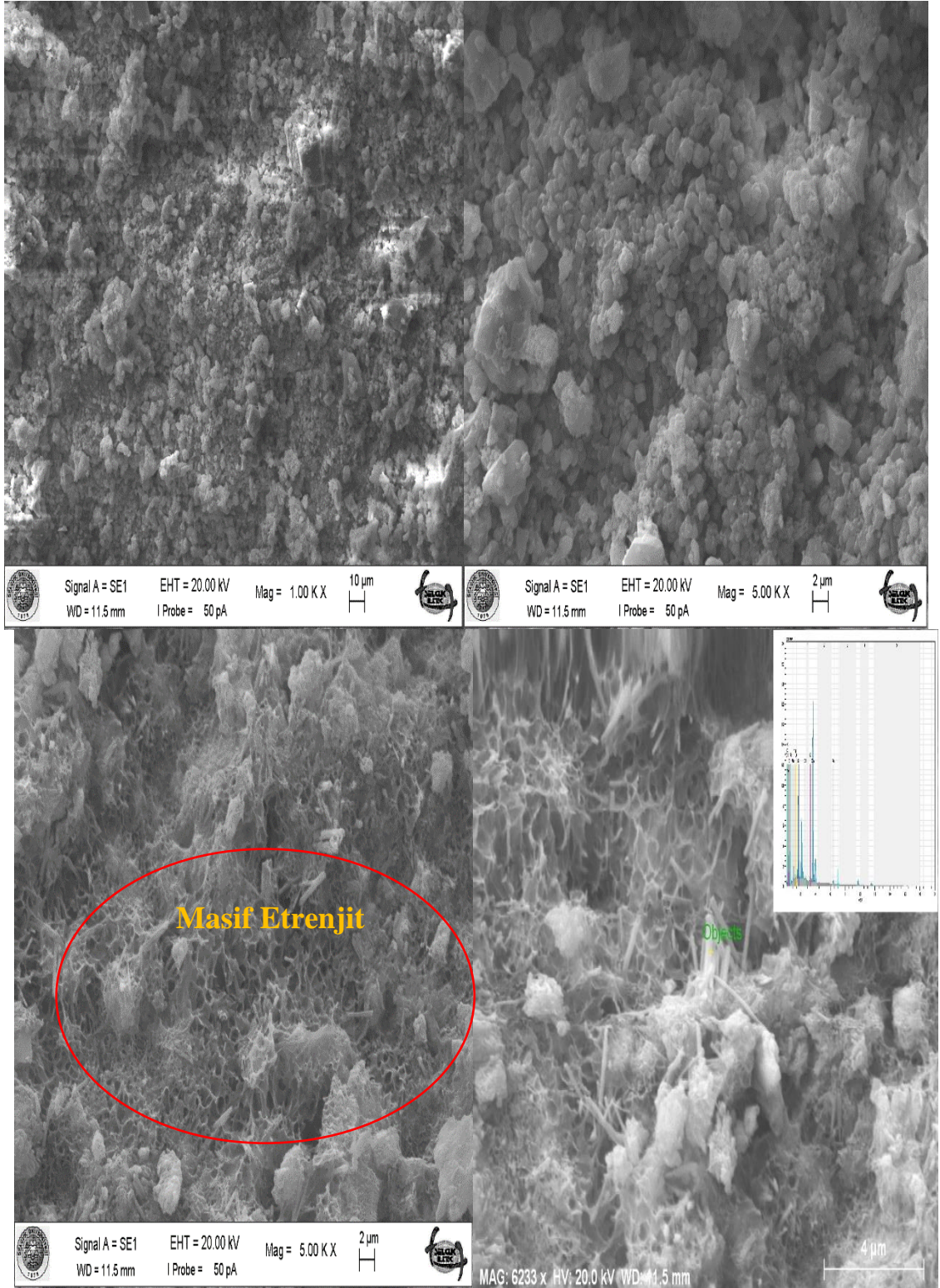
Şekil 4.17 UKÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları



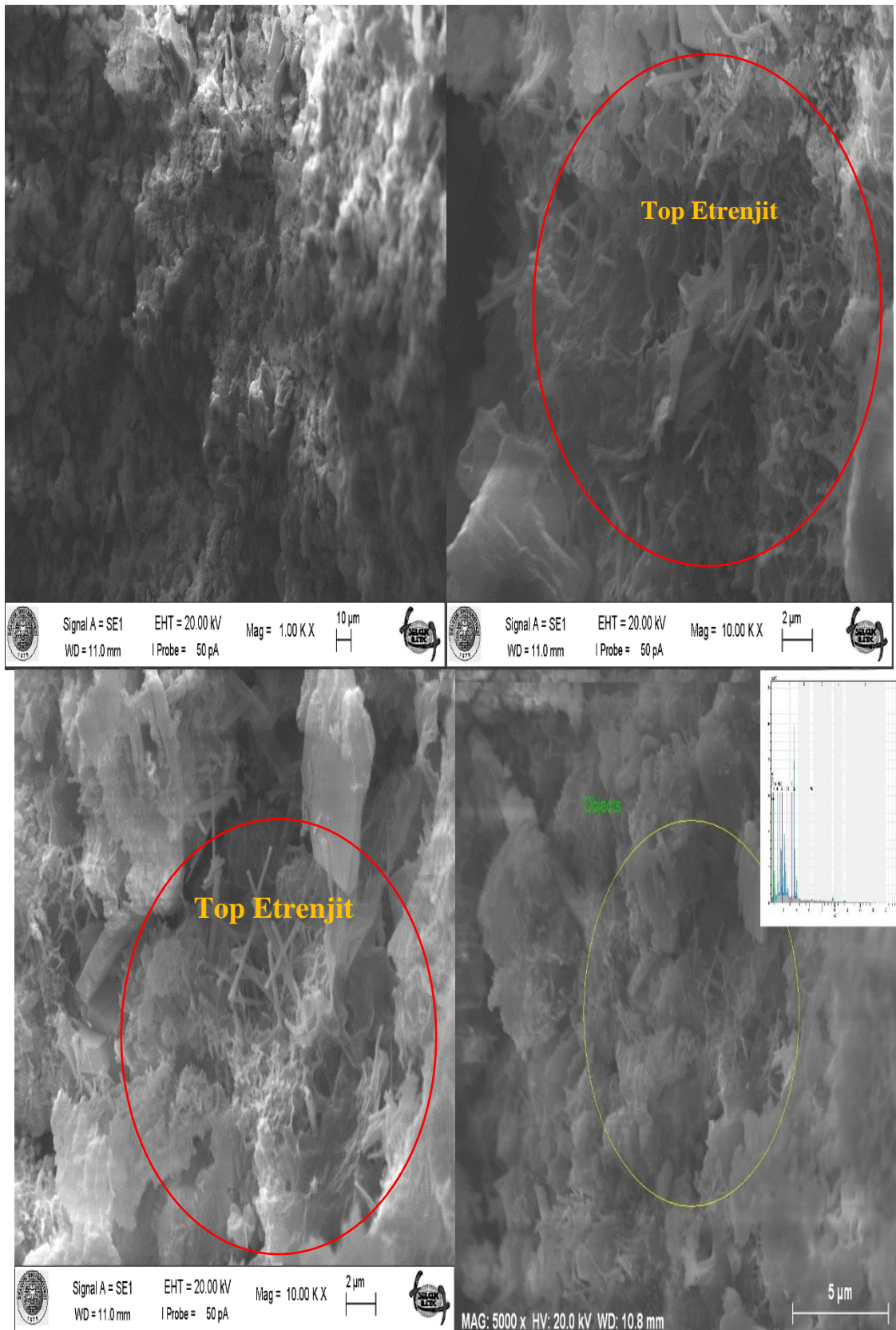
Şekil 4.18 UKÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

Uçucu küllü çimento (UKÇ) ile 6 aylık kür süresi için hazırlan jet grout kolonlardan SEM-EDS analizi için alınan numunler incelenmiştir. Sülfatlı yer altı suyunun etkisinden dolayı UÇK-NMS ile hazırlan kolonda S/Ca oranı 0.115 Al/Ca oranı 0.053. UÇK-SYS ile hazırlana kolonda Sa/Ca oranı 0.259, Al/Ca oranı 0.220

olarak daha yüksek çıkmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde ise UKÇ-SYS 6 aylık kolondan daha fazla ve hacimli etrenjit çubuklarına rastlanmıştır (Şekil 4.19, Şekil 4.20).



Şekil 4.19 UKÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları



Şekil 4.20 UKÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

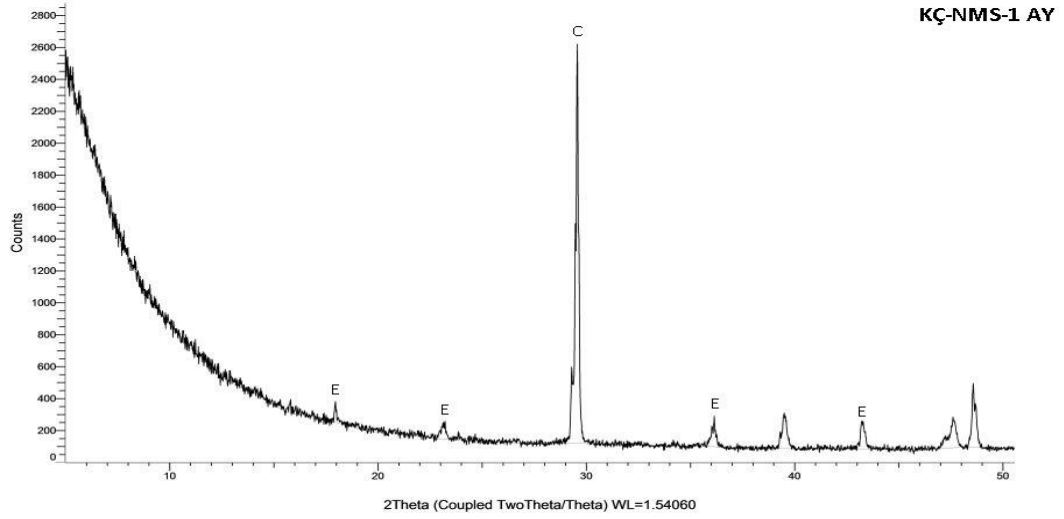
Tez çalışması kapsamında son olarak jet-grout beton kolonların içyapılarında meydana gelen kimyasal reaksiyonların belirlenmesi için alınan ince kesit numunelere SEM-EDS analizleri yapıldıktan sonra oluşan yeni ürünlerin mineralojik yapılarının tam olarak belirlenmesi için XRD analizleri de yapılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda beton numunelere yapılan XRD analizlerinde etrenjit piklerinin yoğunlaştığı 2θ açısı aralığının değiştiği top etrenjite rastlanan pik değerlerin ise 9.1°, 15.8°, 18.8°, 23° 2θ açısına denk gelen pik değerleri olduğu belirtilmiştir (Tosun, 2007), (Felekoğlu, 2008).

Tez çalışması kapsamında jet grout kolonlardan alınan numunelere yapılan XRD analiz 2θ 5°-50° 2°/dk tarama hızı ile yapılmıştır. Kolonlara yapılan analiz sonuçlarının grafiklerindeki 2θ açılara bakılarak örnek numunelerdeki etrenjit pikleri belirlenmiştir (Şekil 4.21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32).

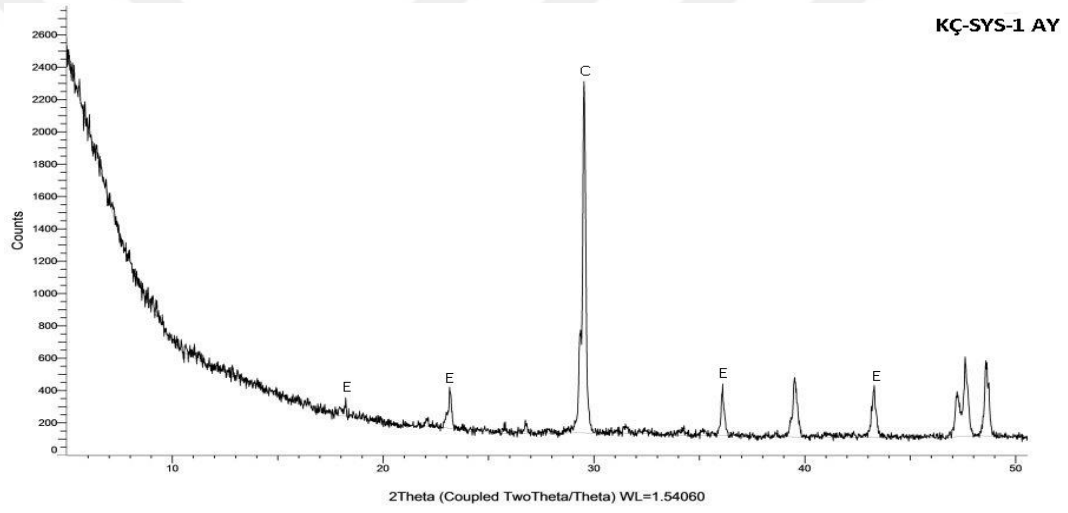
Normal musluk suyu ile hazırlanan beton numunelerde sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan numunelere göre 2θ açısına karşılık gelen pik değerleri düşük çıkmıştır. Kompoze çimento normal musluk suyu ile hazırlanan 3 aylık jet kolonda 18.1°'lik 2θ açı değerine karşılık gelen etrenjit pik değeri 450 olarak belirlenirken, sülfatlı su ile hazırlanan 3 aylık jet kolonda bu pik değeri 1200 olarak tespit edilmiştir. Yine 3 aylık kür süresi için uçucu küllü çimento normal musluk suyu ile hazırlanan kolondan alınan numunede 18.8°'lik 2θ açısında etrenjit oluşmazken, sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan kolondan alınan numunede 18.8°'lik 2θ açısında 700 pik değerinde etrenjit oluşumu gözlenmiştir.

Kompoze çimento normal musluk suyu ile hazırlanan 6 aylık beton kolonda 18.8°'lik 2θ açı değerine karşılık gelen etrenjit pik değeri 600 olarak belirlenirken, sülfatlı su ile hazırlanan 6 aylık beton kolondan bu pik değeri 1900 olarak tespit edilmiştir. Aynı 2θ açı değeri için uçucu küllü çimento normal musluk suyu ile hazırlanan 6 aylık beton kolonda etrenjit oluşumu gözlenmezken sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlana 6 aylık beton kolonda 500 pik değerinde etrenjit oluşumuna rastlanmıştır.

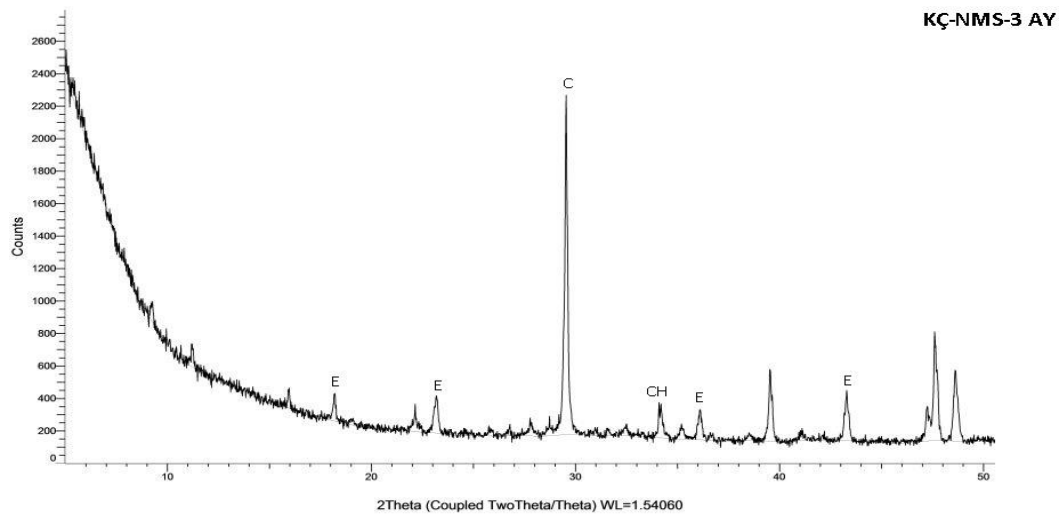
XDR analizlerine bakıldığında çimento cinsleri kendi aralarında karşılaştırılır ise uçucu küllü çimento ile hazırlanan kolonlarda, kompoze çimento ile hazırlanan kolonlara göre daha fazla etrenjit oluşumuna rastlanmıştır. UÇK ile hazırlanan jet grout kolonlar KÇ ile hazırlanan kolonlara göre daha düşük basınç dayanımları vermesi XRD analiz sonucunda UKÇ ile hazırlanan kolonların kimyasal yapılarından dolayı SYS dan daha fazla etkilendiği sonucuna varılmıştır.



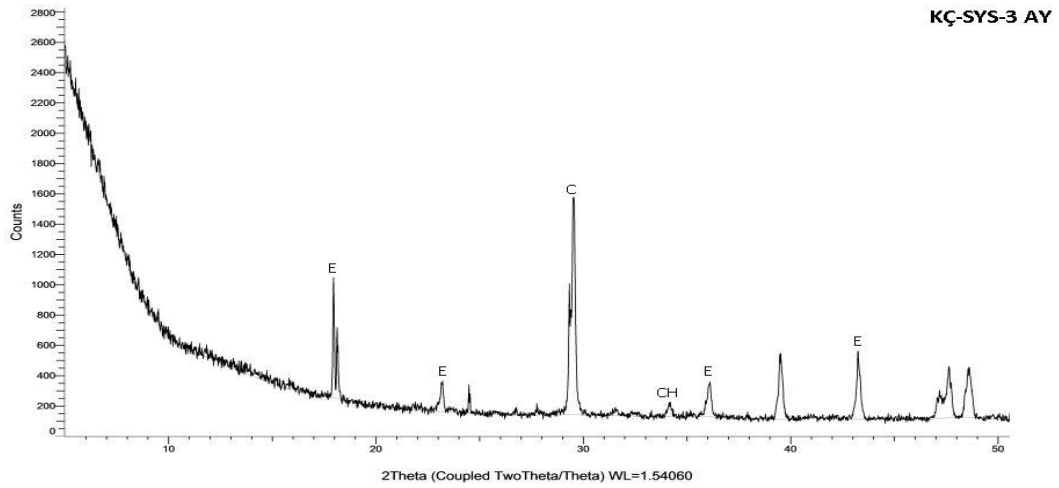
Şekil 4.21 KÇ-NMS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



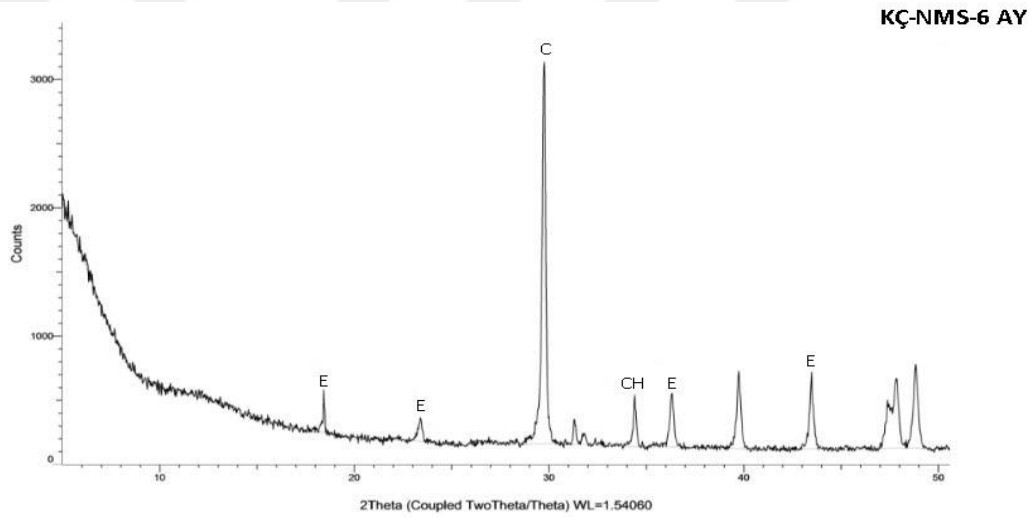
Şekil 4.22 KÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



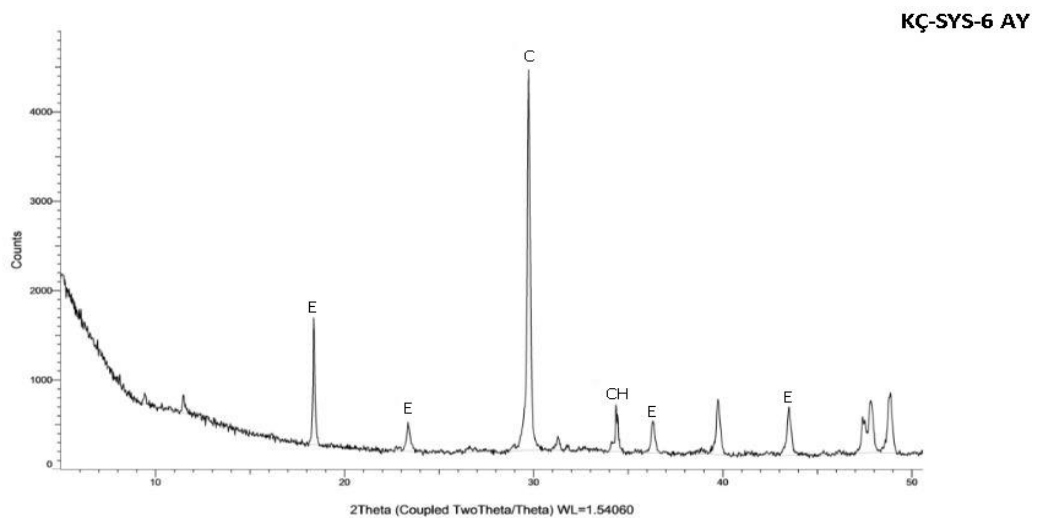
Şekil 4.23 KÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



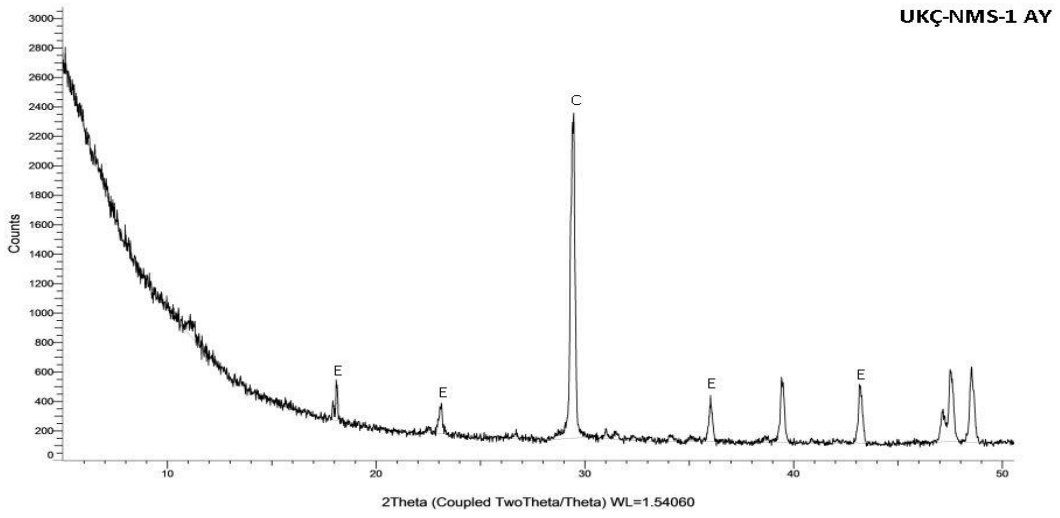
Şekil 4.24 KÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



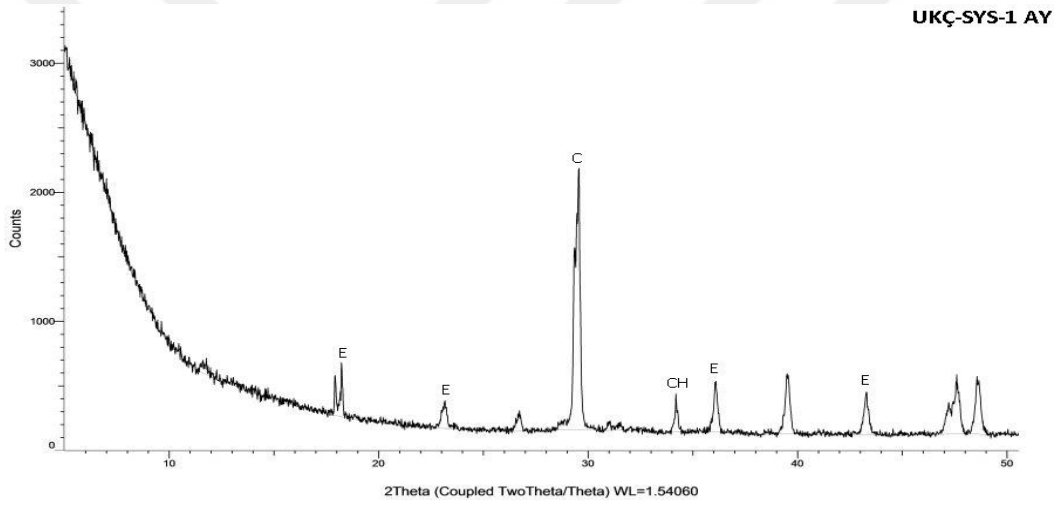
Şekil 4.25 KÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



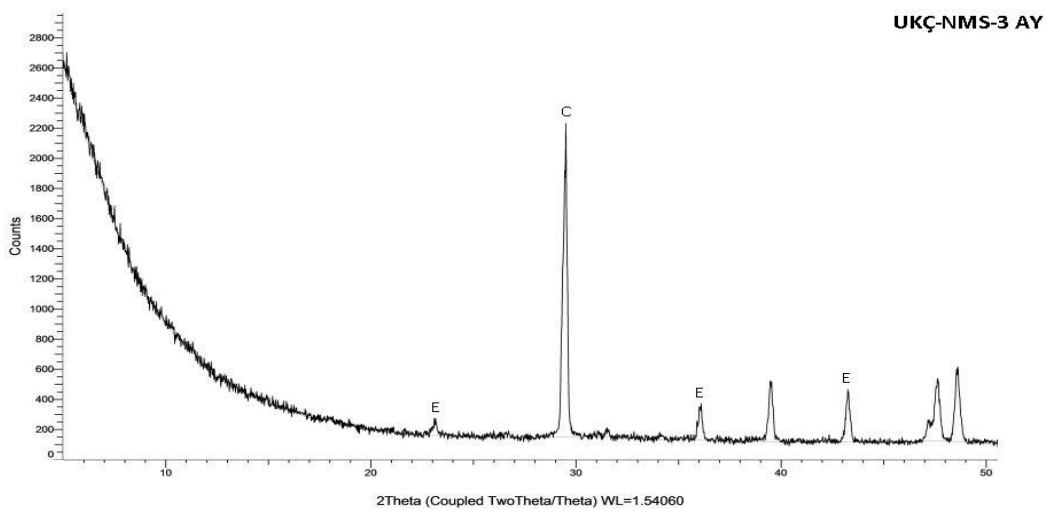
Şekil 4.26 KÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



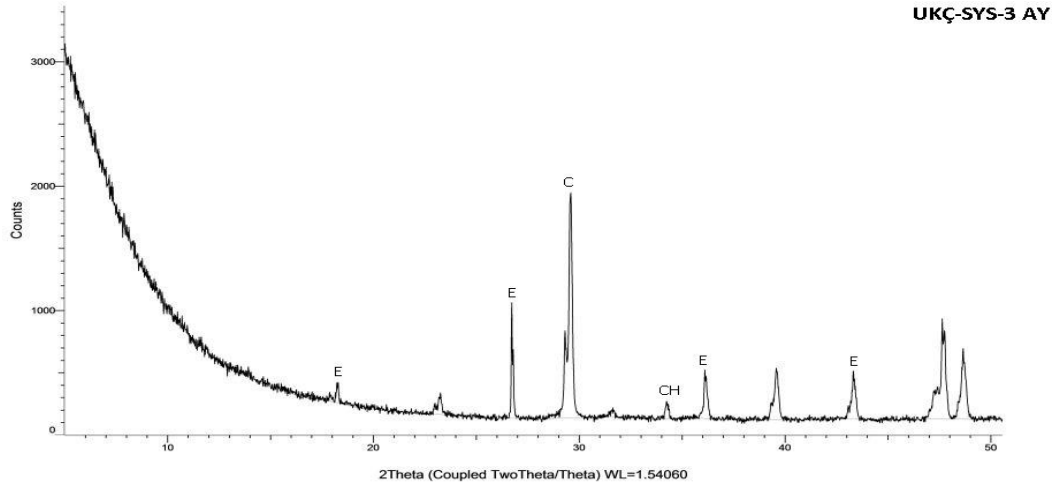
Şekil 4.27 UKÇ-NMS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



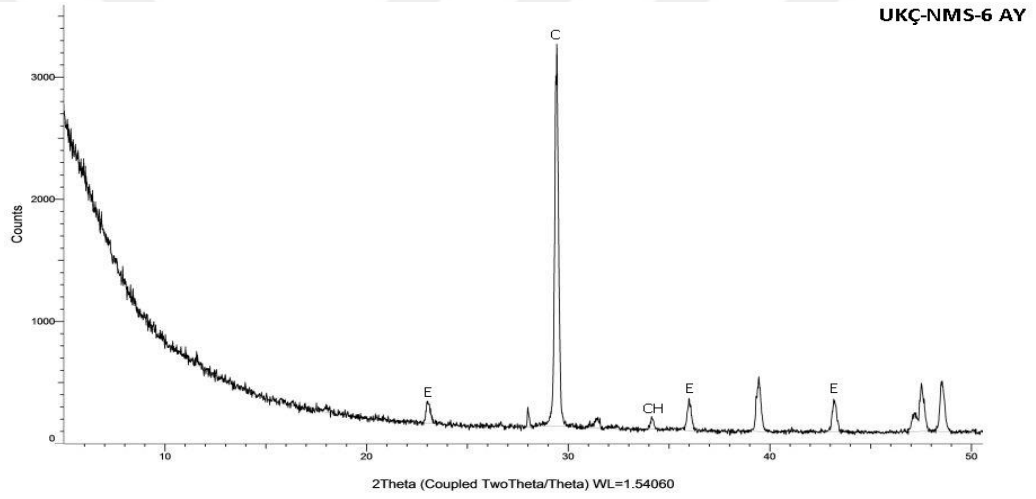
Şekil 4.28 UKÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



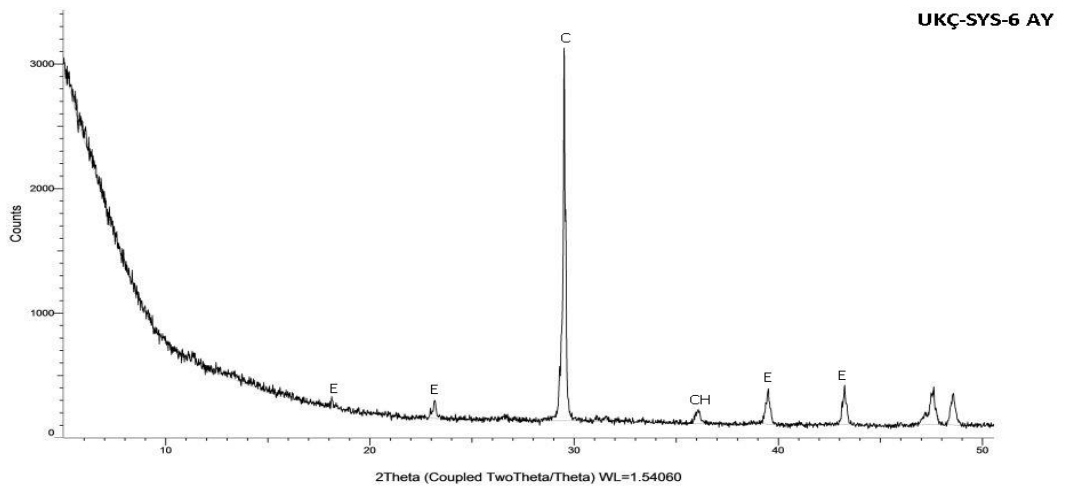
Şekil 4.29 UKÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



Şekil 4.30 UKÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



Şekil 4.31 UKÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları



Şekil 4.32 UKÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında sülfatlı su içeren kum zeminlerde portland kompoze çimento ve uçucu küllü çimento kullanılarak kum zeminde oluşturulan jet grout kolonların taşıma gücüne sülfatlı suyun etkisi incelenmiştir. Jet grout kolonlar laboratuvar ortamında tasarlanan bir deney düzeneği yardımı ile 80 cm çapında 120 boyunda plastik variller içerisinde imal edilmiştir.

- Çalışmada enjeksiyon karışım suyu ve kür suyu olarak normal musluk suyu ve Konya 2. Organize Sanayi Bölgesinde açılan bir sondaj kuyusundan temin edilen sülfatlı yeraltı suyu kullanılmıştır. Sülfatlı yeraltı suyuna TS-3440 göre analiz yaptırılmış olup sülfat içeriği çok güçlü (11484) olarak belirlenmiştir.
- Çalışma kapsamında laboratuvar ortamında en ideal jet grout kolonların hazırlanabilmesi için deneme kolonları imal edilmiş, jet grout imal parametreleri ve kullanılacak kumun fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu belirleme işlemi sonucunda plastik kalıplar içerisinde hazırlanan kum zeminin su içeriğinin % 5-6, rölatif sıkılığının % 41 olarak, jet grout parametrelerin ise enjeksiyon basıncı 20 bar, tij çekme hızı 30 cm/dk, tij dönme hızı 10 dv/dk, enjeksiyon karışımındaki su/çimento oranı ise 1 olarak belirlenmiştir.
- Belirlenen bu jet grout parametreleri ve kumun özellikleri ile aynı boy ve çapta jet grout kolonlar elde edilmiştir
- Portland kompoze çimento (KÇ 32.5 Mpa) ve portland uçucu küllü çimento (UKÇ 42.5 Mpa) kullanılarak 1 ay, 3 ay ve 6 aylık kür süreleri için normal musluk suyundan 1'er sülfatlı yeraltı suyundan 1'er adet olmak üzere 12 adet jet kolon imalatı yapılmıştır.
- İmal edilen jet grout kolonlarını kür süreleri dolduktan sonra plastik varillerden çıkarılıp boy ve çap ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda tüm kolonların yaklaşık aynı boy- çap oranı sahip oldukları tespit edilmiştir. Jet grout kolonların çapları 22-27 cm boyları ise 43-51 cm arasında değişen değerler olarak ölçülmüştür. Sadece KÇ-SYS 1 ay

için hazırlanan jet grout kolonun çapı diğer kolonlara göre daha büyük (35 cm) oluşmuştur.

- Hazırlanan jet grout kolonlarda en az 3'er adet olmak üzere basınç dayanım testleri yapılmak için 4.3 cm çapında 6.5 cm boyunda karot numuneler alınmıştır. Sadece KÇ-SYS 1 ay için hazırlanan 35 cm çapındaki jet grout kolondan numune alınamamış olup bunun sebebi ise kum plastik kaplar içerisine elenirken ideal sıklığın yakalanamamasına bağlanmaktadır.
- Karot alınan jet grout kolonlar daha sonra kırılarak enine ve boyuna kesitlerine bakılmıştır. Bu işlemle daha önceki çalışmalarda da yer alan, jet grout kolonların merkezinden dış yüzeyine doğru iyi çimentolanmış ve az çimentolanmış bölgelerin tespit edilmiştir. Böylece imal edilen jet grout kolonların doğal zemin koşullarına uygun üretilip üretilmediği kontrol edilmiştir.
- Jet grout kolonlardan alınan karotlar üzerine serbest basınç dayanım testi uygulanmıştır (Tablo 5.1).

Tablo 5.1 İmal edilen jet grout kolonların çimento cinslerine ve kür sürelerine göre basınç dayanımları

Kolon Cinsi / Süre (Ay)	Serbes Basınç Dayanımları (Mpa)				
	Karot 1	Karot 2	Karot 3	Ort	Kayıp Ort (%)
KÇ NMS (1)	7.40	-	6.57	6.99	
KÇ SYS (1)	-	-	-	-	-
KÇ NMS (3)	7.62	6.44	-	7.03	
KÇ SYS (3)	3.35	-	7.56	5.45	22.47
KÇ NMS (6)	13.56	12.92	11.76	12.75	
KÇ SYS (6)	8.08	9.67	-	8.88	30.35
UÇK NMS (1)	4.40	3.68	4.11	4.06	
UÇK SYS (1)	3.39	2.95	-	3.17	21.92
UÇK NMS (3)	6.64	-	5.56	6.09	
UÇK SYS (3)	-	3.75	3.17	3.46	43.18
UÇK NMS (6)	7.58	7.65	6.71	7.14	
UÇK SYS (6)	3.03	2.95	3.03	3.01	57.84

- KÇ-NMS ile üretilen kolonlarda ortalama basınç dayanımları kür süreleri bağlı olarak 1 ay için 6.99 Mpa, 3 ay için 7.03 Mpa, 6 ay için 12.75 Mpa olarak hesaplanmıştır.
- KÇ-SYS ile üretilen kolonlarda ortalama basınç dayanımları 1 ay için basınç dayanımı elde edilmezken, 3 ay için 5.45 Mpa, 6 ay için 8.88 Mpa

olarak belirlenmiştir.

- KÇ-NMS-SYS ile hazırlanan kolonlar karşılaştırıldığında 3 aylık kolonlarda % 22.47, 6 aylık kolonlarda ise % 30.35 basınç kaybının olduğu tespit edilmiş olup sülfatlı yeraltı suyunun zamanla birlikte kolonların dayanım kaybının artmasına sebep olduğu anlaşılmıştır.
- UÇK-NMS ile hazırlanan kolonlarda basınç dayanımları her kür süresi ortalama 1 ay için 4.06 Mpa, 3 ay için 6.09 Mpa, 6 ay için 7.14 Mpa olarak belirlenmiştir
- UÇK-SYS ile imal edilen kolonlarda ise basınç dayanımları sırasıyla 1 aylık kolonda 3.17 Mpa, 3 aylık kolonda 3,46 Mpa, 6 aylık kolonda ise 3.01 Mpa olarak hesaplanmıştır.
- UKÇ-NMS-SYS ile imal edilen kolonlar kür süreleri temel alınarak karşılaştırıldığında 1 aylık kolonlarda sülfattan kaynaklan basınç kaybı % 21.12, 3 aylık kolonlarda % 43.18 6 aylık kolonlarda ise % 57.84 olarak hesaplanmıştır.
- KÇ-UKÇ ile imal edilen kolonlara çimento cinslerine göre karşılaştırıldığında ise sülfattan kaynaklanan dayanım kaybı uçucu küllü çimento ile hazırlanan kolonlarda daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu kaybın fazla olması ise uçucu küllü çimentonun kimyasal içeriğinin portland kompoze çimentoya göre daha fazla sülfattan etkilenmesine bağlıdır.
- Basınç dayanımı uygulanan kolonların içyapılarında sülfat etkisinden kaynaklı oluşan etrenjit yapıları zamana bağlı olarak kolonlarda hacimsel artışa sebep olarak basınç dayanımlarını azalttığı düşünülmektedir. Bu etrenjit yapılarının belirlenmesi için dayanım testi uygulanan numunelerden ince kesitler ve toz numunelere alınarak SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır.
- Kolonlardan alınan ince kesit ve toz numunelere uygulanan SEM analizlerinde imal edilen tüm kolon tiplerinin içyapılarında etrenjit kristallerine rastlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon tepkimeleri sonucunda oluşan beton için yararlı olan etrenjit yapıları ile dış sülfat kaynağının etkisi ile oluşan, betonun zamanla hacmini artırıp dayanımını azaltan,

performans ömrünün düşmesine sebep olan etrenjit yapılarının birbirine karıştırılmamasıdır.

- SEM ve EDS analizi yapılan numuneler sonuçlarından hesaplanan (Tablo 5.2) silisyum-kalsiyum (S/Ca), alüminyum-kalsiyum (Al/Ca) oranlarından kolonların iç yapılarında meydana gelen etrenjit oluşum mekanizmaları belirlenmiştir.

Tablo 5.2 İmal edilen kolonlara yapılan EDS analiz sonuçları

JG Kolon Cinsi	S/Ca Oranı	Al/Ca Oranı	Morfolojik Analiz	Etrenjit Oluşum Mekanizması
KÇ NMS (1)	0.040	0.007	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (1)	0.124	0.067	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
KÇ NMS (3)	0.235	0.062	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (3)	0.260	0.063	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
KÇ NMS (6)	0.253	0.060	SEM-EDS	Hidrasyon
KÇ SYS (6)	0.177	0.074	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (1)	0.085	0.012	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (1)	0.370	0.115	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (3)	0.252	0.240	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (3)	0.663	0.168	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi
UKÇ NMS (6)	0.115	0.053	SEM-EDS	Hidrasyon
UKÇ SYS (6)	0.259	0.220	SEM-EDS	Hidrasyon+Sülfat Etkisi

- KÇ-NMS-SYS kullanılarak hazırlanan kolonların kür sureleri göz önünde tutularak S/Ca ile Al/Ca oranlarına bakıldığında sülfat etkisinden kaynaklan bir artışın meydana geldiği gözlenmektedir. Örnek olarak kompoze çimento kullanılarak NMS ve SYS ile hazırlanan 3 aylık kolonlarda sülfat etkisinden dolayı S/Ca oranı 0,235'den 0.260'a Al/Ca oranı ise 0,062'den 0,063'e yükselmiştir. Buda bize sülfatlı yeraltı suyu ile oluşturulan kolonlarda etrenjit miktarında sülfat etkisinden kaynaklanan bir artışın meydana geldiğini göstermektedir.
- UÇK-NMS-SYS kullanılarak hazırlanan kolonlarda da tıpkı kompoze çimentoda olduğu gibi dış kaynaklı sülfattan dolayı S/Ca, Al/Ca oranlarında artış meydana geldiğini bununda etrenjit oluşum mekanizmasının tetikleyerek daha fazla etrenjit kristallerinin oluşmasına sebep olduğu gözlenmiştir.
- KÇ-UKÇ karşılaştırılmasında ise dış kaynaklı sülfatın etkisi sonucunda UÇK-SYS kullanılarak imal edilen jet grout kolonlarda KÇ-SYS kullanılarak imal edilen kolonlara göre S/Ca, Al/Ca oranlarının daha

yüksek olduğu belirlenmiştir. Uçucu küllü çimentonun kimyasal bileşiminin sülfatlı yeraltı suyundan daha fazla etkilenecek dayanım kaybını fazla olmasına neden olduğu anlaşılmaktadır.

- Jet kolonlardan kür süreleri göz önünde bulundurularak alınan toz numunelere yapılan XRD analiz sonuçları değerlendirildiğinde normal musluk suyu ile hazırlanan kolonlarda oluşan top etrenjit pik değerlerinin sülfatlı yeraltı suyu ile hazırlanan kolonlarda oluşan pik değerlerinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir.
- Jet kolonlardan alınan numunelere yapılan XRD analizleri çimento cinslerine göre değerlendirildiğinde ise UKÇ kullanılarak hazırlanan kolonlar KÇ kullanılarak hazırlanan kolonlara göre daha fazla etrenjit oluşumuna rastlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında sülfatlı yeraltı suyu ve normal musluk suyu ile farklı çimento tiplerinde kullanılarak oluşturulan jet grout kolonlardan alınan numunelere serbest basınç dayanım testleri, SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde hem sülfatlı yeraltı suyunun hem de kullanılan çimento cinsinin kum zeminde oluşturulan jet kolonların taşıma gücünü doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır.

Sülfatlı yeraltı suyunun olduğu zeminlerde oluşturulacak Jet grout kolonlarının dayanımı hesaplanırken, kullanılacak çimento sınıfına bağlı olarak dayanım kayıpları dikkate alınmalıdır.

5.2. Öneriler

İleriki dönemlerde yapılacak buna benzer çalışmalardan daha etkin sonuçların elde edilmesi için:

- Daha önce yapılan çalışmalarda bahsedildiği gibi sülfatın beton üzerindeki etki mekanizmasının çok karmaşık ve uzun periyotlu bir süreç olduğundan beton dayanımına sülfat etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için en az 2 yıllık kür sürelerinde hazırlanan numunelerde basınç dayanım kaybı incelenmelidir.

- Yapılan çalışmalardan ideale daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi için laboratuvar ortamında hazırlanan zeminler içinde imal edilen jet kolonlarda değil, doğal zemin içerisinde imal edilen kolonlar üzerinde deneysel çalışmalar yapılmalıdır.
- Bu çalışmada sadece kum zeminlerde imal edilen jet kolonlar üzerinde sülfat etkisinden kaynaklı performans değerlendirmesi yapılmıştır. Aynı yöntemle farklı zemin tiplerinde ya da homojen olmayan tabakalı zeminlerde de benzer çalışmalar yapılmalıdır.
- Farklı jet teknikleri ile imal edilen jet kolonlar üzerinde de benzer çalışmalar yapılarak beton üzerindeki sülfat etkisi irdelenmelidir.
- 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.

***** Bu çalışma Selçuk Üni. Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü 16401087 numaralı bilimsel araştırma projesi ile desteklenmiştir.**

KAYNAKLAR

- Akman, M, S, 4. Ulusal Beton Kongresi (1996), Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, s. 1-12
- Abdalkadar, A, H,M, Lynsdate, C,S, Cripps, J, C, 2015 The Effect on Cement Mortar Subject to Sulfate Exposure at Low Tempeture, Elsevier, Volume 78, p. 102-111
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite) 2002, DEÜ Müh. Fak. Yayınları, İzmir, s.89-200
- Baş, K, Temel Takviyesi Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler 2006 İTÜ Yüksek Lisans Tezi
- Bakım, A, M, Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi 2007 Süleyman Demirel Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- 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.
- 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
- 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.
- Colleparidi, M., A State-art-of-art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete.
- Damidot, D. ve Glasser, F. P. (1995). Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaCO₃-H₂O closed system at 25°C and the influence of Na₂O. Advances in Cement Research, 7, (27), 129-134.
- Demiral, Ö, T, 2017 Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Ensitüsü, Sülfatlı Su İçerikli Kum Zeminlerde Portland Çimento ve Portland Sülfata Dayanıklı Çimento Kullanılarak Oluşturulan Jet Grout Kolonlarının Taşıma Gücüne Sülfatın Etkisi, Konya
- 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.

- Doğanışık S.K., 2010, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jet grout kolondaki gerilme dağılığının incelenmesi, İstanbul
- Durgunoğlu H. T., 2004. “Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erdoğan, Turhan, 2003. Beton, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ankara
- Essler R., 2012, The design of jet grouting from concept to execution, Grouting and Deep Mixing, ASCE, 2071-2081
- 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
- Gallavresi, F., 1992, Grouting Improvement of Foundation Soils Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, ASCE, Cilt 1, s. 1-39.
- Gollop, R. S., Taylor, H. F. W. (1994). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack II. Sulfate-resisting Portland cement: Ferrite Composition and hydration chemistry. Cement and Concrete Research, 24, (7), 1347-1358.
- Gökalp A., Düzceer R., (2002). “Ground Improvement by jet grouting technique for foundations of a natural gas combined cycle power plant in Turkey” Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, October 2002, Nice, France.
- Ilıca T., 2008, “ Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klor Geçirimsizliği”, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
- Kirsch F., Sondermann W., 2001. “Ground improvement and its numerical analysis”. Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., İstanbul 2001, A.A. Balkema, S. 1775 – 1778
- Kılınç, K., 2003. “ Beton Karışım Suyundaki Magnezyum Sülfat, Sodyum Sülfat ve Sodyum Sülfür Tuzlarının Taze ve Sertleşmiş Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kuleli, A, Karahan (Malatya - Darende Arası; KM:35+894-37+500) Tünelinde Karşılaşılan Problemlerin Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi 2011 Niğde Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- Kuzel, H.-J. (1996). Initial Hydration Reactions and Mechanisms of Delayed Ettringite Formation in Portland Cements, Cement and Concrete Composites, 18, (3), 195-203.

- Küçükali, N., 2008, Demiryolu altyapısının jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik 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.
- Küsin, C. C, Jet - grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi 2009 Çukurova Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- Lunardi P., 1977. "Ground Improvement by Means of Jet-Grouting", Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, Vol 1 No:2, pp. 65 - 86.
- Melegari, C. ve Garassino, A. L., 1997, Seminar on Jet Grouting, CI_Premier Pte. Ltd., Singapore.
- Moseley, M., P. ve Kirsch., K., 2004. Ground Improvement, Spon Press, New York, 160-196.
- Müllauer, W., Beddoe, R. E. ve Heinz, D., 2013, Sulfate attack expansion mechanisms, Cement and Concrete Research, 52, 208-215.
- Nakanishi, W., and Miki, G. 1984. Lion city leaps ahead with MRT- Singapore mass, rapid transit, Tunnels and tunneling, Oct. Pari
- Nicholson, A.L., 1963. Discussion, ICE Conf. on Grouting and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths, London
- Omar, S, Baghabra, Al-Amoudi (2002), Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, Cement and Composites, 24, 305-316
- Pinto, A., Tomasio, R., Pita, X. ve Pereira, A., 2012, Ground Treatment Solutions Using Jet-Grouting, Grouting and Deep Mixing 2012, 2112-2121
- Rahman, M. M. ve Bassuoni, M. T., 2014, Thaumassite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation, Construction and Building Materials, 73, 652-662.
- Taylor, H. F. W. (1999). Distribution of sulfate between phases in Portland cement clinkers. Cement and Concrete Research, 29, (8), 1173-1179.
- Tekin İ., 2010, " Sulfat Etkisine Maruz Farklı Çimento Harçlarındaki Makro Boşluk Yapısı Gelişiminin Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi ile İncelenmesi", Doktora Tezi Gazi Üniversitesi, Ankara
- Tosun, K., 2007, Farklı çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Trevi K., 1994. "Columnar Treatment", Illustrative Report, Cesena

- 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.
- Tunçdemir , F., 2004. Türkiye Mühendislik Haberleri, _MO, 430-2, Ankara, Türkiye.
- Ustabas, İ., 2008, Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Uyan,M., Kılınç, K., 2003. “ Beton Karışım Suyundaki Sülfat TuzlarınınÇimento Harcı Özelliklerine Etkisi “, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul
- Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. ve Bruce, D. A., 1994, Ground Control And Improvement, New York, John Wiley, P
- Sağlamer A., Düzceer R., Gökalp A.,Yılmaz E., 2001, “Recent applications of jet grouting for soil improvement in Turkey”, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 1-3, Pages 1839-1842.
- Sert S., Önalp A., Özocak A., 2007, Derin yumuşak kil üzerinde köprü ayağı temeli, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu 29-30 Kasım, Antalya
- 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.
- 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.
- Stark, T., D., Axtell, P., J., Lewis, J., R., Dillon, J., C., Empson,W., B., Topi, J., E. Ve Walberg, F., C., 2009. Soil Inclusions in Jet Grout Columns, DFI Journal, Vol.3, No.1, May,33-44.
- Wong K.S., Li J.C., Goh. A.T.C., Poh K.B., Oishi E., 1999. „Effect of Jet Grouting on Performance of Deep Excavation in Soft Clay“”, Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics- FMGM99, Singapore, 279 - 284.
- Xiong, C, Jiong, L, Xu, Y, Chu, H, Jin, M, Zhang, Y, 2016, Deterioration of Pastes Exposed to Leaching External Sulfate Attack and the Dual Actions, Elsevier, Volume 116, p. 52-62

Xu, X, Zhang, S, Shazin, A, M, Dong, Z, Dong, Li, Hongzhi, C. (2018) Effect of Calcium Sulfate Type and Dosage on Properties of Calcium Aluminate Cement Based Self-leveling Mortar, Elsevier, Volume 167, p. 235-262

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

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).

<http://www.keller.com.au/techniques/#soilcrete-jet-grouting>:

<http://www.haywardbaker.com/>:

<https://www.cimsa.com.tr/tr>

<http://www.akcansa.com.tr/>

<http://me.mam.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlar/elektron-mikroskop-laboratuvarlari-0>

<http://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-difraksiyon-laboratuvari-xrdl>

<http://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-difraksiyon-laboratuvari-xrdl>

<https://www.sbfs.fr/>

EKLER

EK-1 Tablolar Listesi

- Tablo 2.1. Jet grout saha uygulamasında tercih edilen parametreler (Lunardi, 1997)
Tablo 2.2. S/Ç oranına göre kolon dayanımları (Baumann, 1984)
Tablo 3.1. Saha uygulamalarında jet yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Burke,2004)
Tablo 3.2 Hazırlanan kum zemine ait indeks değerleri
Tablo 3.3 Plastik varillerde sıkıştırılan kum zeminin fiziksel özellikleri
Tablo 3.4 Konya II Organize Sanayi Bölgesinden alınan yeraltı suyunun analiz sonuçları
Tablo 3.5 Beton temas sularının zararlı etkinlik dereceleri için (TS-EN-3440, 2014) sınır değerleri
Tablo 3.6 Deneysel çalışmalarda kullanılan kolon imalat parametreleri
Tablo 4.1 İmal edilen jet grout kolonların boy, çap değerleri ve kür süreleri
Tablo 4.2 İmal edilen jet grout kolonların çimento cinslerine ve kür sürelerine göre basınç dayanımları
Tablo 4.3 İmal edilen jet grout kolonlara yapılan EDS analiz sonuçları
Tablo 5.1 İmal edilen jet grout kolonların çimento cinslerine ve kür sürelerine göre basınç dayanımları
Tablo 5.2 İmal edilen kolonlara yapılan EDS analiz sonuçları



EK-2 Şekiller Listesi

- Şekil 2.5 Tek eksenli basıç dayanımı – elastisite odülü arasındaki ilişki (Trevi, 1994)
- Şekil 2.6 Kazı yan yüzeyinde jet uygulaması sonucunda sehim değerleri (Wong vd, 1999)
- Şekil 2.7 İmalatı yapılan kolonlar üzerinde gün esaslı basıç test sonuçları (Bell vd, 2003)
- Şekil 2.8 $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 içeren çözeltilerde zamama göre genleşme (Santhanam vd 2002)
- Şekil 3.3 Zemin enjeksiyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Tunçdemir, 2004)
- Şekil 3.2 Permeasyon enjeksiyonu uygulama alanları
- Şekil 3.3 Çatlak enjeksiyonunun şematik gösterimi (Gallavresi, 1992)
- Şekil 3.4 Kompaksiyon enjeksiyonunun temsili gösterimi (Essler, 2000)
- Şekil 3.5 Bir akaryakıt tankında kompaksiyon enjeksiyonu ile zemin iyileştirmesi (Bakım, 2007)
- Şekil 3.6 Jet grout yönteminin şematik gösterimi
- Şekil 3.7 Zemin tipi ve dane boyutuna göre jet grout yönteminin kullanım aralığı
- Şekil 3.8 Jet grout enjeksiyon ekipmanları (Erkan,2010)
- Şekil 3.9 Jet enjeksiyon ekipmanlarından monitör ve nozullar
- Şekil 3.10 Jet grout yöntemi saha uygulama aşamaları
- Şekil 3.11 Jet grout enjeksiyon teknikleri
- Şekil 3.12 Tek akışkanlı (jet 1) sistemi (Keller-Groud)
- Şekil 3.13 Çift akışkanlı (jet 2) sistemi (Keller-Groud)
- Şekil 3.14 Üç akışkanlı (jet 3) sistemi (Keller-Groud)
- Şekil 3.15 Jet kolon üretiminde kolon üretim zamanının ve enjeksiyon basıncının kolon çapına etkisi
- Şekil 3.16 Kademeli ve sürekli tij çekme teknikleri
- Şekil 3.17 Jet enjeksiyon nozulunun kesit görünümü
- Şekil 3.18 Kazık Süreklilik Deneyi
- Şekil 3.19 Jet Grout Kolonlarında Çap Kontrolü
- Şekil 3.20 Sülfat etkisine maruz kalmış yapı elemanları
- Şekil 3.21 Klasik sülfat etkisinin şematik olarak gruplandırılması
- Şekil 3.22 Buhar kürü geçirdikten sonra bir yıl suda bekleyen örneklerde agrega çimento hamuru ara yüzeyinde etrenjit birikimi
- Şekil 3.23 Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nem etkisiyle etrenjit oluşumu
- Şekil 3.24. Dış sülfat etkisinin ortaya çıkardığı heterojen içyapı hasarı
- Şekil 3.25 Etrenjit kristalinin beton hamurundaki görünümü (Akçansa)
- Şekil 3.26 Sıcaklık, CO_2 ve SO_4^{2-} konsantrasyonlarına bağlı olarak etrenjit ve diğer karbonatlaşma ürünlerinin oluşumu (Tosun, 2010)
- Şekil 3.27 beton üzerinde sülfat etkisi ile oluşan bozulmalar
- Şekil 3.28 Sülfat maruz bırakılmış silindirik numunelere yapılan basınç dayanım testi (Yıldız, 2010)
- Şekil 3.29 SEM-EDS ve XRD analiz cihazları (TÜBİTAK)
- Şekil 3.30 Tez çalışmasında kullanılan jet grout düzeneği
- Şekil 3.31 Doğal kum zemine ait dane boyu dağılım eğrisi
- Şekil 3.32 Jet grout deney düzeneğinin kontrol paneli
- Şekil 3.33 Doğal kum kullanılarak plastik varillerin içinde kum zemin ortamının hazırlanması
- Şekil 3.34 Farklı ebatlardaki plastik variller kullanılarak imal edilen deneme kolonları
- Şekil 3.35 Enjeksiyon karışımının hazırlanması ve deney düzeneğinin haznesine konması
- Şekil 3.36 Üretilen jet grout kolonların üretim aşaması
- Şekil 3.37 Jet grout kolonların imalatından sonra kum zeminin doygun hale getirilmesi ve su kaybının önlenmesi için ağızlarının kapatılması
- Şekil 4.1 İmal edilen jet grout kolonların plastik varillerden çıkarılması boy ve çap kontrollerini yapılması
- Şekil 4.2 KÇ-SS (1 Ay) kullanılarak hazırlanan kolonun yüzeyinde oluşan spirallenme
- Şekil 4.3 İmal edilen jet grout kolonlarından silindirik karot alınma işlemleri iyi ve az çimentolanmış bölgelerin tespiti
- Şekil 4.4 KÇ ve UÇK ile hazırlanan jet grout kolonlardan alınan karot numuneler
- Şekil 4.5 Karot numunelere uygulanan serbest basınç dayanım testi
- Şekil 4.6 KÇ-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması
- Şekil 4.7 UÇK-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması
- Şekil 4.8 KÇ-UÇK-NMS-SYS ile hazırlanan kolonların basınç dayanımlarının karşılaştırılması
- Şekil 4.9 KÇ-NMS ile hazırlan 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
- Şekil 4.10 KÇ-SYS ile hazırlan 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
- Şekil 4.11 KÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları

- Şekil 4.12 KÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.13 KÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.14 KÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.15 UKÇ-NMS 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.16 UKÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.17 UKÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.18 UKÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.19 UKÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.20 UKÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların SEM-EDS analiz sonuçları
Şekil 4.21 KÇ-NMS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.22 KÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.23 KÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.24 KÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.25 KÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.26 KÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.28 UKÇ-SYS 1 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.29 UKÇ-NMS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.30 UKÇ-SYS 3 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.31 UKÇ-NMS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları
Şekil 4.32 UKÇ-SYS 6 aylık jet grout kolonların XRD analiz sonuçları

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Sinan Akbay
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Çorum / 12.10.1984
Telefon : -
Faks : -
e-mail : sinanakbay@dsi.gov.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Sincan Lisesi, Sincan, Ankara	2003
Üniversite	: Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir	2010
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Konya	Devam ediyor
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013 - ...	Devlet Su İşleri 4. Bölge Müdürlüğü	Kontrol Mühendisi