

154204

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JET GROUT TEKNİĞİNİN ZEMİN SIVILAŞMASI
ÜZERİNDEKİ AZALTICI ETKİSİNİN NÜMERİK
ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI

154204

İnşaat Müh. İlker ERKİN

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yard.Doç.Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

Prof. Dr. Gülhan Baykal
Gülhan Baykal

İSTANBUL, 2004

154204

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	iv
ÖNSÖZ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. JET GROUT SİSTEMİ VE KULLANIMI.....	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Jet Grout Yönteminin Uygulama Alanları.....	5
2.3 Jet Grout Tekniğinde Kullanılan Ekipmanlar.....	8
2.4 Jet Grout Metodunun Yapım Aşamaları.....	10
2.4.1 Delme	10
2.4.2 Enjeksiyon	10
2.5 Başlıca Jet Grout Teknikleri	12
2.6 Uygulama Parametreleri	13
2.6.1 Basınç	13
2.6.2 Dönme ve Çekme Hızı	15
2.6.3 Dozaj.....	15
2.7 Jet Grout Kolonlarının Uygulanması.....	16
2.8 Jet Grout Kolonu Mekanik Özellikleri.....	17
2.9 Jet Grout Kolonlarının Uygulanması.....	20
3. SIVILAŞMA SIVILAŞMA OLASILIĞININ BELİRLENMESİ ve SIVILAŞMA- YI ÖNLEMEDE JET GROUT TEKNİĞİNİN ÖNEMİ.....	22
3.1 Giriş	22
3.2 Sıvılaştırılabilir Zeminler	24
3.2.1 Çakıllar	24
3.2.2 Siltli ve Killi Kumlar	25
3.2.3 Temiz Kumlar	26
3.3 Sıvılaştırmayı Belirleyen Kriterler	26
3.4 Sıvılaştırma Olasılığının Belirlenmesi	27
3.4.1 SPT Yöntemi ile Sıvılaştırma olasılığının Belirlenmesi	27

3.4.2	Deprem Büyüklüğü Bağıntılı Süre Düzeltmesi	31
3.4.3	Efektif Gerilme Düzeltmesi	32
3.4.4	SPT (N_1) ₆₀ Değerinin Hesabı	33
3.4.4.1	Yük Düzeltme Faktörleri (C_N).....	33
3.4.4.2	Enerji Düzeltme Faktörleri (C_E).....	35
3.4.4.3	Tij Uzunluğu Düzeltme Faktörleri (C_R)	37
3.4.4.4	Sondaj Çapı Düzeltme Faktörleri (C_B)	37
3.4.4.5	Numune Alıcı Kılıf İçindeki Düzeltme Faktörleri (C_S)	38
3.5	Türk Deprem Yönetmeliğinde Sıvılaşma (1998)	39

4. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....40

4.1	Giriş	40
4.2	Plaxis Programı	41
4.3	Plaxis'de Birleşik Gerilme-Şekil Değiştirme –Plastik Analiz	41
4.3.1	Gerilme ve Şekil Değiştirme Bileşenlerinin Tanımlanması	42
4.3.2	Gerilme-Şekil Değiştirme Analizi	43
4.3.3	.Sonlu Eleman Formülasyonu	46
4.3.4	Diferansiyel Plastisite Modelinin Belirli İntegrali	49
4.3.5	Global İterasyon Yöntemi	50
4.4	Analizlerde Kullanılan Malzeme Modeli	51
4.4.1	Mohr-Coulomb Modeli	51
4.5	Plaxis'de Dinamik Analiz	53
4.5.1	Dinamik Davranışın Temel Denklemi	54
4.5.2	Zaman İntegrasyonu	55
4.5.2.1	Dalga Hızları	56
4.5.2.2	Kritik Zaman	57
4.5.3	Model Sınırları	57
4.5.3.1	Absorbent Sınırlar	58

5. JET GROUT TEKNİĞİ İLE SIVILAŞMANIN AZALTILMASI 60

5.1	Giriş	60
5.2	Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılan Yazılımla Jet Grout Kolonlarının.....	61
	Modellenmesi.....	61
5.3	Sonlu Elemanlar Modeli	61
5.4	Malzeme Özellikleri	63
5.5	Statik Analiz	65
5.6	Dinamik Analiz	69
5.6.1	Zemin İslahı Öncesi Durum	69
5.6.2	Zemin İslahı Sonrası Durum	73
5.7	Sonuçlar ve Öneriler	89

KAYNAKLAR 90

ÖZGEÇMİŞ 9

SİMGE LİSTESİ

a_{max}	Maksimum yatay yer ivmesi
A_r	Alan yer değiştirme oranı,
A_{jg}	Jet grout kolonu alanı,
A_{zemin}	Jet grout kolonları arasında kalan dikdörtgen bölgenin alanı,
[B]	Deformasyon matrisi
c	Kohezyon
C	Sönüm matrisi
c_{ref}	Plaxis'de kullanılan kohezyon
C_N	Jeolojik yük düzeltme faktörleri
C_E	Enerji düzeltme faktörleri
C_E	Tokmak enerji düzeltme faktörü
C_B	Sondaj çapı düzeltme faktörü
CSR_{Denk}	Denk üniform tekrarlı gerilme oranı
D	JG kolonları çapı , metre
D_{WFM}	Deprem büyüklüğü süre düzeltme katsayısı
E	Elastisite modülü
E_0	Başlangıç rijitlik modülü
E_{50}	Deviatör gerilmenin %50'sine karşılık gelen rijitlik modülü (Secant modülü)
f_{ex}	Dış kuvvet vektörü
f_{in}	İç kuvvet vektörüdür ve üst indis i adım numarasıdır
F	Yük vektörü
F_s	Güvenlik faktörü
G	Kayma mukavemeti
g	Yerçekimi ivmesi
G_{jg}	JG kolonunun kayma modülü
Gr	JG'un kayma modülünün zeminin kayma modülüne oranı
G_z	Zeminin kayma modülü
K	Rijitlik matrisi
k_x	Yatay permeabilite
k_y	Düşey permeabilite
K_w	Suyun kütle modülü
M	Kütle matrisi
n	Zeminin porozitesini
p	V hacmindeki cismin kütle kuvvetleri
p'	Izotropik gerilme
q	Eşdeğer kayma
R	Kayma gerilmesi azaltma katsayısı
r_d	Derinlik azaltma katsayısı
R_{inter}	Arabirim azaltma faktörü
S_1	Jet grout kolonlarının x doğrultusundaki aralık mesafesi, m.
S_2	Jet grout kolonlarının x doğrultusundaki aralık mesafesi, m.
u	Toplam boşluk suyu basıncı
u	Yer değiştirme vektörü
V_p	Basınç dalgası
V_s	Kayma dalga hızını
Δv	Yer değiştirme artımı
$\Delta \epsilon$	Şekil değiştirme artımı belirlenebilir
$\Delta \epsilon_p$	Elastik malzeme davranışı için, plastik şekil değiştirme artımı

$\Delta\sigma$	Gerilme artımları
$\Delta\lambda$	İdeal plastik ve lineer pekleşme modeli için plastik çarpan
Δv	Artımsal yer değıştirme vektörü
α_R, β_R	Rayleigh katsayıları
ϵ^p	Plastik şekil değıştirmelerin
ϕ	İçsel sürtünme açısı
γ	Toplam birim ağırlık
γ_{dry}	Kuru birim hacim ağırlık
γ_{wet}	Doygun birim hacim ağırlık
ν	Poisson oranı
ρ	Malzeme yoğunluğunu
σ	Ortamdaki toplam gerilmeler
σ'	Efektif gerilmeler
σ_v'	Düşey efektif gerilme
σ_v	Düşey gerilme
σ^{tr}	Yardımcı gerilme vektörü
$\tau_{max\text{önce}}$	İyileştirme öncesi oluşan maksimum kayma gerilmesi
$\tau_{max\text{sonra}}$	İyileştirme sonrası oluşan maksimum kayma gerilmesi
ω	Zaman integralinin tipini belirten bir parametredir
ψ	Genleşme açısı

KISALTMA LİSTESİ

İSKİ	İstanbul Su Kanalizasyon İşletmeleri
ÖY	Ön Yıkama
SPT	Standart Penetrasyon Testi
CPT	Konik Penetrasyon Testi
Y.A.S.S	Yer altı Su Seviyesi
JGK	Jet Grout Kolonu



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Jet grout tekniğinin yapım aşamaları (Keller Company, 2001).....	4
Şekil 2.2a-b	Temel altı takviyesinde jet grout uygulaması.....	6
Şekil 2.3a-b	Baraj ve atık sahaların altında geçirimsizlik amaçlı jet grout uygulaması.....	6
Şekil 2.4a	Jet grout uygulamasının tünel boy kesitinde gösterimi	7
Şekil 2.4b	Jet grout uygulamasının tünel en kesitinde	7
Şekil 2.5	Jet grout makinesi	8
Şekil 2.6	Jet grout kolonu imalatında kullanılan ekipmanlardan bazıları	9
Şekil 2.7	İmalat sonrası görsel inceleme amacıyla etrafı kazılan grout kolonu.....	11
Şekil 2.8	Serbest basınç dayanımı-çimento miktarı arası ilişki (Samorf, 1990).	17
Şekil 2.9	Zemin tipine bağlı beklenen kolon çapı	18
Şekil 2.10	SPT vuruş sayısı ile kolon çapı arasındaki ilişki.....	18
Şekil 2.11	Farklı zemin tipleri için jet grout tekniğinin uygulanabilirliği	19
Şekil 2.12	Serbest basınç dayanımının zaman ve numune alma derinliğine göre dağılımı.....	21
Şekil 3.1	Zeminin sıvılaşması sonucu yapılarda ortaya çıkan büyük boyutlu hasara bir örnek (Adapazarı depremi,1999)	23
Şekil 3.2	Sıvılaşmaya neden olan CSR ile $N_{1,60}$ arasındaki ilişki (Youd & Idriss, 1997)	29
Şekil 3.3a	" r_d " değerleri (Seed ve Idriss, 1971).....	30
Şekil 3.3b	" r_d " değerleri (Seed ve Çetin, 2000).....	30
Şekil 3.4	Deprem büyüklüğü ile orantılı süre düzeltme katsayısı	31
Şekil 3.5	Çetin, vd. önerdiği K_σ değerleri ve karşılaştırma için NCEER çalışma grubunca önerilen değerler ($n=0.7$, $D_r=60\%$ için).....	32
Şekil 4.1	Standart drenajlı üç eksenli deneyden E_0 ve E_{50} 'nin tanımlanması	52
Şekil 5.1	Zemin ıslahı öncesi PLAXIS'de oluşturulan sonlu eleman ağı.....	62
Şekil 5.2	Zemin ıslahı sonrası ($S=2.0m$. için) PLAXIS'de oluşturulan sonlu eleman ağı.....	62
Şekil 5.3	Zemin ıslahı öncesi Plaxis'de oluşturulan model.....	67
Şekil 5.4	Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış model ($S=2.0 m$. için).....	67
Şekil 5.5	Statik yükler altında meydana gelen düşey oturma değerleri.....	68
Şekil 5.6	Sıvılaşmaya potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan CSR ile $N_{1,60}$ ilişkisi (Youd & Idriss ,).....	70
Şekil 5.7	Girdi olarak kullanılan ivme değerleri.....	71
Şekil 5.8	Üst tabakanın sıvılaşma potansiyelinin derinlikle değişimi.....	72
Şekil 5.9	Modelde dinamik yükler altında meydana gelen relatif maksimum yatay deplasman değerlerinin zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlarda değişimi.....	77
Şekil 5.10	Farklı S aralığı için A-A' kesitinde görülen kayma gerilmeleri.	78
Şekil 5.11	Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış durumda farklı A_r değerleri	

	için R katsayısının derinlikle değişimi ($G_r=30$ değeri için).....	80
Şekil 5.12	Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış durumda farklı A_r değerleri için R katsayısının derinlikle değişimi ($G_r=15$ değeri için).....	81
Şekil 5.13	$A_r=0,196$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.....	82
Şekil 5.14	$A_r=0,087$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.....	83
Şekil 5.15	$A_r=0,049$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.....	84
Şekil 5.16	CSR azaltım katsayısının A_r katsayısına bağlı değişimi.....	86
Şekil 5.17	Zemin ıslahı sonrası sıvılaşma tahkiki.....	87



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Jet grout parametrelerinin tipik dağılımı 14
Çizelge 2.2	Jet grout konları çekme deneyi sonuçları.....21
Çizelge 3.1	Siltli ve Killi kumların sıvılaştırılabilirliği (Andrews ve Martin, 2000).....25
Çizelge 3.2	Temiz kumlarda sıkılık derecesi, deprem büyüklüğü ve sıvılaşma potansiyeli arasındaki yaklaşık ilişki (Seed ve Idriss, 1971).....26
Çizelge 3.3	Jeolojik yük düzeltme faktörleri (CN).....34
Çizelge 3.4	CE'nin değişim aralığı36
Çizelge 3.5	Tij Uzunluğu düzeltme faktörleri37
Çizelge 3.6	Sondaj çapı ve düzeltme faktörleri (Skempton, 1986).....38
Çizelge 3.7	Kılıf düzeltme faktörleri (Youd ve Idriss, 1997 ; Skempton, 1986).....38
Çizelge 3.8	Türk deprem yönetmeliğine göre zemin grupları39
Çizelge 5. 1	SEM'de kullanılan Üst tabaka zemini..... 64
Çizelge 5. 2	SEM'de kullanılan alt tabaka zemini..... 64
Çizelge 5.3	SEM'de kullanılan jet grout kolonu (JG1)..... 65
Çizelge 5.4	SEM'de kullanılan radye temel in mekanik özellikleri..... 65
Çizelge 5.5	Zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlar için zemin yüzeyinde seçilen A noktasında meydana gelen maksimum yatay ivme (a_{max}) değerlerinin A_r oranına bağlı değişimi..... 74
Çizelge 5.6	Zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlar için emin yüzeyinde seçilen A noktasında meydana gelen maksimum yatay hız değerleri..... 75

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim esnasında beni hep destekleyen sevgili aileme ve bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen başta tez danışmanım Yard. Doç. Dr. Mehmet M. Berilgen olmak üzere tüm dostlarıma teşekkür ederim.



ÖZET

Günümüzde zemin sıvılaşması ülkemizde meydana gelen son depremlerde de (Kocaeli ve Düzce) gözlemlendiği gibi önemli hasarlara neden olan doğal afetlerden biridir. Bundan dolayı olası bir deprem durumunda meydana gelebilecek can ve mal kayıplarının önlenmesi için bu tür zeminlerde iyileştirmeye gidilmelidir.

Bu tez çalışmasında son yıllarda dünyada yaygın olarak kullanılan zemin ıslah yöntemlerinden jet grout tekniği kullanılarak zemin içinde oluşturulan jet grout kolonları sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek zeminin sıvılaşması üzerindeki azaltıcı etkisinin saptanması amaçlanmıştır.

Sıvılaşma özelliği gösteren zemin ve bu zeminde oluşturulan jet grout kolonları sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu olarak modellenmiş ve model sismik bir harekete maruz bırakılmıştır. Bu sismik hareket oluşan kayma gerilmelerinin büyük bir kısmı ara zemin bloklarına göre daha rijit bir yapıya sahip olan jet grout kolonlarında toplanır. Bu yüzden zemin ıslahı sonucu elde edilen kayma gerilmelerinde iyileştirme öncesi duruma göre azalma gözlenir. Elde edilen maksimum kayma gerilmeleri birbirine oranlanarak jet grout aralığı, jet grout çapı ve jet grout dayanımına bağlı kayma gerilmesi azaltım katsayısı (R) elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayı sayesinde jet grout kolonları ile zemin ıslahı sonrası ara zemin bloklarında oluşacak kayma gerilmeleri zemin ıslahı öncesi durumda oluşan kayma gerilmelerinin bir oranı olarak hesaplanabilir.

Anahtar kelimeler: Jet grout tekniği, jet grout kolonu, zemin sıvılaşma, zemin ıslahı

ABSTRACT

In view of today' earthquakes (Kocaeli and Düzce), one of the most important cause of collapse is soil liquefaction. So that liquefiable soil should be improved to prevent this structural and unstructural damage in the earthquake condition.

In this study jet grout columns which are produced by jet grouting method, were modelled to calculate the reduction effect on liquefaction by finite element method.

The soil that have potential of liquefaction and jet grout columns were modelled by means of finite element method. The produced models were exposed to the seismic movement. Due to this seismic movement, the generated shear stresses are accumulated on jet grout columns since they are stiffer than the surrounding ground. So that the decrease in maximum shear stresses are established when we used jet grout columns. These calculated maximum shear stresses for two cases were estimated to ech others and shear stress changing coefficient (R) was obtained due to diameter, spacing and the strenght of the jet grout columns. Using this coefficient maximum shear stresses in soil between jet grout columns are calculated due to the obtained maximum shear stresses from the unimprovement model.

Keywords: Jet grout technique, jet grout column, soil liquefaction, soil improvement



1. GİRİŞ

Günümüzde meydana gelen depremlerde oluşan can ve mal kayıplarının çoğunun yapının yapısal kusurlarının yanında üzerine inşaa edildiği zeminin özelliklerinin iyi bilinmemesinden kaynaklanır.

Son olarak ülkemizde meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinde de olduğu gibi yapısal hasarların önemli etkenlerinden biri de sıvılaşmadır. Sıvılaşma sonucu taşıma gücünü yitiren zemin, zemin içindeki hafif boru hattı gibi yapıların zemin yüzeyine çıkmasına ve zemin üstündeki ağır yapıların ise zemine gömülmesine, yanal deplasman yapmasına veya devrilmesine neden olmaktadır (Kramer, 1996).

Sıvılaşma sonucu oluşan can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi için bu tür zeminlerde iyileşmeye gidilmelidir. Bu iyileştirme yöntemlerinden biri de jet grout metodunun sıvılaşma olasılığı yüksek olan zemin tabakalarında uygulanmasıdır. Jet grout kolonların ülkemizde kullanımına 1988 yılında İSKİ Atıksu Derin Tünelleri Projesi ile başlanmış olup 1998 yılından itibaren bu kullanım, yüksek kapasiteli ekipmanların devreye girmesi ile birlikte yaygınlaşmıştır (Sağlamer A, 2000).

Jet grout tekniğinin sıvılaşma olasılığı yüksek zemin gruplarında kullanılması ile zemin içinde oluşturulan zemine göre daha yüksek mukavemete sahip jet grout kolonları, oluşturuldukları bölgede sıvılaşma riskini sıfıra indirirken sismik bir hareket sonucu (örneğin deprem) aralarında kalan zemin bloğunda oluşacak maksimum kayma gerilmelerinde azalmaya neden olarak zeminin sıvılaşma riskini düşürür. Sismik bir hareket sonucu jet grout kolonları arasında kalan zemin bloğunda oluşacak maksimum kayma gerilmelerinin değerinin azalmasının sebebi, bu kayma gerilmelerinin zemin bloğuna göre daha rijit olan jet grout kolonları üzerinde toplanacağı düşüncesidir. İşte bu nedenden dolayı oluşan kayma gerilmeleri öncelikli olarak bu sert jet grout kolonlarını ve daha sonra ise onların etrafındaki zemini yıkmaya çalışacaktır. Şu çok açıktır ki, zemin içinde yer alan jet grout kolonları depremden dolayı oluşacak kayma gerilmelerine karşı koyabilecek kayma direncine sahiptirler.

Kayma gerilmeleri dağılımındaki bu kabul yapı mekaniğindeki kabule çok benzer ve bu kabule göre yapısal çerçeve sistemlerinde oluşan maksimum momentler sistem içinde diğer elemanlara göre daha yüksek rijitliğe sahip olan elemanlarda toplanır.

Bu çalışmada jet grout tekniğinin sıvılaşma olasılığı yüksek zemin gruplarında kullanılması ile zemin ıslahı öncesinde zeminde sıvılaşmaya neden olacak sismik bir hareketin, zemin ıslahı yapıldıktan sonra (Jet grout tekniği ile) zemin içinde oluşturulan jet grout kolonlarının zeminin sıvılaşma olasılığı üzerindeki azaltıcı etkisini saptamak amacı ile nümerik analizler yapılmıştır.

Nümerik analizlerde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 7.2'den yararlanılmıştır. Statik analizlerde zeminin iyileştirme öncesi yaptığı oturmalarla jet grout kolonları belli aralıklara göre zemin içinde oluşturulduğu durumda yaptığı oturmalar hesaplanıp birbiri ile karşılaştırılmışlardır. Dinamik analizlerde ise sismik bir yük altında jet grout kolonlarının sıvılaşma potansiyelini önlemedeki katkısı belirlenmiş ve yapılan çalışmalar Bölüm 5'te detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca çalışma içinde farklı bölümlerde sıvılaşma, zeminin sıvılaşma olasılığının belirlenmesi, jet grout tekniği ve uygulaması hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2. JET GROUT TEKNİĞİ VE KULLANIMI

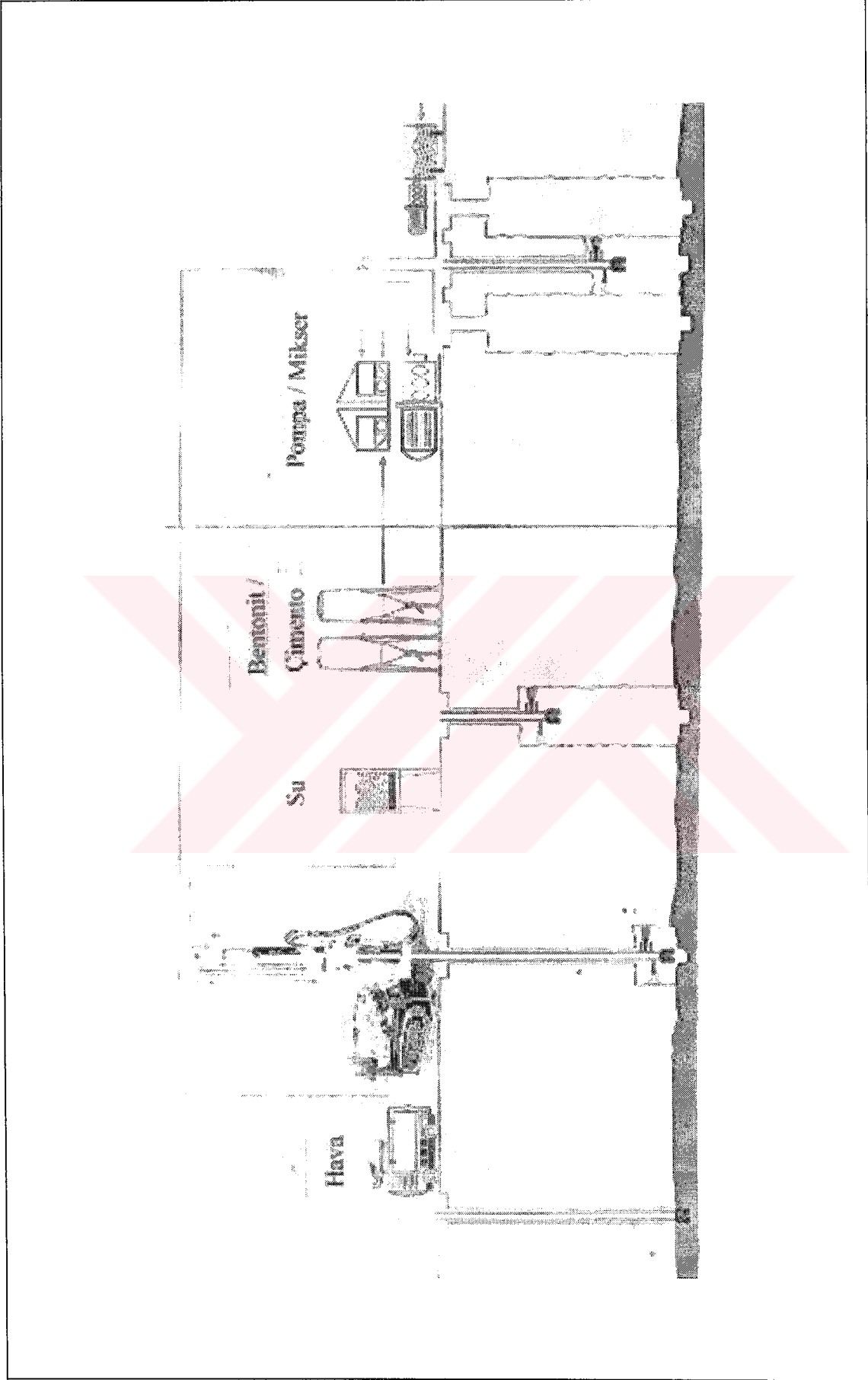
2.1 Giriş

Jet grout tekniği, delgi ve yüksek basınç ile zemin içinde yüksek mukavemete sahip zemin-çimento kolonları oluşturma amaçlı zemin iyileştirmelerinde kullanılan modern iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Jet grout yönteminde iyileştirme yapılacak derinliğe kadar delgi yapılması, bu derinliğe ulaşıldığında enjeksiyon meme/memelerinden (nozlle/s) yüksek basınç değerleri ile zemine grout karışımı (su-stabilize malzeme (çimento) şerbeti) püskürtülmesi ile zemin içinde jet grout kolonları oluşur. Püskürtme işlemine başlandığı andan itibaren dönme hareketiyle eş zamanlı yukarı çekme hareketine (tijen yukarı çekilmesi) geçilir. Bu işlem iyileştirmenin bittiği derinliğe kadar yapılır ve sonuçta ortaya uygulanan bölgede dairesel zemin-çimento kolonları oluşur. Böylelikle önceden belirlediğimiz karakteristik özelliklere sahip homojen ve sürekli yapısal elemanlar meydana gelir. Bütün bu yapım aşamamaları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Bugün kullanılan şekline 20. yüz yılın ortalarında İtalya'da başlayan çalışmalar sonucunda kavuşan jet grout tekniğinin ülkemizdeki kullanımına 1988 yılında İSKİ Atıksu Derin Tünelleri Projesi ile başlanmış olup 1998 yılından itibaren bu kullanım, yüksek kapasiteli ekipmanların devreye girmesi ile birlikte yaygınlaşmıştır (Sağlamer A, 2000).

Önceleri jet grout tekniğinin sadece granüler zeminlerde kullanılabilieceğine inanılırdı, fakat teknolojik işlemlerin gelişmesiyle birlikte bu tekniğin ince daneli zeminlerde granüler zeminlere göre daha tatminkar sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



Şekil 2.1 Jet grouting tekniğinin yapım aşamaları
(Keller Company, 2001)

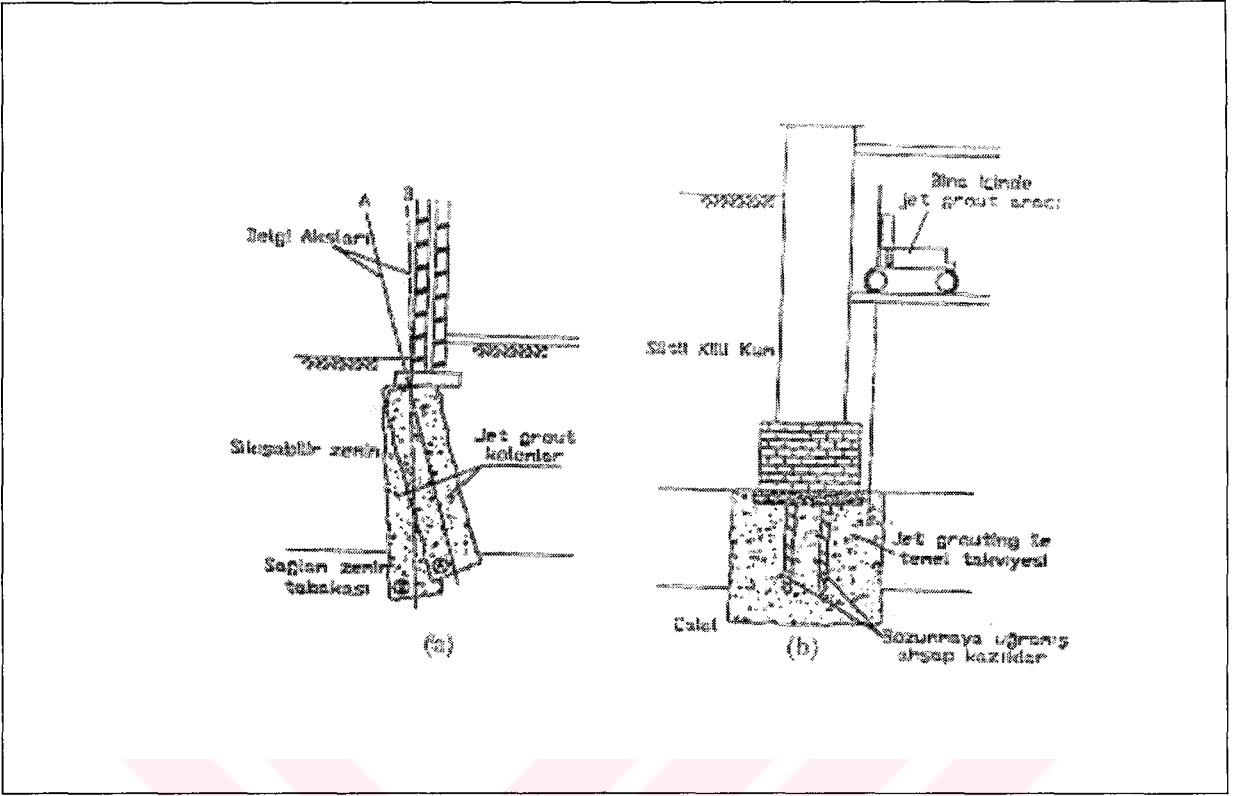
2.2 Jet Grout Yönteminin Uygulama Alanları

Jet grout tekniği zemin içinde yüksek mukavemetli zemin-çimento kolonları elde etmek suretiyle zeminin taşıma dayanımında artış ve permeabilitesinde bir düşüş meydana getirir. Birbiriyle kesişen jet grout kolonları imalatı ile zemin içinde geçirimsiz perdelerin oluşturulması da bu metodun önemli avantajlarındanır.

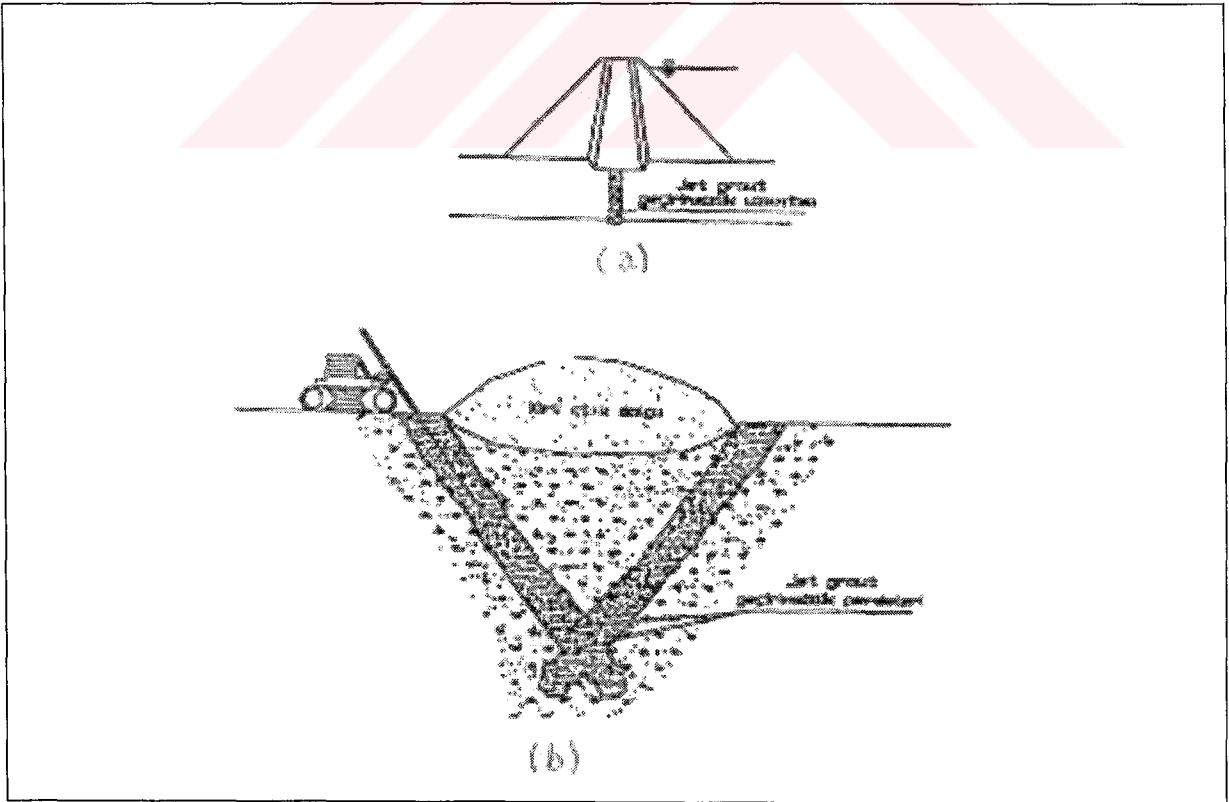
Jet grout tekniğinin genel uygulama alanları:

- Yeni yapılacak veya mevcut yapılar altında yer alan temel zemininin iyileştirilmesi,
- Taşıma elemanları olarak,
- Kazı desteklenmesi ve stabilizasyonu,
- Şev ve heyelan stabilizasyonunu,
- Tünel ve shaft inşaatları kazı desteklenmesi,
- Atık sahaların geçirimsizliğinin sağlanması,

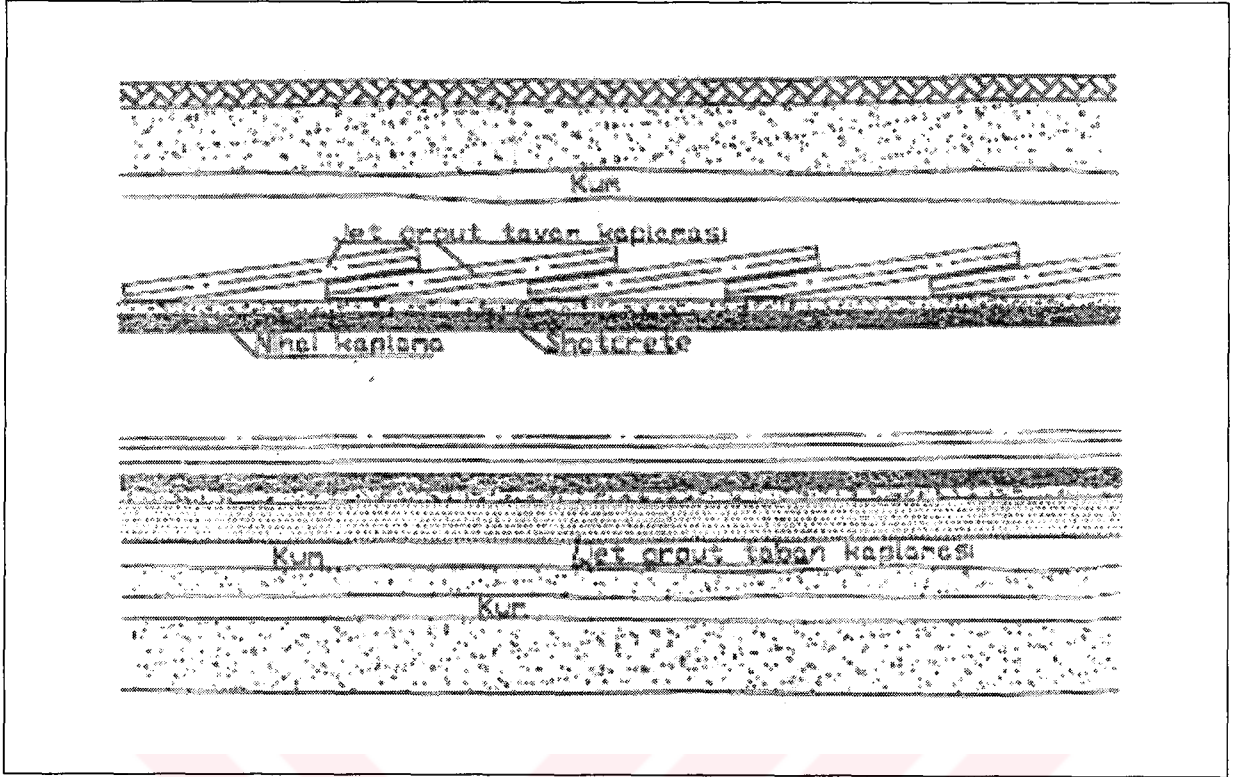
Yer altı suyu kontrolü amaçlı jet grout uygulamaları , geçici kazılarda sızıntı sularının minimizasyonu baraj gövdeleri altında oluşturulan kalıcı geçirimsizlik perdeleri oluşturulmasına kadar çeşitlilik gösterir. Jet grout teknik kullanım alanlarının bazıları Şekil 2.2.a-b , Şekil 2.3.a-b ve Şekil 2.4.a-b'de gösterilmiştir.



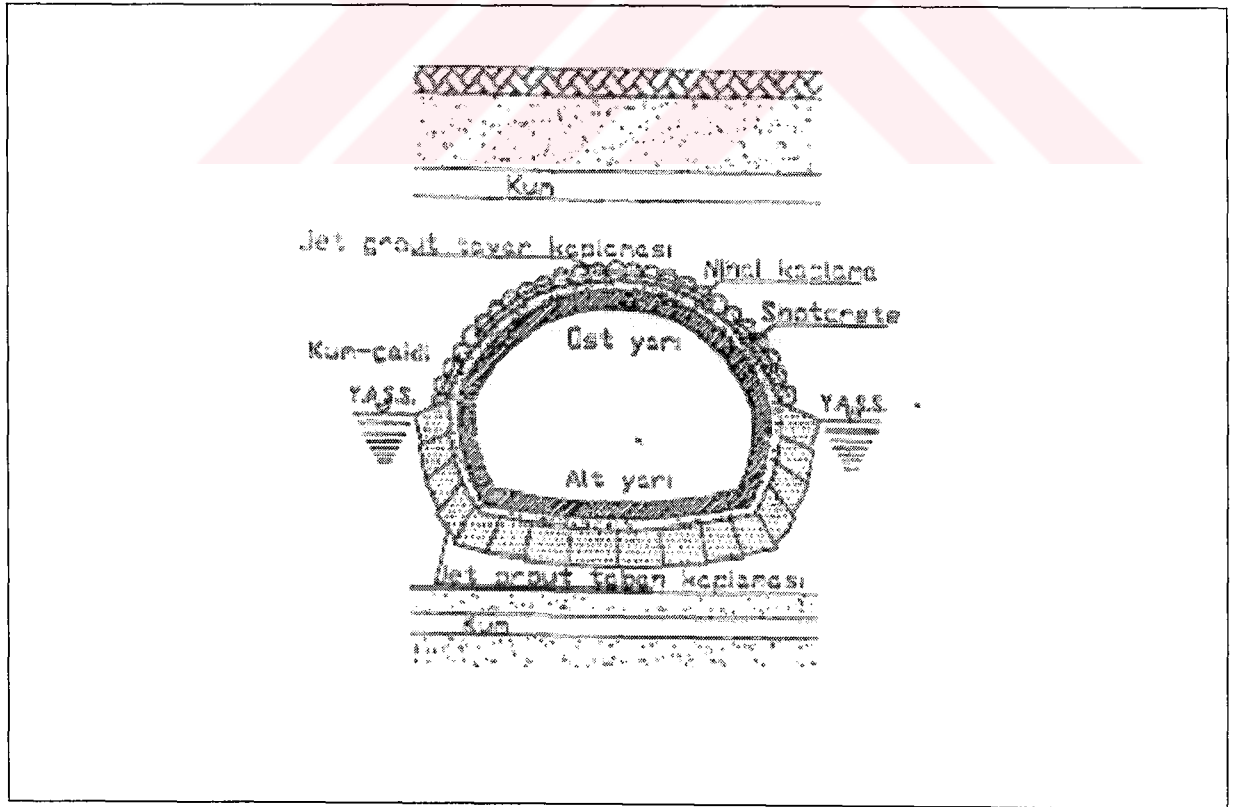
Şekil 2.2.a ve b Temel altı takviyesinde jet grout uygulaması.



Şekil 2.3.a ve b Baraj ve atık sahaları altında geçirimsizlik amaçlı jet grout uygulaması.



Şekil 2.4.a Jet grout uygulamasının tünel boy kesitinde gösterimi.



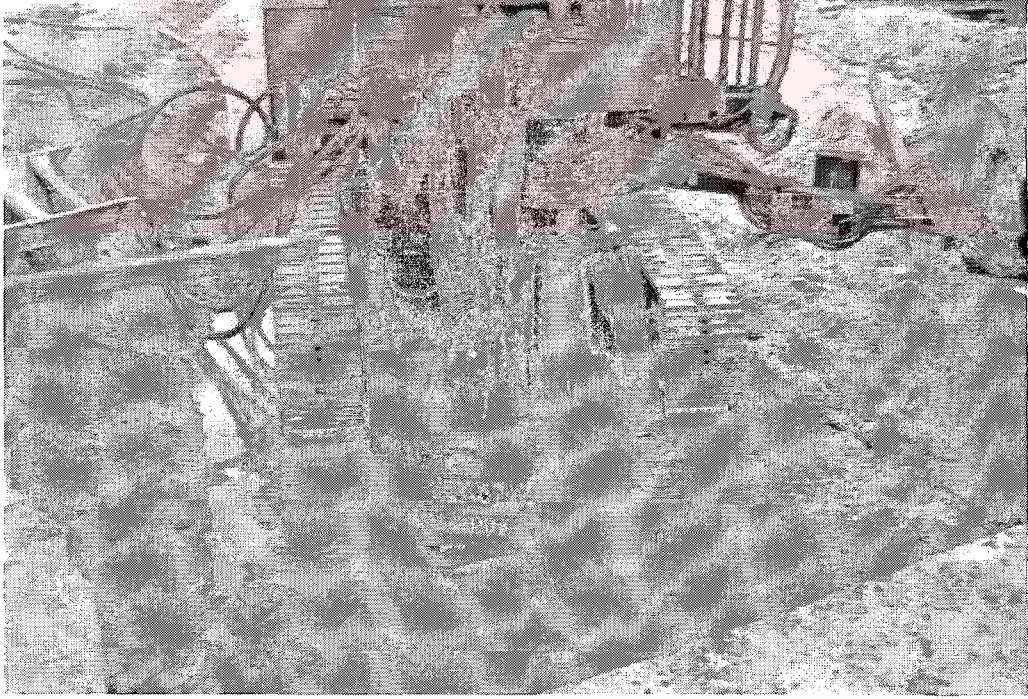
Şekil 2.4.b Jet grout uygulamasının tünel en kesitinde gösterimi.

2.3 Jet Grout Tekniğinde Kullanılan Ekipmanlar

Jet grout uygulamalarında gereken ekipmanlar ve araçlar aşağıda yer almaktadır.

- Santral (Mikser, dinlendirici ve kumanda odasından oluşur.),
- Pompa (Santralden buraya aktarılan stabilize malzemeyi yüksek basınçlarda basabilecek pompa ve bunun motor aksamından oluşur.) (Şekil 2.6.a),
- Delgi makinesi (Şekil 2.5),
- Su pompası (Şekil 2.6.b),
- Çimento silosu.

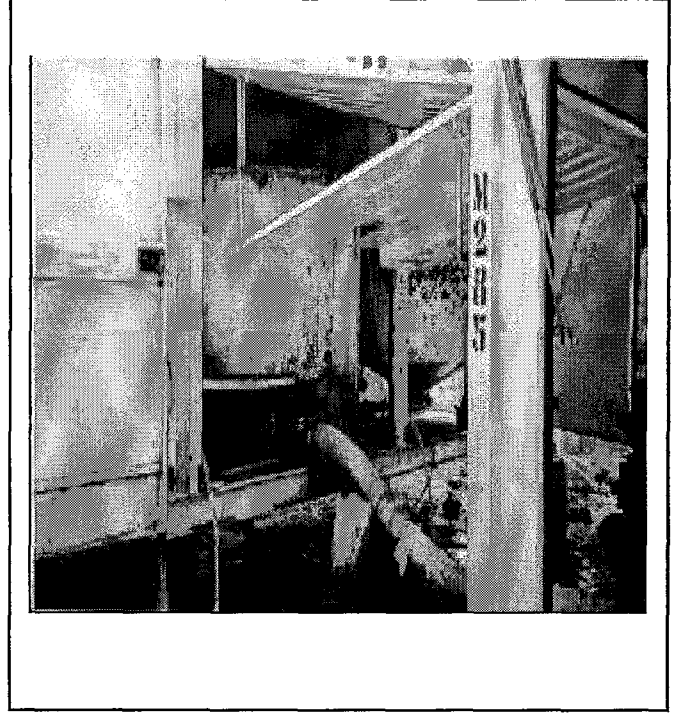
yukarıda bahsedilen ve jet grout tekniğinde kullanılan araçlar ve ekipmanlar Şekil 2.1, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



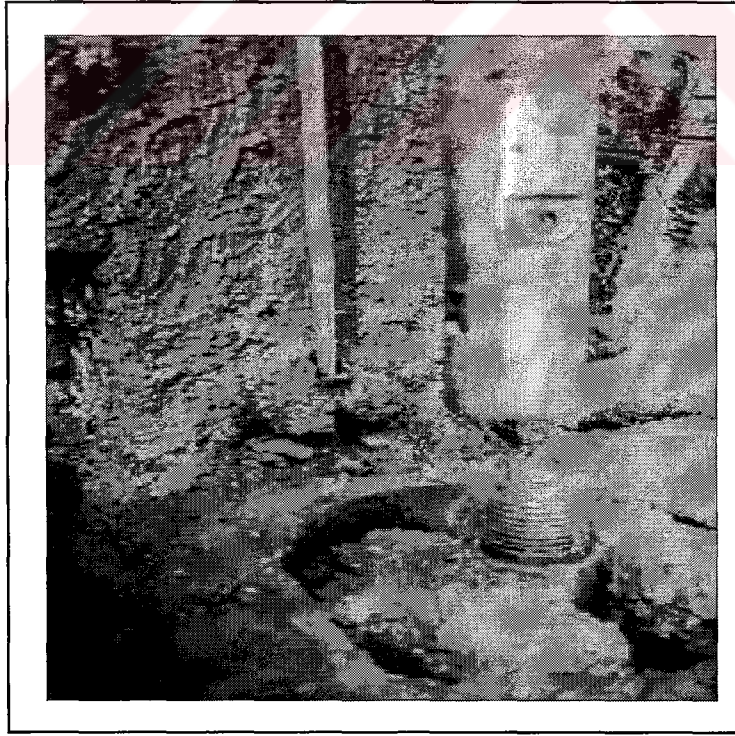
Şekil 2.5 Jet grout makinesi



(a) Jet grout pompa ünitesi



(b) Jet grout mikser ünitesi



Şekil 2.6 Jet grout kolonu imalatında kullanılan ekipmanlardan bazıları.

2.4 Jet Grout Metodunun Yapım Aşamaları

2.4.1 Delme

Delme işlemi geleneksel sondaj metodlarına benzer, bu metodlar sadece dönme veya dönme-vuruş şeklinde olur. Delme işlemi sırasında hiçbir karışım kullanılmayacağı gibi su, hava, bentonit veya bunların karışımları kullanılır. Son yıllarda yapılan uygulamalarda delici çubuk (tij) olarak kullanılacak malzemeler aynı zamanda yüksek basınçta enjeksiyon yapacak şekilde kullanıldıklarından 50-60 Mpa basınca dayanabilecek şekilde tasarlanırlar.

2.4.2 Enjeksiyon

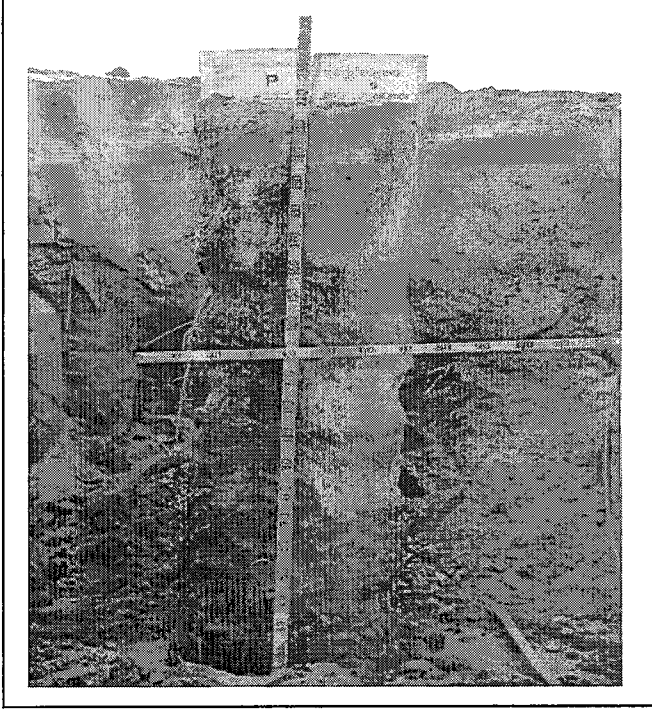
Planlanan derinliğe ulaşıldığında “monitör” adı verilen özel araçların üzerine yerleştirilen küçük çaplı enjeksiyon meme/memelerinden (nozzle/s) yüksek basınçta enjeksiyon karışımı (grout) püskürtülür (Şekil 2.6). Burada yüksek hızla çıkan enjeksiyon karışımı zemini parçalar ve zeminle grout birbirine karışır ve ortaya konsolide olmuş zemin kolonu ortaya çıkar . Bu yolla doğal zeminin mekanik özellikleri iyileştirilebilir.

Dönme açısı, hızı ve tijin kaldırma zamanı değiştirilerek çok çeşitli özelliklere sahip konsolide olmuş jet grout kolonları elde edilir. Tijin 360° lik dönüşüyle eş zamanlı tijin yukarı doğru çekilmesiyle silindirik kolonlar elde edilir (Şekil 2.7).

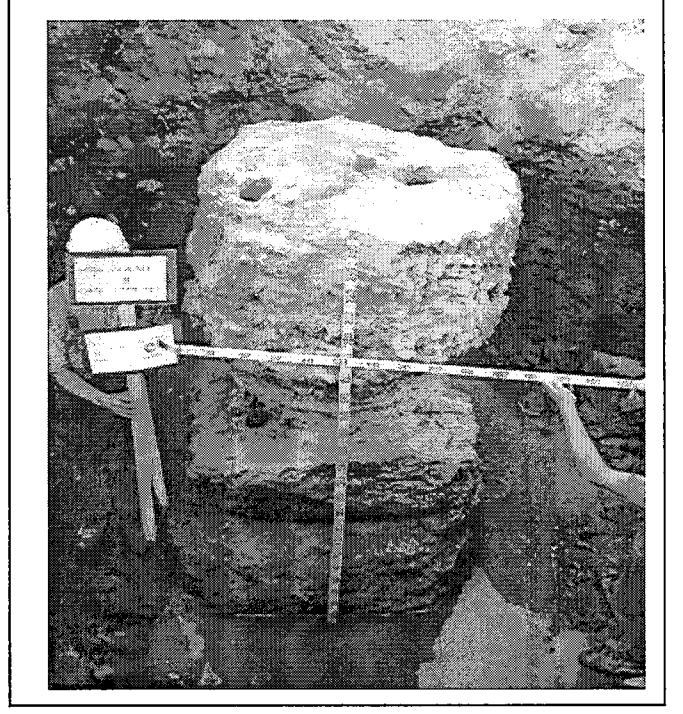
Elde edilen elemanların boyutları zemin tipine ve seçilen operasyon parametrelerine (tijin dönme hızı, çekim hızı, kullanılan enjeksiyon memelerinin çapı ve adeti, enjeksiyonun akış hızı ve basınca) bağlıdır.

Enjeksiyon sırasında tijle açılan delik arasından akışkanın çıkmasının gözlenmesi önerilir. Dışarı sürekli malzeme akışı; enjeksiyon uygulanan zemin açısından aşırı basınç artışı almadığı anlamına gelir. Zemindeki bu aşırı basınç artışı zeminde göçme ve dolayısıyla kabarmalara neden olur. Bu durum yüzünden kolonların sürekliliği tehlikeye girer ve daha önceden yapılmış yapılarda da yapısal problemlere neden olur.

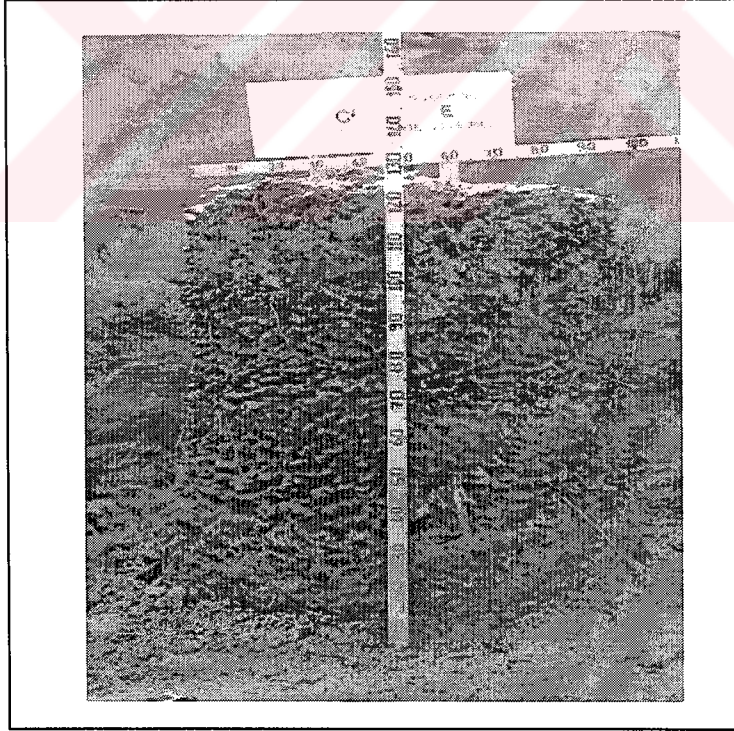
Dışarı atılan malzemenin hacmi jet grout uygulanan zeminin tipine ve porozitesine bağlıdır. Bu hacim killi zeminlerde fazla iken çakıllı zeminlerde azalır ve ortalama olarak enjeksiyon hacminin %10' kadardır.



(a)



(b)



Şekil 2.7 İmalat sonrası görsel inceleme amacıyla etrafı kazılan jet grout kolonları.

2.5 Başlıca Jet Grout Teknikleri

Jet grout tekniği kontrollü miktarda ve dozajda çimentonun çeşitli enjeksiyon metodları ile zemine enjekte elde edilmesi olarak nitelenir ve aşağıda belirtildiği şekilde adlandırılırlar.

➤ Jet 1 (Tekli Akışkan Sistemi) :

Bu metod en basit ve en yaygın jet metodlarından biridir. 20. yüz yılın başlarında Japonya'da başlayan bu metod günümüzde şu an bizim bildiğimiz şeklini 20. yüz yılın ortalarında İtalya'da geliştirilerek aldı.

Delme ve enjeksiyon adımlarının tek bir ticide meydana gelmesiyle gerçekleşir. Zemine enjekte edilen grout (çimento şerbeti) 30 ile 60 Mpa arasında değişen bir basınçla enjeksiyon memelerinden dışarı çıkar. Bu metodla elde edilen zemin-çimento kolonlarının çapları uygulanan zemin tipine ve kullanılan işlem parametrelerine (çekme hızı, dönme hız, enjeksiyon basıncı vb.) bağlı olarak killi zeminlerde yaklaşık 600-800 mm arasında değişirken bu değerler çakıllarda 1000 mm'ye kadar varabilir.

➤ Jet 2 (Çiftli Akışkan Sistemi) :

Bu sistemde Jet1 sistemine ek olarak erozyon (aşındırma) kabiliyetinin artırılması için 0.8-1.2 Mpa arasında değişen basınçlı hava enjeksiyon memelerinden püskürtülür. Bu teknikte enjeksiyon karışımının (çimento şerbetinin) enjeksiyon meme/memelerinden çıkış hızı 100 m/san'dir.

Jet 2 tekniği Jet1'le kıyaslandığında elde edilen kolon çaplarında 60 ile 80 % arasında değişen bir artış gözlenir. Bu sistem kohezyonlu zeminlerde tekli akışkan sistemine göre daha etkilidir.

Bu yöntemin kullanıldığı yerler panel duvarları, geçirimsiz perdeler, yapı temelleri ile granüler zeminlerde büyük çaplı kolonlarla sıvılaşma engelleyici sistemler olarak kullanılırlar.

➤ **Jet 3 (Üçlü Akışkan Sistemi) :**

Bu sistemde öncelikle 40-60 Mpa basınçlı su ile birlikte 0.8-1.2 Mpa basınçlı hava enjeksiyon meme/memelerinden çıkarak zeminin aşındırılması sağlanır. Zemine enjekte edilecek çimento-su karışımı ise suyun çıktığı enjeksiyon memelerinin aşağısına yerleştirilen başka bir enjeksiyon memesinden 3-8 Mpa basınçla zemine püskürtülür. Bu metotla elde edilen zemin-çimento kolonlarının çapları 2 m'ye varabilmektedir.

2.6 İşletim Parametreleri

Uygulama parametrelerinin seçimi ; kolon çapına, taşıma kapasitesi ihtiyacına ve uygulanacak metoda bağlıdır.

2.6.1 Basınç

Jet grout uygulamalarında çimento şerbetinin enjeksiyon memelerinden çıkış basıncına göre sınıflandırılması aşağıda belirtilen şekilde yapılır.

- Düşük basınçlı : Basınç 20-25 Mpa civarındadır.
- Orta basınçlı : Basınç 30-40 Mpa civarındadır.
- Yüksek basınçlı : Basınç 40-70 Mpa civarındadır.

Çeşitli jet grout metotları için enjeksiyon basınç değerleri ve diğer parametreler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

İhtiyaç duyulan çapta kolonlar elde etmede uygulanan basınç en önemli parametredir. Elde edilecek kolonun çapı ile uygulanan basınç arasında direkt bir bağlantı vardır. Daha yüksek basınçlarda daha büyük çaplı kolonlar elde edilir. Buradan Yüksek basınç her zaman iyidir anlamı çıkarılmamalıdır. Sadece basınçtaki artışla büyük çaplı kolonlar elde edilebilir ama birim alana düşen çimento miktarını azalttığından üretilen kolonlar çok düşük mukavemet gösterirler. Bunun yanında yüksek basınç kullanılması sırasında elde edilen kolonlarda çapın jet grout kolonu boyunca homojen olmaması gibi durumlarla da karşılaşılabilir.

Çizelge 2.1 Jet grout parametrelerinin tipik dağılımı.

JET-GROUT PARAMETRELERİNİN TİPİK DAĞILIMI

"Jet-Grouting" Parametreleri		"Jet-Grouting" Sistemleri		
		Jet-1	Jet-2	Jet-3
Enjeksiyon Basıncı				
Su	(Mpa)	ÖY(20-30)	ÖY(20-30)	30-50
Grout(Çimento-su karışımı)	(Mpa)	30-60	30-60	40-60
Basınçlı Hava	(Mpa)	Kullanılmaz	0.8—1.2	0.8—1.2
Enjeksiyon Memesi Çapları				
Su	(mm.)	ÖY(1.6-2.4)	ÖY(1.6-2.4)	1.8-2.5
Grout(Çimento-su karışımı)	(mm.)	1.6-3.0	2.0-4.0	6.5-6.0
Tijin Dönme Hızı				
	(rpm)	10—30	10—30	10—30
Tijin Her Adım (4 cm.) Çekme Süresi				
	(saniye)	8—15	10—20	15—25
Kolon Çapı				
Çakıllı/Kumlu Zemin	(m.)	0.6-1.0	1.0-2.0	1.5-2.5
Killi Zemin	(m.)	0.5-1.0	1.0-1.5	1.0-2.0
Su / Çimento Oranı S:Ç				
	den	0.8 : 1.0	e	2 : 1
Çimento Tüketimi				
İyileşme Yapılan Zeminin Her Hacmi İçin	(kg/m ³)	400-800	400-800	400-800
Jet Grout Kolonu Dayanımı				
Çakıllı/Kumlu Zemin	(Mpa)	10-30	7.5-25	7.5-20
Killi Zemin	(Mpa)	1.5-10	1.5-8.5	1.5-7.5

Notlar : ÖY= Ön yıkama

2.6.2 Dönme ve Çekme Hızı

Uygulanan katkının (çimento) zeminle etkili bir biçimde karışabilmesi için tijin dönüş hızı oldukça yavaş olmalı ve çekme hızı ise jetin uygulanan zeminde homojen bir karışım edilmesini sağlayacak bir hızda tutulmalıdır. Dönme hızı genellikle 10-20 rpm (dev./dak.) arasında olmakla beraber nadiren 30 rpm'e kadar çıkarılabilir. Tijin çekme adımları 2 ile 8 cm arasında değişse de sahadaki uygulamalar 4 cm'nin en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir.

Çekim zamanı zeminin tipine ve karışımın miktarına bağlıdır. Kohezyonlu zeminlerde genellikle zeminle katkının (çimento şerbeti) uygun karışımı oluşturması ve jetin etkin bir şekilde yerine getirebilmesi için daha uzun sürelere ihtiyaç vardır.

Dönme ve çekme hızı uygulanacak jet tipine bağlıdır. Bu da jet uygulanacak zeminin hacmi ile doğrudan ilişkilidir. Jet-2 ve jet-3'ün uygulama zamanları jet-1'le kıyaslandığında daha uzundur bunun nedeni ise çaptaki artışa bağlı olarak iyileştirilecek zemindeki hacim artışından kaynaklanmaktadır.

2.6.3 Dozaj

Katkı olarak kullanılacak çimento şerbetinde standart su/çimento oranı (s/ç) 1'dir. Bu karışımın özgül ağırlığı ise 1410-1570 kg/m³ arasında değişir. Bu karışım oranı çeşitli parametrelere bağlıdır.

Bunlar :

- Uygulanan metod,
- İhtiyaç duyulan iyileştirme tipi,
- Kolonlarda istenilen son dayanım.

Su/Çimento oranı genellikle 0.7'den daha küçük olacak şekilde uygulanmamakla beraber su geçirmezlik perdeleri yapımında bentonit kullanıldığında 0.7'den daha küçük değerlerin kullanıldığı görülür. İyileştirme uygulanan zeminin her m³'ü için kullanılan çimento miktarı 350-700 kg/m³ arasında değişir. Ortalama değer olarak uygulamalar da bu değer 450 kg/m³ olarak alınabilir.

Bu enjeksiyon karışımlarına farklı amaçlarla ilave maddeler eklenebilir. Örneğin, yer altı su akışının yüksek olduğu durumlarda 1-3 % arasında sodyum silikat ilavesi önerilir.

2.7 Jet Grout Kolonlarının Uygulanması

Jet grout tekniğinin başarısı uygulama parametrelerinin dikkatle seçimine bağlıdır. Bu parametrelerin bazılarını önceki paragraflarda değinilmiştir. Uygulanacak basınç değeri ve enjeksiyon zamanı metodun uygulanacağı zeminin tipine ve dayanım özelliklerine göre de çeşitlilik gösterir.

Aşağıda bazı zemin tipleri için bu uygulamaların nasıl yapılacağına kısaca değinilmiştir.

➤ İnce Daneli Zeminlerde :

İnce daneli zeminlerde düzenli kolonlar elde etmek için küçük çaplı enjeksiyon memeleri kullanılır. Kullanılan bu enjeksiyon memeleri en çok 2 adet olup bunların çaplarının 1.6-2.0 mm arasında değişmesi önerilir. Bu zemin tipinde uygulanacak en yüksek basınç 50-60 Mpa civarında olup zeminde kabarmalara neden olmayacak seviyede tutulmalıdır. Çünkü kil zeminlerde bu olaya çok sık rastlanır.

Uygulamanın zor olduğu durumlarda sadece bir tane enjeksiyon memesi kullanılması daha uygundur böylece yüksek basınçtaki enerji kaybı kontrol altına alınmış olur. Bu tür zeminlerde 25-30 Mpa basınçlı su ile ön yıkama yapılması önerilir.

➤ Granüler:

Granüler zeminlerde operasyon parametreleri killi zeminlerdeki parametrelerdekilerden farklıdır. Enjeksiyon basıncı değerleri 40-50 Mpa arasında değişirken enjeksiyon memelerinin çapları 2.5-3.0 mm arasında değişir. Buda daha büyük miktarlarda karışımın zemine enjekte edilmesine neden olur.

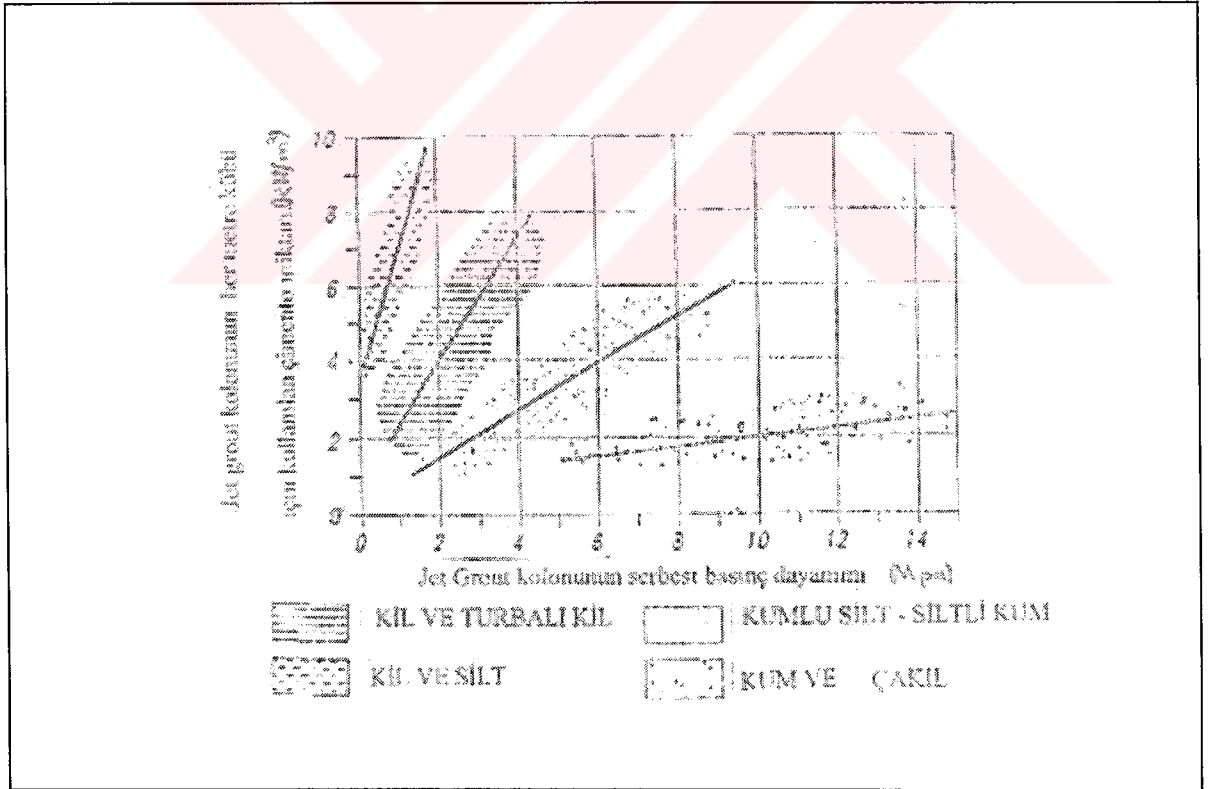
2.8 Jet Grout Kolonu Mekanik Özellikleri

Jet grout kolonlarının mekanik özellikleri genellikle bu kolonlardan alınan karotlar üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı testleri ve/veya jet grout kolonlarında gerçekleştirilen aksenal çekme deneyleri ile tespit edilir. Bununla birlikte farklı zemin tipleri için zeminin metre küpüne düşen çimento miktarına karşı serbest basınç dayanımı değerleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

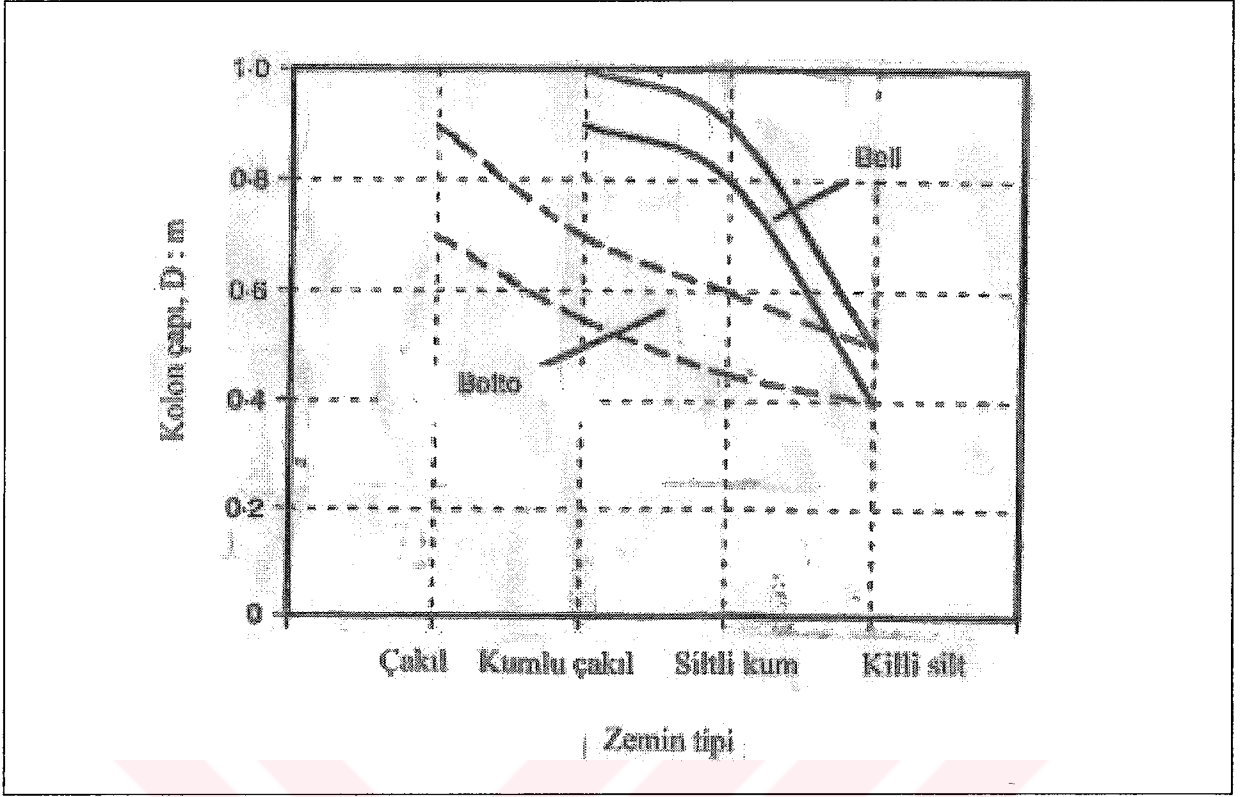
Şekil 2.9’da Bell’e (1993) göre zeminin türüne göre oluşacak jet grout kolon çapları arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Şekil 2.10’da ise Miki ve Nakanishi (1984) tarafından daha önce yapılan benzer çalışmaları da gösteren SPT N – D (Jet grout kolon çapı) ilişkisi verilmiştir.

Bunlara ek olarak Keller Company (2001) tarafından geliştirilen farklı jet grout teknikleri için pratikte kullanılacak uygulama limitleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



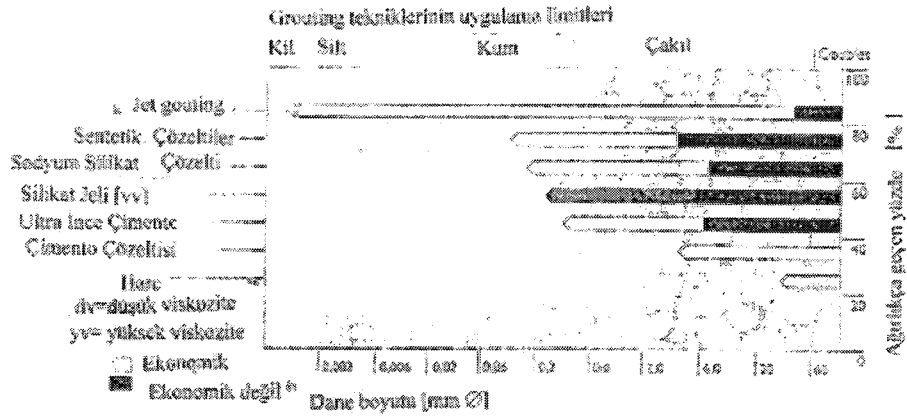
Şekil 2.8 Serbest basınç dayanımı-çimento miktarı arası ilişki (Samorf,1990).



Şekil 2.9 Zemin tipine bağlı beklenen kolon çapı (Bell,1993).

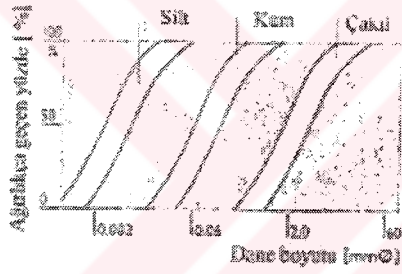


Şekil 2.10 SPT vuruş sayısı ile kolon çapı arasındaki bağıntı (Miki&Nakanishi,1984).

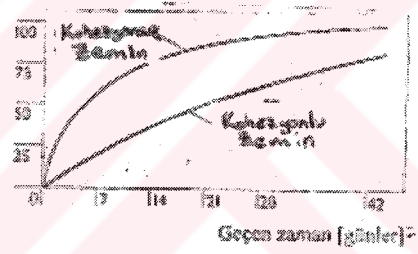


Zemin tipine bağlı oluşturalar:

Jet grout kolonunun basıncı



Jet grout kolonunun zemin tipine ve zamana bağlı basınç dayanımı artışı



Zemin tipi	Silt	Kum	Çakıl
Basıncı [MPa]	≤ 5	≤ 10	< 25
Zaman [günler]			

Şekil 2.11 Farklı zemin tipleri için jet grout tekniğinin uygulanabilirliği (Keller Company,2001)

2.9 Kalite Kontrol Testleri

Uygulamaya geçilmeden önce farklı imalat parametreleri kullanılarak deneme kolonları yapılır ve bu kolonların çapları çevre kazısı yapılarak yerinde gözlenir. Bulgular ışığında gerekiyorsa uygulama parametreleri revize edilerek hedeflenen kolon çaplarını temin edecek parametreler tespit edilir. Bu şekilde yeterli çap sağlandıktan sonra çeşitli testler yapılarak jet grout kolonlarının mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Bunlar :

➤ Çekme deneyi :

Çekme deneyleri ile jet grout kolonların proje yükü ve emniyetli taşıma yükündeki elastik ve plastik deformasyonlar belirlenir . Jet grout kolonlarının çevre sürtünmesiyle taşıdığı yükü tespit etmek için çekme deneyleri yapılır. Basınç deneylerinde kolonların çevre sürtünmesiyle taşıdığı yük yanında uç mukavemetinden gelen yükün etkisi de olduğu için jet grout kolonlarının emniyetle taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yeterlidir.

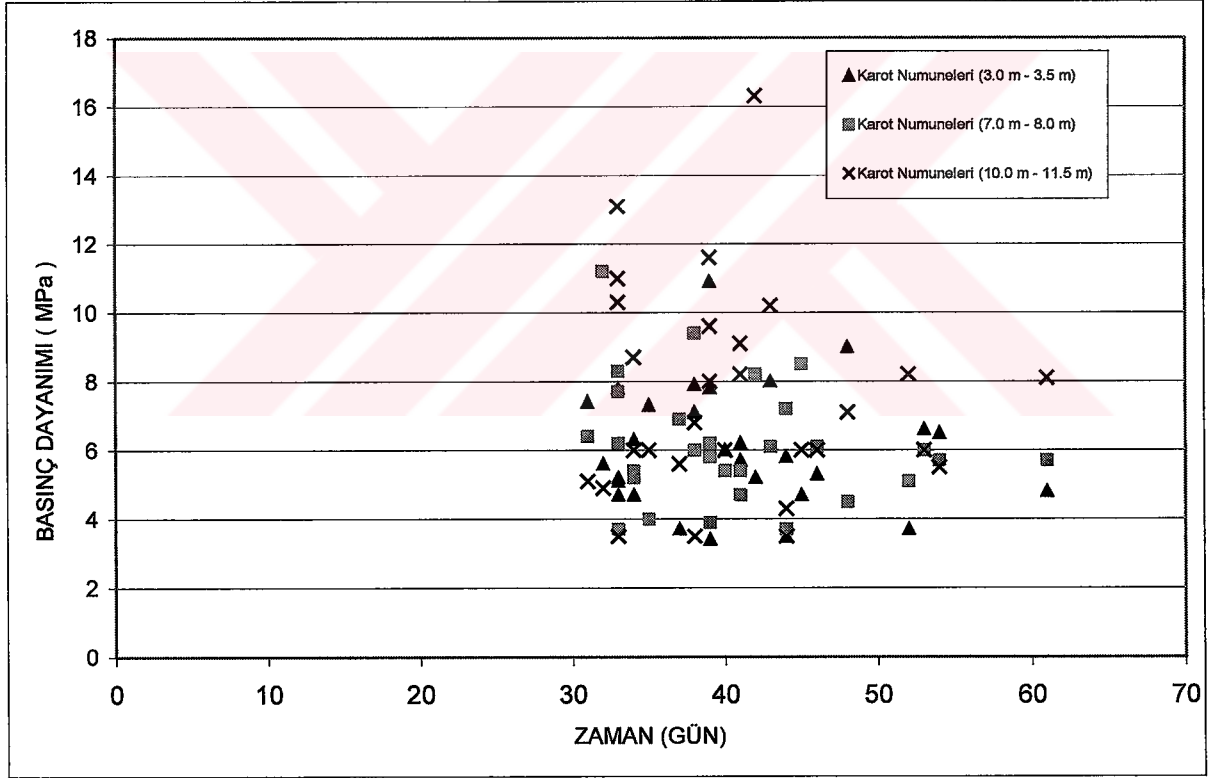
Çizelge 2.2’de Gebze, Aliğa ve Afşin/Elbistan B Termik Santrallerinde yapılan jet grout kolonlarından bazıları üzerinde yapılan çekme deneylerinden elde edilen çekme yükü-jet grout kolonu yer değiştirmesi değerlerinden hareketle Mazurkiewiez ve Corps of Engineers Yöntemleriyle belirlenmiş sıyırılma yükü değerleri yer alır (Sağlamer A, 2000).

➤ Serbest Basınç Testi :

Test kolonlarından sürekli karot alınır ve bu karotlar laboratuvarında tek eksenli basınç testine tabi tutularak malzeme mukavemetinin yeterliliği doğrulanır. Şekil 2.12’de ise karot numunelerinin kür zamanı ve alındığı derinliklere bağlı serbest basınç dayanımı değişimi gösterilmektedir. Bunun yanında jet grout kolonu oluşturulmasında kullanılan karışımın kalitesi ve dayanımını tespit etmek amacı ile 10X10 cm boyutundaki kübik kaplara doldurulan bu karışımın 7 ve 28 günlük eksenel basınç dayanımı tespit edilir.

Proje	Jet Grout No	Çap(cm)	Boy (m)	Servis Yüğü (t)	İlk Çevrimde sıyrılma (mm)	İkinci Çevrimde sıyrılma (mm)	Tahmin Edilen sıyrılma Yüğü (t)
Gebze Santrali	T1	80	8.00	62.50	1.85	3.93	165.00
	T4	80	13.00	62.50	1.68	5.57	160.00
Aliağa Santrali	1	60	12.00	45.00	0.41	1.82	100.00
	2	60	12.00	45.00	1.01	2.86	100.00
	3	60	12.00	45.00	1.04	3.29	115.00
	4	60	12.00	45.00	0.74	3.23	112.50
	5	60	12.00	45.00	0.86	2.66	126.00
	6	60	12.00	45.00	1.32	3.97	122.50
Aşain/Elbistan B Termik Santrali	T/A1/2	80	9.30	100.00	10.17	25.00	194.00
	T/A2/2	80	9.10	100.00	5.84	19.90	200.00
	T/A3/2	80	9.80	100.00	5.19	13.60	215.00
	T/A4/2	80	9.30	100.00	6.85	20.50	206.00

Çizelge 2.2 Jet grout kolonları çekme deneyi sonuçları



Şekil 2.12 Serbest basınç dayanımının zamana ve numune alma derinliğine göre dağılımı.

3. SIVILAŞMA, SIVILAŞMA OLASILIĞININ BELİRLENMESİ VE SIVILAŞMAYI ÖNLEMEDE JET GROUT TEKNİĞİNİN ÖNEMİ

3.1 Giriş

Sıvılaşma kavramı ilk olarak 1930'lu yılların sonlarında Casagrande tarafından belirlenmiştir (Kramer,1996). Zeminde meydana gelen sismik hareketlerden dolayı genellikle kötü derecelenmiş gevşek granüler zeminlerde yer altı su tablasının yakın olduğu durumlarda zemindeki boşluk suyu basıncındaki artış ve zemin yüzeyine olan su akışı kum zeminde geçici mukavemet kaybına sebep olur ve bu duruma sıvılaşma denir.

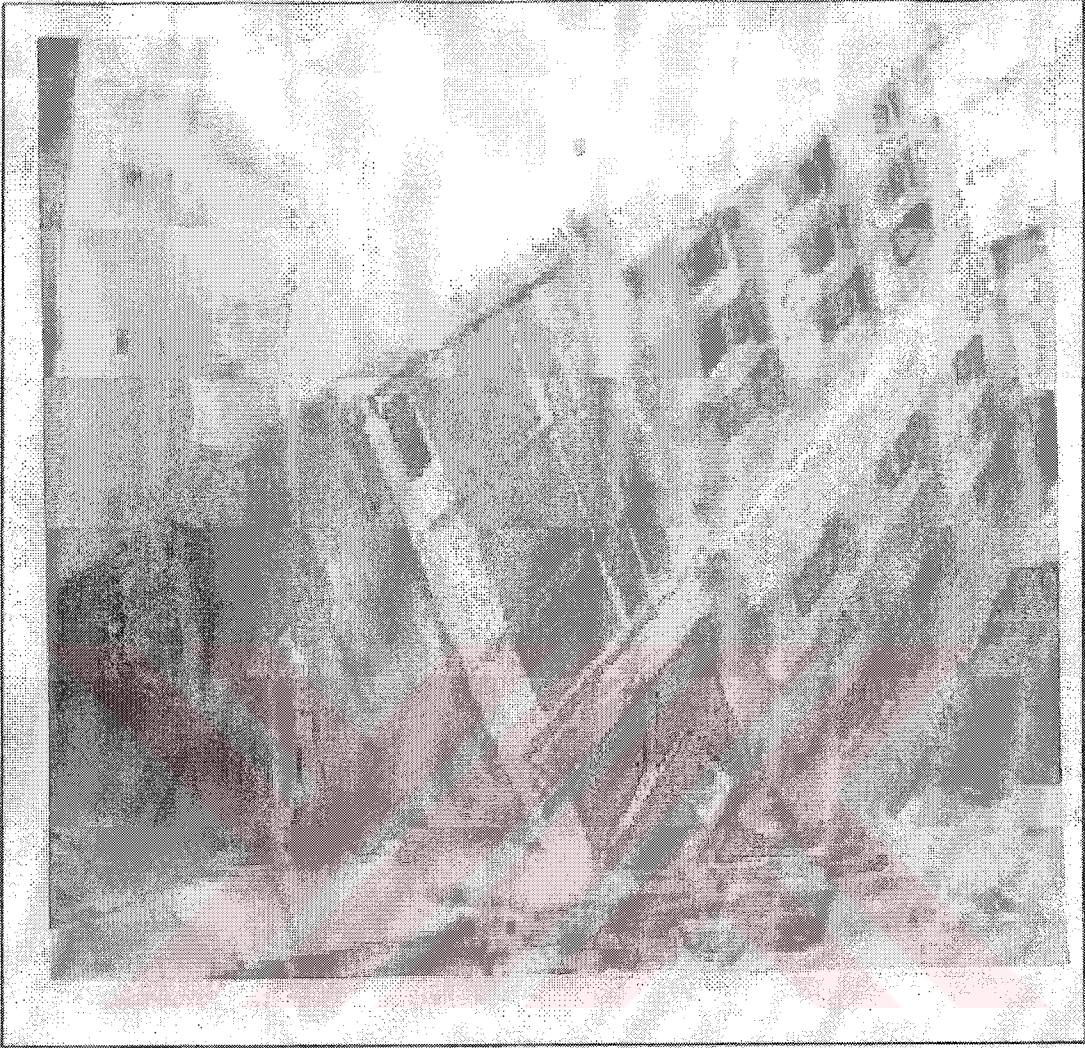
Sıvılaşma durumunda, efektif gerilme sıfır olur ve bireysel zemin daneleri serbest duruma gelir. Zemin yüzeyine doğru bir su akışı meydana gelir ve bu da yüzeyde çamur fişkırmaları veya kum kaynaması şeklinde şekillenir de görülür.

Sıvılaşma sonucu, taşıma gücünü yitiren zemin, zemin altındaki hafif boru hattı gibi yapıların zemin yüzeyine çıkmasına , zemin üstündeki ağır yapıların ise zemine gömülmesine, yanıl deplasman yapmasına veya devrilmesine neden olmaktadır (Kramer, 1996). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde, Adapazarı, Gölcük ve Düzce'de yapısal hasarların önemli etkenlerinden birinin sıvılaşma olduğu gözlemlenmiştir (Mollamahmutoğlu, M., vd., 2000). Şekil 3.1'de zeminin sıvılaşması sonucu yapılarda ortaya çıkan büyük boyutlu hasarlar gösterilmiştir.

Sıvılaşma sonucu oluşacak can ve mal kayıplarının önüne geçilebilmesi için bu tür zeminlerde iyileştirmeye gidilmelidir. Bu iyileştirme yöntemlerinden biri de jet grout metodunun sıvılaşma olasılığı yüksek olan zeminlerde uygulanmasıdır.

Jet grout tekniğinin sıvılaşma olasılığı yüksek zemin tabakalarında kullanılması ile zemin içinde oluşturulan ve zemine göre daha yüksek mukavemete sahip jet grout kolonları (zemin-çimento) oluşturulduğu bölgede sıvılaşma riskini sıfıra indirir. Zemin matrisi içinde jet grout kolonları arasında kalan zemin bloğunda ise bir deprem durumunda oluşacak kayma gerilmeleri değerlerinde düşüşe neden olarak zeminin sıvılaşma potansiyelinde azalma sağlar.

Jet grout metodunun sıvılaşma olasılığı yüksek olan zeminlerde uygulandığında gözlenen sıvılaşmayı azaltıcı etkisinin belirlenmesi için Plaxis programında hazırlanan modeller



Şekil 3.1 Zeminin sıvılaşması sonucu yapılarda ortaya çıkan büyük boyutlu hasara bir örnek
(Adapazarı,1999)

üzerinde yapılan çalışmalara ve bunların sonuçlarına bölüm 5'te değinilecektir. Bu bölümde ise sıvılaşabilir zeminler ve sıvılaşma olasılığının belirlenmesinde kullanılacak bazı yöntem gösterilecektir.

3.2 Sıvılaşabilir Zeminler

Zemin sıvılaşma analizinin ilk adımı potansiyel olarak sıvılaşabilir zemin tabakalarının söz konusu zemin profilinde bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Bu belirlemeyi yapabilmek içinde öncelikle hangi zeminlerin sıvılaşma riski taşıdığına saptanması gerekir.

Burada temiz kumların sıvılaşabilirliği yanında siltli ya da siltli kumlar ile çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliği üzerinde durulacaktır.

3.2.1 Çakıllar

İri daneli ve çakıllı zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilirler. Çakıllı zeminlerin sıvılaşabilirliğini gösteren örnekler mevcuttur (örneğin : Evans, 1987; Harder, 1998; Hynes, 1988; Andrus, 1994). Ancak bu tip zeminler daha ince daneli kumlu zeminlere göre davranış olarak iki önemli farklılık gösterirler: (1) Daha geçirimli olduklarından sismik yükleme sırasında oluşan tekrarlı boşluk suyu basıncı daha çabuk sönmümlenebilmektedir; ve (2) oluşumları sırasında iri danelerinden dolayı ağır kütleleri çok nadiren gevşek tabakalaşma karakteri göstermekte ve doğada gevşek olarak sıkça rastlanmamaktadır.

Çakıllı zeminlerin bilinen yüksek geçirimlilik avantajı şu durumlarda bozulabilir:

- Daha az geçirimli tabakalar arasında sıkıştığında ,
- İnce daneli malzemelerin çakıllı danelerin boşluklarını doldurduğu durumlarda ,
- Eğer çakıllı tabaka oldukça kalın ve buna bağlı olarak drenaj mesafesi uzunsa ; deprem yükü gibi ani yükler uygulandığında .

Bu gibi durumlarda iri daneli malzemelerin sıvılaşabileceği bilinmeli ve gerekli sıvılaşma hesapları yapılmalıdır.

3.2.2 Siltli ve Killi Kumlar

Andrews ve Martin (2000), %10'dan az killi (<0.002mm) malzeme içeren ve 40 no.lu elekten geçen malzemenin likit limitinin (LL) %32'den az olduğu durumlarda sıvılaşmanın olası olduğu ; kil muhtevası %10'dan fazla ve 40 no.lu elekten geçen malzemenin likit limitinin %32'den fazla olduğu durumlarda sıvılaşma olasılığının çok düşük olduğu ve bu iki uç arasında kalan malzemelerden numune alınarak sıvılaşabilirliğin belirlenmesi için test edilmesini önermektedir. Bu bulgular Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Siltli ve killi kumların sıvılaşabilirliği (Andrews ve Martin,2000)

	Likit Limit ¹ <32	Likit Limit>32
Kil İçeriği ² <10%	Sıvılaşabilir	İleri çalışma gerekir (Plastik kil harici boyutlu dane olduğu düşünülerek- Mika gibi)
Kil İçeriği ² >10%	İleri çalışma gerekir (Plastik olmayan kil boyutlu dane olduğu düşünülerek – maden ve ocak atığı gibi)	Sıvılaşmaz

Not:

1. Casagrande tipi darbe aleti ile belirlenen likit limit
2. Kil 0.002 mm den küçük dane olarak tarif edilir.

İnce daneli (siltli ve killi) zemin parçacıklarının iri daneleri birbirinden ayıracak ya da genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarlarda olduğu durumlarda, bu tür malzemelerin sıvılaşması ince daneli siltli yada killi malzemenin plastik olmadığı ya da düşük plastisiteli olduğu (PI≤10-12%) durumlarda rastlanır. Aslında düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar hem sıvılaşabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının düşmesini engelleyebilecek kadar düşük geçirimsizlik göstermeleri sebebiyle en tehlikeli zemin türleridir (Çetin, K.Ö.,2000).

3.2.3 Temiz Kumlar

Temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşılabirliği bilinmektedir. Seed ve Idriss (1971), temiz kumların sıvılaşıma potansiyelini, zeminin sıkılık derecesi ve meydana gelen depremin büyüklüğüne bağlı olarak gösteren aşağıdaki Çizelgeyi önerirler.

Çizelge 3.2 Temiz kumlarda sıkılık derecesi, deprem büyüklüğü ve sıvılaşıma potansiyeli arasındaki yaklaşık ilişki (Sonra Seed ve İdriss, 1971).

Deprem İvmesi (%g)	Yüksek Sıvılaşıma Olasılığı	Orta Sıvılaşıma Olasılığı	Düşük Sıvılaşıma Olasılığı
0.10g	$Dr < 33\%$	$33\% < Dr \leq 54\%$	$D > 54\%$
0.15g	$Dr < 48\%$	$48\% < Dr \leq 73\%$	$D > 73\%$
0.20g	$Dr < 60\%$	$60\% < Dr \leq 85\%$	$D > 85\%$
0.25g	$Dr < 70\%$	$70\% < Dr \leq 92\%$	$D > 92\%$

3.3 Sıvılaşımayı Belirleyen Kriterler

Sıvılaşımayı kontrol eden birçok etkenler vardır. Bu etkenler gerek laboratuvar gerekse arazide yapılan ve deney ve gözlemlere dayanırlar. Yukarıda belirttiğimiz zemin tip ve özelliklerine ek olarak sıvılaşımanın olabilmesi aşağıdaki şart ve/veya şartlarında mevcut olması gerekir.

- Malzeme doygun yada doyguna çok yakın olmalıdır (Yer altı su seviyesi yüzeyde veya yüzeye çok yakın olmalıdır.).
- Yük hızlı uygulanmalı (drenajsız), su tablasındaki değişimlerin mevsimsel olduğu unutulmamalıdır.
- Sıvılaşıma analizine $a_{max} < 0.10g$ ve yerel deprem büyüklüğünün $M_L < 5$ olduğu durumlarda gerek yoktur.
- Aşırı konsolidasyon oranı (OCR) arttıkça zeminin sıvılaşıma direncide artar.

3.4 Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi

Sismik sebepli zemin sıvılaşma hesaplarının ilk aşaması sıvılaşmanın olabirliğinin sayısal yöntemlerle belirlenmesidir. Bu amaca yönelik iki yöntem vardır:

1-) Örselenmiş numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesi ,

2-) Arazi davranışları ile “index” test parametrelerine dayalı amprik bağıntıların kullanılması.

Laboratuvar testlerinin kullanılması numune alımı ve numunenin arazideki gerilmelere konsolidasyonu sırasındaki örselenmeler sebebiyle oldukça zordur. Tekrarlı basit kayma testi her ne kadar arazide oluşan sismik yükleri en iyi modelleyebilen test olsa da deneylerin zorluğu ve ekonomik olmamaları gibi sebepler, bu narin laboratuvar yöntemlerinin tipik mühendislik uygulamalarını kısıtlar.

Günümüzde arazi testlerinin mühendislik uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır. Mevcut uygulamaları özetleyen yayında (NCERR, 1997) dört değişik arazi deney yöntemi ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yeterli doygunluğa ulaşıldığı vurgulanmıştır. Bu testler 1-) standart penetrasyon deneyi (SPT), 2-) koni penetrasyon deneyi (CPT), 3-) arazi kayma dalga hızının (V_s) ölçülmesi, 4-) Becker penetrasyon deneyi.

Bu yöntemler arasında en eski ve en sıkça kullanılan yöntem SPT olup, detaylı olarak tartışılacaktır.

3.4.1 SPT Yöntemi İle Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi

SPT'nin (Standart Penetrasyon Testi) sismik sıvılaşma riskinin belirlenmesinde kullanılması 1964 Büyük Alaska ($M=8+$) ve 1964 Niigata Depremlerine ($M=7.5$) kadar gitmektedir. NCEER çalışma grubunca (NCEER, 1997) özetlendiği üzere, en yaygın kabul gören ve kullanılan deterministik bağıntı Seed ve diğerleri (1984, 1985) tarafından önerilen bağıntıdır. Şekil 3.2 bu çalışmanın NCEER çalışma grubu tarafından düşük dinamik kayma gerilmesi oranlarında yapılan düzeltmeyi içeren sürümünü göstermektedir. Bu bağıntı düşey efektif gerilme, enerji, ekipman ve prosedür düzeltmeleri yapılmış SPT “N” değeri (N_{160}) ile deprem süresi için düzeltilmiş uniform tekrarlı sismik yükün (CSR) karşılaştırılması ile elde edilmiştir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bağıntıda değişkenler N_{160} değeri ile sıvılaştırmayı

başlatabilecek sarsıntı süresi düzeltilmesi uygulanmış minimum tekrarlı yük (CSR_N) ile ince daneli (≤ 0.074 mm) malzeme yüzdesi olarak seçilmiştir.

Seed ve Idriss (1971)'in geliştirdiği "basitleştirilmiş" yöntemine göre :

$$CSR_{mak} = \left(\frac{\tau_{mak}}{\sigma_v'} \right) = \left(\frac{a_{mak}}{g} \right) * \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) * r_d \quad (3.1)$$

Burada:

a_{max} : maksimum yatay yer ivmesi

g : yeryüzü ivmesi

σ_v' : toplam düşey gerilme

σ_v : düşey efektif gerilme

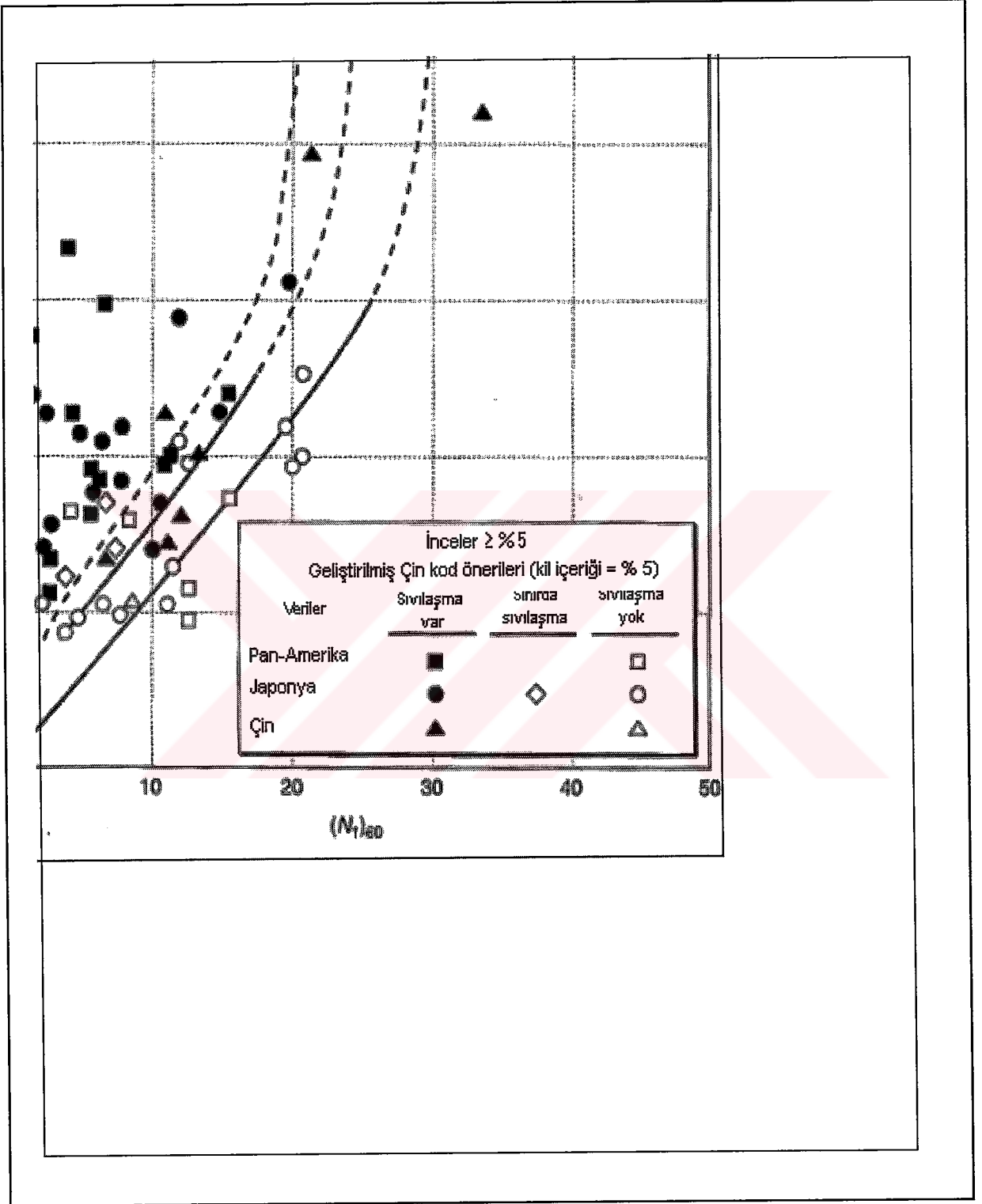
r_d : derinlik azaltım katsayısı

Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilmiş r_d değerleri Şekil 3.3.a'da ve Çetin ve Seed (2000) tarafından önerilmiş r_d değerleri ise Şekil 3.3.b'de gösterilmiştir.

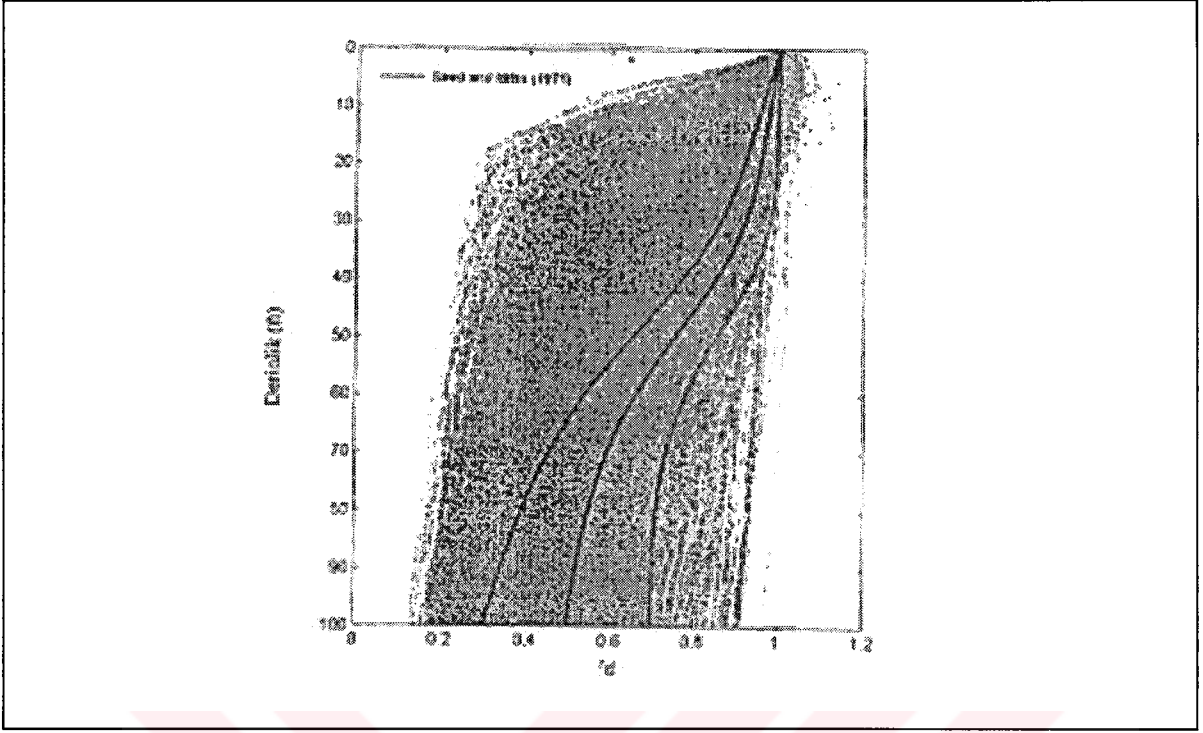
Yeterli zemin verisinin bulunduğu ve uygun kuvvetli yer hareketi kaydının yakındaki istasyonlardaki kayıtlardan geliştirilebileceği durumlarda denk doğrusal yöntem kullanılarak

CSR_{denk} değeri (Shake 90; Idriss ve Sun,1992) hesaplanmıştır. Ayrıca CSR_{denk} 'in hesaplanmasında olası belirsizlikler istatistik yöntemleri kullanılarak modellenmiştir (Çetin ve diğerleri,2001).

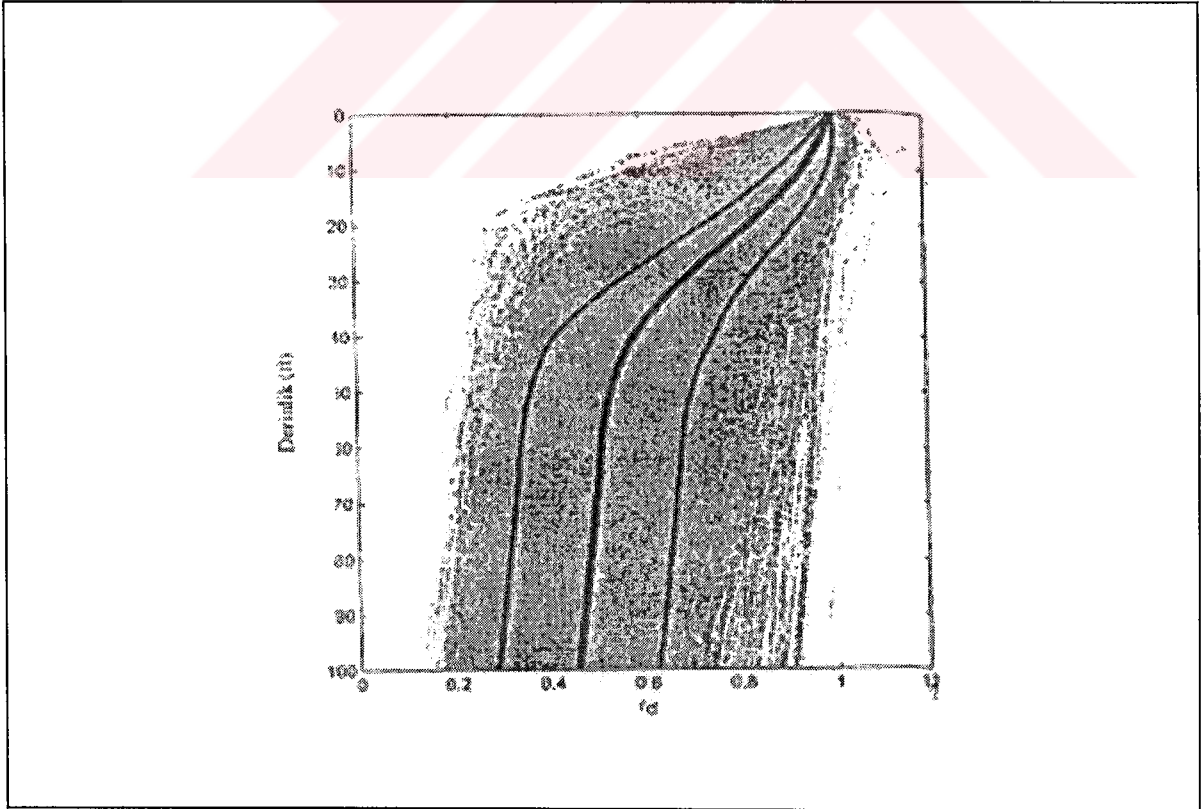
$$CSR_{denk} = 0.65 * CSR_{max} \quad (3.2)$$



Şekil 3.2 Sıvılaşmaya neden olan CSR ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki (Youd & Idriss, 1997).



Şekil 3.3.a rd değerleri (Seed ve Idriss,1971).



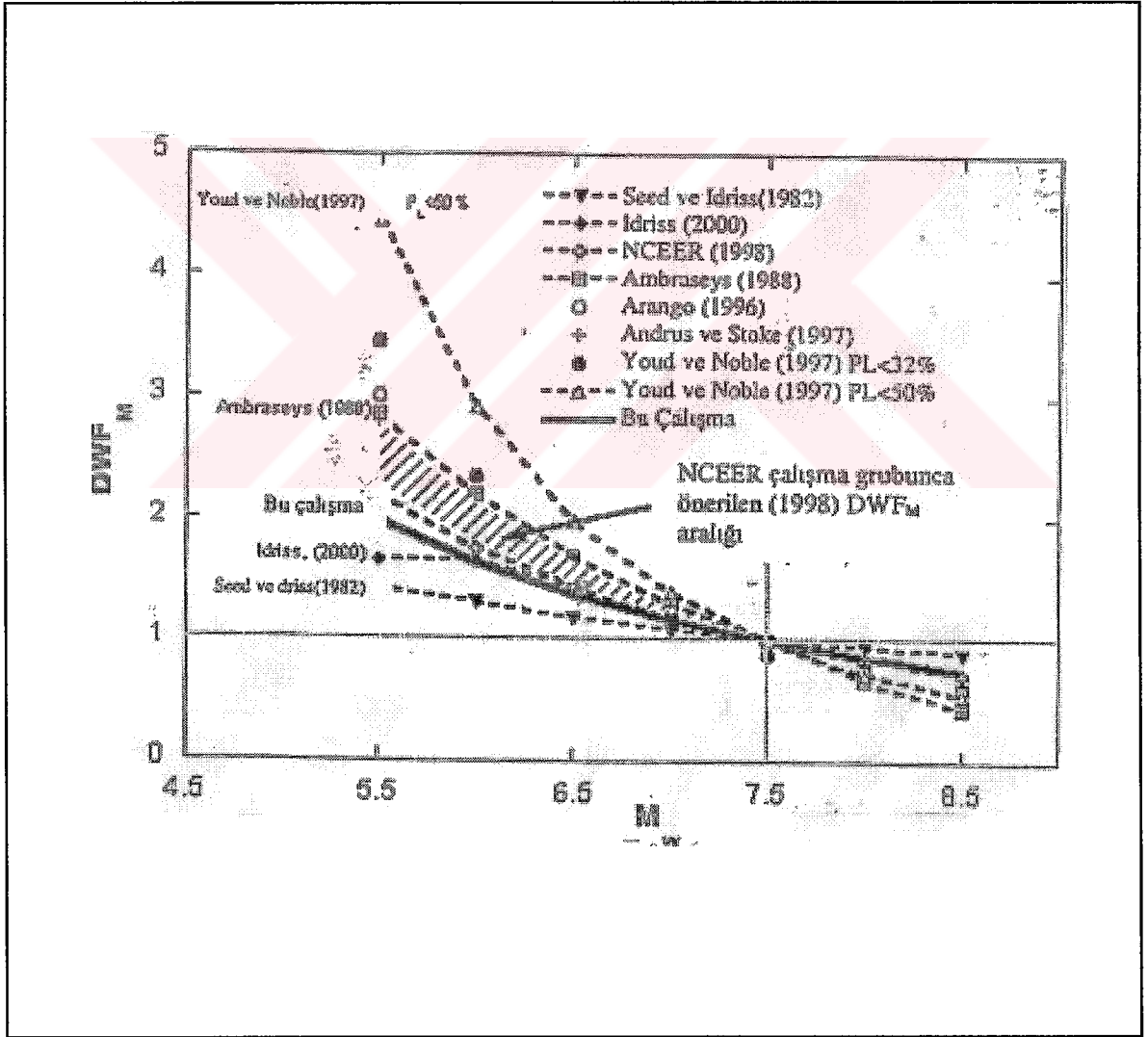
Şekil 3.3.b rd değerleri (Çetin ve Seed,2000).

3.4.2 Deprem Büyüklüğü Bağımlı Süre Düzeltmesi

Genellikle bu düzeltme CSR'ın 7.5 şiddetindeki bir depremin üreteceği ortalama süreye çevrilmesi şeklinde aşağıda verildiği üzere yapılır.

$$CSR_N = CSR_{eq, M=7.5} = CSR_{eq} / DWF_M \quad (3.3)$$

Süre düzeltme katsayısı (DWF_M) değerinin belirlenmesi ciddi tartışmalar yaratmış bir çok araştırmacı farklı yöntem sonuçlarını kullanarak önerilerde bulunmuşlardır. Deprem büyüklüğüyle orantılı süre düzeltme katsayısı şekil 3.4'de gösterilmiştir.



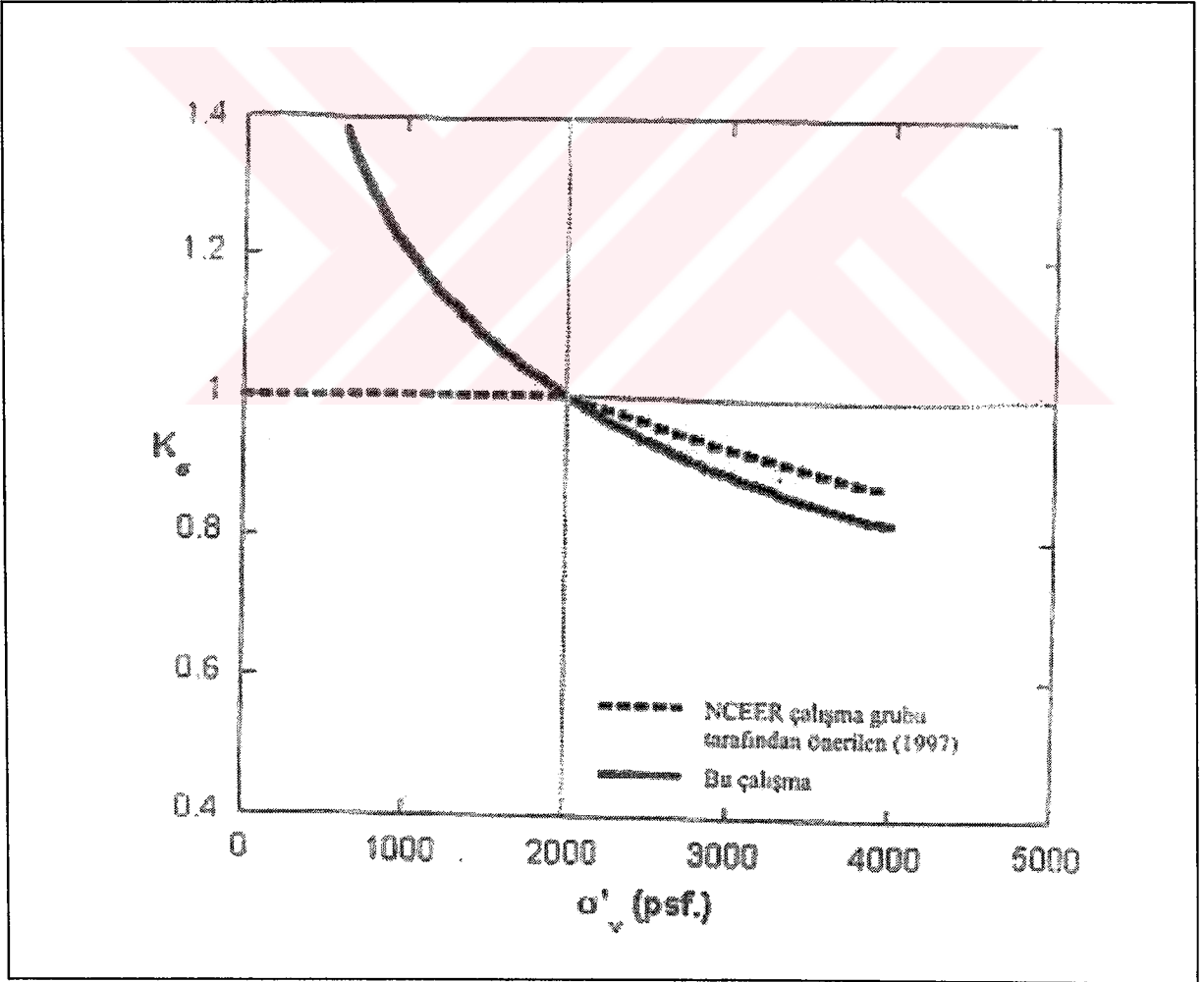
Şekil 3.4 Deprem büyüklüğü ile orantılı süre düzeltme katsayısı (Çetin K.Ö., 2001).

3.4.3 Efektif Gerilme Düzeltmesi

Önceki arazi davranış temelli araştırmalarda doğrudan çözümlenememiş diğer bir konuda aynı CSR altında zeminlerin sıvılaşma riskinin artan efektif gerilmelerle atması idi. Bu N değerinin 1 atm. efektif gerilmeye normalizasyonuna ek olarak önerilmektedir.

$$CSR_{SIV} = CSR_{SIV,1 \text{ atm.}} * K_X \quad (3.4)$$

Şekil 3.5 ; NCEER çalışma grubunun sıvılaşma direncini 1 atm.'e normalize eden K_σ düzeltme katsayısı ile birlikte Çetin, ve diğerlerinin önerdiği K_σ değerleri yer alır.



Şekil 3.5 Çetin, vd. önerdiği K_σ değerleri, ve karşılaştırma için NCEER çalışma grubunca önerilen değerler ($n=0.7$, $D_r=60\%$ için)

3.4.4 SPT ($N_{1,60}$) Değerinin Hesabı

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, arazide ölçülen vuruş sayılarında (SPT- N_{arazi}) tokmak enerjisi, jeolojik basınç ve bazı durumlarda sonuçları etkileyen çeşitli diğer dış değişkenler için düzeltme yapılmalıdır. Ölçülen vuruş sayıları (SPT- N_{arazi}), N_{60} veya $N_{1,60}$ şeklinde normalize edilebilir. N_{60} veya $N_{1,60}$ için en genel formül aşağıdaki gibidir:

$$N_{60} = N_{arazi} C_E C_R C_B C_S \quad (3.5)$$

$$N_{1,60} = N_{arazi} C_N C_E C_R C_B C_S \quad (3.6)$$

Burada N_{60} teorik serbest düşme, tokmak enerjisinin % 60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı, $N_{1,60}$ teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60 ve efektif düşey basıncı 100 kPa değerine göre düzeltilmiş vuruş sayısı, N_{arazi} arazide ölçülen vuruş sayısı, C_N jeolojik yük düzeltme faktörü, C_E enerji düzeltme faktörü, C_R tij uzunluğu düzeltme faktörü, C_B sondaj çapı düzeltme faktörü, C_S numune alıcı kılıf düzeltme faktörü, C_A çakma başlığı düzeltme faktörü, C_{BF} çakma sayısı sıklığı düzeltme faktörü, C_C tokmak yastığı düzeltme faktörüdür.

Çoğu geoteknik uygulamalar için yukarıda sıralanan son altı düzeltme faktörü kullanılmamaktadır. Bazı durumlarda, bunlar daha iyi veri sağlamak için kullanılabilir. Bununla beraber bir çok durum için, N_{60} ve $N_{1,60}$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$N_{60} = N_{arazi} C_E \quad (3.7)$$

$$N_{1,60} = N_{arazi} C_E C_N \quad (3.8)$$

3.4.4.1 Yük Düzeltme Faktörleri (C_N)

Farklı derinliklerde ölçülen SPT-N sayılarını karşılaştırmak için, ölçülen SPT-N sayıları 100 kPa'lık standart basınca (σ_v') göre ayarlanmaktadır. Kohezyonsuz malzemelerin penetrasyon direnci, ağır bir şekilde çevre basıncına bağlıdır. Aynı kum için sığ derinlikte yapılan bir SPT deneyi, daha derinde yapılan SPT deneyinden daha düşük SPT-N değerine sahip olacaktır. N_{arazi} , C_N ile çarpılarak çevre basıncı etkileri karşılanır. Kohezyonlu zeminlerde sığ derinlikler için düzeltmenin gereksiz fakat derin durumlar için düzeltmenin kullanılması hala tartışma

konusudur (Farrar, 2001). Bununla beraber pratikte killi zeminler için C_N uygulanmamaktadır. C_N 'nin çeşitli araştırmacılar tarafından tavsiye edilen değerleri Çizelge 3.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Jeolojik yük düzeltme faktörleri (C_N).

Referans	Düzeltilme faktörü (C_N)	σ_v'
Teng (1962)	$C_N = 50/(10+0.15\sigma_v')$	KPa
Bazaraa (1967)	$C_N = 4/(1+0.04\sigma_v')$ $\sigma_v' \leq 72$	kPa
	$C_N = 4/(3.25+0.01\sigma_v')$ $\sigma_v' > 72$	
Peck ve diğ. (1974)	$C_N = 0.77 \log_{10}^{2000/\sigma_v'}$	kPa
Seed (1976)	$C_N = 1-1.25 \log_{10}^{0.01\sigma_v'}$	kPa
Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	$C_N = 1.7/(0.7+0.01\sigma_v')$	kPa
Liao ve Whitman (1986)	$C_N = (1/0.01\sigma_v')^{0.5}$	kPa
Skempton (1986)	$C_N = \frac{2}{(1+0.01\sigma_v')}$ orta sıklıkta ince kumlar	kPa
	$C_N = \frac{3}{(2+0.01\sigma_v')}$ normal konsolide sıkı kaba kumlar	
	$C_N = \frac{1.7}{(0.7+0.01\sigma_v')}$ aşırı konsolideince kumlar	

3.4.4.2 Enerji Düzeltme Faktörleri (C_E)

Kapsamlı araştırmalar sonucunda, toplam teorik enerjinin numune alıcıya aktarılan enerjiye oranı (ER), bir çok faktör tarafından etkilenmektedir: Tokmak tipi ve düşürölme mekanizma şekli, kedibaşı çapı, halat çapı, kedibaşına halat sarım sayısı, sondaj çapı, tij tipi ve uzunluğu, numune alıcı tipi, operatörün tecrübesi vs. SPT-N değerini etkileyen en önemli parametre enerji düzeltilmesi için gerekli ER miktarının bilinmesidir.

SPT- N_{arazi} değerinde yapılacak en önemli düzeltmelerden biri, çelik tijlere aktarılan enerji düzeltilmesidir (C_E). Tokmaktan tij çubuklara aktarılan enerji, tokmağın tipi ve serbest düşürölme yöntemine bağlıdır. Bir çok farklı tokmak türü ve tokmak düşürölme şekli yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların hiçbirisi % 100 randımanlı değildir.

SPT-N'i temel alan korelasyonların çoğu, yaklaşık % 60 verimliliğe sahip tokmakları kullanarak, geliştirilmiştir. Teorik olarak 63.5 kg tokmağın 76 cm yükseklikten düşürölmesi 475 J enerji üretir. Kayıplardan (sürtünme, serbest düşme eksikliği) dolayı çelik tijlere aktarılan gerçek enerji 475 J'den düşüktür. Enerji düzeltme faktörü uygulanmasının amacı, teorik enerjinin % 60'ını veren bir tokmak deneyde kullanılmışsa, ölçölmüş olan SPT-N değerini düzeltmektir. Düzeltme faktörü (C_E) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$C_E = ER / 60 \quad (3.9)$$

Burada C_E tokmak enerji düzeltme faktörü, ER 63.5 kg tokmağın 76 cm'den düşürölmesiyle yüzde olarak numune alıcıya aktarılan enerjinin toplam teorik enerjiye oranı olarak ifade edilir. Çeşitli araştırmacıların tokmağın tipine göre enerji düzeltme faktörünün değişimini araştırmışlar ve topluca Çizelge 2.4'de gösterildiği gibi her bir tokmak için C_E aralığını ve ortalama değerler önermişlerdir. Alternatif olarak enerji oranı, direkt olarak ASTM D 6066-96'da belirtildiği şekilde ölçölerek belirlenebilir.

Çizelge 3.4 C_E'nin değişim aralığı.

Referans	Tokmak tipi	ER (%)	C _E
Seed ve diğ. (1984)	Otomatik	78	1.3
	Güvenli	60	1.0
	Halka	45	0.75
Seed ve diğ. (1985)	Halka	45	0.75
	Güvenli	60	1.00
	Trip	100	1.67
Youd ve Idriss (1997)	Halka	30-60	0.50-1.00
	Güvenli	42-72	0.7-1.20
	Otomatik-trip halka	48-78	0.80-1.30
Durgunoğlu ve diğ. (2000)	Güvenli	52-60	0.87-1.00

3.4.4.3 Tij Uzunluğu Düzeltme Faktörleri (C_R)

Çizelge 3.5 Tij uzunluğu düzeltme faktörleri.

Tij uzunluğu	C_R		
	Seed ve diğ. (1985)	Skempton (1986)	Youd ve Idriss (1997)
< 3 m	0.75	-	-
3 – 4 m	1.0	0.75	0.75
4 – 6 m	1.0	0.85	0.85
6 – 9 m	1.0	0.95	0.95
> 9 m	1.0	1.0	-
9 – 30 m	-	-	1.0
> 30 m	-	-	< 1.0

3.4.4.4 Sondaj Çapı Düzeltme Faktörleri (C_B)

Ölçülen SPT-N değerleri, sondaj çapının 115 mm'den büyük olduğu durumlarda deneylerin yapılması halinde, düzeltme yapılır. Sondaj kuyuları 115 mm'den büyük olduğunda gerilme boşalması meydana gelir ve ölçülen SPT-N değerleri daha küçük çaptaki delik için ölçülen SPT-N değerinden daha düşüktür. Bu etki kumlarda önemli olabilir fakat kohezyonlu zeminlerde muhtemelen ihmal edilebilir (Sanglerat, 1982). Çizelge 2.6. sondaj çapı düzeltme faktörü için önerilen (C_B) değerleri göstermektedir.

Çizelge 3.6 Sondaj çapı düzeltme faktörleri (Skempton, 1986).

Sondaj kuyu çapı	C_B
65-115 mm	1.00
150 mm	1.05
200 mm	1.15

3.4.4.5 Numune Alıcı Kılıf İçindeki Düzeltme Faktörleri (C_s)

Standart penetrasyon deneyi, numune alıcı içerisinde kılıf kullanarak veya kılıfsız şekilde yapılabilir. Uygulamalarda kılıflar sıkça ihmal edilir ve dolayısıyla numune alma tüpün iç çapı artar. İç çaptaki artma, numune alıcının içerisindeki sürtünmeyi azaltır ve zeminin ölçülen penetrasyon direncini azaltır. Skempton (1986) ve Youd ve Idriss (1997) iç kaplamanın olmaması durumunda düzeltme faktörlerinin aralığını Çizelge 2.7'de gösterildiği gibi önermişlerdir.

Çizelge 3.7 Kılıf düzeltme faktörü (Youd ve Idriss, 1997; Skempton, 1986).

Numune alıcı şekli	C_s	
	Youd ve Idriss (1997)	Skempton (1986)
Kılıflı (Standart)	1.00	1.00
Kılıfsız (Amerika)	1.10-1.30	1.20

3.5 Türk Deprem Yönetmeliğinde Sıvılaşma (1998)

Türk Deprem Yönetmeliği zeminleri A, B, C ve D olarak dört grupta sınıflandırır. D grubunda yer alan zeminlerde yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden 10 m'den daha az derinlikte yer aldığı durumlarda ; zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip olup olmadığı, laboratuvar ve/veya arazi çalışmalarına dayalı, uygun analitik metotlarla tespit edilir.

Türk Deprem Yönetmeliği zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin hesabında kullanılacak özel bir hesap yöntemi veya başvuru kaynağı önermez. Kullanıcılara esneklik sağlar buda kullanıcılara literatürde yer alan ve dünyaca kabul gören metotlardan biri veya bir kaçını kullanabilme imkanı sağlar. Çizelge 2.8'de Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin grupları gösterilmektedir.

Çizelge 3.9 Türk Deprem Yönetmeliğine göre zemin grupları

Zemin Grubu	Zemin Grubunun Tanımı	Standart Penetrasyon (N_{30})	Sııklık Derecesi (%)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1. Ayrışmamış sağlam kayalar	—	--	$7 > 1000$	> 1000
	2. Çok sıkı çakıl ve kum	> 50	85-100	--	> 700
	3. Sert kil ve siltli kil	> 32	--	> 400	> 700
(B)	1. Ayrışmış ve çatlaklı kayalar	--	--	500-1000	700-1000
	2. Sıkı çakıl ve kum	30-50	65-85	--	400-700
	3. Çok katı kil ve siltli kil	16-32	--	200-400	300-700
(C)	Yumuşak, süreksiz düzlemli çok ayrışmış kayalar	--	--	< 500	400-700
	Orta sıkı çakıl ve kum	10-30	35-65	--	200-400
	Katı kil ve siltli kil	8-16	--	100-200	200-300
(D)	1. Yer altı su seviyesi yüksek olan yumuşak alüvyon tabakaları	—	—	—	< 200
	2. Gevşek kum	> 10	> 35	--	< 200
	3. Yumuşak kil ve siltli kil	> 8	--	> 100	< 200

4. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

4.1 Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir (katı cisim mekaniği, termoelastite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, magnetizma vb). Bu yöntem, sayısal yaklaşımların genel özelliklerinin çoğunu gözönüne almakla birlikte bilgisayar yazılımları için en uygun formülasyona sahiptir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları ve non-linear malzeme davranışını modellemeye uygun ve homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlama için elverişli olmasıdır.

Sonlu elemanlar yönteminde, sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak, elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimum olması ve sonra bu elemanların birleştirilmesi şeklinde bir çözüm yöntemi uygulanmaktadır. Bunun sonucu olarak sınır koşulları, sisteme ait özellikler, dış yüklerin sürekli veya ani değişimleri kolayca gözönüne alınabilmekte ve ayrıca sürekli sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır. Diğer bir avantajı da sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda hesaplara dahil edilmesidir. Böylece çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına 1966 yılında başlanmıştır. Bu amaçla, Clough ve Woodward (1967), dolguda gerilmeleri, yanal ve hareketleri belirlemek ve Reyes ve Deene (1966), yeraltında kayada kazı yapılması uygulamalarında kullanılmış ve geçen 37 yıllık zaman süresince teoride ve pratikte birçok avantajlar sağlanmıştır. Çoğu geoteknik sonlu elemanlar analizleri gerçek yapımı modelleyecek şekilde adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenebilmektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-linear olduğundan geoteknik mühendisliği sonlu eleman analizlerinde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-linear

gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ve uygulanan depremin ivme değeri ve periyodu analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir. Sonlu elemanlar analiz yöntemini jet grout kolonların tasarlanmasında kullanılabilir. Jet grout kolonu ve temel zemini malzeme parametrelerindeki belirsizlikleri gidermek için parametrik çalışma yapılabilir ve sonuç olarak elde edilen gerilmeler, yatay ve düşey hareketler karşılaştırılarak tasarımın yeterliliği hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Bu araştırmada, jet grout kolonları oluşturulan zemin modelinde gerilme-şekil değiştirme dinamik davranışı sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle model zemini tanımlanmış ve tanımlanan deprem yükü altında davranışı incelenmiş ardından aynı işlemler jet grout kolonlarının zeminde oluşturulmasından sonra tekrarlanmış ve iki durumda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Analizlerde temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-dinamik davranışı için geoteknik problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilen Plaxis isimli bir bilgisayar programından yararlanılmıştır.

4.2 Plaxis Programı

PLAXIS programı geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program analizlerde gerilme artışları ve ani oturmaların hesaplanmasında elasto-plastik davranışı, tanımlanan yatay yer değiştirmeler ve deprem yükleri altında oluşan gerilme-şekil değiştirmeler ve ivme değerleri hesabında dinamik analizi dikkate almaktadır. Programın malzeme modellerini tanımlamada sağladığı avantajdan dolayı zemin ortamı iki fazlı (katı ve sıvı) olarak gözönüne alınmakta ve drenajlı veya drenajsız çözümler yapılması olanaklı olmaktadır (Plaxis Manual 7,1997).

4.3 Plaxis'de Bütünleşik Gerilme – Şekil Değiştirme – Konsolidasyon Analizi

Zeminler ile mühendislik malzemelerinin davranış mekanizması arasındaki en önemli fark zeminlerin üç fazlı (katı daneler-boşluk suyu-boşluklardaki gaz) bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Bu üç fazın farklı davranmasından dolayı, zemin davranışının modellenmesi oldukça karmaşıktır. Eğer zemin tamamen suya doygunsa, efektif gerilmelere göre yapılan analizler oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Jeolojik ortamın sınır koşulları ve ortamın davranışı (elasto-plastik malzeme davranışı) genellikle karmaşıktır. Gerilme-şekil değiştirme analizinde yük artışından dolayı oluşan gerilmeler hesaplanabilir.

4.3.1 Gerilme ve Şekil Değiştirme Bileşenlerinin Tanımlanması

Malzeme modelleri gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişkileri tanımlayan matematiksel denklemlerdir ve genellikle bu ilişkilerde gerilme ve şekil değiştirmeler artımsal formda ifade edilir. Plaxis'de de bütün malzeme modelleri efektif gerilme değişim hızı $[\sigma']$ ve şekil değiştirme $[\epsilon]$ şeklinde belirtilmiştir. Gerilme ve şekil değiştirme hızı tensörü altı kartezyen gerilme ve şekil değiştirme bileşeni içermektedir. Düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetri durumlarında sadece dört bileşen gereklidir, çünkü γ_{yz} , γ_{zx} , τ_{yz} ve τ_{zx} sıfırdır. Pozitif gerilme bileşenleri çekme gerilmelerini, negatif gerilme bileşenleri basınç gerilmelerini temsil etmekte, şekil değiştirmeler yer değiştirme bileşenleri u_x ve u_y ' nin kısmi türevi alınarak belirlenmektedir. Buna göre,

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \text{ve} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{zz} = 0 \quad (\text{düzlem şekil değiştirme}) \quad (4.2)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{r} \cdot u_x \quad (\text{düzlem şekil değiştirme}) \quad (4.3)$$

Kartezyen gerilmelerden belirlenen asal gerilmeler,

$$\sigma'_1 = \frac{1}{2} \times (\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) + \sqrt{\frac{1}{4} \times (\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \tau'_{xy}} \quad (4.4a)$$

$$\sigma'_2 = \sigma'_{zz} \quad (4.4b)$$

$$\sigma'_3 = \frac{1}{2} \times (\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}) - \sqrt{\frac{1}{4} \times (\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \tau'_{xy}} \quad (4.4c)$$

Gerilme invariantları, aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir.

$$p' = -\frac{1}{3} \times (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (4.5a)$$

$$q = \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} \quad (4.5b)$$

(p') ' izotropik gerilme veya ortalama gerilme, q eşdeğer kayna gerilmesidir. Sıkışma (basınç) durumunda p' nün işareti diğer gerilme ölçümlerinin tersine pozitiftir. Üç eksenli gerilme durumunda $q = |\sigma'_1 - \sigma'_2|$ şeklinde belirtilir (Plaxis Manual 7,1997).

4.3.2 Gerilme – Şekil Değişirme Analizi

Plaxis programı ile efektif parametrelerle drenajsız analiz yapabilme olanağı vardır. Gerilme-şekil değişirme analizlerinde drenajsız durum gözönüne alındığından, malzeme parametreleri (deformasyon modülü, kayma modülü, Poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı) efektif gerilmeler cinsinden göz önüne alınmaktadır. Bu durum ortamın (zemin) iki fazlı yani sıvı (su) ve katı (dane) malzemeden meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Buna göre ortamdaki toplam gerilmeler σ , efektif gerilmeler σ' ve boşluk suyu basıncı u cinsinden ,

$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} + u$$

$$\sigma_{yy} = \sigma'_{yy} + u \quad (4.6)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} + u$$

$$\tau_{xy} = \tau'_{xy}$$

şeklinde yazılabilir. Burada (u) toplam boşluk suyu basıncı (u_0) yer altı su seviyesinden dolayı başlangıç boşluk suyu basıncı ile (Δu) fazla boşluk suyu basıncının toplamı olarak

$$u = u_0 + \Delta u \quad (4.7)$$

şeklinde gösterilebilir. başlangıç boşluk suyu basıncı değeri başlangıç arazi verilerinden (yeraltı su seviyesi) hesaplanmakta, fazla boşluk suyu basıncı ise drenajsız malzeme davranışı

durumunda gerilme – şekil değiştirme analizleri ile bulunmaktadır. Kararlı durum bileşenlerinin zamana göre türevi sıfır olduğundan, aşağıdaki eşitlik belirlenebilir.

$$u' = \Delta' u \quad (4.8)$$

Buna göre boşluk suyu basıncındaki değişim nedeniyle jeolojik ortamda meydana gelecek elastik şekil değiştirme değişimleri $[\varepsilon^e]$ (elemanlarda) lineer elastik malzeme davranışı için geçerli Hook Yasası'ndan yararlanılarak şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^e \\ \varepsilon_{yy}^e \\ \varepsilon_{zz}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - u \\ \sigma_{xx} - u \\ \sigma_{xx} - u \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Suyun pratik olarak az sıkıştığı göz önüne alınırsa, boşluk suyu basıncının değişimi

$$u' = \frac{K_w}{n} (\varepsilon_{xx}^e + \varepsilon_{yy}^e + \varepsilon_{zz}^e) \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada K_w suyun kütle modülü, n ise zeminin porozitesini göstermektedir.

$$\frac{K_w}{n} = 300 \frac{0.495 - \nu'}{1 + \nu'} \cdot K' > 30K' \quad (4.11)$$

Burada K' zeminin kütle modülü, ν' Poisson oranıdır. Drenajsız gerilme analizlerinde malzeme parametresi olarak kayma modülü G' ve Poisson oranı verilmekte ve bu parametreler drenajsız malzeme parametrelerine dönüştürülmektedir. Buna göre toplam şekil değiştirmelerin analizi için (4.9) eşitliği aşağıdaki ifadeye dönüşmektedir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^e \\ \varepsilon_{yy}^e \\ \varepsilon_{zz}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E_u} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_u & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & 1 & -\nu_u & 0 \\ -\nu_u & -\nu_u & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Burada

$$E_u = 2G' \cdot (1 + \nu_u) \quad \text{ve} \quad \nu_u = \frac{\nu' + \mu \cdot (1 + \nu')}{1 + 2\mu \cdot (1 + \nu')} \quad (4.13)$$

$$\mu = \frac{1 \cdot K_w}{3n \cdot K'} \quad (4.14)$$

şeklindedir. (u) alt indisi drenajsız parametreleri göstermektedir. Bu ifadelerden anlaşılacağı üzere, fazla boşluk suyu basınçları küçük hacimsel şekil değiştirme değişimlerinden hesaplanabilecektir.

$$\dot{u} = \frac{K_w}{n} \cdot \dot{\varepsilon}_v^e \quad (4.15)$$

Yukarı anlatılanların ışığında Plaxis programı ile yapılan drenajsız gerilme şekil değiştirme analizlerinde, ortam iki fazlı olarak düşünüldüğü yani zemin ve suyun farklı deformasyon parametrelerine sahip iki malzeme olarak davrandığı kabul edildiği için, zemin parametreleri (Young modülü, Poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı) drenajlı parametreler olarak alınmalıdır.

Elastik – plastik analizin temeli elastik ve plastik şekil değiştirmeler veya şekil değiştirme hızlarının ayrılmasına dayandığından, analizlerde elastik bileşen ε^e (4.9) eşitliğinden belirlenmiş, plastik şekil değiştirmelerin ε^p hesabında ise bileşik olmayan akış kuralı göz önüne alınarak, göçme Mohr-Coulomb göçme kriterine göre belirlenmiştir. Genel elasto-plastik gerilme – şekil değiştirme davranış analizi Bölüm 3’de özetlendiği gibi Plaxis’de hesaplarda plastik şekil değiştirmeler,

$$\varepsilon^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (4.16)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada, g plastik potansiyel fonksiyonu, λ skaler bir çarpan, elastik davranışta $\lambda=0$, plastik davranışta $\lambda>1$ olarak alınmıştır. Elasto - plastisite için gerilme ve şekil değiştirmeler,

$$\sigma' = \left[D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e \right] \varepsilon \quad (4.17)$$

eşitliğinden belirlenmektedir. Bu eşitlikteki d

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma^i} \cdot D^e \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma^i} \quad (4.18)$$

ile ifade edilir. Eğer malzeme davranışı elastikse (4.17) eşitliğinde $\alpha=0$ veya plastik davranışta $\alpha=1$ olarak alınabilir ve α

$$\alpha = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} \cdot D^e \cdot \varepsilon \quad (4.19)$$

eşitliği ile belirlenebilir Plaxis Manual 7, (1997).

4.3.3 Sonlu Eleman Formülasyonu

Bu çalışmada, uygulanan sonlu elemanlar formülasyonunda deplasman (yer değiştirme) yöntemi uygulanmıştır, yani deplasmanlar esas bilinmeyen olarak seçildiği sonlu elemanlar uygulamaları için adım adım aşağıdaki formülasyonlar uygulanmaktadır.

Sürekli bir ortamın statik dengesi aşağıdaki gibi yazılır,

$$[L^T] \{\sigma\} + \{p\} = 0 \quad (4.20)$$

Bu eşitlikte $\{\sigma\}$, altı gerilme bileşeninin kısmi türevini içeren vektörü $\{p\}$, kütle kuvvetlerinin 3 bileşenini göstermektedir. $[L^T]$, diferansiyel operatörün transpozesidir. $[L^T]$ aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$[L^T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Denge eşitliğine ek olarak kinematik ilişki aşağıdaki gibi yazılırsa,

$$\{\varepsilon\} = [L] \{u\} \quad (4.22)$$

elde edilir.

Eşitlikteki $\{\varepsilon\}$, altı şekil değiştirme bileşeni vektörü $\{u\}$, üç yer değiştirme bileşeninin kısmi türevi ve $[L]$, ise diferansiyel operatördür. (4.20) ve (4.22) eşitlikleri arasında ilişki, malzeme davranışını temsil eden bünye ilişkileri ile aşağıdaki eşitlikle sağlanır.

$$\{\sigma\} = [M] \{\varepsilon\} \quad (4.23)$$

Burada $[M]$ bünye matrisidir ve (4.20), (4.22) ve (4.23) eşitliklerinin birleşimine, Galarkin varyasyonu prensibi uygulanarak denge eşitliği belirlenir ve bu eşitliğe Green Teoremi uygulanarak aşağıdaki virtüel iş eşitliği elde edilir.

$$\int \delta\{\varepsilon^T\} \{\sigma\} dV = \int \delta\{u^T\} \cdot \{p\} dV + \oint \delta\{u^T\} t dS \quad (4.24)$$

Eşitlikteki $\{t\}$, vektörü S yüzeyindeki kuvvetleri ve $\{p\}$, ise V hacmindeki cismin kütle kuvvetlerini göstermektedir. $\{\varepsilon^T\}$ V hacmindeki cismin şekil değiştirme matrisini göstermektedir. Meydana gelen gerilmeler artımsal biçimde aşağıdaki gibi gösterilebilir,

$$\{\sigma^i\} = \{\sigma^{i-1}\} + \{\Delta\sigma\} \quad \text{ve} \quad \{\Delta\sigma\} = \int \dot{\sigma} dT \quad (4.25)$$

eşitlikteki $\{\sigma^i\}$, bilinmeyen gerilmenin başlangıç durumunu, $\{\sigma^{i-1}\}$, bilinmeyen gerilmenin bir adım önceki değerini, gerilme artımı $\{\Delta\sigma\}$ 'da küçük bir zaman artışı üzerinden integre edilen gerilme hızını belirtir. (4.24) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$\int \delta\{\varepsilon^T\} \{\Delta\sigma\} dV = \int \delta\{u^T\} \cdot \{p^i\} dV + \oint \delta\{u^T\} t^i dS - \int \delta\{\varepsilon^T\} \cdot \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (4.26)$$

elde edilebilir. (4.20)-(4.26) arasındaki eşitliklerde gösterilen bütün büyüklükler üç boyutlu uzayda düşünülmelidir. Sonlu elemanlar yöntemine göre, bir sürekli ortam bir çok elemana ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları bir serbestlik derecesine sahiptir.

Deformasyon teorisinde serbestlik derecesi yer değiştirme bileşenlerine karşılık gelir ve bir eleman içindeki yer değiştirme vektörü $\{u\}$ ile, herhangi bir noktada $\{u\}$ deplasmanlarının düğüm noktasındaki ifadesi $\{v\}$ ile, Şekil fonksiyonlarını içeren matris ise $[N]$ ile gösterilir ve deplasmanların düğüm noktasındaki ifadesi aşağıdaki eşitlikle belirtilebilir.

$$\{u\} = [N] \{v\} \quad (4.27)$$

(4.27) eşitliği (4.22) kinematik eşitliğinde yazılırsa,

$$\{\epsilon\} = [L] [N] \{v\} = [B] \{v\} \quad (4.28)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki $[B]$ matrisi deplasmanları, Şekil değiştirmelere dđnüştüren deformasyon matrisidir, $\{\epsilon\}$ ve $\{u\}$ terimleri bilinmeyenlerdir ve eleman deplasmanları $\{v\}$ cinsinden ifade edilir. (4.27) ve (4.28) eşitlikleri varyasyonel, artımsal ve hız formunda da yazılabilir. (4.26) denklemini minimize edecek Şekilde varyasyon prensibi uygulanırsa

$$\int [B]^T \{\delta v\}^T \{\Delta \sigma\} dV = \int [N]^T \{\delta v\}^T \{p^i\} dV + \int [N]^T \{\delta v\}^T t^i dS - \int [B]^T \{\delta v\}^T \{\sigma^i\} dV \quad (4.29)$$

olarak elde edilir. Düğüm deplasmanlarının $\{v\}$ değişimi keyfi olduğundan, integralin dışına çıkartılabilir,

$$\{\delta v\}^T \int [B]^T \{\Delta \sigma\} dV = \{\delta v\}^T \int [N]^T \{p^i\} dV + \{\delta v\}^T \int [N]^T \{t^i\} dS - \{\delta v\}^T \int [B]^T \{\sigma^i\} dV \quad (4.30)$$

ve aşağıdaki Şekilde belirtilebilir.

$$\int [B]^T \{\Delta \sigma\} dV = \int [N]^T \{p^i\} dV + \int [N]^T \{t^i\} dS - \int [B]^T \{\sigma^{i-1}\} dV \quad (4.31)$$

Eşitlikte, sağ taraftaki birinci ve ikinci terim dış kuvvet vektörünü, son terim ise iç reaksiyon vektörünü belirtmektedir. Dış kuvvet vektörü ile iç reaksiyon vektörü arasındaki fark $\Delta \sigma$ gerilme artımı arasındaki ilişki genellikle non-lineerdir. Sonuç olarak Şekil değiştirme artımları direkt olarak hesaplanamaz, bütün malzeme noktaları için global iterasyon yöntemi uygulanarak (4.31) eşitliğinde denge durumu sağlanır.

4.3.4 Diferansiyel Plastisite Modelinin Belirli İntegrali

Gerilme artımları $\Delta\sigma$, (4.25) eşitliğine göre gerilme hızının integrali tarafından belirlenir. Diferansiyel plastisite modelinde gerilme artımları aşağıdaki biçimde yazılırsa,

$$\{\Delta\sigma\} = [D^c] \{\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^p\} \quad (4.32)$$

eşitlikteki $[D^c]$ geçerli gerilme artımı için elastik malzeme matrisini belirlemektedir. Deplasmanları şekil değiştirmelere dönüştüren deformasyon matrisi $[B]$ kullanılarak, yer değiştirme artımı Δv 'den şekil değiştirme artımı $\Delta\varepsilon$ belirlenebilir. Elastik malzeme davranışı için, plastik şekil değiştirme artımı $\Delta\varepsilon^p$ sıfırdır. Plastik malzeme davranışı için, plastik şekil değiştirme artımı Vermeer (1989)'a göre aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\{\Delta\varepsilon^p\} = \Delta\lambda \cdot \left[(1-w) \cdot \left(\frac{\partial g}{\Delta\sigma} \right)^i + w \cdot \left(\frac{\partial g}{\Delta\sigma} \right) \right] \quad (4.33)$$

Bu eşitlikteki $\Delta\lambda$ plastik çarpan artımı ω ise zaman integralinin tipini belirten bir parametredir. $\omega = 0$ için integrasyon belirsiz ve $\omega = 1$ için integrasyon belirli olarak adlandırılır. Vermeer (1989)'a göre $\omega = 1$ 'i kullanmak akma yüzeyinde elastik davranıştan elasto-plastik davranışa geçişteki gerilme durumunda bazı avantajlar sağlamaktadır. Böylece (4.33) eşitliği $\omega = 1$ için

$$\{\Delta\varepsilon^p\} = \Delta\lambda \cdot \left(\frac{\partial g}{\Delta\sigma} \right)^i \quad (4.34)$$

şeklinde ifade edilir. (4.34) eşitliği (4.32) eşitliğinde yerine yazılırsa ve (4.25) eşitliğine uygulanırsa aşağıdaki eşitlikler belirlenir.

$$\{\sigma^i\} = \{\sigma^{ir}\} - \Delta\lambda \cdot [D^e] \cdot \left(\frac{\partial g}{\Delta\sigma} \right)^i \quad (4.35)$$

$$\{\sigma^{ir}\} = \{\sigma^{i-1}\} + [D^e] \cdot \{\Delta\varepsilon\}$$

Bu eşitlikteki $\{\sigma^{tr}\}$ yardımcı gerilme vektörüdür, yeni bir gerilme durumunda tamamen lineer elastik malzeme davranışı göz önünde bulundurulduğu zaman elastik gerilmeler veya deneme gerilmeleri olarak adlandırılır. (4.35) eşitliğinde kullanılan $\Delta\lambda$, akma durumundan sonra oluşan plastik haldeki yeni gerilme durumları için kullanılan bir parametredir.

$$f\{\sigma^i\} = 0 \quad (4.36)$$

ideal plastik ve lineer pekleşme modeli için $\Delta\lambda$ plastik çarpan artımı aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\Delta\lambda = \frac{f\{\sigma^{tr}\}}{d+h} \quad (4.37)$$

burada d aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$d = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right)^{\sigma^{tr}} [D^e] \cdot \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma}\right)^i \quad (4.38)$$

h ise pekleşme parametresidir, ideal plastik model için $h=0$ ve lineer pekleşme modeli sabittir. İkinci durum için yeni gerilme hali aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

Bu eşitlikteki $\langle \cdot \rangle$ Mc Cauly parantezi $\langle x \rangle = 0 \quad x < 0$ ve $\langle x \rangle = x \quad x > 0$ şeklinde kullanılır (De Brost ve Vermeer, 1984).

4.3.5 Global İterasyon Yöntemi

(4.31) denge eşitliği içinde gerilme ve şekil değiştirme artımları arasındaki ilişkinin yerine $\{\Delta\sigma\} = [M] \{\Delta\varepsilon\}$ yazılırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$[K^i] \{\Delta v^i\} = \{f_{ex}^i\} - \{f_{in}^{i-1}\} \quad (4.39)$$

Bu eşitlikteki K rijitlik matrisi, Δv artımsal yer değiştirme vektörü, f_{ex} dış kuvvet vektörü, f_{in} iç kuvvet vektörüdür ve üst indis i adım numarası belirtir. Ancak gerilme ve şekil değiştirme artımları arasındaki ilişki genellikle non-lineer olduğundan rijitlik matrisi yukarıdaki gibi önceden formülize edilemez, bu nedenle denge durumu ve bünye ilişkisinin her ikisini de sağlayan global iterasyon yöntemi gereklidir. Global iterasyon yöntemi aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$[K^i] \{\Delta \delta^i\} = \{f_{ex}^i\} - \{f_{in}^{i-1}\} \quad (4.40)$$

üst indis j iterasyon sayısını belirler $\Delta \delta$ i adımındaki yer değiştirme adımına yardım eden, alt artımsal yer değiştirmeleri içeren bir vektör (sub-incremental displacement)

$$\{\Delta v^i\} = \sum_{j=1}^n (\delta v^j) \quad (4.41)$$

n i adımı içindeki iterasyon sayısını belirtir. (4.40) eşitliğindeki K rijitlik matrisi yaklaşık olarak malzeme davranışını temsil eder. K 'yı daha hassas belirlemek için, belirli bir toleransla daha az sayıda iterasyonla denge sağlanır. K lineer-elastik davranışı belirtir ve bu durum aşağıdaki biçimde formülize edilir.

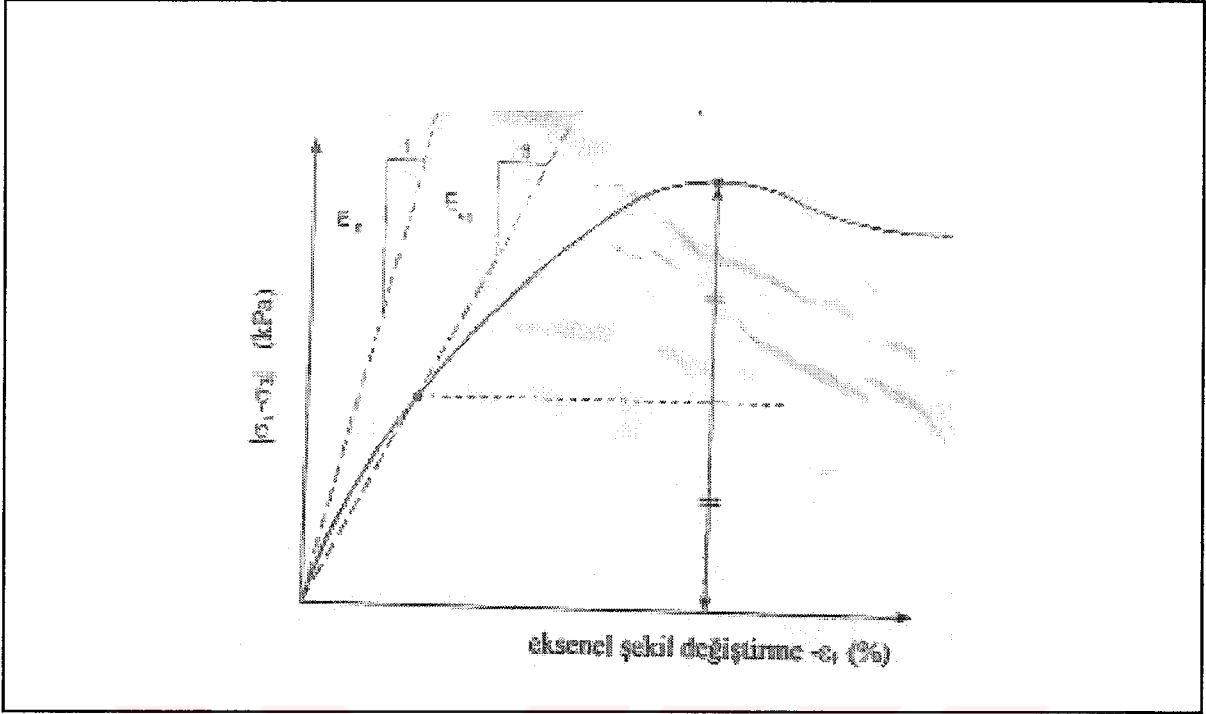
$$[K] = \int [B] \cdot [D^e] \cdot [B] dV \quad (\text{Elastik rijitlik matrisi}) \quad (4.42)$$

4.4 Analizlerde Kullanılan Malzeme Modelleri

Bu çalışmada analizlerde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmış ve bu modelde malzeme davranışı ideal elasto-plastik olarak alınmıştır.

4.4.1 Mohr – Coulomb Modeli

Bu modelde plastik davranışı modellemek için üç zemin parametresi c' (kohezyon), ϕ' (içsel sürtünme açısı), ψ (genleşme açısı) ve elastik davranışı modellemek için ise E' (elastisite modülü) ve ν' (Poisson oranı) kullanılmaktadır. Geleneksel üç eksenli deneylerde genellikle gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıç eğimi başlangıç rijitlik E_0 ve deviatör gerilmenin %50'sine karşılık gelen rijitlik modülü ise Secant modülü olarak E_{50} şeklinde Şekil 4.1'de gösterilir.



Şekil 4.1 Standart drenajlı üç eksenli deneyden E_0 ve E_{50} 'nin tanımlanması.

Bu modelde kumlar ve normal konsolide killer için Secant modülünü kullanmak daha uygun olmaktadır. Mohr – Coulomb modelinde akma durumu asal gerilmelere göre belirtilen üç akma fonksiyonuna göre tanımlanmıştır.

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_3) \cdot \sin \phi' - c' \cdot \cos \phi' \geq 0 \quad (4.43)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_1) \cdot \sin \phi' - c' \cdot \cos \phi' \geq 0 \quad (4.44)$$

$$f_3 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2) \cdot \sin \phi' - c' \cdot \cos \phi' \geq 0 \quad (4.45)$$

Akma fonksiyonundaki iki plastik model parametresi içsel sürtünme açısı ϕ' ve kohezyon c' dir. Bu üç akma fonksiyonu asal gerilme uzayında bir hegzagonal koniyi temsil etmektedir. Mohr - Coulomb modelinde plastik davranışı tanımlamak için bu üç akma fonksiyonuna ek olarak üç plastik potansiyel fonksiyon tanımlanmıştır.

$$g_1 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_3) \cdot \sin \psi \quad (4.46)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_1) \cdot \sin \psi \quad (4.47)$$

$$g_3 = \frac{1}{2} \cdot |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2) \cdot \sin \psi \quad (4.48)$$

Plastik potansiyel fonksiyonları üçüncü bir plastisite parametresi genişleme açısı ψ içerir, modelin ayrıntıları Smith ve Griffith (1982)'de verilmiştir.

Bu modelde iki basitleştirme yapılmıştır birincisi sabit bir elastisite modülünün kullanılması diğeri ise zeminin göçtükten sonra limitsiz genişleme eğiliminde olmasıdır. Gerçek davranışta, zemin göçtükten sonra, zemin boşluk oranı kritik bir değere ulaşmakta ve genişleme sona ermektedir. Analizlerde aşamalı yüklemelerden dolayı rijitlik modülündeki plastik potansiyel fonksiyonundaki efektif gerilme değerlerinin değişimi ile hesaba katılmıştır.

4.5 Plaxis'de Dinamik Analiz

Bu bölümde dinamik davranışın teorik açıklamaları üzerinde durulacak. Aşağıdaki başlıklar tartışılacaktır.

- Dinamik davranıştaki temel eşitlikler
- Zaman integrasyonu
- Dalga Hızları
- Kritik Zaman adımı
- Absorbent sınırlar
- Model sınırlarındaki başlangıç gerilmeleri ve gerilme artışları

4.5.1 Dinamik Davranışın Temel Denklemi

Dinamik yük etkisi altında modelin zamana bağlı hareketini ifade eden denklem eşitlik (4.49) ile ifade edilir.

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = \underline{F} \quad (4.49)$$

Burada M kütle matrisi, u yer değiştirme vektörü, C sönüm matrisi, K rijitlik matrisi ve F ise yük vektörü olarak alınmıştır. Zamanla değişen u yer değiştirmeyi, $\dot{\underline{u}}$ hızı ve $\ddot{\underline{u}}$ ise ivmeyi belirtir. Denklem (4.43)'deki son iki terim olan ($\underline{k} \cdot \underline{u} = \underline{F}$) statik deformasyon hesabı ile ilgilidir.

K matrisi malzemenin rijitlik özelliklerini içerir ve F vektörü ise zeminde gerilme - şekil değiştirme bakımından yük unsurlarını içerir. Burada tanımlanan teori lineer elastik davranışa dayanır. Prensipinde bununla birlikte Plaxis'de bütün modeller kullanılabilir. Zemin davranışı drenajlı ve drenajsız olarak alınabilir. Son iki durumda olduğu gibi burada da yer altı suyunun hacimsel rijitliği bulk modülü rijitlik matrisine (K) ilave edilir.

M matrisinde, malzemelerin (zemin + su + diğer yapıları) kütlesi hesaba katılır. Newton'un ikinci yasasına ($\underline{F} = m \cdot a$)'ya göre özel bir güç uygulandığında kütle arttıkça ivme değeri azalır.

C matrisi malzemelerin malzeme sönümünü yansıtır. Gerçekte malzeme sönümüne sürtünme ve geri dönülemez deformasyonlar (plastisite veya viskozite) neden olur. Sönüm Matrisini hesaplamak için ekstra parametrelere ihtiyaç duyulur. Bu parametreleri testlerden tespit etmek zordur. İşte bu yüzden C sıklıkla kütle matrisi ve rijitlik matrisinin kombinasyonu olarak (Rayleigh Sönümü) denklem (4.50)'de görüldüğü üzere yazılır.

$$\underline{C} = \alpha_R \underline{K} + \beta_R \underline{M} \quad (4.50)$$

Bu ise sönüm matrisinin hesabını Rayleigh katsayıları α_R ve β_R ile sınırlar. Burada düşük frekanslı titreşimler sönümlendiğinde M' in C' deki payı daha fazladır. (örneğin, $\alpha_R = 10^{-2}$ ve $\beta_R = 10^{-3}$) ve yüksek frekanslı titreşimler sönümlendiğinde K' nın C' deki payı (örneğin, $\alpha_R = 10^{-3}$ ve $\beta_R = 10^{-2}$) daha fazladır.

4.5.2 Zaman İntegrasyonu

Dinamik nümerik uygulamalarda analizlerin doğru ve tutarlı olması için zaman integrasyon yöntemi çok önemlidir. Doğrudan ve dolaylı integrasyonlar olarak zaman integrasyonu iki şekilde uygulanabilir. Doğrudan integrasyonun nispeten basit olarak formüle edilmesi onun bir avantajı olarak alınır. Fakat analizlerin yakınsamasında kullanılan zaman adımlarının bir limit değerinin olması ve bundan dolayı hesap zamanının uzaması bu integrasyonun dezavantajları arasındadır. Dolaylı yöntemin daha karmaşık fakat daha güvenli bir yöntem olması ve daha doğru sonuç vermesi bu yöntemin avantajıdır.

Dolaylı zaman integrasyon yönteminde genellikle Newmark şeması kullanılır. Bu yöntemde $t+\Delta t$ zamanındaki noktadaki yer değiştirme ve hız sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$u^{t+\Delta t} = u^t + u^t \Delta t + ((1/2 - \alpha) \ddot{u}^t + \alpha \ddot{u}^{t+\Delta t}) \Delta t^2 \quad (4.51)$$

$$\dot{u}^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \dot{u}^t \Delta t + ((1 - \beta) \dot{\ddot{u}}^t + \beta \dot{\ddot{u}}^{t+\Delta t}) \Delta t \quad (4.52)$$

Yukarıdaki denklemlerde, Δt zaman adımını α ve β katsayıları da nümerik zaman integrasyonunun kesinliğini tespit eder ve Rayleigh sönümündeki α ve β ' ya eşit değillerdir.

Stabil bir sönüm elde etmek için aşağıdaki duruma başvurulur.

$$\beta \geq 0.5 \quad \alpha \geq 1/4 (1/2 + \beta)^2 \quad (4.53)$$

Bir çok hesapta, standart katsayılar $\alpha=0,25$ ve $\beta=0,50$ kullanılır. Bu "ortalama ivme metodu" diye isimlendirilir. Bununla birlikte diğer özel kombinasyonlarda mümkündür.

Plaxis' de integrasyon tasarımının uygulanması:

Denklem (4.51) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ddot{u}^{t+\Delta t} = c_0 \cdot \Delta u - c_2 \cdot u^t - c_3 \cdot \ddot{u}^t$$

$$u^{t+\Delta t} = u^t - c_6 \ddot{u}^t - c_7 \ddot{u}^{t+\Delta t} \quad , \quad \dot{u}^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \Delta u \quad (4.54)$$

veya

$$\ddot{u}^{t+\Delta t} = c_0 \cdot \Delta u - c_2 \cdot u^t - c_3 \cdot \dot{u}^t$$

$$\ddot{u}^{t+\Delta t} = c_1 \cdot \Delta u - c_4 \cdot u^t - c_5 \cdot \dot{u}^t \quad (4.55)$$

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \Delta u$$

Burada c_0, \dots, c_7 katsayıları zaman adımında ve integrasyon (α ve β) parametrelerinde ifade edilir. Bu yolla; yer değiştirme, hız ve ivme zaman adımının sonunda, zaman adımı ve yer değiştirme artışının başındaki değerlerle ifade edilir. Doğrudan olmayan zaman integrasyonu ile birlikte denklem (4.56) zaman adımının sonu ($t+\Delta t$) ile derlenmelidir.

$$\underline{M} \ddot{u}^{t+\Delta t} + \underline{C} \dot{u}^{t+\Delta t} + \underline{K} u^{t+\Delta t} = \underline{F}^{t+\Delta t} \quad (4.56)$$

Bu denklem (4.48 ve 4.49)'deki ifadelerle zaman adımının sonundaki hız, yer değiştirme ve ivmeler için birleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$(c_0 \underline{M} + c_1 \underline{C} + \underline{K}) \Delta u = \underline{F}_{ext}^{t+\Delta t} + \underline{M} (c_2 u^t - c_3 \dot{u}^t) + \underline{C} (c_4 u^t - c_5 \dot{u}^t) - \underline{F}_{int}^t \quad (4.57)$$

Bu durumda Dinamik analiz için olan eşitlik sistemi statik analizdekiyle karşılaştırılır. Burada ki fark kütle ve önm için rijitlik matrisi ekstra terimler içerir. Zaman adımının başında (zaman Δt) ikinci el terimi hız ve ivmeyi belirten ekstra terimler içerir.

4.5.2.1 Dalga Hızları

Sıkışma dalga hızı, V_p , tek boyutlu rijitliğe (E_{oed}) ve kütle (ρ)'ya bağlıdır.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad \text{nerede} \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \quad \text{ve} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (4.58)$$

Burada E = Young modülü, ν = Poisson oranı, γ = toplam birim ağırlık, g = yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/sn}^2$)'dir.

Benzer bir ifade aşağıdaki kayma dalgası hızı V_s için

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{nerede} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.59)$$

4.5.2.2 Kritik Zaman Adımı

Doğrudan olmayan integrasyona rağmen hesaplarda kullanılan zaman adımı sınırlanma eğilimindedir. Şayet zaman adımı çok büyükse, sonuçlar büyük sapmalar gösterecek ve hesap sonuçları güvenilmez olacaktır. Kritik zaman adımı modelde meydana gelen maksimum frekansa ve sonlu eleman ağınlığının kesinliğine bağlıdır. Genel olarak tekil bir eleman için aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\Delta t_{kritik} = \frac{B}{\alpha \cdot \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \sqrt{1 + \frac{B^4}{4S^2} - \frac{B^2}{2S} \left[1 + \frac{(1-2\nu) 2S}{4 B^2}\right]}}} \quad (4.60)$$

İlk terimi sıkışma dalgasının hızını temsil eder ve α faktörü eleman tipine bağlıdır. 6 noktalı eleman için $\alpha=1/(6 \cdot C_6^{0.5})$ ve $C_6 \approx 5.1282$ 'dir. 15 noktalı eleman için $\alpha=1/(19 \cdot C_{15}^{0.5})$ ve $C_{15} \approx 4.9479$ 'dur. Diğer faktörleri Poisson oranı ν , elemanın ortalama uzunluğu B , yüzeyi ise S ' dir. Bir sonlu eleman modelinde kritik zaman adımı (4.60) eşitliğindeki değerinin minimum değerine eşittir.

4.5.3 Model Sınırları

Statik deformasyon analizi durumunda sonlu eleman modelinin sınırlarında önceden sınır yer değiştirmeleri üretilir. Sınırlarda tamamen serbest, bir veya iki doğrultuda mesnetli olacak şekilde mesnet şartları tanımlanır. Özellikle, ağırlık düşey sınırları sıklıkla fiziksel olmayan (synthetic) sınırlardır. Bunlar seçilmiştir ve bu yüzden bunlar modellenmiş yapının deformasyon davranışını esasen etkilemez.

Dinamik hesaplarda model sınırlar prensipte statik deformasyon hesapları için olandan daha uzaktadır. Çünkü titreşimler genellikle çok hızlı yayılır. Sınırlar yakında olduğu zaman

titreşimler hızlıca sınırlara ulaşır ve böylece doğal olmayan yansımalar ortaya çıkar, bu da sonuçların hatalı olmasına yol açar. Diğer yandan sınırları ihtiyaç duyulan bir çok ekstra elemandan çok uzağa konumlandırmak daha çok bilgisayar belleğine ve hesap zamanına ihtiyaç duyulmasına yol açar.

Yansımaları karşılamak için sınırlarda özel ölçümlere ihtiyaç duyulur. Çeşitli metotlar bu sınır durumlarını yansıtmak için kullanılır.

Bunlar;

- Yarı sonlu elemanların kullanımı (sınır elemanları).
- Sınırlardaki elemanın malzeme özelliklerinin adaptasyonu (düşük rijitlik, yüksek viskozite).
- Viskoz sınırların kullanımı (dampers).

Bütün bu metotların avantaj ve dezavantajları vardır ve özel problemleri içerirler. Plaxis (Versiyon 7)'deki dinamik etkilerin uygulanması için absorbent sınırlar kullanılır.

4.5.3.1 Absorbent Sınırlar

Absorbent sınırlar, sönümlendirici (damper) uygulanan mesnetler yerine kullanılır ve her belirli doğrultudaki sönümlendirici şunu sağlar; sınır yüzeyindeki gerilme artışının sıçrama olmaksızın yutulmasını sağlar. Plaxis' deki absorbent sınırların kullanımı Lysmer ve Kuhlmeyer tarafından tanımlanan metoda dayanır. X-doğrultusundaki sönümleyici tarafından yutulan normal ve kayma gerilmeleri bileşimleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_n = -c_1 \rho V_p u'_x \quad (4.61a)$$

$$\tau = -c_2 \rho V_s u'_y \quad (4.61b)$$

Burada ρ malzeme yoğunluğunu, V_p ve V_s sırasıyla basınç dalgası hızı ve kayma dalga hızını temsil eder. V_p ve V_s değerleri (4.58) ve (4.59) eşitliklerinden hesaplanabilir. C_1 ve C_2

relaksasyon katsayılarıdır ve absorpsiyonun etkisini ispatlamak için kullanılır. Basınç dalgası sadece sınıra dik doğrultuda vurduğunda relaxation gereğinden fazladır ($C_1 = C_2 = 1$). Kayma dalgasının varlığında relaxation olmaksızın absorptent sınırların sönüm etkisi önemli değildir. Etki ikinci katsayının adapte edilmesiyle ispatlanabilir. Şimdiye kadar elde edilen sınırlı bilgiler bize şunu gösterir, $C_1 = 1$ ve $C_2 = 0.25$ sonuçları sınırdaki dalgaların yutulmasında en uygun sonuçları verir. Bununla birlikte kayma dalgalarının tam olarak yutulması mümkün değildir. Bu nedenle kayma dalgasının varlığında sınır etkisi fark edilir. Bu noktada ilave araştırmalar gerekli olmakla beraber bu tarif edilen metot pratik uygulamalarda etkilidir.

$$\sigma_n = -\rho V_p u_n + \sigma_n^0 = -\rho V_p (u_n - u_n^0) \quad (4.62)$$

5. JET GROUT TEKNİĞİ İLE SIVILAŞMANIN AZALTILMASI

5.1 Giriş

Taşıma gücü bakımından yeterli olmayan ve/veya sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde jet grout tekniği uygulandığında zemin içinde yüksek mukavemetli, belli aralıklara göre dizilmiş ve istenilen boy ve çapa sahip dairesel kesitli jet grout kolonları oluşur.

Jet grout kolonlarının zeminin taşıma gücünü arttırmaları yanın da sıvılaşma potansiyeli olan zemin gruplarında zeminin sıvılaşmasını engelleyici bir zemin ıslahı yöntemi olarakda kullanılırlar.

Bu amaçla sıvılaşma potansiyeline sahip bir zeminin jet grout kolonları ile zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumları için Plaxis programında modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları incelenerek elde edilen neticeler birbiri ile karşılaştırılmış ve jet grout tekniğinin zemin ıslahında ne gibi bir rolü olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Başlangıçta statik yüklere maruz kalan zemin de oluşan oturmalarda jet grout kolonları zemin içinde oluşturulduktan sonra ne gibi bir değişiklik meydana geleceğini araştırmak amacı ile Plaxis programında zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlar için modeller oluşturulmuştur. Ve oluşturulan bu modellerin statik yükler altında yaptığı oturmalar hesaplanarak her iki durum birbiri ile kıyaslanmıştır.

Daha sonra seçilen zeminin jet grout kolonları ile iyileştirilmesi öncesi sismik yükler altında sıvılaşp sıvılaşmayacağı incelenmiştir. Aynı zeminde jet grout kolonları oluşturulduğunda zeminde sıvılaşmayı azaltması bakımından zemin ıslahı öncesi duruma göre oluşacak kayma gerilmelerinin ne kadarının bu kolonlarda toplanacağı belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlarda deprem etkisi altında modellerimizde görülen yatay deplasmanlar incelenmiştir.

5.2 Sonlu Elemanlar Metodu Kullanan Yazılımla Jet Grout Kolonlarının Zemin İçinde Modellenmesi

PLAXIS programı statik ve dinamik yükler altında elastik ve elasto-plastik şekil değiştirmelerin analizini yapabilmektedir. Aynı zamanda programda zemin ortamı iki fazlı (katı ve sıvı) olarak göz önüne alınmakta ve drenajlı veya drenajsız çözümler yapılması olanaklı olmaktadır (Plaxis Manual 7,1997).

Bu çalışmada sonlu elemanlar prensibiyle çalışan PLAXIS programının 7.2 versiyonu kullanılarak jet grout kolonları ile iyileştirilmiş bir zemin tabakasının deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

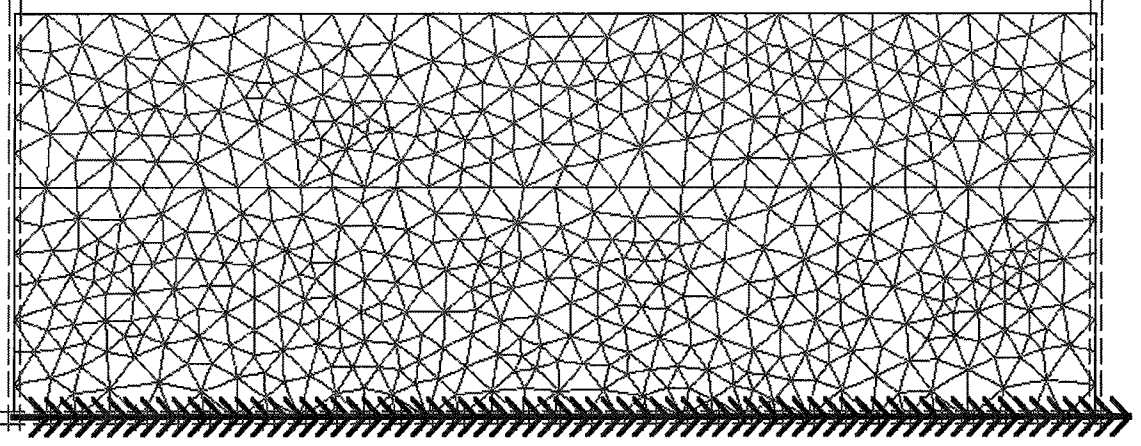
5.3 Sonlu Elemanlar Modeli

Zemin ve jet grout kolonlardan oluşan bir ortamın dinamik ve statik yükler altında deformasyon davranışını tahmin etmek için 3 boyutlu modellerin kullanılması gerçeğine daha uygun olmakla birlikte 3 boyutlu modellemenin zorluğu ve hesap aşamalarının uzunluğu nedeni ile bu tez çalışmasında 2 boyutlu sonlu elemanlar analizleri tercih edilmiştir. Bu 2 boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde 6 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar dikkate alınarak ortamın düzlem şekil değiştirme davranışı gösterdiği kabul edilmiştir.

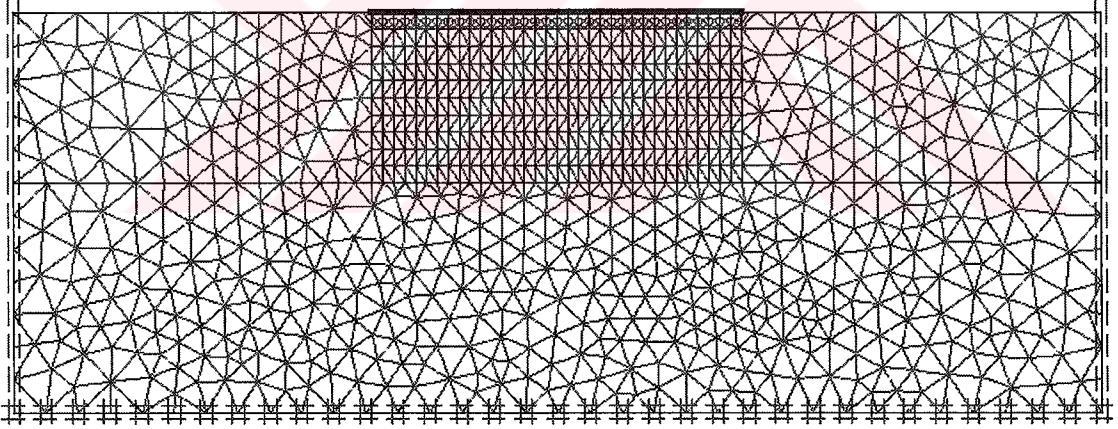
Geliştirilen sonlu eleman modelinde sık bir sonlu eleman ağı kullanılarak elde edilecek gerilmelerin daha iyi yakınsaması sağlanmıştır.

Model üzerinde sağ ve sol tarafta jet grout kolonlarından belirli uzaklıkta yer alan düşey sınırlarla birlikte depremden dolayı oluşacak dalgaları emmesi için emici sınır koşulları tanımlanmıştır. Model içinde oluşturulan jet grout kolonları belirli bir aralık (S) ile yerleştirildiklerinden, modele dik olan yöndeki bu aralık etkisini yaratmak için jet grout kolonu olarak tanımlanan malzemenin elastisite modülü jet grout kolonları arası mesafeye bölünerek elde edilen elastisite değerleri hesaplarda kullanılmıştır.

Burada jet grout kolonları arası mesafe $S=2.0$ m. olmak üzere zemin ıslahı yapılmış durumla zemin ıslahı yapılmadan önceki durumda oluşturulan sonlu eleman ağları sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.1 Zemin ıslahı öncesi PLAXIS'de oluşturulan sonlu eleman ağı.



Şekil 5.2 Zemin ıslahı sonrası ($S=2.0$ m. için) PLAXIS'de oluşturulan sonlu eleman ağı.

5.4 Malzeme Özellikleri

Gerek statik analiz gerekse dinamik analizlerde kullanılacak modellerin tümünde malzeme özellikleri sabit tutulmuştur. Üstte yer alan 15 m. kalınlığında ki tabaka Türk Deprem yönetmeliğinde D grubu olarak tanımlanan gevşek kum olarak tanımlanmıştır. Bu gruba giren malzemelerin kayma dalgası hızları 200 m/s'den küçüktür. Bu nedenle bu zemin tabakasının kayma dalgası hızı 185 m/s olarak seçilmiştir.

Alınan bu kayma dalgası hızı kullanılarak Denklem 5.1 yardımı ile üst tabaka zemininin kayma modülü hesaplanmıştır. Bununla birlikte kayma dalgası hızından yararlanılarak Imai ve Yoshimura'nın önerdiği Denklem 5.2 kullanılarak zemininin SPT vuruş sayısı değeri hesaplanmıştır.

$$G = \rho * (V_s)^2 \quad (5.1)$$

$$V_s = 76 * (N)^{0.33} \quad (5.2)$$

Burada;

ρ = zemin yoğunluğu, t/m³

V_s = Kayma dalgası hızı, m/s

N = SPT vuruş sayısı,

G = kayma mukavemetidir.

Modelde üst tabaka malzemesi olarak kullanılacak olan zeminin malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de detaylı olarak sunulmuştur.

Altta zemin tabakasının kalınlığı ise 20 m. olup malzeme özellikleri de sınırlama olayının görülemeyeceği biçimde seçilmiştir. Bu tabakanın malzeme özellikleri ve malzeme modeli ile ilgili daha detaylı bilgi Çizelge 5.2'de verilmiştir. Statik ve dinamik analizlerin her ikisinde de alt ve üst tabakaların malzeme özellikleri sabit tutulmuştur.

Statik analizlerde kullanılacak olan radye temel ise Plaxis programında elastik bir giriş eleman olarak tanımlanmıştır. Modelde oluşturulan radye temelin mekanik özellikleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Statik ve dinamik analizlerin her ikisinde de zemin ıslahı sonrası durumda kullanılacak olan jet grout kolonları yüksek elastisiteli zemin kolonları olarak tanımlanmış ve jet grout kolon malzemesi olarak da Çizelge 5.3’ de ki mekanik özellikleri içeren JG1 olarak adlandırdığımız malzeme kullanılmıştır. Bununla birlikte jet grout kolonları arasında ki açıklığın şekle dik yöndeki etkisini hesaplara yansıtılabilmek için oluşturulacak jet grout aralığına göre hesaplarda kullanılacak elastisite modülü değeri JG1 malzemesinin elastisite modülünün bu ara mesafe değerine bölünmesi ile elde edilmiştir.

Çizelge 5. 1 Üst tabaka zemininin malzeme özellikleri

Parametre	Adı	Üst tabaka (Kum)	Birim
Malzeme modeli	Model	Mohr-Coulomb	-
Malzeme davranışı modeli	Tip	Drenajlı	-
Kuru birim hacim ağırlık	γ_{dry}	16	kN/m ³
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{wet}	18	kN/m ³
Yatay permeabilite	k_x	1×10^{-6}	m/s
Düşey permeabilite	k_y	1×10^{-6}	m/s
Elastisite modülü	E_{ref}	1.45×10^5	kN/m ²
Poisson oranı	ν	0.30	-
Kohezyon	c_{ref}	1	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	ϕ	28	°
Kabarma açısı	ψ	1	°
Arabirim azaltma faktörü	R_{inter}	Rijit	-
Arab. permeabilite parametresi	Perm.	Doğal	-

Çizelge 5. 2 Alt tabaka zemininin malzeme özellikleri

Parametre	Adı	Alt tabaka	Birim
Malzeme modeli	Model	Lineer Elastik	-
Malzeme davranışı modeli	Tip	Drenajlı	-
Kuru birim hacim ağırlık	γ_{dry}	19	kN/m ³
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{wet}	21	kN/m ³
Yatay permeabilite	k_x	0.01	m/s
Düşey permeabilite	k_y	0.01	m/s
Elastisite modülü	E_{ref}	5.0×10^6	kN/m ²
Poisson oranı	ν	0.25	-
Kohezyon	c_{ref}	-	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	ϕ	-	°
Kabarma açısı	ψ	-	°
Arabirim azaltma faktörü	R_{inter}	Rijit	-
Arab. permeabilite parametresi	Perm.	Doğal	-

Çizelge 5.3 Jet grout kolonu (JG1) malzeme özellikleri.

Parametre	Adı	Jet Grout Kolonu	Birim
Malzeme modeli	Model	Lineer elastik	-
Malzeme davranışı modeli	Tip	Non-porous	-
Kuru birim hacim ağırlık	γ_{dry}	19	kN/m ³
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{wet}	19	kN/m ³
Yatay Permeabilite	k_x	0.0	m/s
Düşey permeabilite	k_y	0.0	m/s
Elastisite modülü	E_{ref}	4.50×10^6	kN/m ²
Poisson oranı	ν	0.25	-
Kohezyon	c_{ref}	-	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	ϕ	-	°
Kabarma açısı	ψ	-	°
Arabirim azaltma faktörü	R_{inter}	Rijit	-
Arab. Permeabilite parametresi	$Perm.$	İmpermeable	-

Çizelge 5.4 Radye temelin mekanik özellikleri.

Parametre	Adı	Değer	Birim
Malzeme davranışı modeli	Malzeme Tipi	Elastik	-
Normal sağlamlık	EI	1.50×10^7	kN/m
Eğilme rijitliği	EA	3.1250×10^5	kNm ² /m
Eş değer kalınlık		0.50	m
Ağırlık	ω	25	kN/m/m
Poisson oranı	ν	0.0	-

5.5 Statik Analiz

Zemin içinde gerek jet grout kolonları ile iyileştirme yapıldığında gerekse iyileştirme öncesinde statik yükler altında zeminde meydana gelen oturmalarda ne gibi farklılıkların ortaya çıktığını araştırmak amacı ile Plaxis programında Şekil 5.3'de görülen model oluşturulmuştur.

Modelde de görüldüğü üzere üstte 15 m. kalınlığında özellikleri Çizelge 5.1'de verilen sıvılaşma potansiyeli yüksek bir kum tabakası onun altında ise 20 m. kalınlığında Çizelge 5.2'de malzeme özellikleri verilen sıvılaşma potansiyeli düşük ve daha iyi malzeme özelliklerine sahip bir zemin tabakası yer almaktadır.

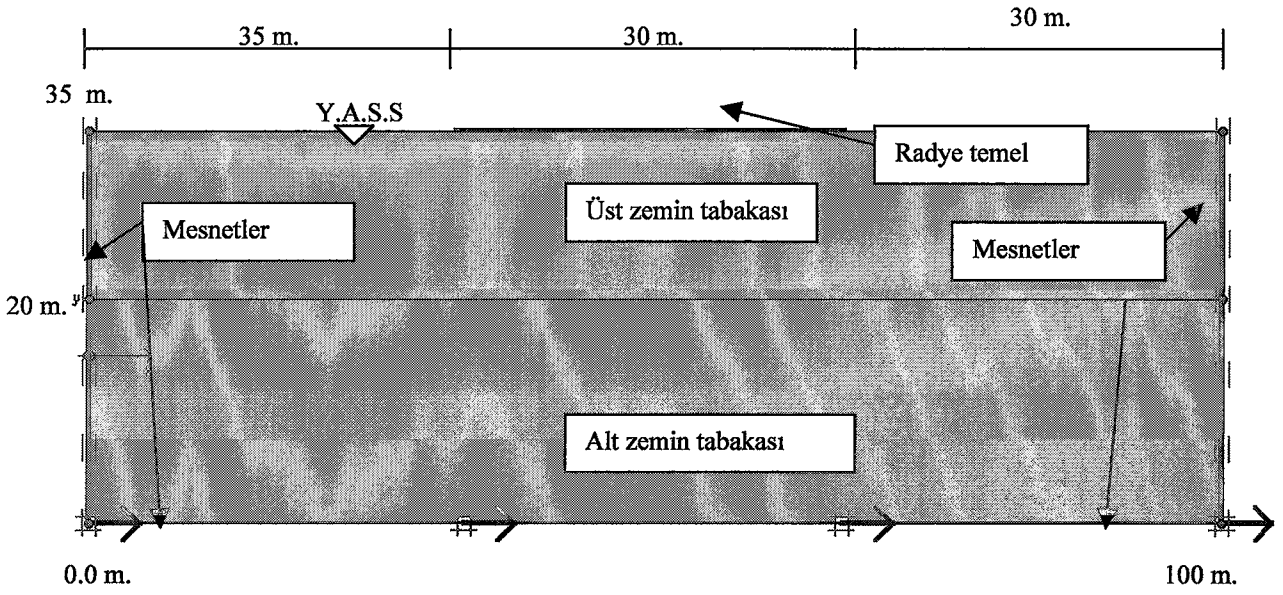
Zemin yüzeyinde 30*30 m. boyutlarında 0.5 m. yüksekliğinde bir radye temel oluşturulmuştur. Tanımlanan bu radye temele ait mekanik özellikler Çizelge 5.4'de

sunulmuştur. Plaxis programında kiriş eleman olarak tanımlanan bu temelin ölü ve hareketli yüklerle birlikte toplam 25 kN/m^2 lik bir yüke sahip olduğu düşünülmüştür. Yer altı su seviyesi de zemin yüzeyinde olduğu varsayılarak tanımlanan temel ağırlığı altında alt ve üst tabakalarda meydana gelecek oturmalar Plaxis programı ile hesaplanmıştır.

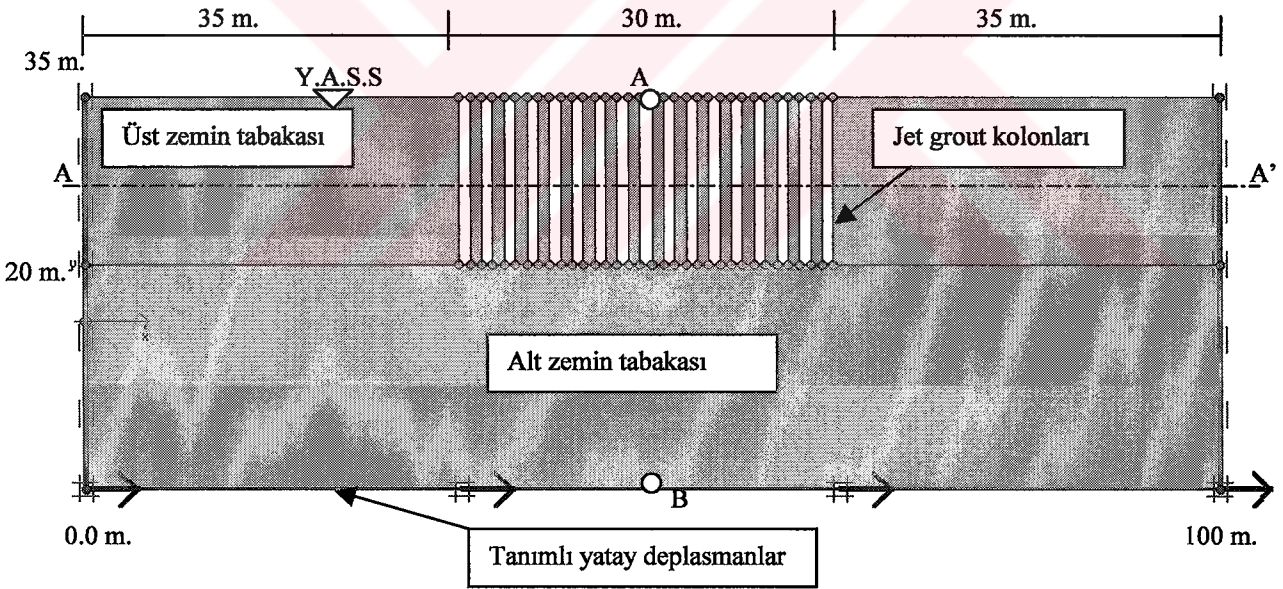
Elde edilen bu oturma değerlerinde üstte yer alan gevşek kum tabakası içinde belli aralıklarda jet grout kolonları oluşturulduğunda meydana gelecek değişimi incelemek amacı ile 1 metre çapında ve 15 metre boyunda jet grout kolonları temel altında Şekil 5.4'de görüldüğü gibi modellenmiştir.

Analizlerde jet grout kolonları ara mesafeleri $S=2 \text{ m.}$, $S=3 \text{ m.}$ ve $S=4 \text{ m.}$ olmak üzere 3 farklı iyileştirilmiş zemin dikkate alınmıştır. Geliştirilen bu 3 modelde radye temelin ağırlığı altında oluşacak oturma ve deformasyonlar hesaplanmıştır.

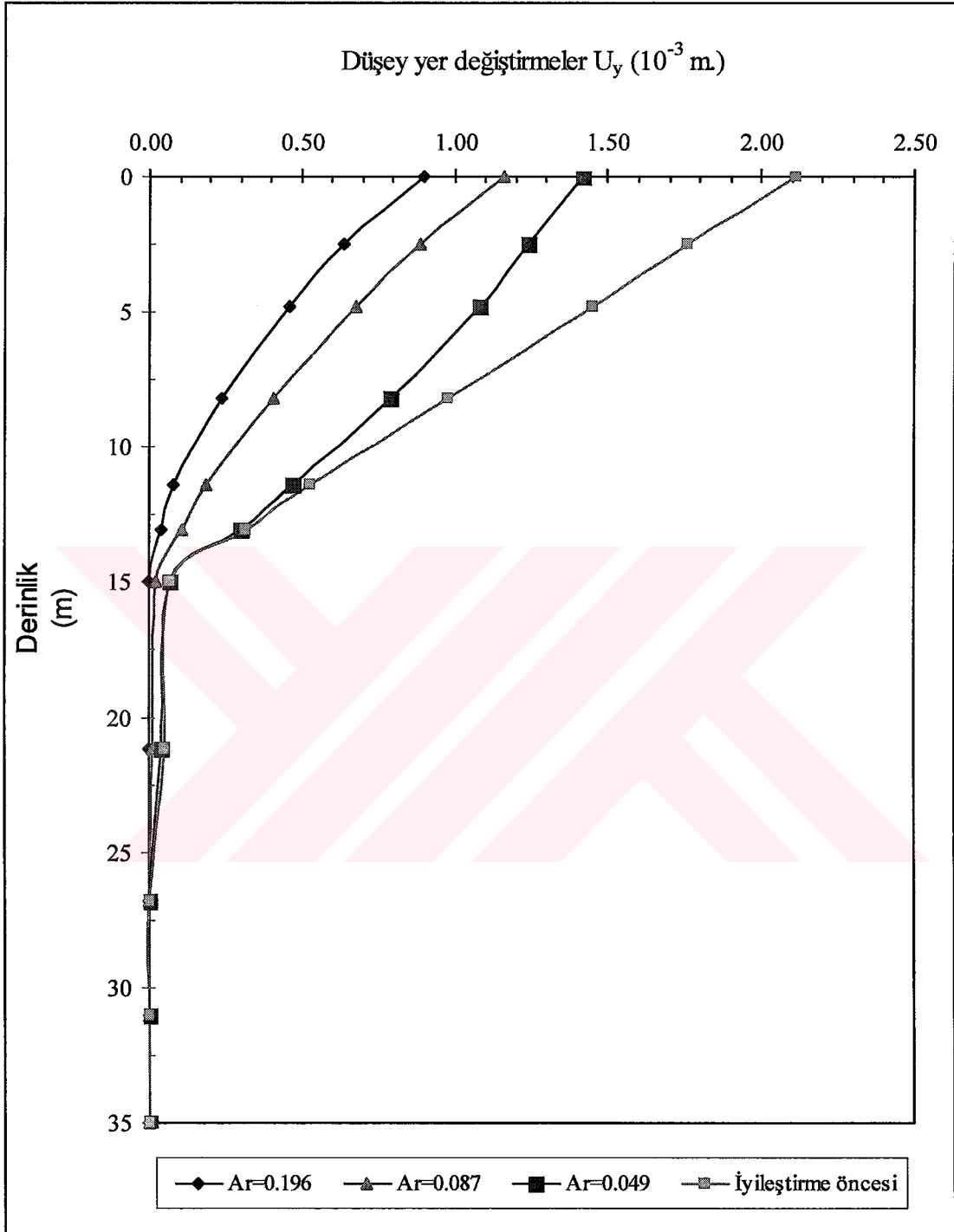
Zemin ıslahı öncesinde ve sonrasında elde edilen düşey yer değiştirmelerin zemin derinliği boyunca değişimi Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Şekil 5.5'den de görüleceği gibi jet grout kolonlarının zemin içinde oluşturulduğu durumlarda meydana gelen oturma değerlerinde zemin ıslahı öncesinde meydana gelen oturma değerlerine göre belirgin bir düşüş görülmektedir. Bununla birlikte jet grout kolonları birbirine yaklaştıkça oturma değerleri de azalmaktadır.



Şekil 5.3 Zemin ıslahı öncesi Plaxis'de oluşturulan model.



Şekil 5.4 Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış model (S=2.0 m için).



şekil 5.5 Statik yükler altında meydana gelen düşey oturma değerleri

5.6 Dinamik Analiz

5.6.1 Zemin Islahı Öncesi Durum

Sıvılaşmaya yatkın zemin tabakalarının olası bir deprem etkisinde sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yaygın olan kullanılan yöntemlerin başında Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen amprik yöntem gelmektedir. Bu yöntemde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)'nden elde edilen $(N_1)_{60}$ darbe sayılarının ince dane oranına göre deprem durumunda zemin içinde oluşacak maksimum kayma gerilmelerinden yararlanarak hesaplanan CSR_{denk} oranı ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bunun için Şekil 5.6'da verilen grafikten yararlanılmaktadır. Burada verilen grafik Seed ve Idriss (1971) tarafından ilk elde edilen grafiğin bu tarihten daha sonra oluşan depremler neticesinde meydana gelen sıvılaşma gözlemlerini de içermektedir (Youd ve Idriss, 1997).

Denklem 5.3'de Seed ve Idriss (1971)' in önerdiği CSR_{denk} katsayısının hesaplanması verilmiştir.

$$CSR_{denk} = \frac{\tau_{ort}}{\sigma_{vo}} = 0.65 * \frac{\tau_{maks}}{\sigma_{vo}} \quad (5.3)$$

Burada ;

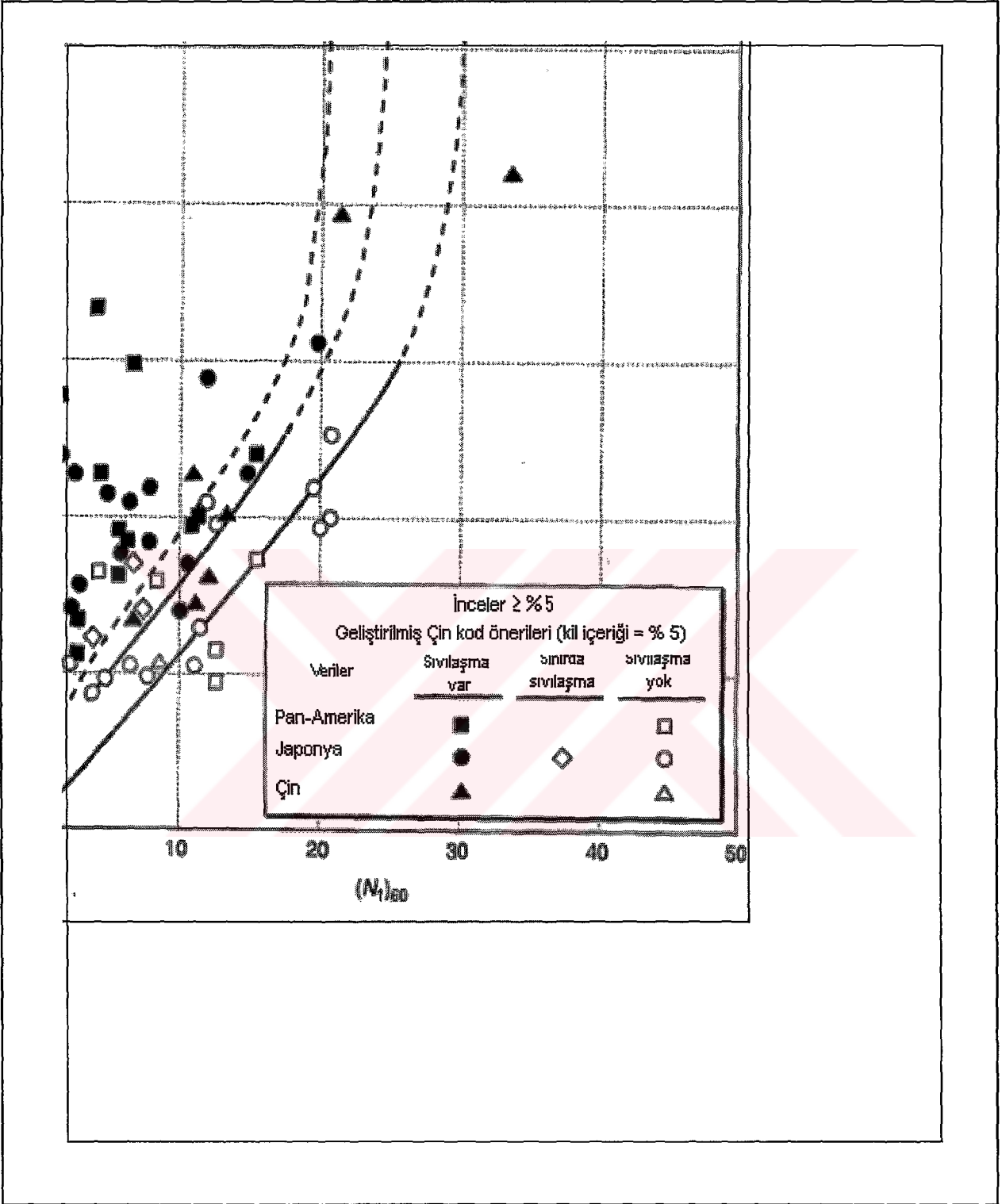
CSR_{denk} = Denk uniform tekrarlı gerilme oranı,

τ_{ort} = Ortalama kayma gerilmesi,

τ_{maks} = Maksimum kayma gerilmesi,

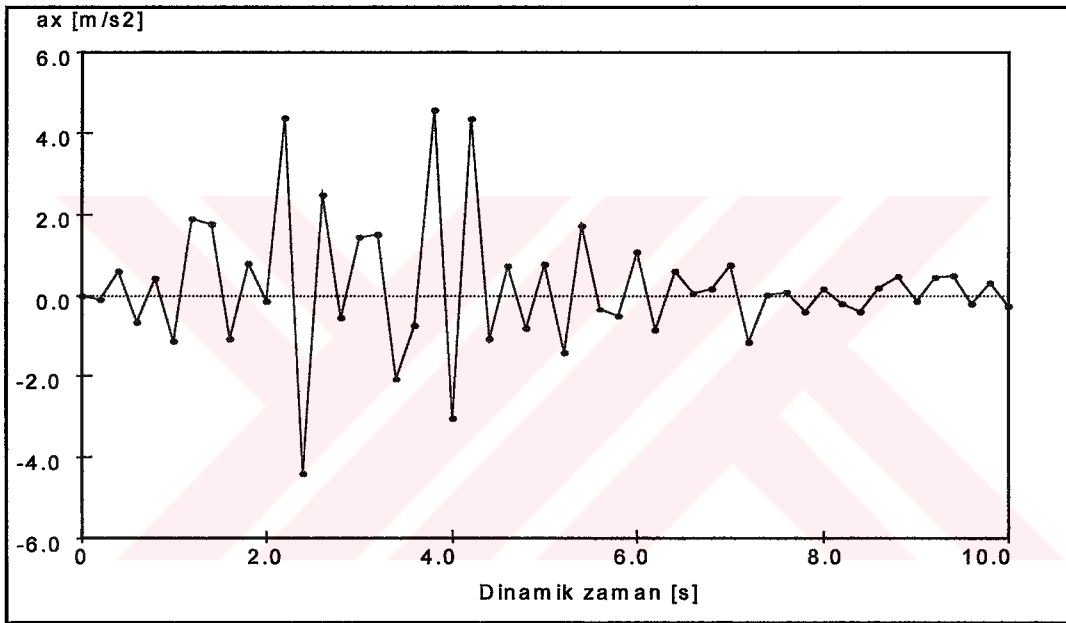
σ_{vo} = Düşey efektif gerilme.

Jet grout kolonları ile iyileştirme yapılmamış modelde üst tabakanın sıvılaşma potansiyelini araştırmak amacı ile dinamik analizler yapılmıştır. Dinamik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri statik analizlerde verilenlerle aynı olup Çizelge 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 'de verilmiştir. Sistemin (zemin ortamı + jet grout kolonlar + radye temel) dinamik etkiler karşısında sönümü program tarafından Rayleigh sönüm faktörleri şeklinde dikkate alındığından yapılan analizlerde bunlar $\alpha=\beta=0.01$ olarak seçilmiştir (Bakınız Bölüm 4.5.2).



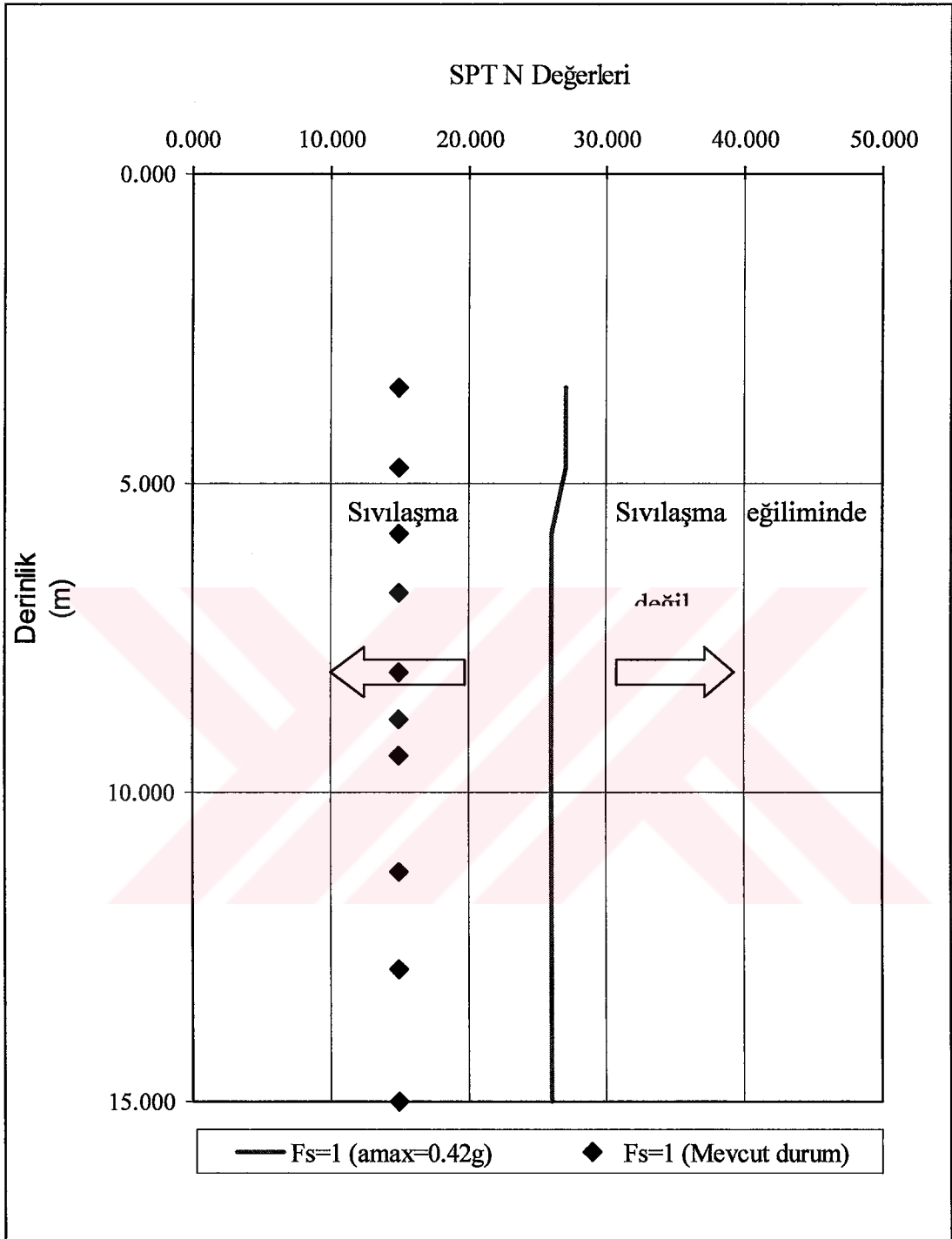
Şekil 5.6 Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan CSR ile (N_1)₆₀ ilişkisi (Youd & Idriss,1997).

USGS tarafından 1989'da kaydedilen gerçek bir depremin (Loma Prieta) ivme kaydı analizlerde kullanılmıştır. Modelde deprem etkisinin yaratılması için modelin alt sınırında deplasmanlar tanımlanarak girdi olarak kullanılan deprem kaydı belli bir değere ölçeklendirilmiştir. Oluşturulan bu yer değiştirmelerin yatay bileşeninin değeri 0.027 m. düşey bileşeninin değeri ise 0 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu yer değiştirmeler zemin ıslahı öncesi durum için seçilen Loma Prieta depreminin ivme kaydı uygulandığında alt tabakanın en altındaki taban kayası üzerinde seçilen B noktasında $a_{\max}=4.111 \text{ m/s}^2$ (0.42g) olacak şekilde seçilmiştir. Yapılan çalışmalarda tüm modeller için modelin en altında B noktasında 10 saniye süre içinde meydana gelen yatay ivme değerleri Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7 Girdi olarak kullanılan ivme değişimi.

Gözönüne alınan bu deprem etkisi sonucunda zeminde oluşacak maksimum kayma gerilmesi değerleri (τ_{\max}) belirlenmiştir. Elde edilen bu τ_{\max} değerleri denklem 5.3'de yerine konularak farklı derinlikler için CSR_{denk} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu CSR_{denk} katsayıları Şekil 5.6'de yerine konularak bunlara karşı gelen zeminde sıvılaşmanın gözlenmemesi için zeminin sahip olması gereken SPT $(N_1)_{60}$ sınır değerleri bulunmuştur. Burada elde edilen SPT $(N_1)_{60}$ değerleri ile bizim sahip olduğumuz zemine ait SPT $(N_1)_{60}$ değerleri kıyaslanarak zeminin sıvılaşma sıvılaşmayacağı belirlenebilir.



Şekil 5.8 Üst tabakanın sıvılaşma potansiyelinin derinlikle değişimi.

Üst tabakaya ait SPT $(N_1)_{60}$ değerleri ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde olunan kayma gerilmesi oranlarından hesaplanan sıvılaşma potansiyeli güvenlik sayılarının ve sıvılaşma potansiyeline karşı güvenlik sayısının bire eşit olduğu yani sıvılaşma olayının gerçekleşmesi için sınır güvenlik sayısı değerlerinin derinlik boyunca değişimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.8'de $a_{max}=0.42g$ değerine karşılık gelen eğrinin sağ tarafı sıvılaşma olasılığının olmadığı kısmı sol tarafı ise bu ivme değeri altında sıvılaşma olayının görülebileceği SPT $(N_1)_{60}$ değerlerini göstermektedir. Modelde kullanılan kum tabakasında gözönüne alınan deprem etkisi sonucunda sıvılaşma olduğu Şekil 5.8'de görülebilmektedir.

5.6.2 Zemin Islahı Sonrası Durum

Zeminde sismik bir hareket sonucu meydana gelen maksimum kayma gerilmelerinde ki artış zeminin sıvılaşma riskini arttırmaktadır. Zeminde oluşacak bu τ_{maks} değerlerinde azalmaya neden olabilirsek zeminin sıvılaşma olasılığında da azalma olacağı aşikardır. Jet grout tekniği kullanılarak zemin içinde oluşturulan yüksek rijitlikli jet grout kolonlarının sıvılaşma üzerindeki azaltıcı etkisi de zeminde sismik bir hareket sonucu oluşacak kayma gerilmelerinde bir düşüşe neden olmasından kaynaklanmaktadır.

Sismik bir hareket sonucu jet grout kolonları arasında kalan zemin bloğunda oluşacak maksimum kayma gerilmesi değerinin azalmasının sebebi, bu kayma gerilmelerinin zemin bloğuna göre daha rijit olan jet grout kolonları üzerinde toplanacağı düşüncesidir. Kayma gerilmeleri dağılımındaki bu kabul yapı mekaniğindeki kabule çok benzer ve bu kabule göre çerçeve sistemlerinde oluşan maksimum momentler sistem içinde diğer elemanlara göre daha yüksek rijitliğe sahip olan elemanlarda toplanır. Bu mantıkla zemin içinde yer alan jet grout kolonları depremden dolayı oluşacak kayma gerilmelerine karşı koyabilecek mukavemete sahipse, kolonlar arasındaki zemin bölgelerinde daha düşük kayma gerilmeleri oluşacaktır.

Jet grout kolonları ile iyileştirme yapılan zeminlerde deprem sonucu oluşacak τ_{maks} değerlerinin zemin ıslahı öncesi duruma göre ne kadarını jet grout kolonlarının aldığını belirlemek amacı ile jet grout kolonları ile iyileştirme yapılan modellere Loma Prieta depreminin ivme kaydı uygulanmıştır.

Jet grout kolonları ara mesafesi sırasıyla $S=2.0$ m., $S=3.0$ m. ve $S=4.0$ m. olacak biçimde üç farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu üç model de zemin ıslahı yapılmamış ilk modelle aynı deprem etkisine maruz bırakılmıştır. Hesap aşamaları tamamlandıktan sonra

zemin içinde oluşturulan jet grout kolonlarının zemin üzerindeki iyileştirici etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla analizler sonucunda jet grout kolonları arasında kalan bölgede iyileştirme sonrası oluşan maksimum ivme değerleri zemin ıslahı öncesi durum ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.4’de görülen modelin en üst orta noktasında (A noktasında) oluşan maksimum yatay ivme değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5’den de anlaşılacağı gibi jet grout tekniği uygulandığında zemin iyileştirmesi öncesi duruma göre zemin yüzeyinde oluşan maksimum yatay ivme değerinde azalma gözlenmiştir.

Çizelge 5.5 Zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlar için zemin yüzeyinde seçilen A noktasında meydana gelen maksimum yatay ivme (a_{max}) değerlerinin A_r oranına bağlı değişimi.

Zemin Islahı	İyileştirme Sonrası Durum		
	$A_r=0,049$	$A_r=0,087$	$A_r=0,196$
Öncesi Durum			
$a_{max}=3.33 \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{max}=3.07 \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{max}=2.96 \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{max}=2.57 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Burada A_r , alan yer değiştirme oranı olup Denklem 5.4 yardımı ile hesaplanabilir.

$$A_r = \frac{A_{jg}}{A_{zemin}} = \frac{\left(\frac{\pi * D^2}{4} \right)}{S_1 * S_2} \quad (5.4)$$

Burada ;

A_r = Alan yer değiştirme oranı,

A_{jg} = Jet grout kolonu alanı,

A_{zemin} = Jet grout kolonları arasında kalan dikdörtgen bölgenin alanı,

S_1 = Jet grout kolonlarının x - doğrultusundaki aralık mesafesi, m.

S_2 = Jet grout kolonlarının x - doğrultusundaki aralık mesafesi, m.

D = Jet grout kolonunun çapı, m.

Maksimum yatay ivme değerlerinin yanın da zeminde meydana gelecek maksimum yatay hız değerlerindeki değişimi belirlemek amacı ile zemin yüzeyinde seçilen A noktasında (Şekil 5.4) elde edilen maksimum yatay hızlar Çizelge 5.6'de verilmiştir.

Çizelge 5.6 Zemin ıslahı öncesi ve sonrası durumlar için zemin yüzeyinde seçilen A noktasında meydana gelen maksimum yatay hız değerleri.

Zemin Islahı	İyileştirme Sonrası Durum		
Öncesi Durum	$A_r=0,049$	$A_r=0,087$	$A_r=0,196$
$V_{yatay}=0.259$ (m/s)	$V_{yatay}=0.225$ (m/s)	$V_{yatay}=0.208$ (m/s)	$V_{yatay}=0.188$ (m/s)

Elde edilen bu yatay hız değerlerinden de görüldüğü gibi zemin yüzeyinde iyileştirme sonrası yatay hız değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma miktarı jet grout aralığı birbirine yaklaştıkça artmaktadır.

Bunun yanında jet grout kolonları ile ıslah çalışması yapılan zeminde deprem sırasında oluşan maksimum relatif yatay deplasmanlar incelenmiştir. Hesaplanan bu deplasman değerleri zemin ıslahı öncesi durum ile kıyaslanmış ve jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapıldığında oluşacak maksimum yatay deplasmanlarda ıslah öncesindeki değerlere göre azalma olduğu saptanmıştır. Bu azalma miktarı A_r katsayısını artması ile de bağıntılı olarak değişmektedir.

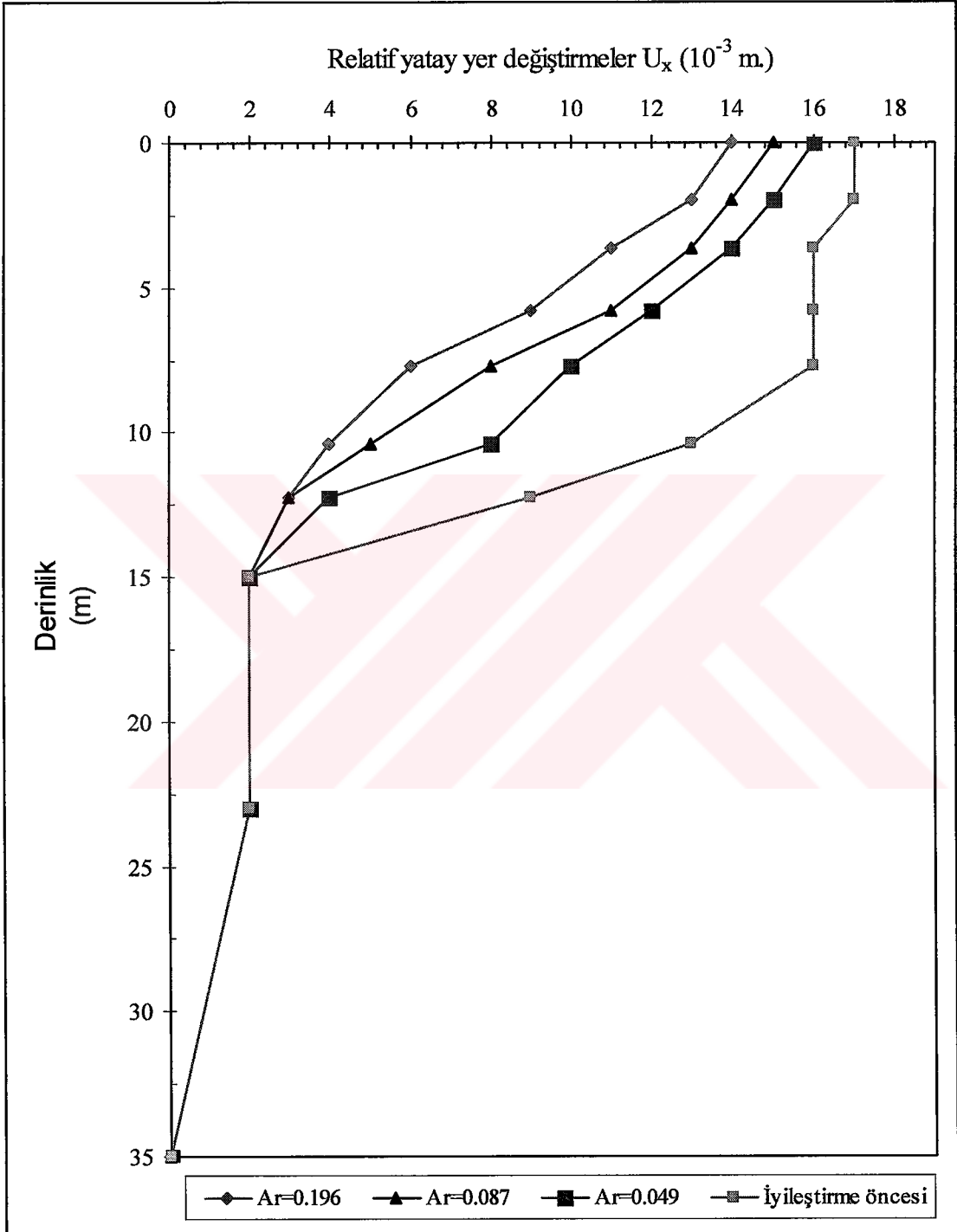
Diğer bir değişle çap sabit kalmak şartı ile jet grout kolonları arası mesafe azaldıkça yatay deplasman değerleri daha fazla azalmaktadır. Şekil 5.9'dan da görüldüğü gibi jet grout tekniği kullanıldığında oluşan maksimum yer değiştirmelerde zemin ıslahı öncesi duruma göre azalma gözlenmiştir. Jet grout kolonları zemin yüzeyinden başlayarak 15 m. derinliğe kadar oluşturulduklarından 15 m.' den sonra başlayan alt tabaka üzerinde yatay deplasmanları azaltıcı bir etkisi olmadığı Şekil 5.9'da da görülmektedir.

Jet grout kolonları ile zemin iyileştirilmesi yapılmış modellerde deprem etkisi altında oluşacak kayma gerilmelerinin ara zemin bloklarına göre daha yüksek rijitliğe sahip olan jet grout kolonlarında toplandığı gözlemlenmiştir. Bunun için farklı jet grout aralıkları için oluşturulan modeller üzerinde Şekil 5.4'de gösterildiği gibi A-A' kesiti alındığında nihai durum ($t=10$ s) için kayma gerilmesi değerleri iki farklı jet grout aralığı ($S=2.0$ m. ve $S=3.0$ m.) için Şekil 5.10'da sunulmuştur.

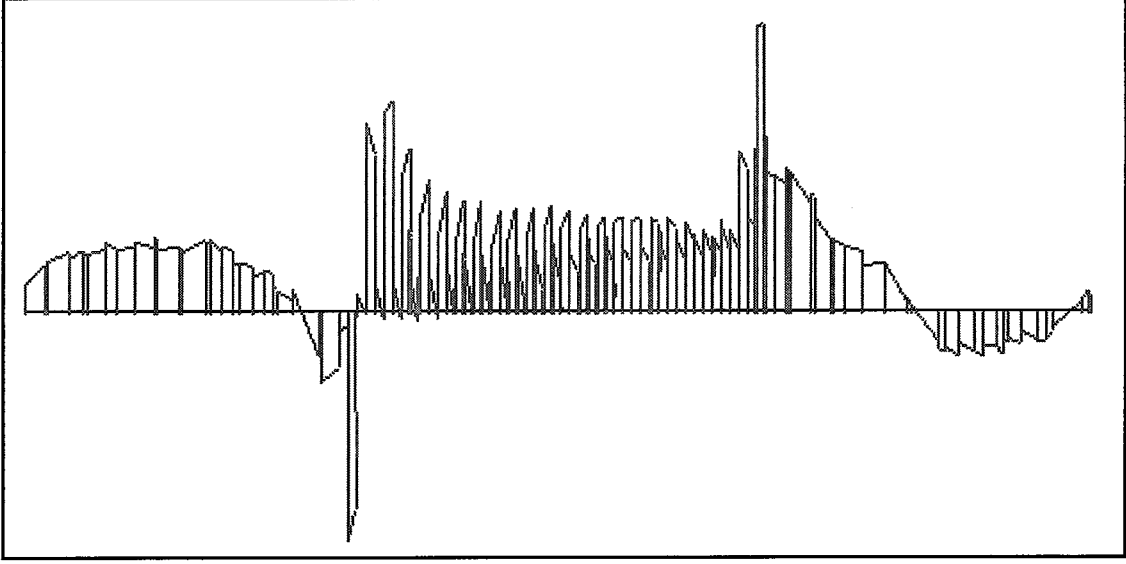
Bu kesitlerde jet grout kolonlarının olduğu bölgelerde oluşan kayma gerilmelerinin ara zemin bloklarında oluşan kayma gerilmelerine göre daha büyük değerler aldığı ortaya çıkmıştır. Jet grout kolonlarının daha sık bir şekilde oluşturulduğu (S aralığının daha küçük olduğu) modellerde jet grout kolonları ile ara zeminin alacağı kayma gerilmeleri arasındaki farkın arttığı, jet grout kolonlarının ara zemine göre daha fazla oranda kayma gerilmesi aldığı saptanmıştır.

Kesitlerde de görüldüğü gibi S aralığı azaldıkça ara zemin ile jet grout kolonu arasındaki kayma gerilmesi alma oranı büyümekte ve jet grout kolonları ara zemine göre daha yüksek kayma gerilme değerleri almaktadır. Bu nedenle bir deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin büyük bir kısmı bu jet grout kolonlarında toplanarak arada kalan zemin bloğunda zemin iyileştirmesi öncesi meydana gelen kayma gerilmelerine göre daha küçük kayma gerilmeleri oluşur. Bu durum ise τ_{maks} 'a bağlı olan CSR_{denk} katsayısında azalmaya neden olduğundan zeminin sıvılaşma olasılığında düşüş gözlenir.

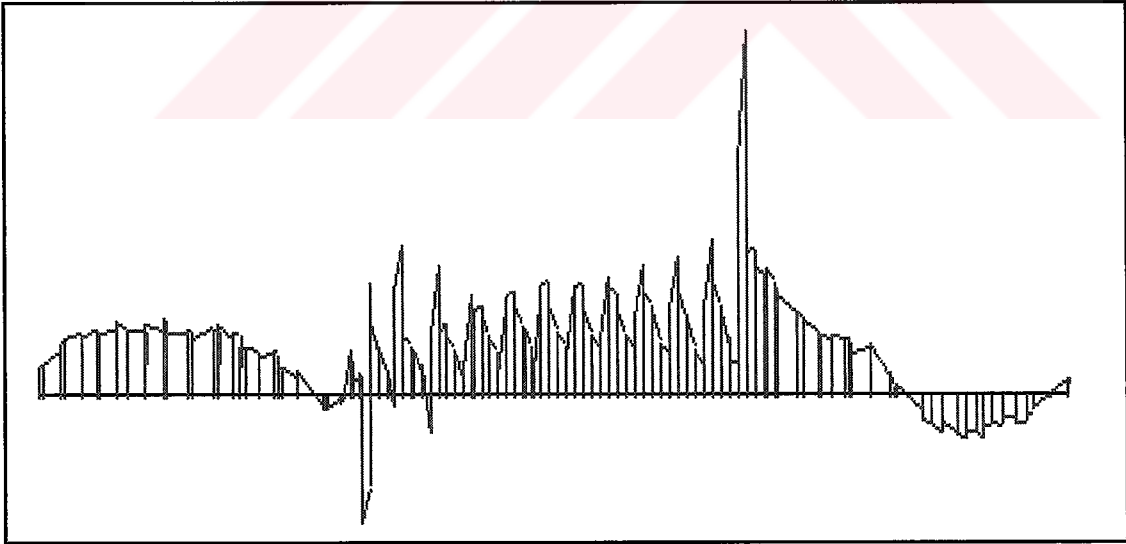
Derinlik arttıkça jet grout kolonlarının alacağı maksimum kayma gerilmesi değerlerinde zemin ıslahı öncesi durumdaki kayma gerilmesi değerlerine göre artış gözlenmektedir. Bu artış jet grout kolonları arasında kalan zemin bloklarında oluşacak kayma gerilmesi değerlerinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12). Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de R katsayısının farklı A_r değerleri için derinlik boyunca değişimi gösterilmiştir.



şekil 5.9 Dinamik yükler altında meydana gelen relatif maksimum yatay deplasman değerlerinin zemin ışlahı öncesi ve sonrası durumlarda değişimi.



a) $S=2.0$ m. aralıklı jet grout modeli.



b) $S=3.0$ m. aralıklı jet grout modeli.

Şekil 5.10 Farklı S aralığı için A-A' kesitinde görülen kayma gerilmeleri.

Derinlik boyunca değişim gösteren kayma gerilmesi azaltım katsayısı R , zemin ıslahı öncesi durumda oluşacak maksimum kayma gerilmesi değerlerinin ne kadarının zemin ıslahı sonrası jet grout kolonları arasında ki zemin bloklarında oluşabileceğini göstermektedir.

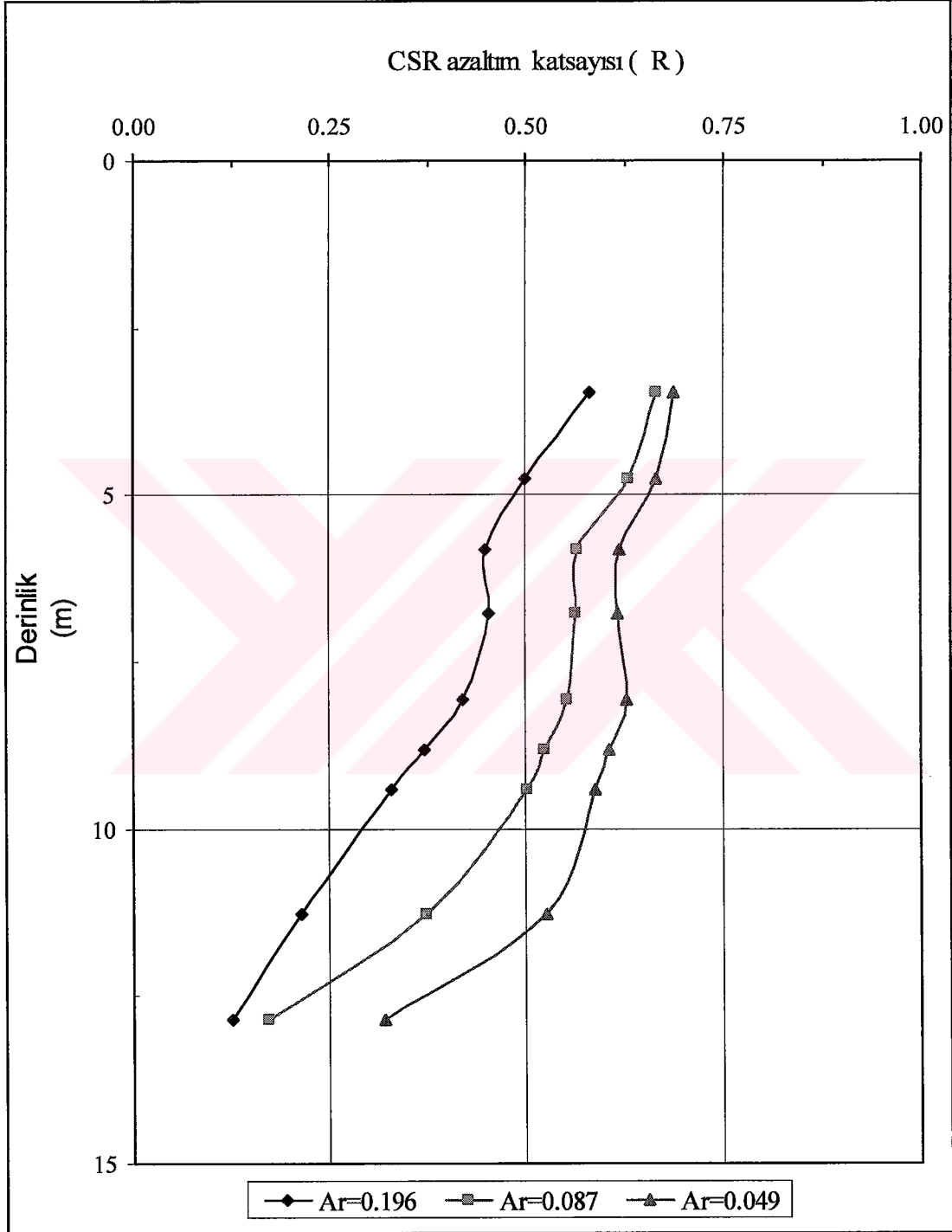
Jet grout kolonlarının dayanımının R katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile iki farklı G_r oranı için dinamik analizler yapılmıştır. Burada G_r oranı jet grout kolonlarının kayma modülünün zeminin kayma modülüne oranını göstermektedir. Analizler de G_r oranı olarak 15 ve 30 değerleri kullanılmıştır. Jet grout kolonlarının içinde yer aldıkları zemine göre rijitlik oranları arttıkça jet grout kolonlarının ara zemine göre alacakları kayma gerilmelerinde de artış gözlenmiştir. Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'in her birinde farklı A_r katsayıları için G_r oranına bağlı olarak R katsayısının zemin derinliği boyunca değişimi sunulmuştur.

Farklı A_r değerleri için elde edilen bu eğrilerden yararlanılarak R katsayısının derinlik boyunca değişiminin ortalamasını ifade eden R_{ort} katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu R_{ort} değerinin A_r oranına bağlı değişimi G_r oranının 15 ve 30 olduğu durumlar için Şekil 5.16'da sunulmuştur.

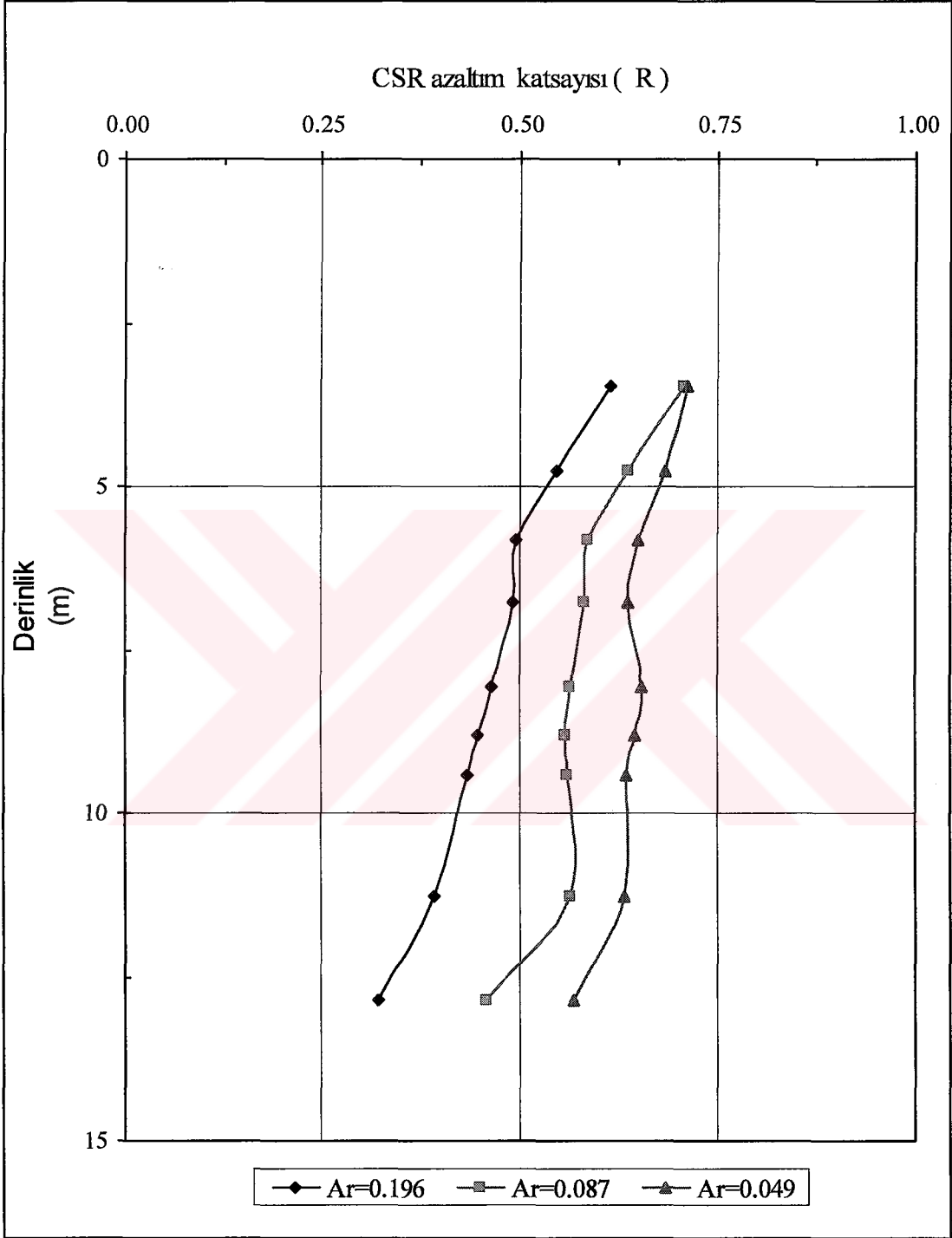
Jet grout kolonlarının çapları sabit kalmak şartı ile ara mesafeleri azaltıldığında A_r oranında artış gözlenmiştir. A_r oranında ki bu artışla birlikte ara zemin bloklarının alacağı maksimum kayma gerilmesi değerlerinde (zemin ıslahı öncesi duruma göre) bir azalma gözlenir . Buradan da anlaşılacağı üzere jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapıldığında zeminde oluşturulacak kolonlar ne kadar sık aralıklı ise iyileşme oranındaki artışta o kadar fazla olacaktır.

Jet grout kolonları ile iyileştirme yapıldığında zemin yüzeyinden başlayarak zemin derinliği boyunca zemin ıslahı öncesi durum ile aynı noktalarda ki maksimum kayma gerilmeleri karşılaştırıldığında jet grout kolonlarında maksimum kayma gerilme oranlarında artış olduğu belirlenmiştir. Farklı jet grout kolonu malzemeleri ve ara mesafeleri için bu artışın değişim oranı incelenerek zemin ıslahı sonrası oluşacak maksimum kayma gerilmelerinin yüzde kaçının bu jet grout kolonlarında ne kadarının ise arada kalan iyileştirilmemiş bölge

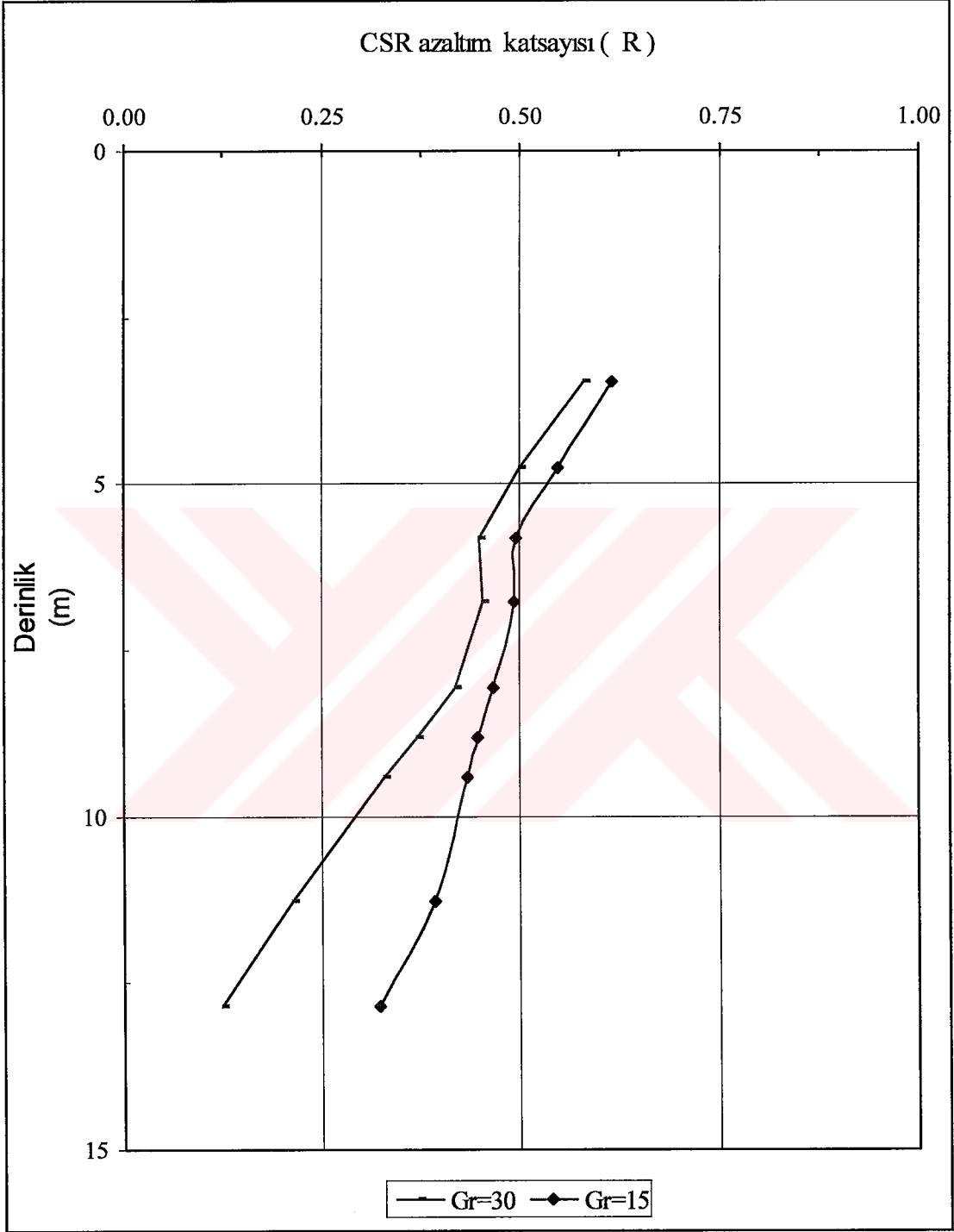
tarafından alınacağı incelenmiştir. Jet grout kolonları ile iyileştirme yapıldığında ara zeminde oluşacak maksimum kayma gerilmelerinin zemin ıslahı öncesi duruma göre elde edilen



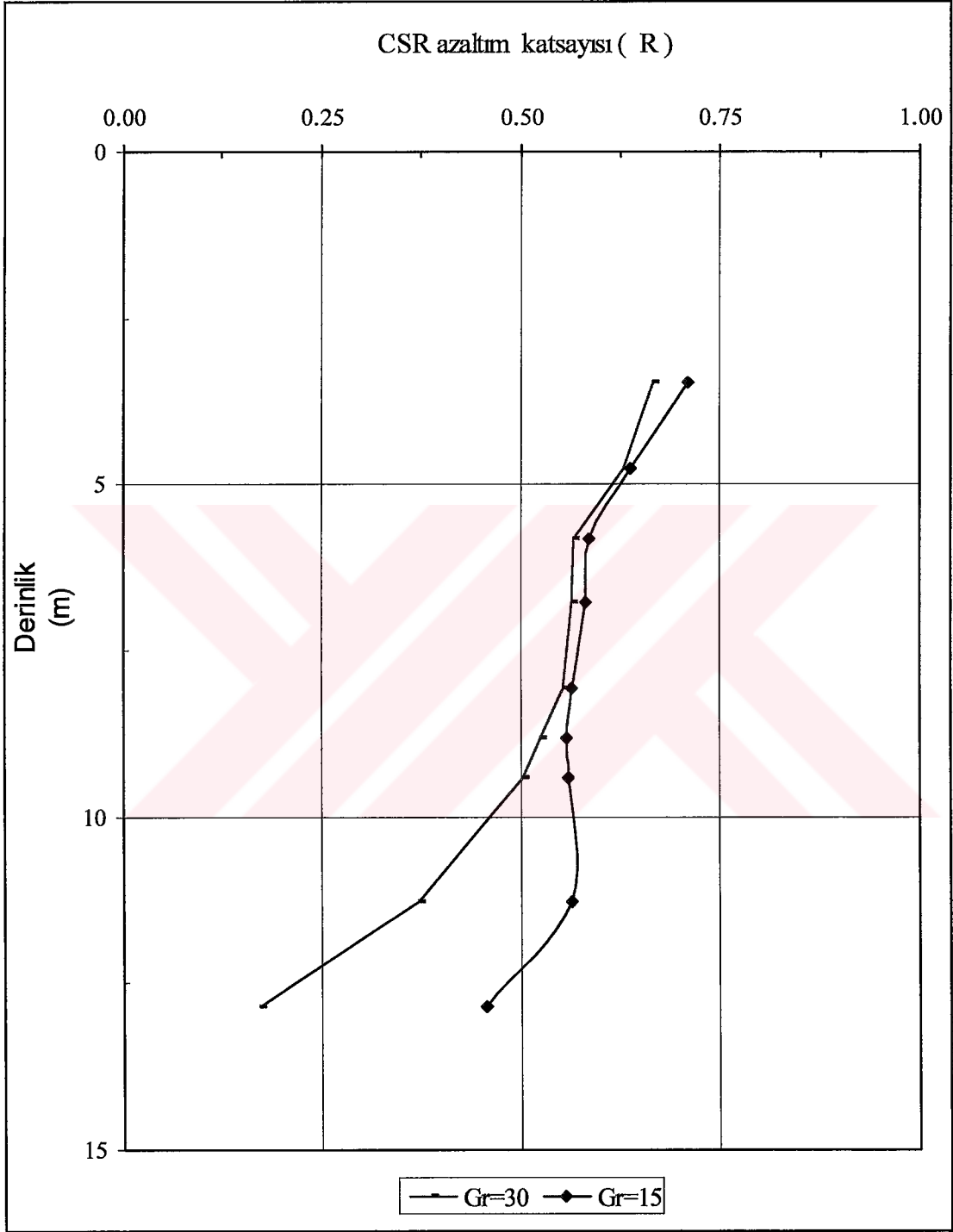
Şekil 5.11 Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış durumda farklı A_r değerleri için R katsayısının derinlikle değişimi ($G_r=30$ değeri için).



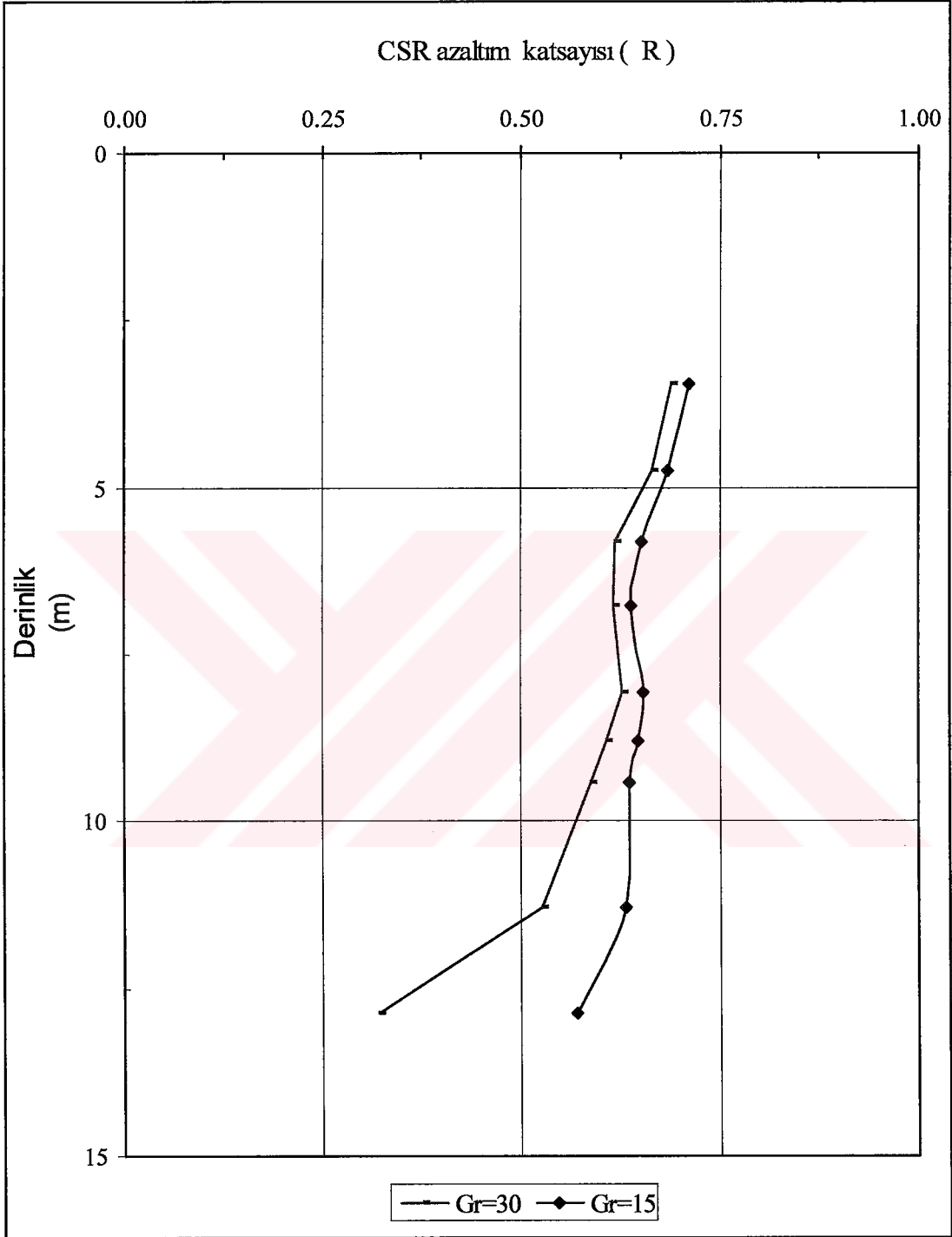
Şekil 5.12 Jet grout kolonları ile zemin ıslahı yapılmış durumda farklı A_r değerleri için R katsayısının derinlikle değişimi ($G_r=15$ değeri için).



Şekil 5.13 $A_r=0,196$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.



Şekil 5.14 $A_r=0,087$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.



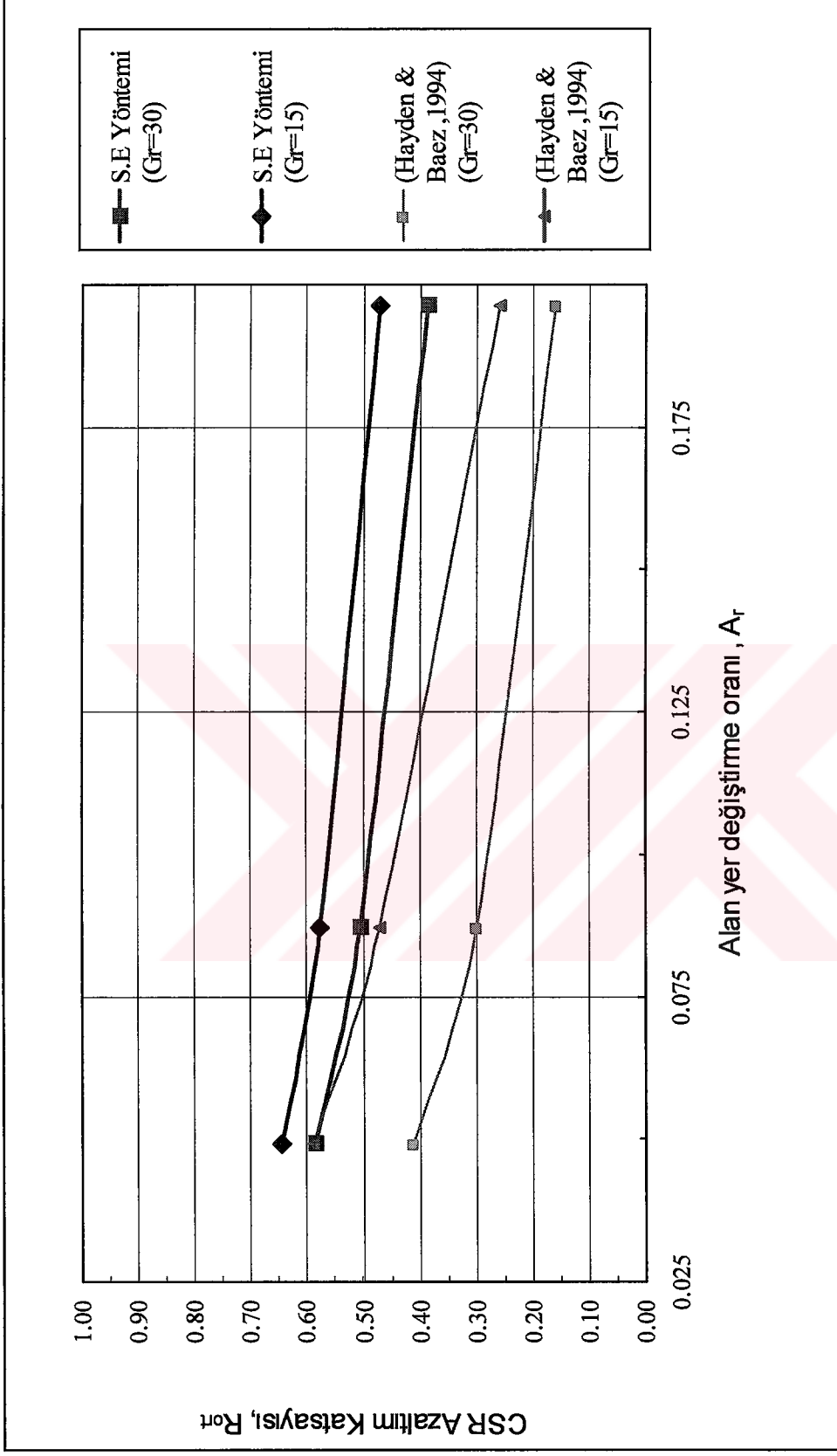
Şekil 5.15 $A_r=0,049$ değeri için R katsayısının rijitlik oranlarına göre derinlikle değişimi.

maksimum kayma gerilmelerinin ne kadarını alacağını gösteren kayma gerilmesi azaltım katsayısı (CSR azaltım katsayısı olarak da tanımlanabilir) Baez ve Martin'in (1993) taş kolonlar için elde ettiği sonuçlarla birlikte Şekil 5.16'da sunulmuştur. Şekil 5.16'da CSR azaltım katsayısının (R_{ort}), A_r katsayısına bağlı değişimi farklı G_r oranları için gösterilmiştir.

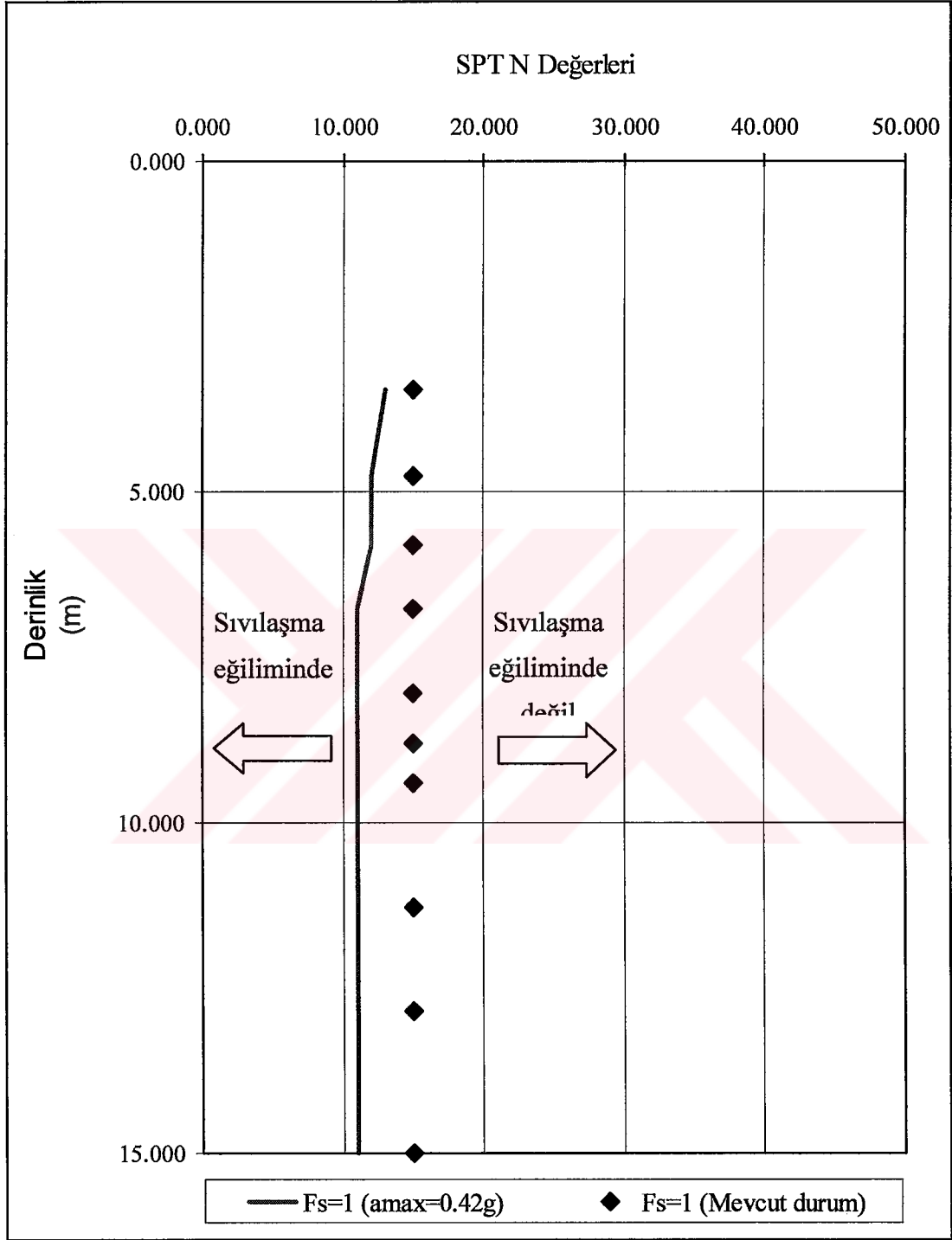
Şekil 5.16'dan da anlaşılacağı üzere jet grout kolonları birbirine yaklaştıkça ara zemin bloklarında alacağı maksimum kayma gerilme değerlerinde bir azalma gözlenmektedir bu azalmanın sebebi zemin içinde oluşturulan kolonların bir deprem durumunda alacakları kayma gerilmelerin artışından kaynaklanmaktadır. CSR azaltım katsayısı (R_{ort}) yalnız kolonlar arası mesafeye bağlı değildir. Jet grout kolonların zemine göre sahip oldukları dayanımda ki artış da doğrudan bu kolonların ara zemin bloklarına göre alacakları kayma gerilmelerinde bir artışa neden olmaktadır.

Zemin ıslahı sonucu ara zemin bloğunun alacağı maksimum kayma gerilmeleri ne oranda azalırsa CSR oranı da o oranda azalacağından sıvılaşma riskinde de bu değişime bağlı bir azalma gözlenir. Burada dikkate alınan deprem etkisi altında sıvılaşma gösteren üst tabakada $G_r=30$ için alan yer değiştirme oranı $A_r=0,196$ olacak şekilde jet grout kolonları oluşturulduğunda yeni CSR_{denk} değerleri zemin ıslahı öncesi durumda elde edilen CSR_{denk} değerlerinin %39'u kadardır. Elde edilen bu yeni CSR_{denk} değerleri kullanılarak farklı derinliklerde ki SPT (N_1)₆₀ vuruş sayılarının derinlikle değişimi Şekil 5.6'dan hesaplanmıştır. Hesaplanan bu SPT (N_1)₆₀ vuruş sayıları sıvılaşma potansiyelinin sınır değerleridir ($F_s=1$).

Elde edilen bu SPT (N_1)₆₀ sınır değerleri ıslah öncesi zeminin sahip olduğu değerlerle birlikte Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi daha önce sıvılaşma gözlenen üst tabaka sıvılaşma potansiyeli sınırının sağında yer alarak sıvılaşmaya karşı güvenli bir duruma gelmektedir.



şekil 5.16 CSR azaltım katsayısının A_r katsayısına bağlı değişimi.



Şekil 5.17 Zemin ıslahı sonrası sıvılaşma tahkiki.

5.7 Sonuçlar ve neriler

Bu çalışmada jet grout tekniği ile iyileştirme yapılacak zeminlerin statik ve dinamik yükler altında davranışı ve yapılan iyileştirmenin sağladığı katkının miktarını araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla nümerik analizlerini yapmak üzere sıvılaşma potansiyeli yüksek bir kum zemin tabakası ile onun altında sıvılaşma riski olmayan daha rijit bir zemin tabakasından oluşan bir arazi dikkate alınmıştır. Nümerik analizler için sonlu elemanlar yöntemini dikkate alan Plaxis adındaki geoteknik uygulamalar üzerine geliştirilmiş bir bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Statik analizlerde zeminin iyileştirme öncesi yaptığı oturmalarla jet grout kolonları belli aralıklara göre zemin içinde oluşturulduğu durumda yaptığı oturmalar hesaplanıp birbiri ile karşılaştırılmışlardır. Analizlerde elde edilen sonuçlara göre jet grout kolonlu zemin modellerinin yük altında yaptığı oturma değerlerinde zemin ışlahı öncesi duruma göre belirgin bir azalma olduğunu tespit edilmiştir. Bu azalma miktarı zemin özellikleri ile birlikte oluşturulan kolonların dayanımı, çapı ve ara mesafelerine bağlıdır.

Dinamik analizler neticesinde sismik bir yük altında jet grout kolonlarının sıvılaşma potansiyelini önlemedeki katkısı belirlenmiştir. Buna göre sıvılaşma potansiyeli yüksek bir zemin tabakasında jet grout kolonları uygulandığında deprem etkisi sonucu meydana gelecek kayma gerilmeleri ara zemin bloklarına göre daha rijit olan bu kolonlarda toplanmakta ve böylece ara zeminin bloklarında kayma gerilmesi değerleri azalmaktadır.

şekil 5.16'da CSR azaltım katsayısının A_r katsayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. şekil 5.16'dan da anlaşılacağı üzere A_r katsayındaki artışa bağlı olarak CSR azaltım katsayısında azalma gözlenmektedir. Burada CSR azaltım katsayısı zemin ışlahı sonrası ara zemin bloklarının zemin ışlahı öncesi durumdaki kayma gerilmelerinin ne kadarını alacağını belirtir.

şelil 5.17'de de mevcut durumdaki SPT $(N_1)_{60}$ vuruş sayıları ile zemin ışlahı sonucunda sıvılaşmanın oluşmayacağı SPT $(N_1)_{60}$ sınır değerlerinin derinlikle değişimi birlikte gösterilmiştir ($F_s=1$). şekil 5.8'de zemin ışlahı öncesi sıvılaşma gösteren st tabaka zemini şekil 5.17'de görüldüğü gibi sıvılaşma potansiyeli sınırının sağında yer alarak sıvılaşmaya karşı güvenli bir duruma gelmiştir.

Sonuç olarak jet grout kolonları ara zemin bloklarında zemin ıslahı öncesi duruma göre oluşacak kayma gerilmesi değerinde belirgin bir düşüşe neden olarak zeminin sıvılaşmasını engellemekle birlikte yatay deplasmanların da azalmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada elde olunan sonuçlar literatürle uyumlu olup bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerektiğine işaret etmektedir. Burada yapılan analizlerde iki boyutlu modeller kullanılmış ve bu modellerde tüm elemanlar (zemin+jgk + temel) için aynı sönüm oranları dikkate alınmıştır. Oysa analizlerde farklı ortamlar için farklı sönüm oranlarında üç boyutlu modellerin kullanılması sistem mekanizmasına daha uygundur. Ayrıca farklı deprem kayıtları ve diğer dinamik etkiler altında bu nümerik analizler gerçekleştirilmelidir.



KAYNAKLAR

Andrus, R.D., Stokoe, K.H., "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity," in Youd, T.L., Idriss, I.M. (editors), *Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, pp. 89-128, 1997.

Arulmoli, K., Arulanandan, K., Seed, H.B., "New method for Evaluating Liquefaction Potential," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 111, no.1, January 1985.

Bakır B. S., Yılmaz M.T., (2002) "Sıvılaşmanın Sismik Bina Performansı Üzerindeki Etkileri: Adapazarı Örneği", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 353-362.

Bazaraa, A.R.S. (1967) "Use of Standard Penetration Test for estimating settlements of shallow foundations on sand", PhD, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois.

Bell, A.L., "Jet Grouting," *Ground Improvement*, pp. 149-174, 1993.

Botto, G., "Developments in the Techniques of Jet Grouting," *Ciclo di Conferenze di Geotechnica*, Torino, 1985.

Booth, E. (editor), *Concrete Structures in Earthquake Regions*, Longman Scientific & Technical, 1994.

Candoğan, A., Yılmaz, E., Sağlamer, A. (2000) "Jet-Grout Tekniği İle Yapılan Zemin İyileştirilmelerinde Kalite Kontrolüne Yönelik Testler: Gebze/Adapazarı ve İzmir Doğalgaz Afşin-Elbistan B Termik Santralleri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 301-309.

Çetin K.Ö., (2001) "Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı", Yrd. Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Clayton, C.R.I. (1990) "SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance", *Ground Engineering*, 23(10), pp. 35-43.

Covil, C.S., Skinner, A.E., "Jet Grouting: A review of the Some of the Operatind Parameters thet form the basis of the Jet Grouting Process," *Grouting in the Ground*, pp. 605-627, London, 1994.

Croce, P., Flora, A., "Analysis of Singel Fluid Jet Grouting," *Geotechnique*, pp. 739-748, February 2001.

Decourt, L. (1990) "The Standard Penetration Test: State-of-the-Art-Report", *Norwegian Geotechnical Institute Publ.*, No. 179, Oslo, Norway.

Durgunoglu H.T., Kulaç H.F., Oruç K., Yıldız R., Altuğu T., Emrem C., (2002) "Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout yöntemi İle Zemin Islahına Ait Vaka Analizi", *Zemin Mekaniği ve Temel*

Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 614-623.

Durgunoğlu,H.T., Togrol,E. (1974) "Penetration testing in Turkey: State-of-the-art report", *ESOPT*, p. 137.

Durgunoglu,H.T., Sancio,R.B., Bray.,J.D., Karadayılar,T. ve Önalp,A. (2000) "Sıvılaştırılmış Zeminlerde Zemin davranışı Modellemesinde Kullanılan Zemin Araştırma Yöntemleri-Adapazarı Örneği", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, İTÜ, İstanbul, 26-27 Ekim 2000, s. 391-398.

Eurocode 8, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, European Committee for Standardization, Brussels, 1994.

Farrar,J.A., Nickell,J., Alien,M.G., Goble,G., and Berger,J. (1998). "Energy loss in long rod penetration testing.- Terminus Dam Liquefaction Investigation", *Proc. of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III Specialty Conference, ASCE GSP*, No. 75, pp.554-567.

Gökalp A., Düzceer R., (2002) "Jet Grout Uygulaması için Kalite Kontrol, İş sağlığı ve Güvenliği Denetimi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 574-583.

Idriss, I.M., "Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice," Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.1, San Francisco, pp. 255-320, 1985.

Imai, T., Tonouchi, K., "Correlation of N value with S-wave Velocity and Shear Modulus," Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Hungary, pp.24-27,1982.

Ishira, K., Yoshimine, M., "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes," *Soil and Foundations*, vol. 32, pp. 173-188, 1992.

Ishihara, K., "Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes," *Geotechnique*, vol. 43, pp. 351-415,1993.

Ishihara, K., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press, Oxford, 1996.

Keller Group of Companies, *The Soilcrete – Jet Grouting Process Brochure*, 2001b.

Keskin S.N., Çimen Ö., (2002) "Zemin İyileştirilmesinde Jet-Grout Yöntemi Kullanılması Üzerine Bir Uygulama", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 641-648.

Kovacs, W.D., Salomone, L.A., and Yokel, F.Y. (1981) "Energy measurement in the Standard Penetration Test", U.S. Department of Commerce and National Bureau of Standards, Washington, D.C.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V., "Overburden Correction Factors for SPT in Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 112, pp. 373-377, March 1986.

Lunardi, p., "Ground Improvement by means of Jet Grouting," *Ground Improvement*, pp. 65-85, 1997.

Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Spon Press, London, 2001.

Miki, G., Nakanishi, W., "Technical Progress of Jet Grouting Method and Its New Type," *Proceedings of the International Conference on insitu soil and rock reinforcement*, Paris, pp. 195-200, 1984.

Mitchell, J.K., Tseng, D.J., "Assessment of Liquefaction Potential by Cone Penetration Resistance," in Duncan, J.M. (editor), *Proceedings of H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Berkeley, 1988.

National Research Council (NCR), *Liquefaction of Soils During Earthquakes*, National academy Press of US, Washington, 1985.

Olsen, R., "Liquefaction Based on the Cone Penetrometer Test," in Youd, T.L., Idriss, I.M. (editors), *Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, pp. 225-272, 1997.

Önalp A., Arel E., (2002) "Siltlerin Sıvılaştırma Yeteneği: Adapazarı Kriteri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 363-372.

Ozsoy, M.B. (2002) "The Mitigation of Liquefaction by Means of Soil Improvement Techniques", PhD, Dept. of Civil Engineering, Bogazici University.

Poulos, S.J., Castro, G., Frabce, J.W., "Liquefaction Evaluation Procedure," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 111, pp. 772-792, June 1985.

Roberson, P.K., Campanella, R.G., Wigthman, A., "SPT -CPT Correlation," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 109, pp. 1449-1459, November 1985.

Seed, H.B., Idriss, I.M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 97, pp. 1249-1273, September 1971.

Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 109, pp. 458-482, March 1983.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M., “Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations,” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 111, pp. 1425-1445, december 1985.

Seed, H.B., De Alba, P., “Use of SPT and CPT Tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Soil,” *Proceedings of Institut’86*, ASCE, 1986.

Sivrikaya O., Toğrol E., (2002) “Standart Penetrasyon Deneyinin Türkiye’deki Uygulaması”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim 2002, s. 158-167.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve soyadı	İlker ERKİN	
Doğum tarihi	21.01.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1997	Fenerbahçe Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

Çalıştığı kurumlar

2002-2003 Kasktas A.S.

