

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JET GROUT KOLONLARIN SEM ANALİZİ VE ETKİN
PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU**

Erkan YAĞIZATLI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA

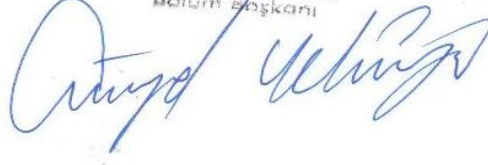
2012

Doç.Dr.H.Murat ALĞIN danışmanlığında, Erkan YAĞIZATLI' nın hazırladığı
“**Jet Grout Kolonların Sem Analizi Ve Etkin Parametrelerin Optimizasyonu**”
konulu bu çalışma 27 /01/ 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr.H.Murat ALĞIN


Doç.Dr.H.Murat ALĞIN
Harran Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği
Bölüm Başkanı


Üye : Yrd. Doç. Dr. Güzel YILMAZ



Üye : Yrd. Doç. Dr. Celal AĞAN



**Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre
Düzenlendiğini Onaylarım**


Prof. Dr. Mehmet CİCİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere
tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
T E Ş E K K Ü R.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Materyal.....	17
3.1.1. Jet grout zemin enjeksiyonu uygulama tekniği.....	17
3.1.2. Jet grout kolonların kullanım alanları.....	18
3.1.3. Jet grout yönteminin proje esasları.....	19
3.1.4. Jet grout metodunun uygulaması.....	21
3.1.4.1. Delgi aşaması.....	23
3.1.4.2. Enjeksiyon aşaması.....	24
3.1.4.3. Ön jet grout.....	26
3.1.5. Jet Grout Teknikleri.....	26
3.1.6. Jet Grout Yönteminin Çalışma Parametreleri.....	31
3.1.6.1. Enjeksiyon Basıncı.....	32
3.1.6.2. Dönme ve Çekme Hızı.....	33
3.1.6.3. Dozaj.....	33
3.1.7. Jet Grout Yöntemi Ekipmanı.....	35
3.1.7.1. Delgi Makinesi.....	37
3.1.7.2. Pompa Ünitesi.....	37
3.1.7.3. Mikser Ünitesi.....	38
3.1.7.4. Çimento Silosu.....	39
3.1.7.5. Monitör.....	39
3.1.8. Kalite Kontrol ve Testler.....	40
3.1.8.1. Karot Numunelerinin Alınması.....	40
3.1.8.2. Kazık Yükleme Deneyi.....	41
3.1.8.3. Kazık Süreklilik Deneyi.....	43
3.1.8.4. Çap Kontrolü.....	45
3.1.8.5. Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu.....	45
3.1.9. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Kapasitesi.....	46
3.1.9.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü.....	47
3.1.9.2. Kohezyonlu Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü.....	50
3.1.9.3. Homojenleştirme Yöntemiyle Kompozit Zeminlerin Sayısal Analizinin Yapılması.....	51
3.1.10. Zemin Sıvılaşması ve Jet Grout Yöntemi.....	58
3.1.10.1. Zemin Sıvılaşması.....	58
3.1.10.2. Sıvılaşma ve Etkisine Karşı Alınabilecek Tedbirler.....	59
3.1.10.3. Sıvılaşma ve Etkisine Karşı Jet Grout Yönteminin Kullanılması.....	60
3.2. Yöntem.....	60
3.2.1. Optimizasyon.....	60
3.2.2. Varyans Analizi (ANOVA).....	61
3.2.3. Regresyon Analizi.....	62
3.2.3.1. Basit Doğrusal Regresyon Analizi.....	62
3.2.3.2. Çoklu doğrusal regresyon.....	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	70
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizler.....	70
4.2. Geometrik Model Özellikleri.....	71
4.3. Veri Analizi.....	82
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR.....	96

ÖZGEÇMİŞ	100
ÖZET	101
SUMMARY	102

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JET GROUT KOLONLARIN SEM ANALİZİ VE ETKİN
PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU**

Erkan YAĞIZATLI

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

**Danışman :Doç. Dr. H.Murat ALĞIN
Yıl : 2012, Sayfa :102**

Jet grout yöntemi, geoteknik mühendisliğinde sıkça karşılaşılan zemin problemlerine karşı etkili ve pratik bir zemin iyileştirme şeklidir. Bu çalışma kapsamında, jet grout yönteminin kullanıldığı alanlar, uygulama teknikleri, uygulama aşamasında kullanılan ekipmanlar, yöntemin avantajları, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri ve çalışma parametreleri incelenmiştir. Plaxis 2D programı kullanılarak zemin içerisinde jet grout kolonları modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizler zemin parametrelerinin farklı değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulmuştur. İstatistiksel analizlerin yapılmasındaki amaç zemin modelinde deplasman ve gerilme faktörleri üzerinde etkili olan zemin parametrelerinin tespiti ve bu parametrelerin optimizasyonudur. Optimizasyon neticesinde etkin parametrelerin maksimum ve minimum sınır koşulları saptanmıştır. Optimizasyon sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarının sayısal analiz sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarına büyük oranda yakınlığı, yapılan kıyaslama sonucunda görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: İyileştirme, jet grout, optimizasyon, plaxis, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

MSc Thesis

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF JET GROUT COLUMNS AND OPTİMİZATION OF EFFECTİNG PARAMETERS

Erkan YAĞIZATLI

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Advisor : Assoc. Prof. Dr. H.Murat ALĞIN
Year : 2012, Page :102**

Jet grouting method is frequently used in geotechnical engineering as an effective and practical way of soil improvement. This disertation focuses on this method's application techniques, equimments, implementation stages, advantages, analysis tecniques, and operating parameters. Additionally, finite element method is applied on jet grout column configuration using plaxis 2D and the verious parameters affecting the jet grout column design are investigated. The results are evaluated statistically in terms of the ground displacement and extreme stress values. The statistical optimizations have been performed using maximum and minimum limitations and optimization goals. The results indicated that the statistical analysis and optimization were performed adequately since the resulting equations provide good results to a large extent. Consequently the affecting parameters of jet grout design are determined in terms of the configuration assumed in this study.

KEY WORDS: İmprovement, jet grout, optimization, plaxis, finite element method

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu yüksek lisans tez çalışmasında katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr.H.Murat ALGIN' a, çalışmalarım esnasında beni sürekli olarak çalışmaya teşvik eden Babam'a, ayrıca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Gerilme dağıtım parametresi - eshelby tensörü ilişkisi (Omine vd., 1993).....	4
Şekil 2.2. Deney düzeneği (Omine vd. 1993).....	5
Şekil 2.3. Elastisite modülü – Tek eksenli basınç mukavemeti ilişkisi (Trevi, 1994).....	5
Şekil 2.4. Elastisite modülü – Tek eksenli basınç mukavemeti ilişkisi (Trevi, 1994).....	6
Şekil 2.5. Homojenleştirme metodu hesap algoritması (Omine vd. 1999).....	8
Şekil 2.6. Jet grout uygulaması zemin kesiti (Wong vd., 1999).....	8
Şekil 2.7. İslah öncesi ve ıslah sonrası inklinometre ölçümleri (Wong vd., 1999).....	9
Şekil 2.8. Kolon numunelerinin basınç dayanımları (Bell vd., 2003).....	12
Şekil 2.9. Önerilen hesap algoritması (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).....	12
Şekil 2.10. Jet kolonların mukavemet aralıkları (Doğu vd., 2006).....	15
Şekil 3.1. Jet grout sistemi ve yastık tabaka şematik gösterimi (Bakım, 2007).....	18
Şekil 3.2. Jet grout yöntemi uygulama aşaması (Özden, 2010).....	22
Şekil 3.3. Kademeli delgi matkabı (Melegary ve Garassino, 1997).....	23
Şekil 3.4. Kademesiz delgi matkabı (Melegary ve Garassino, 1997).....	24
Şekil 3.5. Enjeksiyon aşaması (Bakım, 2007).....	25
Şekil 3.6. Jet 1 tekniği (Yıldız, 2011).....	27
Şekil 3.7. Jet 2 tekniği (Yıldız, 2011).....	28
Şekil 3.8. Jet 3 tekniği (Yıldız, 2011).....	28
Şekil 3.9. Süper jet tekniği (Osmanoğlu, 2007).....	29
Şekil 3.10. Standart yöntemle oluşturulmuş kolonlar (Osmanoğlu, 2007).....	30
Şekil 3.11. Süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar (Osmanoğlu, 2007).....	30
Şekil 3.12. Basınç-Bekleme süresi-kolon çapı ilişkisi (Melegary ve Garassino, 1997).....	32
Şekil 3.13. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi (Melegary - Garassino, 1997).....	35
Şekil 3.14. Jet grout ekipmanı (Yıldız, 2011).....	36
Şekil 3.15. Delgi makinesi (Küsin, 2009).....	37
Şekil 3.16. Pompa ünitesi (Yıldız, 2011).....	38
Şekil 3.17. Mikser ünitesi (Yıldız, 2011).....	38
Şekil 3.18. Çimento silosu (Bakım, 2007).....	39
Şekil 3.19. Karot numunelerin alınması (Yıldız, 2011).....	40
Şekil 3.20. Karot numune örneği (Yıldız, 2011).....	41
Şekil 3.21. Kazık yükleme deneyi (Düzceer, 2004).....	42
Şekil 3.22. Kazık süreklilik deneyi şeması (Yıldız, 2011).....	44
Şekil 3.23. Kazık süreklilik testi cihazı (Yıldız, 2011).....	44
Şekil 3.24. Jet grout kolonlarında çap kontrolü (Yıldız, 2011).....	45
Şekil 3.25. Proje kriterlerinin sahada kalibrasyon ve optimizasyonu (Durgunoğlu, 2004).....	46
Şekil 3.26. Gerilme dağıtım parametresi - Eshelby tensörü ilişkisi (Omine vd., 1999).....	52
Şekil 3.27. Nümerik analiz ile önerilen eşitlik sonuçlarının karşılaştırması (Adams –Doner, 1967).....	53
Şekil 3.28. Kazık şeklinde kolonlar ile iyileştirilmiş zemin.....	54
Şekil 3.29. Katkı ve matris gerilme - Deformasyon eğrileri (Omine vd., 1999).....	56
Şekil 3.30. Basit doğrusal regresyon doğrusu.....	64
Şekil 3.31. Gerçek ve tahmin edilen regresyon doğruları.....	65
Şekil 4.1. Jet grout sistemi geometrik modeli.....	78
Şekil 4.2. Yeraltı su seviyesi.....	79
Şekil 4.3. Geometrik model yük değerlerinin girilmesi.....	79
Şekil 4.4. Geometrik model zemin atama.....	80
Şekil 4.5. Zemin modeli ve birim ağırlık parametlerinin girilmesi.....	80
Şekil 4.6. Zemin parametlerinin girilmesi.....	81
Şekil 4.7. Zemin modelinin yüklemmeden sonraki toplam deplasman değeri.....	81
Şekil 4.8. Zemin modelinin yüklemmeden sonraki toplam gerilme değeri.....	82
Şekil 4.9. Zeminin kohezyon değerleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi.....	84
Şekil 4.10. Jet grout kolon mesafeleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi.....	85
Şekil 4.11. Zeminin kohezyon değerleri ile dolgu kalınlığı değerlerinin oturmaya etkisi.....	88

Şekil 4.12. Jet grout kolon mesafeleri ile gerilme değerlerinin oturmaya etkisi	89
Şekil 4.13. Jet grout kolon mesafeleri ile dolgu kalınlığı değerlerinin oturmaya etkisi	91
Şekil 4.14. Zemin kohezyon değerleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Su - çimento oranına bağlı kolon dayanımları (Bauman, 1984)	3
Çizelge 3.1. Jet grout yöntemi imalat parametreleri (Lunardi, 1977)	31
Çizelge 3.2. Zemin cinsi - fJG - E / fJG ilişkisi (Durgunoğlu, 2004).....	34
Çizelge 3.3. Terzaghi taşıma gücü katsayıları	48
Çizelge 3.4. Kazık malzemesi - δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki.....	49
Çizelge 3.5. Çoklu regresyon modelinde verilerin gösterimi	67
Çizelge 3.6. Çoklu regresyonda varyans analiz tablosu	69
Çizelge 4.1. Zemin özellikleri	72
Çizelge 4.2. Plak özellikleri.....	72
Çizelge 4.3. Farklı zemin parametrelerine bağlı olarak elde edilen oturma ve gerilme değerleri .	72
Çizelge 4.4. Varyans analizi sonuçları	82
Çizelge 4.5. Varyans analizi sonuçları	86
Çizelge 4.6. Değişkenlerin arzu edirlilik fonksiyonlarına göre optimizasyon sonuçları	90
Çizelge 4.7. Optimizasyon sonuçları - Sayısal analiz sonuçları kıyas tablosu.....	93

SİMGELER DİZİNİ

A	Kolon uç alanı
Ab	Kolon taban alanı
b	Gerilme dağıtım parametresi
B	Jet Grout kolon aramesafesi
C	Jet grout çapı
C	Kohezyon
c*	Matris kohezyonu
c1	Kazık ucundaki drenajsız kayma mukavemeti
c2	Kazık çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti
cus	Katkı kohezyonu
E	Homojenleştirilmiş malzeme elastik modülü
E	Püskürtme enerjisi
E*	Matris elastik modülü
Ejet	Jet grout kolonlarının elastisite modülü
Eort	Zeminin ortalama elastisite modülü
Es	Herhangi bir derinlik için zeminin elastisite modülü
Es	Katkı elastik modülü
g	Yerçekimi ivmesi
G*	Matris kayma modülü
Gij	Homojenleştirilmiş malzeme kayma modülü
Gs	Katkı kayma modülü
h	Hidrostatik düşü
K	Homojenleştirilmiş malzeme hacimsel esneklik modülü
K*	Matris hacimsel esneklik modülü
Ks	Katkı hacimsel esneklik modülü
L	Kolon boyu
Nq	Taşıma gücü faktörü
P	Püskürtülen harcın basıncı
pv	Düşey basınç
Q	Nozzledan çıkan enjeksiyon malzemesi debisi
Qd	Kolon taşıma gücü
Qf	Adhezyon ile taşıyabileceği yükün
Qu	Kolon ucunun maksimum taşıyabileceği yük
R ²	Çoklu belirtme katsayısı
SD	Serbestlik derecesi
V	Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı
Wk	Kolon ağırlığı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
δ	Zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı
v	Poisson Oranı
v*	Matris poisson oranı
vij	Homojenleştirilmiş malzeme poisson oranı
vs	Katkı poisson oranı
φ	İçsel sürtünme açısı

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılda başlayan ve günümüzde de süren hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gelişmiş ülkelere benzer şekilde Türkiye'de de yapı alanlarının hızla azalmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak her geçen gün yeni yapılaşma alanlarının açılması zorunlu hale gelmiştir. Bu yeni açılan alanların arasında, zaman zaman geoteknik açıdan yapılaşmaya uygun olmadığı kanıtlanmış, bir başka deyişle taşıma gücü zayıf olan temel zemin özellikleri gösteren alanların da yapılaşmaya açıldığı görülmüştür. Yeni bir yapının inşasına veya mevcut bir yapının güçlendirilmesine, yapının bulunduğu zeminin araştırılmasından sonra başlanmalıdır. Zemin etütleri sonucunda taşıma kapasitesi düşük olan zeminlerin güçlendirilmesi, eski ve kontrolsüz sıkıştırılmış dolgu sahalarının iyileştirilmesi ve yer altı yapılarının yapımında karşılaşılan zemin ile ilgili problemlerin giderilmesi gibi gereksinimler, temel zeminini iyileştirme konusunda yeni yöntem ve tekniklerin geliştirilmesini ve uygulamasını gerekli kılmıştır. Bu gereksinimlere dayalı olarak ve teknolojinin de ilerlemesi ile yeni yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerden bir tanesinde jet grout yöntemidir.

Jet Grout yöntemi ilk olarak 70'li yılların başında Japonya'da denenmiş, başarılı olmuştur. Yine 70'li yılların sonunda İtalya'da ve diğer Avrupa ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizdeki ilk uygulaması 1986 yılında Haliç Kollektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında yapılmıştır (Mut, 1987). Zemin ıslahı, ana işlev olarak zeminin mekanik mukavemet değerlerini arttırmayı hedefler, dolayısıyla taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artar, geçirgenlik azalır. Jet grout yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi değişik karakterdeki çok geniş ve farklı türdeki zeminlerin ıslahı mümkün olmaktadır. Bu yöntemde diğer klasik enjeksiyon sistemlerine göre farklı olarak uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi, geçirgenlik gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla işin başında maliyetin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşturulmuştur. Birinci bölümde konu tanıtılmıştır. İkinci bölümde jet grout yöntemi ile ilgili literatür taramaları özetlenmiştir. Üçüncü bölümde yöntemin kullanıldığı yerler, yapım aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve çalışma parametreleri ile bazı istatistiksel kavramlara (optimizasyon, regresyon analizi, varyans analizi) yer verilmiştir. Dördüncü bölümde Plaxis 2D programı kullanılarak zemin içerisinde jet grout kolonları modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler yapılarak zemin modelinin oturma ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Sayısal analizler zemin parametrelerinin farklı değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulmuştur. İstatistiksel analizlerin yapılmasındaki amaç zemin modelinde deplasman ve gerilme faktörleri üzerinde etkili olan zemin parametrelerinin tespiti ve bu parametrelerin optimizasyonudur. Optimizasyon neticesinde etkin parametrelerin maksimum ve minimum sınır koşulları saptanmıştır. Optimizasyon sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarının sayısal analiz sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarına büyük oranda yakınlığı, yapılan kıyaslama sonucunda görülmüştür. Beşinci bölümde çalışmanın sonuçları genel olarak değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lunardi (1977) tarafından yapılmış olan çalışmada, jet grout yönteminin izahı yapılmış ve yöntemin kullanıldığı bazı mühendislik problemleri incelenmiştir. Makalede, yöntemin farklı zemin çeşitlerine göre uygunluğu, dizayn kriterleri, İnşaat sırasında gözetleme, yöntemdeki en son teknolojik gelişmeler, İnşaat ve çevre mühendisliği çalışmalarında jet grout yöntemi ve vaka analizleri incelenmiştir. Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirmenin, zemin ıslahı problemlerinde oldukça ekonomik ve etkili olduğu ancak daha etkin kullanımı için uygulama ile ilgili deneysel araştırmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Baumann (1984) tarafından yapılmış olan çalışmada, jet grout yöntemi kullanılarak iyileştirilmiş çeşitli zeminlerde, kolon bileşimindeki su - çimento oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimler irdelenmiştir.. Yedi farklı zemin tipinde uygulanan jet grout kolonlarından alınan numunelerde, farklı su - çimento oranına göre elde edilen serbest basınç değerleri Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir.

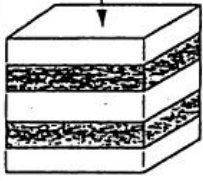
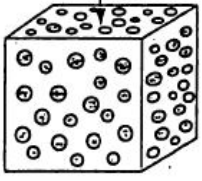
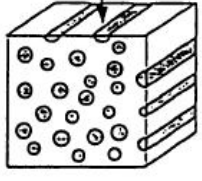
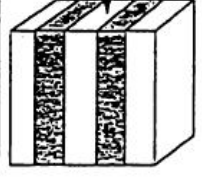
Çizelge 2.1. Su - çimento oranına bağlı kolon dayanımları (Bauman, 1984)

Zemin Tipi	Kolon Basınç Dayanımları (MPa)						
	Çakıl	Kum	Silt, Kil	Organik Zemin	Çakıllı Kumlu	Kumlu Siltli	Siltli Killi
Kolon No	1	2	3	4	5	6	7
Su / Çimento = 0,67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12 - 18	10 - 14	6 - 10
Su / Çimento = 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6 - 10	5 - 7	3 - 5

Çizelge 2.1. değerlendirildiğinde, basınç dayanımlarının kumlu ve çakıllı zeminlerde killi, siltli ve organik zeminlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca çakıllı kumlu, kumlu siltli ve siltli killi zeminlerde, enjeksiyonda kullanılan çimento şerbetindeki çimento miktarının artması basınç dayanımının da arttığı gözlenmiştir.

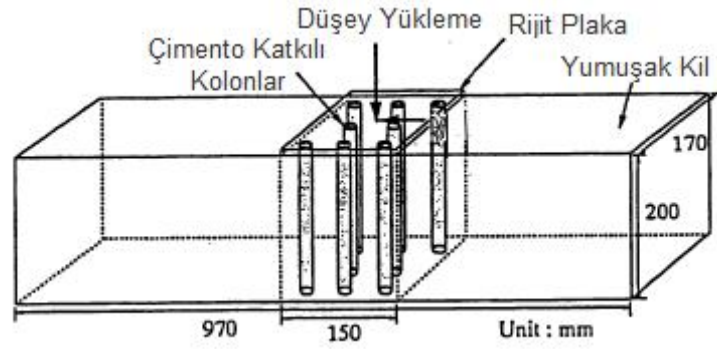
Omine vd. (1993) tarafından yapılmış olan çalışmada, farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek

amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen bir homojenleştirme metodu önerilmiştir. Metodun uygulanmasında gerilme dağıtımını önemi esas alınmıştır. Gerilme dağıtım katsayısı Eshelby Tensörü kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.1).

Type of mixtures	Horizontal laminate 	Mixture with spherical inclusions 	Mixture with pile shaped inclusions 	Vertical laminate 
Assumption	Constant Stress	Constant Strain energy	Approximation based on numerical analysis	Constant strain
Stress distribution parameter b	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^0 = 1$ where, $n = 0$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{2}}$ where, $n = 1/2$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}}$ where, $n = 1/3-1/6$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^1$ where, $n = 1$
Eshelby's tensor S_{iiii}	1	$7/15 - 9/15$ (for $\nu^* = 0-0.5$)	$5/8 - 3/4$ (for $\nu^* = 0-0.5$)	0
$1 - S_{iiii}$	0	nearly 1/2	$3/8 - 1/4$	1

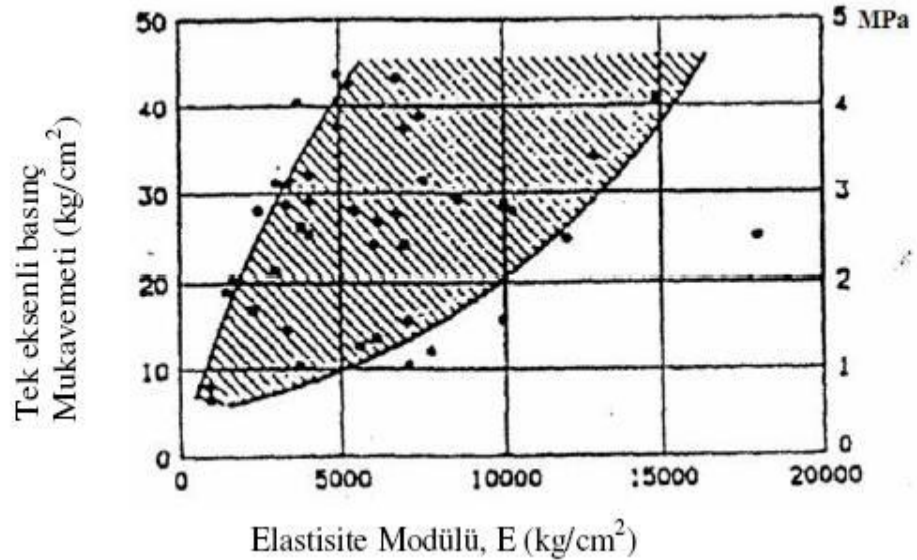
Şekil 2.1. Gerilme dağıtım parametresi - eshelby tensörü ilişkisi (Omine vd., 1993)

Bu metotla kompozit zeminlerin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesi elde edilmiştir. Katkı ve matristen oluşan iki fazlı karışımlarda kullanılan homojenleştirme metodu çimento katkılı taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminler üzerinde uygulanmıştır. Karışımların gerilme – deformasyon ilişkisi, ortalama elastik modülü ve akma kriteri de önerilen modelden türetilmiştir. Önerilen metodun geçerliliğini sağlamak amacıyla, çimento katkılı taş kolonlarla iyileştirilmiş zemine model testleri uygulanmış (Şekil 2.2), test sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.2. Deney düzeneği (Omime vd. 1993)

Trevi (1994) tarafından yapılmış olan çalışmada, elastisite modülü ile jet grout kolonların tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda siltli ve siltli kumlu zeminlerden alınan numuneler kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda Şekil 2.3.'deki grafik elde edilmiş, Jet Grout kolon dayanımının elastisite modülü ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.



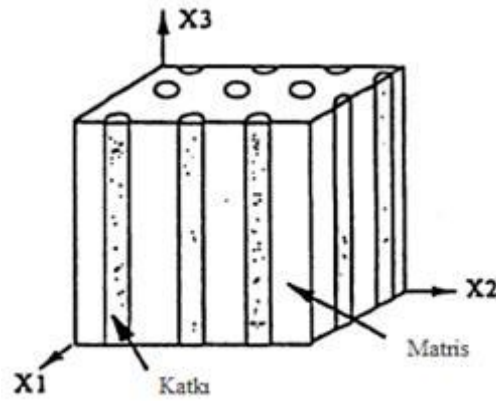
Şekil 2.3. Elastisite modülü – Tek eksenli basınç mukavemeti ilişkisi (Trevi, 1994)

Omime ve Ohno (1997) tarafından yapılmış olan çalışmada, derin karışım veya kum kompaksiyon kazığı metotlarıyla iyileştirilen kompozit zeminler heterojen yapıda bulunmaktadır. Çalışmada kompozit zeminlerin deformasyon analizi için iki fazlı karışım modeli isimli homojenleştirme metodu önerilmiştir. Karışımların elastik modülü geliştirilmiş dağıtma parametresi belirlenerek elde edilmiştir. Bu

homojenleştirme metodu iyileştirilmiş kazıklı kompozit zeminler üzerinde uygulanmıştır.

Metodun geçerliliğini sağlamak amacıyla iki boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları ile üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Öte yandan kazık şeklinde katkı için kompozit zeminin farklı türleri kullanılarak laboratuvar model testleri gerçekleştirilmiş, önerilen metodun geçerliliği model testler ile hesaplanan sonuçlar kıyaslanarak irdelenmiştir.

Omine vd. (1998) tarafından yapılmış olan çalışmada arazide çimento katkısı ile iyileştirilme yapılmış zeminlerin taşıma gücünün değerlendirilmesi için iki fazlı karışım modeli adı verilen bir metod önerilmiştir. Arazide iyileştirme yapılmış zemin, katkı ve matris olarak tanımlanan iki farklı zeminin karışımı şeklinde ele alınmıştır (Şekil 2.4). Bu yüzden taşıma gücü, gerilme dağıtım faktörü ve karışımdaki katkının hacimsel oranı göz önünde tutularak değerlendirilmiştir. Önerilen metodun geçerliliğini doğrulamak amacıyla model ve arazi testleri yapılmıştır. Arazide iyileştirme işlemi yapılmış zeminin taşıma gücü değerlendirilmelerinde metodun etkili olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Elastisite modülü – Tek eksenli basınç mukavemeti ilişkisi (Trevi, 1994)

Durgunoğlu vd. (1998) tarafından yapılmış olan çalışmada, jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılmış bir vaka analizi anlatılmıştır. 4 katlı ve yaklaşık 25.000 m²'lik bir alan üzerine oturan yapının temel zemini jet grout yöntemiyle iyileştirilmiştir. Arazi ve laboratuvar deneyleri esas alınarak yapılan hesaplamalarda

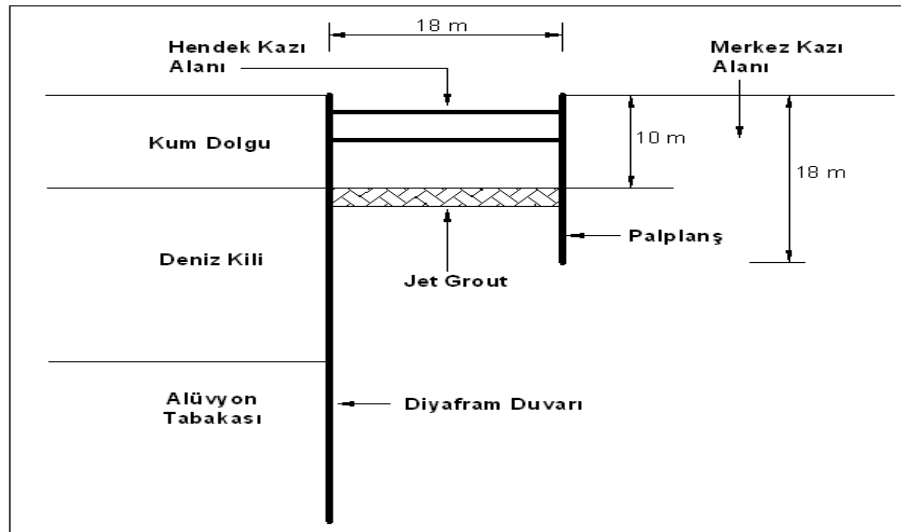
sığ temellerin üst yapı yükleri altında aşırı oturma yapacağı belirlendiği belirtilmiştir. Bu durum karşısında, kazıklı temel ve jet grout uygulaması olarak iki alternatif sistem önerilmiş, düşük maliyeti ve kısa inşaat süresi bakımından jet grout kolon uygulaması tercih edilmiştir. Jet grout teknolojisi ile ilgili olarak, uygulama türü, prosedürü ve parametreleri ortaya konulmuştur. Uygulamanın kalite kontrolü amacıyla kolon çapları uygulamadan sonra kazı yapılarak yerinde ölçülmüş ve kolonlardan karot örnekleri alınarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Kolonların yük taşıma kapasiteleri seri yükleme deneyleri ile belirlenmiştir.

Omine vd. (1999) tarafından yapılmış olan çalışmada, farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen metot, gerilme dağıtımı önemi esas alınarak önerilmiştir. Kompozit malzemelerin sayısal analizlerinde homojenleştirme metodu olarak adlandırılan bu yaklaşım, kazık şeklinde kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, güçlendirilmiş zeminin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesini elde etmek amacıyla uygulanmıştır (Şekil 2.5). Çimento katkılı taş kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, birtakım model testleri uygulanmış, eğimli yüklemelerde düşey oturma ve yatay deformasyon değerleri ölçülmüştür. Sayısal analiz ve test sonuçları arasındaki karşılaştırmadan sonra, önerilen metodun iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesinin önceden hesaplanmasında etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Homojenleştirme metodu hesap algoritması (Omine vd. 1999)

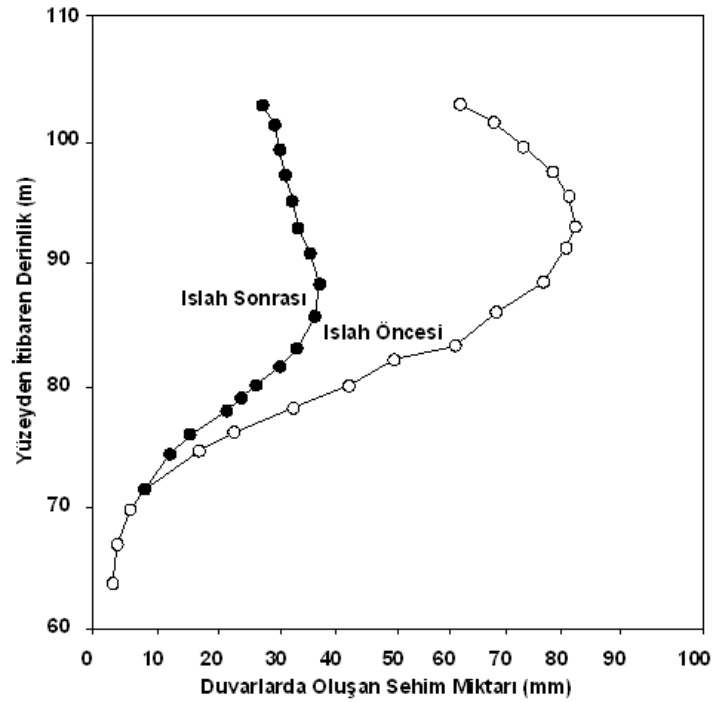
Wong vd. (1999) tarafından yapılmış olan çalışmada, Singapur'da bir sanat merkezi inşaatında 18000 m² alanlı bir temel kazısında palplanş duvarı ve diyafram duvarı ile desteklenmiş kazı yan yüzeylerinin jet grout kolonlar ile güçlendirilmesi ve kazı yönünde deformasyonların jet grout kolonlar ile azaltıldığı gösterilmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren 2,5 - 3,0 m aşağıda yer altı suyu bulunduğu belirtilmiştir. Deniz kili üzerinde kum dolguda yapılan jet grout uygulamasına ait zemin kesiti Şekil 2.6.' da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Jet grout uygulaması zemin kesiti (Wong vd., 1999)

Şekil 2.6.' da verilen zemin kesitinde jet grout kolonlarının Jet 2 yöntemiyle elde edildiği belirtilmiştir.

Çalışmada zemine ait ıslah öncesi drenajsız kayma dayanımının 300 kPa ve elastisite modülünün 150 MPa iken jet grout zemin ıslahı sonrası drenajsız kayma dayanımının 1150 kPa, elastisite modülünün ise, 350 kPa değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Islah öncesi ve ıslah sonrası hendek kazısında yapılan inklinometre ölçümleri sonucunda Şekil 2.7.' deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 2.7. Islah öncesi ve ıslah sonrası inklinometre ölçümleri (Wong vd., 1999)

Şekil 2.7.' de diyafram duvarındaki sehim miktarları 2 m yüksekliğindeki jet grout uygulaması öncesi maksimum 87 mm iken, ıslah sonrası 37 mm'ye düştüğü görülmüştür.

Wong ve Poh (2000) tarafından yapılmış olan çalışmada, jet grout kolonların, bitişik nizamlı yapılarda bodrum kat kazısı sırasında kazı yan yüzeylerindeki diyafram duvarlardaki hareketi önlemek için kullanılması irdelenmiştir. İksa duvarları arkasında oluşturulan jet grout kolonların, duvar arkasındaki zemin tabakasının aksi yönde hareketine sebep olduğu ve diyafram duvarlarında da kazıya

ters yönde deformasyon olduğu gözlem verileri sonucunda elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca diyafram duvarlarındaki eğilme momentlerinin de jet grout kolonlar ile azaldığı ve bitişik yapıların kazıdan daha az etkilenmesinin sağlandığı gösterilmiştir.

Kirsch ve Sondermann (2001) tarafından yapılmış olan çalışmada, düşey iyileştirme kolonlarının analizleri için farklı teknikler tüm dünyada geniş çapta kullanıldığı belirtilmektedir. Yapının temeli, iyileştirmede kullanılan kolon sıklığına bağlı olarak, kazık ya da iyileştirilmiş zemin rolü oynamaktadır. Analiz ve dizayn için metotlar basit ampirik yaklaşımlardan daha karmaşık analitik yaklaşımlara geçmektedir. Deformasyon davranışının sayısal simülasyonu zeminin mekanik davranışını anlamakta önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada farklı yaklaşımlarda sayısal analizler bulunmakta ve sayısal modellemenin, iyileştirmenin güvenli ve ekonomik dizaynında oldukça etkili olduğu gösterilmiştir.

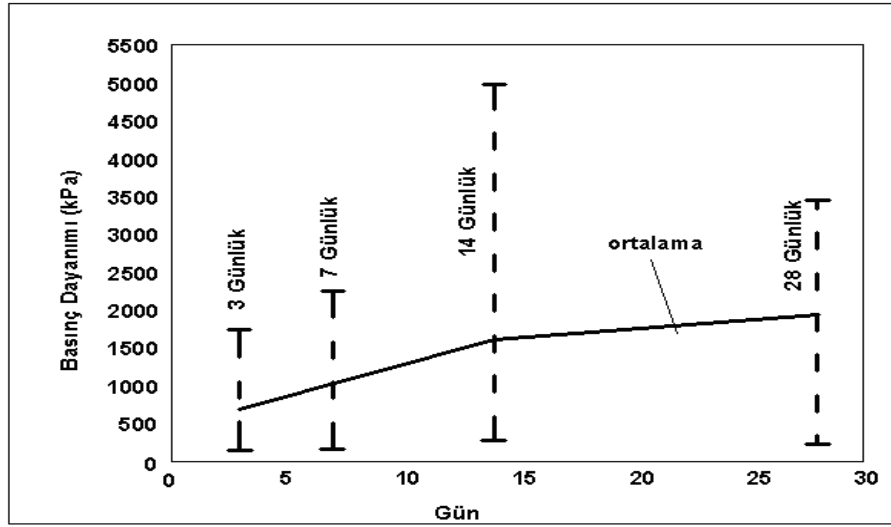
Durgunoğlu vd. (2002) tarafından yapılmış olan çalışmada, İzmir Tire Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilen sigara fabrikası sahasının jet grout yöntemi ile ıslahı vaka analizi olarak sunulmuştur. Bölgenin jeolojisi ana kaya üzerine kolüvyon, alüvyon formasyonları ve dolgu zeminden oluştuğu, ayrıca sahanın 1. derece deprem bölgesi içerisinde olduğu belirtilmiştir. Fabrika temelleri kazıklı, binanın zemine oturan döşemeleri ile diğer hafif yapı temelleri altında ise jet grout kolonlar önerilmiştir. Sıvılaşma riskine karşı sistematik, kolüvyon tabakasına kadar yaklaşık 32,000 m jet grout kolon uygulaması yapıldığı belirtilmiştir. Zemin ıslahı esnasında jet grout kolonlardan karot alımını, kazı yapılarak çap kontrolünü, yükleme deneylerini, piston numune alıcısı ile alınan numuneler üzerinde mukavemet deneylerini içeren kapsamlı kalite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin inşası öncesinde deneme bölgesinde yapılan kalibrasyon çalışmasında teknik parametreler sahaya özel olarak belirlendiği belirtilmiştir.

Çalışmada yapılan kapsamlı ön deneme bölgesi testlerinin, uygulama projesi parametrelerinin belirlenmesindeki ve bu parametrelerin kalibrasyonu bakımından önemi vurgulanmaktadır. Deneme bölgesi testlerinde jet 1 yöntemiyle oluşturulan

kolonların jet 2 yöntemi ile teşkil edilen kolonlara oranla daha yüksek kesit mukavemetine haiz olduğu ve benzer koşullardaki yükleme deneylerinde daha az oturmalar ölçüldüğü belirlenmiştir. Ancak sahadaki zemin ıslahının esas olarak zemin sıvılaşması riskine karşı olarak yapıldığı ve dolayısıyla statik yükleme koşullarındaki taşıma gücü ve deformasyon davranışının ikincil öneme haiz olduğu dikkate alındığında, gerekli yer değiştirme oranını sağlayacak şekilde uygulanan ve daha büyük çaplı kolon teşkilini sağlayan jet 2 yöntemi saha için uygun metot olarak tercih edilmiştir.

Gökalp ve Düzceer (2002) tarafından yapılmış olan çalışmada, Aliğa' da inşaatı devam eden doğalgaz hattının birleştiği güç dönüşüm tesisinin temelinde gerçekleştirilen jet grout uygulaması incelenmiştir. Analizlerde, zeminde beklenen toplam oturma ile farklı oturmaların çok aşırı mertebelerde olduğundan dolayı tesisin ana binalarının temellerinin altında jet grout ile iyileştirme yapılmasına karar verilmiştir. Çalışmada, jet grout tekniğinin seçimi, uygulama sistemi, enjeksiyon basıncı gibi yöntemdeki detayları, nozzle sayısı ve ebatları, oluşturulan kolonların taşıma gücü ve nozzle dönme hızı gibi tasarım parametrelerinin seçimi ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Önceden planlanmış jet grout çalışması için birçok ön parametrik test ve çekme testi uygulandıktan sonra gerekli jet grout kolonunun çapı ve bu çapa ulaşmak için gerekli uygulama basıncı belirlenmiştir. Ayrıca uygulamadan sonra yapılan karot testi, bütünlük testi, yükleme testi ile kapsamlı kalite kontrolü ve güvence araştırması ile ilgili açıklamalar yapılmıştır.

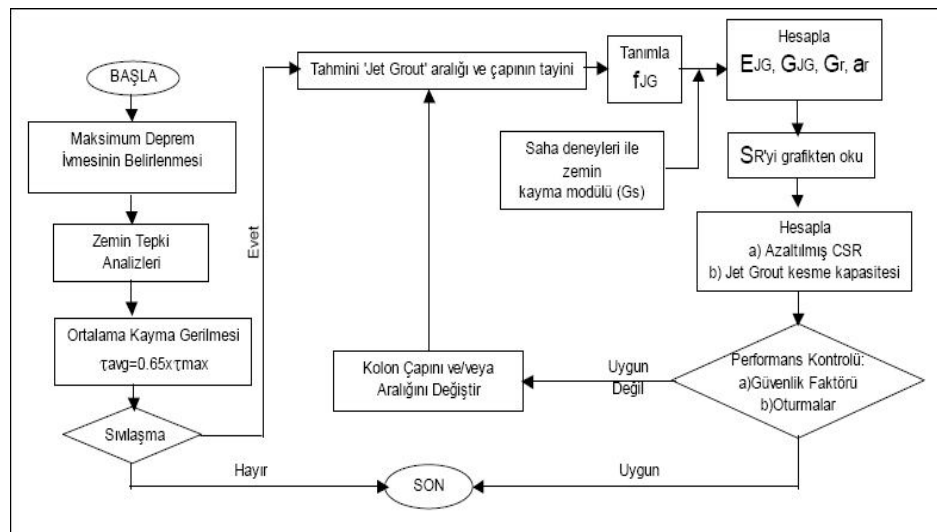
Bell vd. (2003) tarafından yapılmış olan çalışmada, süper jet kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde laboratuarda tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 76 x 150 mm' lik silindirik numunelere ait 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirlenmiş ve Şekil 2.8.' deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 2.8. Kolon numunelerinin basınç dayanımları (Bell vd., 2003)

Şekil 2.8.' e göre süper jet kolon dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı ve gerçek dayanıma ise 28. günde ulaşıldığı belirlenmiştir.

Özsoy ve Durgunoğlu (2003) tarafından yapılan çalışma kapsamında 'Jet Grout' ve 'Deep Mixing' zemin ıslahı teknikleriyle sıvılaşmanın etkilerinin azaltılmasına yönelik yeni bir hesap metodu önerilmiştir (Şekil 2.9). Deprem sebebiyle oluşan kayma gerilmelerinin tanımlanan birim alanlar üzerine dağılımı, zemin - çimento karışımı kolonlar ve çevrelerindeki zemin arasındaki kayma modülü farkı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen metodun etkinliği Ford – Otosan Gölcük Tesisleri sahasında yapılan zemin ıslah çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.9. Önerilen hesap algoritması (Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

Bu çalışmada önerilen hesap yöntemi kısaca, deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak, yüksek kayma modüllü kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında kayma modülleri oranında dağılacığı kabulüne dayanmaktadır. Bu bakımdan çalışmada, önerilen metodun uygulamada ekonomik ve güvenli sonuçların elde edilmesinde yararlı olacağı beklendiği belirtilmiştir. Çalışmada yapılan kabullerin iki veya üç boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu veya Sonlu Farklar Metodu modelleri ile kontrolünün yapılması önerilmiştir.

Durgunoğlu (2004) tarafından yapılmış olan çalışmada, çeşitli inşaat mühendisliği yapılarının geoteknik ve sismik risklerinin değerlendirilmesi sonucu gerekli görülen zeminin iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için kullanılan yöntemler tartışılmıştır. Bu metotlardan ülkemizde yaygın bir kullanımı bulunan yüksek modüllü jet grout kolonların temel mühendisliğinde çeşitli kullanımları, imalat parametreleri, kalite kontrol ve proje kriterlerinin tahkik deneyleri açıklanmıştır. Deprem yükleri altında zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörlerinin hesap yöntemleri açıklanmış ve Chinese kriterinin ince daneli zeminler için geçerliliği tartışılarak getirilen yeni bir öneri üzerinde durulmuştur.

Yüksek modüllü jet grout kolonların sıvılaşma riskini azaltmada kullanımı detaylı olarak konu edilmiş, bu kullanıma ait geliştirilen bir tasarım metodu özetlenmiştir. Geliştirilen bu metodun özellikle 17 Ağustos 1999 Depremi öncesi kısmen uygulandığı İzmit Carrefour - SA ticaret merkezi bir vaka analizi olarak incelenerek, metodun geçerliliği kanıtlandığı belirtilmiştir.

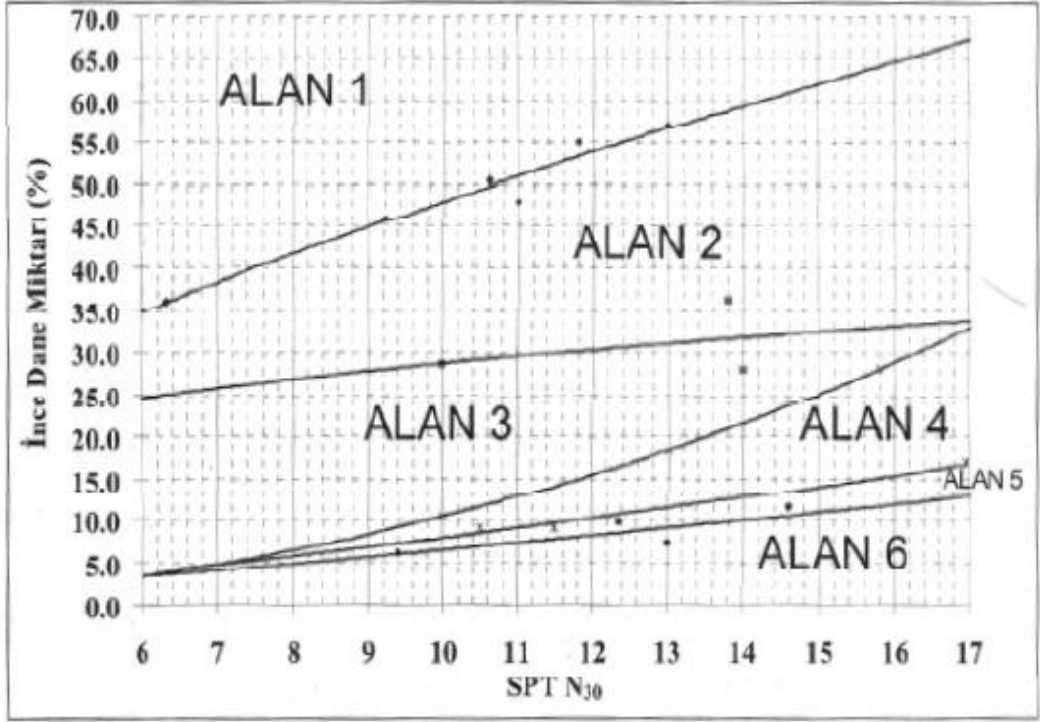
Bzowka (2004) tarafından yapılan çalışmada, jet grout uygulamasının sayısal analizi yapılmıştır. Nümerik modelleme; başlangıç planlaması ve matematiksel formülasyon, model parametrelerinin tanımlanması, doğrulama ve hassaslık analizi olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Nümerik analizlerde, ampirik formüllerin kullanıldığı geleneksel analizlerden farklı olarak jet kolonlara gelen yüklerin ve oturmaların hesaplanabildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, problem gerçek

boyutlarında modellenmiştir. Nümerik analizlerde Mohr – Coulomb modeli kullanılarak jet kolon, onun etki bölgesi ve zemin ortamı ayrı ayrı modellenmiştir. Bu araştırma sonucunda, sayısal analiz, deneysel bulgular ve ampirik çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Racansky vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, derin kazı dizaynında yapının deformasyon davranışını ve stabilitesini araştırmak amacıyla farklı metotlar uygulandığı belirtilmektedir. Genellikle çakıl tabakasının altında yumuşak kil tabakası bulunması veya yer altı su seviyesinin zemin yüzeyine çok yakın olması ve kazı sırasında su seviyesinin aşağı çekilmesi gibi elverişsiz zemin koşullarında kapsamlı geoteknik analizler gerekmektedir. Bu çalışmada zemin göçme modu, limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar metodu ile kazı desteklerinin stabilitesi ve ankrajlara uygulanan ön germe kuvveti ile dayanım elemanın derinliği ve kalınlığının hesap sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

Doğu vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada Taris - Aydın, Limak Lara Otel Antalya, Concorde Otel Antalya sahalarında yapılan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinin mukavemet özelliklerinin zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısından ne derece etkilendiği araştırılmıştır. Çalışmalarda arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zeminin ince dane oranı, ortalama SPT darbe sayısı ve karotiyer ile alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarını incelemiştir.

Çalışmalar sonucunda alınan numunelerin serbest basınç dayanımları, araştırma verileri ile karşılaştırılarak, ince dane yüzdesine ve SPT vuruş sayısına bağlı olarak kolonların serbest basınç dayanımlarının belirlenebileceği gösterilmiştir. Şekil 2.10.' da zeminde teşkil edilen jet grout kolonların serbest basınç dayanım aralıkları gösterilmiştir. Bu grafikte, altı adet alan, SPT vuruş sayısına ve ince dane yüzdesine bağlı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.10. Jet kolonların mukavemet aralıkları (Doğu vd., 2006)

Şekil 2.10. ' a göre;

- Alan 1 : 2,6 N/mm²' den düşük dayanımlı kolonlar
- Alan 2 : 3,5 N/mm²' den düşük, 2,6 N/mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 3 : 5,5 N/mm²' den düşük, 3,5 N/mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 4 : 7,0 N/mm²' den düşük, 5,5 N/mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 5 : 14,0 N/mm²' den düşük, 7,0 N/mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 6 : 14,0 N/mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar

olarak belirtilmektedir.

Çalışma sonucunda zeminde oluşturulan kolonların mukavemetinin yüksek olmasının nedeninin malzemeleri oluşturan danelerin iyi derecelendirilmiş olmasına

bağlı olduğu ve ince dane miktarının artması sonucu ise kolon mukavemetinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Tschuchnigg ve Schweiger (2008) tarafından yapılan çalışmada, jet grout kolonlarının klasik kazık veya kazıklı radye temellere ekonomik alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Genellikle problemi çözmek için analizi zor olan çok sayıda jet grout kolonları inşa edilmek zorunda olduğu ve bu temellerin çalışmasını hesaplamak amacıyla nümerik metotlar artarak kullanıldığı belirtilmiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak yapılan modellemenin, tüm elemanların arazi şartlarındaki gibi tanımlandığı üç boyutlu modellemeler kadar hassas sonuçlar vermeyeceği açıktır. Ancak üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile problemi modellemek oldukça karmaşıktır. Bu modellerin karmaşıklığını azaltmak için en uygun metodun, kazıkların sürekli ortamda sonlu elemanlar yöntemiyle net olarak modellenmediği ancak kazık çakma davranışını ele alan özel bir formülasyonla sonlu elemanlar yöntemine uyumlandıran gömülü kazık konsepti olduğu belirtilmiştir. Bu makalede yayılı yük altındaki jet grout kolonları analizlerinde iki boyutlu düzlem deformasyon, üç boyutlu ve gömülü kazık modelleri kullanılmış, yapılan sayısal analizler sonucunda bu modellerin karşılaştırması yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Jet grout zemin enjeksiyonu uygulama tekniği

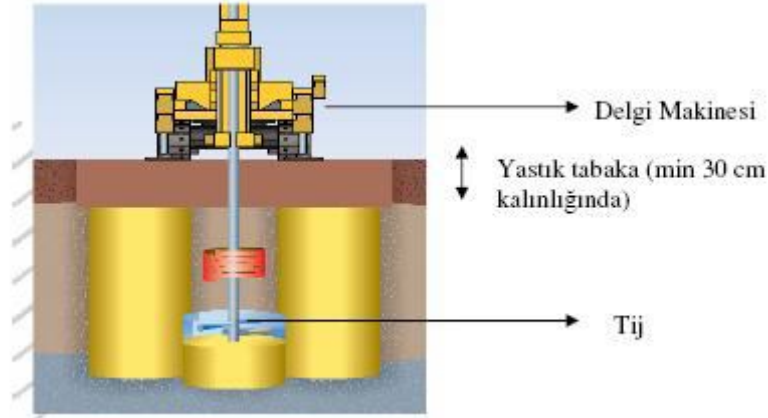
Jet grout yöntemi, amaç yönünden bütün zemin iyileştirme metotları gibi ana işlev olarak zeminin mekanik mukavemet değerlerinin artırılmasını hedefler, dolayısıyla taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artar, permeabilite azalır. Jet grout yöntemi bu amaca ulaşılmasında en başarılı enjeksiyon yöntemlerindedir. Jet Grout işlemi, iyileştirme yapılacak derinliğe kadar bir delgi yapılması ve jet grout ekipmanı kullanılarak zeminin minimum 300 bar basınçla püskürtülen bir stabilizerle karıştırılmasıdır. Stabilizerler, genellikle su-çimento karışımıdır (grout). Yüksek basınç etkisi altında sevk edilen grout, nozzle(lar) dan geçerken büyük bir kinetik enerji (hız) kazanmasını sağlar. Yüksek hızlı (200-250 m/sn) grout, zemini "yırtarak", zeminin ve zayıf kayaçların parçalanmasını sağlamakta, zeminle bir karışım meydana getirmektedir (Soilcrete). Bu karışım, homojen ve sürekli bir yapı özelliğindedir.

Jet grout yöntemi, uygulandığı sahaların ve zeminlerin çeşitlilik göstermesi (kil, silt, kum, çakıl, alüvyal zemin gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlar) yönünden diğer iyileştirme metotlarından daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifidir.

Ayrıca Jet Grout yöntemi diğer enjeksiyon yöntemlerine göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptir (Okyay, 1987).

- Önceden belirlenebilecek geometrik ölçüler çerçevesinde uygulanacağından ötürü malzeme sarfiyatının büyük bir yaklaşımla önceden hesaplanabilmesi,
- Genelde çimento-su karışımı kullanıldığı için kimyasal enjeksiyon gibi çevre kirliliği yaratmaması,
- Dar sahalarda enjeksiyon işinin başarıyla gerçekleştirilebilmesi.

Şekil 3.1.' de jet grout sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Oluşturulan jet grout kolon başlıklarının temel altında kırılmasını engellemek amacıyla, jet grout kolonları ile temel alt kotu arasında minimum 30 cm, maksimum 60 cm kalınlığında yastık tabakası görevini üstlenen stabilize dolgu malzemesinin serilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1. Jet grout sistemi ve yastık tabaka şematik gösterimi (Bakım, 2007)

3.1.2. Jet grout kolonların kullanım alanları

Jet grout kolonların çeşitli maksatlarla kullanımları aşağıda sıralanmaktadır (Durgunoğlu, 2004).

- Temel altında, düşey yükler için basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü,
- Döşeme altında düşey ve özellikle yüksek yayılı yükler altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü
- Dolgu altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü,
- Köprülerde yaklaşım dolguları altında düşey dolgu yüklerinin taşınması, dolgu altında oturma kontrolü ve kenar ayak kazıklarına negatif çeper sürtünmesi intikalinin önlenmesi,
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile teçhiz edilerek çekme elemanı olarak,
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması,

- Kazılarda donatı ile teçhiz edilerek düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak,
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak,
- Geçirimli ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerdeki kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo kapama elemanı olarak,
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında teşkil edilen payanda elemanı olarak,
- Kazı tabanından kazıya gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak,
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili ile
- Yumuşak zeminde açılan yüzeye yakın tünellerde tünel üstündeki zeminin iyileştirmesi amacı ile
- Yumuşak zeminde açılan tünellerde tünel içinde ve ayna önünden yapılarak, kazı öncesi tünel kesiti üzerinde taşıyıcı bir semsiye oluşturulması amacı ile
- Önemli ve ağır yapılarda sıvılaşma güvenlik sayısı düşük olan yerlerde kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deformasyonların kontrolü için, kazıklarla birlikte,
- Sıvılaşma sonucu oluşacak zemin yanal ve düşey deformasyonlarının sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak,
- Sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin bir kısmının taşınarak deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deformasyonların sınırlandırılması.

3.1.3. Jet grout yönteminin proje esasları

Jet grout tekniğinin uygulama alanlarının çoğalmasıyla, bu uygulamanın granüler zeminlerde başarılı sonuçlar verdiği gibi ince daneli zeminlerde de başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Jet grout yöntemi tasarımı arazide elde edilen deneyimlerden yararlanılarak yapılmaktadır. Yöntem tasarımında önemli olan

güvenli olmanın yanında ekonomik bir çözüme ulaşmaktır. Bu sebeple uygulanacak metodun iyi belirlenmesi, prosedür ve detayların adım adım hesaplanmasıdır. Bilinmesi gerekenler;

- Zemin hakkında elde edilecek tüm bilgilerin toplanması
- Zeminin mekaniksel modellenmesi
- Yükleme şartlarının belirlenmesi
- Yüklerin hesaplanması
- İyileştirilmiş zeminin dayanımı dahil malzemelerin seçilmesi

Tasarımcının öncelikle yöntemin zemin iyileştirilmesi veya yapısal taşıyıcı eleman olarak tasarlanacağı konusundaki kararını vermesi gerekmektedir. Sonra tasarım için önemli olan özellikleri (zemin cinsi ve parametreleri, enjeksiyon özellikleri, zemin-enjeksiyon karışımları, katkı malzemesi...vb.) tespit etmesi gerekmektedir.

Taşıyıcı olarak tasarlanacak stabilize edilmiş kolonların kapasite hesaplarında, tekil kazık taşıma gücü hesaplarındaki esaslar geçerli olup toplam güvenli taşıma kapasitesi uç ve çeper sürtünmesi ile belirlenecek olmakla beraber, zemin - çimento bileşimindeki malzemede zemin cinsi, dozaj ve işletme parametrelerine ve karot deneylerine dayanarak güvenli olarak saptanacak değerden daha büyük bir gerilme olmaması sağlanmalıdır.

Hesaplama yönteminde grup şeklindeki taşıyıcı elemanların toplam taşıma kapasitesinin (basınç cinsinden) tüm tekil kazıkların toplam taşıma kapasitelerine eşit olacağı göz önüne alınmaktadır. Yapısal yük rijit bir gövde ile taşıyıcı tabaka içine girdiği takdirde, tüm yük güvenli bir şekilde sağlam tabakalara aktarılmış olup, bu şekilde oluşacak oturma da elastik kısalma ile sınırlı kalmış olmaktadır.

Yük rijit bir gövde ile taşıyıcı olmayan bir zemin içerisinde yüzen kazıklarla taşınıyor ve kazıklar taşıyıcı tabakaya girmiyorsa yükün büyük bir kısmı kolonlara

aktarılmakla beraber yükün bir kısmı zemine intikal eder ve reel oturma, kolonlarının elastik oturma değerinden daha büyük değerde gerçekleşir.

Esnek bir zeminde üniform bir yük, taşıyıcı zemin tabakasına girecek şekilde aktarılıyorsa farklı oturmalar meydana gelebilir.

Yükle temel arasında yeterli kalınlıkta granüler bir tabaka varsa, yükün bir kısmının kolonlarla taşınması gerçekleşirken, önemli bir kısmı da zemin tarafından taşınır. Granüler dolgu malzemesi jet grout kolonların davranışını daha üniform yapar. Kolon boyu arttıkça zemin gerilmesinin önemli kısmını jet grout kazıklar taşımış olur. Yapısal yükün rijit bir gövde ile sağlam tabakalara aktarılması durumunda jet grout kolonunun davranışı kazık uygulamalarında olduğu gibidir. Diğer tüm şıklarda kolonların varlığı yükü ilgili zemin davranışına göre değişen özel bir zemin iyileştirilmesi durumundadır. Jet grout yöntemiyle zemin iyileştirilmesi taşıma kapasitesi kazıkları çevreleyen sınırlar içindeki alanın hesaplanmasıyla belirlenir. Doğal zeminlerle bu tür iyileştirilmiş zeminler arasındaki fark kompozit zeminler tanımlamasıyla belirlenmektedir. Sonuç olarak zemin iyileştirilmesi yüklerin önemli bir bölümü jet grout kolonlarla taşıttırılmış ve oturmalarda azalma sağlanmış olmaktadır.

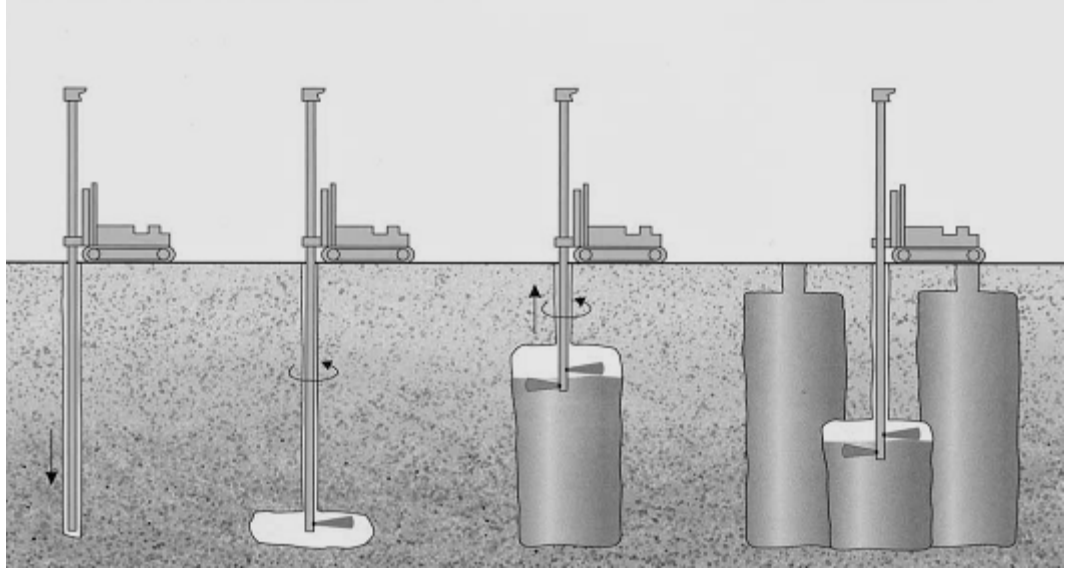
İmalat sırasında yapımla ilgili tüm bilgiler düzenlenen formlara işlenmelidir. İmalatta kullanılacak su / çimento ve katkı maddeleri önceden kontrol edilmeli, enjeksiyon esnasında çalışma koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanacak hususlar, harcın kusması gözlenmeli ve not edilmelidir. Zemin üst düzeyine kadar yükselen kolonların son kısımları 50 cm kadar istenilen nitelikte olmayacağından kırılmalı ve gerekirse beton dökülerek düzenlenmelidir.

3.1.4. Jet grout metodunun uygulaması

Jet grout metodunun uygulanmasında delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşama bulunmaktadır. Uygulama için Türkiye’de “TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon” yönetmeliği esas alınmaktadır. Öncelikle inşaat sahası ve yolları, makine ve personelin verimli çalışarak planlanan günlük imalat

miktarlarının yapılabilmesi ve imalat kalitesine ulaşılabilmesi için düzgün ve kuru tutulmalıdır. Delgi makinesi, paletli vinç, beton mikseri, beton pompası ve ağır iş makinelerinin batmadan çalışmalarına imkan sağlayacak biçimde düzenlenmesi gerekir. Çalışma sahasında uygun yüzey drenaj sistemi tesis edilerek platformun kuru kalması sağlanmalıdır.

Jet grout uygulamasının ilk aşamasında zemin küçük çapta sondaj tiji ile delinmektedir. Nozzlelar, imal edilecek jet kolonun en alt seviyesine ulaştığı zaman delme işlemi bitirilmektedir. Sonraki aşamada tijler kendi etrafında döndürülerek yukarı çekilmekte ve bu sırada zemine nozlerden oldukça yüksek basınçta grout enjekte edilmektedir. Kolon, önceden belirlenmiş olan en üst seviyeye ulaştırıldığında enjeksiyon işlemi sona erdirilmektedir (Şekil 3.2).

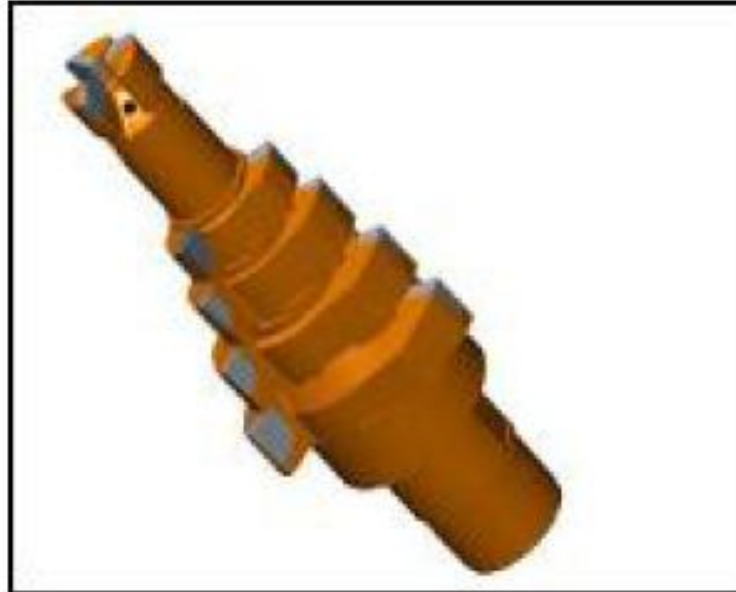


Şekil 3.2. Jet grout yöntemi uygulama aşaması (Özden, 2010)

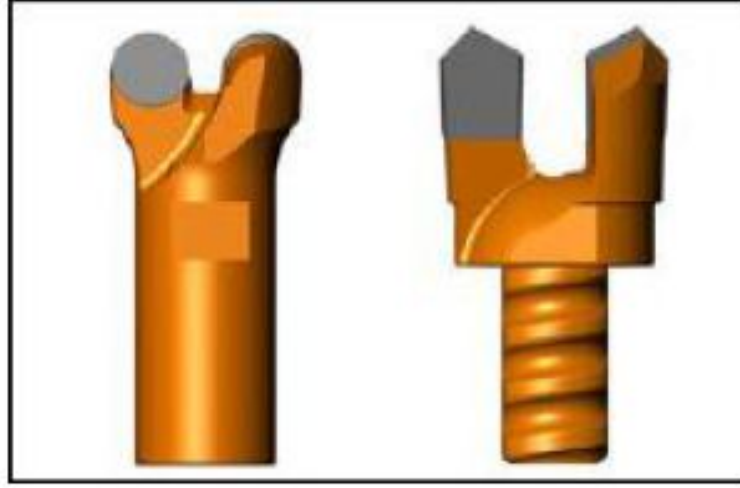
Jet grout elemanının özelliklerini belirleyen parametreler; zemin cinsi, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan basıncı, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan debisi (nozzle çapı), enjeksiyon şerbetinin bileşimi, jet enjeksiyon tijinin çekme hızıdır.

3.1.4.1. Delgi aşaması

Jet Grout kolonlarının imal edileceği noktalar zemine işaretlenir. Tüm jet grout kolonlar uygulama projelerinde gösterilen merkez konumlarından en fazla 75 mm mesafe içinde kalacak şekilde oluşturulur. Jet grout kolon deliğinin oluşturulması esnasında, delgi ucu mümkün olduğunca düşey konumda tutulmalıdır. Delgi sırasında kuyu ağzının yer altı su seviyesinin üzerinde olması çalışabilme açısından tercih edilir. Delme işleminin çeşidi, delinecek zeminin özelliklerine bağlı olarak seçilir. Buna göre de bilinen tüm rotary ve darbeli – rotary metotları kullanılır. Darbeli - rotary metodunun en yaygını da harici çekiçli sistemlerdir. Delme işleminin kolaylaştırılması, uç takımının soğutulması ve zeminin enjeksiyona ön hazırlanması amacıyla delme sırasında çok çeşitli akışkanlar kullanılmaktadır. Bunlar su, hava, bentonit şerbeti, çimento şerbeti (grout) olabilmektedir. Uç takımı olarak, yumuşak karakterli zeminlerde genellikle kil bitleri, sert karakterlerde ise "tricone" bitler kullanılmaktadır. Delme borusu (tij) olarak da jet grout tijleri kullanılmakta, bunlar yüksek basınca dayanıklı malzeme ve imalat tekniği ile imal edilmektedir. Bağlantı (ek) manşonlarında da 500 – 600 bar 'a dayanımlı sızdırmazlık elemanları kullanılmaktadır. Şekil 3.3.' te alüvyonlu zeminlerde su ve hava ile delgide kullanılan kademeli matkap, Şekil 3.4.' te yumuşak zeminlerde kullanılan kademesiz delgi matkabı görülmektedir.



Şekil 3.3. Kademeli delgi matkabı (Melegary ve Garassino, 1997)



Şekil 3.4. Kademesiz delgi matkabı (Melegary ve Garassino, 1997)

3.1.4.2. Enjeksiyon aşaması

Jet grout enjeksiyon ekipmanları mikser, dinlendirici, pompa, su tankı, çimento silosu, basınç göstergeleri, vanalar vb. ekipman, su saati, gidiş - dönüş hattı, ara hortumlar vb. ekipmanlardan oluşmaktadır. Enjeksiyon karışımı belirli orandaki suyun ve çimentonun mikserde birleştirilmesiyle oluşur. Uygulama alanına göre su /çimento oranı ayarlanır, çok miktarda hacim dolacaksa, pompanın basmasının mümkün olduğu oranda (%25 kadar) kum katılır. Geçirimsizlik ve ince çatlakların doldurulması bentonit karışımı ile sağlanır. Mikserde hazırlanan enjeksiyon karışımı, dinlendiriciye alınır ve oradan pompa vasıtasıyla hortumlar ile kuyuya verilir. Projede belirlenen derinliğe ulaşıldığında, delme ve su basma işlemi durdurulur, çelik bir bilya delme borusu içine bırakılır, uç kısmının hemen üstünde yer alan bir valf bu suretle kapatılmış olur. Valf kapanınca delme borusuna yollanacak groutun yönü boru ucunda “monitör” diye adlandırılan ve jet grout nozzle’larını taşıyan takıma çevrilmiş olur. Yüksek basınçlı grout pompalanmaya başlanır ve enjeksiyon fazı başlamış olur. Yüksek basınç grouta nozzle’lardan geçerken yüksek hız kazandırır. Yüksek hızlı grout zeminin doğal yapısını parçalayarak zeminle karışır. Delici takımın dönel hareketi sayesinde bu karışım daire kesitli bir kolon formunda oluşur ve zeminden çok farklı mekanik değerlere sahip jet grout kolonu elde edilmiş olur (Melegary ve Garassino, 1997). Şekil 3.5.’ te, Enjeksiyon aşamasında nozzle’lardan groutun fişirması gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Enjeksiyon aşaması (Bakım, 2007)

Delici takımın dönme hareketi, önceden belirlenmiş ve sabit bir hızla çekme hareketi ile birleşince düşey kolonlardan oluşan bir yapı oluşturulur. Delici boru takımının çekilmesi esnasında, dönme hareketinin kısmi olarak uygulanması da mümkün olup, bu yolla çeşitli kesitlerde ince çimento perdeler elde edilebilir.

Oluşacak kesitlerin ebatları, zeminin özelliklerine bağlı olduğu gibi, nozzle çap ve adedi, grout debisi, grout basıncı, çekme hızı ve dönüş hızı gibi jet grout yönteminin ana parametrelerine de bağlıdır.

Basıncılı enjeksiyon esnasında, delici takımın etrafından dışarıya belirli bir miktar zemin materyali taşması uygun görülür. Bu durum groutla karıştırılan zemin içinde aşırı basınç oluşmadığına işaret eder, çünkü aşırı basınç oluşması halinde, basıncın fazlası delme borusu çapı ile delinen delik çapı farkından oluşan boşluktan dışarı kaçar.

Aşırı basıncın oluşmasının istenmemesinin sebebi aşırı basıncın zeminde kırılmalara ve ayrıca zeminin kaldırılmasına sebep olmasıdır. Bu durum oluşturulan kolonlarda süreksizliğe ve mevcut yapıların konstrüksiyonlarında problemlere yol açar. Bu türden sorunların yaşanmaması için uygulamada; debi miktarının azaltılması, enjeksiyon basıncının düşürülmesi, masif kil özellikli zeminlerde, ön yıkamalı delme işlemi gibi tedbirler alınmaktadır. Basınçlı enjeksiyon sırasında tasan materyal miktarı, zeminin geçirgenliğine ve türüne bağlıdır. Bu miktar, killi zeminlerde daha fazla, kumlu-çakıllı zeminlerde daha az olacaktır, ortalama olarak enjekte edilen miktarın % 10' u alınabilir (Melegary ve Garassino, 1997).

3.1.4.3.Ön jet grout

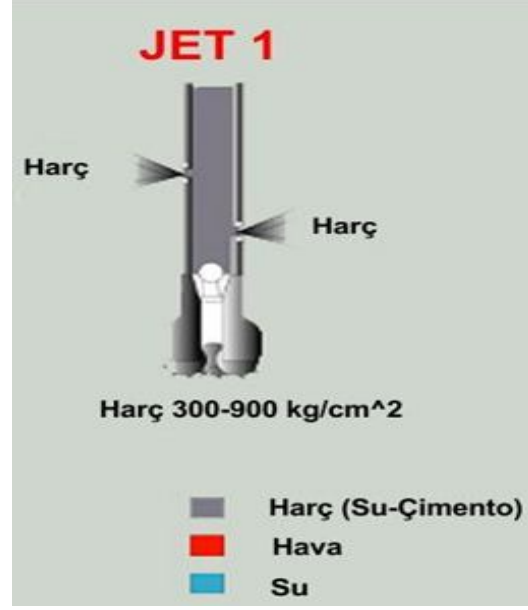
Su ve / veya diğer akışkan jetinden ibaret bir ön parçalanma safhasıyla, bir elemanın jet enjeksiyonunun yapıldığı metottur.

Not: Ön jet grout işlemi, aynı zamanda, yaygın olarak, ön yıkama ve ön kesme olarak da bilinir.

3.1.5. Jet Grout Teknikleri

Jet grout teknikleri zemin koşullarına, istenen jet grout kolon özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Amaçlarına ve kullanım sekline göre jet 1, jet 2, jet 3 ve süper jet yöntemleri olmak üzere dört çeşit jet grout tekniği bulunmaktadır.

JET 1 yöntemi, en basit ve yaygın kullanılan tekniktir. İlk olarak 70' li yılların başında Japonya'da, 70' li yılların ortalarında ise İtalya' da denenmiştir. Zeminin parçalanma ve çimentolanmasının, genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın yüksek enerji jeti şeklinde uygulandığı jet enjeksiyon işlemidir. Bu metotta delme - enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan ibaret olup, grout bu borudan yaklaşık 200 m/sn hızla, 300 – 900 kg/cm² (bar) basınçla basılır. Bu metotla oluşan kolonlar, zemin türlerine ve parametre aralıklarına göre, çakıllı zeminlerde 0,6 m'den 1,2 m çapına kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde çakıllı zeminlerdeki kadar etkin değildir. Şekil 3.6.' da jet 1 yöntemi şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Jet 1 tekniği (Yıldız, 2011)

JET 2 yöntemi, zeminin parçalanması ve çimentolanmasının ikinci bir akışkan olarak hava jeti, yüksek enerjili bir sıvıyla (genellikle bir çimento şerbeti) gerçekleştirildiği jet enjeksiyon sistemidir. Grout orta borudan, basınçlı hava (8 – 12 bar) ise dış borudan geçer. Basınçlı hava, kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığı için, bu metotta oluşan kolon çapları jet 1'e kıyasla % 60 - 80 daha büyük olur.

Bu yöntemle kolon çapları orta sıkı zeminlerde 1,0m'den, gevşek zeminlerde ise 1,8 m'den fazla kalınlığa ulaşabilmektedir. Jet 2 yöntemi kohezyonlu zeminlerde Jet 1 yöntemine göre daha etkili sonuçlar vermektedir. Şekil 3.7.' de jet 2 yöntemi şeması gösterilmiştir.

Kum içindeki bir uygulamada, ikili sistemle jet grout kolonu yapılırken zeminin örselenmesi için 45 MPa basınç uygulanmış; delgi borusunun dönme hızı 8 - 10 devir/dk, harcanan çimento 930 kg/m³, harç debisi 130 lt/dk, harcın birim hacim ağırlığı 16 – 17 kN/m³, iken kolon çapı 1,4 m ye ulaşmıştır (Ichihashi vd., 1992).



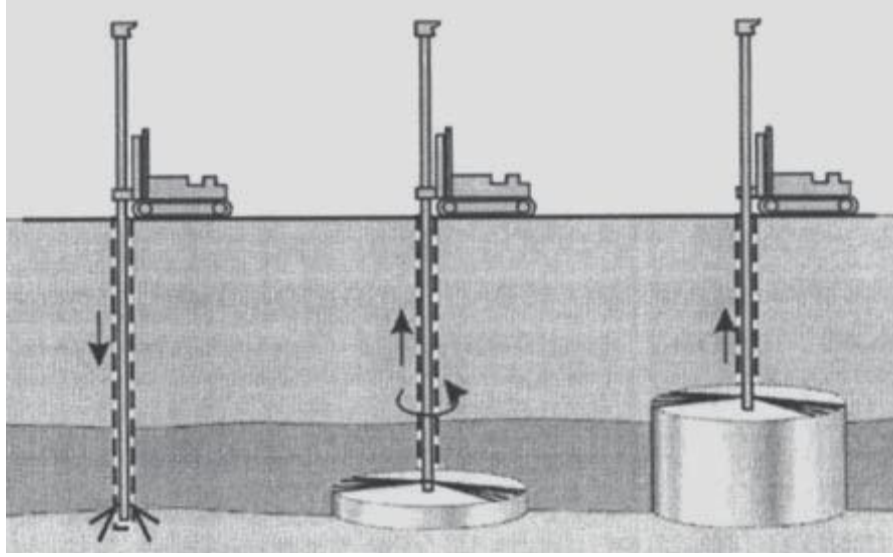
Şekil 3.7. Jet 2 tekniği (Yıldız, 2011)

JET 3 yöntemi, zeminin parçalanmasının yüksek enerjili su jeti ile sağlandığı, çimentolanmasının ise eş zamanlı olarak ayrı bir enjeksiyon karışımı jeti ile elde edildiği jet enjeksiyon işlemidir. İç içe üç borulu takım kullanılan bu metotta, 400 – 600 bar basınçlı su ortadaki borudan, 8 – 12 bar basınçlı hava ara borudan, tıpkı jet 2' deki gibi, nozzlelerden basılmaktadır. 30 - 80 bar basınçlı grout ise en dış borudan ayrı bir nozzleden, su - hava karışımı içine enjekte edilmektedir. Jet grout kolonları bu metotla 2 m'den fazla boyuta kadar ulaşabilmektedir. Jet 3 yöntemi kohezyonlu zeminlerde en etkili yöntemdir. Şekil 3.8.' de Jet 3 yöntemi şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Jet 3 tekniği (Yıldız, 2011)

SÜPER JET yöntemi, son dönemlerde büyük kolon çaplarını yüksek hızda ve düşük maliyetlerle elde edebilmek geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu metot ile 3 – 5 m çapa kadar zemin – çimento karışımı içeren kolonlar elde edilmektedir. Kolon yapım aşaması ilk olarak 15 cm çapa sahip tijin istenilen noktaya indirilmesi ile başlamaktadır. Tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozzlelerden çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak zemin – çimento karışımı kolonlar oluşur (Şekil3.9).



Şekil 3.9. Süper jet tekniği (Osmanoğlu, 2007)

Şekil 3.10.' da standart yöntemle oluşturulmuş jet grout kolonlar ve Şekil 3.11' de süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar gösterilmiştir. Özel durumlarda, su yerine diğer uygun sıvılar veya süspansiyonlar kullanılabilir.



Şekil 3.10. Standart yöntemle oluşturulmuş kolonlar (Osmanoğlu, 2007)



Şekil 3.11. Süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar (Osmanoğlu, 2007)

Bu yöntemde tijlerin dönme ve çekme hızları standart jet grout yöntemindekine göre çok daha azdır. Bell vd. (2003) süper jet kolonları imalatında işletim parametreleri olarak 3 – 4 devir / dakika dönüş hızı, 7 mm/dakika çekme hızı, 40 MPa enjeksiyon basıncı ile 4 m çapa kadar ulaşılabildiği görülmektedir. Süper jet yöntemiyle oluşturulan kolonlarda kolon kesitlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu yöntem yatay zemin suyu kontrolünde, sıvılaşabilir tabaka stabilizasyonunda, geçirimsiz perde duvar imalatında, kazı yan yüzleri desteklenmesinde kullanılmaktadır.

3.1.6. Jet Grout Yönteminin Çalışma Parametreleri

Çalışma parametreleri zemin özelliklerine, elde edilmek istenen kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve seçilen jet grout metoduna göre seçilir. Jet grout kolonunun imalatına başlanmadan önce farklı işletim parametreleri kullanarak test kolonları imal edilmektedir. Zemin yapısına uygun, istenen kolon çapının elde edildiği, kolonda sürekliliğin sağlandığı ve ekonomik olan parametreler tercih edilmektedir. Değişik çalışma parametreleri ve bunların elde edilecek sonuca etkileri aşağıda görülebilir.

Jet grout yönteminde kullanılan imalat parametreleri;

- Enjeksiyon Sistemi
- Enjeksiyon Basıncı
- Nozzle Sayısı ve Çapı
- Tij Dönme Hızı
- Tij Çekme Hızı
- Su / Çimento Oranı

olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin tipik değerleri Çizelge 3.1.' de verilmektedir. Jet grout uygulaması sonucu seçilen sisteme ve zemin cinsine bağlı olarak oluşan kolon çapı değişken olmaktadır. Kolon çapı enjeksiyon esnasında çimento yanında, hava ve su kullanmak suretiyle artırılmaktadır. Ülkemizde genellikle yaygın olarak jet 1 ve jet 2 sistemleri kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Jet grout yöntemi imalat parametreleri (Lunardi, 1977)

Sistem	Enjeksiyon Tipi	Basınç	Nozzle Adedi ve Çapı	Çekme Hızı	Dönme Hızı	Su / Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi
		(bar)	(ad., mm)	(cm/dak)	(rpm)	-	(lt / dak)
JET 1	Çimento	400 - 550	1 - 2 x 2 - 5	15 - 100	5 - 15	1,0 - 1,5	70 - 600
JET 2	Çimento Hava	400 - 550 10 - 12	1 - 2 x 2 - 5 -	10 - 30 10 - 30	4 - 8 -	1,0 - 1,5	70 - 600 4000 - 10000
JET3	Çimento Hava Su	50 - 100 10 - 12	1 - 2 x 4 - 5 -	6 - 15 6 - 15 6 - 15	4 - 8 - -	1,2 - 1,5 - -	80 - 200 4000 - 10000 40 - 100

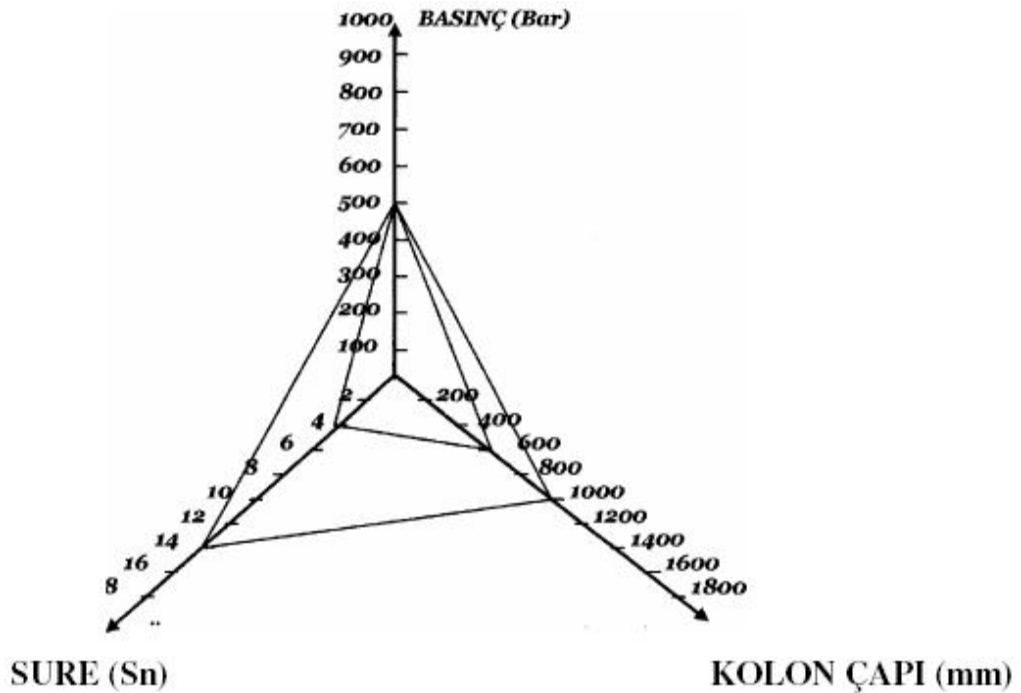
3.1.6.1. Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncının çalışma aralıklarına göre, jet grout işlerini genel olarak sınıflandırmak daha kolay olur;

- 200 – 250 bar aralığında çalışma DÜŞÜK BASINÇLI
- 300 – 400 bar aralığında çalışma ORTA BASINÇLI
- 400 – 700 bar aralığında çalışma YÜKSEK BASINÇLI

olarak tanımlanabilir.

Basınç, elde edilmek istenen çapın oluşmasında en önemli parametredir. Şekil 3.12.' de görüldüğü gibi basınç ile jet grout kolonu çapı arasında direk bir bağlantı vardır. Basınç arttırıldığı zaman kolon çapı artar.



Şekil 3.12. Basınç-Bekleme süresi-kolon çapı ilişkisi (Melegary ve Garassino, 1997)

Bununla beraber ulaşılmak istenen çapta homojen bir kolon elde etmek için basınç değeri gerekli fakat yeterli değildir. Aynı çap ve homojenlikte kolon oluşması zaman faktörü ile de ilişkilidir. Bazı zemin şartlarında, basınç arttırmak, çapın artmasını sağlayamayabilir.

3.1.6.2. Dönme ve Çekme Hızı

Dönme işlemi delgi makinesinde bulunan tijlerin belli bir hızla kendi eksenleri etrafında dönmesidir. Zemin ile bağlayıcı malzemenin (grout) homojen bir karışım oluşturabilmesi için, takım dönüş hızı belirli bir değerden fazla olmamalı, takım çekme hızı da ıslah edilen bölgenin tamamında sürekliliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Dönüş hızı genellikle 10 – 20 devir / dak. değerleri arasında değişir, bazı özel durumlarda 30 devir/dak.'ya kadar çıkabilir. Takım çekme işlemi, iki şekilde olabilir;

1. Kademeli çekme.
2. Sürekli çekme.

Bu iki ayrı tip çekme metodu, genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlı olarak seçilir. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli, hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, her kademede 4 cm. ilerleme ve her kademede 6 – 10 sn. bekleme en iyi neticeyi sağlamıştır (Melegary ve Garassino, 1997).

Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacme enjekte edilecek grout miktarına bağlıdır. Bağ dokusu kuvvetli (cohesive) zeminler, jet hüzmelerinin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süre gerektirirler. Dönme ve çekme hızı adaptasyonu (optimizasyonu) ıslah edilecek zemine ve kullanılan jet grout metoduna çok sıkı bağlıdır. Jet 2 ve jet 3 metotları, daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla ıslah edilen zemin hacmi daha büyük olduğu için, daha uzun süreye ihtiyaç duyarlar.

3.1.6.3. Dozaj

Standart su - çimento oranı 1 (s / ç = 1), özgül ağırlığı ise 1410 – 1570 kg/m³'dür. Bu oran seçilen metot, uygulanan ıslah yöntemi ve kolonların final mukavemetlerine göre değişebilir. Su / çimento oranının, su geçirmez plastik grout perde teşkili için karışımında bentonit kullanımı hali hariç 0,7' nin altına inmesi uygun görülmez.

1m³ ıslah edilmiş zemin içindeki çimento miktarı 350 – 700 kg arasında değişir. Farklı zeminlerin taşıma kapasiteleri incelendiğinde, su - çimento oranı 1 ve ıslah edilmiş zemin içindeki çimento dozajı ortalama 450 kg/m³ olarak oluşturulmuş kolonların kapasiteleri Çizelge 3.2.' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Zemin cinsi - f_{JG} - E / f_{JG} ilişkisi (Durgunoğlu, 2004)

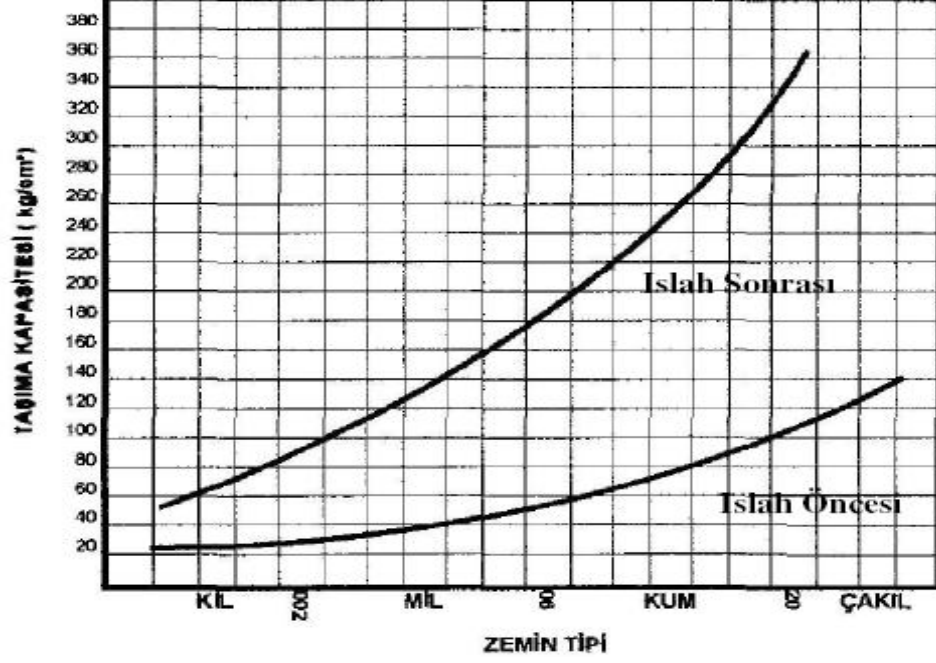
Zemin Cinsi	Serbest Basınç Mukavemeti f _{JG} MPa	Modül Oranı (%40 gerileme seviyesine tekabül eden modül) E / f _{JG} -
Kil	2 – 5	150
Silt	3 – 7	200
Kum	7 – 14	600
Çakıl	12 – 18	900

Grout karışımı içerisine bazı katkıları ilave etmek de mümkündür. Örneğin yüksek debili zemin suyu bulunan durumlarda (high substratum water flow), 1 – 3 oranlarında sodyum silikat ilavesi tavsiye edilebilir.

Organik içerikli zeminlerde çimento dozajı 450 kg/m³ den 700 kg/m³'e çıkartılabilmektedir. Bunun sebebi kullanılan çimentonun bir kısmının organik ortamda yer alan ve çimentonun bağlayıcılığını ortadan kaldıran asitlerin nötrleştirilmesinde harcanmasıdır. Jet grout yöntemi sayesinde ıslah edilmiş hacim, bitişindeki işlem görmemiş zeminin özelliklerini de iyileştirmektedir. Jet grout yönteminin bu ikinci etkisi sayesinde, ıslah edilmiş zeminin SPT değerleri doğal zemininkine (ve diğer ıslah metotlarının neticesinde oluşan sonuca) göre % 20 - 25 civarında daha yükselmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

Aynı su / çimento oranı ve çimento dozajlı jet 2 kolonunun mukavemeti, jet 1 kolonuna göre % 10 - 15 civarında daha düşüktür. Bunun sebebi, jet 2 kolonunun içindeki hava içeriğidir. Yine aynı su / çimento oranlı ve çimento dozajlı jet 3 kolonunun mukavemeti jet 1 ve jet 2 kolonunun mukavemetinden daha düşüktür. Buda jet 3 metodunun içerdiği çok miktardaki sudan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.13.' te ıslah edilmiş zemin sınıfına göre kolon taşıma kapasitesinin değişimi

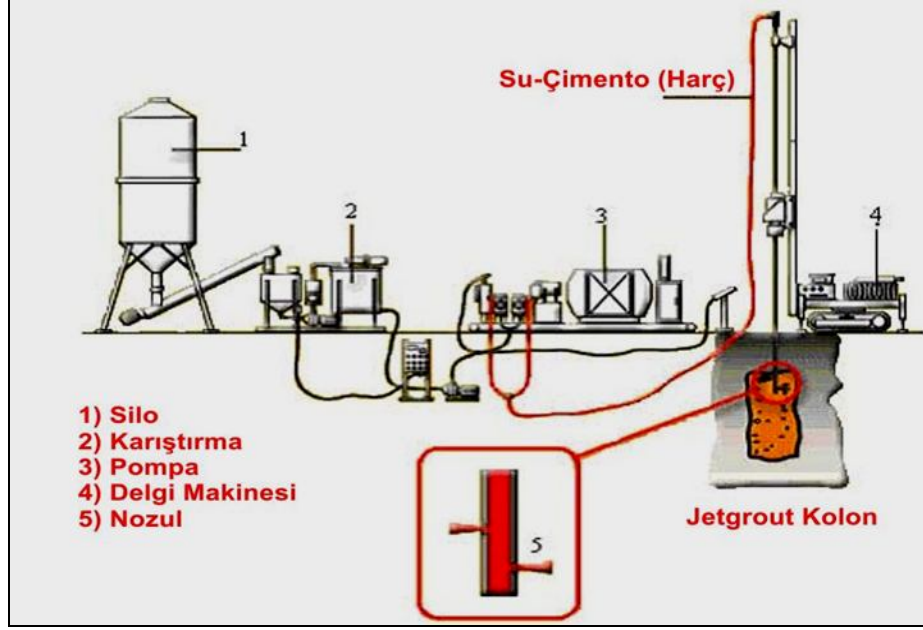
gösterilmektedir. Buna göre granüler zeminlerde ıslah sonrası taşıma kapasitesindeki artışın daha fazla olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.13. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi (Melegary - Garassino, 1997)

3.1.7. Jet Grout Yöntemi Ekipmanı

İnşaat aşamasında jet grout uygulaması için uyarlanmış bir delgi makinesi, basınçlı püskürtme için gerekli enjeksiyon pompası, çimento silosu, su deposu, enjeksiyon işlemi için mikser ve dinlendirici kazanlar ile santralin bulunduğu bir düzen kullanılır. Bu sistem Şekil 3.14.' te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Jet grout ekipmanı (Yıldız, 2011)

Jet grout donanımı genellikle aşağıdakileri içermektedir;

- Sondaj makinesi
- Jet grout makinesi (Genellikle aynı zamanda sondaj makinesi işlevi de görür. Önceden belirlenen dönme ve aktarma hızlarında ilerlemek için jet enjeksiyon tiji, monitör ve diğer gereçlerle donatılmıştır.)
- Jet grout akışkanını (veya akışkanlarını) temin eden karışım ve pompa tesisi
- Jet grout pompasını jet enjeksiyon makinesine birleştiren yüksek basınç hatları
- Basınçları, akışkan debi ve hacimlerini, dönme ve aktarma hızlarını ve derinliği denetlemeyi sağlayan donanım
- Jet grout donanımları, seçilen işlem için aşağıda belirtilenlerin gerçekleşmesini sağlayarak jet enjeksiyon işleminin yapılmasını temin eder.
- Jet grout takımının tasarım hızında ilerlemesi ve döndürülmesi
- Gerekli basınç ve akışkan debisinde, tesisten gelen akışkanın jet grout takımına aktarımı
- Farklı sistemler için jet grout hazırlama ve enjeksiyon tesisi, aşağıdakileri kapsar;

- Tekli sistem için: Çimento ve diğer malzemeler için depo, koloidal karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası.
- Çiftli (hava) sistem: Tekli sistemdekilere ek olarak bir hava kompresörü
- Çiftli (su) sistem: Tekli sisteme ek olarak bir yüksek basınçlı su pompası ve bir enjeksiyon şerbeti pompası
- Üçlü sistem: İkili sisteme (su) ek olarak bir hava kompresörü

3.1.7.1. Delgi Makinesi

Uygulama projesinde öngörülen derinliğe kadar jet grout kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesidir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Delgi makinesi (Küsin, 2009)

3.1.7.2. Pompa Ünitesi

Enjeksiyon karışımını istenen çapta jet grout kolonu teşkil edebilecek basınçta basabilecek yüksek basınçlı pompadan oluşan pompa ünitesidir (Şekil 3.16). Jet grout kolonlarının yapımında 60 MPa da 150 – 450 lt/dk. arasında çimento harcı basabilen ve 8 saate kadar sürekli çalışabilen pompalar kullanılmaktadır (Kauschinger vd., 1992).



Şekil 3.16. Pompa ünitesi (Yıldız, 2011)

3.1.7.3. Mikser Ünitesi

Enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştıracak mikser ve dinlendiriciden oluşan, pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitedeki ünedir. Şekil 3.17.'de jet grout mikser ünitesi gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Mikser ünitesi (Yıldız, 2011)

3.1.7.4. Çimento Silosu

En az 50 ton kapasiteli dökme çimento depolayabilen ve mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek çimento silosu ve konveyörüdür (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Çimento silosu (Bakım, 2007)

3.1.7.5. Monitör

Monitör aşağıda verilen özellikleri kapsar (TS EN 12716);

- Tekli sistem için, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücü. Bu püskürtücüler aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir.
- İkili (hava) sistem için, hava ve enjeksiyon şerbetinin eş zamanlı jet haline getirilme işlemi için bir ya da daha çok çift püskürtücü (aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkan sağlayan açılarda). Hava püskürtücüsü, dairesel şerbet püskürtücüsünün çevresini bir halka şeklinde sarar.
- İkili (su) sistem için, suyun jet haline getirilmesi için bir ya da daha fazla püskürtücü ve çimento karışımını yollamak için bir ya da daha fazla daha derine yerleştirilen püskürtücü.
- Üçlü sistem için, su ve havanın eş zamanlı jetlenmesi işleminde bir ya da daha fazla çift püskürtücü ve enjeksiyon şerbetinin gönderilmesini

sağlayan daha derine yerleştirilmiş bir ya da daha fazla normal püskürtücü.

3.1.8. Kalite Kontrol ve Testler

3.1.8.1. Karot Numunelerinin Alınması

Kolonlardan arazide alınan silindirik numuneler üzerinde laboratuarda yapılan serbest basınç deneyi ile jet grout elemanının basınç dayanımı elde edilir. Numuneler, uygulama esnasında kolon yaş iken piston numune alıcı ile alınır. Prizini almış kolon üzerinde ise karot numune alınır (Durgunoğlu vd., 2003). Serbest basınç deneyinde tercihan deformasyonlarda ölçülerek deformasyon modülü, EJG tayin edilir (Sağlamer vd., 2002).

Şekil 3.19.' da jet grout kolonundan karot numune alımı gösterilmektedir. Deneylelerden ölçülen mukavemet değerlerinin servis yüklerini belli bir emniyet faktörü ile taşıdıkları ispat edilmelidir. Karot numuneleri imal edilen kolondan imal tarihinden 28 gün sonra, TS 10465'e (Beton Deney Metotları - Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini Yönetmeliği) uygun şekilde alınmalıdır.



Şekil 3.19. Karot numunelerin alınması (Yıldız, 2011)

Şekil 3.20.' de jet grout kolonundan alınmış olan karot numune örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Karot numune örneği (Yıldız, 2011)

3.1.8.2. Kazık Yükleme Deneyi

Projede jet grout kolon yüklerinin ve jet grout kolon imalatı kalitesinin tahkik edilmesi amacıyla tüm proje kapsamında imal edilen kolonlardan seçilecek bir adedi üzerinde kolon yükleme deneyi yapılır. Yükleme deneyi için bir adet basınç kolonu ile iki adet çekme kolonu olarak kullanılacak kolonlar imal edilmelidir. Deney doğrultusunda basınç kolonuna statik eksenel basınç yükü yüklenerek yük - oturma, yük - zaman ve oturma - zaman grafikleri hazırlanır.

Jet grout kolonun toplam taşıma kapasitesi, kolonun çeperi ve ucu tarafından taşınan toplam kapasitesidir. Deney yükü için ise jet grout kolonun toplam kapasitesinin 1,5 katı dikkate alınmalıdır. Deneme kolonları, göçene kadar veya maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar yüklenir. Göçme yükü;

1. Yük daha fazla artmadığı halde oturmanın devam etmesi halindeki yük,
2. Kolon çapının % 10'u kadar bir toplam oturmaya yol açan yük,

tanımlamalarından birisine göre seçilir. Yükleme deneylerinde “ASTM D 1143 – 81” standart yükleme için uygun maddeleri kullanılabilir.

Yükleme deneyinde kolonda maksimum yüklemeye meydana gelen deformasyon servis yükünde meydana gelen deformasyonun 1,5 katını geçmemesi, deney yükü kaldırıldıktan sonra meydana gelen kalıcı deformasyonun ise toplam deformasyonun % 50’sini geçmemesi ve kazık başlığında ölçülen toplam oturma değerinin 10 mm’yi geçmemesi gerekmektedir (Düzceer, 2004).

Deney ekipmanları kazığa verilecek aksel yüküne maruz reaksiyon kirişleri, hidrolik krik ve hidrolik basınç pompası, yükü ölçmek için manometre, ölçüm düzenekleri olmak üzere dört ana gruptan oluşmaktadır.

Hidrolik pompa vasıtasıyla belli kademelerde statik yük, kolon başlığı ve reaksiyon kirişleri üzerine yerleştirilmiş olan hidrolik krikoya iletilir. Rijit sistemden dolayı yük altında kolon aksel olarak hareket eder. Deney kolonunda oluşan deformasyonlar, kolondan ve basınç elemanlarından bağımsız bir ölçüm sistemiyle kayıt altına alınmalıdır (Şekil 3.18).



Şekil 3.21. Kazık yükleme deneyi (Düzceer, 2004)

3.1.8.3. Kazık Süreklilik Deneyi

Uygulanan jet grout kolonların boyları, kazıklardakine benzer şekilde ülkemizde de yaygın olarak kullanılan integrity deneyi ile tespit edilebilmektedir.

Kazık çap ve boy sürekliliğinin denetlenmesi için uygulanan kazık süreklilik deneyinde kazıkların üst ucundan küçük bir çekiç darbesi verilmektedir. Bu darbenin ivme sinyali A, kazık üstüne geçici olarak yapıştırılan bir akselometre ile algılanarak sayısallaştırılıp bilgisayarda kaydedilir. Kazıktaki şekil / malzeme değişikliklerinden ve kazık ucundan yansıyan sinyaller de algılanarak hız sinyali olarak kaydedilir. Bu sinyal hıza bağlı bir değişken olup geçen zamanın tam olarak bilinmesinden faydalanılarak, alınan yansımaların yerini tespit için sinyal, derinliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülmektedir. Bu dönüşümde bilinmesi gereken dalganın yayılma hızı olup beton / jet grout kolon için ortalama $C = 3000 - 4500$ m/sn'dir (Rausche vd., 1988).

Formüle edilirse, yansıma derinliği X, Eşitlik 3.6 ile bulunabilmektedir. ((Rausche vd., 1988)

$$X = \left(\frac{1}{2} \times C \times t \right) \quad (3.6)$$

t : Darbeden yansıma anına kadar geçen süre

C : Dalganın yayılma hızı

Bu şekilde derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği yorumlanarak kazıkta olası boy ve uç şekli değişiklikleri anlaşılabilir.

Şekil 3.22.' de kazık süreklilik deneyi şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Kazık süreklilik deneyi şeması (Yıldız, 2011)

Ancak bu deney taşıma kapasitesini tahmin etmek için kullanılmamalıdır. Bu deney karotlu sondaj, kazı araştırması, yükleme testleri gibi zaman alıcı ve masraflı yöntemlerle karşılaştırıldığında çabuk ve ucuz sonuçlar sunar. Kazık cevabı hemen ekranda görüntülenebilir ve yazdırılabilir veya detaylı analizler için aletin kendi belleğinde depolanabilir. 1968’ den beri tüm dünyada kullanılarak yapılan milyonlarca testte birçok kazıkta bozukluk ortaya çıkmıştır. Kazıkların üst seviyelerinde tespit edilen bozukluklardan dolayı, kazıklar daha detaylı inceleme için kazılır veya karotlu sondaj ile numune alınır.

Şekil 3.23.’ te kazık süreklilik testi cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Kazık süreklilik testi cihazı (Yıldız, 2011)

3.1.8.4. Çap Kontrolü

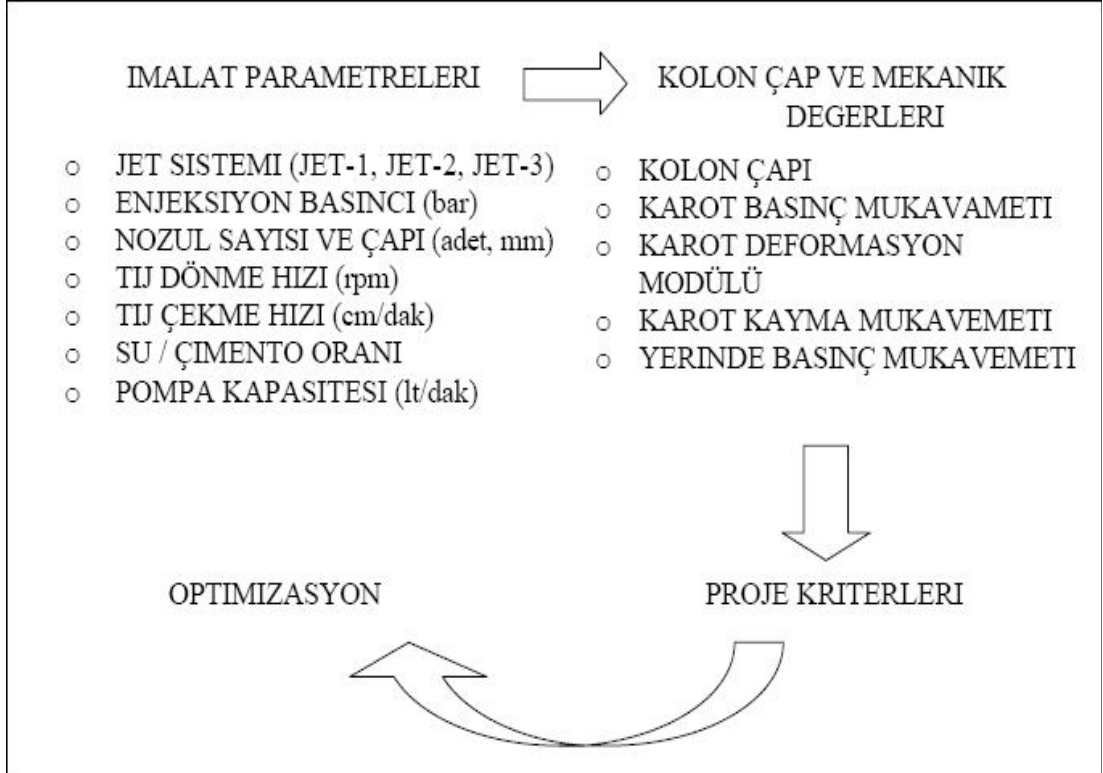
Çalışma platformundan seçilecek imalatı tamamlanan kolonlardan bazıları kazılarak kolon meydana çıkartılır ve kolon boyutları tahkik edilerek istenen çapın sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Şekil 3.24.' te jet grout kolonlarında imalat sonrası çap kontrolü gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Jet grout kolonlarında çap kontrolü (Yıldız, 2011)

3.1.8.5. Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu

Her önemli jet grout uygulamasında seçilen proje kriterlerinin, özellikle kolon çap ve mukavemet değerlerinin arazide yapılacak ön kalibrasyonu çalışmaları sonucu değerlendirilmesi önerilmektedir. İmalat parametrelerindeki değişiklikler, sonuç kolon özelliklerini belirleyeceğinden Şekil 3.25.' de özetlenen yöntemlerin uygulanarak proje kriterlerini sağlayan sistem parametrelerinin optimum değerlerinin tespiti yapılabilmektedir (Durgunoğlu, 2004).



Şekil 3.25. Proje kriterlerinin sahada kalibrasyon ve optimizasyonu (Durgunoğlu, 2004)

3.1.9. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Kapasitesi

Zeminde düşey olarak oluşturulan jet grout kolonları, kazık elemanlarına benzer bir şekilde hesaplanmaktadır. Jet grout kolonunun çevre zemini açısından toplam taşıma gücü iki bileşenden oluşur. Bunlar uç direnci ve çevre sürtünmesi bileşenleridir.

Bir jet grout kolonunun göçmeden önce taşıyabileceği maksimum yük (kolon taşıma gücü) Q_d , kolon ağırlığı W_k ile gösterilirse, bir jet grout kolonunun kırılma olmadan taşıyabileceği yük $Q_d + W_k$ 'dir. Bu yük kolon ucunun maksimum taşıyabileceği yük (Q_u) ile kolon çevresinin sürtünmesi ve adhezyon ile taşıyabileceği yükün (Q_f) toplamı kabul edilir. Bu durumda Eşitlik 3.7 elde edilir.

$$Q_d = Q_u + Q_f - W_k \quad (3.7)$$

Jet grout kolon uç taşıma gücü eşitliği aşağıda Eşitlik 3.8' de gösterilmektedir.

$$Q_u = A q_d \quad (3.8)$$

A : Kolon uç alanı

Q_d : Kolon ucundaki zeminin taşıma gücü

Jet grout kolon sürtünme taşıma gücü formülasyonu Eşitlik 3.9' da gösterilmektedir.

$$Q_f = A_s f_s \quad (3.9)$$

A_s : Kolonu zemin içerisinde kalan yüzey alanı

f_s : Kolonun birim alanına etkileyen ortalama sürtünme gerilmesi

Kolon birim yüzey alanı P ile ifade edilecek olursa A_s = P x D_f olacaktır.

Birim alana etkileyen sürtünme kuvveti Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_s = c_u + p_h \tan \delta \quad (3.10)$$

c_u : D_f boyunca ortalama adhezyon

p_h : D_f boyunca ortalama yatay basınç

Bu durumda kolon taşıma gücü, Eşitlik 3.11' deki gibi yazılabilir.

$$Q_d = A q_d + A_s f_s - W_k \quad (3.11)$$

3.1.9.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü

Kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun taşıma gücü Eşitlik 3.12 ve 3.13 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_d = A q_d \quad (3.12)$$

$$q_d = p_o N_q + K_2 \gamma_2 N_\gamma B \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13'teki p_o parametresi kolon uç efektif basınç gerilmesi olup Eşitlik 3.14 ile ifade edilmektedir.

$$p_o = \gamma_1 D_f \quad (3.14)$$

K_2 parametresi şekil katsayısı olup kare kesitli kazıklarda 0.4, dairesel kesitli kazıklarda ise 0.3' tür. Jet grout kolonu dairesel kesitli kazık sınıfında olduğundan dolayı Eşitlik 3.13' te bulunan K_2 değeri 0.3 olarak alınacaktır. Eşitlik 3.13' te bulunan kolon çapı veya kenarının içeren terim (B), kolon çapının küçük olduğu düşünülecek olursa ihmal edilebilmektedir. N_q değeri tarafından verilen tablodan Çizelge 3.3.' den alınacaktır (Kumbasar – Kip, 1987).

Çizelge 3.3. Terzaghi taşıma gücü katsayıları

Ø	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
N_c	5,7	7,3	9,6	12,9	17,7	25,1	37,2	58,0	96,0	172,0	348,0
N_q	1,0	1,6	2,7	4,4	7,4	12,7	22,5	41,0	81,0	173,0	415,0
N_γ	0,0	0,5	1,2	2,5	5,0	9,7	19,7	42,0	100,0	298,0	1153,0

Jet grout kolon boyu (L) ile kolonun zemin içinde kalan uzunluğu (D_f) birbirine eşittir. Kolon en kesiti ile uç alanı aynıdır.

$$W_K = A L \gamma_{kazık} = A D_f \gamma \quad (3.15)$$

$$Q_U - W_k = A \gamma D_f N_q - W_k = A \gamma D_f (N_q - 1) \quad (3.16)$$

Kohezyonsuz zeminlerde $c_u = 0$ olduğundan birim çevre sürtünmesi Eşitlik 3.17 ve 3.18 ile hesaplanabilmektedir.

$$f_s = p_h \tan \delta \quad (3.17)$$

$$p_h = K p_v \quad (3.18)$$

- ph : Çevre sürtünmesinin hesaplanacağı seviyede kazık çevresine etkiyen yatay basınç
- K : Yatay toprak basıncı katsayısı
- p_v : Düşey basınç

K ve δ değerleri Çizelge 3.4.' den alınmaktadır (Kumbasar – Kip, 1987).

Çizelge 3.4. Kazık malzemesi - δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki

Kazık Malzemesi	δ	K Değerleri	
		Küçük Relatif Sıklık	Yüksek Relatif Sıklık
Çelik	20°	0,5	1,0
Beton	3/4 Ø	1,0	2,0
Ahşap	2/3 Ø	1,5	3,0

Jet grout kolonları beton kazık sınıfına girdiğinden dolayı Eşitliklerde, beton kazıklar için kullanılan K ve δ değerleri kullanılacaktır. Bu durumda birim çevre sürtünmesi değerini elde etmek için Eşitlik 3.19 kullanılmaktadır.

$$f_s = K p_v \tan \delta \quad (3.19)$$

Düşey basınç gerilmesi $p_v = \gamma D_f$ olup birim çevre sürtünmesi Eşitlik 3.8' den de görüleceği derinlikle arttıkça lineer olarak artacaktır. D_f boyunca lineer dağılım halinde çevre sürtünmesi Eşitlik 3.20, dairesel kolonlarda ise (jet grout kolonu) Eşitlik 3.21 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_f = P D_f f_s \quad (3.20)$$

P : Kazık çevre uzunluğu

$$Q_f = \frac{\pi}{2} K \gamma D_f^2 D \tan \delta \quad (3.21)$$

Jet grout kolonunun tek tabaka içinden geçmesi durumunda Eşitlik 3.22 kullanılacaktır.

$$Q_d = Q_u Q_f - W_k = A \gamma D_f (N_q - 1) + \frac{\pi}{2} K \gamma D_f^2 D \tan \delta \quad (3.22)$$

Kolonun farklı tabakalardan geçmesi halinde çevre sürtünmesi her tabaka için kolon yüzey alanı, ortalama düşey basınç, toprak basıncı katsayısı ve sürtünme açısı ayrı değerlerin toplamı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.23).

$$Q_f = \sum A_{s_i} K_i P_{v_i} \tan \delta \quad (3.23)$$

Bu durumda kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun taşıma gücü Eşitlik 3.24 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$Q_d = Q_u Q_f - W_k = A \gamma D_f (N_q - 1) + \sum A_{s_i} K_i P_{v_i} \tan \delta \quad (3.24)$$

3.1.9.2. Kohezyonlu Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü

Killi zeminlerde Skempton formülüne göre $D_f / B > 2,5$ kolon en kesitleri daire, kare veya bunlara yakın şekillere sahip olduğundan Eşitlik 3.25 kullanılacaktır. (Jet grout kolonu dairesel kazık sınıfına girmektedir.)

$$N_c c = 9c \quad (3.25)$$

Katsayı olarak 9 değerinin alınabilmesi için kolonun taşıyıcı zemine $5B$ kadar girmesi gerekmektedir.

$$q_d = 9c_1 + \gamma D_f \quad (3.26)$$

$f_s = c_u$ olduğundan dolayı

$$Q_u = (9c_1 + \gamma D_f) A \quad (3.27)$$

$$Q_f = A_s c_u \quad (3.28)$$

$$Q_d = A(9c_1 + \gamma D_f) + A_s c_u - W_k \quad (3.29)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan kabule göre $W_k = A \gamma D_f$ olarak alınabileceğinden killi zeminlerdeki kolon taşıma kapasitesi Eşitlik 3.30' da gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$Q_d = 9c_1 A + A_s \alpha c_2 \quad (3.30)$$

c_1 : Kazık ucundaki drenajsız kayma mukavemeti

c_2 : Kazık çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti

3.1.9.3. Homojenleştirme Yöntemiyle Kompozit Zeminlerin Sayısal Analizinin Yapılması

Farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen metot, Omine vd. (1999) tarafından gerilme dağıtımını önemi esas alınarak önerilmektedir. Kompozit malzemelerin nümerik analizlerinde homojenleştirme metodu olarak tanımlanan bu yaklaşım, kazık şeklinde kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, güçlendirilmiş zeminin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesini elde etme amacıyla uygulanmaktadır.

Farklı karışımlarda gerilme dağıtım parametresinin belirlenmesi için Şekil 3.26.' da gerilme dağıtım faktörü ile Eshelby tensörü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Tabakalar veya küresel katkılı karışımlar için gerilme dağıtım parametresi, katkı ve matrisin elastisite modülü oranının E_s / E^* kuvvet fonksiyonu olarak temsil edilmektedir. Nümerik analiz sonuçlarından kazık şeklinde katkılar için yeterli n değerinin $1/3 \sim 1/6$ aralığında olduğu elde edilmektedir (Adams - Doner, 1967, Omine vd., 1997).

$$S_{1111} = 1 \quad ; \text{ Yatay Tabakalar}$$

$$S_{1111} = 0 \quad ; \text{ Düşey Tabakalar}$$

$$S_{1111} = \frac{7-5\nu^*}{15(1-\nu^*)} \quad ; \text{Küre şeklinde katkı}$$

$$S_{1111} = \frac{5-4\nu^*}{8(1-\nu^*)} \quad ; \text{Kazık şeklinde katkı}$$

S_{1111} : Eshelby Tensörü

ν^* : Matris poisson oranı

Not: Bu bölümdeki tüm formülasyonlarda alt indis “s” ve üst indis “*” sırasıyla katkı ve matris anlamını taşımaktadır.

Type of mixtures	Horizontal laminate	Mixture with spherical inclusions	Mixture with pile shaped inclusions	Vertical laminate
Assumption	Constant Stress	Constant Strain energy	Approximation based on numerical analysis	Constant strain
Stress distribution parameter b	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^0 = 1$ where, $n = 0$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{2}}$ where, $n = 1/2$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}}$ where, $n = 1/3-1/6$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^1$ where, $n = 1$
Eshelby's tensor S_{iiii}	1	$7/15 \sim 9/15$ (for $\nu^*=0-0.5$)	$5/8 \sim 3/4$ (for $\nu^*=0-0.5$)	0
$1 - S_{iiii}$	0	nearly 1/2	$3/8 \sim 1/4$	1

Şekil 3.26. Gerilme dağıtım parametresi - Eshelby tensörü ilişkisi (Omine vd., 1999)

Şekil 3.26.’ da gösterildiği üzere gerilme dağıtım parametresi kuvveti (n) (Uygulanan kuvvet doğrultusunda) Eshelby tensörüyle ilişkilidir.

$$n = 1 - S_{iiii} \quad (3.31)$$

İki fazlı karışımların gerilme dağıtım parametresi Eşitlik 4.26 ile elde edilen n değerinin Eşitlik 3.32’ de kullanılması ile elde edilmektedir.

$$b = \left(\frac{E_s}{E^*} \right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*} \right)^{1-S_{1111}} \quad (3.32)$$

b : Gerilme dağıtım parametresi

E* : Matris elastik modülü

E_s : Katkı elastik modülü

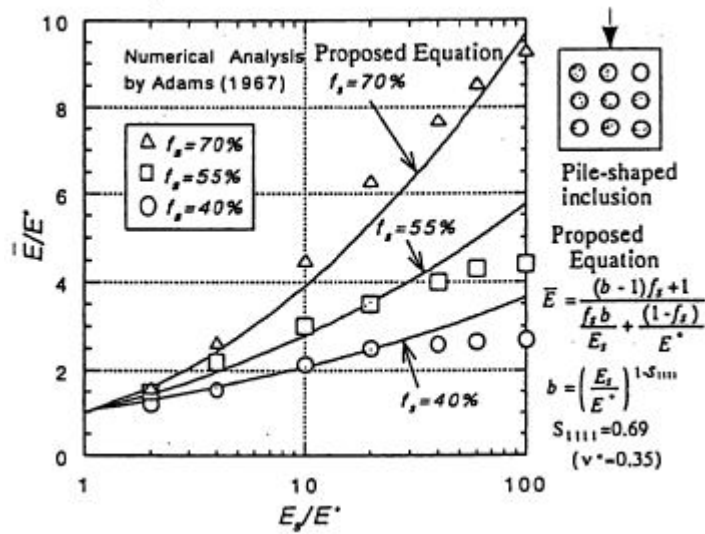
Karışımın elastik modülü Eşitlik 3.32 ile elde edilen gerilme dağıtım parametresinin değerinin Eşitlik 3.33' te kullanılması ile elde edilmektedir (Adams - Doner, 1967).

$$E = \frac{(b-1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{E_s} + \frac{(1-f_s)}{E^*}} \quad (3.33)$$

E : Homojenleştirilmiş malzeme elastik modülü

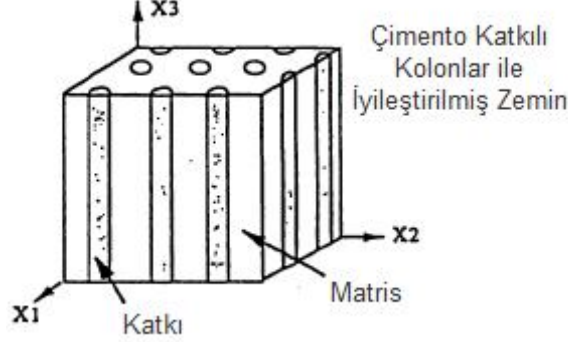
f_s : Katkı hacimsel oranı

Şekil 3.27.' de kazık şeklinde katkı için Adams - Doner (1967)'in iki farklı malzeme ile yaptıkları nümerik analiz sonuçları ile Eşitlik 3.33 kullanılarak hesaplanan sonuçlarının karşılaştırması gösterilmektedir.



Şekil 3.27. Nümerik analiz ile önerilen eşitlik sonuçlarının karşılaştırması (Adams –Doner, 1967)

Derin karışım metoduyla iyileştirilmiş zemin, kazık şeklinde kolonlu kompozit zemin olarak Şekil 3.28.' de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Kazık şeklinde kolonlar ile iyileştirilmiş zemin

Çoğu iyileştirilmiş zemin yatay ve düşey doğrultularda farklı elastik modüllerine sahip unizotropik malzeme olarak kabul edilmektedir. İyileştirilmiş zeminin elastik modülü davranışı Eşitlik 3.34' te gösterilen gerilme – deformasyon ilişkisi ile temsil edilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & \frac{-v_{hh}}{E_h} & \frac{-v_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & \frac{-v_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{vh}}{E_v} & \frac{-v_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hv}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (3.34)$$

$$E_h = E_1 = E_2, E_1 = E_2, G_{hh} = G_{12}, G_{hv} = G_{13} = G_{23}, v_{vh} = v_{31} = v_{32}, v_{hh} = v_{12},$$

“v” ve “h” alt indisleri düşey ve yatay bileşenleri temsil etmektedir. Önerilen iki fazlı karışım modelinde iyileştirilmiş zeminin ortalama elastik modülü, poisson oranı ve kayma modülü formülleri Eşitlik 3.35, 3.36 ve 3.37'de verilmektedir (Omine vd., 1999).

$$E_i = \frac{(b_i - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b_i}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (3.35)$$

$$v_{ij} = \frac{f_s b_i \frac{v_s}{E_s} + (1 - f_s) \frac{v^*}{E^*}}{\frac{f_s b_i}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (3.36)$$

v_{ij} : Homojenleştirilmiş malzeme poisson oranı

v_s : Katkı poisson oranı

$$G_{ij} = \frac{(b_{ij} - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b_{ij}}{G_s} + \frac{(1 - f_s)}{G^*}} \quad (3.37)$$

G_{ij} : Homojenleştirilmiş malzeme kayma modülü

G_s : Katkı kayma modülü

G^* : Matris kayma modülü

v_{ij} : Homojenleştirilmiş malzeme poisson oranı

v_s : Katkı poisson oranı

v^* : Matris poisson oranı

İyileştirilmiş zeminin ortalama elastik modülü katkı ve doğal zemin parametrelerinden elde edilmektedir. Gerilme dağıtma parametresi Eşitlik 3.38 ve 3.39 kullanılarak elde edilmektedir (Omine vd., 1999).

$$b_i = \left(\frac{E_s}{E^*} \right)^{1-S_{iii}} \quad (3.38)$$

$$b_{ij} = \left(\frac{G_s}{G^*} \right)^{1-S_{iiii}} \quad (3.39)$$

$b_i = b_{iii}$, $b_{ij} = b_{ijij}$ ve kazık şeklinde katkılarla karışımlar için Eshelby faktörü

$$S_{1111} = S_{2222} = 3/4$$

$$S_{3333} = 0$$

$$S_{1212} = S_{1313} = S_{2323} = 1/4 \text{ olarak alınmaktadır (Mura, 1982).}$$

Şekil 3.29.' da da görüldüğü gibi matris ve katkı malzemelerinin kırılana kadar lineer elastik, kırıldıktan sonra ise tam plastik davranış gösterdikleri kabul edilmektedir. Eğer katkı ve doğal zeminin drenajsız durumda sürtünme açıları sıfır ise bu zeminlerin akma gerilmeleri aşağıdaki Eşitlik 3.40 ve 3.41' de gösterilmektedir.

$$\sigma_{ys} = 2c_{us} \quad (3.40)$$

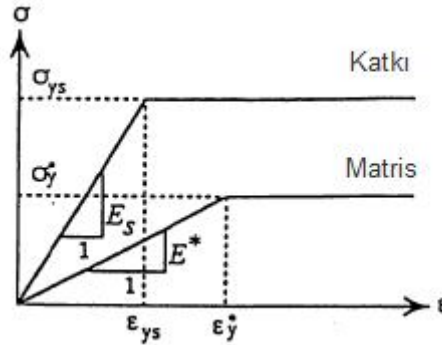
$$\sigma^* = 2c^* \quad (3.41)$$

c_{us} : Katkı kohezyonu

c^* : Matris kohezyonu

Doğal zeminin ortalama gerilmesi Eşitlik 3.42' de gösterilmektedir.

$$\sigma_{y11}^* = \sigma_y^* = 2c_u^* \quad (3.42)$$



Şekil 3.29. Katkı ve matris gerilme - Deformasyon eğrileri (Omine vd., 1999)

Gerilme dağıtım tensörü $b_h (= b_{1111})$ kullanılarak elde edilen homojenleştirilmiş zeminlerin ortalama gerilmesi Eşitlik 3.43' de gösterilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{s11} = b_h \sigma_{y11}^* = 2 b_h c_u^* \quad (3.43)$$

Homojenleştirilmiş zeminin yatay doğrultudaki akma gerilmesi σ_{yh} (σ_{y11}) katkı ve doğal zeminin ortalama gerilmesi olarak Eşitlik 3.44' de gösterilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{yh} = 2(f_s b_h + 1 - f_s)c_u^* \quad (3.44)$$

Aynı şekilde homojenleştirilmiş zeminin düşey doğrultudaki akma gerilmesi Eşitlik 3.45 ile elde edilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{yv} = 2[f_s + (1 - f_s)/b_v]c_{us} \quad (3.45)$$

Omine vd. (1999) çalışmalarında eshelby tensörü kullanarak düşey ve yatay doğrultular için farklı gerilme dağıtım parametresi elde etmektedirler. Omine vd. (1993) ise çalışmalarında homojenleştirme metodunu, tek gerilme dağıtım parametresi kullanarak uygulamaktadırlar. Omine vd. (1993) 'nin çalışmalarında zeminlerin kohezyon değerlerinin homojenleştirilmesi herhangi bir formülasyon önerilmemektedir. Buna karşın çalışmada elastik modülü ve kesme modülünün dışında, hacimsel esneklik modülü homojenleştirilmesi için de formülasyon önerilmektedir.

Elastik modülü, hacimsel esneklik modülü ve kesme modülü için önerilen formülasyonlar Eşitlik 3.46, 3.47 ve 3.48' de gösterilmektedir.

$$E = \frac{(b-1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{E_s} + \frac{(1-f_s)}{E^*}} \quad (3.46)$$

$$G = \frac{(b-1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{G_s} + \frac{(1-f_s)}{G^*}} \quad (3.47)$$

$$K = \frac{(b-1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{K_s} + \frac{(1-f_s)}{K^*}} \quad (3.48)$$

K : Homojenleştirilmiş malzeme hacimsel esneklik modülü

K_s : Katkı hacimsel esneklik modülü

K^* : Matris hacimsel esneklik modülü

Gerilme dağıtım parametresi farklı doğrultulardaki karışımlar ayırt etmeksizin tek bir formülasyon ile elde edilmektedir. Gerilme dağıtım parametresi Eşitlik 3.49' dan elde edilmektedir (Omine vd., 1993).

$$b = \left(\frac{E_s}{E^*} \right)^{1/2} \quad (3.49)$$

Omine vd. (1993) tarafından hazırlanan çalışmada poisson oranı için ayrı bir homojenleştirme formülasyonu önerilmediğinden dolayı poisson oranı, kesme modülü – poisson oranı ilişkisi (Eşitlik 3.50) veya hacimsel esneklik modülü – poisson oranı ilişkisini (Eşitlik 3.51) gösteren formülasyonlardan biri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.50)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.51)$$

3.1.10. Zemin Sıvılaşması ve Jet Grout Yöntemi

3.1.10.1. Zemin Sıvılaşması

Depremler, özellikle suya doygun granüler zeminlerde, özel zemin davranışlarının gelişmesine yol açmaktadır. Bu davranışlar arasında sıvılaşma ve bununla ilgili zemin duyarsızlıkları, yapısal hasarlar üzerinde etkin rol oynamaktadır. Sıvılaşma sonucu, taşıma gücünü yitiren zemin, yapıların tasmanına, yanal deplasman yapmasına veya devrilmesine neden olmaktadır (Kramer, 1996). 17 Ağustos 1999 Türkiye depreminde, Adapazarı, Gölcük ve Düzce'de yapısal hasarların önemli etkenlerinden birinin sıvılaşma olduğu gözlemlenmiştir (Mollamahmutoğlu, 2000).

Suya doymuş gevşek granüler zeminlerin deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sonucu, efektif gerilmelerin küçülerek kayma direncini yitirmesi sonucu zeminin bir sıvı gibi hareket etmesi halinin genel tanımı sıvılaşma olarak verilmektedir. Orta sıkı veya sıkı zeminler, kayma gerilmeleri altında hacim artırmaya yönelik davranış gösterdiğinden gerilme seviyesinin belirli bir seviyeye ulaşması ile boşluk suyundaki artış bu tür zeminlerde gerçekleşmediği için, genellikle sıvılaşmaya en hassas zeminler gevşek, diğer bir deyişle düşük izafi sıklıktaki granüler zemin katmanları olarak belirlenmektedir (Durgunoğlu, 2004).

3.1.10.2. Sıvılaşma ve Etkisine Karşı Alınabilecek Tedbirler

Zemin sıvılaşması, zemin yüzeyinde ve yapılar üzerinde önemli etkilere neden olmaktadır. bunlar arasında en belirgin olanları; yüzeye kum ve su fıskırtması, büyük oturmalar, büyük genlikli yer hareketleri, taşıma gücü kaybı, istinat duvarlarında ve rıhtımlarda hasarlar, şevlerde akma, zeminde yayılma olarak adlandırılan kalıcı yatay deformasyonlar ve yer altı yapılarının yüzmesi olarak sayılabilir.

Sıvılaşma etkilerinin azaltılmasına yönelik metotlar;

- Sıvılaşma potansiyeli olan zeminin kazılması ve / veya yer değiştirilmesi
- Zemin sıkılaştırmasıyla mukavemet parametrelerinin artırılması (vibrokompaksiyon, taş kolon, dinamik kompaksiyon, patlatma vs.)
- Aşırı boşluk suyu basınçlarının taş kolon veya şerit drenler ile drenajı
- Çimento ve diğer bağlayıcılarla zeminde mukavim kolonlar oluşturulması (Jet Grout, Deep Mixing vs.)
- Çakma veya fore kazıklı temeller (kesme kuvvetlerini karşılayacak şekilde donatılarak)
- Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi
- Diyafram duvar
- Radye temel uygulamaları olarak sıralanabilecektir.

3.1.10.3. Sıvılaştırma ve Etkisine Karşı Jet Grout Yönteminin Kullanılması

Jet grout kolonlu zemin iyileştirme yönteminde önce kolon alt kotuna kadar hidrolik su basıncı uygulanarak enjeksiyon tijleri indirilmektedir. Daha sonra zemin ortamına yüksek basınç altında su – çimento karışımı enjekte edilerek tijler döndürülerek zemin yüzeyine doğru çekilmektedir. Bu sayede zeminde yaklaşık daire kesitli kolonlar oluşturulmakta, kohezyon ve yüksek basınç mukavemeti kazandırılmaktadır. Zemin iyileştirme öncesi durumuna göre daha rijit olmakta, taşıma gücü artmakta muhtemel oturmalar azalmaktadır. Deprem esnasında oluşacak kayma gerilmelerinin bir kısmı jet grout kolonlar tarafından karşılanacağı için zemini sıvılaştıran veya yumuşatan tekrarlı kayma gerilmesi oranı düşmektedir.

3.2.Yöntem

Çalışmamızda, jet grout kolonlara ait etken parametrelerin optimizasyonu yapılacağından bazı istatistiksel analizlerin tanımlarına ihtiyaç duyulacaktır. Bunlar optimizasyon, varyans ve regresyon analizleri gibi temel kavramlardır. Bu temel kavramların tanımları aşağıda verilmiştir.

3.2.1.Optimizasyon

Optimizasyon, bir sistemde varolan kaynakların en verimli şekilde kullanılarak belirli amaçlara (maliyet enazaltılması, kapasite kullanımının enyükseltilmesi ve verimliliğin ençoklanması gibi) ulaşmayı sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Gass, 2000).

Optimizasyon teknolojisi, karar verme süreçlerini hızlandırmakta ve karar kalitesini arttırmakta kullanılarak gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin etkin, doğru ve gerçek zamanlı çözümünde yararlanılmaktadır (Winston, 2003). Optimizasyon, ekonomik açılarından getirdiği kazançların yanında sistemde yer alan kaynakların kalitesinin yükseltilmesinde de etkin bir şekilde başvurulan bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

3.2.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi (F testi), İkiden çok örnek kütle ortalamalarının karşılaştırılmasında kullanılır. Muamele sayısının 2' den fazla olması durumunda, t testi ile ikili karşılaştırmaların yapılması gerekir. Örneğin 4 muamele olduğunda 4' ün 2' li kombinasyonu kadar ($4C_2=6$) karşılaştırma yapmak gerekir. Muamele sayısı arttıkça karşılaştırma sayısı çok daha fazla olacaktır. Bu nedenle 2' den fazla karşılaştırmayı aynı anda yapan varyans analizi tekniği 1925' de Fisher tarafından geliştirilmiştir. Varyans analizlerinin geliştirilmesi ile araştırma metotlarında çok hızlı bir gelişme kaydedilmiştir. Tesadüf parselleri, tesadüf blokları ve latin karesi deneme planlarının gelişmesini takiben eksik bloklar, kısmi tekerrürlü denemeler, bölünmüş parseller, ortogonal olmayan denemeler gibi daha karışık planlar geliştirilmiştir. Bu yöntemle toplam değişmeye katkıda bulunan çeşitli değişim kaynaklarının değişkenler arası etkileşimi ve deneysel hataları incelenir. Varyans analizi tek yönlü ve çok yönlü olarak uygulanabilir. Tek yönlü varyans analizi elle hesaplanabilir, ancak çok yönlü varyans analizi için bilgisayar kullanılmalıdır. Bu yöntemle ilgili aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

1. Gruplardaki bireyler birbirine benzer ve homojen olmalıdır.
2. Gruplar birbirinden bağımsız olmalıdır. Bağımlı gruba uygulanmaz.
3. Veriler ölçümle belirlenmiş sürekli karakter olmalıdır.
4. Gruptaki denek sayıları birbirine eşit veya yakın olmalıdır.

Bu şartlar sağlanamadığı zaman nonparametrik karşılığı "Kruskal Wallis varyans analizi" uygulanmalıdır (Alpar, 1997).

Varyans analizinin ön şartları şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Normallik ön şartı
- 2) Etkilerin eklenebilirliği ön şartı
- 3) Bağımsızlık ön şartı
- 4) Varyansların homojenliği ön şartı

İstatistikte önemli bir dağılımda F dağılımıdır. Aynı normal populasyondan çekilen veya aynı varyanslı normal populasyonlardan çekildiği varsayılan iki örnekten hesaplanan varyansların birbirine oranının 1'e eşit olması beklenir. Fakat bu her zaman gerçekleşmez ve bir dağılım gösterir. Bu oranların dağılımı F-dağılımı olarak bilinir.

3.2.3. Regresyon Analizi

Değişkenler arasındaki ilişkilerin fonksiyonel şekillerini belirlerken, neden durumunda olan değişkenlere bağımsız, sonuç durumunda olan değişkenleri ise, bağımlı değişken olarak tanımlanır. Bir bağımlı değişken, birden fazla bağımsız değişkenle ilişkili olması mümkündür. Regresyon denklemi yardımıyla, bağımsız değişkene verilen herhangi bir değere göre bağımlı değişkenin alacağı değer hesaplanabilir. Regresyon analizi, değişkenler arasındaki ilişki ve bağıntıların araştırılması olarak kısaca tarif edilebilir. Regresyon analizi tek bir bağımsız değişkenle ilgileniliyorsa, basit regresyon; birden çok bağımsız değişkenle bağımlı değişken belirlenmeye çalışılıyorsa çoklu regresyon incelenmesi yapılır.

3.2.3.1. Basit Doğrusal Regresyon Analizi

Birçok istatistiksel çalışmada olduğu gibi regresyon analizinde de ana kütle verilerinin tümü yerine bu ana kütlede seçilen örnek verileri ile analiz yapılır. Daha sonra elde edilen sonuçlar ana kütledeki ilişkinin tahmininde kullanılır. Bilindiği gibi, ana kütle birimi sayısı çok fazla olduğundan, zamandan ve araştırma masraflarından tasarruf amacıyla tüm ana kütle birimleri yerine, bu ana kütlelerden tesadüfi olarak belirli sayıda birim (n) seçilerek istatistik analizler yapılır. Ana kütle ve örnek verileriyle yapılan istatistik araştırmalarda tekniklerinin uygulanmasında farklılık yoktur. Ancak teknikler uygulandıktan sonra örnekleme teorisinden yararlanılarak ana kütle parametrelerinin testleri ve tahminleri yapılır.

Basit doğrusal regresyon analizi, Y bağımlı değişkeninin tek bir bağımsız (açıklayıcı) değişken X ile arasındaki ilişkinin doğrusal fonksiyonla ifade edilmesine

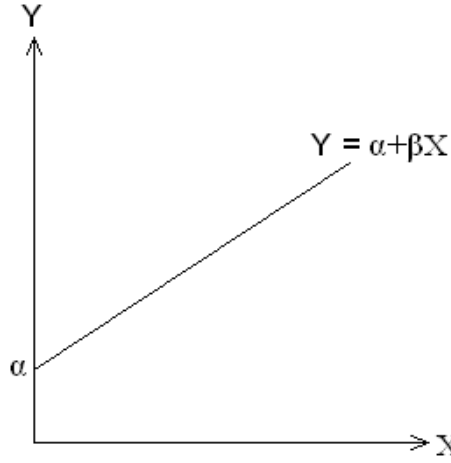
dayanmaktadır. Basit doğrusal regresyon modeli, tek bir serbest değişken içeren (Eşitlik 3.52);

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (3.52)$$

modelidir. Bu modelin α ve β parametrelerini bulmak için X serbest değişkeni, Y bağlı değişkeni ve ε hata terimi ile ilgili gözlemlere gerek duyulur.

Ana kütle içinde birer α ve β değeri varken, bu ana kütlede çekilen her bir örneklem için ayrı birer $\hat{\alpha}$ ve $\hat{\beta}$ elde edilmektedir. İşte bu $\hat{\alpha}$ ve $\hat{\beta}$ normal bölünmeye sahip olup beklenen değerleri sırasıyla α ve β 'dir. Uygulamada tek bir örneklem alınmakta ve bu örneklem yardımıyla ana kütle parametreleri tahmin edilmektedir.

α Doğrusal fonksiyonun sabitidir. $X=0$ olduğunda regresyon doğrusunun dikey eksen olan Y ile kesiştiği noktayı göstermektedir. β (β_{yx} ile de gösterilebilir) ise doğrusal fonksiyonun eğimidir. Regresyon analizinde bağımsız değişken X deki bir birimlik değişimin bağımlı değişken Y' (Y cinsinden) ne kadarlık bir değişime yarattığını gösteren regresyon katsayısıdır. Fonksiyon tipinin belirlenmesi için regresyon analizine serpilme diyagramı çizilerek başlanır. Aşağıdaki serpilme diyagramında (Şekil 3.30) gözlem noktalarının dağılımının doğrusal bir eğilimde olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 3.30. Basit doğrusal regresyon doğrusu

α ve β parametrelerinin gösterdiği grafikte regresyon doğrusunun eğiminin pozitif olduğu anlaşılmaktadır. β 'nin işareti iki değişken arasındaki ilişkinin yönünü göstermektedir. Her iki değişken birlikte artıyor veya azalıyor β 'nin işareti pozitif (+), değişkenlerden biri artarken diğeri azalıyor β 'nin işareti negatif (-) olacaktır. β 'nin sıfır (0) olması ise iki değişkenin arasında bir ilişki olmadığını göstermektedir. Sıfır (0) dan farklılık ise iki değişken arasında belirli bir ilişkinin varlığını ifade etmektedir. Regresyon katsayısının alt sınırı (0) vardır, ancak belirli bir üst sınırı yoktur. Bu nedenle regresyon doğrusuna bakarak ilişkinin gücü hakkında kesin bir şey söylemek mümkün değildir.

Regresyon modeline açıkça dahil edilemeyen diğer değişkenleri temsil etmek üzere $Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i$ modelinde yer verilen ε hata terimini gözlemek hiçbir zaman mümkün olmaz. Dolayısıyla ε hata terimi hakkında aşağıda değineceğimiz bazı varsayımları yapmak zorunlu hale gelir.

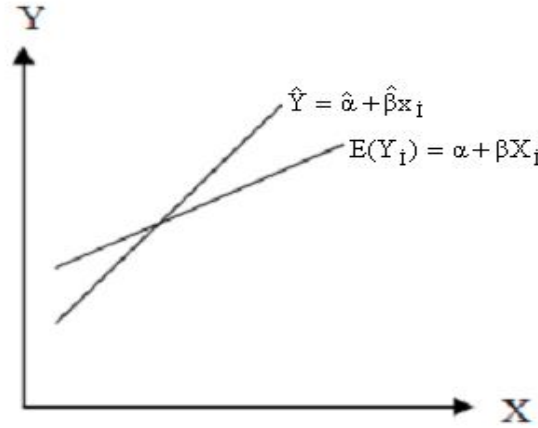
“Y ve X arasındaki gerçek ilişki” ; $Y = \alpha + \beta X_i + \varepsilon$ iken “gerçek regresyon doğrusu” : $E(Y_i) = \alpha + \beta X_i$ eşitliğidir. Öte yandan, “Tahmin edilen ilişki”:

$\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} X + \varepsilon$ şeklinde gösterilmektedir. Tahmin edilen regresyon doğrusu ise şudur: $\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} X_i$

Yukarıdaki eşitliklerde :

- Y_i Y değişkeninin gözlenen değerini,
 \hat{Y}_i X değişkeninin belli bir değeri veri iken Y değişkeninin tahmin edilen değerini,
 $\hat{\alpha}$ α gerçek kesim noktasının tahminini,
 $\hat{\beta}$ β gerçek parametresinin tahminini,
 E ε hata teriminin gerçek değerinin tahminini ifade eder.

Gerçek ve tahmin edilen regresyon doğruları Şekil 3.31.' de gösterilmiştir:



Şekil 3.31. Gerçek ve tahmin edilen regresyon doğruları

Doğrusal regresyon modeli bazı varsayımlara dayanmaktadır. Söz konusu varsayımlar “hata teriminin bölünmesi”, “hata terimi ile serbest değişkenler arasındaki” ve “serbest değişkenler arasındaki ilişki” ile ilgilidir.

Varsayımlar;

1. Hata terimi normal dağılıma sahiptir,
2. Hata terimlerinin ardışık değerleri birbirlerinden bağımsızdır,
3. Hata teriminin varyansı X değerlerine göre değişmez yani sabittir.

Hata teriminin varyansı ayrıca bağlı değişkenin varyansına da eşittir:

$\text{Var}(Y) = \text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$. “Sabit varyans varsayımı” adı da verilen bu varsayıma göre, hata teriminin ortalaması etrafındaki varyansı bütün X değerleri için sabittir.

α ve β 'nın tahminleri olan $\hat{\alpha}$ ve $\hat{\beta}$ 'nın hesaplanmasında “En Küçük Kareler

Tekniği” kullanılabilir.

3.2.3.2. Çoklu doğrusal regresyon

Basit regresyon analizinde bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkiler analiz ediliyordu. Bazı durumlarda ise; Araştırma ve çalışmaların çoğu çeşitli faktörlere bağlı olarak meydana gelmekte, incelenen bir bağımlı değişkeni birçok bağımsız değişken etkileyebilmektedir. Bu nedenle basit regresyon yetersiz kalabilmektedir. İşte bir olayı etkileyen birden fazla faktör olması durumunda sebep-sonuç ilişkisinin araştırılması çoklu regresyon analiziyle mümkün olacaktır.

Çoklu doğrusal regresyon modeli; Basit doğrusal regresyon modelinde bir bağımlı bir bağımsız değişken yer almaktaydı. Çoklu regresyon modelinde ise; bir bağımlı ve bağımlı değişkeni etkileyen birden fazla bağımsız değişken yer almaktadır. Örneğin, bir bağımlı değişkeni etkileyen üç bağımsız değişken söz konusu olduğu zaman kestirimlerde kullanılacak regresyon denklemi:

$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$ şeklinde ifade edilmektedir. Örneklem regresyon denklemi ise,

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + e \text{ yazılır. Bu eşitlikte,}$$

Y : Bağımlı değişken

X : Bağımsız değişken

ε : Hata terimi olarak tanımlanır. Modelde β ’ lar bilinmeyen parametrelerdir. Örneklem regresyon denklemiyle kestirimler elde edilir. b_0 ; sabit terimdir.

Şöyle ki; $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ iken Y’ nin aldığı ortalama değeri gösterir. b_1, b_2, b_3 ise regresyon katsayılarıdır, örneğin b_2 , X_1 ve X_3 değişkeni aynı kaldığında X_2 değişkeninin bağımlı değişken Y’ ye etkisini gösterir. Bu kısmi regresyon katsayısı olarak da isimlendirilir. Böylece b_2 diğer değişkenlerin etkisi artırıldıktan sonra X_2

bağımsız değişkenindeki bir birimlik değişimin bağımlı değişkende yaratacağı değişiklik miktarını verir (Şıklar, 2000).

Sonuçta, verilerin genel durumundan ilişkinin şekli tahmin edilmeye çalışılır. Şayet verilere göre diyagram çizilebilirse diyagram üzerinde her gözlem bir nokta ile temsil edildiğinden her bir değişken için noktalar bir doğru etrafında toplanmış gibi görünüyorsa en iyi fonksiyonun doğrusal bir fonksiyon olduğu söylenebilir (Şıklar, 2000).

Çoklu regresyon analizinde; bağımlı değişken y , bağımsız değişkenler x_1, x_2, \dots, x_p ile gösterilişi Çizelge 3.5.' de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çoklu regresyon modelinde verilerin gösterimi

Gözlem	y	x_1	$x_2 \dots \dots \dots$	x_p
1	y_1	x_{11}	$x_{12} \dots \dots \dots$	x_{1p}
2	y_2	x_{21}	$x_{22} \dots \dots \dots$	x_{2p}
3	y_3	x_{31}	$x_{32} \dots \dots \dots$	x_{3p}
.
.
.
.
n	y_n	x_{n1}	$x_{n2} \dots \dots \dots$	x_{np}

Çoklu doğrusal regresyonda y ile x_1, x_2, \dots, x_p arasındaki ilişki;

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots \dots \dots \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i \text{ ile verilir.}$$

Burada; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ bilinmeyenlerin kısmi regresyon katsayıları ya da kısaca regresyon katsayıları denir. Örneklemeye ilişkin regresyon denklemi;

$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots \dots \dots b_p x_{ip} + e_i$ ile verilirken, beklenen regresyon denklemi;

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots \dots \dots b_p x_{ip} \text{ ile verilir.}$$

$e_i = y_i - \hat{y}_i$ olarak yazılır. e_i ' ler çoğunlukla modelin yeterliliğini değerlendirmekte kullanılır.

Basit doğrusal regresyonda olduğu gibi çoklu doğrusal regresyonun da varsayımları vardır. Bu varsayımlar:

1. x_i değişkenlerine ilişkin değerler sabittir. (Rastlantı değişkeni değildir.)
2. Her bir x_i değişken kümesi için birden çok y değeri vardır ve y alt kümeleri normal dağılım gösterir.
3. y alt kümelerinin varyansları eşittir.
4. y değerleri bağımsızdır.
5. ε_i ' nin ortalaması sifıra eşittir.
6. ε_i ' nin dağılımı normaldir.
7. Hata terimleri arasında ilişki yoktur.
8. Hata terimi eşit varyanslıdır.
9. Hata terimleri ile bağımsız değişken arasında ilişki yoktur.
10. Modelde belirleme hatası yoktur.
11. Bağımsız değişkenler arasında ilişki yoktur.

Bu varsayımlardan, özellikle son varsayım çoklu modellerde yani birden fazla bağımsız değişken olan modellerde söz konusu olur (Şıklar 2000).

Bu gerekçeler, özellikle regresyon katsayıları için hipotezin test edilmesi için gereklidir. Ayrıca, bağımsız değişkenler arasında yüksek derecede ilişki olmaması istenir. Bazı durumlarda ise, bağımsız değişkenler arasındaki ilişki çok belirgindir. Eğer bir bağımsız değişken diğer bağımsız değişken ya da değişkenlerin bir doğrusal fonksiyonu olarak yazılabiliyorsa, değişkenler arasında doğrusal bağımlılık söz konusu olacak ve regresyon katsayıları bulunamayacaktır.

Çoklu regresyon denklemi elde edildikten sonra, çeşitli hipotezler test edilebilir. Öncelikle, varyans analizi yapılarak, bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından açıklanıp açıklanamadığı, diğer bir deyişle, bağımlı değişkenle bağımsız değişkenler kümesi arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığı test edilir. F dağılışı yardımıyla yapılan bu testte H_0 hipotezi, tüm regresyon katsayılarının sifıra eşit

olduğu ($H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$) şeklinde kurulurken, H_1 hipotezi, en az bir β_i nin sıfırdan farklı olduğu şeklinde kurulur. Bilindiği gibi, F değerini bulabilmek için çeşitli kareler toplamları, serbestlik dereceleri ve kareler ortalamalarına gereksinim duyulmakta ve bu sonuçlar varyans analizi tablosu Çizelge 3.6.' de özetlenmektedir.

Çizelge 3.6. Çoklu regresyonda varyans analiz tablosu

VK	KT	Sd	KO	F
YOA	$Y'Y - n\bar{y}^2$	n-1		RKO / RAKO
R	$\beta'X'Y - n\bar{y}^2$	p	RKO	
Hata (RA)	$Y'Y - \hat{\beta}'X'Y$	n-p-1	RAKO	

Yukarıdaki tablodaki gibi elde edilen F istatistiği p, n-p-1 serbestlik dereceli F tablo değeri ile karşılaştırılır. H_0 hipotezinin kabul edilmesi durumunda, seçilen α yanılma düzeyi için, bağımlı değişkenle bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olmadığı ya da bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki değişimi açıklayamadığı sonucuna varılabilir (Alpar, 1997).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde Plaxis 2D programı yardımıyla farklı zemin parametreleri üzerinde analizler yapılmış ve bu analiz sonucunda elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu şekilde zemin parametrelerinin birbirileri ile olan ilişkileri, bu ilişkilerin dereceleri ve zemin parametrelerinin optimizasyonu hakkında önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizler

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, kuramsal incelemelerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en efektif ve sistematik olanıdır. Bu yöntemde, sürekli ortamlardan oluşan sistemler üzerinde, sonlu eleman ağı ile hayali düğümler oluşturulur. Düğümlerde denge, süreklilik ve uygunluk şartları ile eleman rijitlik ve kütle matrisleri ve yük vektörleri ile oluşturulur. Kodlama tekniği ile sistem kütle ve rijitlik matrisleri oluşturularak, sistem hareket denklemi elde edilir. Sistem hareket denklemi ise, uygun bir yöntemle çözümlenerek deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanır. Sonlu elemanlar yönteminde, ağ modelindeki her eleman komşusu olan diğer elemanlara gerçekte sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen bu yöntemde sadece düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanır. Böylece deplasmanların uygunluğunun sadece bu noktalarda sağlanması yeterli olacaktır. Yöntemin sistematikliği ve her türlü yapıya aynı işlemlerle uygulanması en önemli avantajlarındanır.

İşlem hacminin büyümesi dezavantaj olarak görünse de bu olumsuzluk bilgisayar yardımı ile aşılmaktadır. Son yıllarda, yeterli hassasiyette sonuçlar veren ve bu tez kapsamında da kullanılan Plaxis gibi sonlu elemanlar yöntemine dayalı birçok hazır paket program mevcuttur.

Plaxis (Finite Element for Soil and Rock Analysis) geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve stabilite problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. İlk olarak 1987

yılında Hollanda Delfh Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda ise, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Üç boyutlu Plaxis (Plaxis 3D) programında geniş bir alandaki kolonların her birinin ayrı ayrı modellenmesi oldukça uzun ve zahmetli bir çalışma gerektirdiği için bu programın pratikte kullanılması çok güçtür. Bu yüzden doğal zemin ve kolonlardan oluşan yapıyı tek bir malzeme haline getirip iki boyutlu Plaxis (Plaxis 2D) programında tanımlamak, bu problemlerin çözümünü oldukça kolaylaştıracaktır. Bu çalışmada, Plaxis 2D programı kullanılarak oluşturulan geometrik zemin modeli üzerinde çalışılmıştır.

4.2. Geometrik Model Özellikleri

Geometrik modelimiz yer altı su seviyesinin 5 m olduğu 30 m kalınlığındaki zemin tabakalarından oluşmaktadır. Bu çalışmada, genel olarak killi zeminlerin ve kumlu zeminlerin jet grout uygulamasından sonraki deplasmanları incelenmiştir. Bir çeşit kil ve bir çeşit kum olmak üzere iki tür zemin kullanılmıştır. Kullanılan zeminlere ait parametreler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Zemin yüzeyinde 10 metre genişliğinde bir plak temel oluşturulmuştur. Plak objesinin özellikleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Jet grout kolon boyları sabit olup 10 m olarak seçilmiştir. Zemin yer altı su seviyesi, jet grout kolon boyları ile plak parametreleri gibi değerler sabit kabul edilmek üzere; dolgu kalınlığı, jet grout kolon çapları, jet grout kolon ara mesafeleri, zemin poisson oranı, dolgu malzemesi poisson oranı, jet grout poisson oranı, zemin kohezyon değeri, jet grout kohezyon değeri, dolgu malzemesi kohezyon değeri, tüm elemanlara ait içsel sürtünme açıları, tüm elemanlara ait birim ağırlık değerleri ile temel tabakasına gelen yük değerleri gibi parametrelere bağlı olarak plaxis paket programında elde edilen oturma ve gerilme değerleri Çizelge 4.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Zemin özellikleri

Parametre	Cinsi	Kil 1	Kum 1	Jet Grout	Birim
Zemin Modeli	Model	MC	MC	MC	-
Zemin Davranış Tipi	Tür	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	-
Zemin Birim Ağırlık	γ_{unsat}	18	17	22	kN/m ³
Zemin Doygun Birim Ağırlık	γ_{sat}	18	20	22	kN/m ³
Yatay Geçirgenlik	k_x	0,001	1	1	m/day
Düşey Geçirgenlik	k_y	0,001	1	1	m/day
Young Modülü	Eref	4200	13000	5,000E+06	kN/m ²
Poisson Oranı	ν	0,35	0,3	0,2	-
Kohezyon	c_{ref}	14	1	250	kN/m ²
Sürtünme Açısı	ϕ	0	31	0	°
Dilatasyon Açısı	ψ	0	0	0	°

Çizelge 4.2. Plak özellikleri

Parametre	Cinsi	Değer	Birim
Zemin Davranış Tipi	Malzeme Türü	Elastik	-
Normal Rijitlik	EA	1,000E+09	kN/m
Eğilme Rijitliği	EI	1,000E+08	kN/m ² /m
Eşdeğer Kalınlık	d	1,095	m
Ağırlık	w	25,000	kN/m/m
Poisson Oranı	ν	0,00	-

Çizelge 4.3. Farklı zemin parametrelerine bağlı olarak elde edilen oturma ve gerilme değerleri

S.N	ZEMİN CİNSİ	DOLGU KALINLIĞI (m)	JET GROUT ARA MESAFE (m)	JET GROUT ÇAPI (m)	YÜK (KN/m ²)	TOPLAM MAX. OTURMA (m)	TOPLAM MAX. GERİLME (KN/m ²)
1	KİL-1	0,30	2,00	1	1	2,9720E-02	-561,90
2	KİL-1	0,50	2,00	1	1	2,9920E-02	-564,05
3	KİL-1	0,80	2,00	1	1	3,0150E-02	-566,34
4	KİL-1	1,00	2,00	1	1	3,0250E-02	-565,45
5	KİL-1	0,30	2,00	1	3	3,1040E-02	-562,72
6	KİL-1	0,50	2,00	1	3	3,1240E-02	-564,86
7	KİL-1	0,80	2,00	1	3	3,1450E-02	-567,14
8	KİL-1	1,00	2,00	1	3	3,1550E-02	-566,27
9	KİL-1	0,30	2,00	1	5	3,2360E-02	-563,53
10	KİL-1	0,50	2,00	1	5	3,2550E-02	-565,67
11	KİL-1	0,80	2,00	1	5	3,2760E-02	-567,94
12	KİL-1	1,00	2,00	1	5	3,2840E-02	-567,09
13	KİL-1	0,30	2,00	1	10	3,5660E-02	-565,57
14	KİL-1	0,50	2,00	1	10	3,5840E-02	-567,71
15	KİL-1	0,80	2,00	1	10	3,6020E-02	-569,94
16	KİL-1	1,00	2,00	1	10	3,6090E-02	-569,15
17	KİL-1	0,30	2,00	1	15	3,8970E-02	-579,35

18	KİL-1	0,50	2,00	1	15	3,9130E-02	-569,74
19	KİL-1	0,80	2,00	1	15	3,9290E-02	-571,93
20	KİL-1	1,00	2,00	1	15	3,9330E-02	-571,21
21	KİL-1	0,30	2,00	1	20	4,2270E-02	-618,53
22	KİL-1	0,50	2,00	1	20	4,2420E-02	-571,78
23	KİL-1	0,80	2,00	1	20	4,2560E-02	-573,93
24	KİL-1	1,00	2,00	1	20	4,2580E-02	-573,27
25	KİL-1	0,30	2,00	1	25	4,5590E-02	-652,87
26	KİL-1	0,50	2,00	1	25	4,5770E-02	-573,82
27	KİL-1	0,80	2,00	1	25	4,5850E-02	-580,29
28	KİL-1	1,00	2,00	1	25	4,5820E-02	-584,86
29	KİL-1	0,30	2,00	1	30	4,9060E-02	-668,72
30	KİL-1	0,50	2,00	1	30	4,9210E-02	-585,51
31	KİL-1	0,80	2,00	1	30	4,9280E-02	-603,83
32	KİL-1	1,00	2,00	1	30	4,9190E-02	-608,29
33	KİL-1	0,30	2,00	1	35	5,3190E-02	-693,39
34	KİL-1	0,50	2,00	1	35	5,3010E-02	-605,38
35	KİL-1	0,80	2,00	1	35	5,3070E-02	-624,92
36	KİL-1	1,00	2,00	1	35	5,2950E-02	-627,94
37	KİL-1	0,30	2,00	1	40	5,8660E-02	-716,20
38	KİL-1	0,50	2,00	1	40	5,7520E-02	-626,11
39	KİL-1	0,80	2,00	1	40	5,7490E-02	-645,12
40	KİL-1	1,00	2,00	1	40	5,7740E-02	-644,91
41	KİL-1	0,30	2,25	0,8	1	2,7740E-02	-560,28
42	KİL-1	0,50	2,25	0,8	1	2,7870E-02	-564,74
43	KİL-1	0,80	2,25	0,8	1	2,8140E-02	-562,47
44	KİL-1	1,00	2,25	0,8	1	2,8290E-02	-562,85
45	KİL-1	0,30	2,25	0,8	3	2,9080E-02	-561,09
46	KİL-1	0,50	2,25	0,8	3	2,9190E-02	-565,58
47	KİL-1	0,80	2,25	0,8	3	2,9460E-02	-563,29
48	KİL-1	1,00	2,25	0,8	3	2,9590E-02	-563,67
49	KİL-1	0,30	2,25	0,8	5	3,0410E-02	-561,91
50	KİL-1	0,50	2,25	0,8	5	3,0510E-02	-566,41
51	KİL-1	0,80	2,25	0,8	5	3,0770E-02	-564,12
52	KİL-1	1,00	2,25	0,8	5	3,0900E-02	-564,49
53	KİL-1	0,30	2,25	0,8	10	3,3740E-02	-579,44
54	KİL-1	0,50	2,25	0,8	10	3,3820E-02	-568,49
55	KİL-1	0,80	2,25	0,8	10	3,4060E-02	-566,18
56	KİL-1	1,00	2,25	0,8	10	3,4160E-02	-566,54
57	KİL-1	0,30	2,25	0,8	15	3,7070E-02	-624,45
58	KİL-1	0,50	2,25	0,8	15	3,7130E-02	-574,82
59	KİL-1	0,80	2,25	0,8	15	3,7350E-02	-589,99
60	KİL-1	1,00	2,25	0,8	15	3,7420E-02	-581,61

61	KİL-1	0,30	2,25	0,8	20	4,0400E-02	-655,78
62	KİL-1	0,50	2,25	0,8	20	4,0440E-02	-615,71
63	KİL-1	0,80	2,25	0,8	20	4,0640E-02	-630,99
64	KİL-1	1,00	2,25	0,8	20	4,0680E-02	-618,44
65	KİL-1	0,30	2,25	0,8	25	4,3780E-02	-669,18
66	KİL-1	0,50	2,25	0,8	25	4,3850E-02	-653,23
67	KİL-1	0,80	2,25	0,8	25	4,3970E-02	-661,73
68	KİL-1	1,00	2,25	0,8	25	4,4030E-02	-674,17
69	KİL-1	0,30	2,25	0,8	30	4,7200E-02	-696,33
70	KİL-1	0,50	2,25	0,8	30	4,7330E-02	-656,58
71	KİL-1	0,80	2,25	0,8	30	4,7420E-02	-664,07
72	KİL-1	1,00	2,25	0,8	30	4,7500E-02	-696,28
73	KİL-1	0,30	2,25	0,8	35	5,0800E-02	-723,00
74	KİL-1	0,50	2,25	0,8	35	5,0940E-02	-669,84
75	KİL-1	0,80	2,25	0,8	35	5,1010E-02	-681,94
76	KİL-1	1,00	2,25	0,8	35	5,1080E-02	-702,47
77	KİL-1	0,30	2,25	0,8	40	5,5450E-02	-748,78
78	KİL-1	0,50	2,25	0,8	40	5,5080E-02	-691,43
79	KİL-1	0,80	2,25	0,8	40	5,4820E-02	-699,97
80	KİL-1	1,00	2,25	0,8	40	5,4840E-02	-707,26
81	KİL-1	0,30	2,50	0,6	1	2,5770E-02	-560,10
82	KİL-1	0,50	2,50	0,6	1	2,6030E-02	-563,08
83	KİL-1	0,80	2,50	0,6	1	2,6450E-02	-563,40
84	KİL-1	1,00	2,50	0,6	1	2,6550E-02	-560,51
85	KİL-1	0,30	2,50	0,6	3	2,7120E-02	-580,17
86	KİL-1	0,50	2,50	0,6	3	2,7380E-02	-563,92
87	KİL-1	0,80	2,50	0,6	3	2,7800E-02	-564,24
88	KİL-1	1,00	2,50	0,6	3	2,7870E-02	-561,32
89	KİL-1	0,30	2,50	0,6	5	2,8470E-02	-602,90
90	KİL-1	0,50	2,50	0,6	5	2,8730E-02	-564,75
91	KİL-1	0,80	2,50	0,6	5	2,9140E-02	-570,70
92	KİL-1	1,00	2,50	0,6	5	2,9190E-02	-578,70
93	KİL-1	0,30	2,50	0,6	10	3,1850E-02	-655,73
94	KİL-1	0,50	2,50	0,6	10	3,2110E-02	-596,42
95	KİL-1	0,80	2,50	0,6	10	3,2490E-02	-620,05
96	KİL-1	1,00	2,50	0,6	10	3,2490E-02	-627,98
97	KİL-1	0,30	2,50	0,6	15	3,5260E-02	-662,16
98	KİL-1	0,50	2,50	0,6	15	3,5500E-02	-655,80
99	KİL-1	0,80	2,50	0,6	15	3,5840E-02	-664,85
100	KİL-1	1,00	2,50	0,6	15	3,5790E-02	-670,27
101	KİL-1	0,30	2,50	0,6	20	3,8730E-02	-690,90
102	KİL-1	0,50	2,50	0,6	20	3,8930E-02	-675,83
103	KİL-1	0,80	2,50	0,6	20	3,9250E-02	-666,75

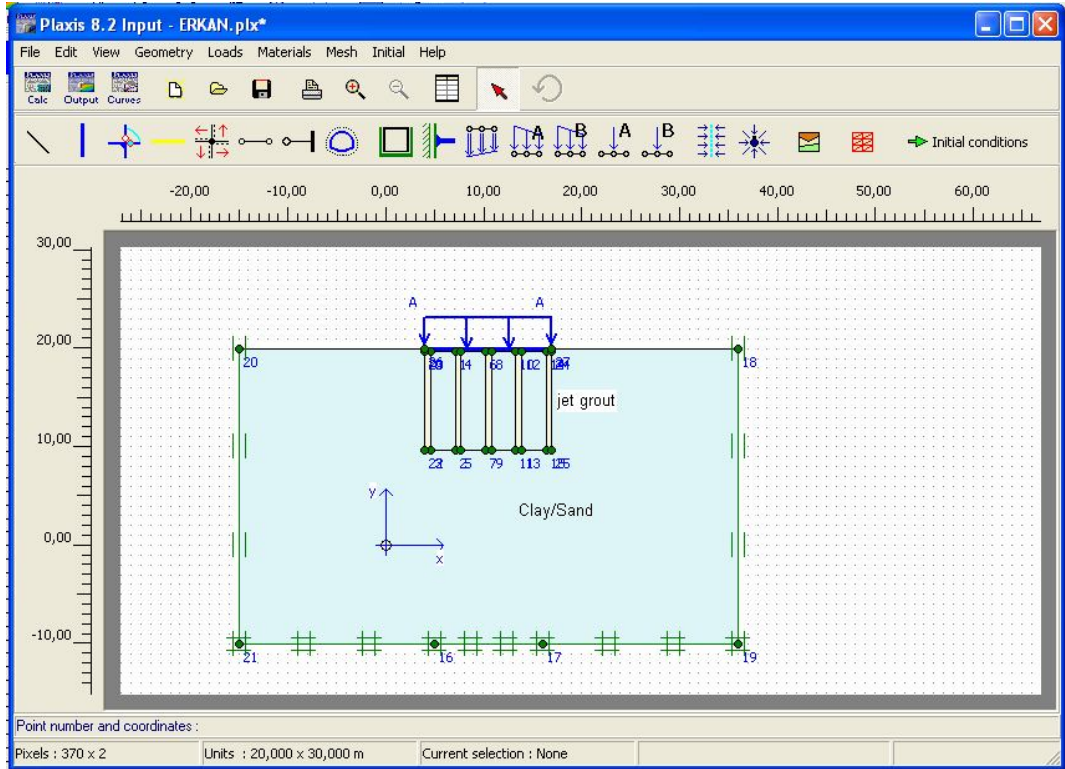
104	KİL-1	1,00	2,50	0,6	20	3,9110E-02	-669,98
105	KİL-1	0,30	2,50	0,6	25	4,2200E-02	-727,07
106	KİL-1	0,50	2,50	0,6	25	4,2460E-02	-680,16
107	KİL-1	0,80	2,50	0,6	25	4,2750E-02	-692,87
108	KİL-1	1,00	2,50	0,6	25	4,2520E-02	-696,43
109	KİL-1	0,30	2,50	0,6	30	4,5690E-02	-751,86
110	KİL-1	0,50	2,50	0,6	30	4,5930E-02	-683,05
111	KİL-1	0,80	2,50	0,6	30	4,6340E-02	-719,48
112	KİL-1	1,00	2,50	0,6	30	4,6100E-02	-724,60
113	KİL-1	0,30	2,50	0,6	35	4,9220E-02	-758,57
114	KİL-1	0,50	2,50	0,6	35	4,9440E-02	-698,66
115	KİL-1	0,80	2,50	0,6	35	4,9960E-02	-745,56
116	KİL-1	1,00	2,50	0,6	35	4,9850E-02	-751,78
117	KİL-1	0,30	2,50	0,6	40	5,3000E-02	-758,05
118	KİL-1	0,50	2,50	0,6	40	5,3240E-02	-733,92
119	KİL-1	0,80	2,50	0,6	40	5,3830E-02	-767,02
120	KİL-1	1,00	2,50	0,6	40	5,3360E-02	-771,33
121	KUM-1	0,30	2,00	1	1	1,7440E-02	-609,53
122	KUM-1	0,50	2,00	1	1	1,7000E-02	-612,97
123	KUM-1	0,80	2,00	1	1	1,6840E-02	-609,57
124	KUM-1	1,00	2,00	1	1	1,6950E-02	-615,11
125	KUM-1	0,30	2,00	1	3	1,8560E-02	-610,19
126	KUM-1	0,50	2,00	1	3	1,8110E-02	-613,63
127	KUM-1	0,80	2,00	1	3	1,7950E-02	-610,24
128	KUM-1	1,00	2,00	1	3	1,8060E-02	-615,77
129	KUM-1	0,30	2,00	1	5	1,9690E-02	-610,86
130	KUM-1	0,50	2,00	1	5	1,9230E-02	-614,29
131	KUM-1	0,80	2,00	1	5	1,9060E-02	-610,90
132	KUM-1	1,00	2,00	1	5	1,9160E-02	-616,44
133	KUM-1	0,30	2,00	1	10	2,2490E-02	-612,51
134	KUM-1	0,50	2,00	1	10	2,2040E-02	-615,96
135	KUM-1	0,80	2,00	1	10	2,1840E-02	-612,57
136	KUM-1	1,00	2,00	1	10	2,1930E-02	-618,10
137	KUM-1	0,30	2,00	1	15	2,5290E-02	-614,17
138	KUM-1	0,50	2,00	1	15	2,4850E-02	-617,61
139	KUM-1	0,80	2,00	1	15	2,4610E-02	-614,24
140	KUM-1	1,00	2,00	1	15	2,4700E-02	-619,77
141	KUM-1	0,30	2,00	1	20	2,8090E-02	-615,82
142	KUM-1	0,50	2,00	1	20	2,7650E-02	-619,27
143	KUM-1	0,80	2,00	1	20	2,7400E-02	-615,91
144	KUM-1	1,00	2,00	1	20	2,7470E-02	-621,44
145	KUM-1	0,30	2,00	1	25	3,0900E-02	-617,48
146	KUM-1	0,50	2,00	1	25	3,0460E-02	-620,94

147	KUM-1	0,80	2,00	1	25	3,0200E-02	-617,58
148	KUM-1	1,00	2,00	1	25	3,0250E-02	-623,11
149	KUM-1	0,30	2,00	1	30	3,3700E-02	-619,14
150	KUM-1	0,50	2,00	1	30	3,3270E-02	-622,60
151	KUM-1	0,80	2,00	1	30	3,3010E-02	-619,26
152	KUM-1	1,00	2,00	1	30	3,3020E-02	-624,78
153	KUM-1	0,30	2,00	1	35	3,6520E-02	-620,81
154	KUM-1	0,50	2,00	1	35	3,6090E-02	-624,27
155	KUM-1	0,80	2,00	1	35	3,5820E-02	-620,95
156	KUM-1	1,00	2,00	1	35	3,5820E-02	-626,46
157	KUM-1	0,30	2,00	1	40	3,9330E-02	-622,47
158	KUM-1	0,50	2,00	1	40	3,8900E-02	-625,93
159	KUM-1	0,80	2,00	1	40	3,8640E-02	-622,63
160	KUM-1	1,00	2,00	1	40	3,8620E-02	-628,14
161	KUM-1	0,30	2,25	0,8	1	1,7240E-02	-609,80
162	KUM-1	0,50	2,25	0,8	1	1,7150E-02	-612,34
163	KUM-1	0,80	2,25	0,8	1	1,6700E-02	-610,33
164	KUM-1	1,00	2,25	0,8	1	1,7760E-02	-610,11
165	KUM-1	0,30	2,25	0,8	3	1,8370E-02	-610,46
166	KUM-1	0,50	2,25	0,8	3	1,8270E-02	-613,00
167	KUM-1	0,80	2,25	0,8	3	1,7820E-02	-610,99
168	KUM-1	1,00	2,25	0,8	3	1,8880E-02	-610,78
169	KUM-1	0,30	2,25	0,8	5	1,9500E-02	-611,12
170	KUM-1	0,50	2,25	0,8	5	1,9400E-02	-613,66
171	KUM-1	0,80	2,25	0,8	5	1,8930E-02	-611,66
172	KUM-1	1,00	2,25	0,8	5	2,0000E-02	-611,45
173	KUM-1	0,30	2,25	0,8	10	2,2330E-02	-612,78
174	KUM-1	0,50	2,25	0,8	10	2,2230E-02	-615,31
175	KUM-1	0,80	2,25	0,8	10	2,1740E-02	-613,32
176	KUM-1	1,00	2,25	0,8	10	2,2790E-02	-613,11
177	KUM-1	0,30	2,25	0,8	15	2,5160E-02	-614,43
178	KUM-1	0,50	2,25	0,8	15	2,5060E-02	-616,96
179	KUM-1	0,80	2,25	0,8	15	2,4550E-02	-614,98
180	KUM-1	1,00	2,25	0,8	15	2,5590E-02	-614,78
181	KUM-1	0,30	2,25	0,8	20	2,8000E-02	-616,09
182	KUM-1	0,50	2,25	0,8	20	2,7890E-02	-618,62
183	KUM-1	0,80	2,25	0,8	20	2,7370E-02	-616,65
184	KUM-1	1,00	2,25	0,8	20	2,8380E-02	-616,44
185	KUM-1	0,30	2,25	0,8	25	3,0840E-02	-617,75
186	KUM-1	0,50	2,25	0,8	25	3,0720E-02	-620,27
187	KUM-1	0,80	2,25	0,8	25	3,0190E-02	-618,32
188	KUM-1	1,00	2,25	0,8	25	3,1190E-02	-618,11
189	KUM-1	0,30	2,25	0,8	30	3,3680E-02	-619,41

190	KUM-1	0,50	2,25	0,8	30	3,3560E-02	-621,93
191	KUM-1	0,80	2,25	0,8	30	3,3040E-02	-619,99
192	KUM-1	1,00	2,25	0,8	30	3,3990E-02	-619,78
193	KUM-1	0,30	2,25	0,8	35	3,6530E-02	-621,08
194	KUM-1	0,50	2,25	0,8	35	3,6400E-02	-623,59
195	KUM-1	0,80	2,25	0,8	35	3,5880E-02	-621,67
196	KUM-1	1,00	2,25	0,8	35	3,6810E-02	-621,46
197	KUM-1	0,30	2,25	0,8	40	3,9380E-02	-622,74
198	KUM-1	0,50	2,25	0,8	40	3,9240E-02	-625,25
199	KUM-1	0,80	2,25	0,8	40	3,8730E-02	-623,35
200	KUM-1	1,00	2,25	0,8	40	3,9650E-02	-623,14
201	KUM-1	0,30	2,50	0,6	1	1,7280E-02	-603,42
202	KUM-1	0,50	2,50	0,6	1	1,7490E-02	-610,52
203	KUM-1	0,80	2,50	0,6	1	1,7300E-02	-612,31
204	KUM-1	1,00	2,50	0,6	1	1,7410E-02	-608,74
205	KUM-1	0,30	2,50	0,6	3	1,8450E-02	-604,08
206	KUM-1	0,50	2,50	0,6	3	1,8650E-02	-611,18
207	KUM-1	0,80	2,50	0,6	3	1,8440E-02	-612,97
208	KUM-1	1,00	2,50	0,6	3	1,8540E-02	-609,40
209	KUM-1	0,30	2,50	0,6	5	1,9610E-02	-604,75
210	KUM-1	0,50	2,50	0,6	5	1,9800E-02	-611,84
211	KUM-1	0,80	2,50	0,6	5	1,9570E-02	-613,63
212	KUM-1	1,00	2,50	0,6	5	1,9670E-02	-610,07
213	KUM-1	0,30	2,50	0,6	10	2,2540E-02	-606,41
214	KUM-1	0,50	2,50	0,6	10	2,2690E-02	-613,49
215	KUM-1	0,80	2,50	0,6	10	2,2420E-02	-615,29
216	KUM-1	1,00	2,50	0,6	10	2,2500E-02	-611,73
217	KUM-1	0,30	2,50	0,6	15	2,5470E-02	-608,07
218	KUM-1	0,50	2,50	0,6	15	2,5580E-02	-615,15
219	KUM-1	0,80	2,50	0,6	15	2,5280E-02	-616,96
220	KUM-1	1,00	2,50	0,6	15	2,5340E-02	-613,40
221	KUM-1	0,30	2,50	0,6	20	2,8400E-02	-609,73
222	KUM-1	0,50	2,50	0,6	20	2,8490E-02	-616,81
223	KUM-1	0,80	2,50	0,6	20	2,8140E-02	-618,62
224	KUM-1	1,00	2,50	0,6	20	2,8180E-02	-615,06
225	KUM-1	0,30	2,50	0,6	25	3,1330E-02	-611,40
226	KUM-1	0,50	2,50	0,6	25	3,1400E-02	-618,47
227	KUM-1	0,80	2,50	0,6	25	3,1010E-02	-620,29
228	KUM-1	1,00	2,50	0,6	25	3,1020E-02	-616,73
229	KUM-1	0,30	2,50	0,6	30	3,4270E-02	-613,07
230	KUM-1	0,50	2,50	0,6	30	3,4310E-02	-620,13
231	KUM-1	0,80	2,50	0,6	30	3,3900E-02	-621,96
232	KUM-1	1,00	2,50	0,6	30	3,3880E-02	-618,40

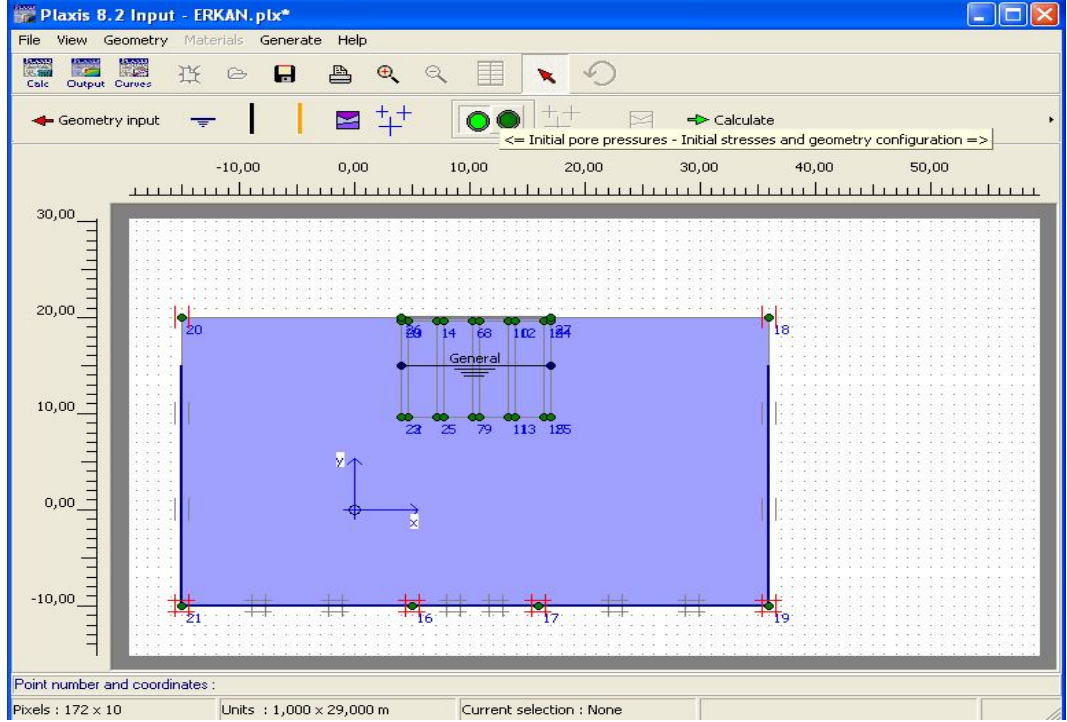
233	KUM-1	0,30	2,50	0,6	35	3,7200E-02	-614,74
234	KUM-1	0,50	2,50	0,6	35	3,7230E-02	-621,79
235	KUM-1	0,80	2,50	0,6	35	3,6810E-02	-623,64
236	KUM-1	1,00	2,50	0,6	35	3,6750E-02	-620,08
237	KUM-1	0,30	2,50	0,6	40	4,0150E-02	-616,41
238	KUM-1	0,50	2,50	0,6	40	4,0150E-02	-623,46
239	KUM-1	0,80	2,50	0,6	40	3,9730E-02	-625,32
240	KUM-1	1,00	2,50	0,6	40	3,9650E-02	-621,77

Plaxis 2D programında oluşturulan Jet Grout sistemi geometrik modeli Şekil 4.1.' te gösterilmiştir.



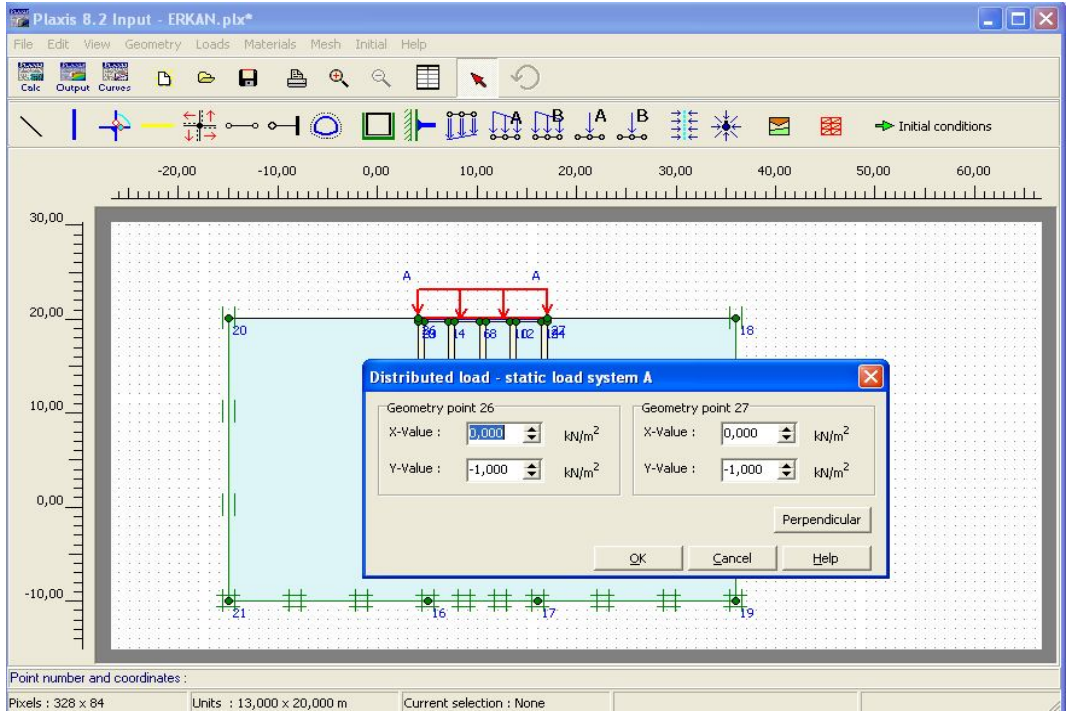
Şekil 4.1. Jet grout sistemi geometrik modeli

Zemin yer altı su seviyesi sabit ve 5 m alınmış olup, Şekil 4.2.' de gösterilmiştir.



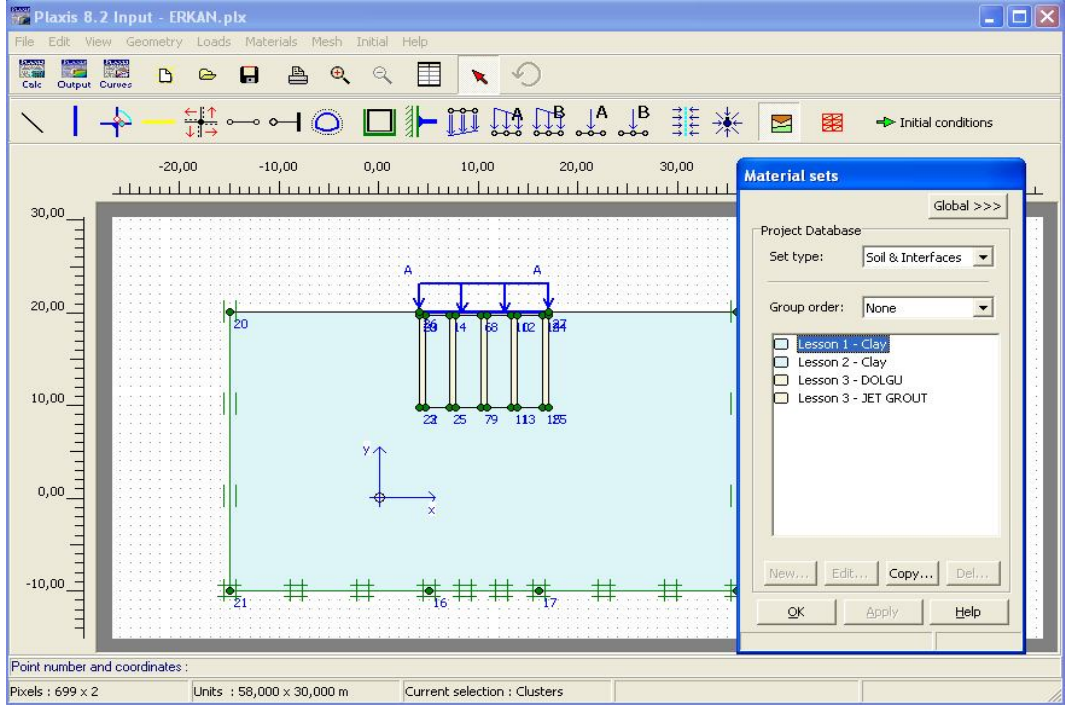
Şekil 4.2. Yeraltı su seviyesi

Plaxis 2D programında oluşturulan geometrik model değerlerinin girilmesi, Şekil 4.3.' te gösterilmiştir.

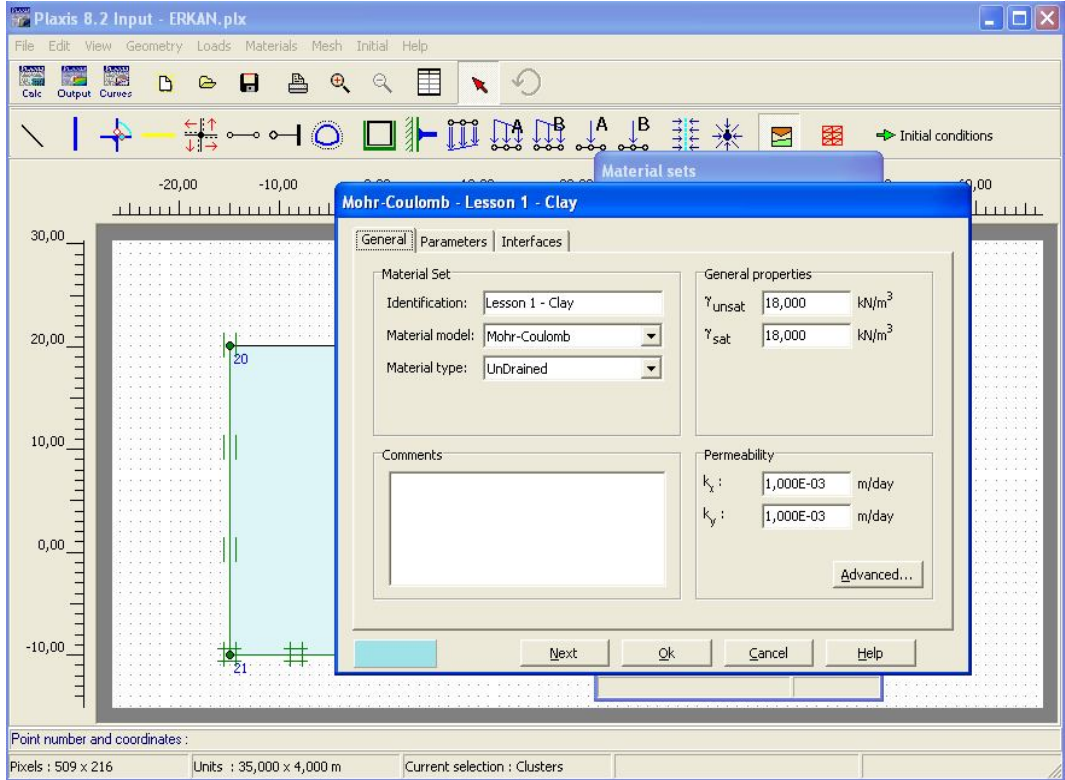


Şekil 4.3. Geometrik model yük değerlerinin girilmesi

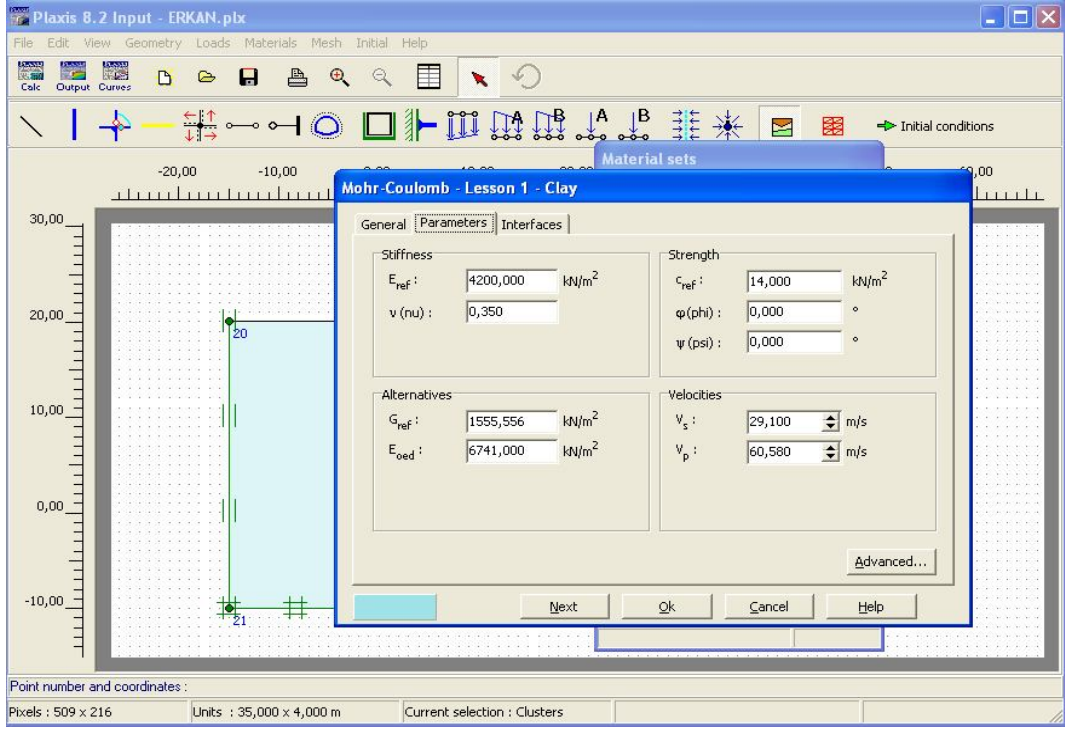
Plaxis 2D programında oluşturulan geometrik model zemin parametrelerinin atanması Şekil 4.4.' de, Şekil 4.5.' de ve Şekil 4.6.' da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Geometrik model zemin atama

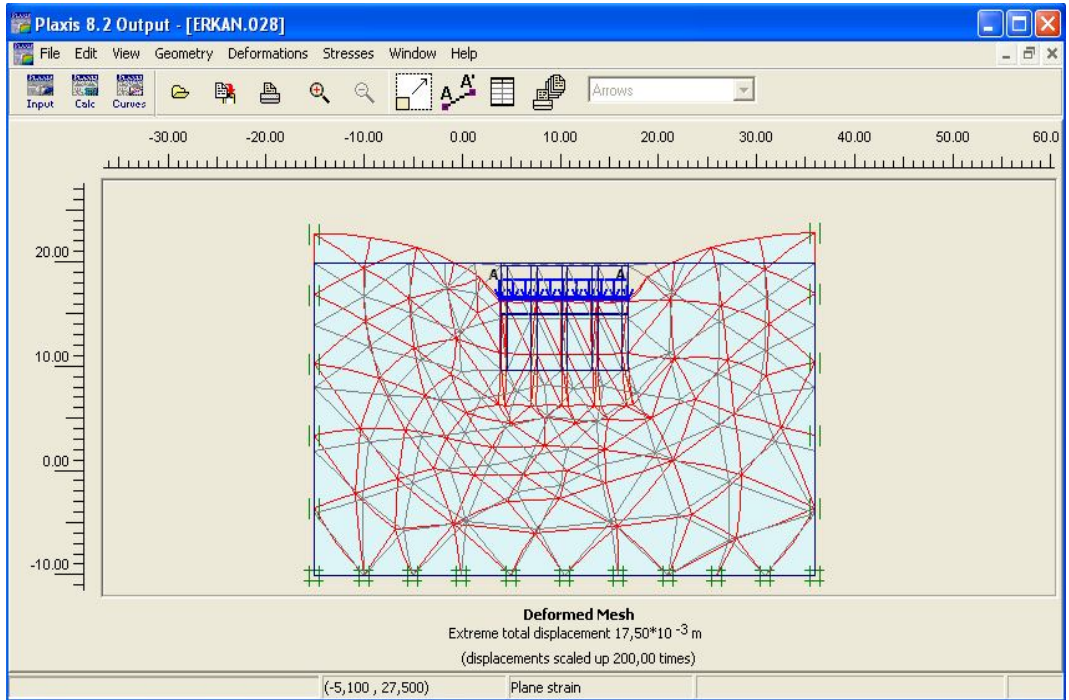


Şekil 4.5. Zemin modeli ve birim ağırlık parametrelerinin girilmesi



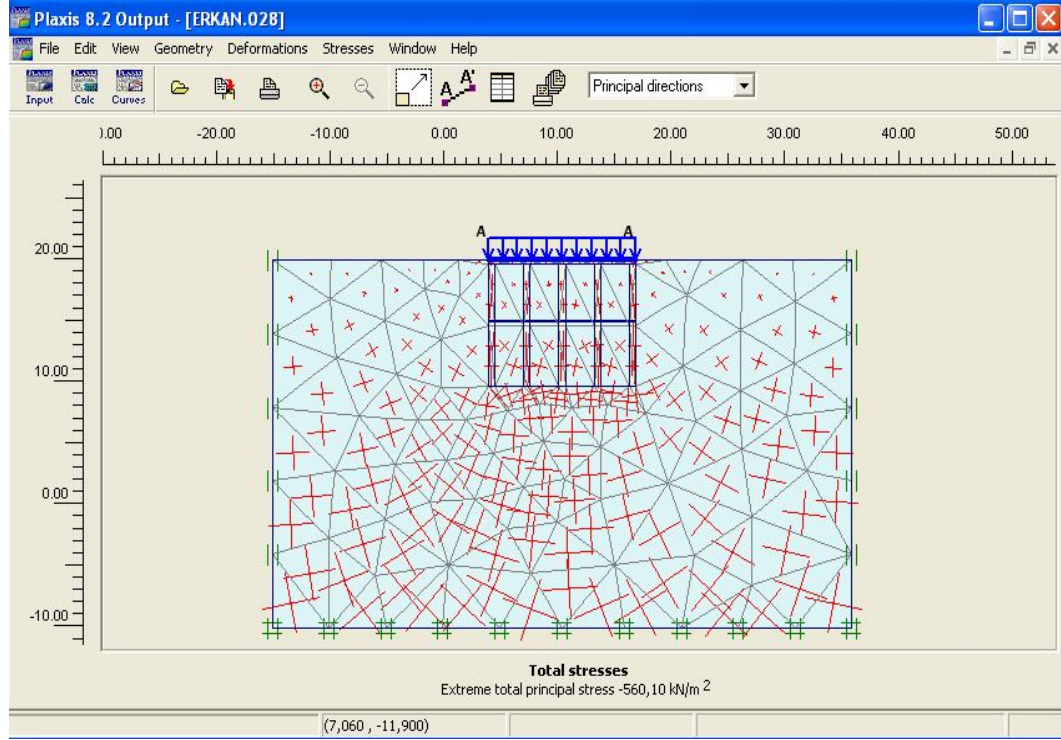
Şekil 4.6. Zemin parametlerinin girilmesi

Plaxis 2D programında, yapılan analizler sonucu elde edilen oturma değerlerine bağlı olarak zeminin oturması görsel olarak Şekil 4.7.' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Zemin modelinin yükleden sonraki toplam deplasman değeri

Plaxis 2D programında, yapılan analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri görsel olarak Şekil 4.8.' de verilmiştir.



Şekil 4.8. Zemin modelinin yüklemeye sonrakı toplam gerilme değeri

4.3. Veri Analizi

Oturma bağımlı değişkeninin parametrik çalışmadaki tüm değişken faktörlerden nasıl ve hangi oranda etkilendiğini bulmak amacıyla, %95 güven aralığında geriye doğru elemeli regresyonla (Backward Elimination Regression), indirgenmiş lineer model üzerinde varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.4.' de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestli derecesi	Kareler Ortalaması	F	p-değer P> F
B-Jet Grout Ara Mesafe (m)	9,08721E-05	1	9,08721E-05	58,4127099	< 0.0001
D-c (Zemin)	0,009794082	1	0,009794082	6295,64885	< 0.0001
J-Yük (kN/m ²)	0,016335481	1	0,016335481	10500,4689	< 0.0001
Artan	0,000367143	236	1,55569E-06		

Çizelge 4.4. 'deki varyans analiz sonuçları incelendiğinde 0,05 güven düzeyinde çift yönlü test kritik değerleri, hesaplama sonucu çıkan test değerlerinden büyük çıkmıştır. Bu sonuçtan anlaşılıyor ki; dolgu kalınlıkları, jet grout ara mesafeleri, zemin kohezyon değerleri, yük değerleri gibi parametreler ile bu parametrelerin farklı kombinasyonları birbirilerini ve oturma değerlerini etkilemektedir.

R^2 değeri 0.9862 olarak belirlenmiştir. Çoklu belirtme katsayısı R^2 birden fazla bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni açıklama miktarıdır. Regresyon denkleminin uygunluk ölçüsü olarak ta kullanılan R^2 , regresyon modeli ile açıklanan değişimin toplam değişimdeki yüzdesi olarak bilinir. R^2 değeri 0-1 arasında değer alır. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni daha iyi açıkladığı, R^2 değeri sıfıra yaklaştıkça modelde yer alan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni iyi açıklamadığı şeklinde ifade edilir. Bu bilgiler doğrultusunda oturma bağımlı değişkeninin parametrik çalışmadaki tüm diğer değişken faktörler tarafından çok iyi oranda ($R^2 = 0.9862$) açıldığı söylenebilir.

R^2 = Çoklu belirtme katsayısı

F = Regresyon hesap değeri

S.D. = Serbestlik derecesi

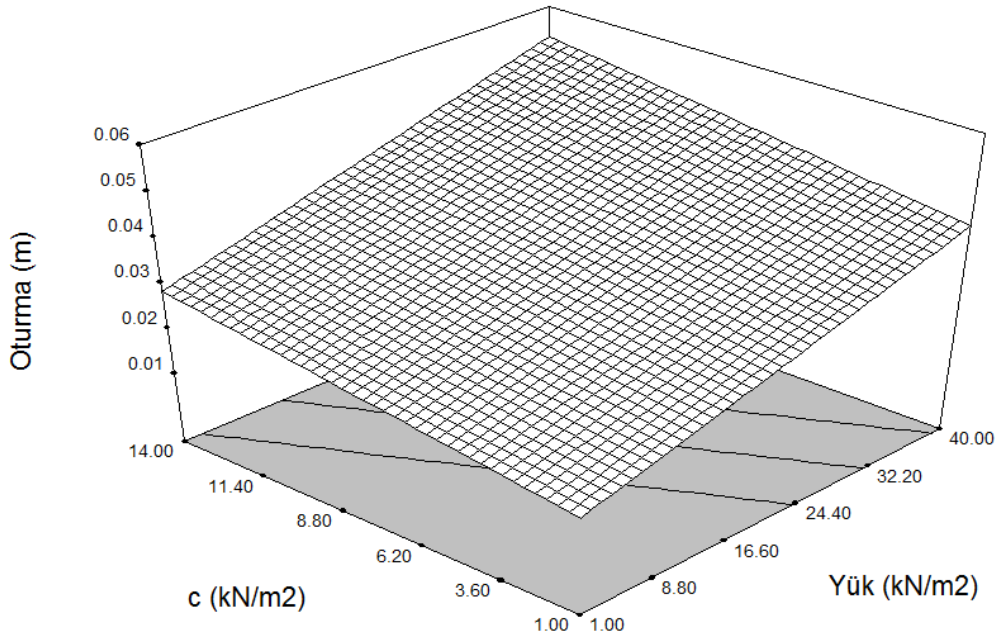
Geliştirilen lineer model Eşitlik 4.1' de verilmiştir.

$$\boxed{T.O = 0.021306 - 3.01450 * E - 0.03 * B + 9.82795 * E - 0.04 * D + 6.28263 * E - 0.04 * J} \quad (4.1)$$

J	Yük(kN/m ²)
E	Zemin içsel sürtünme açısı
D	Zemine ait kohezyon değeri(kN/m ²)
B	Jet grout ara mesafeleri(m)
T.O	Toplam oturma

Aşağıdaki sabit değerlerde oturmanın zeminin kohezyonundan ve yükten nasıl etkilendiği Şekil 4.9.' da verilmiştir.

Dolgu Kalınlığı(A)	0,65 m
Jet Grout Ara Mesafe(B)	2,25 m
Jet Grout Çapı(C)	0,80 m
İçsel Sürtünme Açısı(ϕ)	15,50
Zemin Birim Ağırlık(F)	19,00 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,50 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	8600 kN/m ²



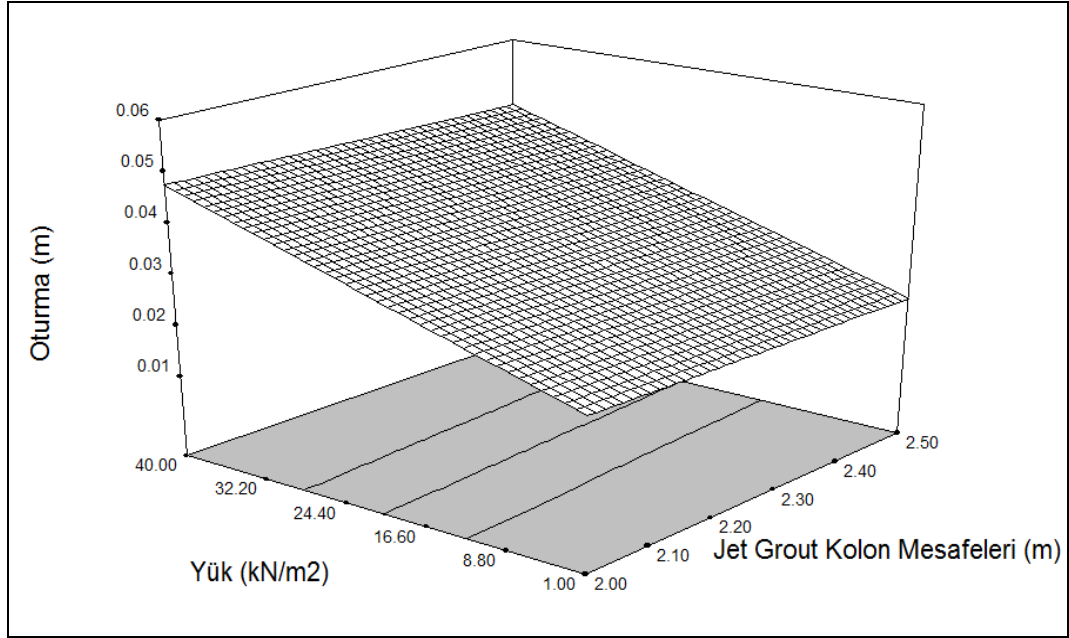
Şekil 4.9. Zeminin kohezyon değerleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi

Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Yük değerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Zemin kohezyon değerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Yük değerinin ve Zemin kohezyon değerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da oturma değerinde arttığı görülebilmektedir.

Aşağıdaki sabit değerlerde oturmanın yükten ve jet grout kolon mesafelerinden nasıl etkilendiği Şekil 4.10.' da verilmiştir.

Dolgu Kalınlığı(A)	0,65 m
Zemin Kohezyon Değeri C (D)	7,50 kN/m ²
Jet Grout Çapı(C)	0,80 m
İçsel Sürtünme Açısı(ϕ)	15,50
Zemin Birim Ağırlık(F)	19,00 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,50 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	8600 kN/m ²



Şekil 4.10. Jet grout kolon mesafeleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi

Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Yük değerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Jet grout kolon mesafelerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Yük değerinin ve Jet grout kolon mesafelerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da oturma değerinde arttığı,

görülebilmektedir.

Gerilme bağımlı değişkeninin parametrik çalışmadaki tüm değişken faktörlerden nasıl ve hangi oranda etkilendiğini bulmak amacıyla, %95 güven aralığında geriye doğru elemeli regresyonla (Backward Elimination Regression), indirgenmiş ikinci dereceden model üzerinde varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.5.' de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler Ortalaması	F	p-değer Prob > F
A-Dolgu Kalınlığı (m)	899,9364	1	899,9364	3,56515397	<0.0503
B-Jet Grout Ara Mesafe	45732,64087	1	45732,64087	181,172698	< 0.0001
D-c (Zemin)	15728,31017	1	15728,31017	62,308678	< 0.0001
J-Yük (KN/m ²)	186302,8202	1	186302,8202	738,050198	< 0.0001
AD	2155,224336	1	2155,224336	8,53805512	<0.0038
BD	47122,0467	1	47122,0467	186,676916	< 0.0001
BJ	13825,37751	1	13825,37751	54,770092	< 0.0001
DJ	132421,3843	1	132421,3843	524,595542	< 0.0001
A ²	3828,728284	1	3828,728284	15,167745	<0.0001
Artan	58057,90549	230	252,425676		

R^2 değeri 0.8811 olarak belirlenmiştir. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni daha iyi açıkladığı, R^2 değeri sıfıra yaklaştıkça modelde yer alan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni iyi açıklamadığı şeklinde ifade edilir. Bu bilgiler doğrultusunda oturma bağımlı değişkeninin parametrik çalışmadaki tüm diğer değişken faktörler tarafından çok iyi oranda ($R^2 = 0.8811$) açıldığı söylenebilir.

Çizelge 4.5. 'deki varyans analiz sonuçları incelendiğinde 0,05 güven düzeyinde çift yönlü test kritik değerleri, hesaplama sonucu çıkan test değerlerinden büyük çıkmıştır. Bu sonuçtan anlaşılıyor ki; dolgu kalınlıkları, jet grout ara mesafeleri, zemin kohezyon değerleri, yük değerleri gibi parametreler ile bu parametrelerin farklı kombinasyonları birbirilerini ve gerilme değerlerini etkilemektedir.

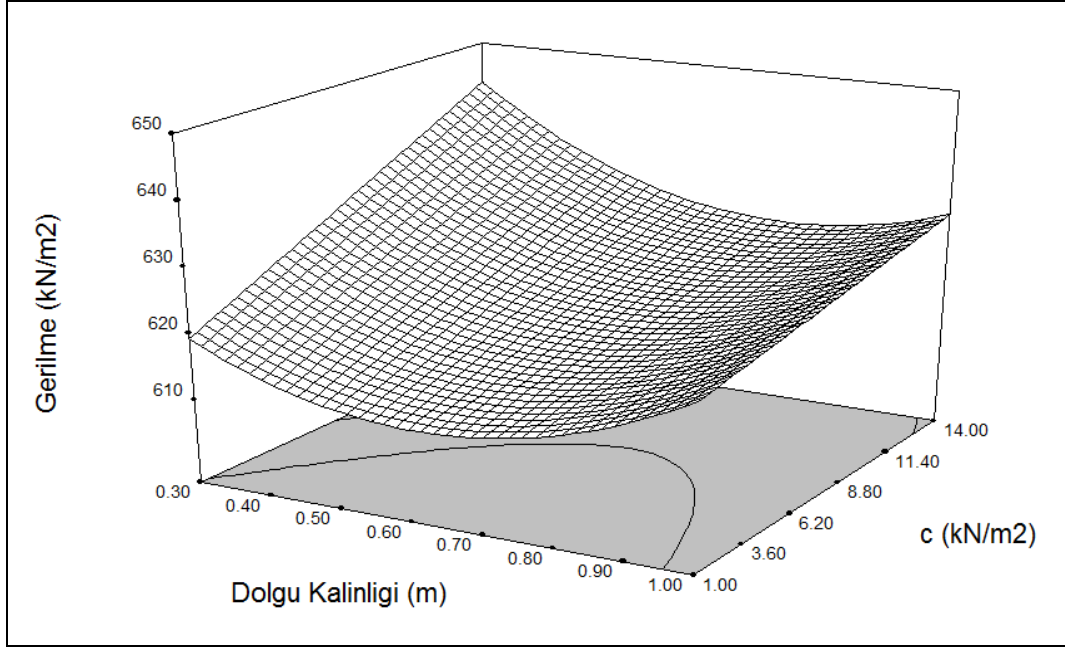
Geliştirilen ikinci dereceden model Eşitlik 4.2' de verilmiştir.

$$G = 793.44807 - 98.19733 * A - 68.76730 * B - 27.02921 * D - 6.31318 * J - 1.71221 * A * D + 10.56085 * B * D + 2.83152 * B * J + 0.27520 * D * J + 79.88250 * (A)^2 \quad (4.2)$$

J	Yük (kN/m ²)
D	Zemine ait kohezyon değeri (kN/m ²)
B	Jet grout ara mesafeleri (m)
A	Dolgu Kalınlığı (m)
G	Gerilme (kN/m ²)

Aşağıdaki sabit değerlerde gerilmenin zeminin kohezyonundan ve dolgu kalınlığından nasıl etkilendiği Şekil 4.11.' de verilmiştir.

Yük(J)	20,50 kN/m ²
Jet Grout Ara Mesafe(B)	2,25 m
Jet Grout Çapı(C)	0,80 m
İçsel Sürtünme Açısı(φ)	15,50
Zemin Birim Ağırlık(F)	19,00 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,50 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	8600 kN/m ²



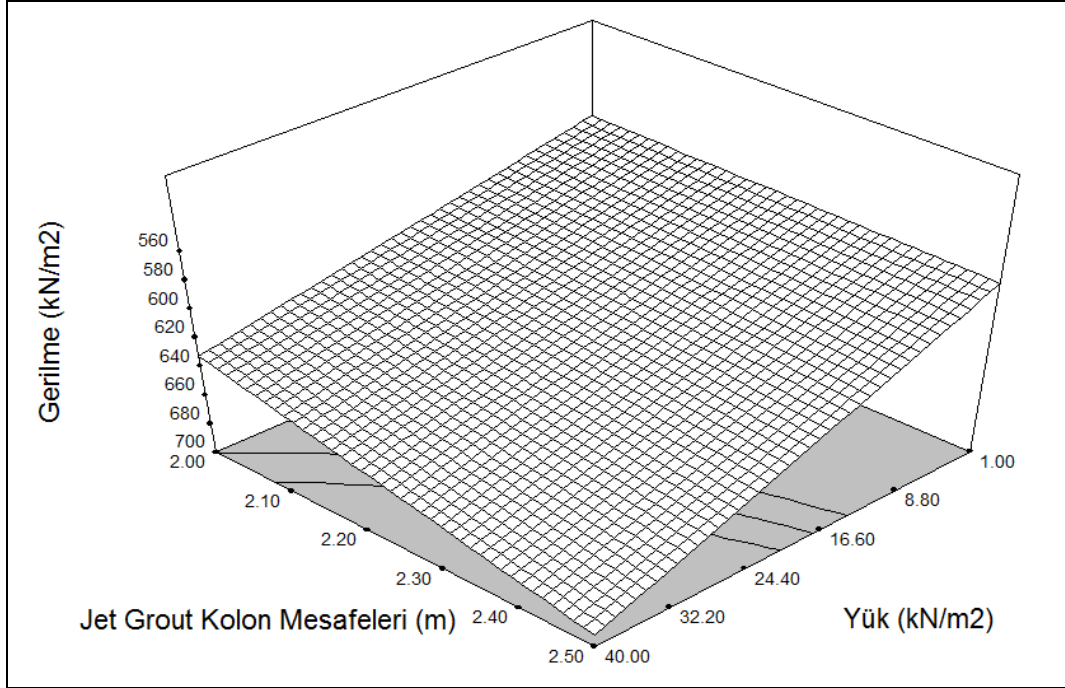
Şekil 4.11. Zeminin kohezyon değerleri ile dolgu kalınlığı değerlerinin oturmaya etkisi

Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Dolgu kalınlığı değerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Zemin kohezyon değerinin ve Dolgu kalınlığı değerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da oturma değerinde arttığı, görülebilmektedir.

Aşağıdaki sabit değerlerde gerilmenin yükten ve jet grout kolon mesafelerinden nasıl etkilendiği aşağıdaki Şekil 4.12.' te verilmiştir.

Dolgu Kalınlığı(A)	0,65 m
Zemin Kohezyon Değeri C (D)	7,50 kN/m ²
Jet Grout Çapı(C)	0,80 m
İçsel Sürtünme Açısı(ϕ)	15,50
Zemin Birim Ağırlık(F)	19,00 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,50 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	8600 kN/m ²



Şekil 4.12. Jet grout kolon mesafeleri ile gerilme değerlerinin oturmayaya etkisi

Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Yük değerinin artmasıyla oturma değerinde arttığı,
- Yük değerinin ve Jet grout kolon mesafelerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da oturma değerinde arttığı,

görülebilmektedir.

Aşağıdaki bağımlı ve bağımsız değişkenlerin arzu edilirlilik (arzu edilirlilik) fonksiyonlarına göre optimizasyon sonuçları Çizelge 4.6.' da sıralı olarak verilmiştir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde;

- Dolgu kalınlığının minimum,
- Jet Grout kolon ara mesafelerinin maximum,
- Yük değerlerinin maximum,
- Toplam oturma değerlerinin maximum,
- Toplam gerilme değerlerinin maximum,

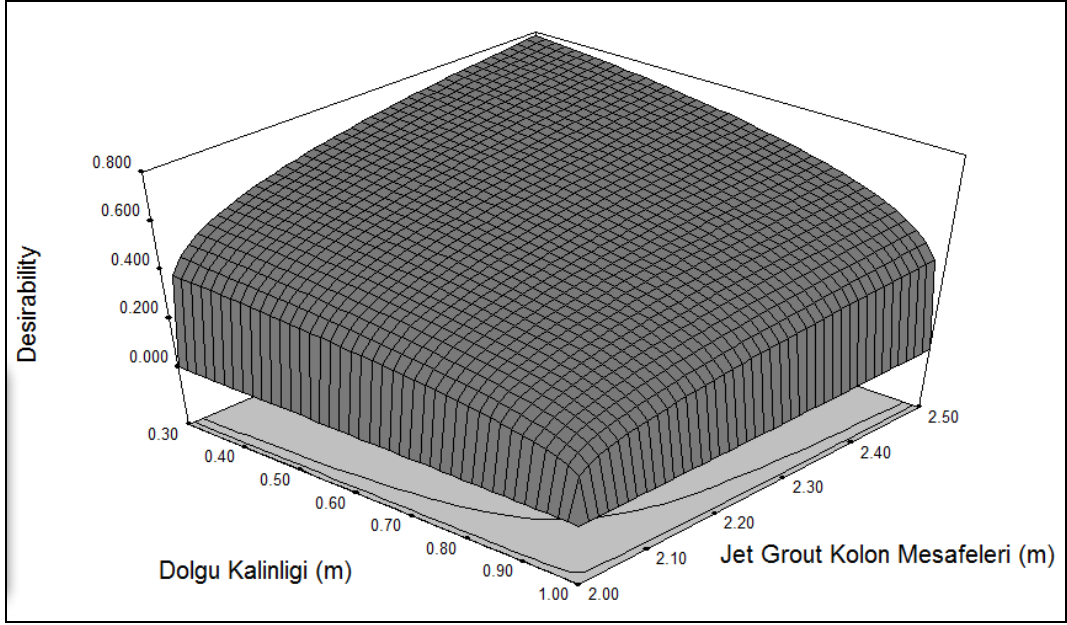
olarak hedeflendiği bir tasarım görülmektedir. Bunun sebebi ise elde edilecek sonuçların hem maximum güvenli bölgede kalması hem de maksimum ekonomikliğin sağlanmasıdır. Çünkü dolgu kalınlığı ve Jet grout kolon ara mesafeleri ekonomiklik açısından önemli faktörlerdir.

Çizelge 4.6. Değişkenlerin arzu edilirlilik fonksiyonlarına göre optimizasyon sonuçları

		En düşük değer	En yüksek değer
Etken parametreler	Optimizasyon hedefi	Limit	Limit
A:Dolgu Kalınlığı (m)	minimize	0,3	1
B:Jet Grout Ara Mesafe (m)	maksimize	2	2,5
D:c (Zemin)	Kendi oranında	1	14
J:Yük (KN/m ²)	maksimize	1	40
Toplam Oturma	minimize	0,0167	0,05866
Toplam Gerilme	minimize	560,1	771,33

Optimizasyon sonucunda aşağıdaki sabit değerlerde arzu edilirlilik fonksiyonun dolgu kalınlığı ve jet grout kolon mesafelerinden nasıl etkilendiği Şekil 4.13.' de verilmiştir.

Yük(J)	31,14 kN/m ²
Zemin Kohezyon Değeri C (D)	1 kN/m ²
Jet Grout Çapı(C)	0,91 m
İçsel Sürtünme Açısı(ϕ)	26,95°
Zemin Birim Ağırlık(F)	18,84 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,25 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	11486,26 kN/m ²



Şekil 4.13. Jet grout kolon mesafeleri ile dolgu kalınlığı değerlerinin oturmaya etkisi

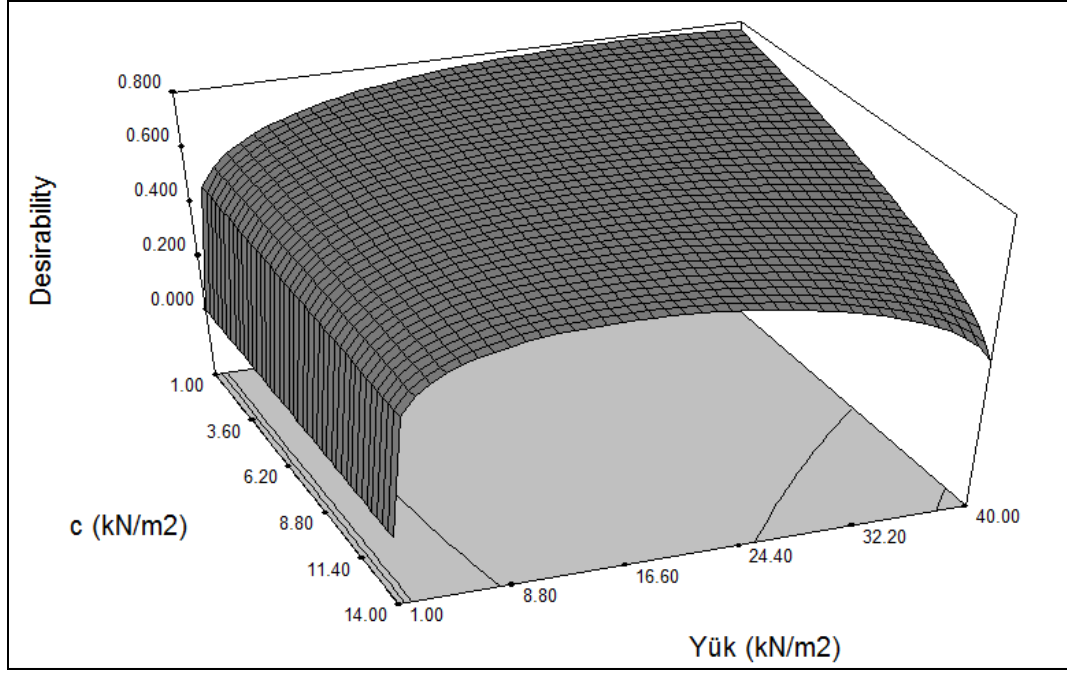
Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Dolgu kalınlığı değerinin artmasıyla arzu edilirlık değerinde arttığı,
- Jet grout kolon mesafelerinin artmasıyla arzu edilirlık değerinde arttığı,
- Dolgu kalınlığı değerinin ve Jet grout kolon mesafelerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da arzu edilirlık değerinde arttığı,

görülebilmektedir.

Optimizasyon sonucunda aşağıdaki sabit değerlerde arzu edilirlık fonksiyonun kohezyon ve yükten nasıl etkilendiği Şekil 4.14.' de verilmiştir.

Dolgu Kalınlığı(A)	0,30 m
Jet Grout Ara Mesafe(B)	2,50 m
Jet Grout Çapı(C)	0,91 m
İçsel Sürtünme Açısı(Φ)	26,95
Zemin Birim Ağırlık(F)	18,84 kN/m ³
Zemin Kuru Birim Ağırlık(G)	17,25 kN/m ³
Zemin Elastisite Modülü E (H)	11486,26 kN/m ²



Şekil 4.14. Zemin kohezyon değerleri ile yük değerlerinin oturmaya etkisi

Şekilden anlaşılacağı üzere;

- Yük değerinin artmasıyla arzu edilirlık değerinde arttığı,
- Zemin kohezyon değerinin artmasıyla arzu edilirlık değerinde arttığı,
- Zemin kohezyon değerinin ve Jet grout kolon mesafelerinin birlikte artması söz konusu olduğu durumda da arzu edilirlık değerinde arttığı,

görülebilmektedir.

Yukarıda yapmış olduğumuz tüm analizler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, uygun(optimum) zemin parametreleri bulunmuştur. Bu zemin parametreleri kullanılarak Plaxis 2D programında sayısal analizler yapılmıştır. Bulunan sayısal analiz sonuçları ile optimizasyon sonucunda elde edilen sonuçlar kıyaslanarak 10 tanesi Çizelge 4.7.' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Optimizasyon sonuçları - Sayısal analiz sonuçları kıyas tablosu

Dolgu Kalınlığı (m)	Jet Grout Çapı (m)	c (Zemin)	ϕ (Zemin)	γ (Zemin)	(yunsat-Zemin)	E (Zemin)	Yük (KN/m2)	Optimizasyon Sonucunda Bulunan Toplam Oturma	Hesaplama Sonucunda Bulunan Toplam Oturma	Optimizasyon Sonucunda Bulunan Toplam Gerilme	Hesaplama Sonucunda Bulunan Toplam Gerilme	Arzuedilirlilik
0.3	0.91	1	26.95	18.84	17.25	11486.26	31.14	0.03431	0,03244	630.533	598,9764	0,7854
0.3	0.78	1	19.71	18.76	17.74	5996.11	31.14	0.03431	0,03235	630.532	599,0054	0,7854
0.3	0.70	1	30.76	18.01	17.35	7784.83	31.16	0.0343	0,03225	630.554	598,8964	0,7854
0.3	0.63	1	6.37	18.40	17.33	9208.97	31.16	0.03432	0,03266	630.549	597,8546	0,7854
0.3	0.85	1	17.65	19.60	17.17	10495.26	31.16	0.03433	0,03228	630.553	598,7542	0,7854
0.3	0.99	1	2.45	18.76	17.29	5896.60	31.08	0.03428	0,03239	630.475	599,0065	0,7854
0.3	0.72	1	15.80	18.30	17.80	5689.76	31.13	0.03431	0,03247	630.521	599,1051	0,7854
0.3	0.73	1	29.58	18.82	17.83	12621.12	31.16	0.03432	0,03271	630.547	598,9919	0,7854
0.3	0.72	1	29.66	18.33	17.01	8968.91	31.12	0.03430	0,03277	630.506	598,9807	0,7854
0.3	0.61	1	20.10	19.90	17.00	12060.15	31.11	0.03429	0,03268	630.500	598,9750	0,7854

Çizelge 4.7. incelendiği taktirde sayısal analiz sonuçlarının optimizasyon sonuçlarına yüksek oranda yakınlığı görülmektedir. Bulunan sonuçlar yapılan optimizasyon çalışmasının başarılı bir şekilde amacına ulaştığını göstermektedir.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma içeriğinde, jet grout yöntemi detaylı olarak irdelenmiştir. Jet grout yönteminin uygulama alanları, jet grout yönteminin uygulama aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve gerekli parametreler incelenmiştir.

Jet grout yönteminin zemin sıvılaşması problemine karşı önemli bir zemin iyileştirme metodu olduğu işlenmiştir.

Çalışmada Plaxis 2D programı kullanılarak zemin içerisinde jet grout kolonlar modellenmiştir. Geometrik model örneğinde kullanılan zemine ait farklı parametreler ve bu parametrelerin farklı değerleri için sonlu elemanlar analizi yapılmış ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak istatistiksel bir çalışma yapılmıştır. İstatistiksel analizde amaç, zemin parametrelerinin birbirileri ile olan ilişkileri ve bu ilişkinin derecelerinin, değişen zemin parametrelerinin oturma ve gerilme değerleri üzerindeki etkilerinin saptanmasıdır.

Bu çalışmada genel olarak elde edilen sonuçlar;

- Jet grout yönteminin, farklı zemin tiplerinin iyileştirmelerinde ve mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılan ekonomik ve pratik bir zemin iyileştirme metodu olduğu,
- Jet grout yönteminin, sıvılaşmaya müsait olduğu öngörülen zeminlerde uygulandığı ve başarılı sonuçlar elde edildiği,
- Herhangi bir zeminin oturma ve gerilme değerleri analizinin Plaxis paket programı ile yapılabileceği,
- Yapılan istatistiksel analizlerle, zemin parametrelerinin birbirileri ile olan ilişkileri ve bu ilişkinin ne derece olduğu,

- Jet grout kolonları imal edildikten sonra kolon başlıklarının üst plaktan gelen yüklerin etkisi ile kırılmaması için belirli bir kalınlıkta dolgunun yapılması gerektiği,
- Dolgu kalınlıkları, jet grout ara mesafeleri, zemin kohezyon değerleri, yük değerleri gibi parametreler ile bu parametrelerin farklı kombinasyonlarının birbirilerini ve gerilme değerlerini etkilediği,
- Üzerinde sayısal analiz yapılan değişkenlerin arzuedirlik fonksiyonlarına göre optimizasyon sonuçları elde edildiği, optimizasyon sonucunda bulunan toplam oturma ve toplam gerilme değerleri ile sonlu elemanlar analizi vasıtasıyla elde edilen toplam gerilme ve toplam oturma değerlerinin kıyaslandığı ve % 80- 90 yaklaşımla sonuçlar elde edildiği, şeklinde sıralanabilir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha farklı zemin türleri ve bu zeminlere ait farklı parametreler için istatistiksel analizler yapılmasına ihtiyaç vardır. Böylece çeşitli zemin parametrelerinin veya zemin parametrelerinden oluşan çeşitli kombinasyonların birbirileri ile olan ilişkileri, zemin gerilmeleri ve oturma değerleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- ALPAR, R., 1997. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş 1. Kültür Ofset, Ankara, 275s.
- BAKIM, M.A., 2007. Enjeksiyon Yöntemleri İle Zemin Islahı. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 157s.
- BAUMANN, V., 1984. Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis. Vortrage der Baugrundtagung, pp. 49 – 83, Duesseldorf.
- BRAY, J. D., SANCIO R. B., RIEMER M., and DURGUNOĞLU H. T., 2004. Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils. Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, UC Berkeley, California, U.S.A.
- BRINKGREVE, R.B.J. 2002. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (User manuals), Balkema.
- BZOWKA, J., 2004. Computational Model for Jet Grout Pile - Soil Interaction. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXVI, No. 3 – 4.
- CUBRINOVSKI, M., ISHOHARA K., 2001. Analysis of the Performance of an Oiltank Pile Foundation in Liquified Deposits. Proceedings of Satellite Conference Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, Istanbul.
- DOĞU, O., 2005. Jet Grouting Tekniği ile Zemin Islahı. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- DOĞU, O., YILDIRIM H., DURGUNOĞLU A. T., 2006. Zeminin İnce Dane Oranı ve SPT Vuruş Sayısının Jet Grout Kolonların Mukavemetine Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On birinci Ulusal Kongresi, K.T.Ü., Trabzon.
- DURGUNOĞLU, H. T., KULAÇ H. F., ORUÇ K., ÖGE C.E., EKER F.Ş., 1998. Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme Üzerine Bir Uygulama. Zemin Mekaniği 153. ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- DURGUNOĞLU, H.T., KULAÇ H.F., ORUÇ K., YILDIZ R., ALTUGU T., EMREM C.A., 2002. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- DURGUNOĞLU, H. T., KULAÇ, H. F., ORUÇ, K., YILDIZ, R., SICKLING J., BOYS I. E., ALTUGU T, EMREM C., 2003. A Case History of Ground Treatment with Jet Grout Against Liquefaction for a Cigarette Factory in Turkey. Grout and Grout Treatment, New Orleans, USA.
- DURGUNOĞLU, H. T., 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- DÜZCEER, R., 2004. Sakhalin Doğalgaz ve Petrol İşleme Tesisi Kazık İşleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- GÖKALP, A., DÜZCEER, R., 2002. Ground Improvement by jet grout technique for foundations of a natural gas combined cycle power plant in Turkey. Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, October 2002, Nice, France.

- GASS, S.I., 2000. Making Decisions with Precision. Business Week October 30, 2000.
- GASS, S.I., and ASSAD, A.A., 2004. Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History. Springer-Verlag, New York, NY.
- ICHIHASHI, Y., SHIBAZAKI, M., KUBO, H., LJI, M., and MORI, A., 1992. Jet Grout at Airport Construction. Proc. ASCE Conf., Grout, Soil Improvement and Geosynthetics. New Orleans, Vol. 1, pp. 182 - 193.
- IDRISS I. M., and BOULANGER R. W., 2004. Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, 7 - 9 January 2004, UC Berkeley, California, U.S.A.
- KAUSCHINGER, J. L., HANKOUR, R., PERRY E, B., 1992. Methods to Estimate Composition of Jet Grout Bodies. Proceedings of the conference of Grout, Soil Improvement and Geosynthetics. New Orleans, 2 vols., pp. 194 - 205, ASCE.
- KIRSCH, F., and SONDERMANN, W., 2001. Ground improvement and its numerical analysis. Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Istanbul 2001, A.A. Balkema, pp. 1775 – 1778.
- KUMBASAR, V., KİP F., 1985. Zemin Mekaniği Problemleri. Çağlayan Kitabevi, 520 s.
- KÜSİN, C.C., 2009. Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 157s.
- LUNARDI, P., 1977. Ground Improvement by Means of Jet-Grout. Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, Vol 1 No:2, pp. 65 - 86.
- MELEGARY, C., GARASSINO, A.L., 1997. Seminar on Jet Grout. CI-Premier Pte. Ltd., Singapore.
- MUT, T., 1987, Jet-Grouting Methodu ile Zemin Islahı. ZMTM 2. Ulusal Kongresi, 11-13 Mayıs 1987, pp. 437- 443, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul
- OHTA, Y., GOTO, N., 1978. Empirical Shear Wave Velocity Equations in terms of Characteristic Soil Indices. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.6, pp. 167 - 187.
- OMINE, K., OCHIAI, H., BOLTON, M.D., 1999. Homogenization Method for Numerical Analysis of Improved Ground with Cement – Treated Soil Columns. Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Bredenberg, Holm & Broms (eds) © Balkema, Rotterdam ISBN 90 5809 108 2.
- OMINE, K., OCHIAI, H., YOSHIDA, N., 1998. Estimation of In – Situ Strength of Cement – Treated Soils Based on a Two – Phase Mixture Model. Soils & Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 17 – 29.
- OMINE, K., OHNO, S., 1997. Deformation Analysis of Composite Ground by Homogenization Method. Proc. of 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, pp. 719 – 722.
- OMINE, K., YOSHIDA, N. OCHIAI, H., 1993. Stress – Strain Behavior of Mixtures with Two Different Elastic Materials. Fukuoka University Review of Technological Sciences, 51: 83 – 93.
- OU, C.Y., TENG, F.C., WANG, I. W. 2007. Analysis and Design of Partial Ground Improvement in Deep Excavations. Computers and Geotechnics 35 576 – 584.
- OSMANOĞLU, D., 2007. Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 137s.

- ÖZDEN, G., 2010. Depreme Dayanıklı Temel Tasarımı. İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Semineri, İzmir.
- ÖZSOY, B., DURGUNOĞLU, H. T., 2003. Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması. 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- ÖZSOY, M.B., 2002. The Mitigation of Liquefaction by means of Soil Improvement Techniques. Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, İstanbul, Türkiye.
- PALACIOS, A., 1977. The Theory and Measurement of Energy Transfer during Standard Penetration Test Sampling. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, Fla.
- RACANSKY, V., SCHWEIGER H.F., THURNER R., 2008. FE-Analysis of the Behaviour of Buttressed Jet Grouted Retaining Walls. Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3984 – 3992
- RACANSKY, V., THURNER R., KUMMERER C., 2006. Design of a deep building pit with numerical and limit equilibrium methods. Numerical Methods in Geotechnical Engineering – Schweiger (ed.) © Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 – 415 – 40822 – 9.
- RAUSCHE, F., GOBLE, G., LIKINS, G., 1988. Recent WEAP Developments. Proceedings of the Third International Seminar on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa.
- ROBERTSON, P. K., WRIDE, C. E., 1998. Evaluating Cyclic Mobility Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test. Can. Geotechnical Journal. Ottawa, Vol. 35, No.3, pp. 442 – 459.
- SAGLAMER, A., DÜZCEER, R., GOKALP, A., and YILMAZ, E., 2002. Ground Improvement by Jet Grout Columns for the Foundations of an Automobile Plant in Turkey. Deep Foundations 2002, Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002, Orlando, Florida, GSP No. 116.
- SANCIO, R. B., BRAY, J. D., REIMER, M. F., DURGUNOĞLU, H. T., 2003. An Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Adapazari Silt. Pasific Conference on Earthquake Engineering, paper no.172.
- SCHMERTMANN, 1976. The Shear Behavior of Soil at Constant Structure. Bjerrum Memorial Volume. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, p. 87.
- SCHMERTMANN, 1977. Guides for CPT Performance and Design. Report prepared for Federal Highway Administration, Washington D.C.
- SEED, H. B. IDRIS, I. M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- SEED, H. B., IDRIS, I. M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.105 (GT2), pp. 201 - 255, 1979.
- SEED, H.B., TOKIMATSU, K., HARDER, L. F., CHUNG, R., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111(12), pp.1425-1445, 1985.
- SERT, S., ÖNALP, A., 2007. Turba Üzerine Yapılmış Rijit Platformun Oturmaları ve Kontrolü. ZMTM 1. Özel Konulu Sempozyumu: Teori ve Uygulamada Zemin - Yapı Etkileşimi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, sayfa: 181 - 185, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

- ŞIKLAR, E., 2000. Regresyon Analizine Giriş. T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, s.1-51, Eskişehir.
- TREVI, K., 1994. Columnar Treatment. Illustrative Report, Cesena.
- TS EN 12716, 2002. Özel Jeoteknik Uygulamalar - Jet Enjeksiyon.
- TSCHUCHNIGG, F., SCHWEIGER, H.F., 2008. Comparison Of Different Models For Analysing Foundations On Jet Grout Columns. Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3149 – 3157.
- WINSTON, W.L. 2003, Operations Research: Applicatios and Algorithms. 4. baskı, International Thomson Publishing, Belmont, CA.
- WONG, J.G., POH, T.Y., 2000. Effects of Jet Grout on Adjacent Ground and Structures. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 247 - 256.
- WONG, K.S., LI J.C., GOH. A.T.C., POH K.B., OISHI, E., 1999. Effect of Jet Grout on Performance of Deep Excavation in Soft Clay. Proceedings of the 5th International Symposiom on Field Measurements in Geomechanics- FMGM99, Singapore, 279 - 284.
- YILDIZ, R., 2011. Jet Grout Kolon Yöntemi ile Zemin İyileştirilmesi Yapılması. İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Semineri, İzmir.
- YOUD, L. T. v.d., (21 farklı yazar) 2001. Liquefaction Resistance of Soils: SummaryReport from the 1996 NCEER and 1998 NCEER-NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.127(10), pp. 817 – 833.
- YOUD, L. T., and IDRIS, I. M., 1997. Proc. NCEER Workshop on Evaluation Liquefaction Resistance of Soils NCEER, Buffola, Newyork.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Adıyaman ili Çelikhan ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Çelikhan ilçesinde tamamladı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim görmeye hak kazandı. 2002 yılında yatay geçiş yapmak suretiyle Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğrenimine devam etti. 2006 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2009 yılında Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

ÖZET

Son yıllarda gelişme gösteren ve genellikle zemin ıslahı amacıyla uygulanan jet grout yöntemi pek çok geoteknik probleme etkin çözümler sağlamaktadır. Bu yöntem çok yüksek basınç altında çimento/su karışımının zemine enjeksiyonuyla zeminin sıkıştırılması olarak tanımlanabilir. Jet grout yöntemini diğer enjeksiyon yöntemlerinden ayıran en önemli özelliği çok farklı zeminlerde başarıyla uygulanabilmesidir. Bu nedenle bu yöntemin kullanıldığı alanlar hızla artmaktadır.

Bu tez çalışmasında, jet grout yöntemin kullanım sahaları, uygulama aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri ve çalışma parametreleri ile bazı istatistiksel kavramlara (optimizasyon, regresyon analizi, varyans analizi) yer verilmiştir. Plaxis 2D programı kullanılarak zemin içerisinde jet grout kolonları modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler yapılarak zemin modelinin oturma ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Sayısal analizler zemin parametrelerinin farklı değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulmuştur. İstatistiksel analizlerin yapılmasındaki amaç zemin modelinde deplasman ve gerilme faktörleri üzerinde etkili olan zemin parametrelerinin tespiti ve bu parametrelerin optimizasyonudur. Optimizasyon neticesinde etkin parametrelerin maksimum ve minimum sınır koşulları saptanmıştır. Optimizasyon sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarının sayısal analiz sonucunda bulunan deplasman ve gerilme sonuçlarına büyük oranda yakınlığı, yapılan kıyaslama sonucunda görülmüştür.

SUMMARY

Jet grouting, a relatively recent development which is applied for mainly ground improvement, provides effective solutions to many geotechnical and geoenvironmental problems. The technique can be described as the process of soil consolidation by ultra-high pressure injection of cement/water mixes. Jet grouting technique differs substantially from the other grouting techniques in that this technique can be used in treating a wide range of soil types. Therefore the application fields of jet grouting are rapidly increasing.

Jet grouting method is frequently used in geotechnical engineering as an effective and practical way of soil improvement. This dissertation focuses on this method's application techniques, equipments, implementation stages, advantages, analysis techniques, and operating parameters. Additionally, finite element method is applied on jet grout column configuration using plaxis 2D and the various parameters affecting the jet grout column design are investigated. The results are evaluated statistically in terms of the ground displacement and extreme stress values. The statistical optimizations have been performed using maximum and minimum limitations and optimization goals. The results indicated that the statistical analysis and optimization were performed adequately since the resulting equations provide good results to a large extent. Consequently the affecting parameters of jet grout design are determined in terms of the configuration assumed in this study.