

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YERALTI SUYUNDAKİ SÜLFAT ORANININ JET ENJEKSİYONU  
KOLONLARININ KALİTESİNE ETKİSİ**

**FURKAN HAMZA HARPUTLUGİL**

**JEOLOJİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2018**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAY SAYFASI

Furkan Hamza HARPUTLUGİL tarafından hazırlanan “Yeraltı Suyundaki Sülfat Oranının Jet Enjeksiyonu Kolonlarının Kalitesine Etkisi” adlı tez çalışması 25/06/2018 tarihinde jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.



**Danışman:** Doç. Dr. Mustafa FENER  
Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

**Jüri Üyeleri:**



**Başkan** : Prof. Dr. Mehmet Çelik  
Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



**Üye** : Doç. Dr. Mustafa FENER  
Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı



**Üye** : Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU  
Niğde Ömer HALİSDEMİR Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN**

**Enstitü Müdürü**

## ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

25.06.2018

Furkan Hamza HARPUTLUGİL



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ YERALTI SUYUNDAKİ SÜLFAT ORANININ JET ENJEKSİYONU KOLONLARININ KALİTESİNE ETKİSİ

Furkan Hamza HARPUTLUGİL

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa FENER

Jet Grout yöntemi günümüzde zemin iyileştirme metotları arasında hızla yayılan ve en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Sıvılaşmaya karşı önlem alınması amacıyla, taşıma gücünü artıran kolon olarak, tünellerde ayna arkasını desteklemek ve aşırı sökülme yavaşlatmak amacıyla, karayollarında viyadük ve köprü ayaklarının desteklenmesi gereken noktalarda, inşaat alanlarında geçirimsiz perde oluşturulması amacıyla ve daha birçok farklı amaçla kullanılmaktadır. Bu yöntemde zemine yüksek basınçlı çimento-su karışımı enjekte edilerek zeminin parçalanması ve zemin-çimento karışımı olan bir kolon teşkil etmesi amaçlanır. Zemini parçalayan sistemde su-çimento karışımının yanı sıra basınçlı hava ve yüksek basınçlı suda bulunabilir.

Sülfat betonun hammaddesini oluşturan materyaller ile reaksiyona girerek betonda çatlama meydana getiren ve dayanım kayıpları oluşturan bir etkidir. Sularda bulunan sülfat betona temas ettikçe betonu çürüterek servis ömrünü azaltır ve maddi hasarlara yol açar. Sülfat ve beton ilişkisini ve bu mekanizmayı konu alan birçok çalışma yapılmıştır. Birçok çalışma ise halen devam etmektedir.

Jet-Grout kolonları zemin ve çimento karışımından oluştuğu için sülfatın betona olan etkisine benzer bir etkinin jet grout kolonlarında da gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu etkinin kesin olarak ortaya konabilmesi için gerçekleştirilen bu çalışmada CEM I SR - 5 (C<sub>3</sub>A içeriği düşük) ve CEM II 42,5 çimentosunun kullanıldığı, killi zemin ile karıştırılmış yapay jet grout karot numuneleri laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Bu karot numuneler 100 ile 12000 mg/l yoğunlukta sodyum sülfat içeren sularda 4 ay bekletilmiş ve serbest basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Zamana, sülfat yoğunluğuna ve çimento türüne göre elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre sodyum sülfat içeren suların jet grout kolonlarının dayanımlarını düşürdüğü anlaşılmıştır.

**Haziran 2018,112 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Jet Grout, Sülfat, Yeraltı Suyu, Sülfat Miktarı, Zemin İyileştirme

## ABSTRACT

### MASTER THESIS

#### THE EFFECT OF THE SULFATE CONSANTRATION ON THE QUALITY OF JET-GROUT COLUMNS

Furkan Hamza HARPUTLUGIL

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geological Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa FENER

Jet Grout method is the most preferred and a fast-spreading soil stabilisation method among others today. It is used as a precaution to liquefaction, as a column for improvement of durability, to stabilise the material behind the tunnel face and to prevent over dismantling on the tunnel walls. The Jet grout method which has a wide range of applying areas, is used as an impermeable wall in construction sites, strengthener on bridge and highway foots. In this method, very high pressurized cement-water mix is injected to soil and tears it. Target of this treatment is to form a soil-crete which is a mixture of soil and cement-water solution. Also there may be high pressurized air and very high pressurized water in the system.

Sulfate is an agent which reacts with the raw materials of the cement. This reaction creates micro fractures and cracks in concrete and results in durability loss. As the sulphate containing waters contact with concrete, durability of concrete decreases, concrete starts to decompose and shortens its lifetime. This process results in propret damage. There are many researchers whose working field is sulfate-cement relationship and they still continue their researchs, but still this process remains uncertain.

Jet grout columns consist of soil and cement mixture. Because of this, the reaction which occurs between cement and sulfate, is expected to be seen between jet grout columns and sulfate. To prove this mechanism, two types of cements, one is resistant to sulfate and other is normally used cement, is used and mixed with clayey soils to form unnatural jet-grout column core samples. This samples kept in sodium sulfate solutions which starts from 100 mg/l saturation to 12000 mg/l saturation for 4 months. Samples then tested for unconfined compression test and the results with changing time, sodium sulfate saturation and type of cement is examined. Results showed that sulfated waters decrease the strength of jet grout columns.

**June 2018, 112 pages**

**Key Words:** Jet Grout, Sulfate, Groundwater, Sulfate Consantration, Soil Stabilization

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda ve araştırmalarımın her safhasında bilgi, öneri ve tecrübelerini benden esirgmeden paylaşan, gerek lisansüstü çalışmalarında, gerekse hayat mücadelesinde her sıkıntıda yanımda olan değerli hocam sayın Doç. Dr. Mustafa FENER'e, hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim sırasında bilgileriyle ufkumu sürekli geliştiren, çalışma ahlakıma yön veren ve birçok sıkıntıda yardımına koşan, hayatımın sonuna kadar hep bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalanmak istediğim Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nün öğretim üyelerinden Prof. Dr. Kâmil KAYABALI'na, gerek zemin mekaniği alanında ve gerekse diğer birçok konuda şüana kadar hep yanımda olan ve hayatımın sonuna kadar da yanımda olmasını istediğim değerli büyüğüm, akıl hocam Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevli Uzm. Aydın GÖKÇE'ye bugünlere gelmemde en büyük emeği veren, her sıkıntıda yanımda olan ve başarılarımı gözyaşlarıyla kutlayan babam Erol HARPUTLUGİL, annem Nur HARPUTLUGİL ve kardeşlerim Şamil ve Numan HARPUTLUGİL'e, çalışmalarım sırasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve sürekli yanımda olan kıymetli eşim Selin Büşra HARPUTLUGİL'e, çalışmalarım sırasında konuşmaları ile devamlı olarak beni motive eden başta sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağrı KARAMAN olmak üzere, Araş. Gör. Muhammet KUTLU'ya ve Arş. Gör. Abdullah Yiğit GÜNGÖR'e ve lisans döneminden beri fikirleri ve çalışmalarını ile sürekli bana yardımcı olan sayın Ali ÖZKESER'e en derin duygularla teşekkür ederim.

Furkan Hamza HARPUTLUGİL

Ankara, Haziran 2018

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1 Zemin İyileştirmesi ve Yöntemleri .....	22
3.2 Jet Grout Yöntemi .....	25
3.2.1 Jet grout sistemleri.....	33
3.2.2 Jet grout yönteminde kolon çapını ve kolon kalitesini etkileyen faktörler .....	36
3.2.3 Jet grout uygulama alanları.....	47
3.2.4 Jet grout kolonlarının kalite kontrolü.....	50
3.3 Sülfatın Beton Üzerindeki Etkisi .....	53
3.3. Sülfatın etki mekanizması ve reaksiyonlar sonucu oluşan yeni materyaller .....	55
3.3.2 Sülfat etki mekanizmasına karşı alınabilecek önlemler .....	60
3.3.3 Sülfat etkisini belirleyen deneyler .....	62
3.4 Deneysel Çalışma .....	64
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	103
KAYNAKLAR .....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	110

## SİMGELER DİZİNİ

$Al_2O_3$	Alümina
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
$Ca_6[Al(OH)_6]_2.(SO_4)_3.26(H_2O)$	Etrenjit
$CaCO_3.CaSO_4.CaSiO_4.15H_2O$	Tomasit
$CaSO_4.2H_2O$	Jips
$CaO$	Kalsiyum Oksit
$C_3A$	Trikalsiyum Aluminat
$C_4AF$	Tetrakalsiyum Alüminoferrit
$C_2S$	Dikalsiyum Silikat
$C_3S$	Trikalsiyum Silikat

### Kısaltmalar

CSH	Kalsiyum-Silika-Hidrate Jeli
EDS	Elektron Dağılımı Spektrometresi
GEF	Gecikmiş Etrenjit Formasyonu
JET-1	Tek akışkanlı Jet Grout Sistemi
JET-2	Çift akışkanlı Jet Grout Sistemi
JET-3	Üç Akışkanlı Jet Grout Sistemi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
XRD	X-Işını Difraktometresi



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Ankara il nüfusunun yıllara göre değişimi.....	2
Şekil 2.1 Jet grout sisteminin blok şema olarak görünüşü (Lunardi , 1997).....	4
Şekil 2.2 Zemin türlerine göre üretilecek jet grout kolonunun serbest basınç dayanımı (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır) .....	7
Şekil 2.3 Zemin ve çimento partiküllerinin etkileşimi için önerilen 3 farklı model (a-sızıntı modeli, b-kumlarda gerçekleştiği düşünülen kum erozyon modeli, c-killi zeminlerde meydana geldiği düşünülen kil erozyon modeli)(Modoni , 2006'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	9
Şekil 2.4 Jet grout uygulamasında zemin ve jet arasındaki etkileşim (Ho, 2007'den değiştirilerek alınmıştır.) .....	10
Şekil 2.5 Shen vd. (2013a) geliştirdikleri Twin-Jet metodunun diyagram şeması (ilgili yayından değiştirilerek alınmıştır) .....	12
Şekil 2.6 Composite-Pipe metodunda geliştirilen vakum hücresinin diyagramı (Shen vd. 2013b'den değiştirilerek alınmıştır) .....	13
Şekil 2.7 Composite-Pipe metodunun imalat adımları a)muhafaza ile delgi, b)composite-pipe'in yerleştirilmesi, c)Jet grout işlemi, d)muhafaza ve composite-pipe'in geri çekilmesi, e)composite-pipe'in temizlenmesi ve deliğin kapatılması (Shen vd. 2013b'den değiştirilerek alınmıştır) .....	13
Şekil 2.8 Zorlu koşullarda gerçekleştirilen jet grout uygulaması (Pinto vd. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	16
Şekil 3.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002) .....	24
Şekil 3.2 Jet grout uygulama yöntemi (Croce vd. 2014).....	27
Şekil 3.3 Jet grout sisteminin ekipmanları (BST Mühendislik) .....	29
Şekil 3.4 Jet grout sistemine ait delgi makinesi .....	30
Şekil 3.5 Jet grout sistemine ait basıncı üreten motor ünitesi .....	31
Şekil 3.6 Jet grout sistemine ait mikser ünitesi .....	31
Şekil 3.7 Jet grout sisteminin genel görünüşü ve çimento silosu.....	32
Şekil 3.8 Jet enjeksiyonun tij çekme sistemleri a) adımli(basamaklı sistem) ve b)sürekli çekme sistemi (Shibazaki 2003'den alınmıştır).....	33
Şekil 3.9 Jet grout uygulama sistemleri a) Jet-1 b)Jet-2 c)Jet-3 .....	34
Şekil 3.10 Nozüllerden fırlatılan taneciklerin basınçlarının zemin tarafından soğurulmasına ait veriler (Croce vd. 2004) .....	38
Şekil 3.11 Dayanım, kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Nikbakhtan ve Ahangari 2010) .....	38
Şekil 3.12 Farklı enjeksiyon basınç, debi ve jet uygulama sürelerinden elde edilen kolon yarıçapları (Yonekura ve Shibazaki, 1996'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	39
Şekil 3.13 Jet grout sistemlerinde dinamik basınç değerleri ile nozüle olan uzaklık ilişkisi (farklı enjeksiyon basınçları ile değerlendirilmiştir)(Vleeschauwer ve Maertens, 2000'den değiştirilerek alınmıştır) .....	39
Şekil 3.14 Zemin tipine bağlı olarak kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos vd. 1994'den değiştirilerek alınmıştır) .....	40
Şekil 3.15 Çimento partiküllerinin nozülden ayrılması ile oluşan efektif hızları ve nozülden olan uzaklıklarının farklı nozül tiplerine göre karşılaştırılması (Shibazaki,2003'den değiştirilerek alınmıştır).....	40

Şekil 3.16 Çimento/Su oranının dayanım ve kolon çapı üzerindeki etkisi (Nikbakhtan ve Ahangari, 2010'dan değiştirilerek alınmıştır).....	41
Şekil 3.17 Çekme ve dönme hızına bağlı olarak kolon çapı ve serbest basınç dayanımı ilişkisi (Nikbakhtan ve Ahangari, 2010'dan değiştirilerek alınmıştır).....	43
Şekil 3.18 Jet grout imalatında tijn yukarı çekilme metotları a)basamaklı-adımlı sistem b)sürekli çekme sistemi.....	44
Şekil 3.19 Bazı zemin türlerinde imal edilen jet grout kolonlarının dayanım değerleri (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır).....	45
Şekil 3.20 Zeminlerin jet grout uygulamaları için sökülebilirliğinin sınıflandırılması (Burke,2004'den alınmıştır).....	47
Şekil 3.21 Jet grout yöntemi kullanım alanları a)dolgu tabanı b)kazı sistemlerinde taban sızdırmazlığı c)geçici tünel destek sistemleri d)barajlarda sızdırmazlık perdeleri (Croce vd., 2014'den alınmıştır).....	49
Şekil 3.22 Jet grout yöntemi uygulama örnekleri a) ve b) perdeler, c) radyeler d)tüneller e)saftlar f)blok temeller.....	49
Şekil 3.23 Deneme kolonlarının açığa çıkartılara çap ölçümü yapılması.....	50
Şekil 3.24 Bilimsel bir çalışma için imal edilen jet grout kolonunun tamamının açığa çıkarılması.....	51
Şekil 3.25 Jet grout kolonunun çekme ve yükleme testlerine tabii tutulması.....	52
Şekil 3.26 Pile Integrity Test ile jet grout kolonunda ölçüm yapılması (www.zeminarastirma.com,2018).....	52
Şekil 3.27 Etrenjit kristallerinin morfolojisi (iğneli yapı).....	57
Şekil 3.28 Magnezyum sülfatın beton yüzeyinde oluşturduğu morfolojik değişiklikler (Yang vd. 2018'den alınmıştır).....	59
Şekil 3.29 Sodyum sülfatın beton yüzeyinde meydana getirdiği morfolojik değişimler (Yang vd. 2018'den alınmıştır).....	59
Şekil 3.30 Sodyum sülfatın boru şeklinde oluşturulmuş betonlarda çatlama mekanizması a)294 günlük kür süresi b)343 günlük kür süresi c)420 günlük kür süresi (Ma vd. 2018'den alınmıştır).....	60
Şekil 3.31 Serbest basınç deneyi.....	63
Şekil 3.32 Beton numunelerinin sülfatlı sulara maruz bırakılarak test edilmesi.....	63
Şekil 3.33 Pirinkayalar geçidinde devam etmekte olan tünel ve stabilizasyon çalışmaları.....	64
Şekil 3.34 Çalışmada kullanılan zeminin granülometri eğrisi.....	65
Şekil 3.35 Zemine ait likit limit deney sonuçlarının grafik ile gösterimi.....	66
Şekil 3.36 Jet grout numuneleri için kullanılan PVC kalıplar.....	66
Şekil 3.37 Laboratuvara getirilip homojen biçimde karıştırılan zemin numunesi.....	67
Şekil 3.38 Laboratuvarda kullanılan etüv.....	67
Şekil 3.39 Numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutarken kullanılan serbest basınç cihazı..	68
Şekil 4.1 Saf su üretim cihazı ve sülfat karışımlarını hazırlamak için kullanılan mikser.....	70
Şekil 4.2 Kür içerisinde 90 gün bekleyen numunelerde meydana gelen morfolojik değişiklikler.....	71
Şekil 4.3 12000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış Normal Portland çimentolu numune.....	72
Şekil 4.4 6000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış normal Portland çimentolu numune.....	72
Şekil 4.5 6000 mg/l sülfata 90 gün maruz kalmış normal Portland çimentolu.....	73
Şekil 4.6 6000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış Portland çimentolu numune.....	73
Şekil 4.7 Numune seti A'ya ait dayanım verileri.....	78
Şekil 4.8 Numune seti B'ye ait dayanım verileri.....	78
Şekil 4.9 Numune seti C'ye ait dayanım verileri.....	78
Şekil 4.10 Numune seti D'ye ait dayanım verileri.....	79

Şekil 4.11 Numune seti E'ye ait dayanım verileri .....	79
Şekil 4.12 Numune seti F'ye ait dayanım verileri .....	79
Şekil 4.13 Numune seti G'ye ait dayanım verileri .....	80
Şekil 4.14 Numune seti H'ye ait dayanım verileri .....	80
Şekil 4.15 Numune seti J'ye ait dayanım verileri.....	80
Şekil 4.16 Numune seti K'ye ait dayanım verileri .....	81
Şekil 4.17 Numune seti L'ye ait dayanım verileri.....	81
Şekil 4.18 Numune seti M'ye ait dayanım verileri.....	81
Şekil 4.19 Numune seti N'ye ait dayanım verileri .....	82
Şekil 4.20 Numune seti O'ya ait dayanım verileri .....	82
Şekil 4.21 Numune seti P'ye ait dayanım verileri .....	82
Şekil 4.22 Numune seti R'ye ait dayanım verileri.....	83
Şekil 4.23 Numune seti S'ye ait dayanım verileri .....	83
Şekil 4.24 Numune seti T'ye ait dayanım verileri.....	83
Şekil 4.25 Numune seti U'ya ait dayanım verileri .....	84
Şekil 4.26 Numune seti V'ye ait dayanım verileri .....	84
Şekil 4.27 Numune seti Y'ye ait dayanım verileri .....	84
Şekil 4.28 Numune seti Z'ye ait dayanım verileri.....	85
Şekil 4.29 Sülfatsız su içerisinde çimentoların tepkileri .....	86
Şekil 4.30 100 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	86
Şekil 4.31 200 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	87
Şekil 4.32 400 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	87
Şekil 4.33 600 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	88
Şekil 4.34 1000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	88
Şekil 4.35 2000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	89
Şekil 4.36 3000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	89
Şekil 4.37 4000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	90
Şekil 4.38 6000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	90
Şekil 4.39 12000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri .....	91
Şekil 4.40 28 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları .....	92
Şekil 4.41 60 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları .....	92
Şekil 4.42 90 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları .....	93
Şekil 4.43 120 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları .....	93
Şekil 4.44 CEM II 42,5 çimento ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıplarının grafiği (lineer) .....	94
Şekil 4.45 CEM II 42,5 çimento ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıplarının grafiği (logaritmik).....	95
Şekil 4.46 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 28 günlük dayanımları .....	95
Şekil 4.47 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 60 günlük dayanımları .....	96
Şekil 4.48 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 90 günlük dayanımları .....	96
Şekil 4.49 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 120 günlük dayanımları .....	97
Şekil 4.50 CEM I SR-5 ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıpları.....	97
Şekil 4.51 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması .....	98

Şekil 4.52 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 60 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması .....	99
Şekil 4.53 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 90 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması .....	99
Şekil 4.54 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 120 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması .....	100
Şekil 4.55 Kür sürelerine göre CEM II 42,5 ile hazırlanan numunelerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmış dayanımları.....	100
Şekil 4.56 Kür sürelerine göre CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmış dayanımları.....	101



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Ankara il nüfusunun yıllara göre değişimi.....	2
Çizelge 2.1 Jet Grout yönteminin türleri ve bunlara bağlı parametreler (Lunardi 1997'den değiştirilerek alınmıştır).....	5
Çizelge 2.2 İzmit'te inşası devam eden CarrefourSA iş merkezinin zemininin depreme karşı sergilediği davranış .....	8
Çizelge 3.1 jet grout sistemlerinde kullanılan teknik parametreler (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır).....	36
Çizelge 3.2 Uygulanan jet grout yöntemi ve uygulanan zemine göre oluşturulan ortalama kolon çapları (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır).....	37
Çizelge 3.3 Zemin türüne göre imal edilen kolonlarda bulunan çimento miktarları (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır) .....	42
Çizelge 3.4 Su/Çimento oranına bağlı olarak jet grout kolonlarının farklı zemin türlerinde oluşturulmuş örnekleri için dayanım değerleri (Baumann,1984'den değiştirilerek alınmıştır).....	42
Çizelge 3.5 Zemin türlerine göre oluşturulan jet grout kolonlarının taşıma kapasiteleri (Melegari ve Garassino, 1997'den değiştirilerek alınmıştır).....	45
Çizelge 3.6 Bazı zemin türlerinde imal edilen jet grout kolonlarının dayanım değerleri ve elastisite modülü oranları (Durgunoğlu, 2004) .....	46
Çizelge 3.7 Zemine ait likit limit deney sonuçları.....	65
Çizelge 3.8 Deneyde kullanılan çimento tipleri, sülfat yoğunlukları ve kür süreleri.....	69
Çizelge 4.1 CEM II 42,5 ile hazırlanmış numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları (MPa cinsinden, “-“ işaretli numunelere deney yapılamamıştır) .....	74
Çizelge 4.2 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımı deneyleri sonuçları (MPa cinsinden).....	75
Çizelge 4.3 CEM II 42,5 ile hazırlanan numunelerin ortalama dayanım değerleri.....	76
Çizelge 4.4 CEM I SR - 5 kullanılarak imal edilmiş numunelerin ortalama dayanım değerleri (MPa cinsinden) .....	77

## 1. GİRİŞ

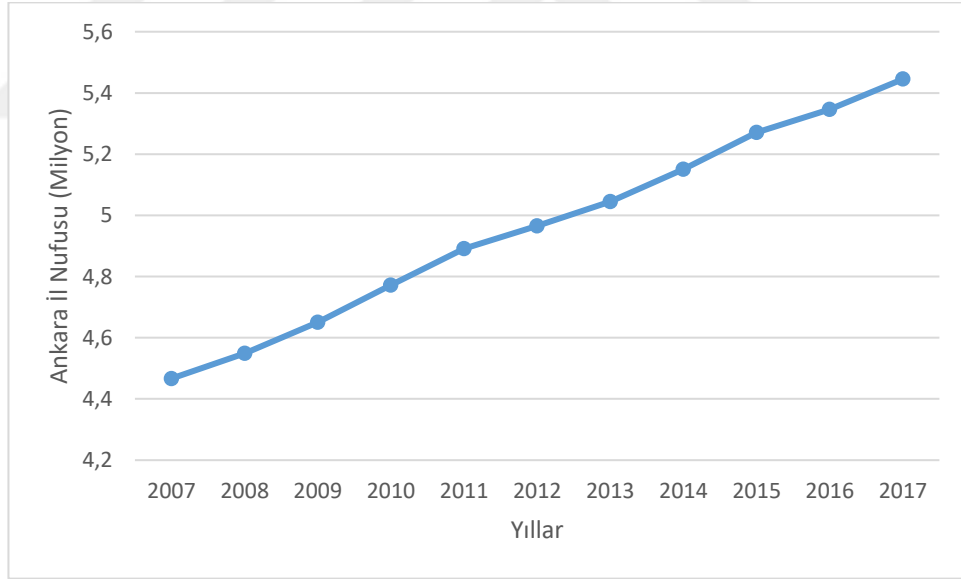
21.yy insanlığın hizmetine sunduğu modern teknoloji ve yeniliğin yanı sıra, insan ihtiyaçlarını değiştirerek birçok farklı alanda uygarlıkları kendilerini geliştirmeye mecbur bırakmıştır. Kent merkezlerinde ve büyük şehirlerde gelişen eğitim imkanları, sosyal imkanlar, iş olanakları ve benzeri diğer birçok faktör nedeniyle nüfus yoğunluğu kent merkezlerine doğru kaymakta, kırsaldan kente doğru hızlı bir göç yaşanmaktadır. Nüfusu artan şehirlerde gerek coğrafi engeller ve gerekse şehir içi ulaşım problemleri ve buna bağlı olarak ulaşım süresinin uzaması nedeniyle şehirlerin yüzey alanları büyüme hızları giderek yavaşlamaktadır. Örnek teşkil etmesi bakımından TÜİK verilerine göre Ankara ilinde 2007 yılında nüfus 4.466.756 iken 2017 yılı itibariyle 5.445.026 olmuştur (Çizelge 1.1) (Şekil 1.1). Nüfus yoğunluğu verilerine göre 2000 yılında km<sup>2</sup> ye düşen insan sayısı 166 iken, 2017 yılında bu rakam 222 olmuştur. Artan nüfusla birlikte aynı yüzey alanında ev, işyeri, kamu binaları, alışveriş merkezleri ve ortak kullanım alanlarının yapılması giderek güçleşmeye başlamıştır. Bu durum daha yüksek katlı binaların yapılmasına ve yapının inşa edileceği zeminin seçilme durumunu bir lüks haline getirmiştir. Bir örnekle özetlemek gerekirse, 1950 yılında Ankara ilinde yapılacak olan bir konut için yer seçilirken, zeminin mühendislik özellikleri ve istenilen konum-cephe özellikleri uyuşmaz ise farklı bir alanı projelendirmek mümkün olabiliyordu. Günümüze gelindiğinde ise 1950 yılına göre şehir büyümüş ve nüfus artmış olduğundan yapıya göre zemin seçme şansı kalmamıştır. Bunun yerine M.Ö. 1500’lü yıllardan beri ilkel manada kullanılan ancak 1950’li yıllarda büyük bir ivmelenme ile gelişen zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Yapıya uygun zemin aramak yerine, yapının inşa edilmek istenildiği bölgede bulunan zemin iyileştirilerek istenilen mühendislik özelliklerinin sonradan, yapay olarak ilgili zemine kazandırılması durumu söz konusu olmuştur.

Zemin iyileştirme yöntemleri çok çeşitli olmasına karşın ülkemizde ekonomik olma faktörü iyileştirme yöntemi seçerken birincil önceliği almaktadır. Jet Grout yöntemi fiyat/performans bakımından diğer zemin iyileştirme metotlarına göre öne çıkmaktadır. Kabaca tanımlama yapılırsa, zemin içerisine yüksek basınçta çimento, su ve hava karışımı enjekte edilerek yer altında zemin-çimento karışımından oluşan bir kolon oluşturularak

zeminin taşıma gücü, sıvılaşma direnci, oturma miktarı gibi parametrelerde iyileştirmeye neden olmaktadır.

Çizelge 1.1 Ankara il nüfusunun yıllara göre değişimi

2007	4466756
2008	4548939
2009	4650802
2010	4771716
2011	4890893
2012	4965542
2013	5045083
2014	5150072
2015	5270575
2016	5346518
2017	5445026



Şekil 1.1 Ankara il nüfusunun yıllara göre değişimi

Kolon yer altında oluşturulurken, yerinde enjeksiyon sistemi ile çalıştığından, zeminle karışarak soilcrete adı verilen, yarı zemin ve yarı çimentodan müteşekkil bir fiziksel yapıyı meydana getirmektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak jet-grout kolonları çimentoyu etkileyen fiziksel faktörlerden etkilenmektedirler. Çimentonun fiziksel ve

kimyasal yapısını etkileyen en önemli parametrelerden biriside yeraltı suyu veya zemininde bulunan sülfat miktarıdır. Sülfat zaman içerisinde çimento dayanımını etkileyerek hem fiziksel yapısını hem de kimyasal yapısını bozarak kolonun çalışma sistemini değiştirecektir.

Sülfatlı yeraltı suları ve sülfatlı zeminler Orta Anadolu başta olmak üzere Türkiye'nin birçok bölgesinde sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Büyüyen inşaat alanları ve yapıların fiziksel şekillerinin gelişen mimari ile birlikte giderek büyümesi sonucu hemen hemen her inşaat projesinde sülfat miktarı Türk Standartları Enstitüsüne göre "yüksek" sınıflamada yer alan yeraltı suları ve zeminler karşımıza çıkmaktadır. Böyle alanlarda imal edilecek jet-grout kolonlarının uzun vadede çalışma performansları üzerine çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır ve bu konu araştırılmaya son derece açık bir konudur.

Bu tezin konusunu oluşturan çalışma kapsamında, laboratuvar ortamında yapay jet-grout karotları kalıplar içerisinde oluşturularak farklı miktarlarda sülfat içeren kürlere maruz bırakılmıştır. Karot numuneleri 7 gün, 14 gün, 28 gün, 2 ay, 3 ay ve 4 aylık süreçlerde farklı miktarlarda sodyum sülfat içeren kürlere maruz bırakılmış ve bu süreçte fiziksel özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler gözlemlenmiştir. Karot numunelerinde imalat sonrasındaki morfolojik değişimler ince kesit aracılığı ile gözlemlenmiş ve serbest basınç deneyi ile numunelerin dayanımları belirlenmiştir. Deneylerin sonuçları grafikler halinde değerlendirilerek jet-grout kolonları üzerinde sülfat miktarının zamana bağlı etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışma 5 ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde jet-grout yönteminin tarihi gelişimi, literatür verileri yer almaktadır. Üçüncü bölümde jet-grout yönteminin kullanıldığı alanlar, sistemleri, ilgili ekipmanlar yöntemin avantajları ve dezavantajları ve imalat sonrası yapılan testler ve deney programı ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölümün devamı sülfat iyonlarının beton ve dolaylı olarak jet-grout kolonları üzerindeki etkisini detaylı biçimde ifade eden bilgiler içermektedir. Dördüncü bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölümde ise deney sonuçları üzerine öneriler ve tartışma bölümü yer almıştır.

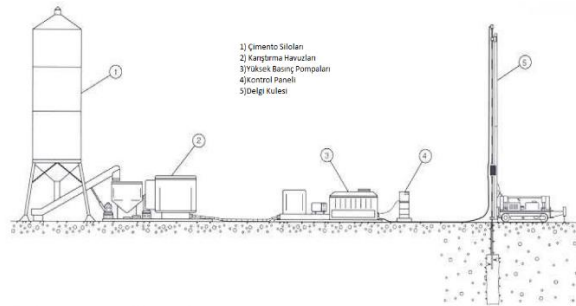


## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

İlk olarak Japonya’da 1950’li yıllarda denemeleri yapılan jet grout yöntemi 1970’li yıllara gelindiğinde ismi duyulan bir metot olmuştur. Üzerinde çok sayıda araştırmacının çalışması ve ar-ge çalışmalarının büyük bir hızla yapılması sonucunda büyük bir ivmelenme ile gelişmiş ve Japonya’dan Avrupa’ya, oradan Amerika’ya kadar yayılmış ve günümüzde dünyanın hemen hemen her yanında uygulanabilen bir zemin iyileştirme metodu haline gelmiştir. Jet grout sistemleri üzerindeki çalışmalar halen devam etmektedir. Sistemin karşılaştığı zorluklar ve dezavantajlarını ekarte etmek için sürekli olarak araştırmalar yapılmaktadır.

Zaman içerisinde yapılan iyileştirmeler ve teknolojik eklemeler aracılığıyla jet-grout sistemi günümüzdeki haline ulaşmıştır. Bu bölümde jet grout kolonlarının tarihçesi, gelişimi, uygulanma alanları ile ilgili literatür verilerinin bir kısmından özet olarak bahsedilmiştir.

Lunardi (1997) tarafından yapılan çalışmada, jet-grout teknolojisinin kısaca tanımı yapıldıktan (Şekil 2.1) sonra tipik olarak kullanılan bazı uygulama örnekleri verilmiş ve farklı zeminlere uygunluğu, tasarım ile ilgili dikkat edilmesi gereken hususlar araştırılmıştır. İmalat sırasında kontrol aşamaları, inşaat mühendisliği ve çevre mühendisliği alanındaki uygulama alanları, teknolojik gelişmeler ve bazı uygulama örnekleri detaylı biçimde incelenmiştir.



Şekil 2.1 Jet grout sisteminin blok şema olarak görünüşü (Lunardi 1997)

Lunardi (1997) tarafından Jet-Grout sistemi şematize edilmiş ve parçaların işlevleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Yöntemin türleri ve bunlara bağlı olarak değişen parametreler çizelge halinde sunulmuştur (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Jet Grout yönteminin türleri ve bunlara bağlı parametreler (Lunardi 1997'den değiştirilerek alınmıştır)

Sistem	Akışkan	Basınç (bar)	Nozul Sayısı ve Çapı	Çıkış Hızı (cm/dk)	Dönme Hızı (rpm)	Su/Çimento Oranı	Boşaltma (l/dk)
Tek Akışkanlı	Çimento	400 - 550	1-2 x 2-5	15-100	5-15	1.0 - 1.5	70-600
Çift Akışkanlı	Çimento Hava	400-550 10 - 12	1-2 x 2-5	10-30 10-30	4-8 -	1.0 - 1.5	70-600 4000-1000
Üç Akışkanlı	Çimento Hava Su	50 -100 10 -12 400-500	1-2 x 4-5 1-2 x 2-3	6-15 6-15 6-15	4-8 - -	1.2 - 1.5 - -	80-200 4000-1000 40-100

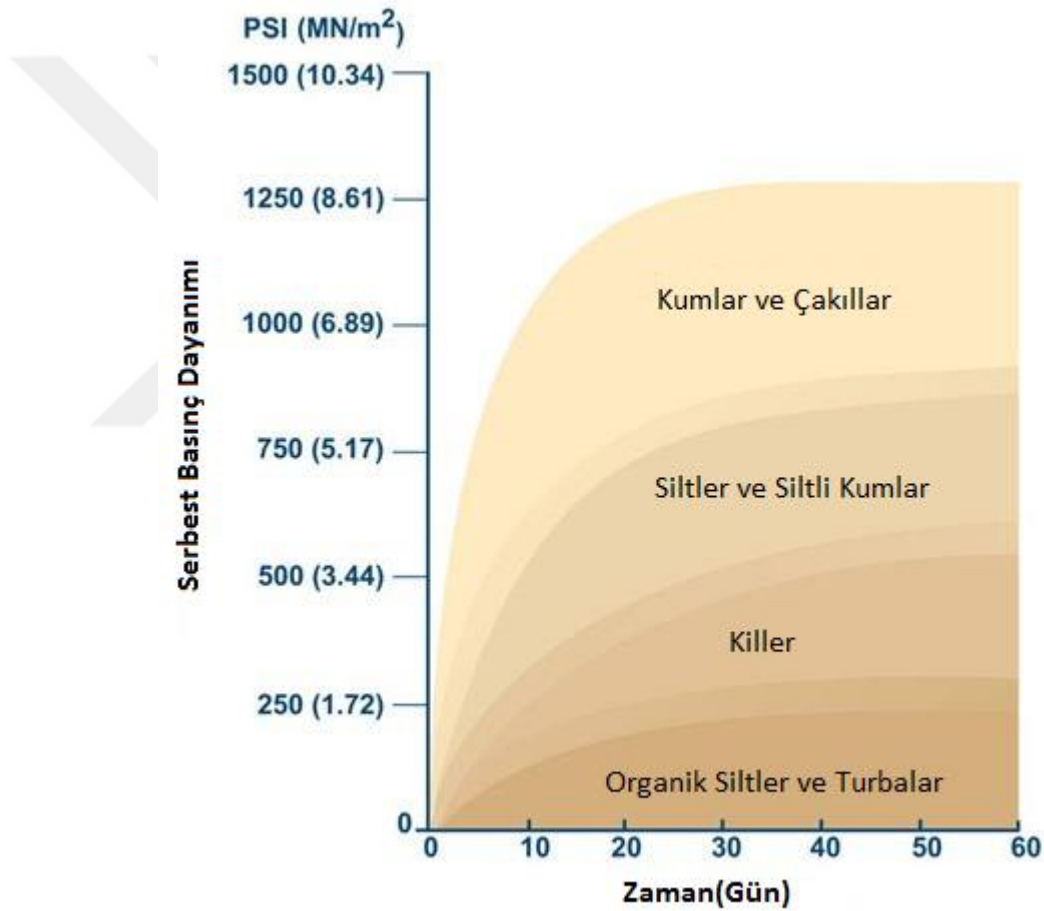
Wong ve Poh (2000) Singapur Posta Merkezi'nin temel kazısı sırasında yapılmış jet grout çalışmasını kullanarak, jet enjeksiyonunun temas halinde bulunduğu zemin üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Örnek olay olarak seçilen çalışmada kalın ve yumuşak denizel kil tabakası mevcuttur. Bu tabaka temel derinliğine kadar kazılmış ve kazı alanında diyafram duvar kullanılarak suyun inşaat alanını basmasının önüne geçilmiştir. Ancak bölgede yer alan kalın kil tabakasının hassas olan eski ve büyük yapılar inşa edilmeden önce şişme ve oturma davranışları sergilemesi sık görülen ve giderilmesi maliyetli bir durumdur. Bu durumu ortadan kaldırmak için derin kazılarda sadece diyafram duvar yeterli olmamaktadır. Örnek olayda jet grout sistemi önerilmiş ve diyafram duvarlarda ve arka kısımda kalan zeminde oluşan yer değiştirmeler kaydedilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Durgunoğlu vd. (2003) yaptıkları çalışmada, batı Türkiye’de yer alan İzmir-Tire Organize Sanayi Bölgesinde kurulacak olan sigara fabrikasında zemin iyileştirme çalışması kapsamında yapılan jet grout çalışmasını konu almışlardır. Toplamda 20.000 m<sup>2</sup>’lik alanda kurulacak olan bir fabrika binası, 2 katlı bir yönetim ofisi ve ek binaların yer almakta olduğu belirtilmiştir. Yapılan tüm işlerin İngiliz Standardına göre kalite kontrol açısından takip edildiği raporlanmıştır. Yapının kurulacağı alan olarak Ege Denizi kıyısında yer alan İzmir şehrinin 70 km güneydoğusunda bulunan Küçük Menderes alüvyal düzlüğü belirlenmiştir. Bölgenin 1. Dereceden (maksimum risk taşıyan) deprem bölgesi olduğu belirtilmiştir ve bölgenin jeolojisi ve stratigrafik yapısı hakkında genel olarak bilgi verilmiştir. Buna göre bölge alüvyal çökellerden oluşan, silt, kum ve çakıllı sedimanter malzemedan oluşan bir zemin yapısına sahiptir. Toplamda 32.000 metre jet kolon uygulaması yapılarak, bölgede olası bir sıvılaşma riskine karşı önlem alınmaya çalışılmıştır. Yapılan uygulama hem Jet-1 sisteminde hem de Jet-2 sisteminde yapılmıştır. İmal edilen kolonlardan karotlar alınmış ve laboratuvar ortamında mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Araziye yapılan ölçümlerde ise kolonlardan çap ölçümü, doğrudan yükleme deneyi gibi deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak Jet-1 ve Jet-2 sistemleri kolon çapı, dayanım, çimento dozajı gibi parametreler aracılığı ile karşılaştırılmıştır. Buradan hareketle çift akışkanlı jet sistemi (Jet-2) ile imal edilen kolonların tek akışkanlı jet sistemine nazaran daha heterojen olduğu ve ayrıca kolon çaplarının daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Jet-1 sistemi ile üretilen kolonların aynı miktarda yükleme testlerine tabi tutulduğu bir ortamda daha yüksek dayanım değerleri ve daha düşük miktarda deformasyon gösterdikleri saptanmıştır. Projenin asıl amacının taşıma gücünü artırmak ve oturmaları azaltmak olmaması, öncelikli amacın deprem esnasında sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak olması itibariyle projede Jet-2 uygulaması tercih edilmiştir.

Shibazaki (2003), jet grout yönteminin tarihçesinden bahsetmekte ve jet grout kolonu oluşturmada etkili olan faktörlerden bahsetmektedir. Buna göre hava basıncı, enjeksiyon hızı, nozül şekli ve yapısı, nozül sayısı, dinamik sıvı basıncı, hava jetinin hızı, çekme hızı gibi parametreler üzerindeki veriler tartışılmış ve oluşturulan kolonların şekli, boyutu ve kalitesi üzerine yorumlar getirilmiştir. Zemin iyileştirme teknolojisinde gelinen son

noktanın poligonal şekilli kolonlar üretmek için elverişli olduğu belirtilmiş ve üretilebilecek kolon şekilleri ve üretim metotları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Burke (2004), jet grout pazarının hızla büyüdüğünü ve birçok farklı firma ve çalışanın farklı ekipmanlarla jet-grout kolonu imalatı yaptığını belirtmiştir. Her firma ve çalışanın farklı özellikte cihaz ve sistem kullanıyor olmasına dikkat çeken Burke jet sistemlerini ve türlerini tanıttıktan sonra jet kolonunun çapı ve mukavemetine etki eden parametreleri ayrı ayrı ele alarak tartışmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Zemin türlerine göre üretilecek jet grout kolonunun serbest basınç dayanımı (Burke, 2004'den değiştirilerek alınmıştır)

Durgunoğlu (2004), 17 Ağustos depremi ve sonrasında ülkemizde zemin iyileştirmesinin öneminin tekrar gözler önüne serildiğini ve iyileştirme yöntemleri içerisinde jet grout

yönteminin diğer yöntemlere göre öne çıktığını ifade etmiştir. Jet grout sistemi tanıtılmış ve imalat parametreleri, kalite kontrol parametreleri verilmiştir. Jet grout kolonlarının kullanım amaçları ve olası kullanım alanları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Sıvılaşmaya karşı olan kullanım ile ilgili teorik altyapı ve hesaplamalar ifade edildikten sonra 17 Ağustos 1999 depremi sırasında inşası halen devam eden ve zemin iyileştirmesinin bir kısmı yapılmış bir kısmı ise yapılmamış CarrefourSA İzmit sahası örnek olay olarak incelenmiştir. Sahada yapılan çalışmalarda jet grout ile iyileştirme ve sıvılaşmaya karşı önlem alınması önerilmiş ve yapılan hesaplamalarda sıvılaşmanın önlenebileceği ortaya konulmuştur. Nitekim deprem gerçekleşmiş, ilgili alanda iyileştirmenin yapıldığı bölümlerde sıvılaşma olmamıştır (Çizelge 2.2). Hasar beklenilenin oldukça altında gerçekleşmiştir. Yapılan incelemeler ile Chinese kriterine göre sıvılaşması beklenmeyen ML zeminin sıvılaşma kapsamında değerlendirilmesinin daha doğru olacağı kanaati ortaya konmuştur.

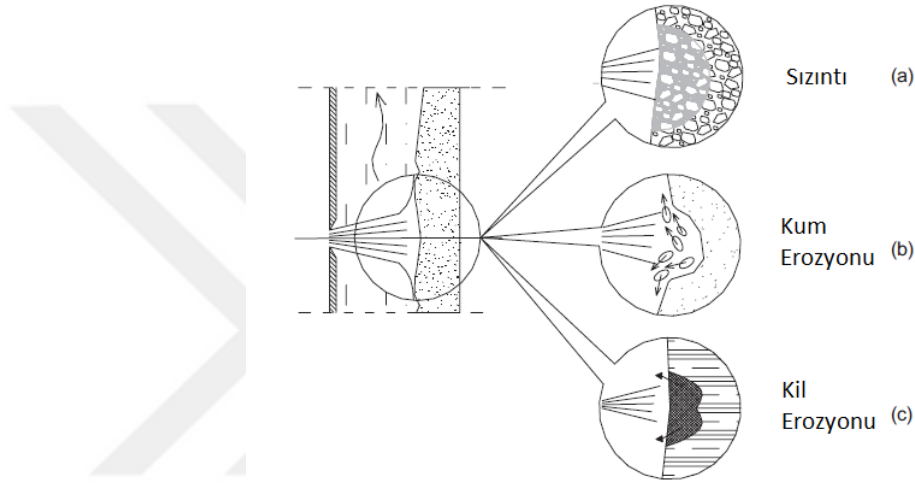
Çizelge 2.2 İzmit'te inşası devam eden CarrefourSA iş merkezinin zemininin depreme karşı sergilediği davranış

Kısım	Uygulanan İslah Aşaması*	İslah olmaksızın öngörülen davranış	Gözlenen davranış	İslahın Gözlenen Etkinliği
Süpermarket yapısı (60% tamamlanmış)	Siltli kum seviyesinde değişirme oranı %7 üst seviyelerde %2 Jet-grout kolonlar	Sıvılaşma FS ~ 0.6 Kum kaynamaları beklenmiyor $\Delta H \approx 6$ ila 10 cm	Yapısal veya zemin hasarı yok Kum kaynaması veya oturma yok	Sıvılaşma ile ilgili hasar önlenmiş; Devirsel kayma birim deformasyonları azaldı, boşluk suyu basıncı artışı önlenmiş.
Otopark yapısı	3.3 m yükseklikte önyükleme dolgusu yüklenmiş ve kaldırılmış Sentetik drenler mevcut, sahanın sadece %10'unda jet-grout imalatı yapılmış	Sıvılaşma FS ~ 0.7 Kum kaynamaları beklenmiyor $\Delta H \approx 7$ ila 11 cm	Oturmalar 7 ila 10 cm (tahmin) Kum kaynaması yok	Önyükleme dolgusu sıvılaşma direncini bir miktar arttırdı. Sentetik drenler deprem esnasında boşluk suyu basıncı artışını azaltmadı ancak kum kaynamasını önlemeye yardımcı olmuş olabilir
Lot C	Deprem esnasında sentetik drenler yerleştirilmiş, 3.3 m yükseklikte önyükleme dolgusu mevcut. Jetgrout yok.	Sıvılaşma FS~ 0.75 (dolu altında) Kum kaynamaları beklenmiyor $\Delta H$ ölçüldü, Tahmine gerek yok	10 ila 12 cm oturma ölçüldü Kum kaynaması yok	Sentetik drenler deprem sonrası konsolidasyonda kum kaynamasını önlemeye yardımcı oldu.
Komşu depolar ve binalar	Yok	Sıvılaşma FS~0.6** $\Delta H \approx 6$ ila 12 cm** (varsayılan)	Binalar altında 5 ila 10 cm oturmalar Kum kaynaması yok	--

\* Kocaeli depremi esnasında / \*\* Zemin koşullarının CarrefourSA sahası ile benzer olduğu varsayımı ile

Modoni vd. (2006) yaptıkları çalışmada jet grout uygulamalarında enjeksiyon malzemesinin nozüller ile zemin arasında aldığı yolun şekli, partikül hızları verilerini

kullanarak, çimento ve zemin arasındaki ilişkiyi ele almışlardır. Buna göre tek akışkanlı jet sisteminde çimento partiküllerinin hızının, nozülden olan uzaklığa, nozül çapına, akış hızına ve çimento partikülünün kinematik viskozitesine bağlı olduğunu açıklamışlardır. Çimentonun zemini yırtarak, zemin içinde kendine yer bulması olayını 3 farklı model ile açıklamışlardır (Şekil 2.3). Çakıllı, kumlu ve killi zeminler için farklı mekanizmalar olduğunu geçmiş çalışmalardan örnekler vererek açıklamaya çalışmışlardır. Ortamın doygunluğuna bağlı olarak önerilen farklı modellerin ve mekanizmaların gerçekleşeceğini ileri sürmüşlerdir.



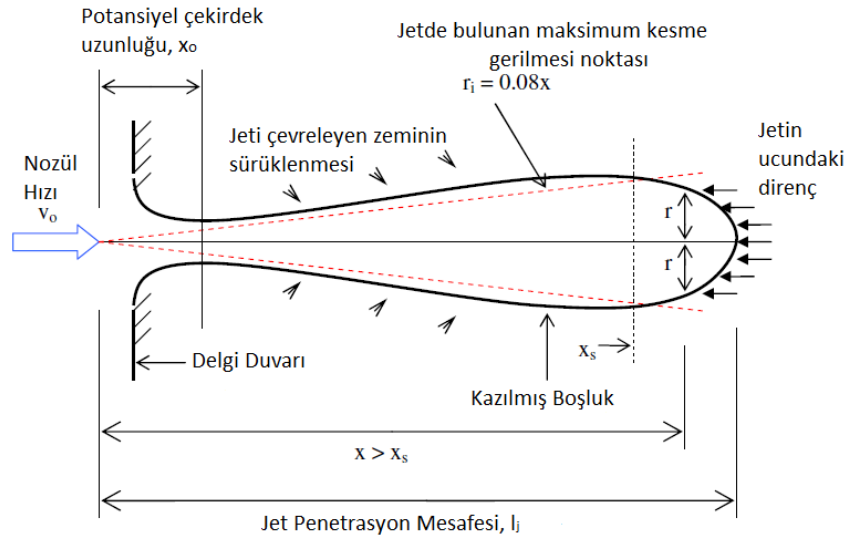
Şekil 2.3 Zemin ve çimento partiküllerinin etkileşimi için önerilen 3 farklı model (Modoni , 2006'dan değiştirilerek alınmıştır)

a.sızıntı modeli,

b.kumlarda gerçekleştiği düşünülen kum erozyon modeli,

c.killi zeminlerde meydana geldiği düşünülen kil erozyon modeli

Ho (2007) yaptığı çalışmada, akışkan ve zemin etkileşimini konu almış ve araştırmaları sonucunda jet-grout sürecini matematiksel bir model ile tanımlamıştır. Buna göre zemin mekaniği ilkeleri ve jet hidrodinamikleri kullanılmıştır. Zemin içindeki jet penetrasyonunun nozül mesafesi, nozül çapı ve nozül ile zemin direnci arasındaki basınç farkına bağlı olduğu ifade etmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Jet grout uygulamasında zemin ve jet arasındaki etkileşim (Ho, 2007'den değiştirilerek alınmıştır.)

Bu modele göre jet çıkış noktasındaki ortalama dinamik basıncın zemin direncinin en üst değeriyle eşitlendiği ana kadar penetrasyonun devam edeceğine değinmiştir. Yapılan gerçek jet grout karşılaştırmalarına göre önerilen modelin ince taneli zeminler için uygun olduğu, kaba taneli zeminler için ise gerçek değerden daha düşük bir tahminde bulunmakta olduğu belirtilmiştir. Ayrıca modelin zemin boşluklarına doğrudan penetrasyonun olduğu, iyi yıkanmış çakıllı zeminlerde uygulanamayacağı açıklanmıştır.

Nikbakhtan ve Osanloo (2008), Jet grout sisteminin kısa bir tanımını yapmıştır. Jet grout sisteminin zemin üzerinde parçalayıcı ve tahrip edici etkisine değinilmiştir. Çalışmada jet grout uygulamasının yapılmasından önce ve sonra zemindeki durumlar incelenmiştir. Bu durumun irdelenmesi için 5 farklı deney (serbest basınç, 3 eksenli basınç deneyi, direk kesme, Brazilian testi ve Schmidt çekiç testi) yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre enjeksiyon basıncı ve akış hızını artırınca serbest basınç değerlerinde logaritmik biçimde artış yaşanmaktadır. Örnek olay olarak çalışmada İran'ın kuzeybatısında yer alan Shahriar barajında uygulanan jet grout örnekleri incelenmiştir. İncelenme amacıyla 6 farklı jet kolonundan örnekler alınmıştır. Numunelere uygulanan sonuçlar değerlendirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Malinin vd. (2010), Jet grout yönteminin etkinliğini belirleyen parametreleri araştırmışlardır. Yöntemin etkinliğini doğrudan belirleyen parametrenin kolon çapı olduğu kanısını ortaya koyduktan sonra bu parametreyi etkileyen enjeksiyon hacmi, basınç, zemin tipi, nozül çapı, tij çekme ve tij dönme hızına bağlı olduğunu ifade etmiştir. Araştırmacılar ilgili parametrelerin kolon çapı üzerindeki etkisini anlamak amacıyla farklı mekanik özellikteki zeminlerde deneme kolonları oluşturmuşlar ve farklı çekme hızları, farklı dönme hızları ve farklı enjeksiyon basınçları gibi parametreleri değiştirerek elde ettikleri verileri grafikler halinde sunmuşlardır. Elde edilen verilere göre kolon çapını en önemli miktarda etkileyen faktörün zemin tipi olduğu kanısına varmışlardır. Çalışma yapılmadan önce zeminin iyi tanımlanması ve kohezyon değerine göre seçimlerin yapılması gerektiği tavsiyesinde bulunmuşlardır.

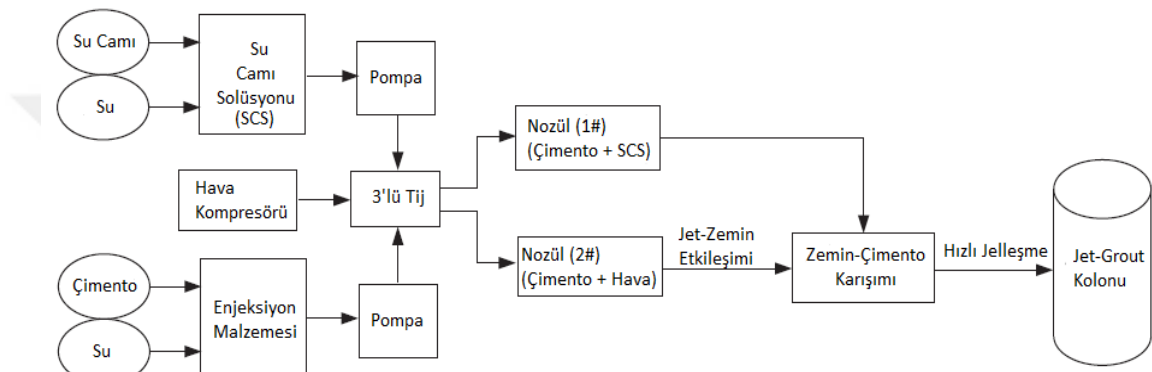
Nikbakhtan ve Ahangari (2010) yaptıkları çalışmada, jet grout kolonlarını oluşturmada kullanılan sistemin ve birçok farklı parametrenin, kolonların çapı ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma amacıyla dönme hızı, basınç, yukarı çekme hızı, su/çimento oranı, su basıncı ve su akış hızı gibi parametreleri değiştirerek 3 farklı jet kolonu oluşturmuşlar ve kolonların farklı derinliklerinden aldıkları çap ölçümleri ve aynı derinliklerden aldıkları karot numunelere serbest basınç dayanımı testi uygulayarak karşılaştırmalar yapmışlardır.

Flora vd. (2012), yeraltı su seviyesinin altında olacak olan ve suyun drenajını önleme amaçlı yapılan bariyerlerin jet grout sistemi ile inşa edildiği durumda karşılaşılabilecek problemlerle ilgili detaylı bilgiler vermişlerdir. Arazi şartlarında ve kolon imalatında meydana gelebilecek çap farklılıkları, eğik olma gibi parametrelerle çalışabilecek 4 farklı imalat geometrisi oluşturmuş ve simülatör sisteminde denemişlerdir. Elde ettikleri bulguları yorumlamışlardır.

Shen vd. (2013a) yaptıkları çalışmada, yumuşak zeminin hızlı biçimde sertleştirilmesini amaçlayan bir teknoloji geliştirmişlerdir. Çalışmada Twin-Jet metodunu tanıtmışlar ve katkı olarak sodyum silikat kullanmışlardır (Şekil 2.5). Uygulama için hem düşey (kumlu zeminde), hem de yatay (killi zeminde) denemeler yapmışlardır. Arazi çalışmalarını zemin ve enjeksiyon malzemesinin 5-10 sn. arasında jelleşmeye başladığını göstermektedir.

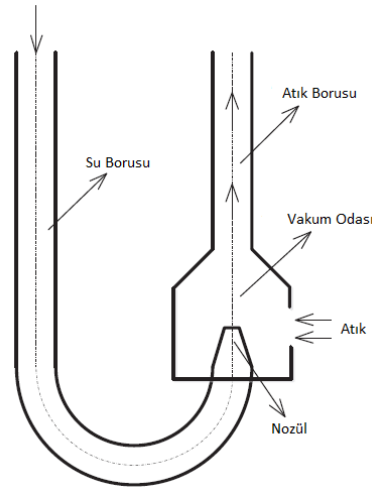


Kumlu zeminlerdeki uygulama için elde edilen sonuçlarda %81-%95 arası RQD değerleri ile beraber 1,1 m çapında kolonlar oluşmuş ve serbest basınç deneylerinde 5-6 MPa arasında dayanım değerleri vermiştir. Killi zemin denemelerinde ise CPT testi ile kolon çapının 1,2 metre olduğu ve 14 günlük serbest basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonucun 0,5 MPa olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki bu yeni metod hem kumlu hem de killi zeminlerde kullanılabilir.

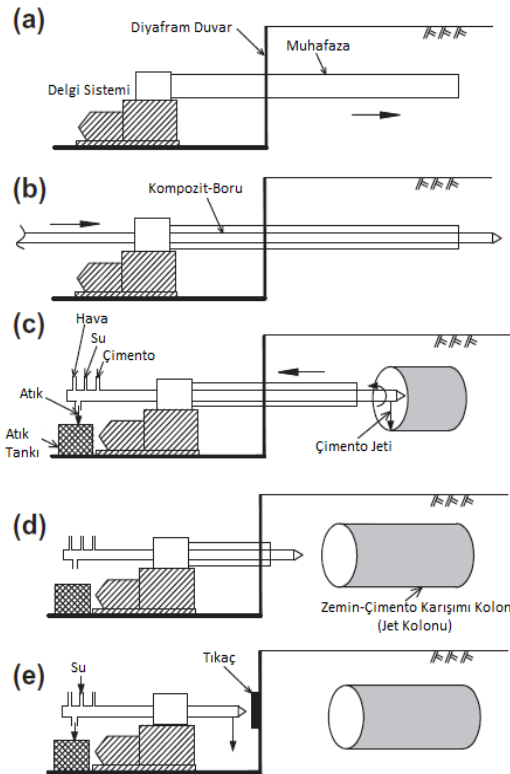


Şekil 2.5 Shen vd. (2013a) geliştirdikleri Twin-Jet metodunun diyagram şeması (ilgili yayından değiştirilerek alınmıştır)

Shen vd. (2013b), inşaat sürecinin çevresel etkilerini ortadan kaldırmak için “composite-pipe” adını verdikleri yatay bir jet grout tekniği geliştirmişlerdir. Yayınlarında bu yeni metodun ekipmanları ve kurulum aşamaları hakkında bilgi vermişlerdir. Uygulama yapmak amacıyla hem composite-pipe metodu ile hem de “horizontal chemical churning pile” (geleneksel tek akışkanlı metod) ile sahada çalışma yapmışlardır. Arazi ölçümlerinde yer yüzeyinin düşey yer değiştirmesi ölçümü, jet grout kolonlarının çaplarının ölçümü ve kolonlar üzerinden alınan karot numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda composite-pipe metodu ile yapılan uygulamanın HCCP yöntemine göre yüzey kabarması bakımından daha makul sonuçlar verdiği görülmüştür. Yöntemin en önemli noktası vakum efekti sistemi (Şekil 2.6) ile artık zemini toplayabilmesidir. Geleneksel metoda göre daha başarılı olduğu görülmüştür (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 Composite-Pipe metodunda geliştirilen vakum hücresinin diyagramı (Shen vd. 2013b'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.7 Composite-Pipe metodunun imalat adımları (Shen vd. 2013b'den değiştirilerek alınmıştır)

- a. muhafaza ile delgi,
- b. composite-pipe'in yerleştirilmesi,
- c. Jet grout işlemi,
- d. muhafaza ve composite-pipe'in geri çekilmesi,
- e. composite-pipe'in temizlenmesi ve deliğin kapatılması

Shen vd. (2013c) yaptıkları çalışmada, türbülân kinematik akış ve zemin yırtılmasını kullanarak teorik bir formül geliştirmişlerdir. Önerilen metot yarı teorik bir yaklaşımdır. Buna göre bazı parametreler ampirik olarak hesaplanmıştır. Metot basınçlı hava aracılığıyla zemini parçalayan sistemlerde de dahil olmak üzere tüm jet grout sistemlerinde başarılı sonuç vermektedir. Önerilen metot operasyonel tüm parametreleri (nozül çapı, nozül sayısı, enjekte edilen sıvının özelliği ve akış hızı, dönme hızı, çekme hızı, zemin özellikleri, zemin direnci, partikül boyu dağılımı) dikkate almaktadır. 0,5-1,5 MPa değerindeki basınçlı havanın da etkisiyle 2 ve 3 akışkanlı sistemlerde kolon çapının % 27 ile % 81 oranında arttığı gözlenmiştir. Gözlenen verilere göre daha büyük dirençte veya daha büyük partikül yapısına sahip malzemeler, kritik hız ile daha çok ilişkilidir ve parçalanması daha zordur. Yine gözlenen verilere göre dönme hızının jet kolon çapı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Dönme hızının artırılması sadece kolonun uniformluk derecesini artırır, ancak çapı artırmaz. Önerilen metot 4 farklı jet metodu ile yapılmış ve 4 farklı olaya uygulanmıştır (Tek akışkanlı, çift akışkanlı, 3 akışkanlı ve geliştirilmiş 3 akışkanlı metotlar). Ölçülen ve hesaplanan çap değerleri göstermiştir ki önerilen metot jet kolon çapını tahmin etmede başarılı sonuçlar üretmektedir.

Flora vd. (2013), Jet grout tekniğinin her ne kadar günümüzde birçok farklı geoteknik problemin çözümünde rol oynasa da, kolonlarının çapını tahmin etmede halen birçok belirsizlikler bulunduğunu belirtmişlerdir. İnşaat halinde iken jet kolonun tamamını veya bir kısmını onarmak veya onarmaya çalışmanın, tasarım aşamasında istenilen çapta kolon üretmek için mesai harcamaktan çok daha maliyetli bir iş olduğundan bahsetmişlerdir. Farklı sistemlerle yapılan denemelerden elde edilen verileri kullanılarak basit bir formül önermişlerdir. Bu formülün zemin gradasyonu ve zemine ait mekanik özellikler ile birlikte, enjeksiyon sistemi, enjekte edilen sıvının bileşenleri, nozüllerdeki jetin kinetik enerjisi gibi jet grout ile ilgili parametrelere bağlı olduğu belirtilmiştir. Elde edilen formülün birkaç istisna dışında +/-%20 farklılık gösterdiği açıklanmıştır. Çizelgeler kullanılarak henüz imalata başlanılmadan, istenilen çapta kolon oluşturmak için gerekli sistem, basınç gibi değişkenler belirlenerek, ileride oluşabilecek maliyetli onarım gerektiren işlerden kaçınılabileceği ifade edilmiştir.

Ochmański vd. (2015), çalışmalarında yapay sinir ağları kullanarak jet-grout kolonlarının çapını hesaplamaya çalışmışlardır. Elde ettikleri formül aracılığı ile zemin tipi ve SPT-N değerine sahip oldukları ve nozüldeki spesifik enerjinin değerini bildikleri sistemlerde çap için başarılı tahmin yapabilir duruma gelmişlerdir. Tek akışkanlı sistem için %12 çift akışkanlı sistem için %13 ve 3 akışkanlı sistem için %15 hata payı ile hesaplama yapabildiklerini göstermişlerdir.

Akın (2016) tarafından yapılan çalışmada, jet grout kolonlarının dokularının, çevrelendikleri zemin materyali ve uygulanan jet grout metoduna bağlı olarak değişiklik gösterdiği ortaya konulmuştur. Buna ek olarak kolonların dayanımı ve indeks özelliklerinin de çevrelendikleri zemin tarafından etkilendiği örnek ve deneylerle gösterilmiştir. İlgili çalışmada kumlu ve killi alanlarda yapılan 2 farklı jet grout çalışmasında oluşturulan kolonların mekanik özellikleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Yapılan deneylerde P dalgası hızının ( $V_p$ ), serbest basınç dayanımı ve permeabilite gibi birçok indeks özellikle pozitif ilişkisinin olduğu ifade edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık verisinin de P dalgası hızı ile birlikte değerlendirilerek birçok parametrenin belirlenmesinde kritik rol oynadığı saptanmıştır. Ayrıca elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak grafiklere aktarılmış ve bahsedilen parametrelerin ilişkileri grafikler aracılığı ile de ifade edilmiştir.

Pinto vd. (2016), Lizbon'da inşa edilecek yeni büyük liman projesi için dayanımı oldukça düşük, yumuşak çamurlu alüvyal tabaka üzerinde 4,2 m'lik dolgu yapılacağından bahsetmiştir. Yumuşak tabakanın stabilizasyonu için jet grout yöntemi seçilmiştir. 1.5 m çapında ve aralıkları 5,7 x 5,7 m<sup>2</sup> olacak şekilde jet grout uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulama Plaxis yazılımı kullanılarak 3 boyutlu ortama aktarılmış ve liman başarılı biçimde inşa edilmiştir. Kolonlar imal edildikten sonra yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Jet grout uygulamasına alternatif olarak yapılabilecek taş kolon uygulaması daha sonra hesaplanmış ancak bu durumda 1,5 m'ye varan düşey deformasyonların gerçekleşebileceği ve bölgede yer alan hassas tarihi yapılara, çapı 1m olan ana su borusu hattına ve metro tüneline zarar verebileceği anlaşılmıştır. Çalışma oldukça zorlu koşullarda gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Zorlu koşullarda gerçekleştirilen jet grout uygulaması (Pinto vd. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır).

Elde edilen veriler ve sonuç jet grout sisteminin diğer iyileştirme yöntemlerine göre avantajlarını göz önüne sermiş ve zorlu-kompleks jeolojik koşullarda bile uygulanabileceğini kanıtlamıştır.

Aksangür ve Bol (2017), Jet grout yöntemini tanıttıktan ve sistemlerinden, tarihçesinden bahsettikten sonra zemin iyileştirme metotları içerisinde jet grout yönteminin kullanılmasına karar verilen bir vaka analizini kullanmışlardır. 14 katlı bir yapının temelinin bulunacağı alan için jet grout hesaplamalarını Plaxis yazılımında 3 farklı model oluşturarak hesaplamış ve temel oturma hesabı yapmışlardır. 3 farklı modelden alınan sonuçlar ile geleneksel hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Plaxis yazılımının Jet-Grout elemanlarının kullanılacağı sistemlerde başarı ile çalışabileceği gösterilmiştir.

Demiral (2017), Jet grout sistemlerinin kumlu zeminlerde kullanıldığı durumlarda sülfat etkisini konu alan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, geliştirilen laboratuvar tipi jet grout cihazında kolonlar oluşturmuşlar ve normal Portland çimentosu ile sülfata dayanıklı çimentoyu karşılaştırmak için, sülfatlı su ve normal musluk suyu kullanarak, farklı kolonlar oluşturulmuştur. Kolonlardan alınan karot numunelerde 1 ay, 3 ay ve 6 aylık dayanım değerleri ile SEM analizleri ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sülfatın kolonların dayanımına kötü yönde

etki sağladığı belirtilmiş ve analiz sonuçlarında etrenjit minerali oluşumlarına rastlanılmıştır.

Jet grout sistemleri zemin ve çimentonun bir karışımı olduğu için yarı zemin, yarı çimento davranışı sergilemektedir. Çimentonun sülfat karşısında dayanımını kaybettiği ve sülfat tarafından kimyasal ve fiziksel olarak bozuşmaya uğratıldığı bilinmektedir. Jet grout kolonlarının da sülfata maruz kaldığında aynı etkiyi göstermesi beklenmektedir.

Tian ve Cohen (2000)'a göre, portland çimentosu üzerinde sülfat atak mekanizması genel olarak 2 ana sülfat reaksiyonu şeklinde gerçekleşir. 1- Sülfat iyonlarının  $C_3A$  ve onun hidrasyon ürünleri ile etrenjit oluşturması ve bunun sonucunda hacimce genişlemeyi doğuran bir artış ve betonun çatlaması, 2- Sülfat iyonlarının kalsiyum hidroksit (CH) ile tepkimeye girerek jips oluşturması. Araştırmacılara göre her ne kadar jips oluşumu zararlı olarak kabul edilse de, mekanizması tam olarak anlaşılammıştır. Özellikle jips oluşumunun hacim genişmesine sebep olması durumu tartışmalıdır. Çalışma jips oluşumu mekanizmasını ve sonuçlarını araştırmıştır. Sonuç olarak sülfat atak sonucu jips oluşumu genişmeye neden olabilir.  $C_3A$  içermeyen çimentolarda bile sülfat atak oluşması olayın yalnızca etrenjit oluşumundan ibaret olmadığını, aynı zamanda jips oluşumu ile de sülfat atak gerçekleştiğinin kanıtıdır. Burada soru şudur: jips genişme oluşturmakta mıdır? Çalışmacılar yapay numuneler hazırlamışlar ve sülfata maruz bırakmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre genişme mekanizması mevcuttur.

Santhanam vd. (2002), magnezyum sülfat ve sodyum sülfatın farklı Portland çimentoları üzerindeki genişme ve mikroyapı etkilerini araştırmışlardır. Farklı sıcaklık ve farklı sülfat yoğunluklarının etkilerine de ayrıca değinilmiştir. Sonuçlara göre sodyum sülfata maruz kalan harçlardaki genişme etkisi 2 aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada küçük bir genişme olurken, sonrasında (ikinci aşama) hacimde ani ve hızlı bir artış meydana gelmektedir. Çalışmada çimento harçları hazırlanarak farklı oranlarda sodyum sülfat ve magnezyum sülfata farklı sıcaklıklarda maruz bırakılmışlardır. Numunelerin hacimce genişmeleri ölçülmüş ve etki mekanizmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada hava ile temas, puzolanik katkı, sodyum sitrat, artan sıcaklık ve çözelti

doğunluğu gibi parametrelere de bakılmış ve SEM analizleri yapılarak sonuçları paylaşılmıştır.

Dehwah (2005), betonun maruz kaldığı sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak morfolojik değişimlerini gözlemlemişlerdir. Beton numunelerini %5'lik sodyum klorür solüsyonu ile karıştırılmış sodyum sülfat ve magnezyum sülfat içerisinde bekletmişlerdir. 4 yıl boyunca çözültide bekleyen numunelerin sodyum sülfat veya sodyum klorüre maruz olanlarında herhangi bir bozulma veya çürüme görülmemiştir. Ancak magnezyum sülfata karşı tepki ve çatlamlar gözlenmiştir.

Lee vd. (2005), Portland çimentolu harçlarda sülfat etkisini ve böyle bir etkiye karşı silis dumanı katkısının davranışını araştırmışlardır. 510 günlük sülfat etkisini gözlemek için 50 mm'lik küp numunelere serbest basınç testi uygulanmıştır. Sülfat atak etkisini net olarak gözlemek için XRD ve DSC kullanılmıştır. Silis dumanı sodyum sülfat ile olan etkiye olumlu bir katkı yaparken, magnezyum sülfat kullanılan numunelerde silis dumanı oranı arttıkça numunelerde meydana gelen zarar da artmaktadır. Ayrıca sülfat atağa karşı en kritik parametrenin su/çimento oranı olduğu kanıtlanmıştır.

Irassar (2009), çalışmasında genel olarak 2 soruya cevap aramıştır. 1- kireçtaşı katkısı sülfatın çimento üzerindeki olumsuz etkisini azaltmakta mıdır? 2- Tomasit bozulmanın ana sebebi midir, yoksa sülfat atağın son aşaması mıdır? Çalışmada bu soruların cevabını araştırma amacıyla literatür verileri derlenmiş ve bir Çizelge halinde yapılan çalışmalarda kullanılan materyaller, sülfat etkisi, sülfat miktarı, maruz kalınan süre, çimento kimyası ve kompozisyonu gibi veriler Çizelge halinde sunulmuştur. Tüm veriler tek bir grafik üzerinde birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kireçtaşı katkısı %10 seviyelerinde olduğunda sülfat etkisi açısından herhangi bir farklılık arz etmemektedir. Ancak %15 ve üzeri oranlarda olduğunda sülfat etkisini olumsuz biçimde artırmaktadır. Tomasit için ise çalışmada, çimentoya doğrudan zarar verdiğine dair kesin bir kanıt bulunamamıştır.

Tosun ve Baradan (2010), çalışmalarında ısıya tabi tutulan karışımlarda zamana bağlı etrenjit oluşumlarını incelemişlerdir. Çatlak oluşumlarını gözlemek için 3 farklı zamanda SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca çatlak oluşumu gözlenmesi için X-Ray

mikrotomografi analizi yapılmıştır. 0,44 oranında su/çimento karışımları hazırlanarak 25x25x285 mm boyutlardaki prizmatik kalıplara dökülmüş ve prizlerini aldıktan sonra sülfat solüsyonuna maruz bırakılmıştır. 20°C ile 85°C arasında değişen ısılarda tekrarlı ısıtma ve soğutma deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar paylaşarak ısının etrenjit oluşumu sürecindeki katkısı ve süreci hızlandırdığı ifade edilmiştir.

Müllauer vd. (2013), özel bir hücre tasarlamış ve bu hücreyi kullanarak çimento karışımlarına dışarıdan etki eden sülfat saldırısının içeride oluşturduğu gerilim etkisini ölçmüşlerdir. Mineralojik değişimler ve X-ray difraktometresi aracılığı ile yapılan araştırmanın sonuçlarına göre hasarın temel sebebi 10-50 nm boyutundaki küçük gözeneklerde etrenjit oluşumu ve bunun sonucunda 8 MPa'nın daha üzerine çıkan basınç değerleri oluşumudur. Yüksek sülfat konsantrasyonu ve C<sub>3</sub>A değeri daha yüksek gerilimler üretmektedir. Elde edilen veriler kristal yüzey enerjisi ve kristal büyüme basıncı ile açıklanabilir. 1500 mg/l ve 30000 mg/l yoğunlukta 2 farklı sodyum sülfat çözeltisinde uygulanan deneylerde su ve çimento oranı olarak 0,5 değeri belirlenmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlarla ulaşılan kanıya göre sülfat atak mekanizması 3 aşamada gerçekleşmektedir. 1- Küçük gözeneklerin (10-50 nm) duvarlarında etrenjit oluşarak baskı uygulamaya başlar. 2-basınç matriksin dayanımını aştığında hacimde genişleme ve gözle görülebilir çatlaklar oluşmaya başlar. 3- Genleşme maksimum noktaya ulaşarak durur. Reaksiyonun durmasının sebebi, sürecin devamı için gerekli olan alüminyumun tükenmesi olduğunu belirtmişlerdir.

Sülfat etkisi karşısında genişleme mekanizması hakkında bir çok teori ve fikir olsa da tartışmaların halen devam ettiğini belirten Yu vd. (2013), etrenjit oluşumunun hacim genişlemesine neden olduğunun düşünüldüğünü ancak henüz kesin bir kanıt bulunmadığına dikkat çekmişlerdir. Kristalizasyon basıncının en güçlü teori olduğunun düşünüldüğünü belirten araştırmacılar yapılan çalışma ile kristalizasyon basıncının çatlak oluşumuna sebebiyet veren en güçlü faktör olduğunu teorik olarak ortaya koymuş ve küçük ölçekli gözeneklerinde gelişen kristalizasyonun oluşturduğu basınçla mikro-çatlaklar oluştuğu ve sonrasında bu çatlakların birleşerek daha büyük çatlaklar geliştirdiğini ortaya koymuşlardır.



Rahman ve Bassuoni (2014), tomasit sülfat atağının, sülfat etkisinin özel bir formu olduğunu belirtip, özellikle çimento matriksi içerisinde yer alan karbonat/bikarbonatlarla beraber yüksek nem oranı ve düşük sıcaklık ile birlikte oluştuğunu belirtmişlerdir. Çimentoyu hiçbir taşıma ve çekme gücü olmayan, non-kohezif bir malzemeye dönüştürdüğünü açıklamışlardır. Bu mekanizmayı ve onu etkileyen faktörleri daha önceki yapılan çalışmalardan derlemişler ve etkisinin azaltılması için bir strateji önermişlerdir.

Hossack ve Thomas (2015), sülfat atak mekanizmasının iyi biçimde araştırıldığını, ancak atak etkisinin sıcaklık ile olan değişiminin yeterince incelenmediğini belirtmişlerdir. Çalışmada 2 tip çimento ve 4 tip çimento katkı materyali kullanarak toplamda şahit numuneler ile birlikte 10 tip çimento karışımını 23<sup>0</sup>C, 10<sup>0</sup>C, 5<sup>0</sup>C ve 1<sup>0</sup>C 'lik sıcaklıklarda 15 ve 30 aylık sürelerle 33800 ppm'lik Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonuna maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda uçucu kül, dışarıdan gelen sülfat etkisine karşı oldukça başarılı bir davranış sergilemiştir. Düşük sıcaklıklarda ise uçucu külün sülfat etkisine katkısı neredeyse hiçbir farklılık göstermemektedir. Metakaolin ise düşük sıcaklıklarda sülfat etkisine karşı olan direnci artırmıştır.

Najjar vd. (2017), çalışmada 2 aşamalı çimento sisteminin sodyum sülfat karşısındaki davranışına bakmışlardır. Buna göre silika dumanı eklenmiş olan iki aşamalı çimentonun imalat şekli gereği geleneksel beton ile sülfat karşısında aynı davranışı göstermesi beklenmemektedir. Çalışma bu nedenle yapılmıştır. İki aşamalı çimento imalatı kısaca tanımlanmış ve numuneler hazırlanarak sülfata maruz bırakılmıştır. Hazırlanan numuneler 3 farklı çimento katkı maddesi eklenerek, sülfat etkisinde katkıların davranışları da gözlenmiştir. Bu katkılar uçucu kül, silika dumanı ve metakaolindir. Beklenen sülfat atağı çoğu numunede gerçekleşmemiş ve dayanım kaybı oluşmamıştır. Metakaolin karıştırılarak hazırlanan %10'luk harç hem fiziksel hem de kimyasal sülfat atağına karşı çok güzel bir dayanım sağlamıştır. Dayanım kazanımı olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre iki aşamalı çimentonun, geleneksel betona göre sülfat atağına karşı daha dirençli olduğu ortaya konmuştur.

Ma vd. (2018) yaptıkları çalışmada, sülfatın beton üzerindeki etkisini tanımlamış ve etkinin genleşme ve bozuşma kısımlarını araştırmak için PVC moldlar imal ettirmiş ve

kalıplarda çimento harçları hazırlamışlardır. Numuneler 3 farklı genişleme mekanizması içeren hücrelere yerleştirilerek sodyum sülfata maruz bırakılmıştır. Hücreler genişmeye müsaade eden (yaylı), genişmeye müsaade etmeyen (çelik sınırlayıcı) ve genişmeye karşı kısmen direnç uygulayan şeklinde 3 farklı tipte imal edilmişlerdir. Hücrelere yerleştirilen örnekler 1500 mg/l ve 30000 mg/l SO<sub>4</sub> çözeltisine batırılmıştır. Yüksek sülfat içeren solüsyonların gözeneklerinde 420 günlük bekleminin sonucunda 13.1 MPa ve düşük sülfat içeren solüsyonlarda bekleyen numunelerde 8,3 MPa basınç ölçülmüştür. Micro Computed Tomografi tekniği kullanılarak numunelerin gözeneklerinin boyutları çıkarılmıştır. Genel manada yüksek sülfat solüsyonu veya düşük sınırlama koşulu erken genişmeye yol açmıştır. Çalışmadan elde edilen verilerin birçok başka araştırmanın yolunu açacağı belirtilmiştir.

Yang vd. (2018), çimento üzerinde sülfat etkisini farklı bir yöntem kullanarak izlemek amacıyla magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfat-sodyum klorür karışımı 3 farklı solüsyon kullanarak çimento numunelerini sülfata maruz bırakmış ve X ışınli bilgisayarlı tomografi kullanarak incelemiş ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri verilere göre kullanılan solüsyon sülfat ve magnezyum iyonlarını birlikte içeriyorsa atak daha hızlı gerçekleşmektedir. Eğer klorür iyonları varsa atak bariz biçimde yavaşlıyor. Araştırmacılar X-ışını CT tekniğini gözeneklilik ve gözenek hacmi dağılımını görüntüleme amaçlarıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde jet grout yöntemi detaylı biçimde anlatılmış, teknolojisi, kullanılan sistemler, avantaj ve dezavantajları, kullanım alanları gibi özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Jet grout sisteminin zemin ve çimento karışımından oluşması sebebiyle, çimentonun sülfat karşısındaki etkisi incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler bölüm sonunda detaylı biçimde açıklanmıştır.

#### 3.1 Zemin İyileştirmesi ve Yöntemleri

Zeminlerin hem inşaat yapılarında üzerlerine yapı inşa edilen malzeme olarak hem de inşaat sırasında malzeme olarak kullanıldıkları bilinmektedir. Farklı zeminlerin mühendislik özellikleri de birbirinden farklı olmaktadır. Zeminlerin mühendislik özellikleri de zeminin cinsine ve arazi koşullarına göre (sıklık derecesi, su içeriği, konsolidasyon basıncı, yükleme koşulları, drenaj koşulları) değişiklik göstermektedir. Buradan hareketle herhangi bir yapının inşa edileceği alanda bulunan zemin her zaman inşaata elverişli olmayabilir. İnşaat yerinin değiştirilmesi veya istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin atılarak yerine elverişli zeminlerin kullanılması ise, teknolojik ve ekonomik nedenlerle çoğu kere uygun çözümler olarak kabul edilmemektedir. Bu ve benzeri durumlarda yapının yerini değiştirme imkanı daha zor olduğu için, projelendirme alanında mevcut bulunan zeminin iyileştirilmesi yoluna gidilir. Genişleyen şehirler ve daralan inşaat alanları söz konusu olduğunda, zemin iyileştirme yöntemleri son derece sık başvurulan bir çözüm yöntemi olmaya başlamıştır. Artan sanayileşme ve gelişen teknolojiler sayesinde zeminlerde farklı iyileştirme yöntemleri uygulamak mümkün hale gelmiş ve zemin iyileştirme yöntemleri yaygın hale gelmiştir.

Zemin iyileştirme yöntemlerini sınıflamada birçok farklı metod uygulanabilir. Etkin iyileştirme derinliği, uygulanabilir derinlik, uygulanabilir zemin türü, iyileştirmenin etkili olduğu süre ve iyileştirme türünün zemin ile etkileşim yolu bu sınıflama türlerinden bazılarıdır. Bu çalışmada iyileştirme türünün zemin ile etkileşim yolu temel alınacaktır.

Olumsuz zemin koşullarının iyileştirilmesinde yapılabilecek yaklaşımlar genel manada dört ana başlık içerisinde incelenebilir. Bunlar mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleridir. Bu yöntemlerin uygulanması ile kesme dayanımını artırmak ve büyük yükler söz konusu olduğu zamanlarda zeminin davranışını güçlendirmek ve iyileştirmek, oturma miktarlarını azaltmak ve zemin ile ilgili oluşabilecek su problemlerini gidermek imkânı oluşur (Yıldırım 2002).

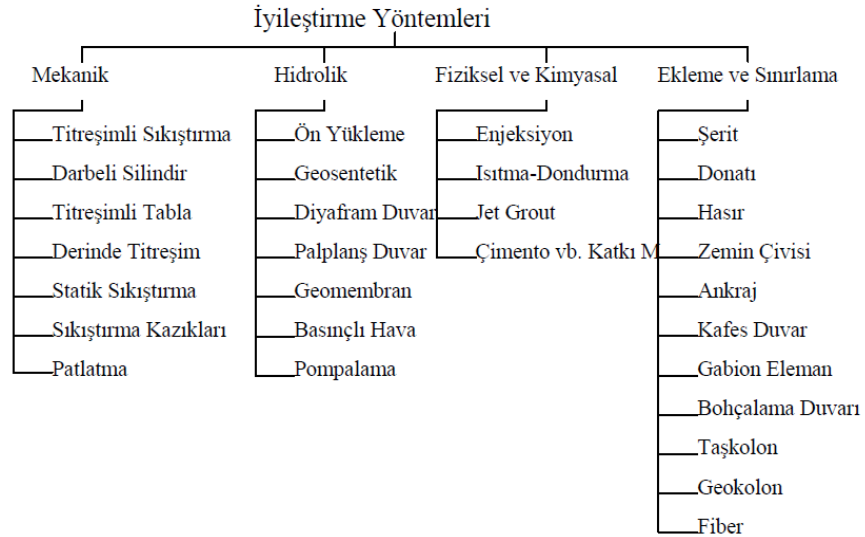
Mekanik iyileştirme yöntemlerindeki amaç zemine kısa süreli ancak güçlü yükler uygulayarak zemindeki boşluk oranını azaltmak ve zemini sıkıştırmaktır. Bu tür iyileştirmelere örnek olarak titreşimli, keçi ayaklı ve statik silindirler, patlatma ile sıkıştırma, sıkıştırma kazıkları ile zeminin sıkıştırılması örnek verilebilir.

Hidrolik iyileştirme yöntemlerinin amacı zemin boşluklarındaki suyu tahliye ederek, boşluk suyu basıncını düşürmek ve bu şekilde kesme dayanımında artışa sebebiyet vermektir. Kaba taneli zeminlerde çakıllı kuyulama ve drenaj delikleri uygulaması, ince taneli zeminlerde düşey drenlerin yardımı ile ön yükleme yapılması ve benzeri yöntemlerle boşluk suyunun uzaklaştırılması türünden iyileştirmeler bu grup altında sıralanabilir. Ayrıca plastik teknolojisinin gelişmesi ile yaygın kullanım alanı bulan geosentetiklerin geleneksel tekniklere katkısı bu alanda büyük olmuştur. Diyafram duvarlar, palplanş duvarlar ve geomembranlar, keson ve tünelde basınçlı hava kullanarak zemin suyunun uzaklaştırılması teknikleri bu grup içerisinde sayılabilir.

Fiziksel ve Kimyasal iyileştirme yöntemleri, zeminler ile doğrudan veya dolaylı olarak temas eden veya reaksiyona giren birtakım materyallerin zemin taşıma gücünde artışa neden olarak zemini güçlendirmesi olarak tanımlanabilir. Kolon imalatları da bu grupta yer alır. Doğal zeminler, endüstriyel atık ürünleri veya atıklar, birbiriyle veya zeminle reaksiyona giren çimento ve kimyasal katkı maddeleri bu grupta kullanılan materyallere örnek olarak verilebilir. Kullanılacak katkı materyalinin basınç yardımı ile zemin boşluklarına, kırık ve çatlak sistemlerine doldurulması söz konusu olduğunda uygulamaya enjeksiyon adı verilir. Isıtma ve dondurma yolu ile yapılan iyileştirmeler (ısısal yöntemler) ile son yıllarda yurdumuzda geniş uygulama alanı bulan jet grout kolonu uygulaması bu grup içerisinde sayılabilir.

Ekleme ve sınırlama ile iyileştirme yöntemleri zemindeki deformasyonları engellemek suretiyle kesme dayanımında artışa sebep olma ve boşluk suyu basıncında azalmaya sebep olma gibi ilkelerle çalışır. Fiberler, şeritler, donatılar ve hasırlar bu amaçla kullanılan ekipmanlardır. Benzer şekilde zemin çivileri ve ankraj yerleştirilecek zeminin donatılandırılması ekleme ile yapılan iyileştirme anlamındadır. Çelik ve beton gibi dayanım değerleri oldukça yüksek materyaller kullanılarak zeminlerin mukavemetini artırmak mümkündür. Kafes duvarlar, gabion elemanlar, geotekstil duvarları, geokolon ve taşkolon imalatı bu grup içerisinde sayılabilir.

Zemin iyileştirme yöntemi seçilirken, birçok parametre dikkate alınmaktadır. İyileştirmenin hangi düzeyde yapılacağı, ne tür bir zemine uygulanacağı, fayda/maliyet oranları gibi birçok parametrenin bilinmesi gerekir. Bunun yanı sıra çevredeki yapılara verilebilecek olası hasarlar, malzemenin kullanım ömrü ve iyileştirme sürecinde doğabilecek problemler gibi farklı sorulara da yanıt bulunması gerekir. Dört ana gruba ayrılan iyileştirme yöntemleri şekildeki gibi ifade edilebilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002)

Zeminde su mevcudiyeti devam ettiği sürece zemini dondurarak stabilizasyon sağlama metodu tüm zemin türlerinde kullanılabilir. Diğer yöntemler farklı parametrelere bağlı

olarak uygunluk sağlarlar. Bu parametreler zemin türü, kohezyonun varlığı, suya doygunluk oranı, konsolidasyon oranı olarak belirtilebilir. Özellikle uğraşılan sorunun türünün (temel taşıma gücü, yanal dayanımı, dayanma yapısı teşkili, yumuşak ve gevşek zemin üzeri dolgu, sızıntı vb.) bir yöntemin uygunluğunda çok önemli bir etken olduğu bilinmektedir (Yıldırım 2002).

Yani, her stabilizasyon yöntemi özel koşullarda geçerlidir. Bu koşullar şöyle özetlenebilir (Önalp 1983).

1. Ortamın türü: kil, organik, tortul vb.
2. İslah edilecek bölgenin alanı ve hacmi: ortamın geometrik özellikleri ve yapı türüne bağlı
3. Yapının türü ve yüklerin dağılımı
4. Zeminin özellikleri: kayma direnci, sıkışabilirlik, geçirimsizlik.
5. İzin verilebilir toplam ve farklı oturmalar
6. Malzeme durumu: taş, kum, su, katkı maddeleri
7. Teknisyen, vasıflı işçi, özel aletlerin varlığı
8. Çevre koşulları: atıkların kullanımı, erozyon, su kirlenme kısıtlamaları
9. Yerel deneyim ve birikimi
10. Ekonomik veriler (Mitchell 1976).

### **3.2 Jet Grout Yöntemi**

Jet Grout yöntemi ilk kez petrol endüstrisinde derin kuyuların duvarlarını stabilize etmek amacıyla British Cementation Company tarafından 1954 yılında kullanılmıştır. O dönemdeki prosedüre göre istenilen derinliğe kadar delgi yapıldıktan sonra sondaj tijleri aracılığı ile zeminde bulunan ince taneleri sökmek amacıyla su enjeksiyonu yapılmaktadır. İstenilen derinlik temizlendikten sonra basınçlı suyun enjeksiyonu sırasında açılan yeraltı boşluğuna çimento enjekte edilerek ilgili derinlikte yer alan zemin, su ve çimentodan oluşan bir karışım meydana getirmek suretiyle kolon imalatı yapılmaktaydı. Daha sonraları yapılan çalışmalarda yöntemin düşük geçirimsizlik özelliğine sahip ince taneli materyallerde istenilen sonucu vermemesi nedeni ile yeraltına

enjekte edilen suyu daha büyük bir güç ve hacimle enjekte ederek daha geniş bir alanda etki doğurması denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

İnşaat sektöründeki ilk uygulamalar 1970'li yılların başlarına rastlamaktadır. Japonya'da kullanılan bu yöntem temel olarak 3 ilkeye dayanmaktadır;

- 1- Zemin taneciklerini yüksek kinetik enerjiye sahip jet aracılığı ile parçalamak
- 2- Zeminin kısmen bulunduğu yerde sıkıştırılması
- 3- Çimento ve zeminin karıştırılması.

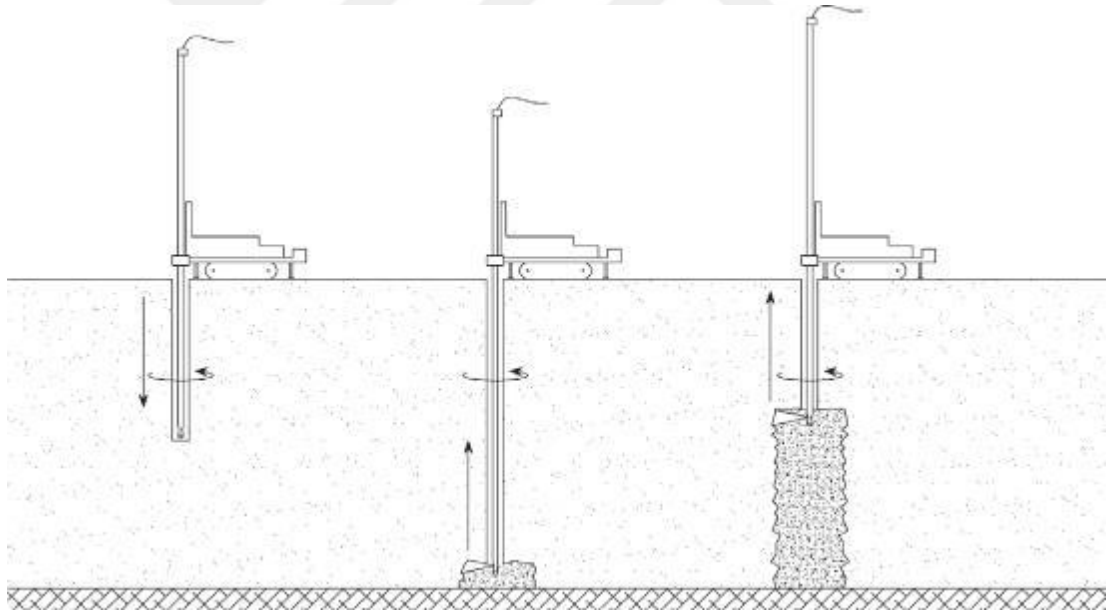
Bu teknik sondaj tıjlerinin uçlarına eklenen nozüllerden yüksek kinetik enerjiye sahip çimentonun enjeksiyonu aracılığıyla yapılmaktaydı. Kumda 50 cm ve kilde 30 cm çapında kolonlar oluşturulabilmekteydi. Bu sistemin dezavantajı ise oluşturulan kolonların çap olarak arzu edilen büyüklüklere ulaşamamasıydı.

Yine 1972 yılında Japonya'da yapılan denemelerde çimento ile birlikte yüksek basınçlı hava enjeksiyonu yapılmış ve 2 metreye varan çaplarda kolonlar imal edilebilmiştir. Bu sistemde ise basınçla püskürtülen havanın zeminde oluşturduğu hidrolik çatlaklar ve kırılmalar sebebiyle kolonlar uniform olarak imal edilememekteydi.

1975 yılında yukarıda anlatılan tekniklere ek olarak Japon Kajima şirketi Trifluid-Kajima metodu olarak adlandırılan tekniği geliştirmiştir. Bu sistemde tıjlerde belirlenen seviyede hava ve su aynı anda yüksek basınçla zemini parçalarken, hava ve su nozüllerinden 30-40 cm alt kısımda yer alan nozüllerden aynı anda yüksek basınçla çimento enjeksiyonu yapılmış ve 2,5 m çapa kadar çıkabilen ve göreceli olarak uniform kabul edilebilen kolonlar imal edilebilmiştir.

Japonyada bu testler yapıldıktan hemen sonra İtalya'da yapılan ve Japonya'nın geliştirdiği sistemi lisansı ile kullanan araştırmacılar sistemin çok büyük ölçeklerde kullanılamayacağını ve fayda/maliyet açısından makul seviyelere ulaşamayacağını hesaplamışlardır.

Jet grout sistemi uygulamanın yapılması istenen derinliğe doğrudan saplanılarak indirilen bir tij takımının belirli hızda dönerek aynı anda ise yukarı yönde hareket ettirilerek, tij ucunda bulunan nozül tabir edilen çapı genellikle 2 mm ile 8 mm arasında olan deliklerden basınçlı biçimde enjeksiyon malzemesinin püskürtülmesi ile çalışır (Şekil 3.2). Bu iki yönlü hareketle birlikte püskürtülen yüksek basınçlı malzeme yeraltında zemin ile birlikte karışarak, soilcrete tabir edilen çimento ve zemin karışımı, silindirik şekilli bir kolon oluşturur. Kullanılan enjeksiyon malzemesi çimento ve varsa katkı malzemesidir. Jet grout sisteminin esas çalışma prensibi, nozüllerden çok yüksek hızda çıkan çimentonun zemini parçalayıp, yırtması ve zemine karışarak zemini fiziksel olarak daha dayanıklı bir hale getirmesidir. Jet grout yönteminde imal edilen kolonlarının çaplarının her geçen gün farklı bir teknikle artırılması, farklı kolon geometrileri oluşturarak projelere özgün çözümler üretilebilmesi ile ayrıca hızlı ve ekonomik olması sebebiyle kullanım alanları her geçen gün gelişmektedir.



Şekil 3.2 Jet grout uygulama yöntemi (Croce vd. 2014)

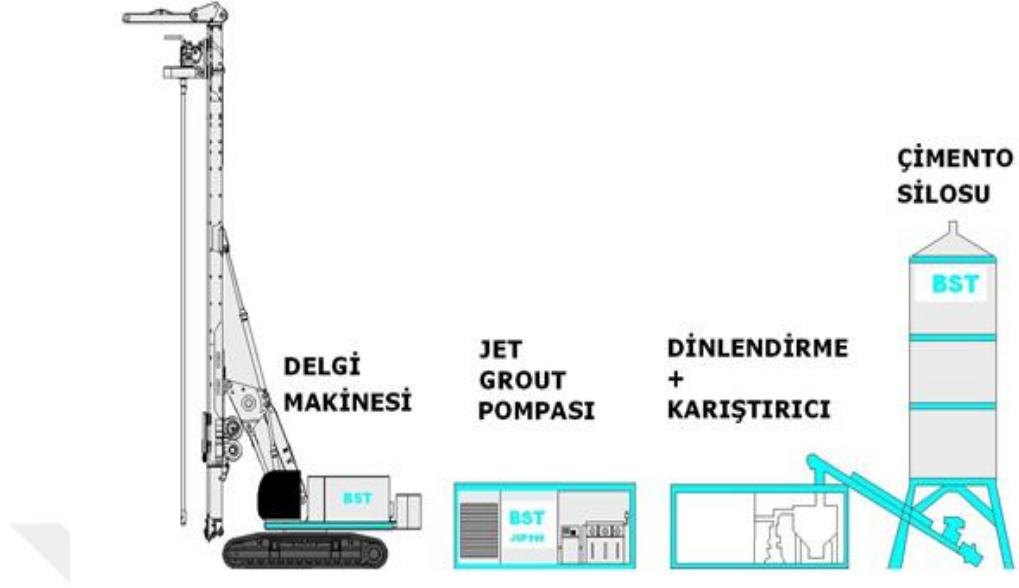
Jet grout tekniğinin günümüzde yaygın olarak tercih edilmesinin nedenlerini Erol ve Bayram (2018) şöyle açıklamıştır:



“Jet enjeksiyon tekniğinin günümüzde zemin iyileştirme metotları arasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biri olmasının başlıca nedenleri aşağıda sıralanmaktadır.

1. Küçük bir delgi operasyonu sonrasında etrafındaki zemini örselemeden, zemin içerisinde büyük çaplı rijit kolonlar teşkil edilebilmektedir.
2. Kolonların değişik yerleşim düzeninde teşkili ile yüksek dayanımlı, geçirimsizlik elemanları (perdeler, duvarlar, şaftlar, kompozit kütleler vb.) üretilmektedir.
3. Gerekli olduğu durumlarda kolonlar donatılı olarak imal edilebilmekte, dolayısıyla eğilme momenti kapasitesi ve çekme dayanımı oluşturabilmektedir.
4. Kullanılan ekipmanlar diğer yöntemlere kıyasla hafif ve küçük hacimli olduğundan, zor çevresel koşullarda uygulama yapılabilir.”

Jet grout uygulaması genel anlamda iki ana prosedür ile gerçekleştirilir. Bunlardan ilki delgi kısmı, ikincisi ise enjeksiyon kısmıdır. Delgi aşamasında uygulamanın yapıldığı zemine bağlı olarak delici uç ve sulu soğutma sistemi kullanılabilir gibi delgi sistemi kullanılmadan doğrudan hidrolik basınç ile tij takımını uygulamanın yapılacağı derinliğe indirmek mümkün olabilir. İri taneli veya sert zeminlerde delgi ucu yardımı ile tij takımı uygulamanın yapılacağı derinliğe kadar zemine indirilir. İstenilen derinliğe erişilince delgi ucu kapatılır ve monitör adı verilen kısım aracılığı ile önceden hazırlanmış enjeksiyon malzemesi yüksek basınçla zemine enjekte edilmeye başlanır. Zemin türüne göre istenilen çapta kolon imal etmek için sistemin ilgili zeminde gerekli basıncı sağlayabilecek kapasitede olması gerekir. Jet grout sistemine ait ekipmanların genel bir şeması (Şekil 3.3)' de görülmektedir.



Şekil 3.3 Jet grout sisteminin ekipmanları (BST Mühendislik)

Jet grout sistemi 4 ana bölümden oluşur. Bunlar delgi makinesi, pompa, mikser ve çimento silosudur.

Delgi makinesi uygulamanın yapılacağı derinliğe kadar olan delgiyi yapma işinden sorumludur. Tij takımı ve beraberindeki delgi başlıkları, nozülleri üzerinde barındıran monitör ve diğer delgi ekipmanları (hidrolik motorlar vd.) bu kısımda bulunur. Delgi makinesi paletli olup taşıma gücü zayıf zeminlerde ve zemin koşullarının elverişsiz olduğu şantiye alanlarında hareket kolaylığı sağlamak amacıyla bu şekilde dizayn edilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Jet grout sistemine ait delgi makinesi

Pompa kısmında mikser bölümünden gelen çimento ve su karışımını delgi makinesine yüksek basınçla iletmek amacıyla tasarlanmış büyük güçte bir dizel motor bulunur. Bu motor havayı sıkıştırarak çimento ve su karışımını yeraltına yüksek basınçta enjekte etmek amacıyla kullanılır. Motorun ikinci bir amacı ise mikser bölümünde hazırlanmış çimento-su karışımını havuzdan çekmektir. Pompa kısmında kullanılan motorlar gerekli zemin koşullarında 400-600 ve büyük projelerde kullanılacak ise 1000 bara kadar basınç üretebilme kapasitesine sahip olmalıdır (Şekil 3.5). Motor üzerinde üretilen basınç, yakıt, motor sıcaklığı gibi değerleri sürekli olarak kontrol edebilmeye imkân tanıyan göstergeler ve istenilen basıncı motor aksamalarını yormadan elde edebilmek amacıyla kullanılan bir vites kutusu bulunur.

Mikser bölümü (karıştırıcı + dinlendirme) 2 büyük havuzun bulunduğu bölümdür. Bu kısımda silodan gelen çimento, su ile homojen biçimde karıştırılır ve ardından dinlendirme kısmına alınarak devamında pompaya iletilir. Mikser bölümünde iki havuz mevcuttur. İlk havuz silodan çimento ve su tankından su çekmek ve bu ikisini homojen biçimde karıştırmakla görevlidir. İkinci havuzda ise ilk havuza göre çok daha yavaş

biçimde karıştırma yapılarak çimentonun su ile tam manada homojen karışması sağlanır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5 Jet grout sistemine ait basıncı üreten motor ünitesi



Şekil 3.6 Jet grout sistemine ait mikser ünitesi

Silo kısmında kuru halde toz çimento bulunur. Silo kısmının ağırlığı diğer ekipmanlara göre daha fazla olduğu için silonun yerleştirileceği zeminin önceden sağlamlaştırılması gerekebilir (Şekil 3.7).

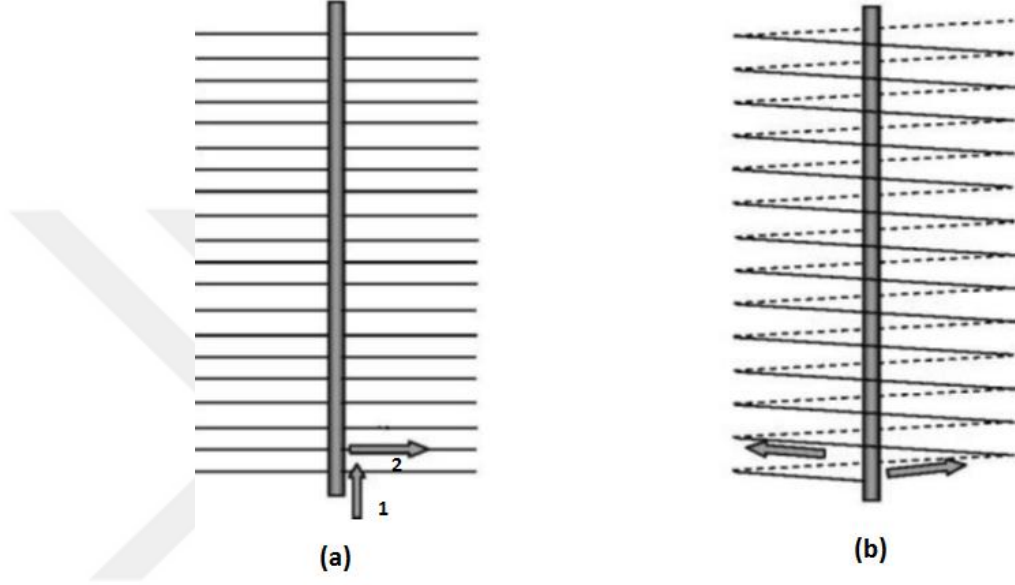


Şekil 3.7 Jet grout sisteminin genel görünüşü ve çimento silosu

Elektrik kesintileri olabilme ihtimaline karşı jet grout sisteminin bulunduğu alanda mutlaka jeneratör bulunmalıdır.

Jet grout sisteminde mevcut olan 2 yönlü harekette rotasyon hızı sabit tutulur. Oluşturulacak kolonun istenilen çap özellikleri taşıma amacıyla yukarı çekme ve rotasyon hızları uygulamada farklılıklar gösterir. Yukarı çekme sistemi adımlı biçimde veya sürekli olarak yapılabilmektedir. Teknolojik anlamda eski olarak sınıflandırılacak makinelerde yukarı çekme işlemi sadece adımlı biçimde yapılabilirken, günümüzde gelişmiş cihaz ve sistemlerde bu işlem oldukça yavaş biçimde ve sabit hızla sürekli olarak yapılabilmektedir. Adımlı sistemde adım aralıkları genellikle her inilen derinlikte bir süre rotasyon ile birlikte enjeksiyon yapılmakta ve 40 veya 100 mm yukarı çekme hareketi yapılmaktadır. Çekme hareketinden sonra işlem tekrarlanarak ilgili derinlikte bir süre rotasyon ve enjeksiyon devam eder. Bu şekilde imalat kolon boyunca basamaklı olarak

devam eder. Sürekli olarak yavaş hızda yukarı çekme hareketi yapıldığı takdirde sürekli olarak enjeksiyon devam etmektedir. Jet spiral bir iz bırakır (Şekil 3.8). Jet enjeksiyonu devam ederken rotasyon işlemi durdurulursa çeşitli geometrilere geçirimsiz duvar benzeri yapıların yeraltında inşa edilebilmesi mümkündür (Shibazaki 2003).



Şekil 3.8 Jet enjeksiyonun tij çekme sistemleri (Shibazaki 2003'den alınmıştır)

- a. adımlı(basamaklı sistem)
- b. sürekli çekme sistemi

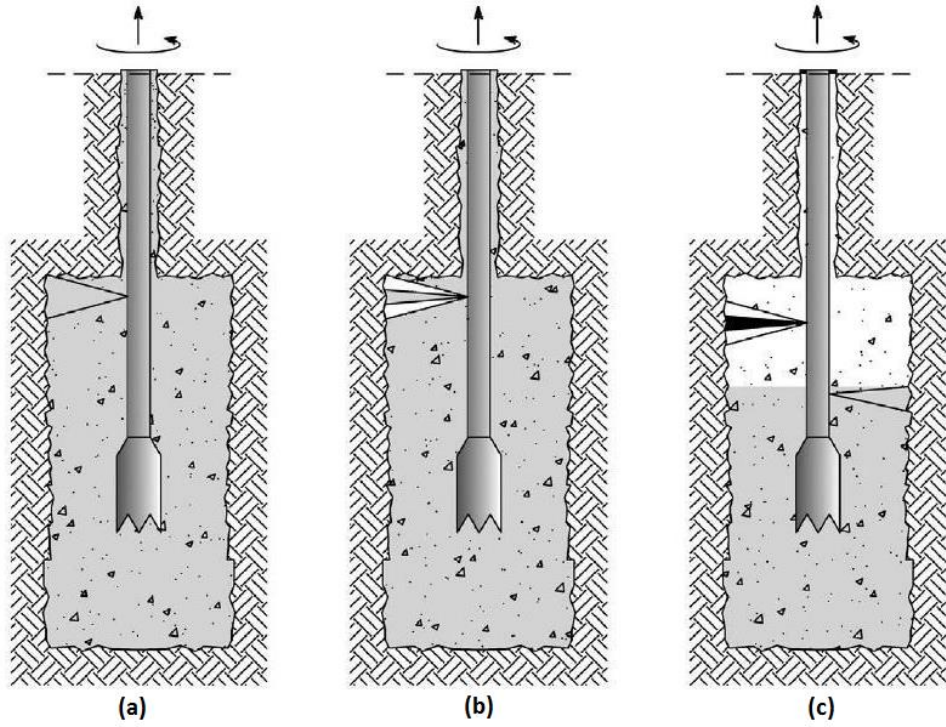
### 3.2.1 Jet grout sistemleri

Jet enjeksiyonu genel anlamda 3 farklı sistem ile kullanılabilir (Croce vd. 2014):

1. Tek akışkanlı sistem
2. Çift akışkanlı sistem
3. Üç akışkanlı sistem

Tek akışkanlı sistemde su ve çimento karışımı birlikte olarak monitör üzerinden tek veya birkaç nozül aracılığı ile zemine yüksek basınç altında aktarılır. Bu sistemde zemini

parçalama ve karıştırma işini tek sıvı yapmaktadır (çimento ve su karışımı) (Şekil 3.9). En basit yöntem olduğu gerekçesiyle uygulamada sıklıkla başvurulan bir metottur. Bu sistemde kullanılan enjeksiyon basıncı zemine ve istenilen kolon çapına bağlı olarak değişmekle birlikte genel olarak 300-600 bar aralığındadır. Genellikle gevşek, kohezyonsuz zeminlerde, gevşek kumlarda ve yumuşak çakıllarda kullanılmaktadır. Kumlu ve çakıllı zeminlerde 100 cm'ye kadar varabilen kolonlar oluşturulabilmektedir (Erkan 2013).



Şekil 3.9 Jet grout uygulama sistemleri a) Jet-1 b)Jet-2 c)Jet-3

Çift akışkanlı sistemde çimento ve su karışımını jetinin yanı sıra basınçlı hava jeti de bulunur. Bu sistemde zemin hem basınçlı hava hem de çimento-su karışımı aracılığı ile parçalanır. İç içe geçirilmiş bir tij seti kullanılarak imalat yapılır. Tijlerde iç kısımdan enjeksiyon malzemesi, tijler arasında kalan boşluktan ise basınçlı hava geçmektedir. Hava için 8-12 barlık basınçların kullanıldığı bu sistem tek akışkanlı sisteme göre daha büyük çapta jet kolonları oluşturulmasına imkân verir (Çizelge 3.1). Kohezyonlu zeminlerde tek akışkanlı sisteme göre daha efektif olan çift akışkanlı sistemde olası nozül tıkanıklıklarını erken fark edebilmek amacıyla Lunardi (1997) tek nozülün kullanılmasını önermiştir.

Üç akışkanlı sistemde iç içe geçirilmiş 3 farklı tij seti kullanılır. Zeminin öğütülmesi ve parçalanması işlemleri ile çimentolanma işlemleri ayrı nozüller aracılığı ile gerçekleştirilir. Özel uygulamalar dışında monitörün çimento-su jetine ait nozülün bulunduğu seviyesinden biraz daha yukarıda ikinci bir hava-su jeti bulunur. Bu şekilde zemin çimentolanma işleminden önce yüksek basınçlı hava ve su aracılığıyla parçalanmış olur. Üç akışkanlı sistemle imal edilen kolonlarda iki akışkanlı sisteme göre daha büyük çapta kolonlar imal etmek mümkün hale gelir.

Bahsedilen sistemlerin dışında SüperJet ve X-Jet adı verilen yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde basınç değerleri geleneksel sistemlere göre çok daha fazladır ve çapı geleneksel yöntemlerle elde edilenlerden çok daha büyük jet kolonları oluşturulmasına müsaade etmektedir.

SüperJet yönteminde tij çekme ve dönme hızı geleneksel sistemlere göre daha düşük olup (3 devir/dk dönme hızı 7 mm/dk çekme hızı) çok daha büyük çaplı kolonlar elde etmek mümkündür.

X-Jet yönteminde nozül konumlandırmaları, jet ile püskürtülen hava ve suyun nozülden belirli uzaklıkta kesişmesi ve çarpışması amacıyla taneciklerin enerjisini kontrol etmeyi amaçlayan bir metottür.

Son yıllarda jet grout yöntemindeki gelişmeler ile geleneksel yöntemlere ek olarak çimento, su ve hava ile birlikte su camı gibi birtakım katkı malzemeleri püskürtülerek yapılan yeni teknikler geliştirilmiştir. İkiz jet adı verilen teknikler üzerindeki araştırma ve çalışmalar halen devam etmektedir (Shen vd. 2013a).

Burke (2004), Jet grout uygulama sistemlerini teknik parametreler ve kullanıldıkları zemin türüne göre oluşturabildikleri kolon çapına göre sınıflandırmıştır (Çizelge 3.2).



### 3.2.2 Jet grout yönteminde kolon çapını ve kolon kalitesini etkileyen faktörler

Jet grout uygulamalarında kolonun hangi amaçla imal edildiği ve çapının, geometrisinin nasıl olması gerektiği sorularına karşılık cevaplar üretmek üzere farklı zeminlerde farklı sistemler ve farklı parametreler kullanmak gereklidir. Shen vd. (2013c) jet grout yönteminde kolon çapı ve kolon dayanımını etkileyen faktörleri enjeksiyon basıncı, nozül çapı, nozül sayısı, enjekte edilen karışımın özellikleri, akış hızı, dönme hızı, çekme hızı, zemin direnci ve partikül boyutu olarak belirlemiştir.

Çizelge 3.1 jet grout sistemlerinde kullanılan teknik parametreler (Burke 2004'den değiştirilerek alınmıştır)

		Tek akışkanlı	Çift Akışkanlı	Üç Akışkanlı
Su	Basınç (Bar)	-	-	300-400
	Hacim(l/dk)	-	-	80-200
	Nozül Sayısı	-	-	1-2
	Nozül Boyutları (mm)	-	-	1,5-3,0
Hava	Basınç(bar)	-	7-15	7-15
	Hacim (m3/dk)	-	8-30	4-15
Çimento	Basınç(bar)	400-700	300-700	7-100
	Hacim(l/dk)	100-300	100-600	120-200
	Yoğunluk	1,25-1,6	1,25-1,8	1,5-2,0
	Nozül Sayıları	1-6	1-2	1-3
	Nozül Boyutları (mm)	1,0-4	2-7	5-10
Çekme	Adım Boyu(cm)	0,5-60	2,5-40	2-5
	Adım Zamanı(sn)	4-30	4-30	4-20
Dönme	Hız(rpm)	7-20	2-20	7-15

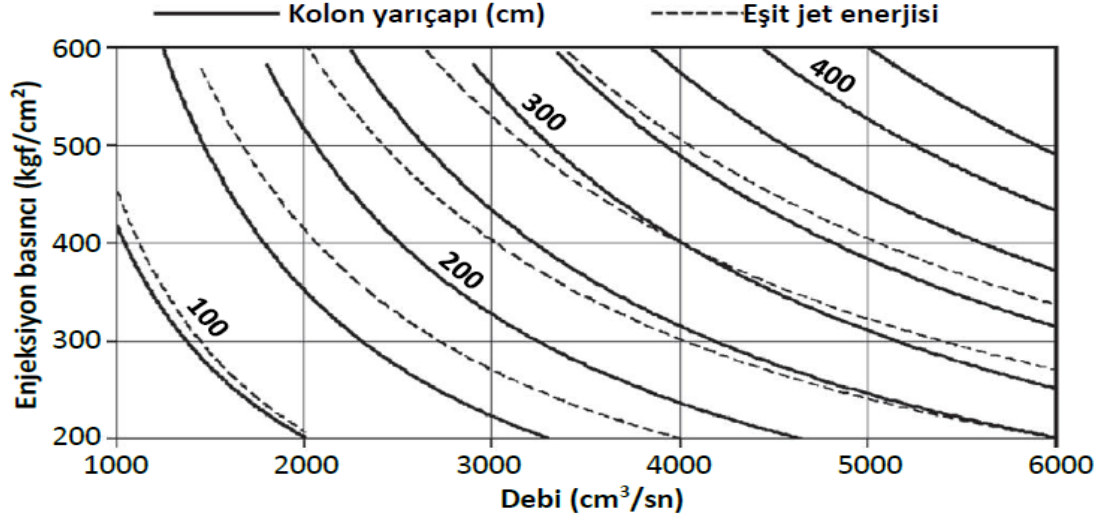
Çizelge 3.2 Uygulanan jet grout yöntemi ve uygulanan zemine göre oluşturulan ortalama kolon çapları (Burke 2004'den değiştirilerek alınmıştır)

Sistem	Yumuşak killer	Siltler	Kumlar
Tek Akışkanlı	0,4-0,9 m	0,6-1,1 m	0,8-1,2 m
Çift Akışkanlı	0,9-1,8 m	0,9-1,8 m	1,2-2,1 m
SüperJet	3,0-4,3 m	3,3-4,6 m	3,5-5,0 m
Üç Akışkanlı	0,9-1,2 m	0,9-1,4 m	0,9-2,5 m
X-Jet	2,3 m	2,3 m	2,3 m

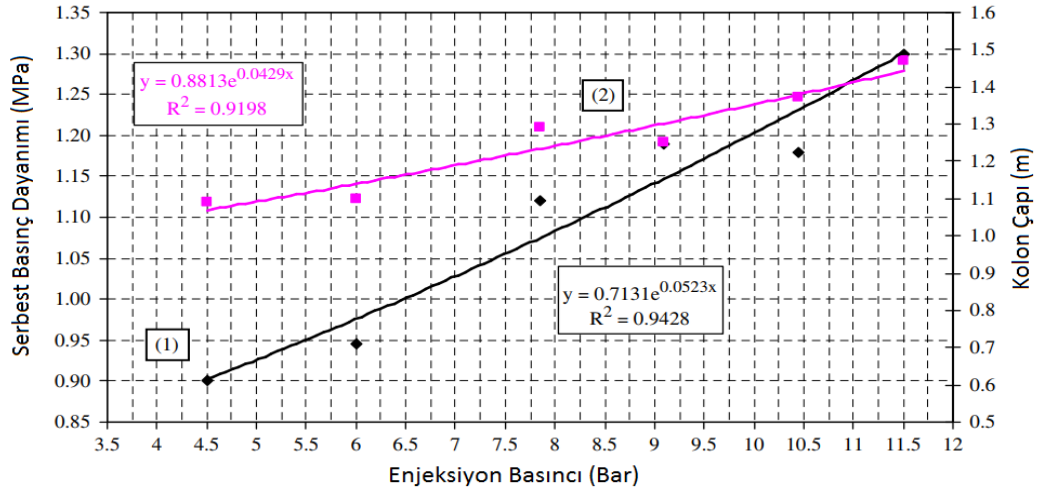
### Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncı ile jet grout kolonlarının çapı ve dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Shibazaki, 2003), (Nikbakhtan ve Ahangari 2010). Zemin türü, enjeksiyon basıncı ve kolon çapı araştırmacıların üzerinde sıklıkla durduğu parametrelerdendir. İstenilen kolon çapını elde etmek için gereğinden fazla basınç uygulanması zeminde gereksiz deformasyonlara ve yüzeyde yırtılmalara, şişmelere neden olabileceği gibi gereğinden düşük basınç uygulanması da kolonların istenilen çapa ulaşamamasına ve kalite bakımından yetersiz olmasına yol açabilir. Bu nedenle araştırmacılar farklı olay analizlerinden ve laboratuvar çalışmalarından çeşitli sonuçlar elde ederek derlemişler ve kolon çapı-zemin türü-uygulanan basınç parametrelerinde farklı abakların oluşmasına neden olmuşlardır. Croce vd (2004) yazdıkları kitapta nozülde fırlatılan taneciklerin sahip olduğu basıncın zemin tarafından soğurulmasına dair elde ettikleri verileri grafik halinde paylaşmışlardır (Şekil 3.10). Nikbakhtan ve Ahangari (2010)'nin ilgili çalışmalarında elde ettikleri kolon çapı, dayanım ve enjeksiyon basıncı değerleri (Şekil 3.11)'de verilmiştir. Farklı

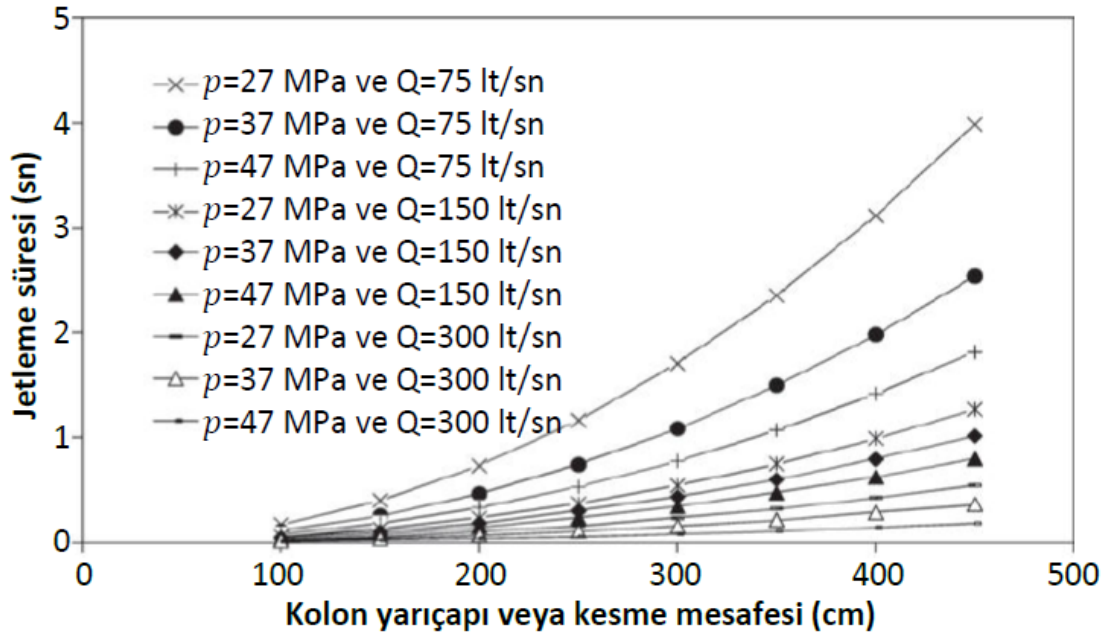
araştırmacıların benzer araştırmalar ile elde ettikleri veriler Şekil 3.11 - 3.14'de verilmiştir.



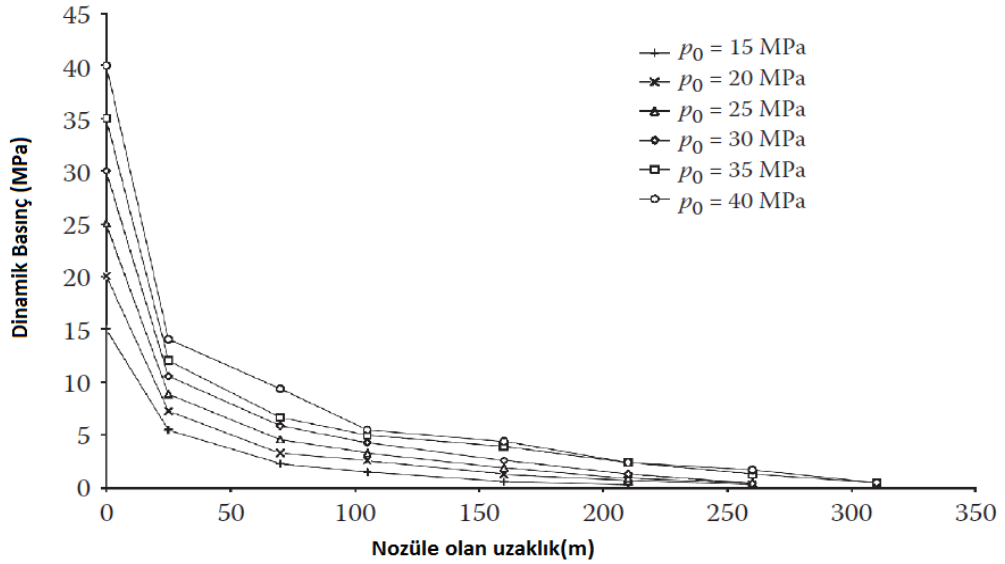
Şekil 3.10 Nozüllerden fırlatılan taneciklerin basınçlarının zemin tarafından soğurulmasına ait veriler (Croce vd. 2004)



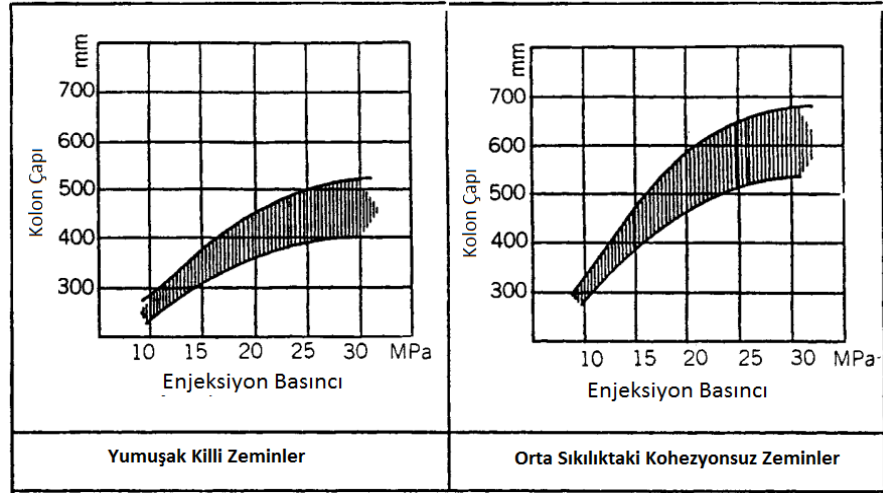
Şekil 3.11 Dayanım, kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Nikbakhtan ve Ahangari 2010)



Şekil 3.12 Farklı enjeksiyon basınç, debi ve jet uygulama sürelerinden elde edilen kolon yarıçapları (Yonokura ve Shibazaki 1996'dan değiştirilerek alınmıştır)



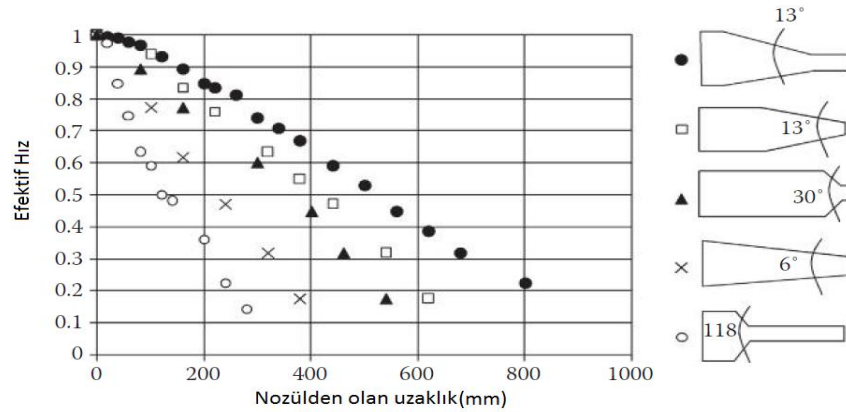
Şekil 3.13 Jet grout sistemlerinde dinamik basınç değerleri ile nozüle olan uzaklık ilişkisi (farklı enjeksiyon basınçları ile değerlendirilmiştir)(Vleeschauer ve Maertens, 2000'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 3.14 Zemin tipine bağlı olarak kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos vd. 1994'den değiştirilerek alınmıştır)

### Nozül Çapı ve Nozül Sayısı

Nozül şekli ve çapı jet grout uygulamasının etkinliği için son derece önemlidir. Odaklanmış bir şekle sahip nozülün, kolon geometrisini ve yapısını daha kesin şekilde biçimlendireceği Shibazaki (2003) tarafından belirtilmiştir. Farklı nozül şekillerinden çıkan sıvının nozülden uzaklaştıkça enerji kaybını gösteren grafikte karşılaştırmalar yapılmıştır (Şekil 3.15).

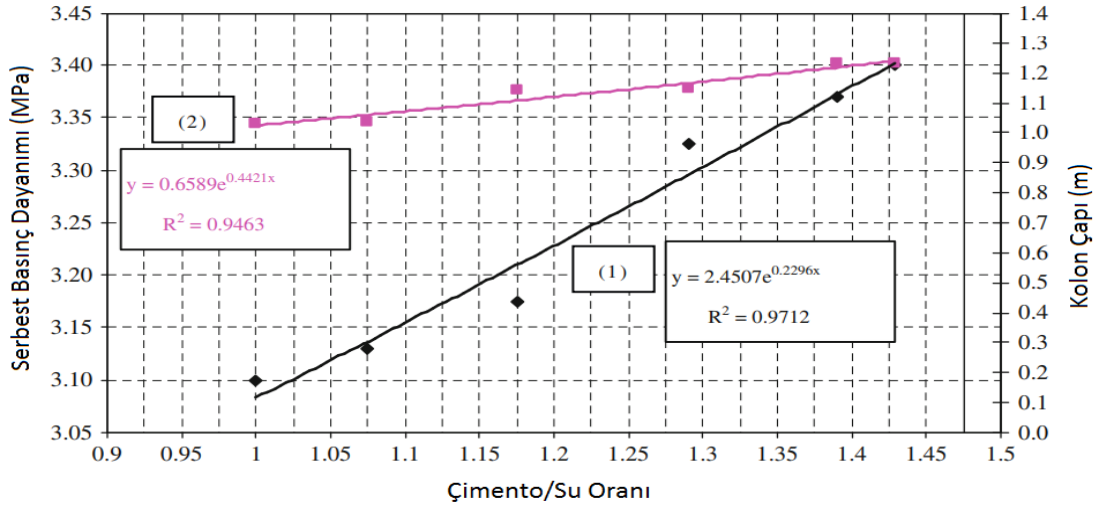


Şekil 3.15 Çimento partiküllerinin nozülden ayrılması ile oluşan efektif hızları ve nozülden olan uzaklıklarının farklı nozül tiplerine göre karşılaştırılması (Shibazaki,2003'den değiştirilerek alınmıştır)

Buna göre 13<sup>0</sup>'lik daralma açısı ve çıkış noktasında nozül çapının 3 katı uzunluğunda doğrusal parçası bulunan nozülün kullanılması tavsiye edilmiştir (Leach ve Walker 1966, Shibazaki 2003).

### Enjeksiyonda kullanılan sıvının özellikleri

Jet grout imalatında kullanılan enjeksiyon malzemesi çimentodur. Çimentoya katkı olarak yakın zamanlarda çimento katkı malzemeleri kullanma fikri birçok araştırmacıyı düşündüren konulardandır. Su/çimento oranı, dozaj gibi kavramlar imal edilecek jet grout kolonlarının kalitesini doğrudan etkilemektedir. Uygulamalarda en çok tercih edilen su/çimento oranı 1.0 olsa da uygulamalarda farklılık göstererek 0,6 ile 1,3 arasında bir değer alabilir. Bu oranın artırılması dayanımın düşmesine neden olmaktadır (Nikbakhtan ve Ahangari 2010)(Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Çimento/Su oranının dayanım ve kolon çapı üzerindeki etkisi (Nikbakhtan ve Ahangari, 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

Saha uygulamalarında enjeksiyon malzemesinin özgül ağırlığı genellikle 1,410 ve 1,570 kg/m<sup>3</sup> aralığındadır. Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu da kolon geometrisini ve

kalitesini etkilemektedir. Akışkanlığı yüksek olan malzemeler düşük akışkanlığa sahip malzemelere göre daha fazla saçılmaktadır. İyileştirilmiş 1 m<sup>3</sup> zemin içerisinde bulunan çimento miktarı 350-700 kg arasında değişmektedir (Yağızatlı 2012). Burke (2004)'e göre zemin tipine göre imal edilen kolonun 1 m<sup>3</sup>'lük kısmında bulunan çimento miktarı Çizelge şeklinde verilmiştir (Çizelge 3.3). Baumann (1984)'e göre su/çimento oranlarının, jet grout kolonunun imal edildiği zemin türüne göre dayanım değerleri Çizelge halinde verilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.3 Zemin türüne göre imal edilen kolonlarda bulunan çimento miktarları (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır)

Zemin Tipi	Kolon içerisindeki Çimento Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kumlar	150-250
Siltler ve Siltli Kumlar	200-27
Killer	250-350
Organik Siltler ve Turbalar	300-400

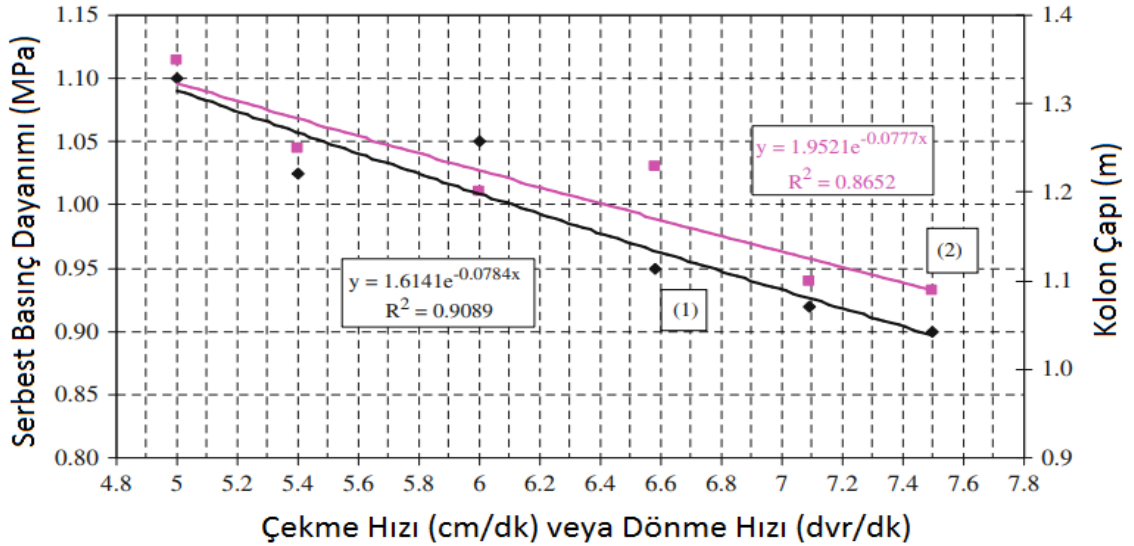
Çizelge 3.4 Su/Çimento oranına bağlı olarak jet grout kolonlarının farklı zemin türlerinde oluşturulmuş örnekleri için dayanım değerleri (Baumann,1984'den değiştirilerek alınmıştır)

Kolon Basınç Dayanımı (Mpa)							
Zemin Tipi	Çakıl	Kum	Silt,Kil	Organik Zemin	Çakıllı Kumlu	Kumlu Siltli	Siltli Killi
S/Ç Oranı=0,67	≤20	≤15	≤12	≤3	12-18	10-14	6-10
S/Ç Oranı=1,00	≤20	≤15	≤12	≤3	6-10	5-7	3-5

Ayrıca enjeksiyonda kullanılan malzemenin hava konisi içinde uygulanması jetin kesme enerjisini 5 kata kadar artırır. Ancak bu şekilde kolon çapında artış gözlenirken, malzeme içerisinde hapsolan hava boşlukları nedeniyle dayanım kayıpları oluşmaktadır. Shen (2013)'e göre 0,5-1,5 MPa basınçla püskürtülecek olan bu havanın yardımıyla 2 akışkanlı sistemde %27 ve 3 akışkanlı sistemde %81 kolon çapı artışı gözlenmektedir.

### Tij dönme hızı ve çekme hızı

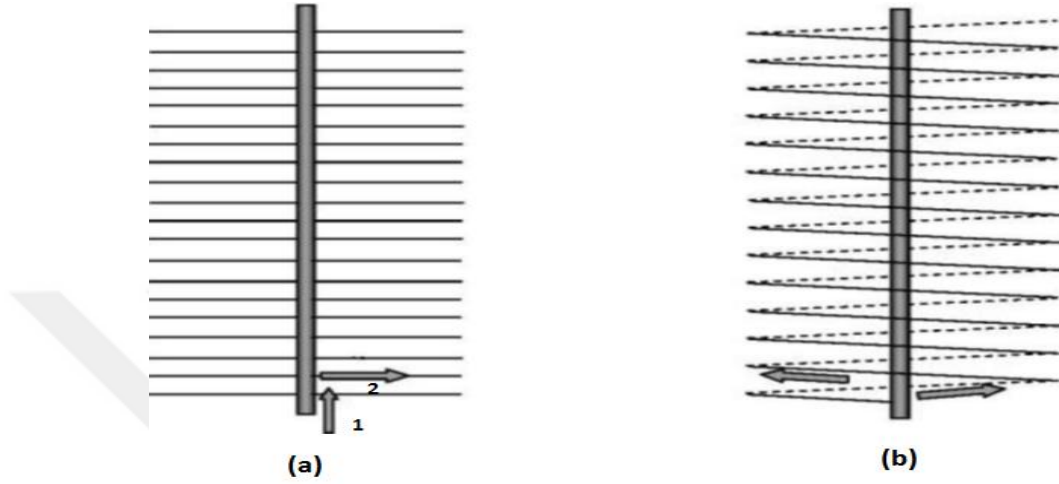
Jet kolonlarının silindirik ve homojen biçimde imal edilmesi istenildiği takdirde her imalatın yapılacağı derinliğin tamamında rotasyonun tam olarak yapılması gerekir. Tij dönme hızı genellikle 5-30 devir/dk arasında değişir. Shen (2013c), tijin dönme hızının kolon çapı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Dönme hızının artırılmasının sadece kolonun uniformluk derecesini artırdığını ancak, çapı artırmadığını belirtmiştir. Nikbakhtan ve Ahangari (2010) yaptıkları çalışmada yukarı çekme hızı ve dönme hızı artışının kolon çapı ve kolon dayanımının logaritmik olarak düşmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Çekme ve dönme hızına bağlı olarak kolon çapı ve serbest basınç dayanımı ilişkisi (Nikbakhtan ve Ahangari 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)



Tijin yukarı çekilme hızında gereğinden hızlı hareket edilirse devamlılığı olmayan, spiral kolonlar elde edilmektedir. Gereğinden yavaş çekilmesi ise yeraltına gereğinden fazla çimento malzemesi enjeksiyonu ve dolayısı ile de maliyet kayıpları ile sonuçlanmaktadır. Tijen yukarı doğru 2 farklı metotla çekilebilmektedir. (Shibazaki 2003) (Şekil 3.18).



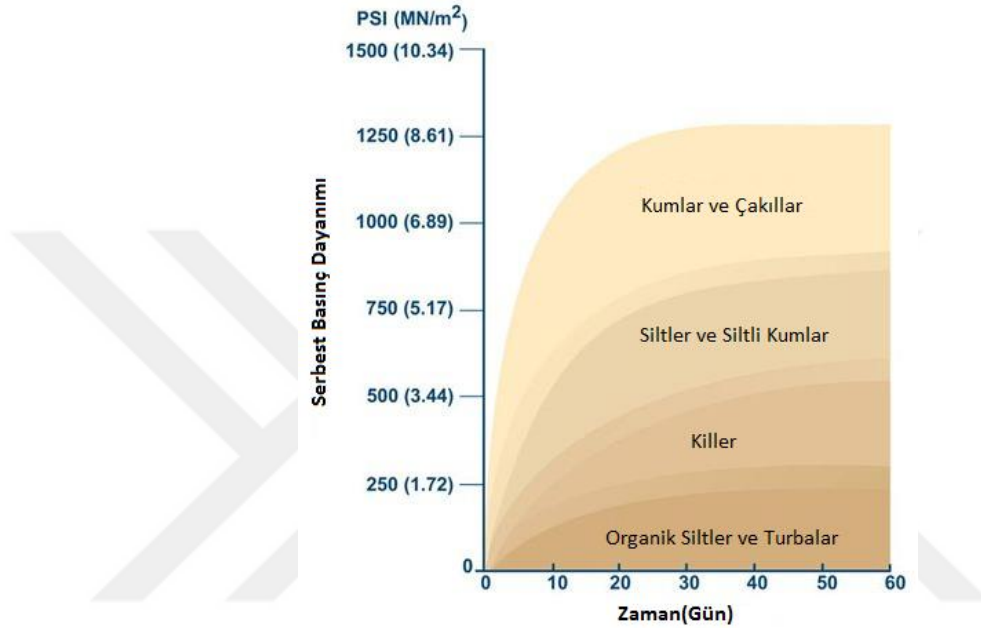
Şekil 3.18 Jet grout imalatında tijin yukarı çekilme metotları  
a.basamaklı-adımlı sistem  
b.sürekli çekme sistemi

İlk sistem adımlı veya kademeli olarak adlandırılan ve 4-5 cm çekilip ilgili yükseklikte zemin türüne bağlı olarak 5-40 sn beklenilmesi veya 4-20 devir dönme ile tekrar 4-5 cm civarında yukarıya çekme olarak ifade edilebilir. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni jet grout delgi makineleri, yukarı yönde sürekli olarak ancak çok yavaş bir hızda hareket edebilmektedir. Yukarı yönde sabit hızda sürekli olarak çekme işlemi yapıldığında oluşturulan kolonların homojenliği daha yüksek olmaktadır.

### Zemin Özellikleri

Jet enjeksiyonunun yapılacağı zeminin fiziksel özellikleri oluşturulacak kolonun çapını ve kalitesini belirleyen en önemli parametrelerdendir. Diğer zemin iyileştirme metotlarına göre jet-grout yönteminin en önemli avantajı birçok farklı zemin türünde uygulamasının yapılabilir olmasıdır. Burke (2004) jet kolonunun oluşturulduğu farklı zemin türlerinde

kolonların dayanımını sınıflandırmış ve aşağıdaki grafiği elde etmiştir (Şekil 3.19). Melegari ve Garassino (1997) farklı zemin tiplerinde oluşturulan kolon dayanımlarını Çizelge halinde vermişlerdir (Çizelge 3.5). Zemin türüne göre kolon özellikleri konusunda araştırma yapan bir diğer çalışmacı da Durgunoğlu (2004) olmuştur (Çizelge 3.6).



Şekil 3.19 Bazı zemin türlerinde imal edilen jet grout kolonlarının dayanım değerleri (Burke,2004'den değiştirilerek alınmıştır)

Çizelge 3.5 Zemin türlerine göre oluşturulan jet grout kolonlarının taşıma kapasiteleri (Melegari ve Garassino, 1997'den değiştirilerek alınmıştır)

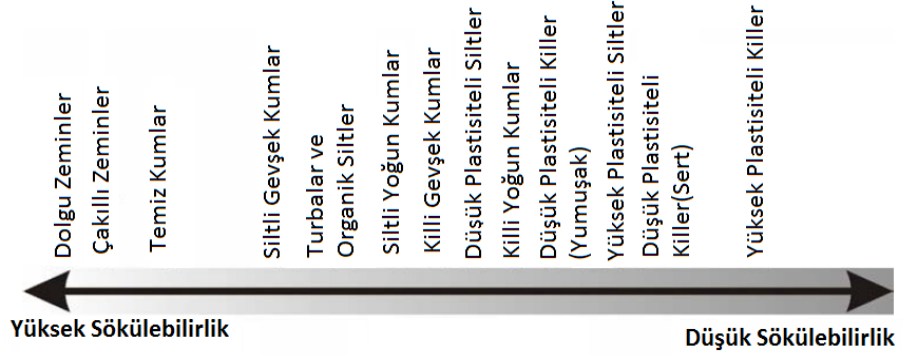
Zemin Türü	Jet Grout Kolon Taşıma Kapasitesi (kg/cm <sup>2</sup> )
Organik	3
Kil	18-30
Silt	30-45
Kum	60-90
Çakıl	100

Çizelge 3.6 Bazı zemin türlerinde imal edilen jet grout kolonlarının dayanım değerleri ve elastisite modülü oranları (Durgunoğlu, 2004)

Zemin Cinsi	Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Modül Oranı $E/q_u(^*)$
Kil	2-5	150
Silt	3-7	200
Kum	7-14	600
Çakıl	12-18	900

Buna göre çakıllı ve kumlu zeminlerde imal edilen jet grout kolonları, killi ve siltli zeminlerde imal edilen kolonlara göre daha yüksek dayanımlara sahip olmaktadır. Bir diğer farklı husus ise küçük ve ince taneli zeminlerde kolon imalatı yapılırken taneciklerin nozülleri tıkama ihtimalidir. Böyle bir durum gerçekleştiği takdirde yeraltındaki kolonun geometrisi bozulabilir ve silindirik olmayan, heterojenliği yüksek kolonlar üretilmiş olur. Bu kolonların taşıma gücü düzgün geometrili kolonlara göre daha az olacağı gibi, hali hazırda imal edilmiş bir kolonu onarma şansında oldukça düşüktür.

Birçok farklı çalışmacının ortak olarak ifade ettiği ve bulgu olarak çalışmalarında sunduğu verilere göre zeminde tane boyutu arttıkça zeminde oluşturulan jet kolonun taşıma gücü de artmaktadır. Farklı zemin tiplerinin sergilediği farklı aşınabilme özellikleri Burke (2004) tarafından çalışmada incelenmiştir (Şekil 3.20). Buna göre kohezyonu yüksek zeminlerin aşınabilme, sökülebilme özelliği kohezyonu düşük zeminlerin aşınabilme özelliğine göre daha zordur. Ayrıca kohezyonsuz zeminlerin aşınabilme özelliği kohezyonlu zeminlere göre daha kolaydır.



Şekil 3.20 Zeminlerin jet grout uygulamaları için sökülebilirliğinin sınıflandırılması (Burke,2004'den alınmıştır)

Tabakalanmalı veya birden fazla zemin türünün bulunduğu zonlarda imalat yapılmadan önce mutlaka sondaj ve SPT-CPT deneyleri yaparak zemin etüt edilmelidir. Sıkı ve gevşek tabakalar arasında imalat esnasında geçiş yapılırken imalat parametrelerinde değişiklik yapılmaz ise çapı değişken kolonlar üretilmiş olur. Basınç, dönme hızı, çekme hızı, su/çimento oranı gibi parametrik değerler sabit tutularak üretim yapılmaya devam edilirse zayıf zonda büyük çap, sert veya yoğun zonda ise küçük çapta kolon üretilmiş olur. Bu ise istenilmeyen dayanım kayıplarını doğurabilir.

İmal edilecek kolonların çap olarak istenilen seviyede olabileceğini kontrol etmenin en kesin yolu proje kapsamında önerilen değerler ile aynı saha içerisinde atıl bir noktada deneme kolonları oluşturmaktır. Deneme kolonu oluşturulup prizini aldıktan sonra çevresi açılarak birkaç metre derinliğinde çukur kazılır ve çap ölçümü gerçek değerler ile yapılır. Elde edilen değerlere göre basınç ve dönme-çekme hızı gibi parametrelerde değişiklikler yapılabilir.

### 3.2.3 Jet grout uygulama alanları

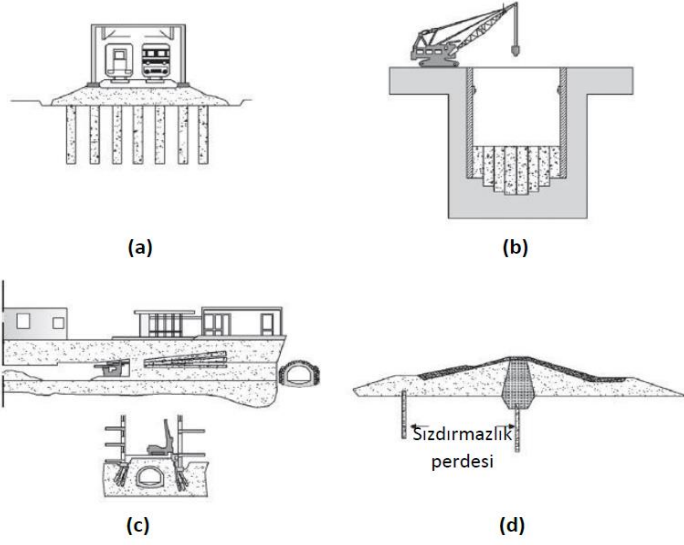
Gelişmiş jet ekipman ve teknolojileriyle farklı geometrilerde kolonların oluşturulmasının mümkün olduğu günümüzde, inşaat sektöründe hemen hemen her alanda kullanılabilen jet grout kolonları düşük maliyeti, geniş spektrumlu uygulanabilirliği ve hızlı uygulama

yapılabilmesi sebebiyle sürekli olarak başvurulanan bir zemin iyileştirme metodu olarak karşımıza çıkmaktadır.

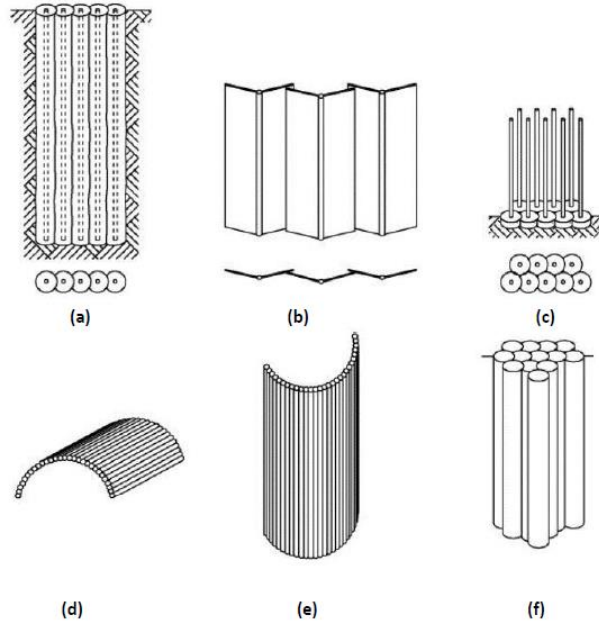
Jet grout yönteminin kullanım alanları her geçen gün gelişmekle birlikte genel olarak 5 farklı başlık altında toplanabilir. Bunlar;

1. Temel Sistemleri
2. İstinat yapıları
3. Geçirimsizlik yapıları
4. Tüneller
5. Diğer uygulama alanları olarak sınıflandırılabilir.

Jet grout kolonları genel itibariyle zeminin taşıma gücünü artırır ve geçirimsizliğini düşürür. Temellerde taşıma gücünü artırmak amacıyla, sızdırmazlık gerektiren perde duvar inşası amacıyla, yumuşak zeminlerde inşa edilen tünellerde ayna gerisinin desteklenmesi ve aşırı sökülme önlemek amacıyla, istinat duvarlarının takviye edilmesi amacıyla, köprü-viyadük gibi ağırlığı yüksek olan ve zemine büyük yük aktaran yapıların temellerinin desteklenmesi amacıyla, atık sahalarında geçirimsizlik oluşturması amacıyla ve barajlarda geçirimsiz çekirdek oluşturulması amacıyla ve daha birçok yerde kullanılırlar. Jet grout kullanım alanlarına ilişkin Croce vd. (2004) şekillerdeki örnekleri vermiştir (Şekil 3.21-3.22) (Malinin vd. 2010).



Şekil 3.21 Jet grout yöntemi kullanım alanları (Croce vd. 2014'den alınmıştır)  
 a.dolgu tabanı  
 b.kazı sistemlerinde taban sızdırmazlığı  
 c.geçici tünel destek sistemleri  
 d.barajlarda sızdırmazlık perdeleri



Şekil 3.22 Jet grout yöntemi uygulama örnekleri  
 a. Perde  
 b. Perde  
 c. radyeler  
 d. tüneller  
 e. shaftlar  
 f. blok temeller

### 3.2.4 Jet grout kolonlarının kalite kontrolü

Jet grout yönteminin başarılı biçimde uygulanabilmesi için öncelikle imalatın yapılacağı zeminin detaylı biçimde incelenmesi gerekir. Bunun için yeraltını örneklemek amacıyla sondaj, zeminin mekanik özelliklerini belirleyen laboratuvar deneyleri, SPT-CPT gibi arazide yapılan deneyler ve mümkünse yeraltında rastlanabilecek boşluklu yapıları belirleyebilmek için jeofiziksel araştırmalar yapılmalıdır. Ardından jet grout yönteminin hangi amaçla uygulanacağı belirlenmeli ve sonrasında imalat parametreleri de (basınç, su/çimento oranı, kullanılacak çimento türü, varsa kullanılacak katkı malzemeleri, dönme ve çekme hızları, dozaj vb.) belirlenerek deneme kolonları oluşturulmalıdır.

Deneme kolonlarında istenilen çapta ve kalitede kolon oluşturulduğunu anlayabilmek amacıyla kolonların etrafı birkaç metre derinliğinde açılarak kolon açığa çıkartılır ve çap ölçümü yapılır (Şekil 3.23-3.24). İstenilen çap değeri sağlanıyorsa imalat parametre değerleri değiştirilmeden üretime devam edilir. Çap değerleri istenilen seviyenin altında ise parametreler değiştirilerek (basıncın artırılması, dönme ve çekme hızlarının azaltılması gibi) tekrar deneme kolonu oluşturulur.



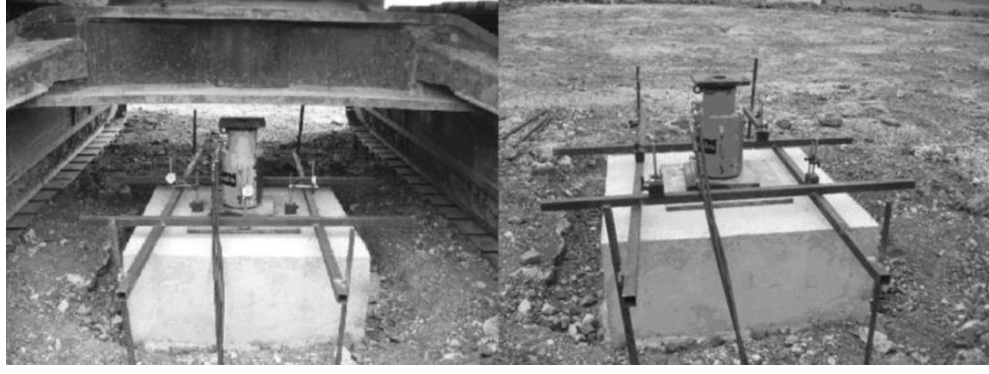
Şekil 3.23 Deneme kolonlarının açığa çıkartılara çap ölçümü yapılması

İmalat sonrasında kolonların istenilen dayanım değerlerine sahip olup olmadığının kontrolü için 28 günlük priz süresini tamamlayan kolonlardan karot numuneler alınır. Karot numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri ve elastisite modülü hesaplanması ile kolonun dayanımı belirlenir. Kolon boyunun istenilen derinliğe erişip erişmediği ise tam boy karotlama işlemi ile anlaşılabilir. Gerekli görülen durumlarda tam boy karotlamaya başvurulmaktadır. Taşıyıcı eleman olarak tasarlanan kolonlarda çekme ve yükleme testleri uygulanabilir. Yükleme testlerinde test kolonlarına proje yükünün en az 1.5 katı kadar yük uygulanmaktadır. Deney kolonlar yenilene kadar veya maksimum oturma miktarı gerçekleşene kadar devam eder (Yağızatl 2012) (Şekil 3.25).



Şekil 3.24 Bilimsel bir çalışma için imal edilen jet grout kolonunun tamamının açığa çıkarılması





Şekil 3.25 Jet grout kolonunun çekme ve yükleme testlerine tabii tutulması

Kolonun boyunu ve kesitteki düzensizlikleri tespit etmek amacıyla Pile Integrity Test uygulanabilir. İvmeölçer prensibine dayanan bu elektronik mekanizma kolona yerleştirilerek kolonun üzerine çekiç ile bir darbe uygulanır. Cihaz sismik dalganın kolon bitiminden geri yansımaları esasına dayanarak kolon boyunu ve varsa süreksizlikleri ölçmenin en hızlı yoludur (Şekil 3.26). Kolonda süreksizlikler mevcut ise Pile Integrity Test ile kolon boyu ölçümü yapılması uygun değildir.



Şekil 3.26 Pile Integrity Test ile jet grout kolonunda ölçüm yapılması

(www.zeminarastirma.com,2018)

### 3.3 Sülfatın Beton Üzerindeki Etkisi

Günümüz teknolojisi ile inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Beton agrega, çimento, su ve varsa katkı materyallerinin karıştırılmasıyla oluşturulan düşük maliyetli, efektif ve yüksek dayanımlı bir malzemedir. M.Ö. 3000 yıllarından itibaren kalsiyum ( $Ca^{+2}$ ) esaslı bağlayıcı malzemeler kullanılsa da çimentonun günümüzdeki halini alması 1800'lü yıllara kadar sürmüştür. Oldukça yaygın olarak kullanılan Portland çimentosu 1824 yılında keşfedilse de bu çimentonun kullanıldığı ilk yapı 1857 yılında inşa edilmiştir.

Betonu oluşturan malzemelerden agrega, betonun kullanım amacına bağlı olarak farklı boyutlarda olabilir. Birkaç mm boyutundaki kumlardan blok boyutuna kadar olan temiz her türlü taneli bileşen beton için gerekli agregayı oluşturabilmektedir. Betonun yaklaşık olarak dörtte üçünü teşkil eden agregalar sert ve dayanıklı olmak durumundadır.

Su, betonda önemli bir yer tutmaktadır. Agregaya ve çimentonun karıştırılması ve şekil verilebilir bir hal almasında önemli rol oynamaktadır. Ayrıca çimentoda meydana gelecek olan kimyasal reaksiyonları başlatmaya neden olan karışım suyu TS-EN-1008, 2003 kriterine uygun olarak seçilmez. Karışım suyunun temiz olması ve çimentonun kimyasal ve fiziksel yapısına zarar verecek iyonları barındırmaması gerekmektedir.

Betonun en önemli bileşeni ise çimentodur. Yalçın ve Gürü'ye göre (2004) çimentonun bileşimi şöyle ifade edilmiştir "Çimento esas olarak, killi ve kireçli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400-1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir. Klinker üretimi için gerekli olan başlıca hammaddeler, kalsiyum oksit ve silisyum dioksittir. Ayrıca klinkerin erime sıcaklığını düşürmek için az miktarda alüminyum oksit ve demir oksite de ihtiyaç vardır. Bu kimyasal maddeleri içeren mineraller genellikle kalsit ve kildir. Aynı amaçla bunların doğal karışımı olan "kireçli marn" da kullanılabilir. Kalkerden klinker için gerekli olan kalsiyum oksit, kilden silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimlerini karşılar. Bazı durumlarda klinkerin silisyum dioksit ve demir oksit ihtiyacı yeterli olmaz ve hammadde

harmanına ayrıca kuvars kumu veya demir cevheri katılarak ayarlanır. Ancak elde edilecek klinkerin bileşimi dikkate alınarak hammaddeyi oluşturan harmanın kimyasal bileşimi çok hassas bir şekilde kontrol altında tutulur. Özellikle fırına giren hammadde karışımı içerisinde  $\text{CaCO}_3$  miktarının % 75-% 79 arasında kalmasına özen gösterilir. Çimentonun hammaddesini oluşturan ve yüksek sıcaklıklı fırında pişirilen bu maddeler Trikalsiyum silikat, Dikalsiyum silikat, Trikalsiyum Aluminat ve Tetrakalsiyum alüminoferrit gibi daha karmaşık ürünler meydana getirir”.

Çimento su ile tepkimeye girerek hidratasyon reaksiyonları ve ürünleri meydana getirir ve bu reaksiyon aracılığı ile beton bağlama özelliği ve dayanım kazanmaya başlar. Çimentonun görevi agrega tanelerini birbirine bağlamak ve dayanım kazandırmaktır.

Betonun dayanımını kontrol eden faktörler su/çimento oranı, karışımda kullanılan suyun kimyasal özellikleri, kullanılan agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri ve kullanılan çimento miktarı gibi başlıca parametrelere bağlıdır. Su/çimento oranının artması betonun porozitesini artırarak dayanım kayıplarına neden olmaktadır. Artan porozite ile birlikte betonun servis ömrü boyunca içerisine nüfuz edebilecek kimyasalların beton ile reaksiyona girmesi kolaylaşır. Ayrıca kullanılan agregada bulunabilecek ve çimento ile reaksiyona girerek beton dayanımını düşürecek malzemeler de aynı şekilde betona zarar verir. Yine aynı şekilde kullanılacak agreganın fiziksel olarak düşük dayanımlı olması veya bol kırıklı çatlaklı olması durumunda betonun da dayanımı düşecektir (Yalçın ve Gürü 2004).

Betonun dayanımını etkileyen iç faktörlerin yanı sıra bulunduğu ortam ile alakalı olarak dış faktörler de bulunmaktadır. Betonun dayanımı ile ilgili etkiye sahip en önemli dış faktörlerden birisi sülfat iyonlarıdır. Sülfat iyonları betonun yapıtaşlarını oluşturan mineraller ile tepkimeye girerek farklı ürünler meydana getirmektedir. Bu şekilde betonun fiziksel ve kimyasal yapısı bozulmuş olur. Sülfat etkisi mekanizması sülfat atak olarak da adlandırılan ve betona zarar veren bir mekanizmadır. Mekanizmanın oluşma ve gelişme biçimi henüz kesin olarak belirlenememiş olsa da gelişen teknoloji ile sülfatın etki mekanizmasına dair birçok araştırmacının takdir ve onayını toplayan teoriler önerilmiştir. Bu konu araştırmacıların halen üzerinde durdukları bir konudur.

Sülfatın temel kaynakları yeraltı suyu ve deniz suyudur. Yeraltı suyunda bulunan sülfat genellikle jeolojik malzemeler içerisinde bulunan minerallerden kaynaklanır. Buharlaşmanın yoğun olarak gerçekleştiği yaz mevsimlerinde genellikle sulardaki sülfat konsantrasyonunda artış meydana gelmektedir. Ayrıca doğaya korumasız biçimde bırakılan çöplerden ve atıklardan süzülen sular, fabrika ve sanayi bölgelerinden doğan atık malzeme ve sular bazı gübre çeşitleri ve bazı tür bakteriler de sülfata kaynak oluşturmaktadır (Xu vd. 1998).

Sülfatın beton üzerindeki etkisini kontrol eden faktörler arasında, su/çimento oranı, çimento katkı malzemelerinin kullanılma durumu ve varsa oranları, betona nüfuz eden sülfatın konsantrasyonu, sülfatın katyon tipi, kür tipi, ortam sıcaklığı ve puzolan vb malzemelerin varlığına bağlıdır (Santhanam vd. 2001).

Çimentonun hidrasyon ürünleri ile sülfatın tepkimeye girmesi sonucu yeni ürünler meydana gelmektedir. Birçok araştırmacının görüşüne göre (Yang 1996, Roziere 2009, Müllauer vd, 2013, Yu 2013, Yang 2018, Ma vd. 2018) sülfat etki mekanizmasının sebebi, beton içerisindeki küçük porlarda (10-50 nm) çimento mineralleri ile sülfatın tepkimeye girerek yeni mineraller oluşturmasıdır. Oluşan bu yeni minerallerin kristalizasyon basıncı ile içerisinde büyüdüğü gözeneği çatlatıp büyümeye devam etmesi ile mikro çatlakların oluşması ve birleşen mikroçatlakların genişlemeye devam ederek daha büyük çatlakları oluşturması ile açıklanabilen sülfat etkisi konusunda araştırmacıların çalışmaları halen devam etmektedir.

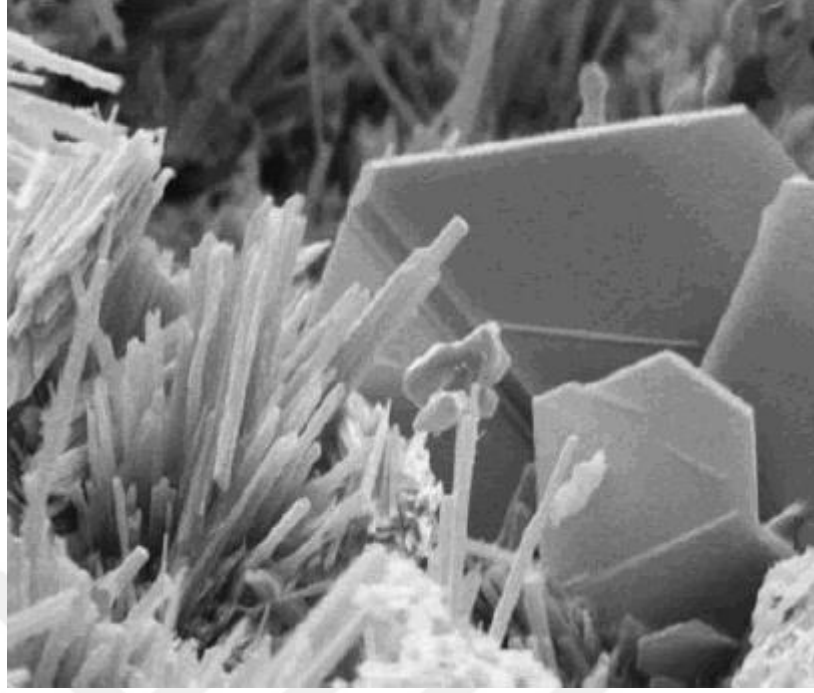
### **3.3.1 Sülfatın etki mekanizması ve reaksiyonlar sonucu oluşan yeni materyaller**

Çimentonun hidrasyon ürünleri olan mineraller ile sülfat iyonları arasında oluşan tepkimeler sonucunda, sülfat iyonlarının barındırdığı katyonlara bağlı olarak etrenjit, tomasit, brüsit, jips gibi ürünler oluşmaktadır. Bu mekanizmaya ait en çok kabul gören görüşe göre; etrenjit, tomasit ve jips gibi ürünler mikro gözeneklerde oluşarak kristalizasyon basınçları ile hacim artışına sebep olup betonda bozulmaya ve çatlamaya yol açmaktadır. Artan çatlamlar ile birlikte sülfat penetrasyonu artmakta ve reaksiyon

hızı da yükselmektedir. Giderek artan hacimle oluşan mikroçatlaklar birleşerek daha büyük çatlaklar oluşturmaktadır. Çimento minerallerinin yerini alan ve dayanımları oldukça düşük olan bu yeni ürünler süreksizlik oluşturmaları ve çimento minerallerine göre dayanımlarının düşük olmasıyla betonu çürütmeye ve beton dayanımını azaltmaya neden olabilirler.

Jips, beton hammaddesi olarak su ile oluşan reaksiyonlar esnasında betonun prizlemesini ayarlamak amacıyla klinker ile birlikte öğütülerek kullanılmaktadır. Sertleşmiş beton yapısında ise sülfat iyonu kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek jips oluşturur. Jips, yüksek sülfat konsantrasyonlarında ( $>8000$  ppm  $SO_4^{2-}$ ) sülfat etkisi reaksiyonlarının birincil ürünüdür. Jips dayanımı çimento minerallerine göre neredeyse sıfır olan bir mineral olup, oluştuğu yerde çimento minerallerinin yerini almaktadır ve ciddi dayanım kayıplarına yol açmaktadır. Jips oluşumu makro ölçekte yüzey bozulması ve genleşme olarak kendini göstermektedir. Beton yüzeyinde oluşan bu değişiklikler sonucunda betonda dökülmeler ve kütle kayıpları meydana gelmektedir (Santhanam vd. 2001).

Etrenjit, betonda meydana gelen sülfat reaksiyonlarının bir diğer ürünüdür. Sulu kalsiyum alüminyum sülfat minerali olan etrenjitin genel formülü  $[Ca_3(Al,Fe)(OH)_6 \cdot 12H_2O] \cdot X_3 \cdot nH_2O$  şeklindedir. Burada X ile ifade edilen grup  $SO_4^{2-}$  veya  $CO_3^{2-}$  olabilmektedir. İğneli veya çubuksu şekilde kristal yapıya sahip etrenjit mineralinin morfolojisi (Şekil 3.27) su/çimento oranı, mineralin oluştuğu boşluğun hacim ve şekline, ortam sıcaklığına, nem durumuna ve sülfat yoğunluğuna bağlıdır (Tosun 2007).



Şekil 3.27 Etrenjit kristallerinin morfolojisi (iğneli yapı)

Araştırmalar sonucu etrenjit mineralinin beton üzerindeki etkisinin farklı mekanizmalar aracılığı ile meydana geldiği anlaşılmıştır (Tosun 2010). Bunlardan ilki birincil etrenjit oluşumu olarak ifade edilen çimentonun  $C_3A$  (trikalsiyum aluminat) ve  $C_4AF$  (tetrakalsiyum aluminoferrit) bileşenlerinden ayrılan  $Ca^{+2}$  (Kalsiyum) ve  $Al(OH)_4^-$  (alüminyum hidroksit) iyonları ile jipsten çözünen  $SO_4^{-2}$  (sülfat) iyonlarının tepkimeye girmesi ile yeni oluşturulmuş betonda meydana gelen etrenjit oluşumdur. Bu etrenjitin beton dayanımı üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi şu ana kadar belirlenememiştir.. Ancak beton içerisine sonradan giren sülfatın oluşturduğu etrenjit mineralleri genleşme ve kristalleşme mekanizması ile çatlatmalar meydana getirerek beton dayanımını azaltmaktadır.

Etrenjit oluşumunu önemli ölçüde etkileyen faktörlerden birisi ortamın pH değeridir. Ortamın pH değerinin 10.7 değerinden düşük olduğu durumlarda alüminat çevresinde toplanan  $Al(OH)_4^-$  bakımından zengin sıvı çözelti ile jipsten çözünen  $SO_4^{-2}$  ın tepkimeye girmesi ile etrenjit oluşur. Ancak pH değeri 10.7 değerinden yüksek ise ilgili sıvı çözeltinin çok ince oluşması sebebiyle etrenjit mineralleri  $C_3A$ 'nın etrafında oluşmakta ve reaksiyon engellenmektedir (Cao 1997).

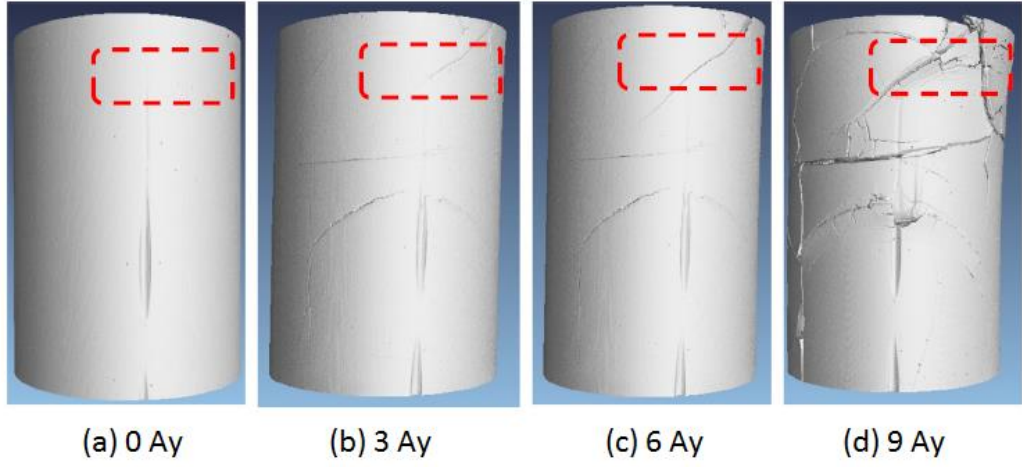
Etrenjit oluşumunda farklı bir mekanizma ise gecikmiş etrenjit oluşumudur. Buhar kürüne maruz bırakılmış ve yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonlarda etrenjit bünyesinde yer alan sülfat iyonları CSH olarak tabir edilen Kalsiyum Silika Hidrat yapıları tarafından tutulmaktadır. Koşulların sonradan normale dönmesi ile sülfat iyonları tekrar CSH yapısından ayrılarak etrenjit oluşturmaya başlamaktadır. Gecikmiş etrenjit oluşumu olarak adlandırılan (Delayed etrenjite formation) bu etrenjit oluşum türü ürünü olan mineral betonda çatlamalara neden olmaktadır (Tosun 2010).

Sülfat etkisi altında oluşan bir diğer mineral ise tomasit mineralidir. Genellikle 15<sup>0</sup>C'nin altındaki sıcaklıklarda oluştuğu ifade edilse de (Santhanam vd. 2001), Brown ve Hooton (2002) normal ortam koşullarında da tomasit oluşumunun gerçekleşebildiğini ortaya koymuşlardır. Etrenjit bünyesinde bulunan alüminyum ve silisyumun yer değiştirmesi ile etrenjit minerali tomasit mineraline dönüşmektedir. Tomasit mineralinin oluşması için kalsiyum silika hidrat olarak adlandırılan CSH grubunun ve sülfat ve karbondioksit ile birlikte suyun tepkimeye girmesi beklenmektedir (Santhanam vd. 2001).

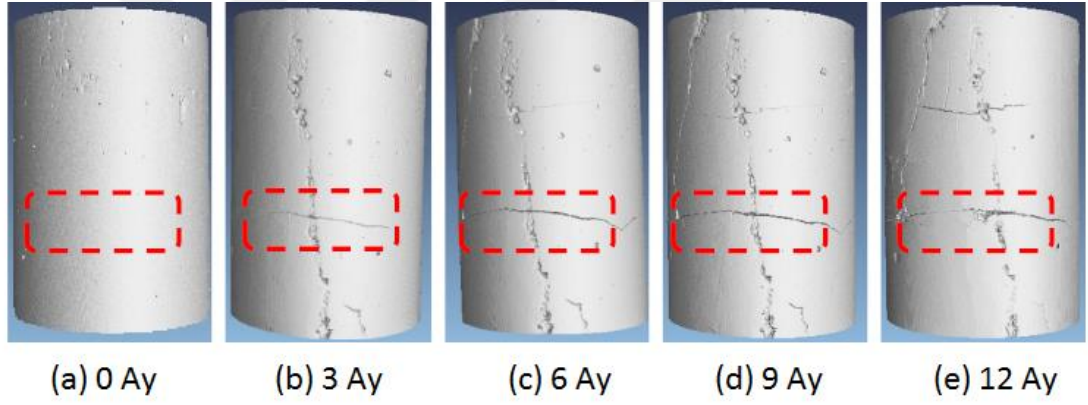
Sülfatın etki mekanizması beton içerisinden veya beton dışarısından oluşabilir. İçeriden oluştuğu durumlarda çimento bünyesindeki minerallerin ve seçilen agreganın teknolojiye uygun olarak üretilmediği anlaşılabilir. Gelişmiş teknoloji ile çimento harcındaki minerallerin oranı ve olması gereken sınırları belirli olup, agregaların taşınması gereken özellikler standartlar ile belirlenmiştir.

Betona sülfat etkisinin dışarıdan geldiği durumlarda, betonun dışarıdan başlayarak içeri doğru bozulma devam etmektedir. Tomasit oluşumu etrenjit oluşumuna göre genleştirici etki bakımından daha düşük miktarda zararlı olsa da tomasitin oluşumu için CSH grubu tüketildiği için bu grubun sağladığı bağlayıcılık etkisi yok olmakta ve beton yüzeyinde dökülmeler ve bozulmalar meydana gelmektedir. (Şekil 3.28 - 3.30).

Dışarıdan oluşan sülfat etkisi betona dışarıdan etkiyen su ve zeminde bulunan sülfatın oluşturduğu etki olarak tanımlanabilir.

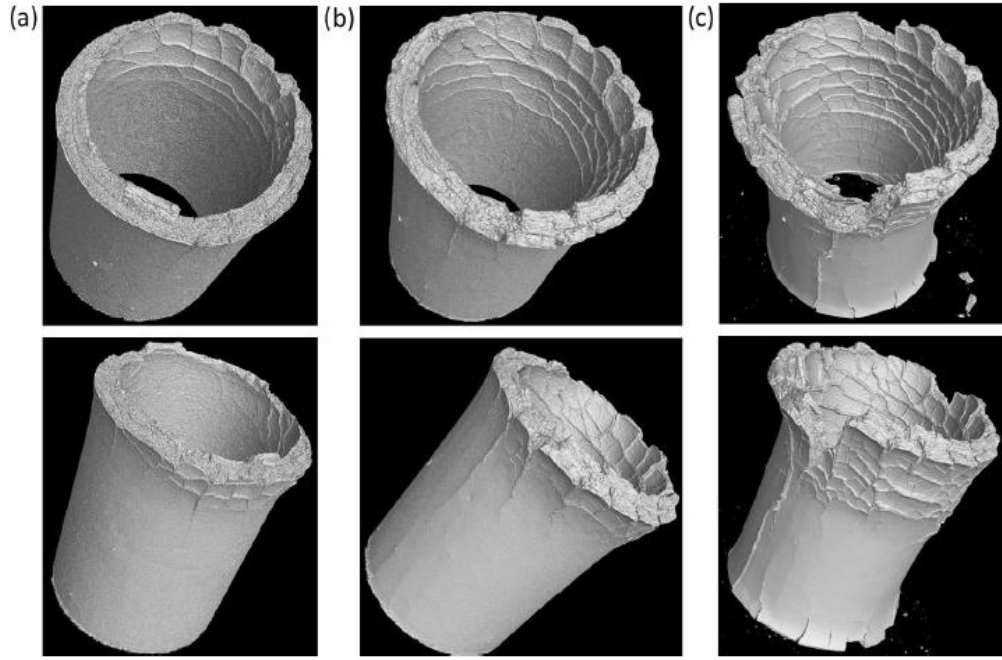


Şekil 3.28 Magnezyum sülfatın beton yüzeyinde oluşturduğu morfolojik değişiklikler (Yang vd. 2018'den alınmıştır)



Şekil 3.29 Sodyum sülfatın beton yüzeyinde meydana getirdiği morfolojik değişimler (Yang vd. 2018'den alınmıştır)





Şekil 3.30 Sodyum sülfatın boru şeklinde oluşturulmuş betonlarda çatlama mekanizması (Ma vd. 2018'den alınmıştır)  
a.294 günlük kür süresi  
b.343 günlük kür süresi  
c.420 günlük kür süresi

### 3.3.2 Sülfat etki mekanizmasına karşı alınabilecek önlemler

Betonu sülfata karşı korumak amaçlı alınabilecek önlemlerin başında çimentonun porozitesini azaltmak veya mümkünse geçirimsiz biçimde imalat yapılmasıdır. Su/çimento oranının azaltılması ile porozitesi ve dolayısı ile geçirimliliği düşük beton üretilebilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu durumda betonun kıvamının artırılması için farklı katkı malzemeleri kullanılarak sülfatın etkisi azaltılabilmektedir. Lee (2005) sülfatın beton üzerindeki olumsuz etkisine karşı en kritik parametrenin su/çimento oranı olduğunu belirtmiştir.

Dışarıdan gelebilecek sülfat etkisine karşı çimento teknolojisi tarafından benimsenmiş yöntem  $C_3A$  oranının düşük tutulması ve çimentonun bu şekilde üretilmiş olmasıdır. Günümüzde gelişen teknoloji ile sülfata dayanıklı  $C_3A$  oranı düşük çimentolar

üretilmektedir. Yakın zamanda yapılan bazı çalışmalarda (Tian ve Cohen, 2000, Brown ve Hooton 2002, Tosun 2007) C<sub>3</sub>A oranının düşürülmesinin tek başına yeterli olmadığı ifade edilmektedir. C<sub>3</sub>A oranının yanında C<sub>3</sub>S oranının da düşürülmesinin gerekliliği ifade edilmiştir.

Sülfatın dışarıdan gelebilecek etkilerine karşı betonda katkı maddeleri kullanılması alınabilecek bir başka önlem şeklidir. Farklı araştırmacılar silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi materyalleri çimentoya katarak sülfat etkisinin değişimini gözlemlemişlerdir ( Lee vd. 2005, Irassar 2009, Hossack ve Thomas 2015, Najjar vd. 2017). Araştırmalara göre sülfat anyonuna ve ortam sıcaklığına bağlı olarak kullanılacak katkı malzemelerinin sülfat etkisine karşı gösterdikleri direnç değişmektedir. Lee (2005)'e göre silis dumanı sodyum sülfatın betona olan zararlı etkisini azaltıcı bir katkı yaparken, magnezyum sülfatın mevcut olduğu durumlarda betonda meydana gelen zarar da artmaktadır. Najjar vd. (2017)'a göre metakaolin katkısı çimento içinde %10'luk bir oranda eklendiği takdirde hem kimyasal hem de fiziksel sülfat atağına karşı olumlu bir davranış sergileyerek dayanım kayıplarını büyük ölçüde önlemiştir. Bu nedenlerden ötürü sülfatın olumsuz etkilerinin azaltılması için çimentoya ek olarak silis dumanı, uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi katkı malzemeleri eklenebilir.

Betonu sülfat etkilerine karşı korumanın bir diğer yöntemi ise imal edilen betonu dışarıdan gelebilecek etkilere karşı izole etmektir. Jeomembran adı verilen ve sentetik olarak üretilen yalıtım malzemeleri kullanılarak betonun sülfat ile teması engellenmiş olur ve sülfatın oluşturabileceği olumsuz etkiler de yaşanmaz.

Yeraltı suyundan gelebilecek sülfat ve beraberindeki olumsuz etkiler drenaj sistemleri kurularak ortadan kaldırılabilir. Sülfat oranı yüksek olan suyun beton ile teması bu şekilde kesilmiş olur. Ayrıca beton ile sülfatlı suyun bulunduğu alan arasında geçirimsiz bir perde imalatı yapılarak, beton sülfat etkilerine karşı korunmuş olacaktır.

Son yıllarda geliştirilen yeni metotlar aracılığı ile betonun dış yüzeyi imalat sonrasında boya veya epoksi gibi sıvı yalıtımı sağlayacak malzemeler ile kaplanarak farklı bir koruma sistemi geliştirilmiştir.

### 3.3.3 Sülfat etkisini belirleyen deneyler

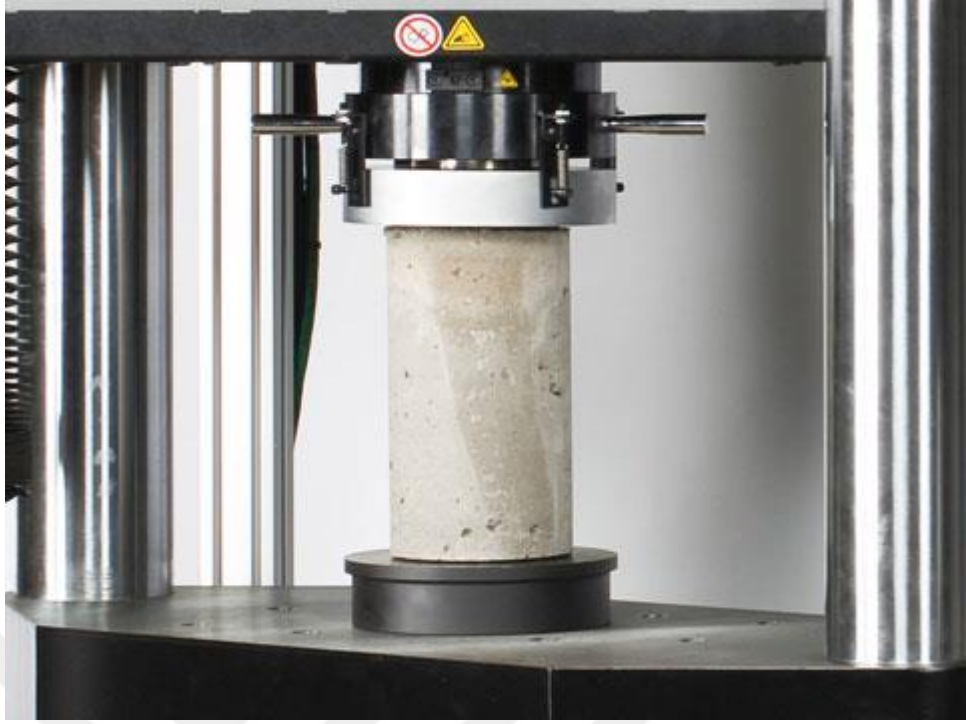
Sülfatın beton üzerindeki olumsuz etkilerini izlemek için laboratuvar ortamında yapılabilecek birçok deney mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan deney sülfatlı suya maruz bırakılmış beton numunelerinin belirli zaman aralıkları ile dayanım değerlerine bakmak ve değerleri karşılaştırmak suretiyle sonuç elde etmektir (Şekil 3.31). Tez çalışması kapsamında bu deney yöntemi ele alınmıştır. Hazırlanılacak olan beton numuneleri silindirik, dikdörtgen prizma, küp gibi çeşitli geometrilerde olabilmektedir.

Sülfata maruz bırakılan beton numunelerinin kütle kaybını ölçmek de bir diğer sülfat etki mekanizması test metodudur. Sülfat içerikli minerallerin beton yüzeyinde aşınmalar ve tahrip meydana getirerek dokuda bozulma, dökülme ve parçalanma gibi etkiler meydana getirebilmektedir. Bu durum kütle testi ile ortaya çıkarılabilir.

Bir diğer test yöntemi görsel analizdir. Sülfata maruz kalmadan önce ve maruz kaldıktan sonra betonun dokusunda meydana gelen görsel değişim (renk değişimi ve çatlak oluşumunun izlenmesi) değerlendirilerek betonun bozulma derecesi belirlenebilir.

Gelişen teknoloji ile birlikte SEM (Scanning Electron Microscope), XRD (X-Ray Diffraction) gibi spektroskopik yöntemler aracılığı ile de betonda meydana gelen sülfat etkisi ve meydana gelen bozulma oranları belirlenebilmektedir. Sülfat reaksiyonları sonucunda oluşan minerallerin tayini ile belirlenen etki SEM ve XRD gibi yöntemlerle oldukça kesin ve hızlı biçimde tayin edilebilmektedir (Demiral 2015).

Tez kapsamında beton örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ele alınacaktır.



Şekil 3.31 Serbest basınç deneyi



Şekil 3.32 Beton numunelerinin sülfatlı sulara maruz bırakılarak test edilmesi

### 3.4 Deneysel Çalışma

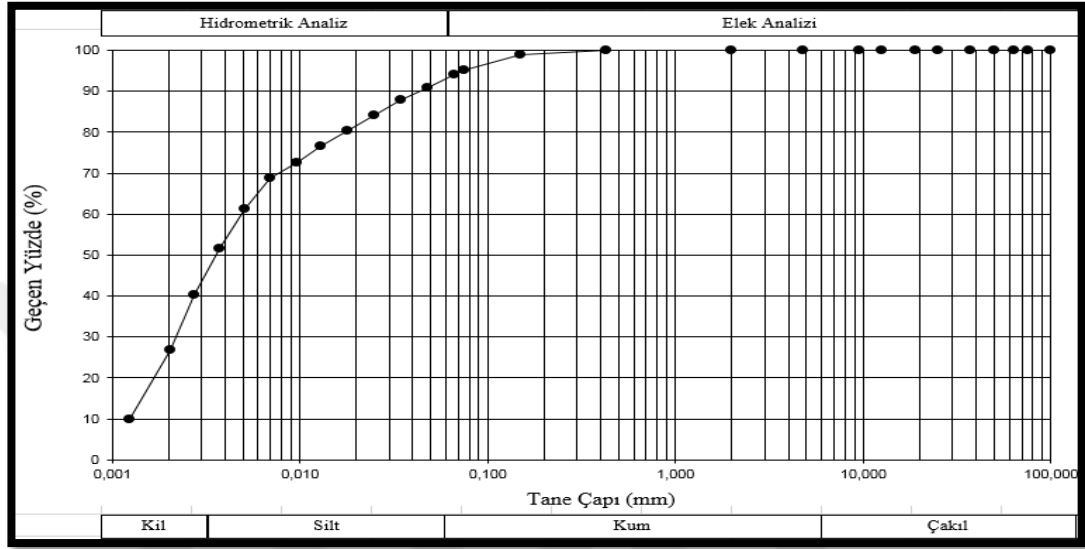
Deneysel çalışmada yeraltı suyunda mevcut olan sülfat yoğunluğunun jet grout kolonlarının dayanımı üzerindeki etkisi, zaman ve sülfat konsantrasyonu parametreleri bakımından araştırılmıştır. Tez çalışmasının deneysel bölümü Atatürk Üniversitesi Oltu Yer Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan zemin numuneleri Erzurum ili Uzundere ilçesi sınırlarında yer alan ve Pirinkayalar Geçidi olarak adlandırılan bölgeden temin edilmiştir. Pirinkayalar Geçidi'nde devam etmekte olan zemin iyileştirme ve tünel yapımı çalışmalarında (Şekil 3.33) Jet Grout uygulaması yapılmaktadır. Tortum Gölü kenarında bulunan bölgeden alınan zemin numuneleri laboratuvara getirilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak zeminlerin alınacağı bölgenin tercih edilmesinde, jet grout uygulamasının yapıldığı bir alan olması ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu bir alanda gerçekleştirilmesi parametreleri aranmıştır. Pirinkayalar mevkiinin Atatürk Üniversitesi Oltu Yer Bilimleri Fakültesine yakın olması nedeni ile ilgili alan tercih edilmiştir.



Şekil 3.33 Pirinkayalar geçidinde devam etmekte olan tünel ve stabilizasyon çalışmaları

Tortum Gölü kenarından alınan zemin numuneleri göl çökeli olup, yapılan tane boyu sınıflandırma deneylerinde CH sınıfında yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. Atterberg limitlerine göre numunenin likit limiti %62 ve plastik limiti %26 olarak

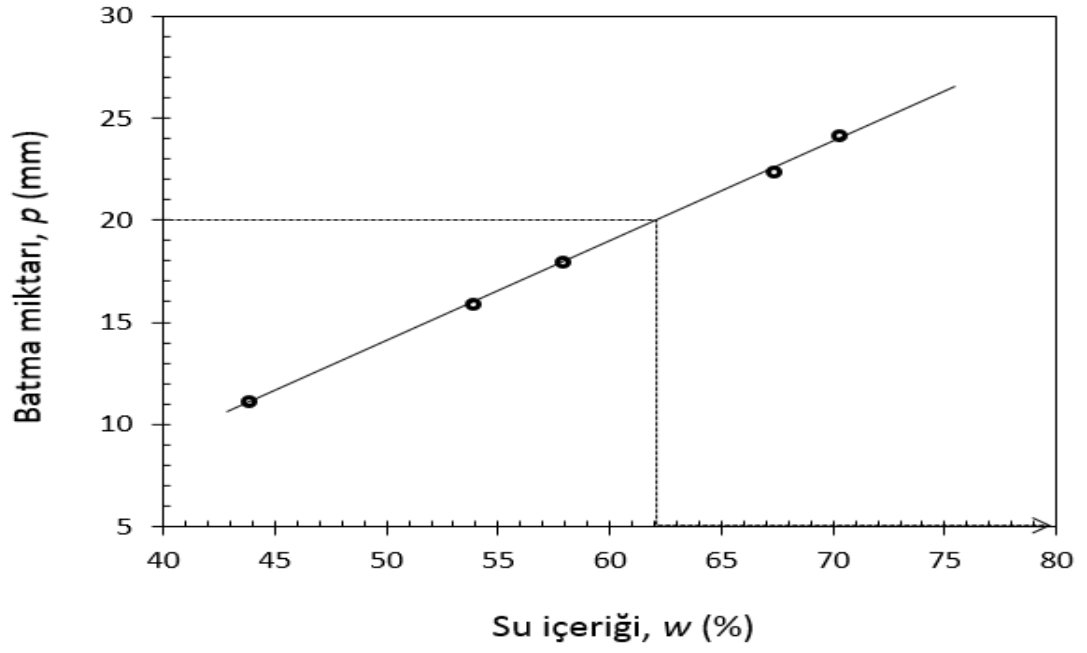
bulunmuştur. Plastisite İndisi ( $PI=LL-PL$ ) ise 36 olarak hesaplanmaktadır. Numune üzerinde hidrometre deneyi, ıslak elek deneyi, özgül ağırlık deneyi ve doğal su muhtevası deneyi tatbik edilmiştir. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda yer almaktadır (Şekil 3.34 - 3.35, Çizelge 3.7).



Şekil 3.34 Çalışmada kullanılan zeminin granülometri eğrisi

Çizelge 3.7 Zemine ait likit limit deney sonuçları

Kap kütlesi (g)	Kap + yaş numune kütlesi (g)	Kap + kuru numune kütlesi (g)	Su içeriği (%)	Koni batma miktarı (mm)
16,20	46,20	37,04	44	11,05
16,20	51,40	39,06	54	15,8
16,20	37,40	29,62	58	17,9
16,20	39,20	29,94	67	22,29
16,20	44,60	32,87	70	24,05



Şekil 3.35 Zemine ait likit limit deney sonuçlarının grafik ile gösterimi

Sınıflandırma deneylerinden sonra zemin ve çimento karışımının hazırlanabileceği ve priz süresi boyunca şeklini kaybetmeden kuruyabileceği kalıplar üretmek üzere, iç çapı 48 mm olan PVC'den imal edilmiş kangal tip boru kesilerek kalıplar üretilmiştir (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Jet grout numuneleri için kullanılan PVC kalıplar

Tortum gölü kenarından alınan zeminin doğal su içeriği %26 olarak belirlenmiştir. Zemin laboratuvara getirildikten sonra oluşturulacak yapay jet grout numunelerinde su içeriği bakımından farklılık olmaması için numunenin tamamı homojen biçimde karıştırılmış ve etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.37 - 3.38).



Şekil 3.37 Laboratuvara getirilip homojen biçimde karıştırılan zemin numunesi

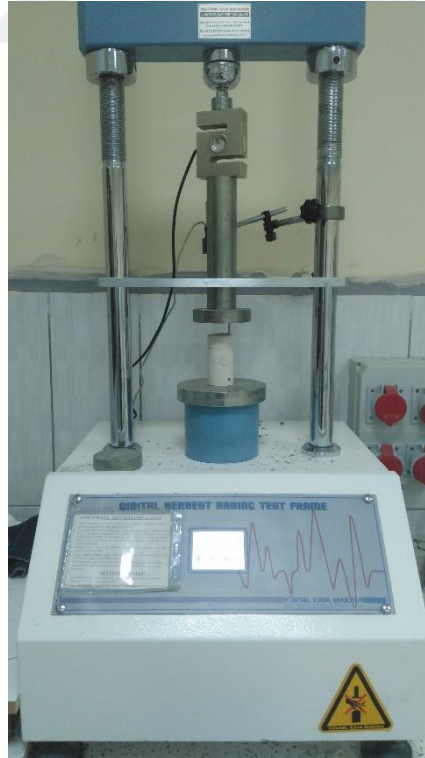


Şekil 3.38 Laboratuvarda kullanılan etüv



Karışımlar hazırlanacağı zaman etüvden alınan kuru zemin numunesine doğal su içeriği olan %26 oranında su katılmış ve homojen biçime getirilmiştir. Bu çalışma kapsamında imal edilecek yapay jet grout numuneleri toplamda 2 farklı tür çimento, 11 farklı oranda sülfat yoğunluğuna sahip su ve 6 farklı kür süresi olmak üzere toplamda 3 temel parametre açısından incelenmiştir (Çizelge 3.8). İlgili kür sürelerini tamamlayan numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuş ve elde edilen dayanım değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.39).

Denenecek her bir numune için sonuçların güvenilirliğini artırmak açısından 3 adet numune hazırlanmıştır. Zemin örnekleri su/çimento oranı 1.0 olan CEM II – 42,5 ve CEM I SR- 5 çimentoları kullanılarak yapılmıştır. Jet grout projelerinde sıklıkla kullanılan enjeksiyon karışımı ile 1-1 oranında karıştırılmıştır. Her bir karışımda kullanılan su 11 farklı sülfat yoğunluğuna sahip su ile muamele edilmiştir. Deneylere referans olması bakımından her iki çimento türünde de bir deney setinde, deneyde kullanılan saf su sülfat eklenilmeden doğrudan numunelere uygulanmıştır.



Şekil 3.39 Numuneleri serbest basınç deneyine tabii tutarken kullanılan serbest basınç cihazı

Numunenin bulunduğu alanda yeraltı suyunun sülfat miktarı Erzurum Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (ESKİ) Su Analiz Laboratuvarı tarafından daha önce farklı zamanlarda analiz edilmiş ve 200 ppm ile 400 ppm arasında değişen oranlarda sülfat konsantrasyonu bulunmuştur (ESKİ web sayfası,2018). Sülfatlı sularda kullanılacak çimentolar ile ilgili Türk Standardında belirtilen maksimum sülfat konsantrasyonu olan 6000 mg/l değerinin daha geniş bir yelpazede incelenmesi açısından deneylerde 12000 mg/l'lik sülfat konsantrasyonu da kullanılmıştır.

3 farklı parametrede toplamda  $2 \times 11 \times 4 \times 3 = 264$  farklı numune hazırlanmıştır. Toplamda 264 farklı numune hazırlanmış, serbest basınç deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

Çizelge 3.8 Deneyde kullanılan çimento tipleri, sülfat yoğunlukları ve kür süreleri

Çimento Türleri	Sülfat Yoğunlukları	Kür Süreleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEM II – 42,5</li> <li>• Sülfata dayanıklı Portland çimentosu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 mg/l</li> <li>• 100 mg/l</li> <li>• 200 mg/l</li> <li>• 400 mg/l</li> <li>• 600 mg/l</li> <li>• 1000 mg/l</li> <li>• 2000 mg/l</li> <li>• 3000 mg/l</li> <li>• 4000 mg/l</li> <li>• 6000 mg/l</li> <li>• 12000 mg/l</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7 Gün</li> <li>• 14 Gün</li> <li>• 28 Gün</li> <li>• 2 Ay</li> <li>• 3 Ay</li> <li>• 4 Ay</li> </ul>

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışması kapsamında jet grout kolonlarını yapay olarak laboratuvar ortamında üretmek için ağırlıkça %50 killi-siltli zemin ve %50 çimento karışımından oluşacak şekilde kurgulanmıştır. Tüm numuneler iki farklı çimento kullanılarak hazırlanmıştır. İlk çimento türü jet grout uygulamalarında sıklıkla kullanılan ve CEM-II 42,5 olarak adlandırılan çimento ve diğeri ise CEM I 42,5 – SR 5 olarak adlandırılan CEM I SR - 5dur. Oluşturulan karışımlar PVC boruların kesilmesi ile elde edilen kalıplara dökülerek ve 24 saat bekletilerek priz almaları sağlanmıştır. 24 saatlik süreyi tamamlayan numuneler farklı yoğunluklarda sodyum sülfat içeren sulara bekletilmiştir. Farklı oranlarda sülfat içeren suların sülfat konsantrasyonları sırasıyla 0, 100, 200, 400, 600, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 12000 mg/l şeklindedir. Bu suların hazırlanması için Atatürk Üniversitesi Oltu Yer Bilimleri Fakültesi Jeokimya Laboratuvarında mevcut bulunan saf su üretim cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Saf su üretim cihazı ve sülfat karışımlarını hazırlamak için kullanılan mikser

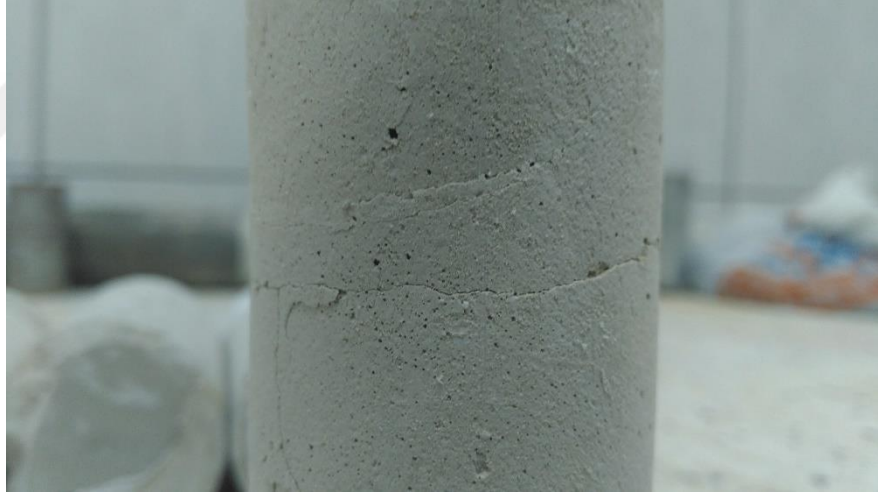
Saf su cihazından alınan sular istenilen sülfat yoğunluğuna erişene kadar sülfat eklenmek ve sonrasında mikser ile karıştırılmak suretiyle hazırlanmıştır. Kür süresi boyunca numunelerin bekledikleri ortam klima yardımı ile sürekli olarak 23°C oda sıcaklığında tutulmuştur. Kür süresi başlangıcından itibaren her 7 günde bir olmak üzere numunelerin ilerinde buldukları su yenilenmiştir. Bu şekilde numuneler kür süresi boyunca sürekli olarak aynı oranda sülfatlı suya maruz bırakılmıştır. Kür süresini tamamlayan numunelerin boy/çap oranı 2.0 olacak şekilde kesilerek, alt ve üst yüzeyleri düzeltilmiştir. Düzeltilmiş numuneler çap ölçümü, boy ölçümü ve serbest basınç dayanımı testine tabii tutularak elde edilen dayanım değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri izelge halinde verilmiştir (izelge 4.1 - 4.2). Numunelerde kür sürelerinin sonunda çatlamalar ve yer yer dağılmalar meydana gelmiştir (şekil 4.2-4.6).



şekil 4.2 Kür içerisinde 90 gün bekleyen numunelerde meydana gelen morfolojik değişiklikler



Şekil 4.3 12000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış Normal Portland çimentolu numune



Şekil 4.4 6000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış normal Portland çimentolu numune



Şekil 4.5 6000 mg/l sülfata 90 gün maruz kalmış normal Portland çimentolu



Şekil 4.6 6000 mg/l sülfata 120 gün maruz kalmış Portland çimentolu numune

Çizelge 4.1 CEM II 42,5 ile hazırlanmış numunelerin serbest basınç deneyi sonuçları (MPa cinsinden, “-“ işaretli numunelere deney yapılamamıştır)

CEM II 42,5 (CEM II-42,5)		Dayanım Değerleri (MPa)			
Numune No	Sülfat Miktarı (mg/l)	28 Gün	60 Gün	90 Gün	120 Gün
A1	0	3,49	3,73	3,77	3,91
A2	0	3,39	3,65	3,77	3,97
A3	0	3,59	3,69	3,65	-
B1	100	3,41	3,32	3,50	3,50
B2	100	3,54	-	3,77	3,69
B3	100	3,47	3,38	3,69	3,65
C1	200	3,42	3,73	-	3,50
C2	200	3,37	3,65	3,83	3,69
C3	200	3,08	3,57	3,73	-
D1	400	3,37	3,43	3,43	3,52
D2	400	-	3,47	3,44	3,44
D3	400	3,44	3,38	3,47	3,40
E1	600	3,20	3,24	3,50	3,47
E2	600	3,47	3,31	3,46	3,44
E3	600	3,16	3,28	-	3,40
F1	1000	3,26	3,27	3,39	3,38
F2	1000	3,28	3,31	3,43	3,39
F3	1000	3,22	3,30	3,44	3,24
G1	2000	3,08	3,14	-	3,31
G2	2000	-	3,20	3,35	3,20
G3	2000	3,20	3,22	3,22	-
H1	3000	3,24	3,20	3,22	3,00
H2	3000	3,18	3,17	-	2,90
H3	3000	3,22	3,16	3,30	2,77
J1	4000	3,07	3,16	3,20	-
J2	4000	3,20	3,22	3,26	2,62
J3	4000	3,32	3,20	3,09	2,49
K1	6000	3,12	-	3,24	-
K2	6000	-	3,14	3,12	2,39
K3	6000	3,05	3,15	3,04	2,34
L1	12000	2,94	2,72	2,57	-
L2	12000	2,96	2,68	-	2,25
L3	12000	2,78	2,69	2,62	2,45

Çizelge 4.2 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımı deneyleri sonuçları (MPa cinsinden)

CEM I SR - 5		Dayanım Değerleri (MPa)			
Numune No	Sülfat Miktarı (mg/l)	28 Gün	60 Gün	90 Gün	120 Gün
M1	0	3,47	3,73	4,05	4,05
M2	0	3,54	3,74	4,06	4,03
M3	0	3,38	3,77	3,98	4,11
N1	100	3,35	3,77	-	4,07
N2	100	3,44	3,87	3,99	4,04
N3	100	-	-	4,10	4,03
O1	200	3,38	3,73	3,99	3,97
O2	200	3,37	3,71	4,03	-
O3	200	3,40	3,59	3,97	3,99
P1	400	3,29	3,65	3,99	3,98
P2	400	3,32	3,62	4,07	3,87
P3	400	3,29	3,73	-	3,77
R1	600	-	3,44	3,87	3,84
R2	600	3,24	3,50	3,80	-
R3	600	3,35	-	3,95	3,88
S1	1000	3,34	3,54	3,95	3,82
S2	1000	3,29	3,47	4,03	3,83
S3	1000	3,29	3,54	-	3,97
T1	2000	-	3,61	4,14	3,87
T2	2000	3,38	3,53	4,01	3,80
T3	2000	3,29	3,47	3,95	-
U1	3000	3,35	3,54	3,84	3,76
U2	3000	3,37	3,44	-	3,75
U3	3000	-	3,47	3,82	3,70
V1	4000	3,24	3,39	3,88	-
V2	4000	3,26	3,35	-	3,84
V3	4000	3,35	-	3,70	3,73
Y1	6000	3,28	3,50	3,73	3,68
Y2	6000	3,47	3,40	3,77	-
Y3	6000	3,22	3,54	3,97	3,87
Z1	12000	-	3,44	-	3,77
Z2	12000	3,20	3,54	3,74	4,01
Z3	12000	3,15	3,54	3,78	3,72



Çizelgede “-“ işareti ile gösterilen eksik değerlerde numuneler fiziksel olarak tahribata uğramış ve deney yapılamamıştır. Fiziksel tahribat kelime grubu ile ifade edilmek istenen, numunenin deney öncesinde veya deneye hazırlanırken yere düşürülmesi, düzgün kesilememiş olduğu için dayanım değerinin beklenilenin çok üzerinde veya çok altında çıkması olabilir. Bazı “-“ işaretli numunelerde çatlama çok fazla olmuş ve numune süreksizlik düzlemi oluşması sebebi ile ikiye bölünmüştür.

Sonuçların daha reel değerler oluşturması için her sülfat yoğunluğu için 3 farklı numune hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının daha iyi yorumlanabilmesi için elde edilen dayanım değerlerinde her bir numune setinin (3 farklı karot örneği) ortalama dayanım değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama dayanım (MPa) değerleri aşağıdadır (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4).

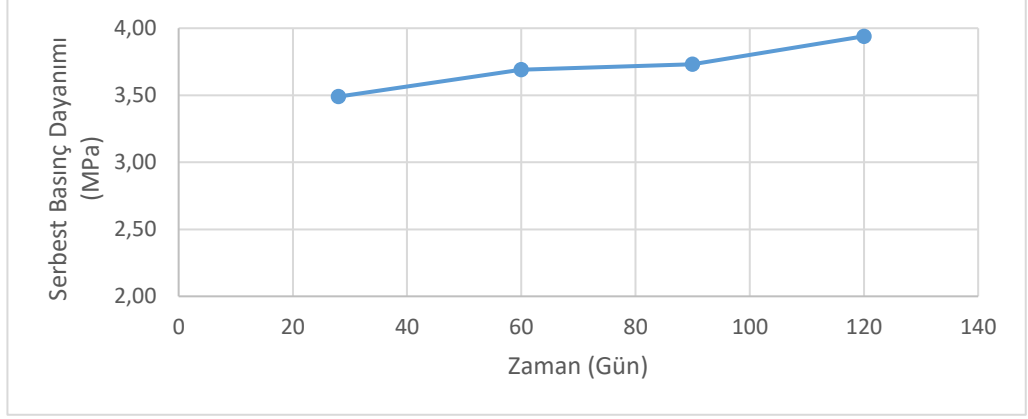
Çizelge 4.3 CEM II 42,5 ile hazırlanan numunelerin ortalama dayanım değerleri

CEM II 42,5 (CEM II-42,5)		Dayanım Değerleri (MPa)			
Numune No	Sülfat Miktarı (mg/l)	28 Gün	60 Gün	90 Gün	120 Gün
A	0	3,49	3,69	3,73	3,94
B	100	3,48	3,35	3,65	3,62
C	200	3,29	3,65	3,78	3,60
D	400	3,40	3,42	3,45	3,45
E	600	3,28	3,28	3,48	3,44
F	1000	3,25	3,29	3,42	3,34
G	2000	3,14	3,19	3,29	3,25
H	3000	3,21	3,17	3,26	2,89
J	4000	3,19	3,19	3,18	2,56
K	6000	3,09	3,15	3,13	2,36
L	12000	2,90	2,70	2,59	2,35

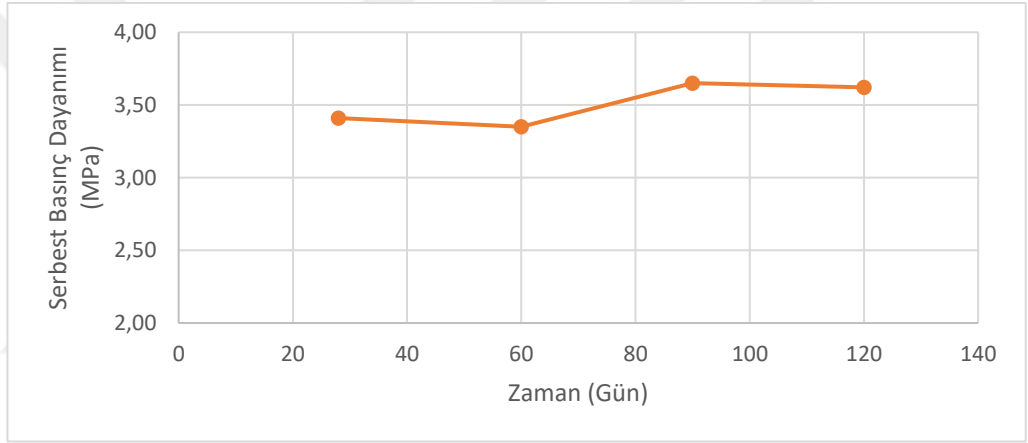
Çizelge 4.4 CEM I SR - 5 kullanılarak imal edilmiş numunelerin ortalama dayanım değerleri (MPa cinsinden)

CEM I SR - 5		Dayanım Değerleri (MPa)			
Numune No	Sülfat Miktarı (mg/l)	28 Gün	60 Gün	90 Gün	120 Gün
M	0	3,47	3,75	4,03	4,06
N	100	3,40	3,82	4,04	4,05
O	200	3,38	3,68	4,00	3,98
P	400	3,30	3,66	4,03	3,87
R	600	3,29	3,47	3,87	3,86
S	1000	3,31	3,52	3,99	3,87
T	2000	3,34	3,54	4,03	3,84
U	3000	3,36	3,48	3,83	3,74
V	4000	3,28	3,37	3,79	3,79
Y	6000	3,32	3,48	3,82	3,77
Z	12000	3,17	3,51	3,76	3,83

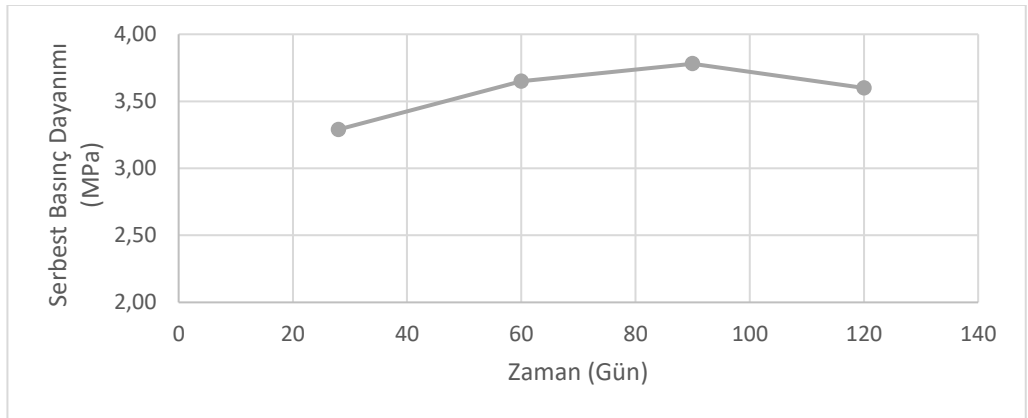
Elde edilen ortalama dayanım (MPa) değerlerini içeren her bir numune seti için günlere göre grafikler çizilmiştir. Harf kodlaması yapılan numune setlerinin farklı oranlarda sülfata maruz kaldıkları unutulmamalıdır. A-L kodları arasına sahip numune setleri CEM II 42,5 ile hazırlanmış numuneler iken M-Z harfleri arasındaki koda sahip numuneler CEM I SR - 5 ile hazırlanmıştır. İlgili grafikler aşağıda sunulmuştur (Şekil 4.7-4.28).



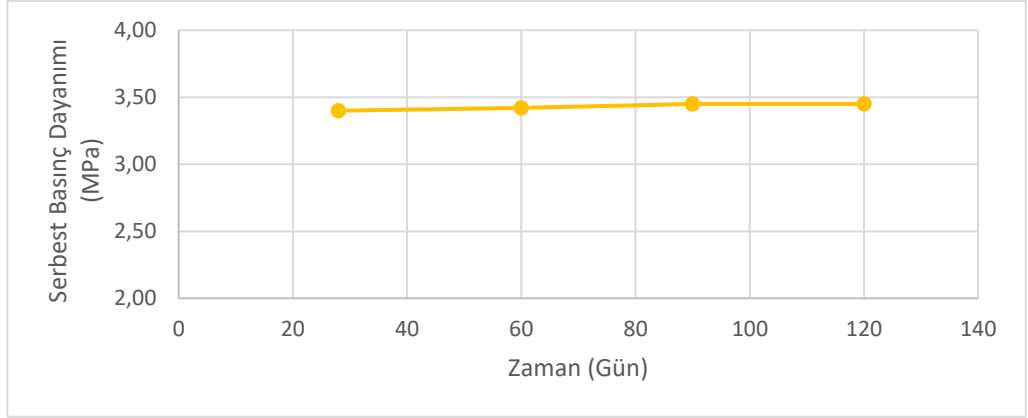
Şekil 4.7 Numune seti A'ya ait dayanım verileri



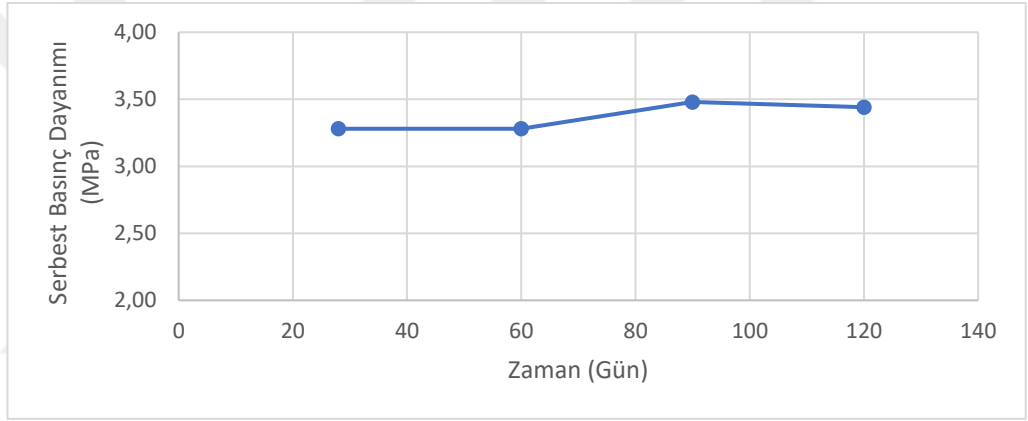
Şekil 4.8 Numune seti B'ye ait dayanım verileri



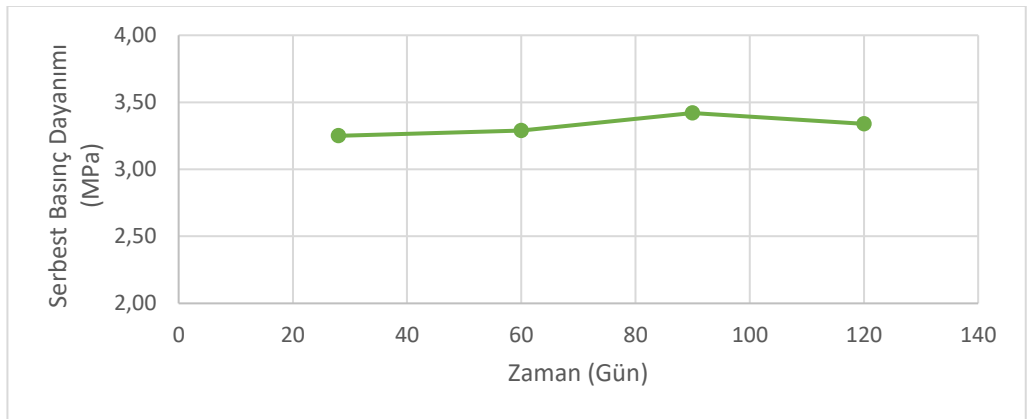
Şekil 4.9 Numune seti C'ye ait dayanım verileri



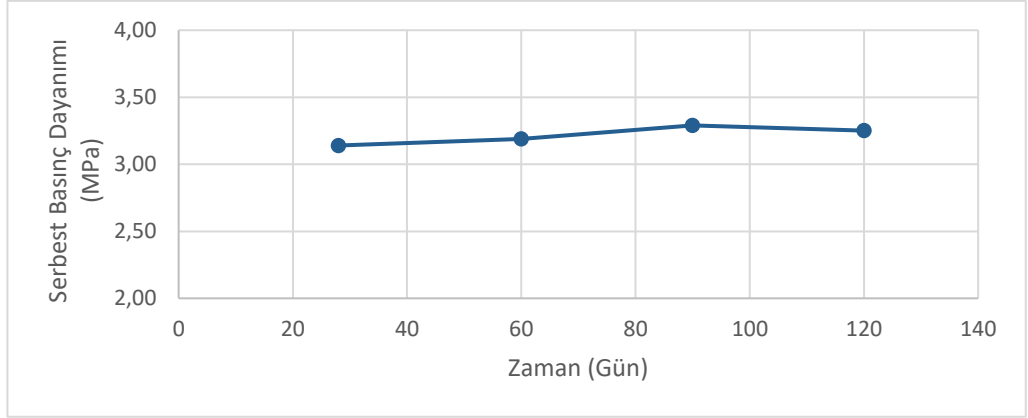
Şekil 4.10 Numune seti D'ye ait dayanım verileri



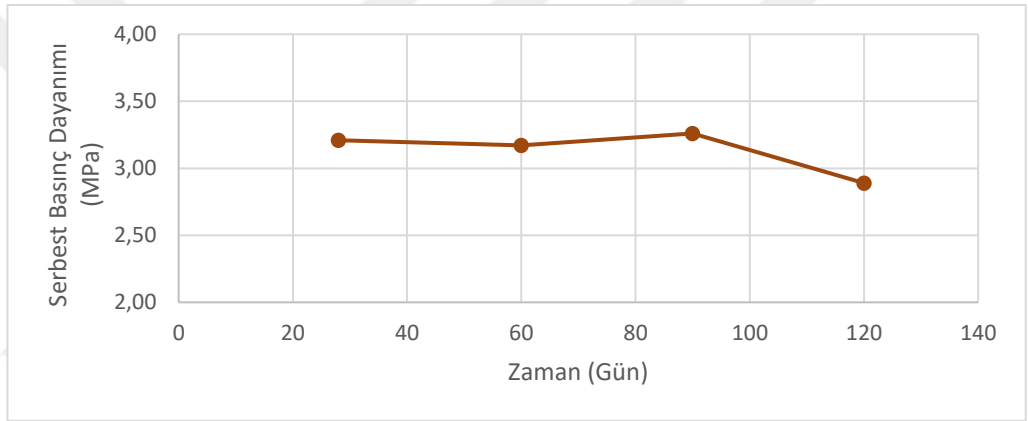
Şekil 4.11 Numune seti E'ye ait dayanım verileri



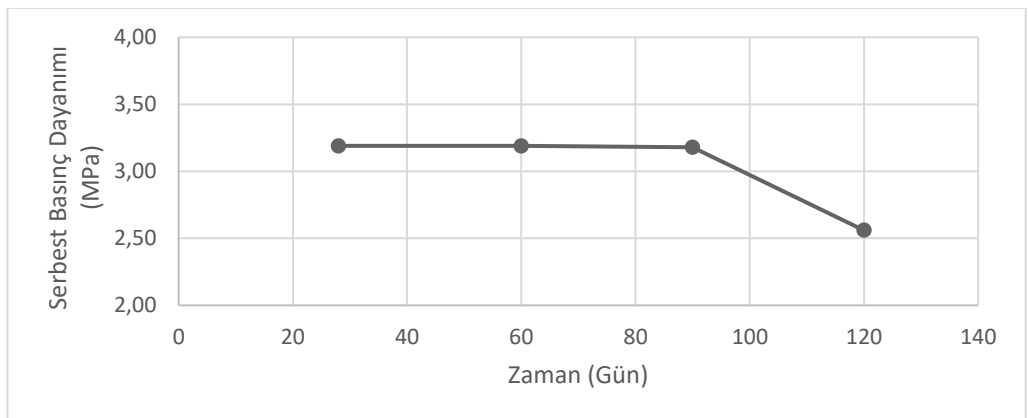
Şekil 4.12 Numune seti F'ye ait dayanım verileri



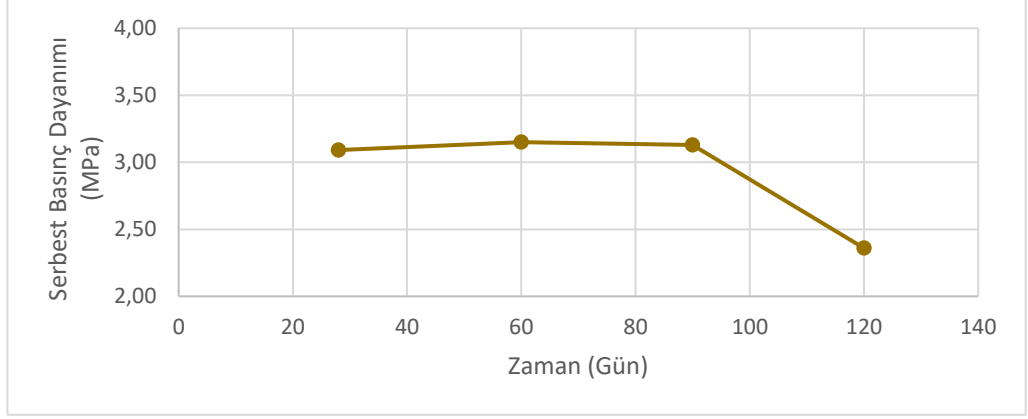
Şekil 4.13 Numune seti G'ye ait dayanım verileri



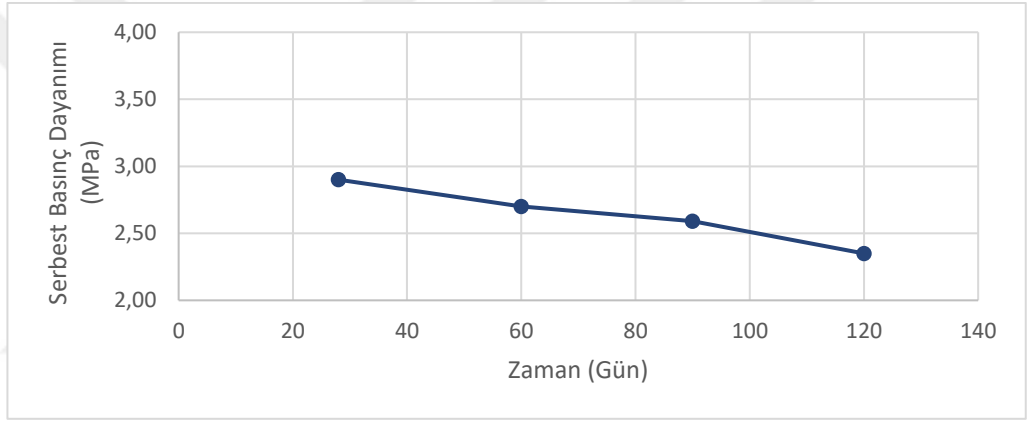
Şekil 4.14 Numune seti H'ye ait dayanım verileri



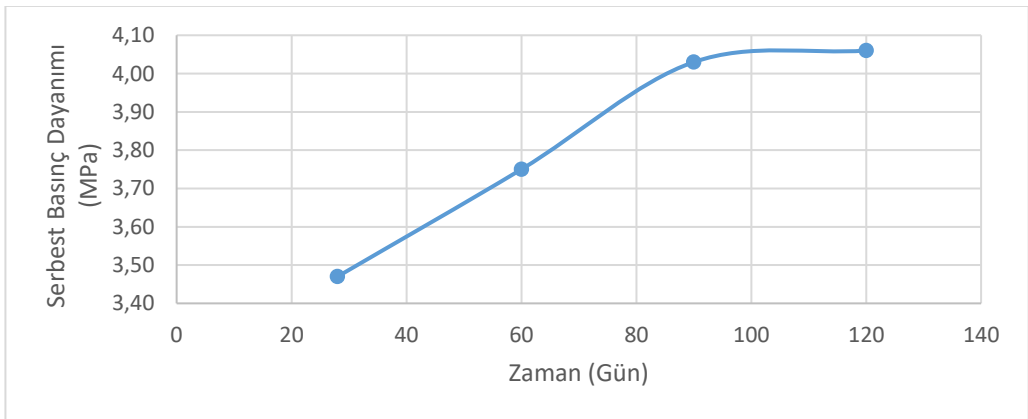
Şekil 4.15 Numune seti J'ye ait dayanım verileri



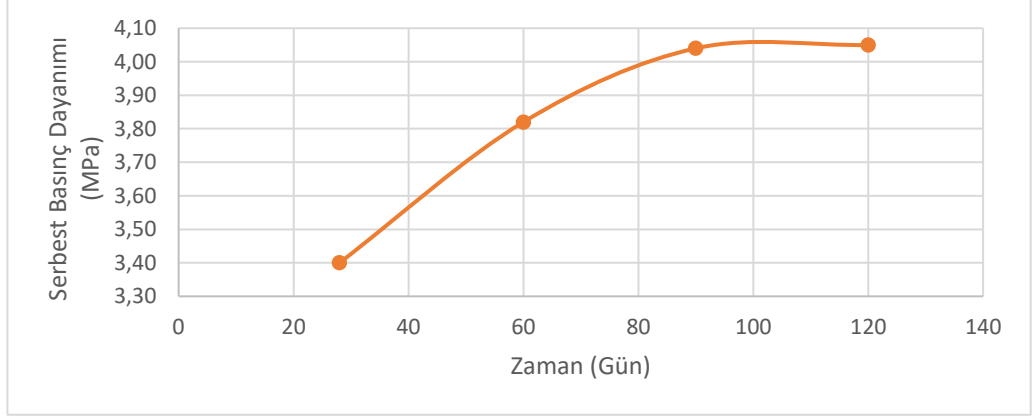
Şekil 4.16 Numune seti K'ye ait dayanım verileri



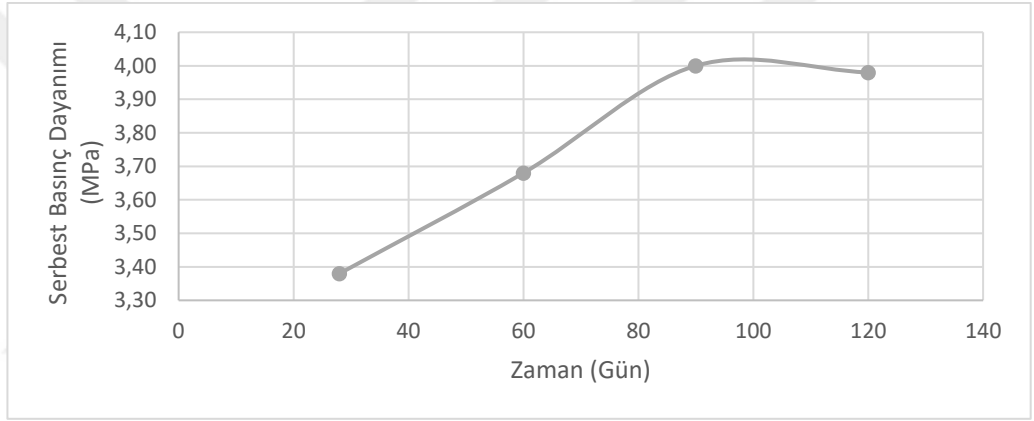
Şekil 4.17 Numune seti L'ye ait dayanım verileri



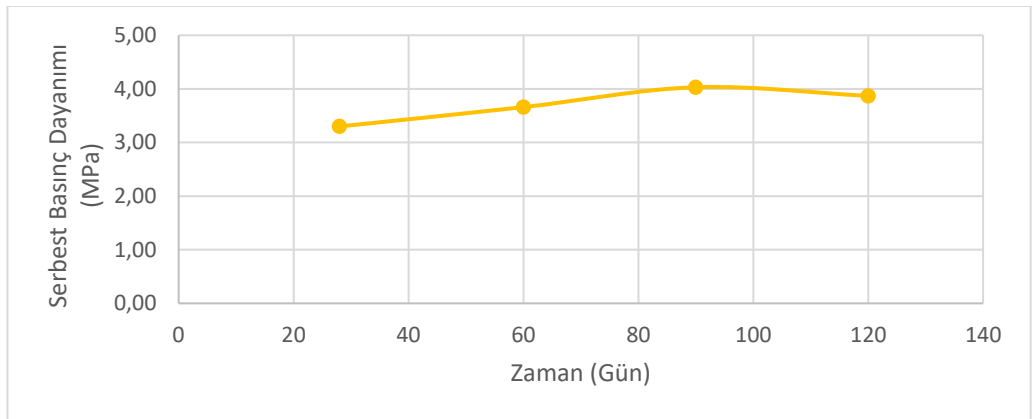
Şekil 4.18 Numune seti M'ye ait dayanım verileri



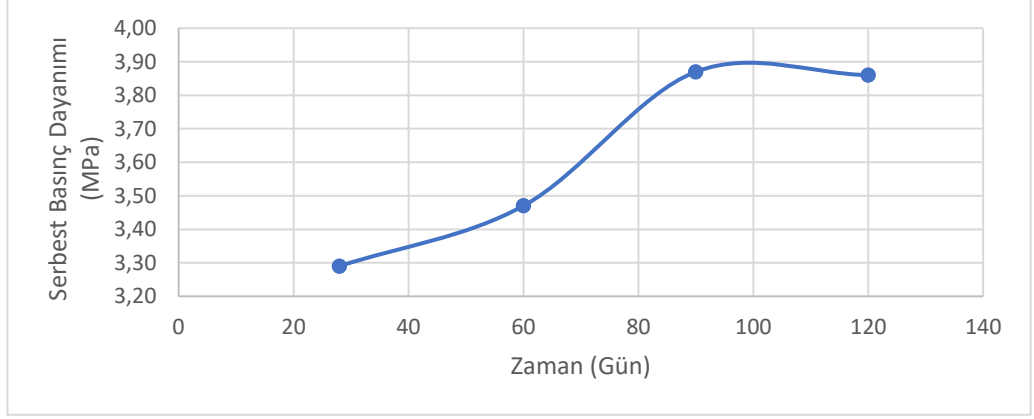
Şekil 4.19 Numune seti N'ye ait dayanım verileri



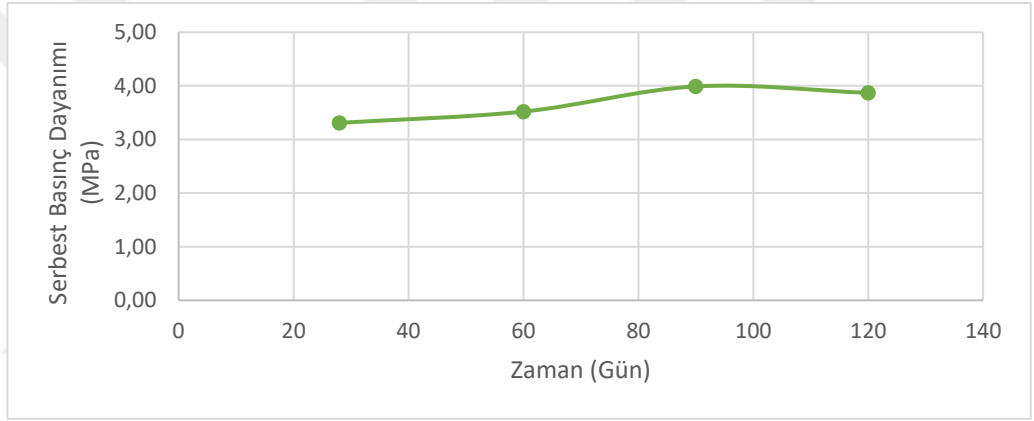
Şekil 4.20 Numune seti O'ya ait dayanım verileri



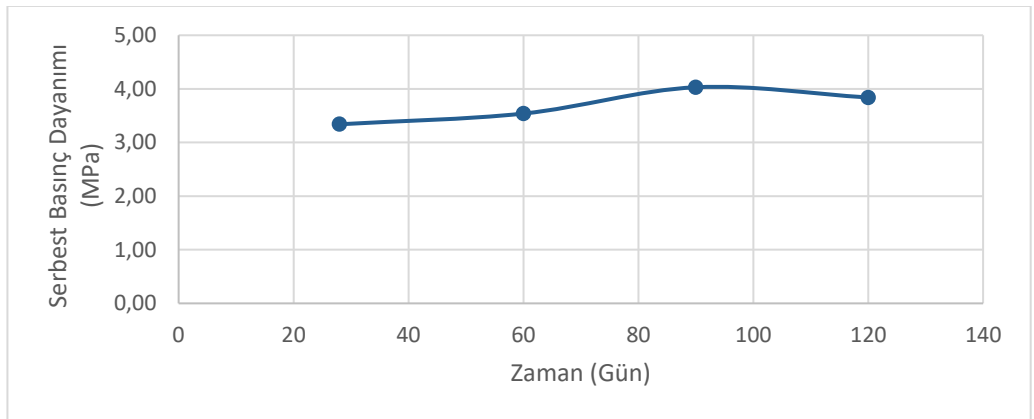
Şekil 4.21 Numune seti P'ye ait dayanım verileri



Şekil 4.22 Numune seti R'ye ait dayanım verileri

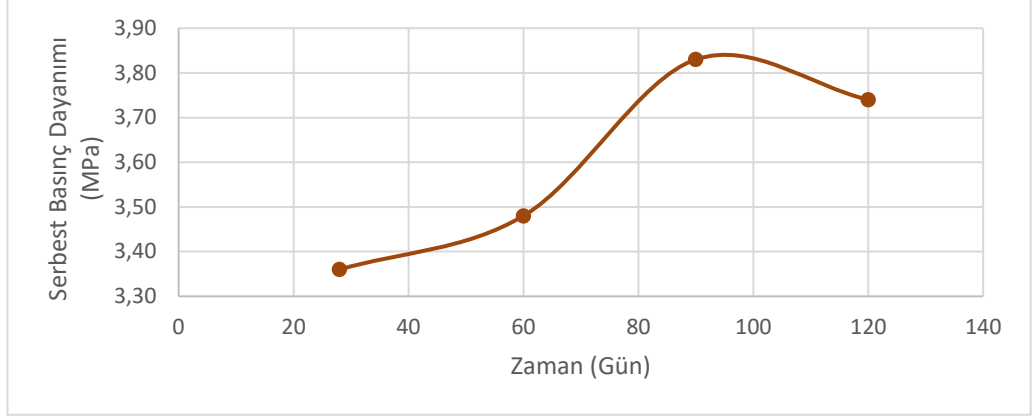


Şekil 4.23 Numune seti S'ye ait dayanım verileri

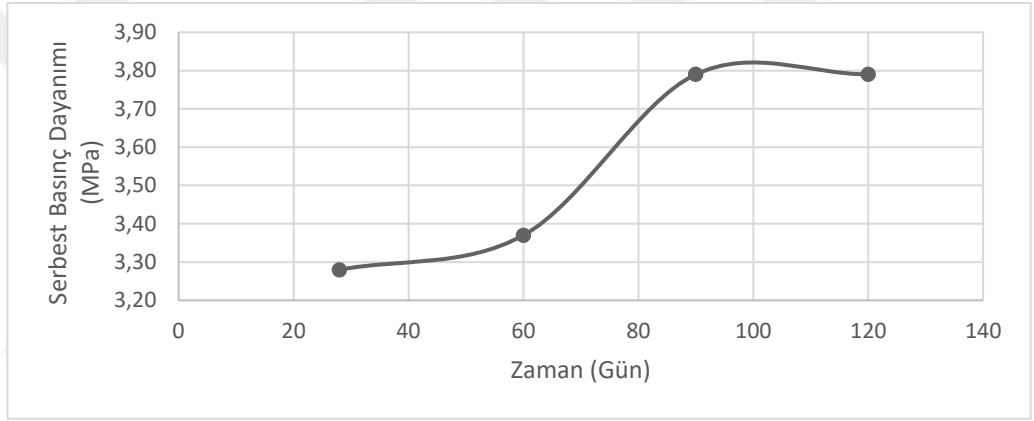


Şekil 4.24 Numune seti T'ye ait dayanım verileri

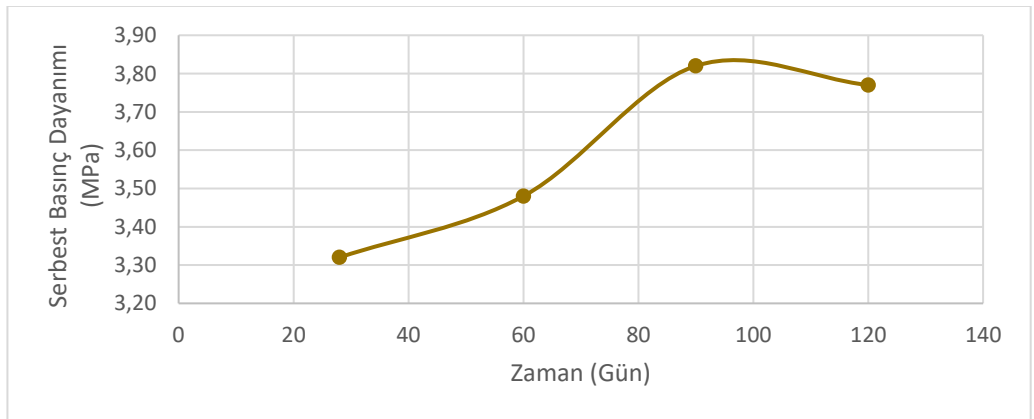




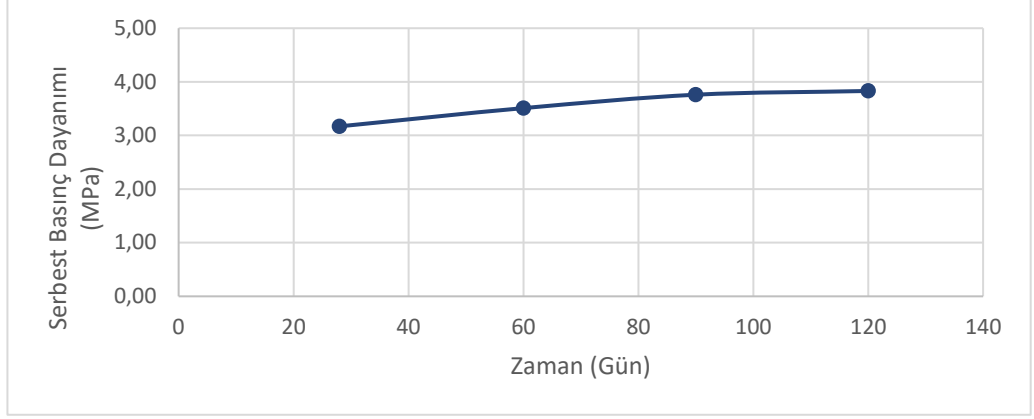
Şekil 4.25 Numune seti U'ya ait dayanım verileri



Şekil 4.26 Numune seti V'ye ait dayanım verileri



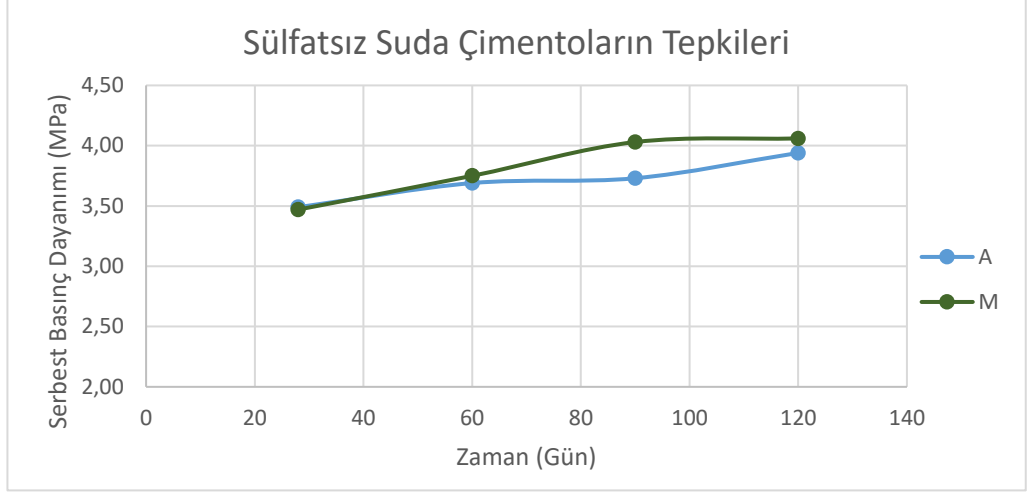
Şekil 4.27 Numune seti Y'ye ait dayanım verileri



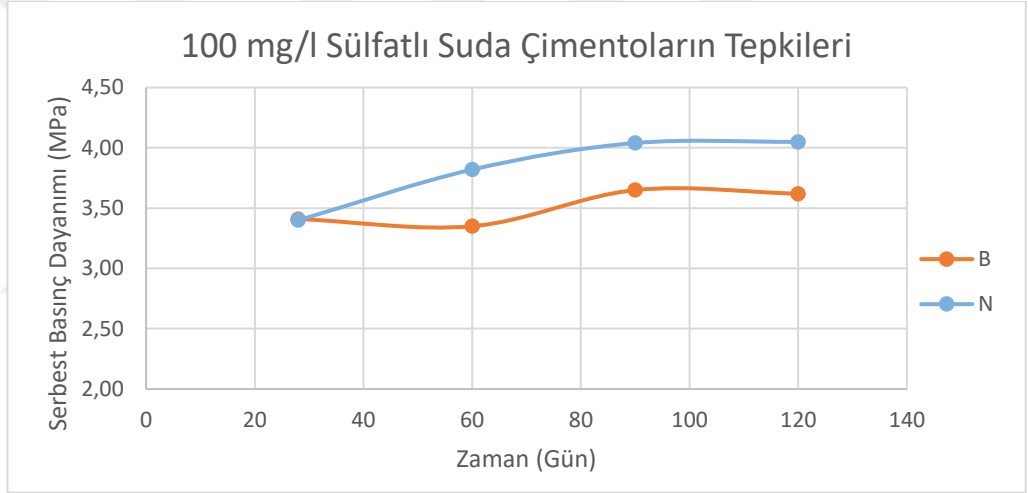
Şekil 4.28 Numune seti Z'ye ait dayanım verileri

Grafiklerden elde edilen verilere göre sülfata maruz kalan normal Portland çimentolu numuneler sülfat yoğunluğunun artması ile birlikte dayanım kaybı sergilemektedirler. Özellikle 2000 mg/l ve daha üzerinde sülfat yoğunluğu içeren numunelerin ciddi dayanım kaybı sergilediği anlaşılmıştır. CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerde ise 3000 mg/l sülfat yoğunluğu ve üzerindeki değerlerde az miktarda dayanım kayıpları gözlenmiş olsa da CEM II 42,5 nun sergilediği dayanım kayıplarına göre bu oran oldukça kabul edilebilir seviyelerde gerçekleşmiştir.

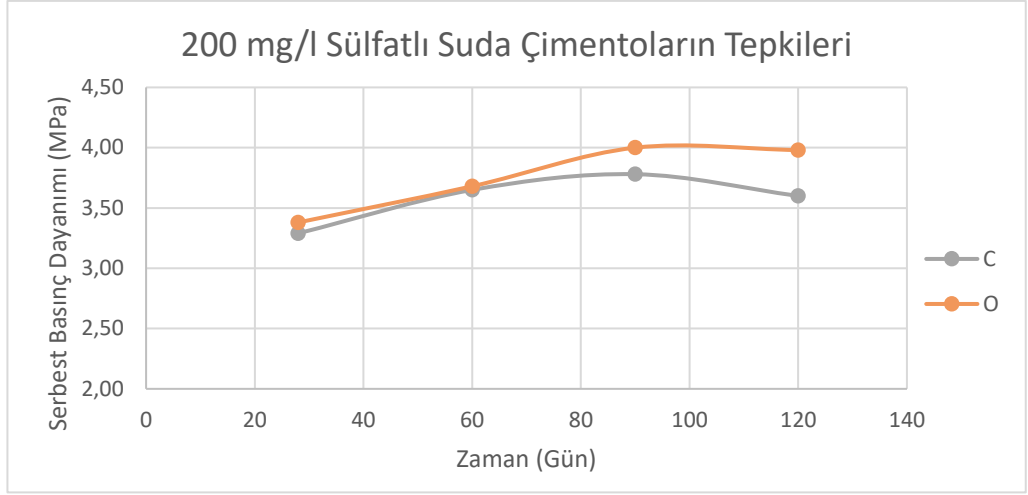
Her iki çimento türünün daha ayrıntılı karşılaştırmasının yapılabilmesi için aynı yoğunlukta sodyum sülfata maruz bırakılan numunelerin her iki çimento tipi için birlikte dayanım-gün grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.29 4.39).



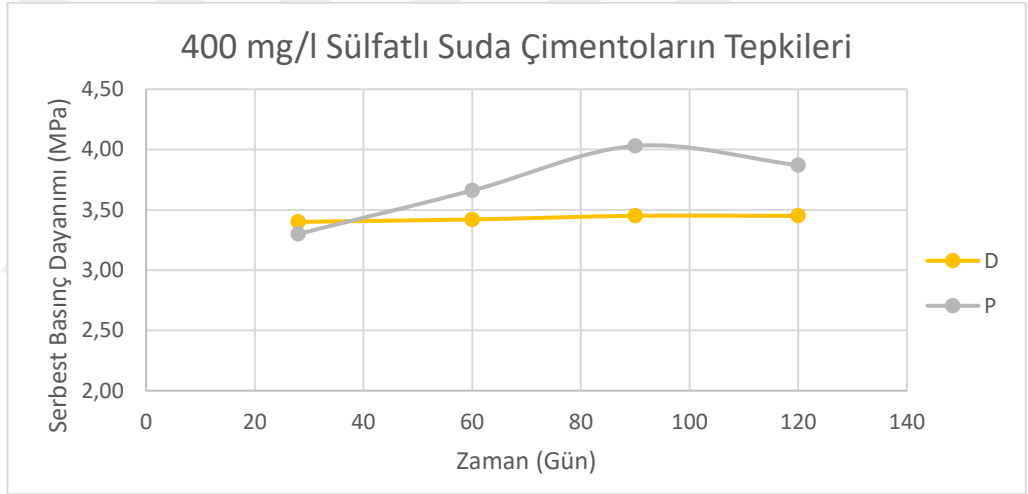
Şekil 4.29 Sülfatsız su içerisinde çimentoların tepkileri



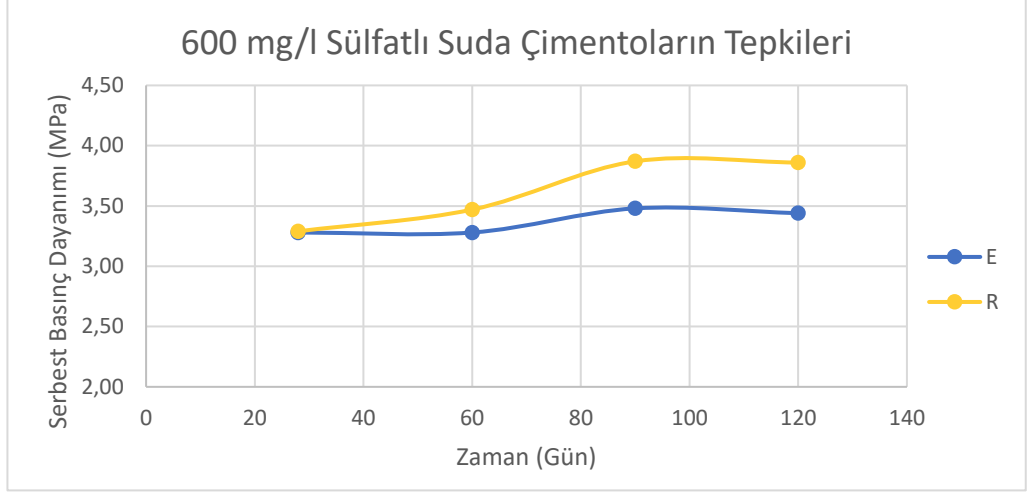
Şekil 4.30 100 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



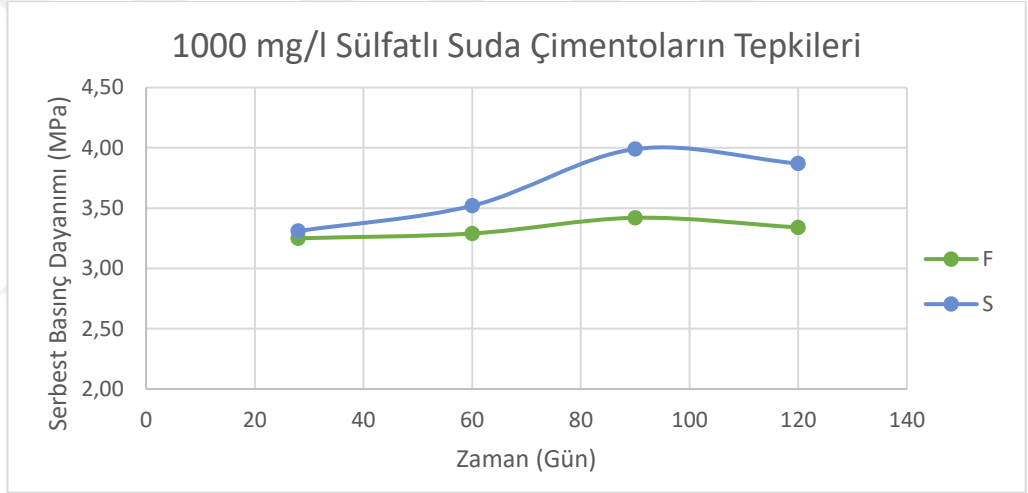
Şekil 4.31 200 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



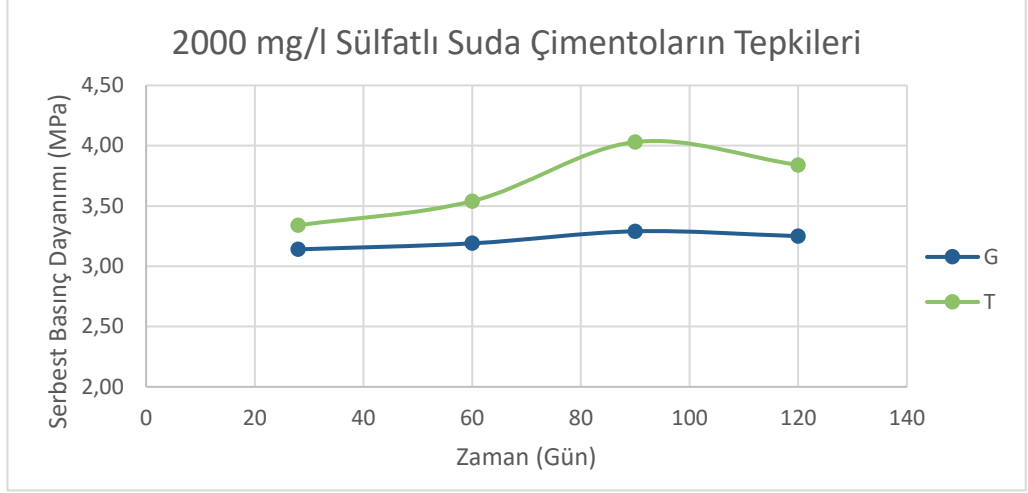
Şekil 4.32 400 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



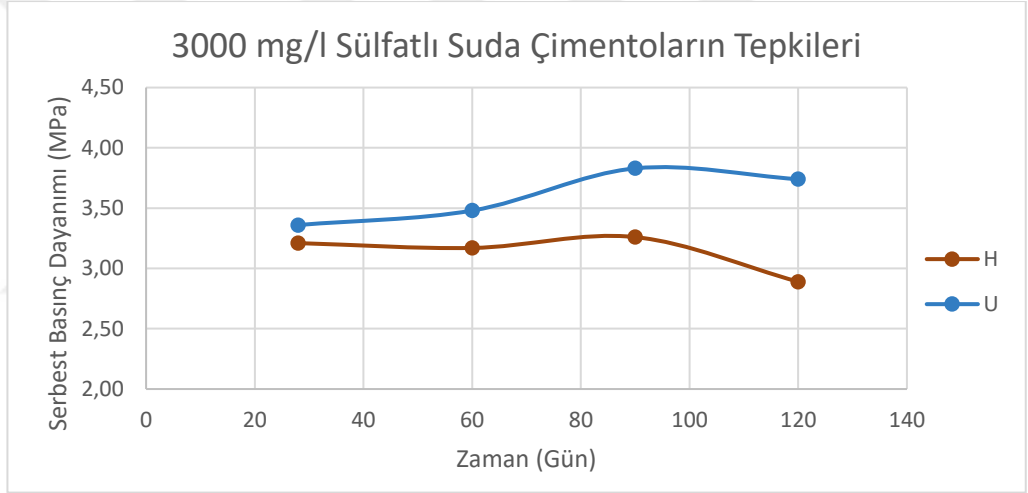
Şekil 4.33 600 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



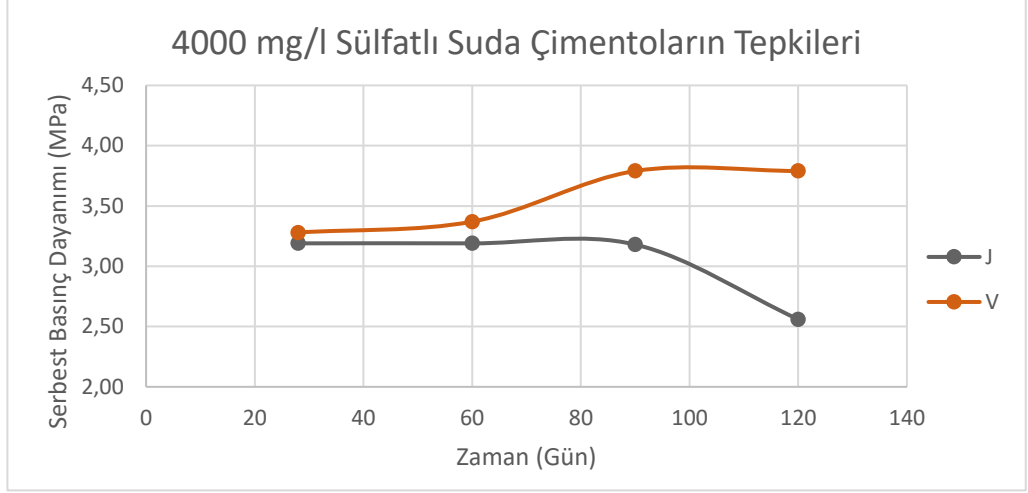
Şekil 4.34 1000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



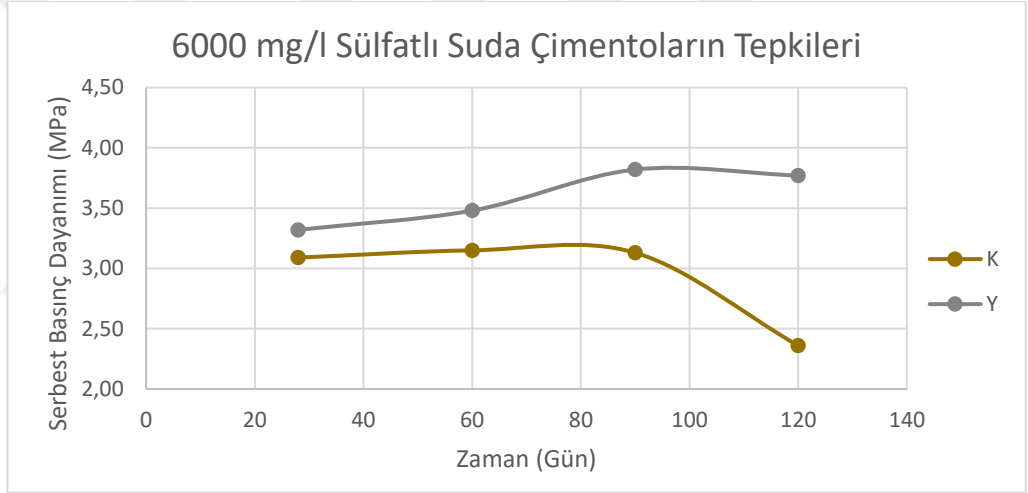
Şekil 4.35 2000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



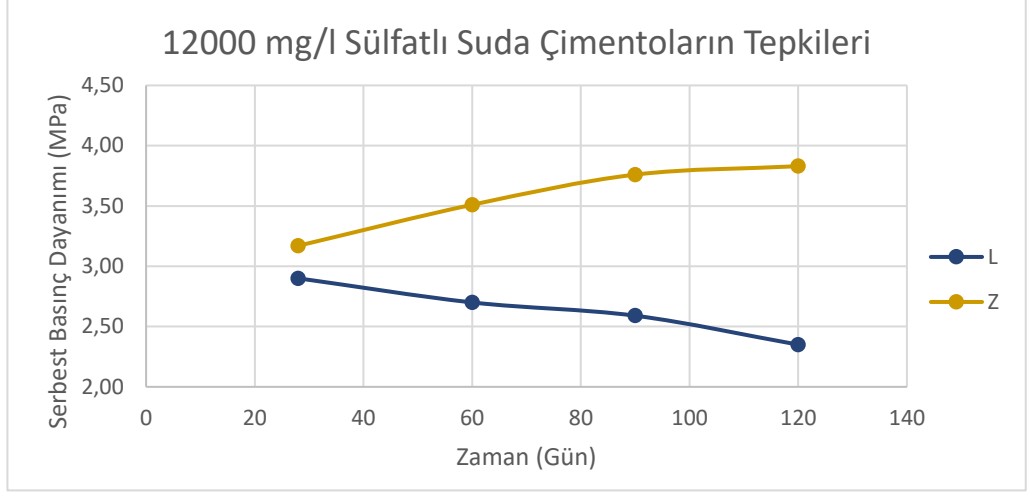
Şekil 4.36 3000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



Şekil 4.37 4000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



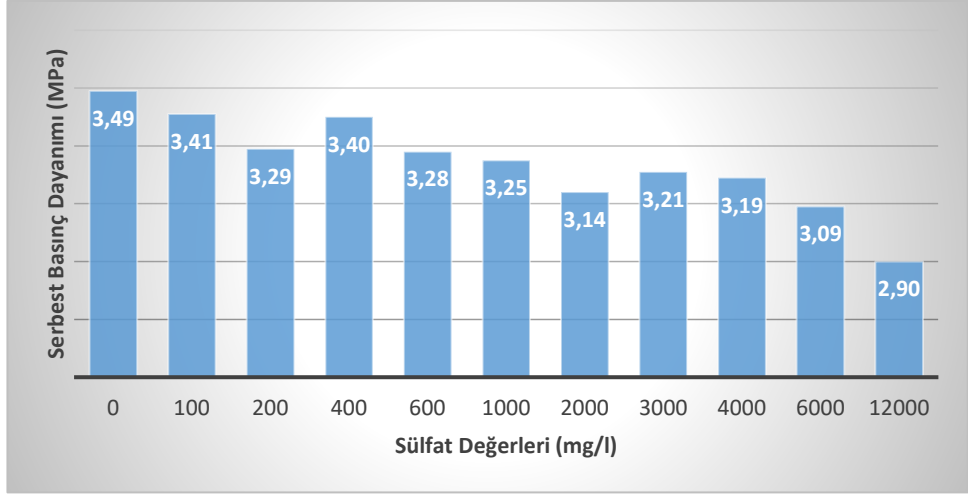
Şekil 4.38 6000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri



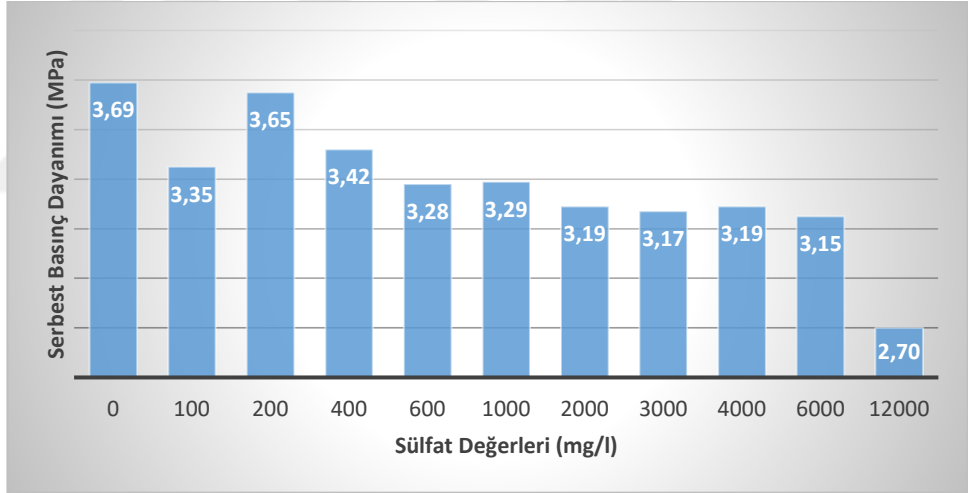
Şekil 4.39 12000 mg/l sülfat içeren su içerisinde çimentoların tepkileri

Grafiklerden anlaşılacağı üzere 2000-3000 mg/l sülfat yoğunluğundan başlamak üzere artan sülfat yoğunluğu değerleriyle birlikte çimento tipleri arasında gözlenen dayanım farklarında artışlar söz konusu olmuştur. Çimento tipleri arasında gözlenen farklılıklar 200-400 mg/l yoğunluklarda oldukça az olsa da artan bekleme süresi ile birlikte farklılıklar belirgin hale gelmiştir. 4000 mg/l yoğunluğa kadar olan kısımda 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri hemen hemen her iki çimento tipi içinde aynıdır. Uzayan kür süreleri dayanım farklılıklarını beraberinde getirmektedir. Sülfat yoğunluğuna bağlı olarak CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları sütun grafikleri şekline getirilmiş ve incelenmiştir (Şekil 4.40 - 4.43).

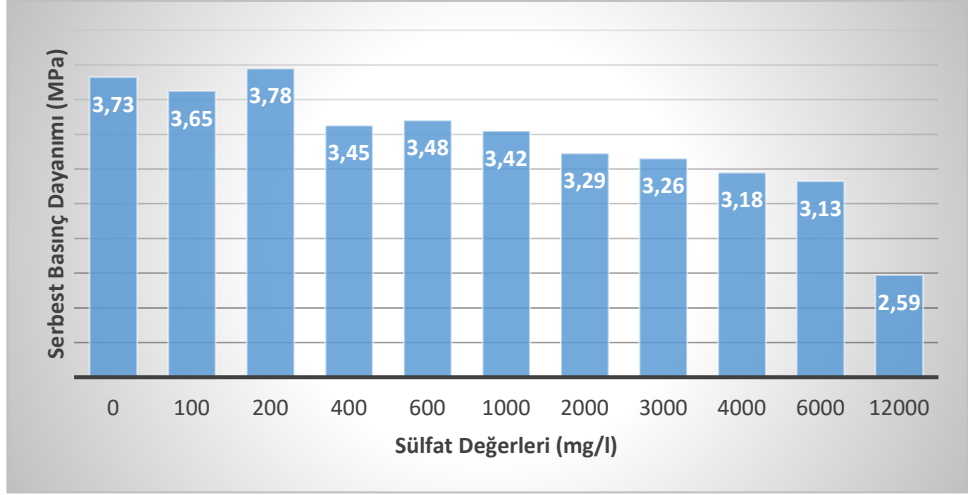




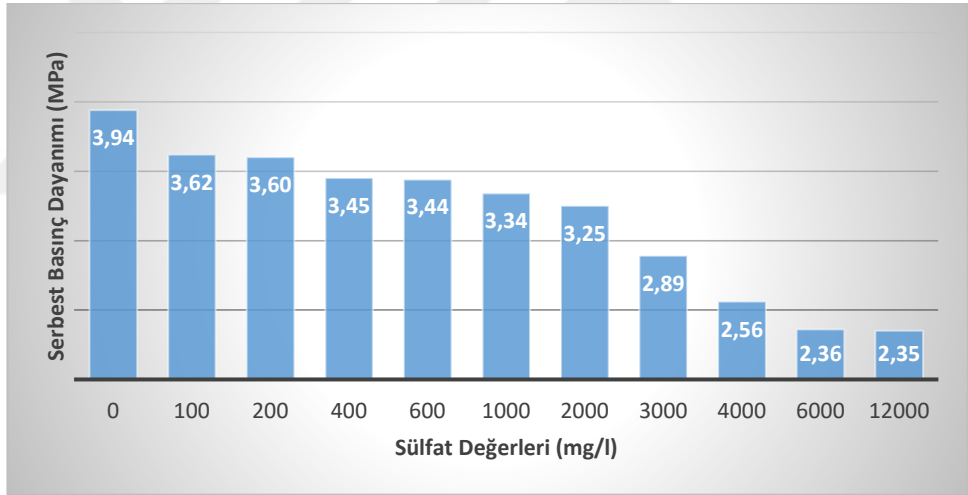
Şekil 4.40 28 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları



Şekil 4.41 60 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları



Şekil 4.42 90 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları

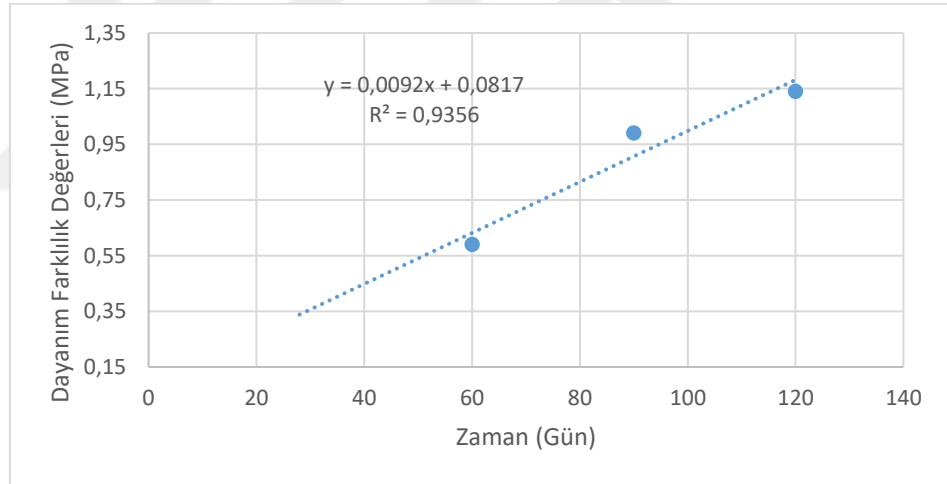


Şekil 4.43 120 Günlük kür süresi sonunda CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları

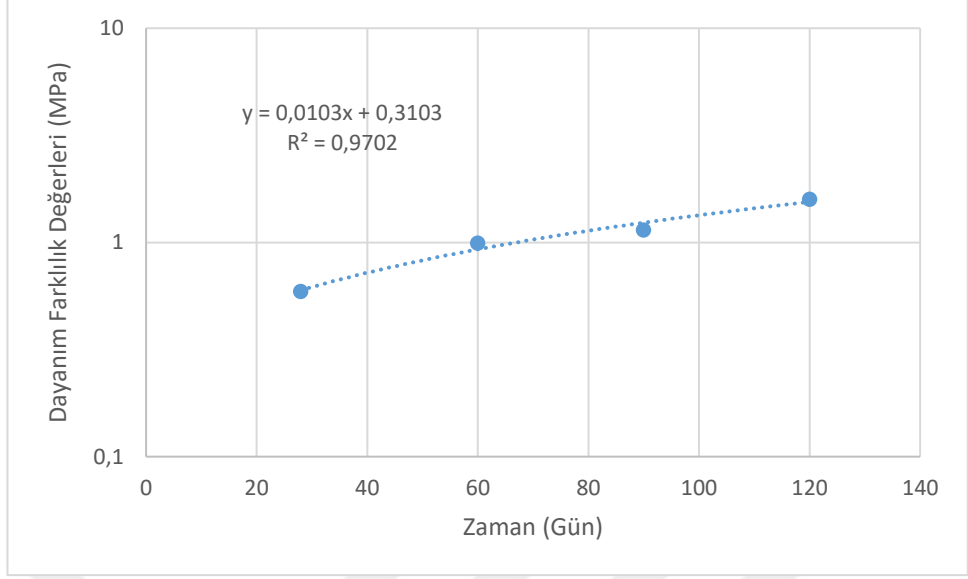
Sülfat yoğunluğuna bağlı olarak CEM II 42,5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları grafikleri yorumlandığı takdirde sülfata hiç maruz kalmamış numuneler ile sülfata tez çalışması kapsamında belirlenen en yüksek oranda (12000 mg/l) maruz kalan numuneler için dayanım farkları incelendiğinde 28 günlük kür süresi için (3,49-2,90) 0,59 MPa, 60 günlük kür süresi için (3,69-2,70) 0,99 MPa, 90 günlük kür süresi için (3,73-2,59) 1,14 MPa ve 120 günlük kür süresi için (3,94-2,35) 1,59 MPa dayanım farkları elde edilmiştir.

Buradan hareketle uzayan kür sürelerinin artan şekilde dayanım kayıpları oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu duruma gerekçe olarak numunelerin mikro gözeneklerinde oluşan sülfat reaksiyonlarının ürünü olan minerallerin zamanla gözenekleri çatlatması ve mikro çatlaklar oluşturması ile birlikte sülfatlı suyun reaksiyona girebilmesi için daha büyük ve geniş bir alanın oluşması gösterilebilir. Elde edilen verilere göre sülfata maruz kalan jet grout numunelerinde sülfat etkisinin zaman bağılı olarak lineer bir hızla artış gösterdiği yorumu yapılabilir (Şekil 4.44 - 4.45).

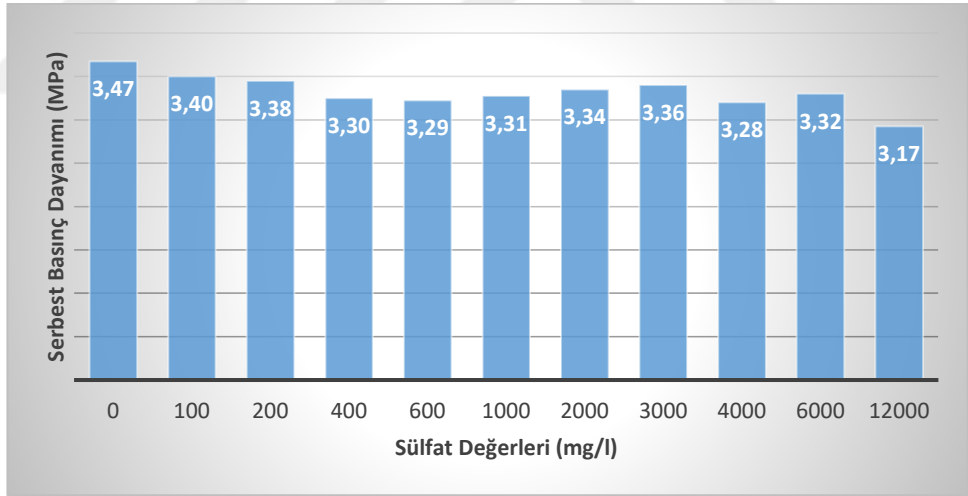
Çimentoların tür olarak karşılaştırılması için sülfat yoğunluğuna bağlı olarak CEM I SR – 5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları sütun grafikler şeklinde verilmiştir. İlgili grafikler aşağıdadır (Şekil 4.46-4.49).



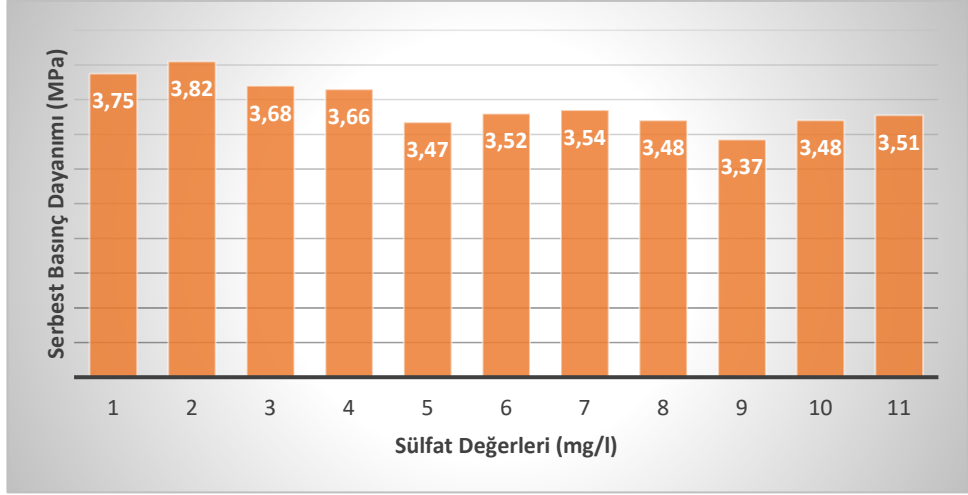
Şekil 4.44 CEM II 42,5 çimento ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıplarının grafiği (lineer)



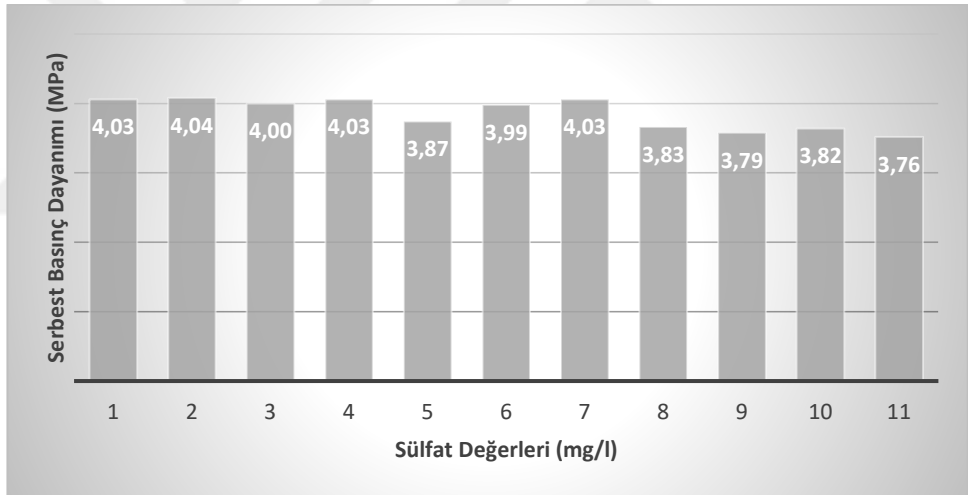
Şekil 4.45 CEM II 42,5 çimento ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıplarının grafiği (logaritmik)



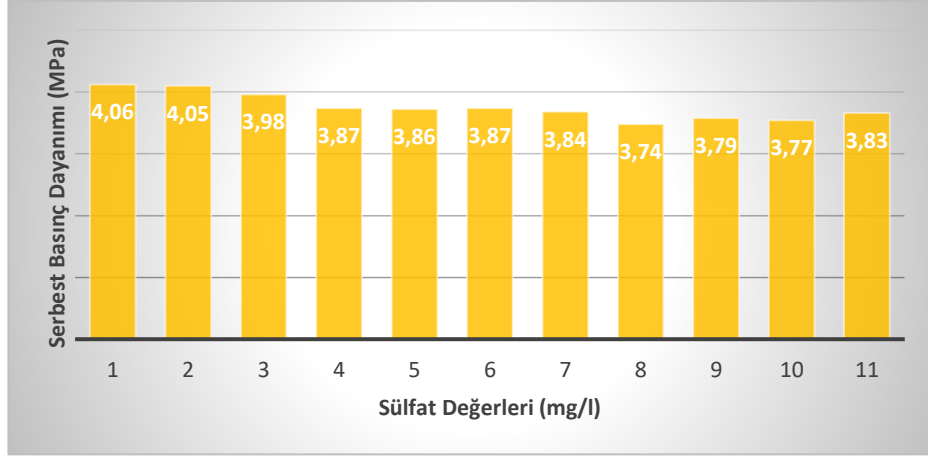
Şekil 4.46 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 28 günlük dayanımları



Şekil 4.47 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 60 günlük dayanımları



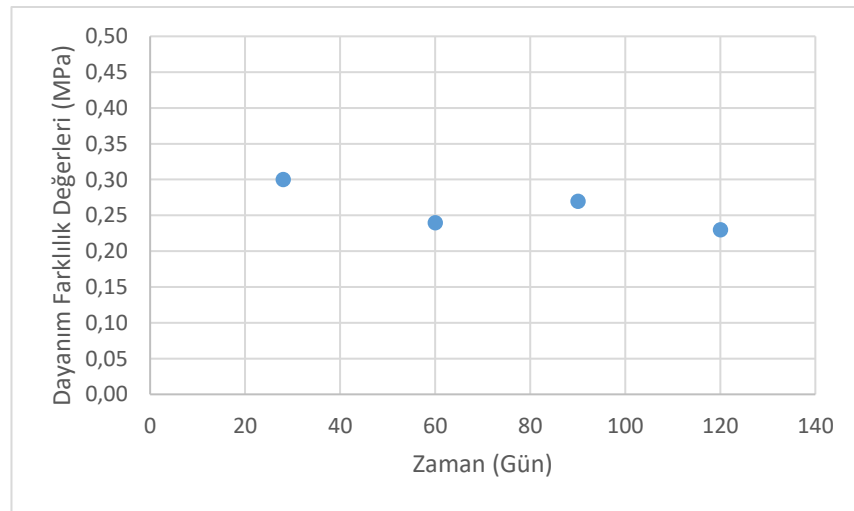
Şekil 4.48 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 90 günlük dayanımları



Şekil 4.49 CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin 120 günlük dayanımları

Sülfat yoğunluğuna bağlı olarak CEM I SR – 5 çimentosunda yaşanan dayanım kayıpları grafiklerinden elde edilen gözlemlere göre sülfata hiç maruz kalmamış ve çalışma kapsamında kullanılan en yüksek sülfat yoğunluğu olan 12000 mg/l sülfat değerine maruz kalmış numuneler arasındaki dayanım değerleri farkı şu şekildedir (Şekil 4.50):

- 28 günlük kür süresi için,  $3,47 - 3,17 = 0,30$  MPa
- 60 günlük kür süresi için,  $3,75 - 3,51 = 0,24$  MPa
- 90 günlük kür süresi için,  $4,03 - 3,76 = 0,27$  MPa
- 120 günlük kür süresi için,  $4,06 - 3,83 = 0,23$  MPa.

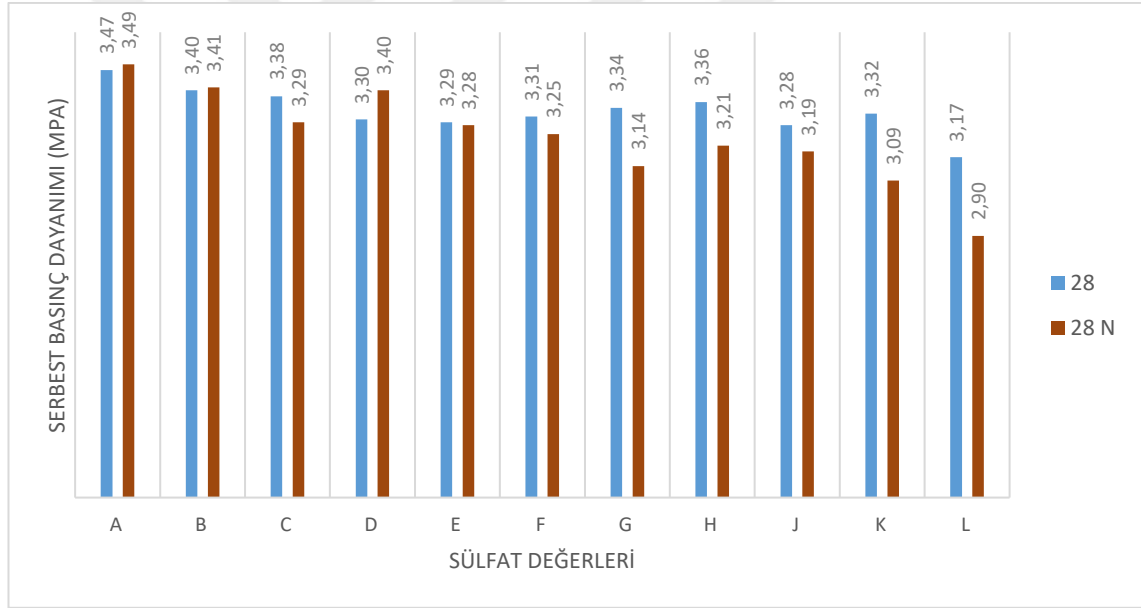


Şekil 4.50 CEM I SR-5 ile hazırlanan numunelerde zamana bağlı dayanım kayıpları

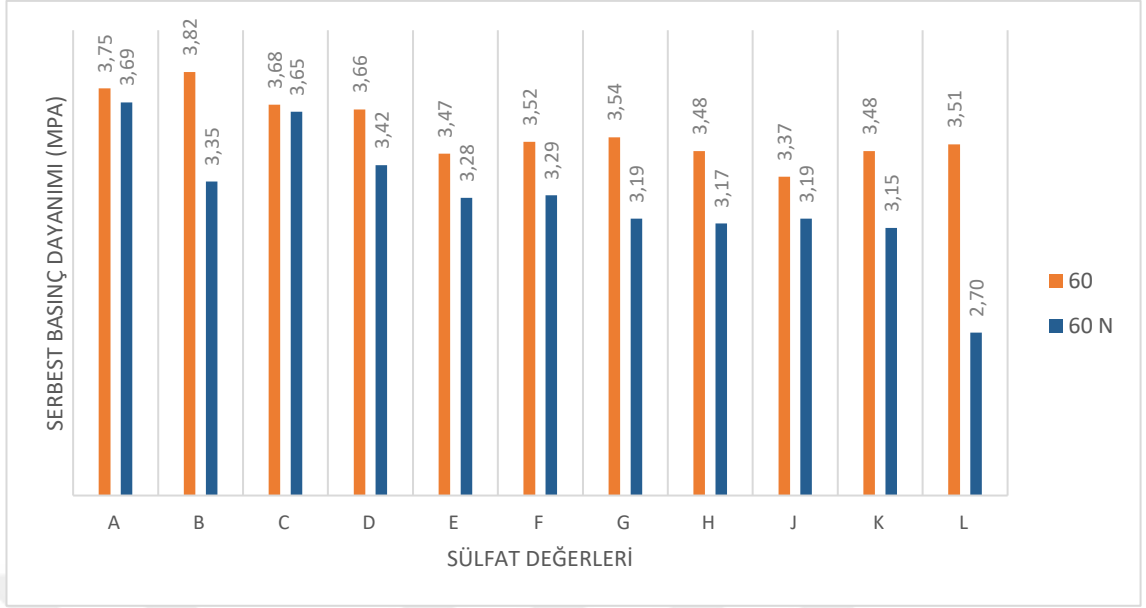
Bu değerler incelendiğinde CEM I SR – 5 imento sunun sülfat etkisine karşı daha dirençli olduğu anlaşılıbilir.

Her iki imento türünün 28-60-90 ve 120 günlük dayanımlarının sülfat yoğunluğuna göre grafikleri çizilmiştir (şekil 4.51 - 4.54). Grafiklerde sayısal gün değeri ile birlikte N ifadesi ile belirtilen imento türü CEM II 42,5 , yalnızca sayısal gün değeri ile ifade edilen imento türü CEM I SR - 5 çimentosudur.

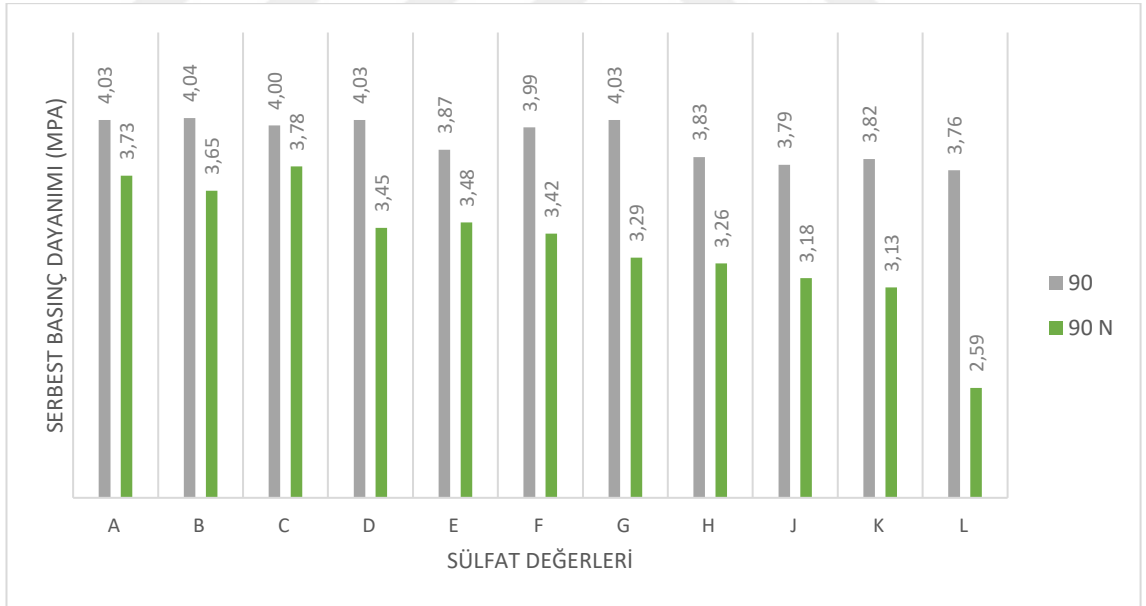
Ayrıca ilgili grafiklere ek olarak kr sürelerine göre CEM II 42,5 ve CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmış dayanımları grafikler halinde verilmiştir (şekil 4.55-4.56).



şekil 4.51 Her iki imento ile hazırlanan numunelerin 28 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması

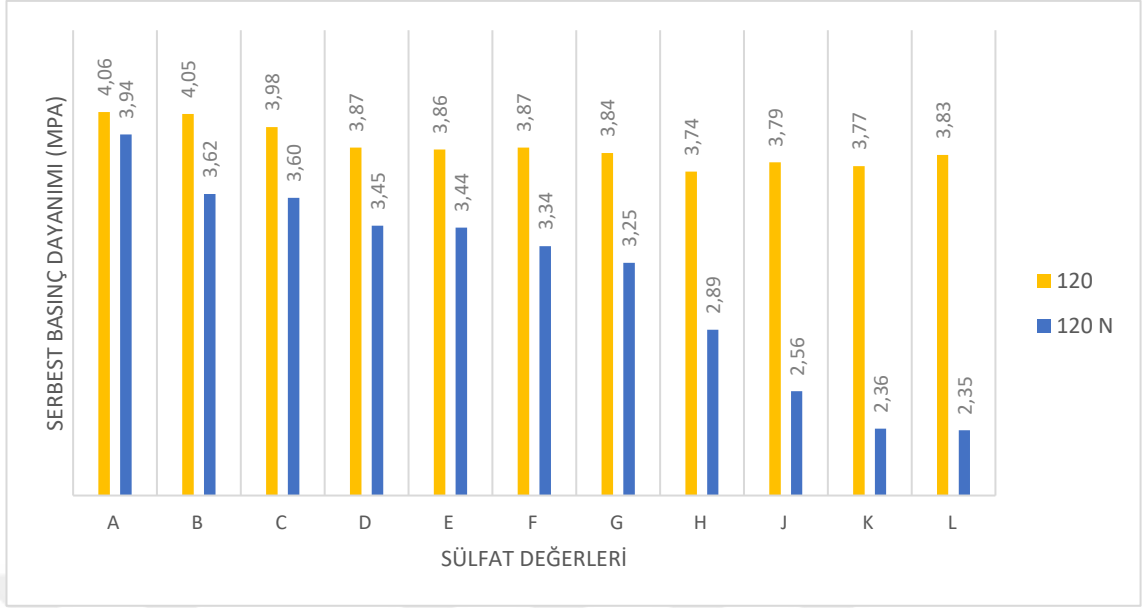


Şekil 4.52 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 60 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması

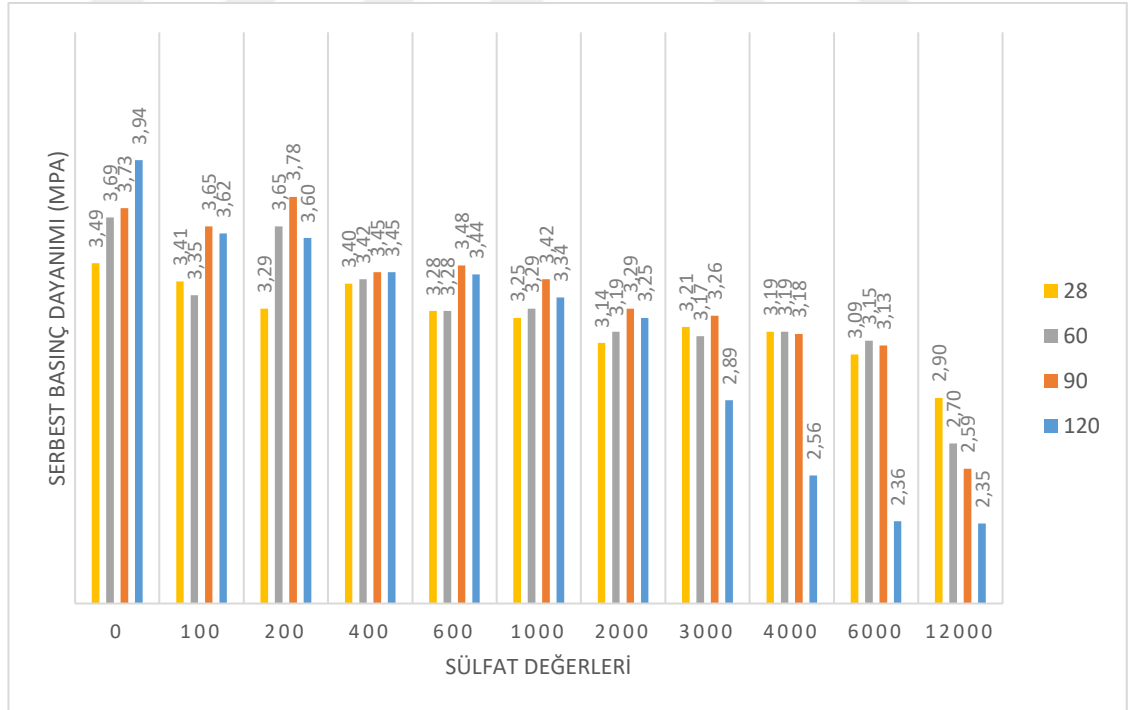


Şekil 4.53 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 90 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması

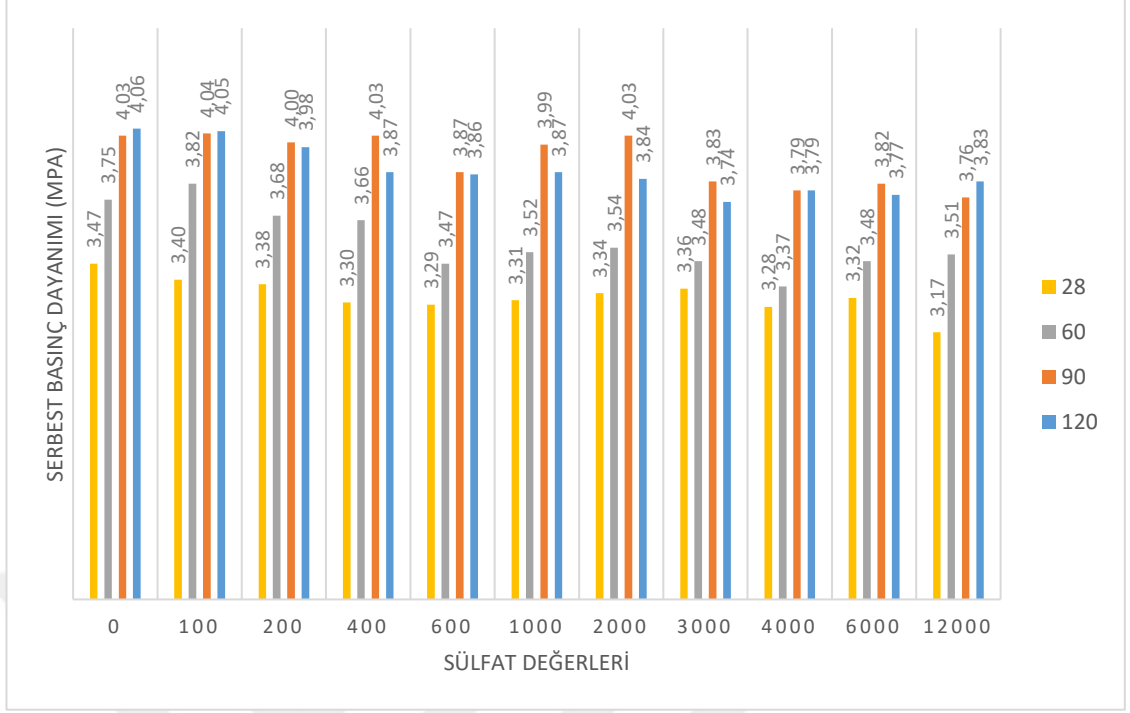




Şekil 4.54 Her iki çimento ile hazırlanan numunelerin 120 günlük dayanım değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.55 Kür sürelerine göre CEM II 42,5 ile hazırlanan numunelerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmış dayanımları



Şekil 4.56 Kür sürelerine göre CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin sülfat yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmış dayanımları

Grafiklerden elde edilen bilgilere göre CEM I SR - 5 kullanılarak hazırlanan numunelerin CEM II 42,5 kullanılarak hazırlanan numuneler kadar olmasa da sülfat karşısında zarar gördükleri ve dayanım kaybına uğradıkları anlaşılmıştır. Sülfat yoğunluğu olarak 28 günlük bekleme süresi için 1200 mg/l sülfat yoğunluğuna sahip kürede bekletilen numunelerde çimentolar arasındaki dayanım farklılığı belirginleşmeye başlamıştır. Artan sülfat yoğunluğu ile birlikte CEM I SR - 5 ile hazırlanan numuneler direnç göstermeye başlarken, CEM II 42,5 ile hazırlanmış numuneler dayanımlarını hızla kaybetmeye başlamışlardır. Belirtilen veriler 60 günlük bekleme süresi için de hemen hemen aynı şekildedir. 90 günlük bekleme süreleri test edildiğinde iki çimento grubu arasındaki dayanım farklarının 600-1000 mg/l seviyelerine gerilediği gözlenmiştir. Buradan hareketle artan bekleme süreleriyle düşük seviye (600 mg/l) sülfat yoğunluğunun da çimento yapısına ve dolayısı ile jet grout kolonlarına zarar verebileceği anlaşılmıştır. 120 günlük bekleme süresi verilerine göre numunelerin dayanım değerleri karşılaştırıldığında artan sülfat yoğunluğu ile birlikte artan dayanım farklılıkları gözlenmiştir. Farklılıklar 100-400 mg/l sülfat yoğunluğu verileri arasında tolerans gösterilebilecek seviyeler

arasında iken, 400 mg/l sülfat yoğunluğunun üstüne çıkılan numunelerde fark çok ciddi biçimde artış göstermiş ve artan sülfat ile birlikte lineer olarak CEM II 42,5 çimentosunun kullanıldığı numunelerde dayanım kaybı gözlenmiştir. CEM I SR - 5 kullanılan numuneler çok az da olsa dayanım kaybetmişler, ancak bu kayıplar çok düşük düzeylerde gerçekleşmiş ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır.

28 günlük bekleme süresinde 100 mg/l ve 400 mg/l sülfat yoğunluklarına sahip numunelerde CEM II 42,5 ile hazırlanan numunelerin dayanım değerleri, CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerin dayanım değerlerinden yüksek çıkmıştır. Bu durumun sebebi tam olarak anlaşılamamış olsa da serbest basınç deneyine tabi tutulamayan ve fiziksel olarak deney öncesinde zarar gören numunelerin ortalamaya katılmaması sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında jet grout kolonlarının içerisinde imal edildikleri killi-siltli zeminlerde bulunan (yeraltı suyunda mevcut) sodyum sülfat iyonlarının jet grout kolonlarının dayanımına olan etkisi serbest basınç dayanımı deneyleri yapılarak araştırılmıştır.

- ✓ Çalışmada Erzurum ili - Uzundere ilçesi, Pirinkayalar Geçidi'nde yapımı devam etmekte olan tünel ve yol yapım çalışmalarında zemin stabilizasyonu için imal edilen jet grout kolonlarının bulunduğu zeminden örnekler alınarak laboratuvarında çimento ile karıştırılmış ve yapay jet grout numuneleri hazırlanmıştır.
- ✓ Jet grout numuneleri çalışma kapsamında sabit ve literatür ile çelişmeyecek bir değer olması bakımından ağırlıkça %50 çimento ve %50 zemin olacak şekilde tasarlanmıştır. Çimento karışımı hazırlanırken su/çimento oranı 1.0 olarak belirlenmiş ve tüm numuneler için aynı oran kullanılmıştır.
- ✓ Kür havuzundan çıkarılan numunelerin bazılarında çatlama-kırılmalar ve bazılarında yüzeysel dağılmalar meydana gelmiştir. Bu durumun sülfatın betona olan etkisinin yapay jet grout karotlarında da gözlemlendiğinin bir kanıtı olarak kabul edilmiştir.
- ✓ Sülfatlı sular içerisinde bekletilen numunelerde dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Morfolojik olarak da bu numunelerin birçoğunda fiziksel çatlaklar, dokuda bozulmalar ve dökülmeler gözlenmiştir.
- ✓ Elde edilen sonuçlara göre CEM II 42,5 için, sülfat yoğunluğu ve bekleme süresi arttıkça numunelerin serbest basınç dayanım değerlerinde meydana gelen kayıplar artmıştır.
- ✓ CEM II 42,5 çimentosu ile hazırlanan numunelerde A-B-C-D-E ve F setlerinde (sırasıyla 0, 100, 200, 400, 600 ve 1000 mg/l sodyum sülfat içeren kürlerde beklemiş olan numuneler) zamana bağlı olarak ufak dayanım kayıpları yaşanmış ancak bu değişimler kabul edilebilir düzeylerde kalmıştır. G-H-J numunelerinde ise (sırasıyla 2000, 3000, 4000 mg/l sodyum sülfat içeren kürlerde beklemiş olan numuneler) zamana bağlı olarak artan dayanım kayıpları gözlenmiştir. K ve L setlerinde ise (6000 ve 12000 mg/l sodyum sülfat içeren kürlerde bekletilmiş numuneler) çok ciddi dayanım kayıpları gözlenmiştir.

- ✓ CEM I SR - 5 ile hazırlanan numunelerde ise dayanım kaybı çoğu numunede 100 günlük bekleme süresinden sonra görünmeye başlanmıştır. Meydana gelen çoğu kayıp oldukça ufak düzeyde ve kabul edilebilir seviyelerdedir.
- ✓ U-V-Y ve Z kodlu numune setlerinde normalde dayanım kazanılan 28-90 günlük süreçte dayanım kazanma hızlarında ciddi bir azalma gözlenmiştir. Bu durum CEM I SR - 5 kullanılsa bile 3000 mg/l ve daha üzerindeki sodyum sülfat yoğunluklarında çimentonun dayanım kaybı yaşaması gerçekleşmese dahi, kazanacağı dayanımı kazanamama durumunun yaşandığı gözlenmiştir.
- ✓ 2 çimento tipinin karşılaştırıldığı durumda sülfatın hiç olmadığı, ve 100, 200, 400, 600 mg/l yoğunluklarda sodyum sülfatın bulunduğu kürlerde bekleyen numunelerde 2 çimento tipi ile hazırlanmış numunelerin dayanımlarında ciddi farkların olmadığı, ancak ufak dayanım farklarının bulunduğu ve artan gün bekleme süreleriyle birlikte bu farkın yavaş bir hızla giderek arttığı gözlenmiştir. Buradan hareketle sülfata dayanıklı olmayan CEM II 42,5 çimentosunun başlangıç aşamalarında sülfata karşı dayanıklı çimento ile benzer tepkiler sergilediği, ancak ilerleyen zaman ile beraber gerçekleşen reaksiyonların hızının artması ve mikro çatlamlar aracılığı ile reaksiyonların daha geniş yüzeylerde gerçekleşmesi sistemi ile sergiledikleri davranışın farklılaştığı ve sülfata dayanıklı olmayan çimentonun dayanım kaybetmeye başladığı anlaşılmıştır. İki çimento tipi arasında gözlenen dayanım farkları genellikle 60-85 gün aralığından sonra artışa geçmiştir.
- ✓ 2000, 3000 ve 4000 mg/l sodyum sülfatlı kür sularında bekletilen numuneler için dayanım farklılaşmalarının 60. gün ve sonrasında başladığı ve sabit bir artış hızı ile dayanım farkı değerinin yükseldiği anlaşılmıştır.
- ✓ 4000, 6000 ve 12000 mg/l değerlerinde sülfatlı kür sularında bekleyen numuneler için dayanım değerlerinde oluşan farklılaşmaların 28-30. günden itibaren başladığı ve 45. günden itibaren farkların artmaya başladığı gözlenmiştir. Özellikle 12000 mg/l sülfatlı suda bekleyen örnekler için iki çimento tipinin sergilediği dayanım değerlerinin arasındaki farkların doğrudan 30. günden itibaren önceki eğilimine göre daha hızlı bir artış gösterdiği ve ayrıca başlangıçtan itibaren doğrudan artış gösterdiği anlaşılmıştır.
- ✓ Elde edilen sonuçlara göre CEM I SR - 5'nun CEM II 42,5 çimentosuna göre sülfatlı sulara daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Sülfat yoğunluğunun belirli düzeylerin

üzerine çıktığı (6000 mg/l ve üzeri) değerlerde CEM I SR - 5da da dayanımda azalma ve kazanılacak dayanımın kazanılamaması durumu gözlenmiştir.

- ✓ Sülfata dayanıksız CEM II 42,5 çimentosunun 2000 mg/l sülfat yoğunluğuna sahip suda 120 gün bekledikten sonra %2 oranında dayanım kaybına uğradığı anlaşılmıştır. 3000 mg/l, 4000 mg/l, 6000 mg/l ve 12000 mg/l yoğunluklardaki sülfatlı sularda CEM II 42,5 çimentosunun uzun süreçte artan sülfat içeriği ile birlikte %12, %20, %25 ve %10 değerlerinde dayanım kaybettiği anlaşılmıştır.
- ✓ 12000 mg/l yoğunluktaki sülfatlı suya maruz kalan numunede %25 değerinin (6000 mg/l sülfat yoğunluğundaki sülfatlı suya maruz kalan numunenin 120 gün sonundaki dayanım kaybı) daha üzerinde bir değerde dayanım kaybı yaşaması beklenirken %10'luk dayanım kaybına uğraması numune hazırlanırken veya numune serbest basınç testine tabi tutulurken yaşanan bir hatadan ötürü kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ✓ Literatür çalışmalarına göre sülfatın betona verdiği zarar, zemin ve çimento karışımı olan jet grout kolonları içinde geçerlidir. Uzayan maruz kalma süreleriyle lineer artış gösterdiği belirlenen bu mekanizma, benzer çalışmalar yürütülerek daha detaylı biçimde araştırılabilir.
- ✓ Literatürde yapılan birçok çalışmada sülfatın etki mekanizması uzayan sürelerde incelenmiştir. Yapılan beton-sülfat etkileşimi konulu çalışmalar kısa süreli olarak birkaç aylık olsa da çok daha uzun süreli (1 yıl, 4 yıl, 6 yıl ve 21 yıl) çalışmalar yapılmıştır. Jet grout kolonlarına etkiyen sülfatın oluşturacağı tepkileri görmek adına çalışma çok daha uzun süreli sülfat maruziyeti ile (2 yıl-3 yıl) yapılabilir.
- ✓ Silis dumanı, kireç katkısı gibi bazı beton katkıları kullanılarak sülfatın betona verdiği zarar belirli ölçülerde kontrol altına alınabilmektedir. Jet grout kolonlarına bu türde katkıları katılarak belirli sülfat direnci sağlanabilir.
- ✓ İlgili sülfat mekanizması farklı zemin türlerinde araştırılarak daha kapsamlı bir sonuç ortaya konulabilir.
- ✓ Türkiye'de özellikle de İç Anadolu Bölgesinde yer alan ve yeraltı suyu içeren akiferlerde sülfat konsantrasyonunun yüksek olduğu durumlarda jet grout uygulamaları yapılacağı takdirde, yeraltı suyundaki sülfat konsantrasyonu ölçülerek, imal edilecek jet grout kolonlarında ileride meydana gelebilecek dayanım kayıpları ve olumsuzluklar önceden belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- Akın, M.K. 2016. Experimental studies on the physico-mechanical properties of jet-grout columns in sandy and silty soils. *Journal of African Earth Sciences*, 116, 190-197.
- Aksangür, Z. ve Bol E. 2017. Yüksek Modüllü Kolonların (Jet Grout) Zemin İyileştirmesinde Kullanımı ve Hesap Yöntemleri, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), 29-30 September, Book of Abstracts,-Azerbaijan)
- Anonim, Zemin Araştırma. Web Sayfası: <http://www.zeminarastirma.com/>:Erişim Tarihi: 05.04.2018
- Anonim, Ankara ili 2007 ve 2017 yılına ait nüfus verileri, [http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1059](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1059)
- Anonim, Ankara ili 2000 yılı ve 2017 yılı nüfus yoğunluğu verileri, [http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_id=1059](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1059)
- Anonymous, 2018. <http://www.bstglobal.com/industry/engineering/>: Erişim Tarihi: 05.03.2018
- Anonymous, 2018. <http://www.keller.com.au/solutions/techniques/jet-grouting/>: Erişim Tarihi 05.03.2018
- Anonymous, 2018. <http://www.pacchiosi.com/jetgrouting.asp>: Erişim Tarihi: 04.04.2018
- Baumann, V. 1984. Das Soilcrete, Verfahren in der Baupraxis, Baugrundtagung, DGEG, 49-83.
- Brown, P., Hooton, R.D. 2002. Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements. *Cement and Concrete Composites*, 24(3-4), 361-370.
- Burke, G.K. 2004. Jet Grouting Systems : Advantages and Disadvantages. GeoSupport Conference 2004.

- Cao, H.T., Bucea, L., Ray, A. and Yozghatlian, S. 1997. The Effect of Cement Composition and pH of Environment on Sulfate Resistance of Portland Cements and Blended Cements. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 161-171.
- Croce, P., Flora, A., Modoni, G. 2014. *Jet Grouting Technology, Design and Control*. CRC Press: Taylor & Francis Group, 298 s.
- Dehwah, H.A.F. 2005. 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.
- Demiral, T.Ö. 2017. Sülfatlı su içerikli kum zeminlerde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının taşıma gücüne sülfatın etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Durgunoğlu, H.T., Kulac, H.F., Oruc, K., Yıldız, R., Sickling, J., Boys, I.E., Altugu, T., Emrem, C. 2003. A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction for a cigarette factory in Turkey. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*. January.
- Durgunoğlu, H.T. 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (431), 39-52.
- Erkan, İ.H. 2013. Jet grout kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması. Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Erol, A.O., Bayram, Z.Ç. 2018, *Jet Enjeksiyon Yöntemi*. Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., 153s, Ankara.
- Flora, A., Lirer, S., Monda, M. 2012. Probabilistic design of massive jet grouted water sealing barriers. *4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, 2012.



- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S. and Croce, P. 2013, The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results. *Géotechnique*, 63(11), 934-945.
- Ho, C.E. 2007, Fluid-Soil interaction model for jet grouting. Conference of Geo-Denver, 2007, October. Geotechnical special Publication, 231(1).
- Hossack, A.M., Thomas, M.D.A. 2015. The Effect of Temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Solution. *Cement and Concrete Research*, 73, 136-142.
- Irassar, E.F. 2009. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 241-254.
- Leach, S.J., Walker, G.L. 1966. Some Aspects of rock cutting by-high speed water jets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 260(1100), 295-308.
- Lee, S.T., Moon, H.Y., Swamy, R.N. 2005. Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. *Cement&Concrete Composites*, 27(1), 65-76.
- Lunardi, P. 1997. Ground Improvement by means of jet-grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 1(2), 65-85.
- Ma, X., Çopuroğlu, O., Schlangen, E., Han, N., Xing, F. 2018. Expansion and degradation of cement paste in sodium sulfate solutions. *Construction and Building Materials*, 158, 410-422.
- Malinin, A., Gladkov, I., Malinin, D. 2010. Experimental research of jet-grouting parameters in different soil conditions. *GeoShanghai International Conference 2010*.
- Melegari, C., Garassino, A.L. 1997. Seminar on Jet grouting, CI Premier Pte, Ltd. Singapore.
- Mitchell, J.K., 1976. *Stabilization of Soils for Foundations of Structures*, Geotechnical Engineering, University of California.

- Modoni, G., Croce, P., Mongioví, L. 2006. Theoretical modelling of Jet Grouting. *Géotechnique*, 56(5), 335-347.
- Müllauer, W., Beddoe, R.E., Heinz, D. 2013. Sulfate attack expansion mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 52, 208-215.
- Najjar, M.F., Nehdi, A.M., Soliman, A.M., Azabi, T.M. 2017, Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 137, 141-152.
- Nikbakhtan, B., Osanloo, M. 2008. Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46(3),498-505.
- Nikbakhtan, B., Ahangari, K. 2010. Field study of the influence of various jet grouting parameters on soilcrete unconfined compressive strength and its diameter. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47(4), 685-689.
- Ochmański, M., Modoni, G., Bzówka J. 2015. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural network. *Soils and Foundations*, 55(2), 425-436.
- Önalp, A. 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi. Cilt II, Karadeniz Üniversitesi Yayın No:3, Trabzon, 1225s.
- Pinto, A., Tomâsio R., Marques, G. 2016. Ground Improvement with Jet Grouting Solutions at the New Cruise Terminal in Lisbon,Portugal. *Procedia Engineering*, 143, 1495-1502.
- Rahman, M.M., Bassuoni, M.T. 2014. Thaumasite Attack on Concrete: Mechanisms, Influential factors and Mitigation. *Construction and Building Materials*, 73, 652-662.
- Roziere E., Loukili A., El Hachem R., Grondin F. 2009. Durability of concrete exposed to elaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1188-1198.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J., 2001. Sulfate attack research – Whither now?. *Cement and Concrete Research*,31, 845-851.

- Santhanam, M., Cohen M.D., Olek, J. 2002. Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 915-921.
- Shen, S., Wang, Z., Horpibulsuk, S., Kim, Y. 2013a. Jet grouting with a newly developed technology: The Twin-Jet method. *Engineering Geology*, 152(1), 87-95.
- Shen, S., Wang, Z., Sun, W., Wang, L., Horpibulsuk, S. 2013b. A field trial of horizontal jet grouting using the composite-pipe method in the soft deposits of Shanghai. *Tunneling and Underground Space Technology*, 35, 142-151.
- Shen, S., Wang, Z., Yang, J., Ho, C. 2013c. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2060-2069.
- Shibazaki, M. 2003. State of practice of Jet Grouting. *International Conference on Grouting and Ground Treatment*. New Orleans.
- Tian, B., Cohen, M.D. 2000, Does Gypsum dormation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*, 30(1), 117-123.
- Tosun, K. 2007. Farklı Çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri, *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi*.
- Tosun, K., Baradan, B. 2010. Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion. *Cement & Concrete Composites*, 32(4), 271-280.
- Vleeschauwer, H., Maertens, G., Jet grouting: State of the art in Belgium, *Proceedings of the Conference of Grouting-Soil improvement-Geosystem including reinforcement*. Finnish Geotechnical Society, Helsinki, 145-156, 2000.
- Wong, I.H., Poh, T.Y. 2000. Effects of Jet grouting on adjacent ground and structures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), 247-256.
- Xanthakos, P., Abramson, L.W., Bruce, D.A. 1994. *Ground Control and Improvement*, New York, John Wiley&Sons, Inc., 670.
- Xu, A., Shayan, A., Baburamani, P. 1998. Test methods for sulfate resistance of concrete and mechanism of sulfate attack: A state of the art review.

- Yağızatlı, E. 2012. Jet-Grout Kolonların SEM Analizi ve Etkin Parametrelerin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Yalçın, H., Gürü, M. Çimento ve Beton. Palme Yayıncılık, 2004, Ankara.
- Yang, S., Zhongzi, X., Mingshu, T. 1996. The Process of Sulfate Attack on Cement Mortars. *Advanced Cement Based Materials*, 4(1), 1-5.
- Yang, Y., Zhang, Y., She, W., Liu, N., Liu, Z. 2018. In situ observing the erosion process of cement pastes exposed to different sulfate solutions with X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 176(10), 556-565.
- Yıldırım, S. 2002. Zemin inceleme ve Temel Tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul, 466s.
- Yonekura, R., Shibasaki, M. 1996. Proceedings of the Conference on Grouting and Deep Mixing: Tokyo, Japan: Balkema, 721-726, May 14-17, 1996.
- Yu, C., Sun, W., Scrivener, K. 2013. Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 43, 105-111.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Furkan Hamza HARPUTLUGİL  
Doğum Yeri : Çankaya/ANKARA  
Doğum Tarihi : 18.11.1991  
Medeni Hâli : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Bahçelievler Anadolu Lisesi, 2009

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği  
Bölümü, 2015

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği  
Anabilim Dalı (Haziran,2018)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Atatürk Üniversitesi Oltu Yer Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 2016-  
Halen