

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JET GROUT KOLONLU TEMEL TAKVİYE SİSTEMLERİNİN NÜMERİK
OTURMA ANALİZLERİ**

İSMAİL HAKKI SARAÇ

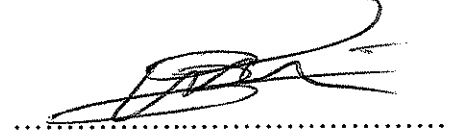
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2017**

Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN danışmanlığında, İsmail Hakkı SARAÇ'ın hazırladığı “**Jet Grout Kolonlu Temel Takviye Sistemlerinin Nümerik Oturma Analizleri**” konulu bu çalışma 10/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN



Üye : Doç. Dr. Taha TAŞKIRAN



Üye: Yrd. Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ



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

Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
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
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Tek Bir Jet Grout Kolonun 3B SE Simülasyonu	10
2.2. Jet Grout Kolon Grupları İle Desteklenmiş Temel Sistemlerinin 3B SE Analizi	18
3. MATERYAL ve YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Jet grouting ekipmanları	33
3.1.2. İyileştirilmiş zeminin bazı özellikleri	37
3.2. Yöntem	41
3.2.1. Jet grout uygulama yöntemleri	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	48
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	76

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JET GROUT KOLONLU TEMEL TAKVİYE SİSTEMLERİNİN NÜMERİK OTURMA ANALİZLERİ

İsmail Hakkı SARAÇ

**Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. H. Murat ALGIN
Yıl: 2017, Sayfa: 76**

Daha önce literatürde sunulmuş olan bir jet grout temel takviye uygulaması için yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar (3D SE) analizi bu tez kapsamında tanıtılmakta olup, sonlu elemanlar modelleme aşamalarının bu karmaşık zemin-yapı etkileşimi problemi için nasıl kullanılabileceğini açıklanmıştır. Böylelikle, sunulan modelleme tekniği sayesinde, tarihi binalar ve sığ duvar altı temelleri için jet grout tekniği ile yapılan takviye işleminin daha genel olarak tasarım uygulamalarında kullanımını kolaylaştırılmaktadır. Tez ayrıca tasarımı senaryosunu ve arazi şartlarının görüntü işleme tekniği kullanarak nasıl modellendiğini açıklamakta ve komşu yapıları dikkate alarak jet grout kolonlarla takviye edilmiş bir temel sisteminin nasıl modellenebileceğini açıklamaktadır. Tez, jet grout kolonlarla takviye edilmiş yüzeysel temeller için geliştirilmiş 3B SE modellerinin bu tür karmaşık temel takviye sistemleri için gerçekçi bir çözüm sağladığı sonucuna varmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Jet grout kolonlar, Sonlu elemanlar analizi, Yüzeysel temeller, Üç boyutlu modelleme, Temel takviye sistemi

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL SETTLEMENT ANALYSIS OF FOUNDATION UNDERPINNING SYSTEMS WITH JET GROUT COLUMNS

İsmail Hakkı SARAÇ

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

**Supervisor: Prof. Dr. H. Murat ALGIN
Year: 2017, Page: 76**

The three dimensional finite element (3D FE) analysis conducted on a jet grout underpinning application practice previously undertaken in the literature is presented in this thesis to demonstrate how the finite element modelling process can be utilized for this complex soil-structure interaction problem and how the presented modelling technique can be applied on the more general underpinning designs with the jet grouting technique for the historical buildings and the shallow wall footings. Thesis also explains how the execution design scenario and the site conditions can be modelled using the image processing technique and how such a foundation system underpinned with jet grouting can be modelled including the consideration of the adjacent structures. Thesis concludes that the developed 3D FE models on the shallow wall footings underpinning jet grouting provides a realistic solution for such a complex underpinning systems.

KEYWORDS: Jet grout columns, Finite element analysis, Shallow foundations, Three dimensional modelling, Underpinning

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez çalışmasında katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Prof. Dr. H. Murat ALGIN'a, teknik desteklerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Zeynep ALGIN ve Yrd. Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ'e, sonlu elemanlar analizlerindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Arda Burak EKMEN'e ve çalışmalarım esnasında benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Jet grout ekipmanları	33
Şekil 3.2. Delici makinesinin dönme ve hız ayarları farklılaştırılarak elde edilebilen geometrilere örnekler	34
Şekil 3.3. Tipik bir jet grout delgi makinesi.....	35
Şekil 3.4. Monitörlerin şematik görünüşleri	36
Şekil 3.5. Genelde uygulanan jet grout sistemleri.....	42
Şekil 3.6. Jet 2 ve Jet 3 sistemlerinde kullanılan ekipmanlardan örnekler	42
Şekil 3.7. Süper jet yöntemi	44
Şekil 3.8. (a) standart yöntemle oluşturulmuş kolonlar, (b) süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar	44
Şekil 4.1. Yeni yapılmış binanın genel görünüşü, First Morris Bank, Trust Company, NJ, Morristown, USA (Armijo, 2002).....	49
Şekil 4.2. Mevcut binanın yıkımından sonra uygulama alanının görünüşü (Armijo, 2002).....	50
Şekil 4.3. Jet grout uygulamasının şematik planı (Armijo, 2002).....	51
Şekil 4.4. Jet grout uygulamasının şematik kesit görünüşü (A-A kesiti, Şekil 4.3).....	52
Şekil 4.5. Analitik hesaplamalarda jet grout duvarının istinat duvarı gibi düşünülmesi	53
Şekil 4.6. Jet grout uygulaması ve kolonların kazı aşamasında traşlanması	54
Şekil 4.7. Jet enjeksiyon parametre programı çıktısı	56
Şekil 4.8. Bir test jet grout kolonunun incelemesi	57
Şekil 4.9. Test kolonunun karot numune işlemi.....	57
Şekil 4.10. Jet grout kolondan alınan numuneler	58
Şekil 4.11. Delme makinesi kontrol paneli ve kayıt sistemi	59
Şekil 4.12. Operatör jet enjeksiyon parametrelerini ayarlarken	60
Şekil 4.13. Delme parametre ve grouting parametre logları	61
Şekil 4.14. Deney kolonu tekrar delme işlemi	63
Şekil 4.15. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (komşu temel yapısı ve kazı alanının yakın plan görselleri)	66
Şekil 4.16. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (zemin tabakaları, içsel mesh ve jet grout kolonları yakın plan görselleri)	66
Şekil 4.17. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (eğimli jet grout kolonları ve temel altından yakın plan görselleri)	67
Şekil 4.18. 3B SE analiz sonuçları	67
Şekil 4.19. 3B SE analiz sonuçlarının jet grout takviyesiz ve takviyeli durumla karşılaştırılması, (a) takviye yapılmadan kazının gerçekleşmesi senaryosu durumunda oturma, (b) jet grout kolon takviyesi yapıldıktan sonra kazının gerçekleşmesi durumunda oturma.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. 3B SE analizlerinde Algin (2016 ve 2017) tarafından kullanılan ve Modoni ve Bzowka (2012) tarafından kabul edilmiş davranış parametreleri ve değerleri.....	16
Çizelge 2.2. 3B SE analiz sonuçlarının optimizasyonunda Algin (2016 ve 2017) tarafından kullanılan birim fiyatlar.....	26
Çizelge 2.3. 3B SE analiz verileri üzerinde yapılan tepki yüzey metodu optimizasyon sonuçları .	32
Çizelge 3.1. Jet grout yöntemlerinde kullanılan tipik parametreleri	45
Çizelge 4.1. Uygulanan jet grout parametreleri	55

SİMGELER DİZİNİ

a_c	jet grout kolonunda belli bir kısım için kesit alanı
a_f	çelik güçlendirme profilinin kesit alanı
B	radyenin genişliği
c'	zeminin kohezyonu
E_c	yastık tabakasının elastisite modülü
E_{JG}	jet grout elemanının elastisite modülü
E_{ur}	yükleme boşaltma modülü
$E_{50\%}$	sekant modülü
L_{JGCE}	radye kenar alanı altındaki jet grout kolon uzunluğu
L_{JGCC}	radye merkez bölge alanı altındaki jet grout kolon uzunluğu
$m_{r(max)}$	jet grout kolon desteksiz radyenin maksimum eğilme momenti
$m_{r(max)}^{JG}$	jet grout kolonlu radyenin maksimum eğilme momenti
p	jet grout kolon tabanındaki düşey gerilme
p_{max}^{JGCE}	radye kenar alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum p değeri
p_{max}^{JGCC}	radye merkez alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum p değeri
p_L	p 'nin limit değeri
p_{L_d}	p_L 'nin limit tasarım değeri
q_c	CPT sonucu elde edilen uç dirnci
q_u	jet grout elemanının tek eksenli basınç dayanımı
S, S_{lim}	jet grout kolonunda belli bir kısım için eksenel yük ve bu yükün limit değeri
S_{JGC}	jet grout kolon merkezleri arasındaki mesafe
S_{ra}	jet grout kolon desteksiz radyenin ortalama oturması
S_{ra}^{JG}	jet grout kolonlu radyenin ortalama oturması
S_{ra_d}	S_{ra} 'nin limit tasarım değeri
t_c	yastık tabakasının kalınlığı
γ	birim ağırlık
γ'	batık birim ağırlık
Δs_r	jet grout desteksiz radyenin diferansiyel oturması
Δs_r^{JG}	jet grout kolonlu radyenin diferansiyel oturması
Δs_{r_d}	Δs_r 'nin limit tasarım değeri
ν	Poisson oranı

σ_c	jet grout kolonunda belli bir kısım için basınç dayanımı
σ_{c_d}	σ_c 'nin limit tasarım değeri
σ_f	çeliğin basınç dayanımı
$\sigma_{z(max)}^{JGCE}$	radye kenar alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum eksenel gerilme
$\sigma_{z(max)}^{JGCC}$	radye merkez alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum eksenel gerilme
τ	jet grout kolon yan yüzeyindeki düşey gerilme
τ_{max}^{JGCE}	radye kenar alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum τ değeri
τ_{max}^{JGCC}	radye merkez alanı altında jet grout kolonlardaki maksimum τ değeri
τ_L	τ 'nin limit değeri
τ_{L_d}	τ_L 'nin limit tasarım değeri
ζ_{asr}	jet grout kolonlu radyenin ortalama oturma oranı
$\zeta_{\Delta sr}$	jet grout kolonlu radyenin diferansiyel oturma oranı
ζ_{mr}	jet grout kolonlu radyenin maksimum eğilme momenti oranı
ϕ'	zeminin içsel sürtünme açısı
ψ	zeminin dilatensi açısı

1. GİRİŞ

Temel takviye işlemi geoteknik mühendisliğinin en önemli alanlarından biri olup, mevcut yapılara ekleme niteliğinde yapılacak uygulamalarda veya mevcut yapı yakınında yapılacak bina kazı ve temel sistemi uygulamaları aşamasında, tasarlanan temel sisteminin arazideki zemin şartlarına göre mevcut yapıyı etkilemeyecek şekilde projelendirilmesi için tasarlanan temel destek işlemidir. Bir tür zemin iyileştirme işlemi olarak da kabul edilebilecek bu uygulama mevcut yapıya takviye niteliğinde olduğundan, bu açıdan zemin iyileştirme yöntemlerinden farklılaşmaktadır. Temel takviye işleminde, Jet grout kolon uygulaması ve mini kazık gibi takviye yöntemleriyle mevcut temel sistemi desteklenerek, planlanan temel müdahalesine veya komşu arazide yapılacak kazı uygulamasından mevcut temel sisteminin etkilenmesi önlenir.

Jet grout bir zemin iyileştirme yöntemi olup, genelde grout denilen su çimento karışımı (bazen dolgu veya bağlayıcı katkıları da farkı olarak kullanılabilir) malzemenin yüksek basınçla delgi içinde püskürtülmesi yoluyla zeminin dairesel formda kesilerek silindirik formlu kolonların oluşturulması işlemidir. Bu sayede çimento, su ve zemin bir nevi karıştırılarak dayanımı doğal zemine göre daha yüksek bir malzeme ile kolon şeklinde bir oluşum zemin içerisinde inşa edilmiş olur. Bu kolonlar bazen bitişik formda uygulanarak zeminin doğal geçirimsizliği azaltılmaktadır. Jet grout işlemi yatay ve eğik olarak uygulanan su jetleri yardımıyla zemini kesen özel bir delici uç kullanılmaktadır. Bu dönen ucun geri çekilmesi sırasında yüksek basınçla yatay püskürtme ağızlarından grout pompalanarak, zeminle karışması sağlanır ve böylelikle sağlam ve geçirimsiz kolonlar oluşturulmuş olur. Klasik enjeksiyon yöntemlerinden farklı olarak jet grout yöntemi pek çok zeminde uygulanabilir. Akışkan olarak sadece grout püskürtülen sistem olan tek akışkanlı, hava ve grout (çift akışkanlı), hava, su ve grout püskürtülen (üç akışkanlı) sistemlerle düşük boşluk oranı, düşük geçirgenlik ve yüksek dayanıma sahip jet grout kolonları imal edilebilir. Çift ve üç akışkanlı sistemlerle imal edilen kolonların çapları uygulanan yüksek kesme enerjisi sebebiyle daha büyüktür. Jet grout yöntemi, yüksek

kesme enerjisi sayesinde klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha verimli ve ekonomiktir, ekipman tercihine, uygulama hız ve basınçlarına göre farklı çap ve geometride jet grout kolonlar oluşturulabilir, jet grout kolonlarının kalite kontrolü ve performansları, klasik enjeksiyon yöntemine nazaran çok daha verimli olarak değerlendirilebilir. Jet grout yönteminde kullanılan enjeksiyon karışımı genelde su ve çimento olduğundan çevreyi kirletici bir özelliği yoktur. Jet grout imalatına istenilen derinlikten başlanılabilmesi yer altı yapıları için bir avantaj oluşturmaktadır.

Jet grout kolonların dayanım ve geçirimliliği, kesici Jet enerjisi, imalat tekniği, grout karışım oranı, doğal zeminin özellikleri ve karışımın homojenliği şeklinde faktörlere bağlıdır. Jet grout kolonların etki mesafesi zeminin kohezyonunun artması ile azalır. Jet grout kolonların imalat hızı, monitörün geri çekme hızına ve dönme hızına bağlıdır. Tek akışkanlı sistemlerde, monitörün geri çekilme hızı 25-30 cm/dak, dönme hızı ise 6-10 devir/dak olup, üç akışkanlı sistemlerde bu değerler sırasıyla 4-7 cm/dak ve 3-6 devir/dak arasında değişmektedir. Jet grout yönteminde kullanılan grout karışımının su/çimento oranı genellikle 0.80-1.50 arasında olup, kolonların geçirimliliği genellikle 10-8 m/s'den küçüktür. Kil katkılı grout karışımlarının kullanılması durumunda geçirimliliğin 10-11- 10-9 m/s değerlerine gerilediği görülmektedir. Jet grout yöntemi, temel takviyesi, kazı destekleme, zemin iyileştirme, tünel ve shaft inşaatlarında kazı desteği, sızıntı sularının kontrolü, şevlerin stabilizasyonu, yeraltı sularının kontrolü, atık sahalarında geçirimsizlik uygulamaları, geçirimsiz perdeler duvar imalatı gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Jet grout imalatının maliyeti birçok farklı değişkene bağlı olmakla birlikte, bu konuda birim fiyat cetveli mevcuttur.

Jet grout yönteminde en önemli faktör, enjeksiyonun zemine istenilen iyileştirmeyi gerçekleştirecek şekilde nüfuz edebilmesini sağlayacak tarzda grout basıncının, monitör dönüş ve yukarı hareket hızının ayarlanmasıdır. Bu metotun uygulamasında zeminde yüksek kil oranının olması veya silt oranının %20'den fazla olması durumunda klasik jet grout uygulamasından uzaklaşılarak özel ekipmanlar ile jet grout işlemi yapılabilir. Bu yöntem, çakıldan kile kadar her türlü zeminin ıslahı için kılma olup, klasik enjeksiyon tekniğinden daha kontrollü bir şekilde

iyileştirmenin yapılmasını olanaklı kılmaktadır. 1965 yılında Japonya'da başlamış olan uygulama sonrasında Avrupa ve ABD'ye yayılmış olup, günümüzde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde klasik enjeksiyon yöntemine göre çok daha yüksek bir basınç değeri kullanılarak zemin kesilmekte, hemen ardından kesilen zemine grout püskürtülmekte ve bir çap dahilinde zemin geometrisi etkilenmektedir. Jet grout yönteminde klasik enjeksiyon işleminden farklı olarak zemin kesilerek etki alanı genişletilmektedir. Jet grout yöntemi ile yapılan zemin iyileştirmesinden beklenen sonuç zeminin dayanımında artış sağlayarak geçirimsizliği azaltmaktır.

Temel takviyesi geniş kapsamlı bir geoteknik problem olup, eski eserlerin yanında çok sayıda yeni eserde de başvurulmuş bir işlemdir. Yanlış tasarım, zemin şartlarının doğru değerlendirilmemesi, zemin şartlarındaki değişim, proje şartlarındaki değişim veya projenin inşa sonrası revize edilme gerekliliği gibi çok farklı sebeplerle, mevcut yapı temelini hasara uğramaması için temel zemininin iyileştirilmesi veya temel taşıma kapasitesinin artırılarak oturmaların azaltılmasını hedefleyen imalatlara verilen genel bir isimdir. Temellerin takviye gereksinimi bir çok farklı sebepten dolayı oluşabilir, örneğin, temel altında sıkışabilir zemin tabakalarının farklı kalınlık veya özellikte olması, temel altında yüksek bir düzeyde sıkışabilir tabakaların mevcudiyeti, yeraltı suyu rejimindeki değişiklikler, su çekme, çöken zeminler gibi özel zemin bulunması, komşu kazılar, tünel kazıları gibi etkilerin olması, yalı temeli gibi su ile irtibatlı olan zeminlerde, durabilitik zarar görmüş temel durumu gibi pek çok durumda temel takviyesi gerekebilir. Genel olarak yapılarda oluşan oturma hasarı, diferansiyel oturma yüksek bir değerde olmasından ötürü binanın rotasyonel hareketi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu takviye işleri genel olarak temel mühendisliğinde üç ana biçimde yapılmakta olup, bunlar yüzeysel onarım, destek kazıkları ve enjeksiyon yöntemleridir.

Bu tez kapsamında, yüzeysel duvar altı temeli altında aşırı oturmaların komşu temel kazısı neticesinde oluşmasını önlemek amacıyla, enjeksiyon yöntemlerinden jet grout yöntemi kullanılarak yapılan temel takviye işleminin üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) analizi sunulmaktadır. Jet grout yönteminin bir temel takviye

sistem elemanı olarak kullanılması, jet grout kolonlarla güçlendirilmiş temellerin analizlerinin yapılması gerekliliğini doğurmuştur. Bu tez çalışmasında, jet grout kolonlarla takviye edilmiş yüzeysel temellerin görüntü işleme yöntemiyle üç boyutlu olarak modellenebileceği ve daha sonra nümerik analizlerinin nasıl yapılabileceği açıklanmaktadır. Bu tez çalışmasında, Jet grout kolon çapında derinlikle değişim benzetiminde, dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı kullanılmıştır Jet grout kolonlarla beraber mevcut temel sistemi ve komşu arazideki kazı aşamaları birlikte analiz edilmiş ve ortak bir etkileşimin olduğu anlaşılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında kullanılan 3B SE modellemesinin temel aldığı görüntü işleme tekniği, temel mühendisliğine ilk olarak Algın (2013) tarafından tanıtılmış olup, jet grout kolon-zemin etkileşiminin realistik modellemesi ve arayüz geometrisinin geoyapısal sistemlerin davranışına etkisi bu kapsamda incelenmiştir. Bu teknik daha sonra çeşitli tipte geoteknik problemlere uygulanmıştır, örneğin, NATM tüneli ile köprü temel etkileşiminin üç boyutlu sayısal analizi, Algın ve Ekmen (2015) tarafından yapılmıştır. Görüntü işleme tekniği ile darbeli kırmataş kolon grupların üzerindeki radyelerin tepki yüzey metodu ile optimizasyonu Algın ve Ekmen (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilen nümerik modeller sayesinde detaylı analizler gerçekleştirilmiş ve Jet grout kolon grupları üzerindeki radyelerle beraber temel sisteminin tamamı için tasarım prensipleri geliştirilerek sistemin bu tasarım parametrelerine göre nasıl optimize edilebileceği ve bu optimizasyon işleminde tepki yüzey metodunun nasıl kullanılabileceği Algın (2016) tarafından açıklanmıştır. Tasarım etki faktörleri olan tabaka kalınlığı, düşey gerilmeler, jet grout kolonu aralıkları ve kolon uzunlukları, eğilme momentleri, ortalama ve diferansiyel oturmalar incelenmiştir. Önceden tanımlanmış tasarım sınırlarına uygun yapılan kabullerde optimize edilmiş tasarım çözümü sunabilmek için optimizasyon analizinde tepki yüzey metodu kullanılmıştır. Optimize edilmiş jet grout destekli radye tasarımında, tasarım kısıtlamaları ve tasarımın göreceli etkileri tartışılmıştır. Jet grout grup kolonları üzerindeki yastık tabakasına oturan radye sistemi (yani jet grout kolonlu radye temel sistemi) bir bağlantısız sistem olup, jet grout kolonlar ile radye arasında bazı kazık sistemlerinde olduğu gibi rijit bir bağlantı söz konusu değildir. Bu sistemin Algın (2016) tarafından daha önce geliştirilen tasarım metodu Ekmen ve Algın (2016) tarafından özetlenmiştir. Bu karmaşık problem üniform olmayan yükleme durumu için özel olarak tekrar incelenmiş ve bu yükleme durumunda tüm sistemin analizleri Algın (2017) tarafından açıklanmıştır. Algın (2017) tarafından tanıtılan dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı sayesinde jet grout kolonların düzensiz çap dağılımlarının bu

fonksiyon ile benzeştiği açıklanarak, geometrik değişimin bu fonksiyon kullanılarak tahmin edilebileceği açıklanmıştır.

Algın (2016 ve 2017)'de jet grout kolonların karmaşık geometrisi 3B olarak modellenmiş olup, her bir araştırma için görüntü işleme tekniği kullanılmıştır. Bu araştırmalarda, kazıklı radyeler ve jet grout kolonlar için önceden belirlenen tasarım stratejilerinin jet grout kolonlu radyelerin tasarımı açısından nasıl bir araya getirilebileceği açıklanarak, tüm bir jet grout kolonlu radye sisteminin optimize edilmiş tasarım boyutlarını elde etmek için tepki yüzey metodunun nasıl kullanılabileceği açıklanmıştır. Ayrıca, optimize edilmiş bir tasarım için sınırlandırılan tasarım parametrelerinin pratikte nasıl kullanılabileceği açıklanarak, göz önüne alınan tasarım faktörleriyle sonuç parametreleri arasındaki karşılıklı ilişkinin nasıl değiştiği izah edilmiştir. Buna bağlı olarak, göz önüne alınan tasarım kısıtlamaları ile sınır tasarım değerleri için jet grout kolonlu radye sisteminin optimize edilmiş tasarım çözümünün analizlerden nasıl etkilendiği açıklanmıştır.

Jet grout yöntemi, çevresindeki zemini keserek, yüksek basınçla piskürtülen enjeksiyonla zeminin karıştırılması yoluyla silindirik şekle benzeyen Jet grout kolon olarak adlandırılan kolonların oluşturulması esasına dayanır (Yahiro ve Yoshida, 1973). Geoteknik mühendisliğindeki çeşitli uygulamalar arasında bu pratik teknik, temel mühendisliğinde kazıklara alternatif olarak ekonomik üstünlükler sağladığından, temel zemininin çok değişkenli ve parçalı kayaç içerdiği durumlar gibi zemin özelliklerinin kazık uygulamaları için uygun olmadığı durumlarda tercih edilirler. Radye temeller ayrıık olarak imal edilmiş jet grout kolonlarıyla desteklenirse, bu kolonların merkezleri arasındaki mesafenin kolonların ortalama çaplarından daha büyük olacak şekilde kolonların konumlandırılması durumunda, bu temel sistemi, bağlantısız kazıklı radye temele benzerliğinden dolayı, jet grout kolonlu radye olarak isimlendirilir (Croce ve ark., 2014).

Jet grout kolonlu radye temel zemini, yastık tabakası (granüler malzemeden yapılmış ara geçiş tabakası olup, radye ile jet grout kolonları arasında bulunmaktadır), Jet grout kolon grup elemanları, radye ve temel zemini, olmak üzere

dört ana taşıyıcı elemandan oluşan kompozit bir temel sistemidir. Granüler malzeme, genellikle yastık katmanı olarak kullanılır ve jet grout kolonlu radye üzerindeki gerilme dağılımını dağıtmak için zemin yüzeyi ile radye arasında bulunur. Bu yüzden jet grout kolonlu radyenin tasarımı, jet grout kolonların etkileri sebebiyle geleneksel radye tasarımından farklıdır (Algın, 2016; Algın, 2017). Bu tez çalışmasında kullanılan Jet grout kolontakviyeli yüzeysel temel sistemi de bu açıdan bakıldığında yastık tabakası hariç olarak imal edildiğinden üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, temel zemini, jet grout kazık grupları ve yüzeysel temel yapısıdır.

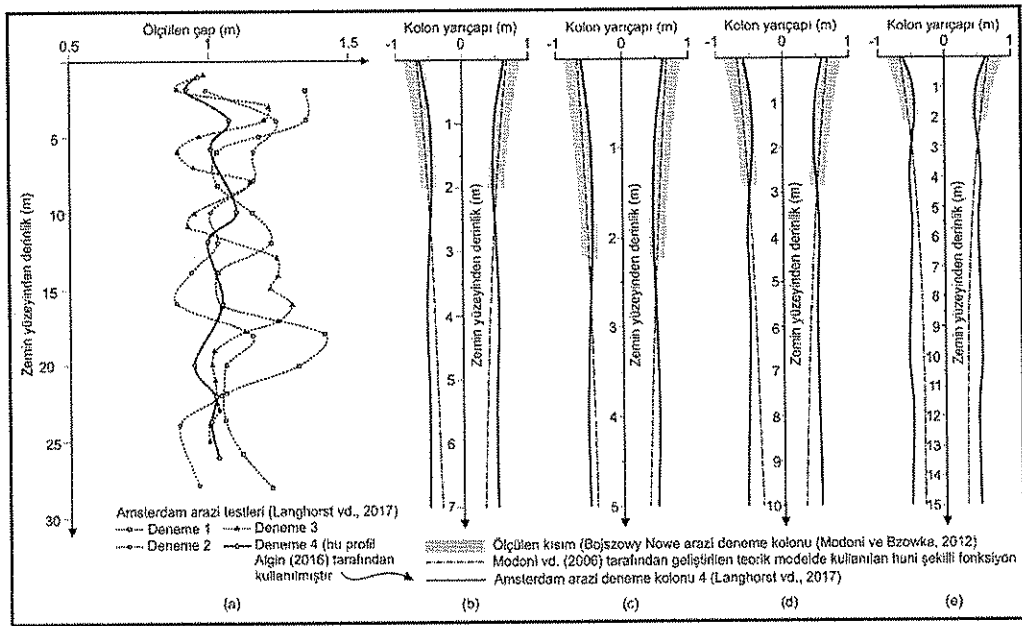
Geleneksel bağlantısız kazıklı radye ile jet grout kolonlu radye arasındaki farklar incelendiğinde, en önemli farklılığın jet grout kolonların özgün şekli ve özellikleri olduğu Algın (2016) tarafından belirtilmiş olup, bu tarz farklılıkların jet grout kolonlu radyelerin geoteknik tasarımında önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. Jet grout kolonların, mevcut yapıların takviyesi işlerinde kullanılması ilgili bazı uygulama çalışmaları (örneğin, Maertens ve Maekelberg, 2001; Popa, 2001; Shibazaki ve Ohta, 1982) ve yeni yapılarda kullanımlarıyla ilgili uygulamalar (örneğin, Cippo ve Tornaghi, 1985; Davie ve ark., 2003; Falcao ve ark., 2001; Saglamer ve ark., 2001) literatürde sunulmuştur.

Jet grout kolonların yük iletme mekanizmalarıyla ilgili Croce ve ark. (2014) tarafından derlenmiş bilinen bazı ilişkiler mevcuttur. Ancak, jet grout kolonlu radyelerin tasarımının aşırı basitleştirilmiş öznel ve ampirik metotlardan kurtarılması, bu bilinen ilişkilerle radye temel tasarım prensiplerinin birlikte değerlendirilmesiyle mümkün olmuş ve jet grout kolonlu radyelerin tasarım parametreleri Algın (2016) tarafından sunulmuştur. Bu tasarımın kompleks olmasının en önemli sebebi jet grout kolonların farklı boyutlarda olması, kolonların grup etkileri ve taşıyıcı malzemelerin gerilme şekil değiştirme özellikleridir (Algın, 2016).

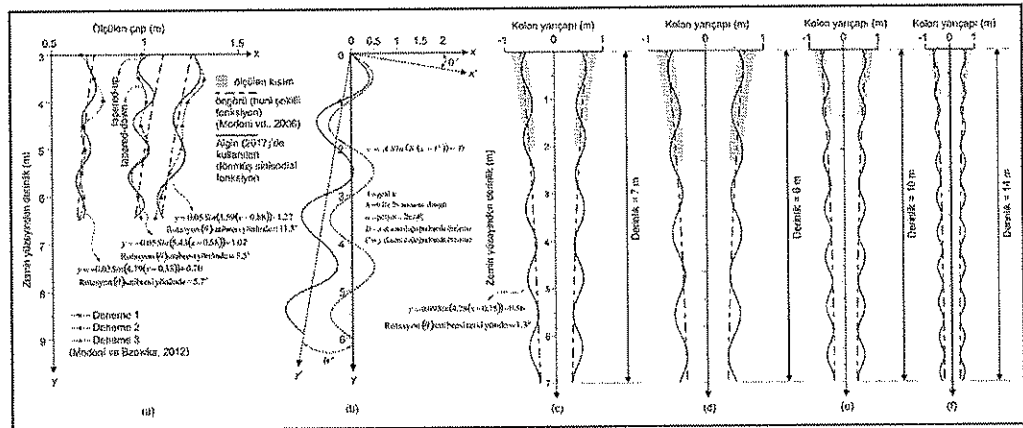
Çeşitli standart ve rehberler (örneğin, BS-EN-12716, 2001; GI-ASCE, 2009), derinliğe bağlı jet grout kolonların özellikleri ve çap farklılıkları gibi bilgileri elde etmek gayesiyle, arazi deneme kolonlarının yapılması gerektiğini vurgulamaktadırlar. Proje zeminine özgü elde edilen Jet grout kolon geometrisini

yakın bir şekilde temsil eden üç boyutlu sonlu eleman (3B SE) modelinin, arazi şartlarına uyarlanması gerekmektedir. Bu tez çalışmasına temel teşkil eden jet grout kolonlarının geometrik benzetimi ise bu teze temel teşkil eden temel takviyesinde arazi deneme kolon verilerine literatürde ulaşamadığından, Algın (2017)'de açıklanan dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı ile kolon geometrisindeki değişim ele alınmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme tekniği sayesinde, kolon bütünlük ve ön arazi testlerinden elde edilen veriler 3B SE modellerinin geliştirilmesinde kullanılabilmektedir. Jet grout kolongeometrilere ne kadar kompleks olursa olsun Algın (2016) sayesinde sunulan bu görüntü işleme tekniği sayesinde, kolonların oryantasyonu ve geometri modellene bilmektedir. Bu tez çalışmasında da bu sebepten dolayı görüntü işleme tekniği kullanılmıştır.

Algın (2016 ve 2017) tarafından sunulan 3B SE modellemeleri, Modoni ve Bzowka (2012); Bzówka (2009); Bzówka ve Pieczyrak (2008) tarafından verilmiş Jet grout kolon yükleme test sonuçlarını ve arazi test sonuçlarını temel almıştır. Bu test sonuçlarına geriye doğru analiz yapılarak 3B SE modelleriyle ulaşılarak analizler için ara yüz sürtünme parametrelerine ulaşılmıştır. Algın (2016)'da ekik olan bazı kolon geometrilere için Amsterdam'da yapılan ve Langhorst ve ark. (2007) tarafından verilen kolon geometrisindeki değişim kabul edilerek kullanılmıştır (Şekil 2.1.). Algın (2017)'de is bu kolon geometrisindeki değişim dönmüş sinisodial fonksiyon kullanılmıştır. Bu yaklaşımla Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan kolon geometrilerindeki değişim göz önüne alındığında tatminkar sonuçları ulaşılmıştır. Bu geliştirilen dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı kullanılarak Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan kolon yükleme testinde baz alınan kolon geometrisine geliştirilen bir dönmüş sinisodial fonksiyonla yaklaşılmıştır. Bu sayede Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan Jet grout kolon yükleme test sonuçlarının baz alındığı jet grout kolonunun derinliğe bağlı olan geometrik değişimi için geçerli olabilecek bir kabul yapılmıştır. Algın (2017) tarafından geliştirilen dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı verilen deneme kolonları için türetilerek Şekil 2.2.'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Algin (2016) tarafından modellenen Bojszowy Nowe (Modoni ve Bzowka, 2012) arazi deneme kolonunun eksik verilen geometrisi için kullanılan Amsterdam arazi deneme kolonu 4'ün geometrik değişimi (Langhorst ve ark., 2007)



Şekil 2.2. Dönmüş sinüsoidal fonksiyon kullanılarak Algin (2017)'de kullanılan yaklaşımla, Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan deneme kolonunun eksik geometrik değişimi tamamlanmıştır.

Algin (2016)'da 3B SE metodu kullanılarak yapılan modelde, jet grout kolonların geometrik çeşitliliği Amsterdam'da yapılan (Langhorst ve ark., 2007) gerçek geometrik şeklini temsil eden bir deneme kolonundan adapte edilmiştir. Tüm jet grout kolonlu radye sistemlerini simüle etmek için geliştirilen 3B SE modelleri, her faktörün değişim seviyelerini, jet grout kolonlu radye elemanlarının nasıl etkileştiğini ve tasarım tepkilerini nasıl etkilediğini ölçmek için analiz edilmiş ve sonuçlar Algin (2016 ve 2017)'de sunulmuştur. Optimize edilen temellerde,

minimum maliyet seviyeleri ile birlikte performans parametrelerinin de sağlanması gerektiği açıklanarak, en ekonomik çözüme ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak jet grout kolonlu radyenin tasarım stratejileri açıklanarak tasarım optimizasyonunda tepki yüzey metodunun nasıl kullanılabileceği açıklanmıştır.

Reul ve Randolph (2004), Nakanishi ve Takewaki (2013), Leung ve ark. (2010) gibi bazı araştırmacılar kazıklı radyenin optimum tasarımı için oturmanın, diferansiyel oturmanın ve maksimum eğilme momentinin önemli bağımlı değişken parametreleri olduğunu bildirmişlerdir. Bu parametreler ile birlikte eksenel ve yanal arayüz gerilmeleriyle birlikte, uç taşıma basıncının da jet grout kolonların tasarım parametreleri olduğu belirtilmiştir. Bu parametreler için bazı kısıtlamalar öncelikle kazıklı radyeler için Reul ve Randolph (2004) tarafından önerilmiş ve Algın (2016 ve 2017) tarafından Jet grout kolontasarımı için sunulan optimizasyon analizinde göz önüne alınmıştır. Oluşturulan çoklu hedefli optimizasyon analizinde kullanılan tepki yüzey metodu (Cornell, 1990) , tüm temel sisteminin mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamıştır. Genellikle bir veya birden fazla bağımlı veya bağımsız değişken (Cornell, 1990) arasındaki ilişkilerin Algın (2016 ve 2017)'de sunulan ampirik çalışmalarda kullanılan tepki yüzey metodu, her bir analizin bir deney sayıldığı bir şekilde kullanılmış olup, 3B sonlu eleman modeline dayanan parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. İstatistiksel olarak yapılan değerlendirmede, sistem sonuçlarının Jet grout kolon aralığı ve uzunluğu, yastık tabakası kalınlığı gibi göz önüne alınan faktörlerle oldukça iyi bir şekilde bağlantılı olduğu garantilendikten sonra tepki yüzey metodu uygulanarak optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

2.1. Tek Bir Jet Grout Kolonun 3B SE Simülasyonu

Jet grout temel proje tasarımında en önemli adım jet grout kolon çapının tahmin edilmesidir (Algın, 2016). Jet grout kolon çapları, kullanılan jet grout uygulama prosedürü ve zemin özelliklerinden önemli bir miktarda etkilenir (Croce ve Flora, 1998). Jet grout kolon çapını tahmin etmek amacıyla bazı araştırmacılar (Botto, 1985; Bell, 1993; Xanthakos ve ark., 1994; Kutzner, 1996; Lesnik, 2001;

Tornaghi ve Pettinaroli, 2004; Flora ve Lirer, 2011; AGI, 2012; Flora ve ark., 2013) ampirik bağıntılar geliştirmişlerdir. Bu bağıntılara alternatif olarak bazı araştırmacılar (Chu, 2005; Modoni ve ark., 2006; Heng, 2008; Wang ve ark., 2012; Ho, 2007; Wang ve ark., 2013; Shen ve ark., 2013a; Shen ve ark., 2013b) ise teorik modeller önermişlerdir. Ochmanski ve ark. (2015) son zamanlarda literatürde rapor edilmiş arazi uygulamaları sonuçlarını derleyerek, jet grout kolonların çapını tahmin etmek için bir takım tasarım çizelgeleri ve yapay sinir ağ modeli önermişlerdir. Yüksek sürtünme açısı değerlerine sahip zeminlerde genellikle derinlikle birlikte jet grout kolon çaplarında derinlikle bir azalma olduğu görülmekte olup, bu durumun sebebi olarak gömülme derinliğinden kaynaklanan zemin tabakasının efektif gerilmesindeki artışa bağlı olarak meydana gelen zeminin kayma gerilmesindeki artış göstermektedir (Algın, 2016).

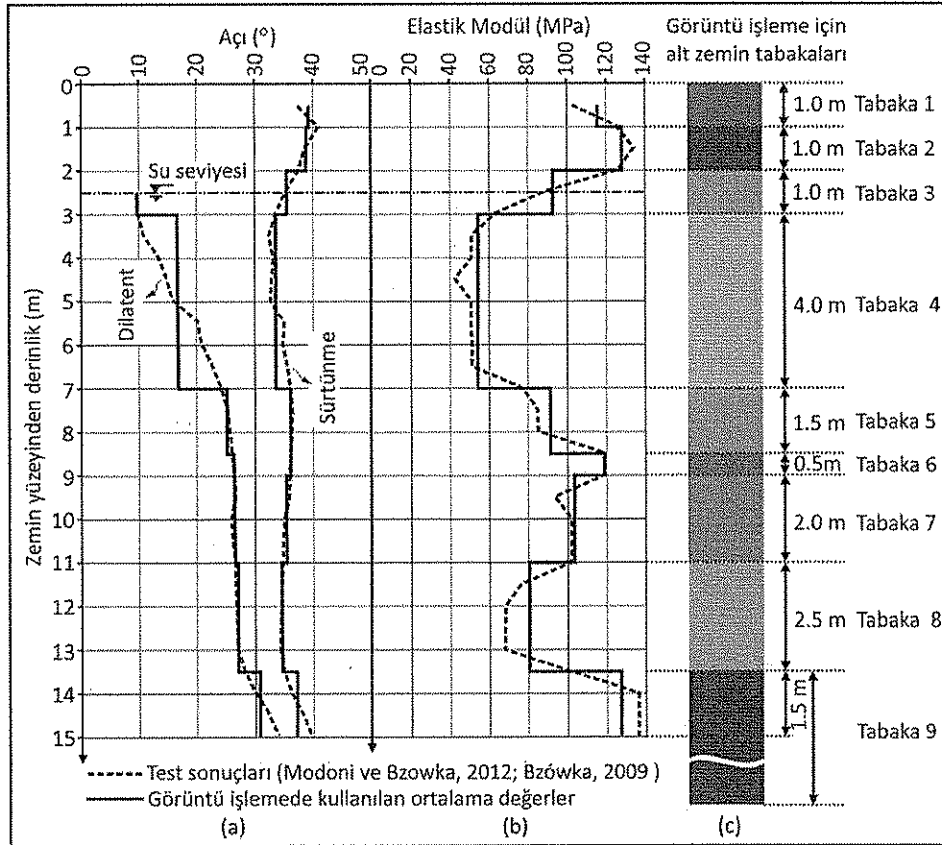
Modoni ve Bzowka (2012) Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout uygulamasında (Bzówka, 2009; Bzówka ve Pieczyrak, 2008) huni formu bir şekil fonksiyonu tanımlamışlardır. Modoni ve Bzowka (2012) tarafından belirtildiği gibi, bu tahmin sadece ortalama boyutsal değişimi göstermekte ve yerel farklılıkları ihmal etmektedir. Algın (2016) tarafından belirtildiği gibi, kolon kesitlerinde, aşağı doğru azalan ve tersi yönde yukarı doğru azalan geometrik değişimlerin, zemin ve kolonların gerilme sonuçlarında önemli bir etki yaptığı ve artan yük seviyeleriyle bu etkinin daha baskın hale geldiği ifade edilmiştir. Benzer bir tespit kazıklar için Shahu (2006) tarafından yapılmıştır. Örneğin Şekil 2.1.(b)'deki jet grout deneme kolonunu detaylı olarak gözlemlendiğinde 1.5 m derinliğe kadar çap azalışı olduğu, bu noktadan itibaren aşağı doğru azalan kesitle geometrik farklılığın başladığı ve sonrasında bu durum 1.5 m ile 4 m derinlikleri arasında çap artışlarıyla birlikte yukarı doğru azalan kesitiyle devam ettiği görülmektedir. Bu aşağı doğru ve yukarı doğru azalan kesitler sonuç gerilme değerlerini etkilediğinden ve sürekli olarak jet grout kolon geometrilerinde gözlemlendiğinden, uygulama projelerinde deneme kolonundan elde edilen bilgilerin kullanılmasıyla, gerçek jet grout geometrisinin modellenmesi gerektiği Algın (2016) tarafından belirtilmiştir. Jet grout kolon çaplarındaki değişimin bütünüyle mevcut gerilme durumuna ve zeminin önceki yükleme geçmişine bağlı olduğundan, jet grout

kolon çaplarının olası çeşitliliğini ve özelliklerini elde etmek için proje uygulamasından önce arazi deneme kolonlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir ve bu gereklilik bazı standart ve rehberde belirtilmiştir (BS-EN-12716, 2001; GI-ASCE, 2009). Bu sebeple, jet grout kolonunun geometrik şeklinin homojen zemin birleşimi için bile silindir olarak göz önüne alınması kabul edilemez bir tasarım hatasıdır.

İlk olarak Bzowka (2009); Bzowka ve Pieczyrak (2008) tarafından bildirilen 4 jet grout kolon üzerinde yapılan eksenel kolon yükleme testlerinin detayları Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan sonlu elemanlar model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu deneysel çalışma Polonya'daki Bojszowy Nowe belediyesinde yürütülmüş ve 7m uzunluğundaki jet grout kolonlar üzerinde yapılmıştır. Kolonların üst kısımlarından 2 m kadar derinliğe kadar jet grout kolon çaplarının direkt ölçümleri yapılmış olup, bu seviyedeki su düzeyinin varlığından ötürü daha derinlerdeki çap değişimleri kayıt edilememiştir. Şekil 2.1.(b-e)'de gösterilen gölgeli kısım jet grout kolonların çap çeşitliliğindeki ölçüm derinliğini temsil etmektedir. Algın (2016) tarafından yapılan bu deneme kolonunun 3B SE modellemesinde, kolonun tüm geometrik değişimi gerektiğinden, bu simülasyon için farklı bir arazi denemesinden alınan jet grout kolon çap değişimi kabulü yapılmıştır. Bu kabul edilen çap değişimi Amsterdam arazi denemesi ölçüm sonuçlarına (Langhorst ve ark., 2007) dayandırılmıştır. Daha spesifik olarak, Algın (2016)'da Şekil 2.1.(a)'da gösterilen deneme jet grout kolon 4'ün çap değişimi Bojszowy Nowe deneme kolonunun geometrik değişimini temsil ettiğini kabul ederek işlemlere devam etmiştir. Bu varsayım Bojszowy Nowe deneme kolonunun ölçülen aralığına uyum sağlayan ve gölgeli alana direk düşen deneme jet grout kolon 4'ün (Amsterdam) çap değişimini gösteren Şekil 2.1.(b) ile açıklanmıştır. Ayrıca, Şekil 2.1.(b-e)'de jet grout kolonların çap değişimini tahmin etmek için Modoni ve ark. (2006) tarafından geliştirilen teorik huni formülü şekil fonksiyonu gösterilmiştir. Şekil 2.1.(b-e) ayrıca teorik huni formülü şekil fonksiyonu (kesikli çizgi) ve deneme jet grout kolon 4 'ün (Amsterdam) (düz çizgi) çap değişimleri arasında nispeten iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir. Şekil 2.1.(a)'da görüldüğü gibi deneme jet grout kolon 4 (Amsterdam) için çaplar 25 m derinliğe kadar ölçülmüştür. Bu veriler sonraki tüm jet grout kolonlu radye sistemlerinin sonlu elemanlar analizleri için kullanılarak, 10 ve

15 metre derinliklere kadar kolon geometrik değişimler için de kullanılmıştır (Şekil 2.1.(d-e)).

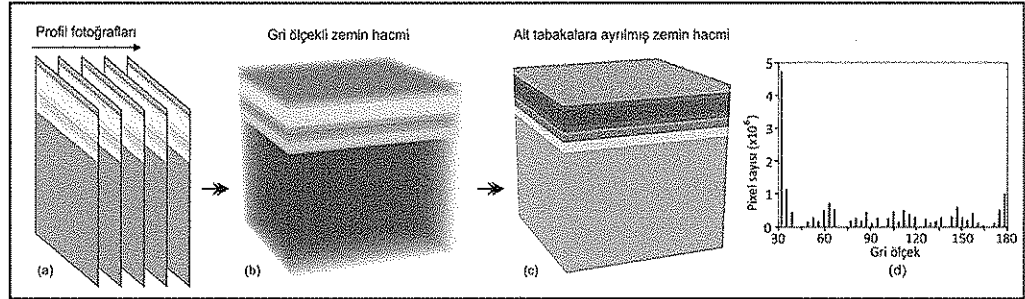
Şekil 2.3.'de , Modoni ve Bzowka (2012) tarafından benimsenen Bojszowy Nowe arazi denemesinin (Bzówka, 2009; Bzówka ve Pieczyrak, 2008) yapıldığı zeminin profilini ve derinliğe bağlı olarak belirlenmiş bazı zemin parametrelerinin değişimini özetlemektedir. Bu zemin profili Algın (2016 ve 2017) tarafından, elde edilen yük-oturma eğrilerinin geri analiz ile birlikte bu sonuçların geçerliliğine izin verdiği sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır. Zemin katmanlarının özellikleri hakkında detaylı bilgi Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sağlanmıştır. Jet grout kolon simülasyonu ve jet grout kolonlu radye sistemlerinin analizinde aynı zemin profili kullanılmıştır.



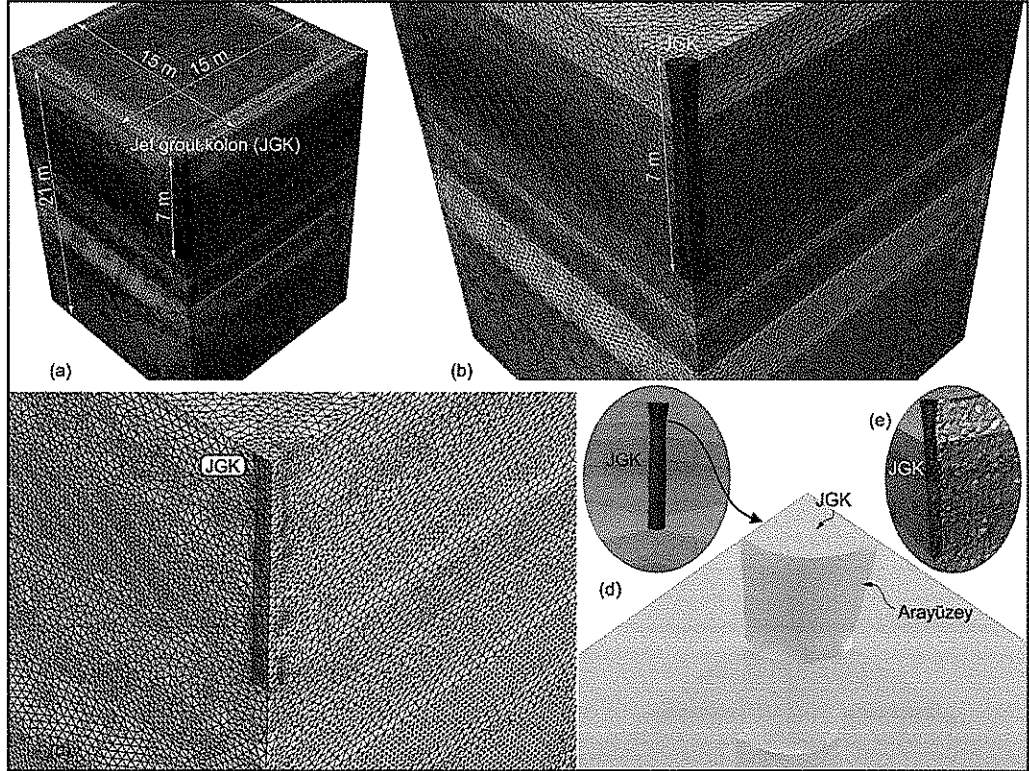
Şekil 2.3. Modoni ve Bzowka, 2012; Bzówka, 2009; Bzówka ve Pieczyrak, 2008 tarafından literatürde sunulan arazi deneme jet grout kolonunun uygulandığı zeminin profili, bazı zemin parametrelerinin derinlikle değişimi ve görüntü işleme metoduyla oluşturulan zemin tabakalarının ortalama değerleri (Algın, 2016 ve 2017)

Algın (2016 ve 2017)'de bir basitleştirme yapılarak belli aralıklarda zemin parametrelerinin ortalama derinliklerine göre zemin 9 alt tabakaya ayrılmış ve Şekil 2.3.(c)'de gösterilmiştir. Her bir zemin katmana ilk aşamada Şekil 2.3.(c)'de gösterildiği gibi bir gri tonlu değer atanmakta ve sonrasında görüntü işleme tekniğiyle temel zemini katmanlarından oluşan zeminin filtrelenmiş hacimsel 3B verilerini oluşturmak için kullanılmıştır. Şekil 2.4.(a-c) uygulanan bu görüntü işleme aşamalarını göstermektedir. Şekil 2.4.(d) hacimsel 3B verilerinin alt parçalara ayrılması için kullanılan gri tonlu aralıktaki piksellerin sayılarının değişimini göstermektedir. Algın (2016) tarafından elde edilen 3B sonlu eleman modeli Şekil 2.4.'te gösterilmiştir. Şekil 2.5.'de Algın (2016) tarafından Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout kolonunu için geliştirilen eden sonlu eleman modeli görülmektedir. Şekil 2.5.'de sunulan modelde Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout kolonundaki eksik geometrik verilerden ötürü Amsterdam arazi deneme kolonunun (Langhorst ve ark., 2007) geometrik değişimi kullanılmış olup, bu değişim Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Diğer taraftan, Algın (2017)'de ise bu kolon geometrisindeki değişim için dönmüş sinüzoidal fonksiyon kullanılmıştır. Bu kabulle geliştirilen model ise Şekil 2.6.'da sunulmuştur. Bu yaklaşımla Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan kolon geometrilerindeki değişim göz önüne alındığında tatminkar sonuçlara ulaşılmıştır. Bu geliştirilen dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı kullanılarak Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan kolon yükleme testinde, baz alınan kolon geometrisine geliştirilen bir dönmüş sinisodial fonksiyonla yaklaşılmıştır. Bu sayede Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan Jet grout kolon yükleme test sonuçlarının baz alındığı jet grout kolonunun derinliğe bağlı olan geometrik değişimi için geçerli olabilecek bir kabul yapılmıştır. Algın (2017) tarafından geliştirilen dönmüş sinisodial fonksiyon yaklaşımı verilen deneme kolonları için türetilerek Şekil 2.2.'de sunulmuştur. Şekil 2.5. ve 2.6.'da görüleceği üzere, basit simetri kullanılarak, hesap kolaylığı açısından model Algın (2016 ve 2017) tarafından çeyreğe indirgenmiştir. Sınır koşullarına gelince, modelin taban yüzeyi düşey olarak desteklenmiş ve tüm dış düşey yüzeyler boyunca normal dönmeler kısıtlanmıştır. Algın (2016 ve 2017)'de sunulmuş olan sonlu eleman modellerine atanan zemin ve jet grout kolon parametreleri Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sağlanmış ve

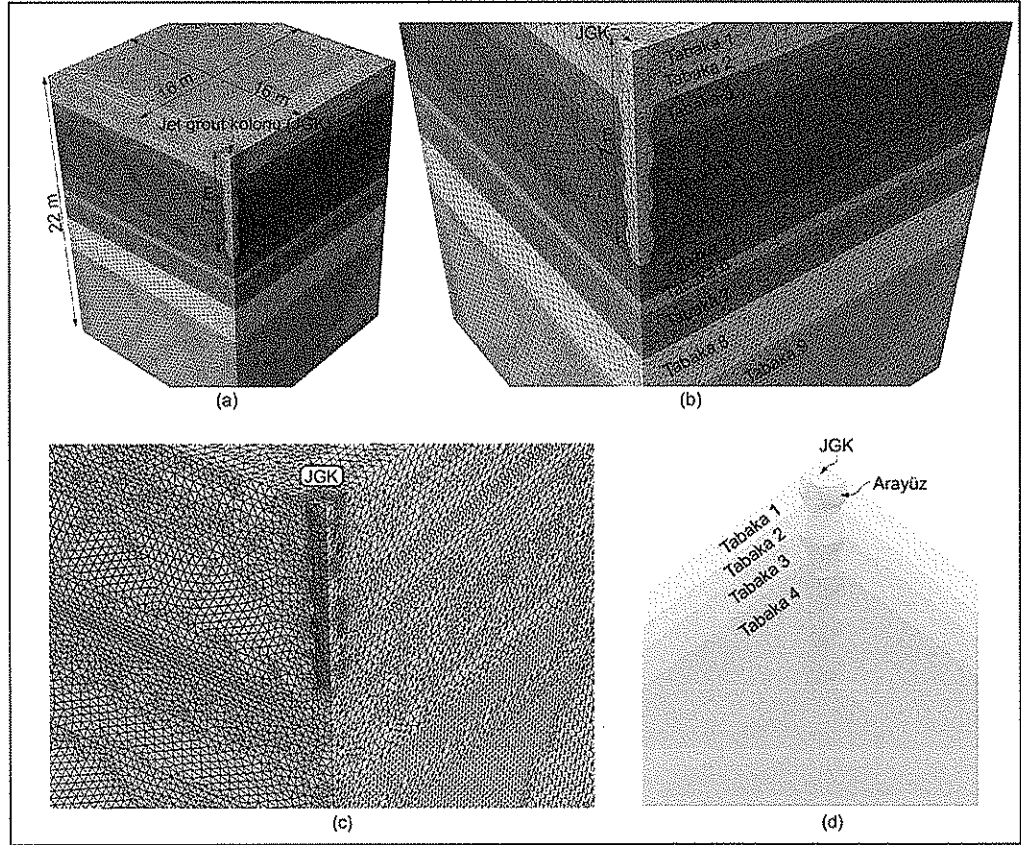
Çizelge 2.1. ve Şekil 2.3.'de sunulmuştur. Her katmana atanan zemin parametreleri Şekil 2.3.'de gösterilen ortalaması alınmış verilerden elde edilmiştir.



Şekil 2.4. 3B SE modelinin geliştirilmesinde kullanılan görüntü işleme tekniğinin aşamaları (Algın, 2016)



Şekil 2.5. Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout kolonunu için Algın (2016) tarafından geliştirilen 3B SE modeli (kolon geometrisindeki eksik verilerden ötürü Amsterdam arazi deneme kolonunun (Langhorst ve ark., 2007) geometrik değişimi kullanılmıştır olup, Şekil 2.1.'de gösterilmiştir)



Şekil 2.6. Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout kolonunu için Algın (2017) tarafından geliştirilen 3B SE modeli (kolon geometrisindeki eksik verilerden ötürü geliştirilen dönmüş sinüzoidal fonksiyon yaklaşımı geometrik değişimde kullanılmış olup, Şekil 2.2.'de gösterilmiştir)

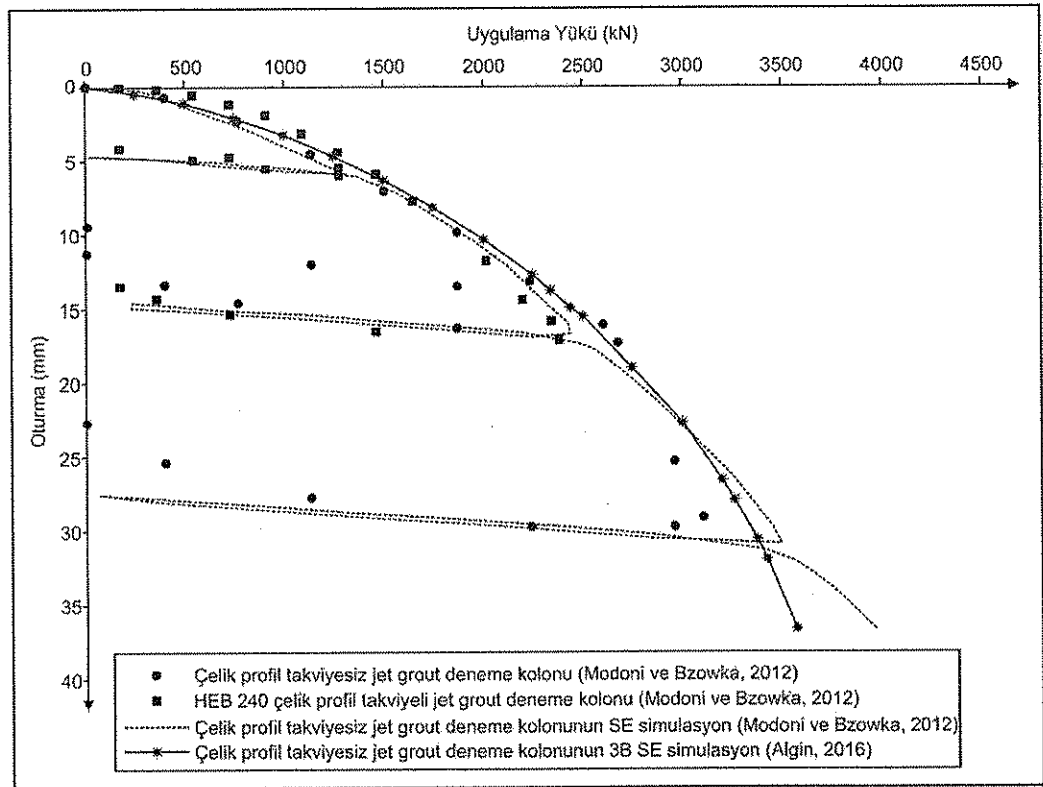
Çizelge 2.1. 3B SE analizlerinde Algın (2016 ve 2017) tarafından kullanılan ve Modoni ve Bzowka (2012) tarafından kabul edilmiş davranış parametreleri ve değerleri

Malzame	γ (kN/m^3)	$E_{50\%}$ (MPa)	E_{ur} (MPa)	ν	$\phi'(^{\circ})$	$c'(kPa)$	$\psi(^{\circ})$
Zemin (Model: HS)	18.4 ^(a) 19.2 ^(b)	Şekil 2.3(b)	$3 \times E_{50}$	0.2	Şekil 2.3(a)	0	Şekil 2.3(a)
JGK (Model: MC)	25	3200		0.19	0	4000	0
Radye (Model: LE)	25	33000		0.2			
Yastık tabakası (Model: HS)	24	40	$3 \times E_{50}$	0.2	37	0	7

(^a) su seviyesi üzerinde (^b) su seviyesi altında

Jet grout kolon-zemin ara yüzündeki hacimsel tetrahedral elementlerin maksimum kenar boyutları 0.15 m olarak ayarlanmıştır. Ara yüz temas kısımları Şekil 2.5.(d) ve 6(d)'de gösterildiği gibi jet grout kolon ile zemin katmanları arasında tanımlanmıştır. Özellikle ara yüz sürtünme katsayısının kalibrasyonunda bazı mühendislik kararları gerekmektedir. Çeşitli denemelerden sonra sürtünme katsayısının 0.7 olduğu varsayımı ile zemin-jet grout kolon ara yüz davranışı

kullanılarak çeşitli denemelerden sonra modele klasik izotrop coulomb sürtünme modeli uygulanmıştır. 0.7 olarak dikkate alınan zemin-jet grout kolon ara yüz sürtünme katsayısı 28 derecelik ara yüz sürtünme açısına eşittir. Şekil 2.6.'de, çelik takviyesiz (Modoni ve Bzowka (2012); Bzówka (2009); Bzówka ve Pieczyrak (2008)) Bojszowy Nowe arazi deneme jet grout kolonunun yük-oturma davranışı görülmektedir. Uygun sınır şartları ile birlikte zeminin başlangıç gerilme durumu oluşturulduktan sonra istenilen alanda jet grout kolon aktif edilmiştir. Çizelge 2.1. ve Şekil 2.3.'de gösterilen parametreler Modoni ve Bzowka (2012) tarafından bildirilen çelik profil takviyesiz jet grout kolon üzerinde yerinde yapılan eksenel yükleme testinin yaklaşık sonuçlarını tekrar elde etmek amacıyla Algin (2016 ve 2017) tarafından kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Bojszowy Nowe arazi denemesi jet grout kolonu için deneysel ve teorik sonuçlar

Jet grout kolon modellerinin (Şekil 2.5.) 3B model simülasyonu için elde edilen yük-oturma tepkisi Şekil 2.7.'de sunulmuştur. Şekil 2.7. aynı zamanda Şekil 2.1.(b)'de kesikli çizgi ile gösterilen teorik huni formülü şekil fonksiyonunun varsayımı ile beraber oluşturulan sonlu eleman simülasyonunu ve Modoni ve

Bzowka (2012) tarafından raporlanan iki adet jet grout kolon yükleme test sonucunu (çelik profil takviyeli ve takviyesiz) göstermiştir. Şekil 2.7., çelik profil takviyesiz jet grout kolonları için elde edilen test sonuçlarının Modoni ve Bzowka (2012) modeliyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu iki sonlu elemanlar simülasyonundan elde edilen sonuçlar, yaklaşık olarak 2500 kN yük seviyesinde ayrılmaya başlamış ve ayrılma durumu testin sonuna kadar artmıştır. Şekil 2.7., jet grout kolonunun varsayılan geometrisiyle oluşturulan sonlu eleman modelinin özellikle yüksek uygulama yükleri için (yaklaşık 2000 kN'dan fazla) test sonuçlarına daha iyi yaklaşım göstermektedir. Bu durum jet grout kolonunun yerel çap değişimlerinin daha iyi dikkate alındığını gösteren jet grout kolonunun varsayılan geometrisine dayanan sonlu eleman modeli ile birlikte bu test sonuçlarının Algin (2016) tarafından 3B SE modellemesiyle daha iyi temsil edildiğini işaret etmektedir.

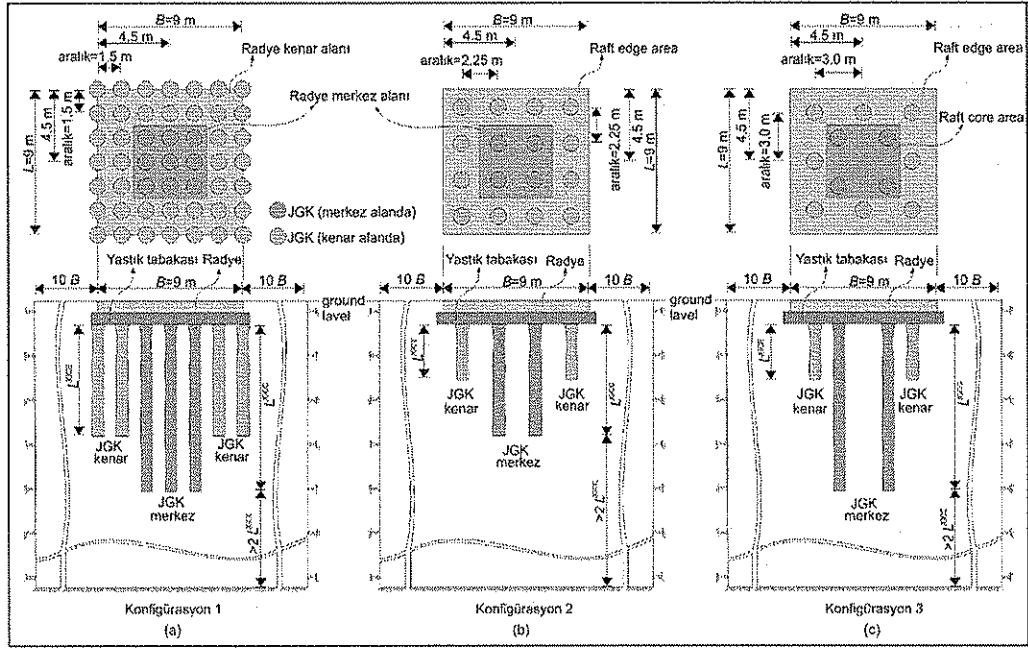
2.2. Jet Grout Kolon Grupları İle Desteklenmiş Temel Sistemlerinin 3B SE

Analizi

Tüm jet grout kolonlu radye sistemini içeren nümerik analiz Algin (2016) tarafından Şekil 2.8.'de gösterilen 3 konfigürasyon düşünülerek gerçekleştirilmiştir. Jet grout kolonlu radyelerin temel elemanları olan kolon, yastık tabakası, radye ve zemin arasındaki etkileşimler, ortalama, diferansiyel oturmaların, eğilme momentlerinin düşey gerilmelerin tasarım tepkileri üzerinde, kolon aralıkları, kolon uzunlukları ve yastık tabakası kalınlığı gibi tasarım faktörlerinin etkilerini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.8.'de gösterildiği üzere, 9 m kenar uzunluğu ve 0.5 m kalınlığıyla bir kare jet grout kolonlu radyenin jet grout kolonlar üzerine oturduğu varsayılmıştır. Rijit elemanlı uzun binaların asansör boşlukları ve merdivenleri radyenin merkezinde, kolonların ise cepheyi desteklemek amacıyla kenarlarda yer almasından dolayı radye tasarımında genellikle bir radye merkez alanı tanımlanır ve bu alan toplam radye alanının %25'i olarak belirlenmiştir (Reul ve Randolph, 2004). Radyenin geriye kalan kısmı ise kenar alanı olarak adlandırılmıştır. Bu tanımlanan merkez ve kenar alanları Şekil 2.8.'de gösterilmiştir. 500 kPa'lık üniform dağılımlı

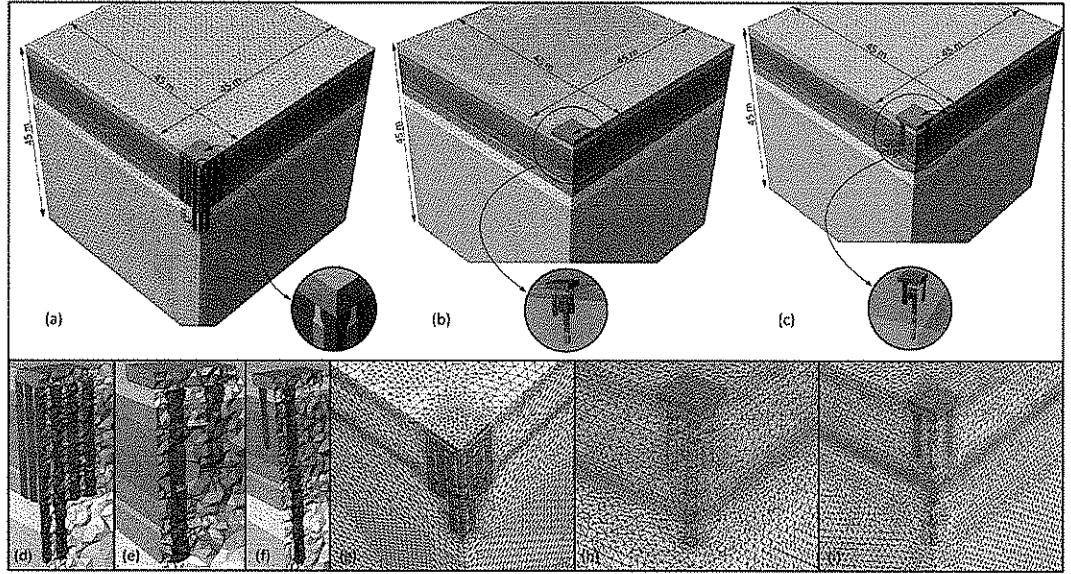
yük radyenin merkez ve kenar alanlarına uygulanmıştır. Bununla beraber Algın (2016) tarafından yapılan bu çalışmada, modellenen jet grout kolonlu radye sisteminin radye-zemin rijitliğinden dolayı merkez alan altında nispeten daha yüksek bir deformasyon beklendiğinden, merkez alan altındaki jet grout kolon uzunlukları kenar alan altındaki jet grout kolonlarına eşit veya daha uzun alınmıştır. Jet grout kolonlar bu sistemlerde tüm yükü taşımaktan ziyade oturmayı kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Buna bağlı olarak jet grout kolonların sonuç maksimum gerilmeleri kenar ve merkez alanları altındaki kolonlardan ayrı ayrı elde edilmiştir. Amsterdam arazi denemesi jet grout kolon 4'ün varsayılan geometrik çeşitliliğine sahip Şekil 2.1.(c-e)'de gösterilen 5 m, 10 m, 15 m uzunluğundaki jet grout kolonlar Şekil 2.8.'da gösterilen tüm biçimlerde göz önüne alınmıştır. jet grout kolon aralığı merkez ve kenar alanları için sabit olarak belirlenmiş ve konfigürasyon sırasıyla 1,2,3 'te 1.5 m, 2.25 m ve 3 m olarak çeşitlendirilmiştir. Şekil 2.9.'da önceden tek bir jet grout kolon simülasyonu (Şekil 2.3.) için kullanılan aynı zemin profili aynı görüntü işleme tekniği kullanılarak her konfigürasyon için tetrahedral hacimsel meshli tipik 3B sonlu eleman modelini göstermektedir. Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi hesap kolaylığı için sistem çeyreğe indirgenerek modellenmiştir. Bu ilgili geometrik alan ve eleman iyileştirmeleri daha geniş bir alanın görünür şekilde sonuç tepkilerini değiştirmedeğini göstermek için deneme hesaplama metodu temelinde belirlenmiştir ve alan sınırları etrafındaki eleman boyutları daha geniş olabilecekken yüksek gerilme veya yer değiştirme değişim alanlarındaki eleman boyutları mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Bu deneme hesapları taban sınırlarının sabitlenmiş olarak belirlenmesi ve sınırların düşünülen en uzun jet grout kolon uzunluğunun 3 katından daha yüksek olan 45 m'de belirlenmesi gerektiğini göstermiştir. Yanal çevre sınırları olarak sınır 45 m olarak belirlenmiş ve yatay hareket sınırlanırken düşey olarak serbest bırakılmıştır. Bu model boyutları kazıklı radye tasarımında sunulan birçok 3B sonlu eleman modeline uyumlu olmaktadır.



Şekil 2.8. Algın (2016) tarafından yapılan Jet grout kolonlu radye temel sisteminin parametrik çalışmasında ele alınan konfigürasyonlar

Zemin ve jet grout kolon için model parametreleri Algın (2016)'nın çalışmasında Modoni ve Bzowka (2012)'den alınmış olup, Çizelge 2.1. ve Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Jet grout kolonu için Mohr-Coulomb elasto plastik davranış uygun görülmüştür. Radyenin mekanik davranışı lineer elastik kabul edilmiştir. Algın (2016)'da yastık elastik modülü kompozit kazıklı radye üzerinde yapılan önceki bir çalışmadan elde edilmiştir (Sharma ve ark., 2014). Zemin jet grout kolonu bağlantı ara yüzü, zemin ve yapının göreceli yer değiştirmesine izin vermek için oluşturulmuştur ve daha önce gösterilen jet grout kolonu simülasyonundaki aynı ara yüz parametreleri kullanılmıştır. Çizelge 2.1. ve Şekil 2.3.'de gösterilen esas parametreler Modoni ve Bzowka (2012)'nin güçlendirilmemiş jet grout kolonu üzerinde yaptığı yerinde eksenel yük testinin geriye dönük analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Jet grout destekli radyelerde sayısal sonuçların doğrulanması önemli bir adımdır. Bu yüzden sayısal modelin sonlu elemanlar analiz sonuçları dikkatlice incelenmiştir. Sonuç olarak görüntü işleme aşamasında jet grout kolonu-zemin ara yüzü etrafındaki tetrahedral elementlerin maksimum köşe boyutu, 170 mm piksel aralığı kullanılarak ayarlanmış ve jet grout kolonuyla zemin tabakaları arasındaki bağlantı ara yüzü Şekil 2.5.(d)' de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Elasto-plastik sonlu elemanlar hesaplamalarında başlangıç gerilme durumu zemin yerçekimi yükü,

zemin basıncı katsayısı kullanılarak oluşturulmuştur (Jaky'nin formülü) ve sonra alt alanlar dikkate alınarak mesh alt gruplarına sistem elementlerinin özellikleri tanımlanmış ve sonuç olarak radye üzerine düzgün yayılı bir yük uygulanmıştır. Kazıksız sınır taşıma kapasitesi Bowles tarafından önerilen taşıma kapasitesi ve şekil faktörleri dikkate alınarak 480 MN olarak hesaplanmıştır (Bowles, 2001).



Şekil 2.9. Algin (2016) tarafından geliştirilen 3B SE modelleri

Reul ve Randolph (2004), kazıklı radye temel tasarımı için 3 sınır şartı tanımlamıştır. Bu sınırlar jet grout destekli radye tasarımına Algin (2016) tarafından aşağıdaki gibi uyarlanmıştır.

$$s_{ra}^{JG} \leq \zeta_{asr} s_{ra} \quad (2.1)$$

$$\Delta s_r^{JG} \leq \zeta_{\Delta sr} \Delta s_r \quad (2.2)$$

$$m_{r(max)}^{JG} \leq \zeta_{mr} m_{r(max)} \quad (2.3)$$

Kazıksız radye için üniform yük altındaki ortalama oturma (s_{ra}) ve jet grout destekli radye için ortalama oturma (s_{ra}^{JG}), Reul ve Randolph (2004) tarafından aşağıdaki gibi önerilen, Davis ve Taylor (1964)'in sayısal yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

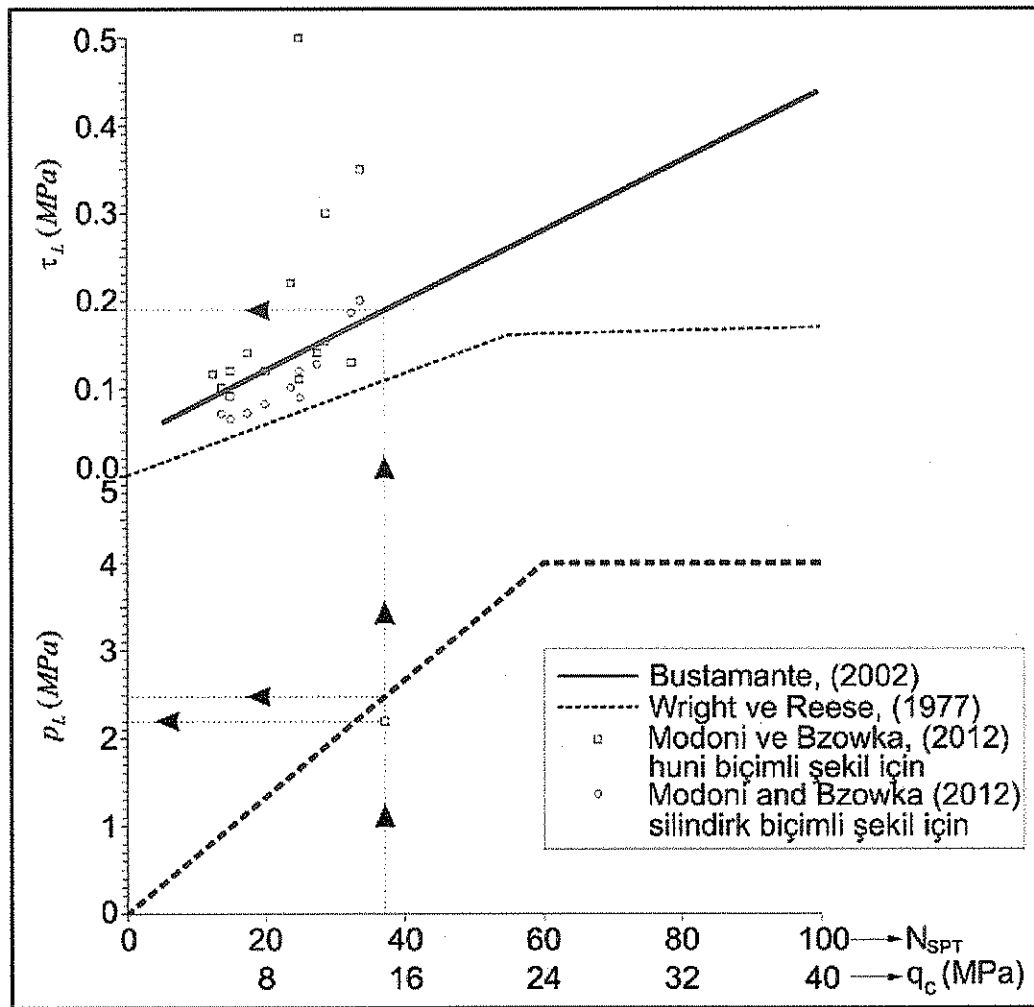
$$S_{ortalama} \approx \frac{1}{3}(2S_{merkez} + S_{kış}) \quad (2.4)$$

ζ_{asr} , $\zeta_{\Delta sr}$ ve ζ_{mr} katsayıları jet grout destekli radyenin performansını gösterdiğinden 1'den küçük olmaları beklenir, aksi takdirde kazıksız radyenin jet grout kolonlarıyla güçlendirilmesine gerek olmayacaktır (Algın, 2016).

Reul ve Randolph (2004) kazıklı radyelerde bazı sistem konfigürasyonlarının farklı oturmalar ve eğilme momentleri için verimi kazıksız radyelere oranla arttırdığını hesaplamıştır. Böylece genellikle 1'den küçük olmaları beklenen bu katsayıların jet grout destekli radye tasarımında 1'den küçük olup olmadıkları kontrol edilmelidir. Bazı yerel standartlar ve uygulamalar kazıklı radyelerde bu katsayıları nicel olarak belirlemek için sınır kriterleri sağlamıştır (Cunha ve Poulos, 2001). Gözlemsel olan bu katsayılar jet grout destekli radyeler için tam olarak hesaplanamamıştır. Algın (2016 ve 2017) çalışmalarında bu katsayıların 1'den küçük olduğu yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım jet grout destekli radye tasarımında boyutsuz parametreler olan s_{ra}^{JG}/s_{ra} , $\Delta s_r^{JG}/\Delta s_r$ ve $m_{r(max)}^{JG}/m_{r(max)}$ için kullanılmıştır.

Genelde bir temelin limit şartları yapabileceği maksimum oturma değeriyle tanımlanır. Bu durumlar için en kritik oluşumda fazlaca oturma görüldüğünde tamamen göçme gerçekleşmeden sınır koşulları tanımlamak anlamsızdır. Bazı araştırmacılar (Berezentzev, 1965; Wright ve Reese, 1977) jet grout destekli radye için maksimum oturma limitinin jet grout ana çapının % 5'i olduğunu ifade etmişlerdir (Modoni ve Bzowka, 2012). Bu varsayım jet grout destekli radyenin tasarımında Algın (2016) tarafından uygun görülmüştür. Ayrıca, limit değer Eurocode 7'de temel genişliğinin %0.5'i olarak ifade edilmiştir (BS-EN-1994-1, 2004). Bu iki yaklaşım için karşılaştırma yapıp en küçük değer Algın (2016 ve 2017) tarafından önerilmiştir. Böylece 0.045 m'lik limit oturma değeri Şekil 2.8.'da gösterilen jet grout destekli radye için sınır oturma değeri olarak öngörülmüştür. Bu varsayım Şekil 2.1.(c-e) de gösterilen Modoni ve Bzowka (2012) tarafından tanımlanmış jet grout kolonunun sınır oturma değeri ile de uyumludur.

Genellikle diferansiyel oturma için kazıklı radyelerde maksimum oturma ile dikdörtgen radyenin genişliğine oranı kullanılır. Bu oran 0.001'den küçük olmalıdır (Reul ve Randolph, 2004). Şekil 2.8.'de gösterilen jet grout destekli radye için 0.009 m diferansiyel oturma sınırı olarak ön görülmüştür. Jet grout kolon tasarım sınırları için Modoni ve Bzowka (2012) kazık ucu limit düşey gerilme sonuçlarının (p_L) Wright ve Reese (1977)'in Şekil 2.10.'daki eğrisi ile uyumlu olduğunu bildirmiştir.



Şekil 2.10. Tasarım sınırlaması olarak kabul edilen, kolon uç taşıma kapasitesi (p_L) ve nihai düşey gerilme (τ_L)

Ayrıca Şekil 2.10., jet grout kolon yanal yüzeylerinde oluşabilecek maksimum limit düşey gerilme değerinin de (τ_L) Bustamante (2002) ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu yüzden bu çalışmada τ_L 'yi elde etmek için Modoni ve Bzowka

(2012) tarafından belirlenen ortalama CPT direnci dikkate alınarak Bustamante (2002) eğrisi kullanılmıştır. Oklarla belirtilen çizgiler τ_L ve p_L değerlerinin Bustamante (2002) ve Wright ve Reese (1977) eğrilerine göre nasıl okunacağını göstermektedir. Algin (2012)'nin çalışmasında τ_L değeri 0,189 MPa olarak alınmıştır. p_L değeri ise Wright ve Reese (1977) eğrisine uyum sağlayan daha önce Modoni ve Bzowka (2012)'nin tanımladığı şekliyle 2.2 MPa olarak alınmıştır (Şekil 2.10.)

Genellikle jet groutlu materyalin dayanımı tek eksenli basınç dayanımı (q_u) olarak tanımlanır ve jet groutun çekme dayanımı jet grout uygulamalarında genellikle ihmal edilir (Croce ve ark., 2014). Modoni ve Bzowka (2012) farklı deneme numuneleri için sekant young modülü ($E_{50\%}$) ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermiştir (Croce ve Flora, 1998; Croce ve ark., 1994; Mongiovì ve ark., 1991).

$$E_{50\%} = \beta_E q_u \quad (2.5)$$

Geçerli veriler $200 < \beta_E < 700$ (Croce ve ark., 2014) sınırını desteklemektedir ve Modoni ve Bzowka (2012)'nin jet grout kolon analizinde $\beta_E = 400$ oranı $E_{50\%}$ ve q_u arasında tanımlanmıştır. Bu yüzden tek eksenli basınç dayanımı değeri Çizelge 2.2.'de jet grout kolonlu radye tasarımında gösterildiği gibi 8 MPa olarak kabul edilmiştir. Jet grout kolonunun sınır eksenel yük değeri aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanmıştır (Modoni ve Bzowka, 2012).

$$S_{lim} = \sigma_c a_c + \sigma_f a_f \quad (2.6)$$

Bu varsayım kolonun güçlendirilmesinin olabilirliğini ve $S = S_{lim}$ sınırının tüm kolon-zemin sistemini yıkmayacağını gösterir, çünkü yükler yıkılmış parça üzerinde konumlanan kolonun kenarlarına aktarılabilir. Jet grout kolonun homojen ve τ_L 'nin Algin (2016)'da gösterilen jet grout kolonlu radye tasarımındaki gibi kabul edildiği durumda, jet grout materyalinin tek eksenli basınç dayanımıyla birlikte jet grout

kolonunun genel bölümündeki sınır eksenel gerilme değeri güvenli bir tasarım için tercih edilir. Bu kabul, eğer jet grout kolon güçlendirilmemişse genel bölümdeki eksenel stresin jet grout kolonunun basınç dayanımını aşmaması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, maksimum eksenel gerilme, jet grout kolonlu radye tasarımında bir tasarım parametresi olarak kabul edilir ve genellikle jet grout kolonunun üst bölümünde oluşmaktadır.

Gösterilen $p_L=2.2$ MPa, $\tau_L=0.189$ MPa, $q_u=8$ MPa parametreleri Eurocode 7 (BS-EN-1994-1, 2004)'de bulunan 1.3 güvenlik faktörüne bölünerek p_{L_d} , τ_{L_d} , σ_{e_d} tasarım parametreleri elde edilmiştir. Jet grout kolonlu radye tasarımında kısmi güvenlik faktörü katsayısı, Modoni ve Bzowka (2012)'nin detaylı deney sonuçlarıyla belirttiği Croce ve ark., (2014) tarafından önerilen 1.5 katsayısından daha küçük olarak kabul edilebilir. Bu faktörün önerilen değerleri, bazı standartlarda bulunabilir (JJGA, 2005; DIN-4093, 2012).

Temellerin optimize edilmiş tasarımına ulaşmak için maliyet en önemli tasarım parametresidir. Basitçe, temel inşa maliyetlerinin genellikle toplam kazık uzunluğu ile orantılı olduğu varsayılır. Merkez ve kenar alanlardaki (Şekil 2.8.) yastık kalınlığı, kolon aralık ve jet grout kolon boyları bağımsız değişken parametreler olarak düşünüldüğünden, jet grout kolonlu radye sistemleri için tasarım açısından detaylı maliyet analizi gerekmektedir. Çizelge 2.2.'de Aşgın (2016) çalışmasındaki tasarım elemanlarının birim maliyetleri özetlemektedir. Sunulan bu maliyetler sadece akademik bir amaç için kullanıldığından, saha durumları yapı ve proje yerine göre değişebileceği unutulmamalıdır. Göz önüne alınan tasarım konfigürasyonlarında sabit bir kalınlık alındığından radye maliyeti analizde hariç tutulmuştur.

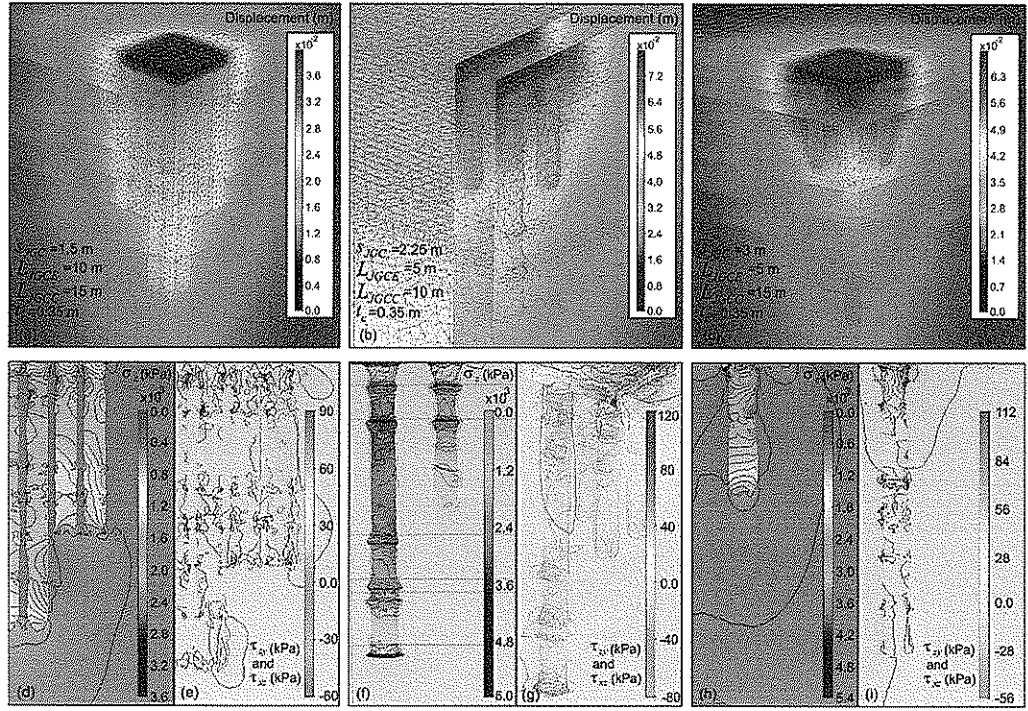
Çizelge 2.2. 3B SE analiz sonuçlarının optimizasyonunda Algın (2016 ve 2017) tarafından kullanılan birim fiyatlar

	Birim	Yaklaşık Fiyat ⁺
JGC ⁺⁺	USD(\$)/m	68.56 ^a
Reinforced JGC ⁺⁺	USD(\$)/m	88.56 ^b
Cushion ⁺⁺	USD(\$)/m ³	5.676 ^c
Radye	Hariç	
(a) JGK imalat + çimento		
(b) JGK imalat + çimento + $\phi 60$ çelik takviye		
(c) Silindirlenmiş granüler malzeme		
(*) Birim fiyatlar T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015 Birim Fiyat listesinden alınmıştır (http://www.birimfiyat.net/)		
(++) Malzeme kod numaraları: Y.16.072/06, Y.16.050/06, Y.23.015, Y.15.140/03		

Merkez ve kenar alanlardaki jet grout kolon uzunlukları, yastık tabaka kalınlığı ve jet grout kolon aralığının bağımsız tasarım değişkenleri arasındaki ilişki, 3B sonlu eleman analizleriyle elde edilmiştir. Şekil 2.11.'de Algın (2016) tarafından yapılan sonlu eleman analizinden elde edilen bazı sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 2.11.(a-c)'de gösterilen şekil değiştirme alanları yastık katmanlarının jet grout kolonlar üzerinde bile yapısal yüklerin dağılımına izin verdiğini göstermektedir. Bu şekil ayrıca yer değiştirmenin granüler malzeme için genellikle 10-80 MPa aralığında değiştiği varsayılan yastık elastisite modüllerinden önemli derecede etkilendiğini göstermektedir. Jet grout kolon düşey gerilme, 0.5 m kalınlıklı alt elemanlar üzerinde yapılmıştır. Şekil 2.11.(d-f-h)'daki bu düşey gerilme artışları jet grout kolondaki düşey gerilmenin (birim kenar kesme dağılımı) jet grout kolonların orta kısmına yakın yerlerde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 2.11.(d-i) ayrıca jet grout kolonların kısmen yatay yüzeyden gelen, kısmen kolonların temelinden gelen yapısal yükü çevredeki zemine ilettiğini göstermektedir. Bu şekiller jet grout kolonlu radyelerin çalışma mekanizmalarının geleneksel kazıklı temellerinkine benzer olduğunu göstermektedir. Bununla beraber geleneksel kazığın aksine kolonun bazı kısımlarındaki gerilme yoğunluğu jet grout kolonun düzensiz çap çeşitliliğinden

dolayı oluşmaktadır. Jet grout kolonların farklı ara yüz şekil ve güçlü özellikleri nedeniyle jet grout kolonlu radye temel sistemleri kompozit bir temel olarak düşünülmelidir. Jet grout kolonlu radyenin taşıyıcı elemanları, her bir eleman için tanımlanan bireysel tasarım sınırlamalarının yanısıra, tüm tasarım sınırlamalarına da uyum sağlamalıdır. Jet grout kolondaki maksimum eksenel gerilmenin basınç dayanımını aşması durumunda merkez ve kenar alanlardaki jet grout kolonlar için çelik profil takviyesi göz önüne alınmıştır. Çelik takviye için gerekli kesit alanı Denklem 6 kullanılarak hesaplanmıştır. Algın (2016) tarafından öngörülen tüm durumlar için 60 mm çaplı çelik profilin yeterli olduğu görülmüştür.

Şekil 2.12., jet grout kolon uzunluğunun 5 m ve yastık kalınlığının 0.8 m olduğu durum için, merkez alanlardaki jet grout kolon uzunlukları ve jet grout kolon aralığının değişimi ile ilgili olarak, merkez ve kenar alanlardaki jet grout kolonlarda oluşan düşey gerilme, tabandaki düşey gerilme ve eksenel gerilmenin elde edilen maksimum değerlerini göstermektedir. Merkez alan altında sunulan gerilme değerleri sırasıyla 1.5 m, 2.25 m ve 3 m aralıklara denk gelen 1,2 ve 3 konfigürasyonları için kenar alanı altındaki gerilme değerlerinden daha yüksektir. Eksenel gerilme üzerinde jet grout kolonun artan boyutunun etkisi jet grout kolonunun daha yüksek değerleri için daha fazladır. Merkez alan altındaki en büyük gerilme kombinasyon 3'te elde edilmiştir (Şekil 2.12.). Şekil 2.12.(b) jet grout kolondaki artışın kenar alan için tabandaki düşey gerilmede genel artış eğilimine sebep olduğunu gösterirken aynı zamanda bu artış merkez alan altındaki jet grout kolonlarında asıl yüzeyinden transfer edilen yüksek yüklerden dolayı, merkez alan için tabandaki düşey gerilmelerde bir azalış olarak sonuçlanmaktadır. Ortak bir gözlem ile, fazla yükler jet grout kolonların yanal yüzeylerinden çevresine transfer edilmiştir. Şekil 2.12.(c) jet grout kolonların yanal yüzeylerindeki artıştan dolayı jet grout kolondaki artışın kenar ve merkez alanları için, gövdedeki düşey gerilmede genel bir azalış eğilimine sebep olduğunu göstermektedir. Bu azalma merkez alanı altındaki jet grout kolonlar için daha yüksektir ve merkez alandaki gövdede oluşan en yüksek düşey gerilme kombinasyon 3'te elde edilmiştir.

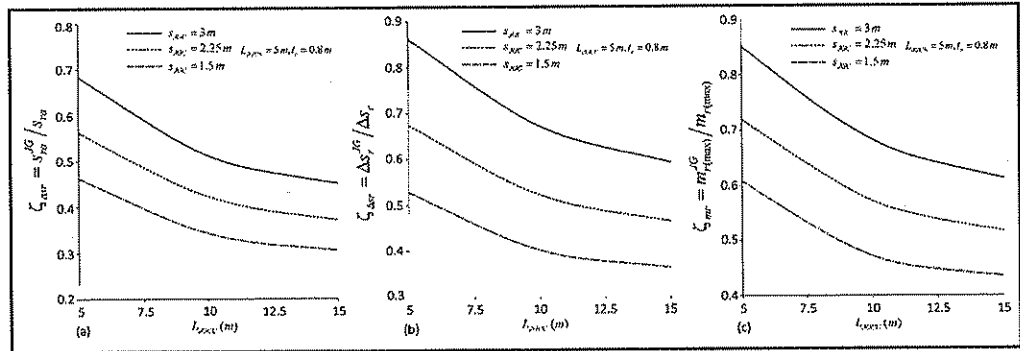


Şekil 2.11. 3B SE analiz sonuçları (Algm, 2016)

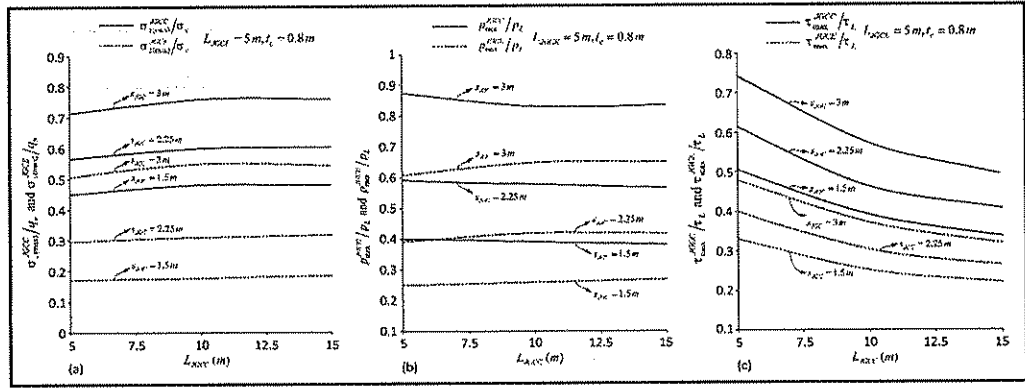
Şekil 2.13.'de gösterilen ζ_{asr} , ζ_{dsr} ve ζ_{mr} tasarım katsayıları sırasıyla ortalama oturma değerlerindeki azalmayı, diferansiyel oturmayı ve jet grout kolonların oluşturulmasından sonra radyenin maksimum eğilme momentini göstermektedir. Şekil 2.13., jet grout kolon yüksekliğinin 5 m olması durumunda ve yastık tabaka kalınlığının 0.8 m olması durumunda, merkez alanlardaki kolon aralık ve jet grout kolon uzunluğu değişimi ile bu katsayılar arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ortalama oturma, diferansiyel oturma ve radyenin maksimum oturma değerlerindeki en büyük azalış kombinasyon 1'de elde edilmiştir, bu katsayılar, jet grout kolon aralığındaki artışla büyümektedir. Şekil 2.13. jet grout kolonların yanal yüzey alan artışı sebebiyle jet grout kolonundaki artışın ortalama oturma, diferansiyel oturma ve radyenin maksimum momentinde genel bir azalış eğilimine sebep olduğunu göstermiş olup, en yüksek artış diferansiyel oturma için gözlemlenmiştir.

Şekil 2.14., merkez ve kenar alanlardaki, yatak tabaka kalınlığı ve jet grout kolon uzunluklarının değişimi ile ilgili kenar alan altındaki jet grout kolonlarda oluşan eksenel gerilmelerin maksimum değerlerini ve ζ_{asr} , ζ_{dsr} katsayılarını göstermektedir. Şekil 2.14.(a) radyenin ortalama oturmasındaki en yüksek azalışın

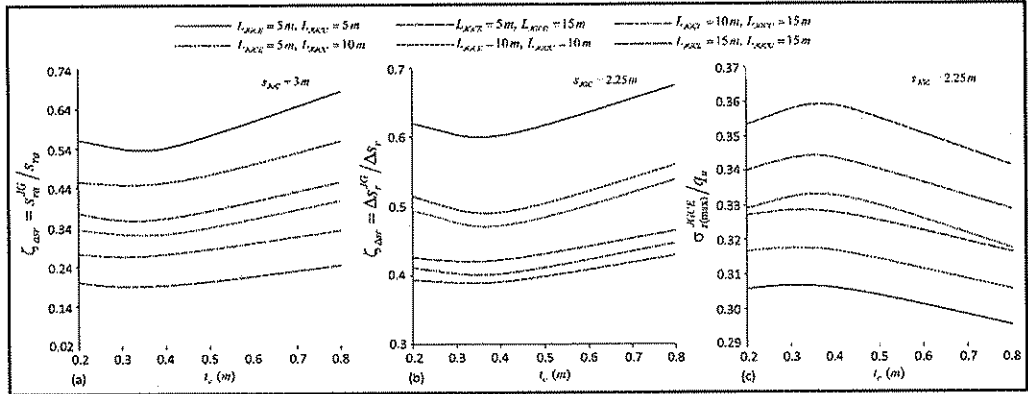
merkez ve kenar alanlarının 15 m altındaki jet grout kolon boyu için elde edildiğini göstermektedir ve jet grout kolon boyundaki azalışla birlikte ζ_{asr} katsayısı büyümektedir. ζ_{asr} 'deki küçük bir azalış genellikle yastık tabakası kalınlığının 0.35 m'ye çıkması halinde gözlemlenmiştir. Fakat yastık tabakası kalınlığındaki artışla birlikte bu durum artmaya başlamıştır. Şekil 2.14.(b) radyenin oturmasındaki en büyük azalışların jet grout kolon uzunluğunun 15 m olması halinde görüldüğünü göstermektedir. Şekil 2.14. en yüksek eksenel gerilmenin merkez ve kenar alanlarının altında 15 m jet grout kolon boyları için elde edildiğini ve yastık tabakasının yaklaşık 0,35 m'ye artışı ile birlikte eksenel gerilmede bir büyüme eğilimi ortaya çıktığını ve sonrasında kalınlıktaki artışla birlikte genel bir azalış eğilimi başladığını göstermiştir. Algın (2016) tarafından elde edilen sonuçların 3B değişimleri Şekil 2.15.'de sunulmuştur. Jet grout kolon aralığının ve uzunluklarının maliyet üzerine etkisi ise Şekil 2.16.'da verilmiştir.



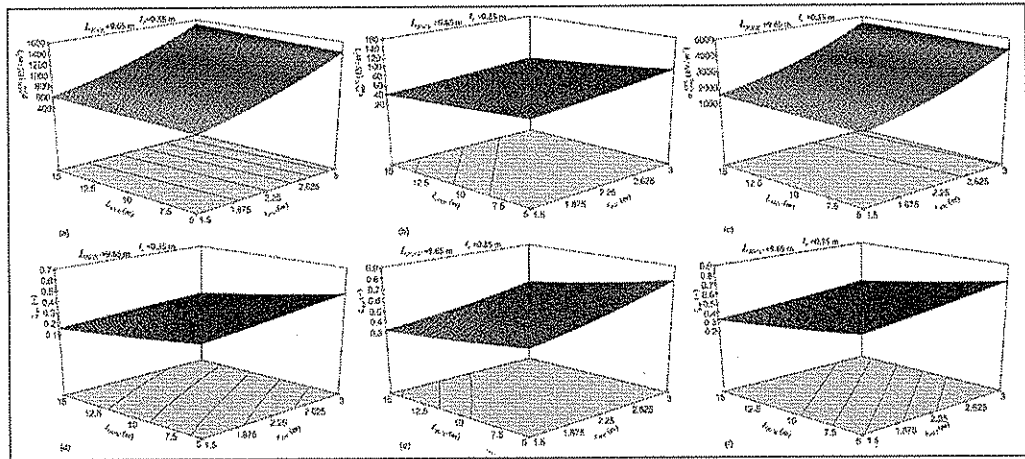
Şekil 2.12. 3B SE analiz sonuçlarına bağlı olarak Algın, (2016) tarafından belirlenmiş jet grout kolon uzunluklarının, eksenel gerilmenin maksimum değerleri, tabandaki düşey gerilme ve merkez ve kenar bölgelerdeki JGC'lerinin şaftı üzerindeki dikey gerilmeye etkisi



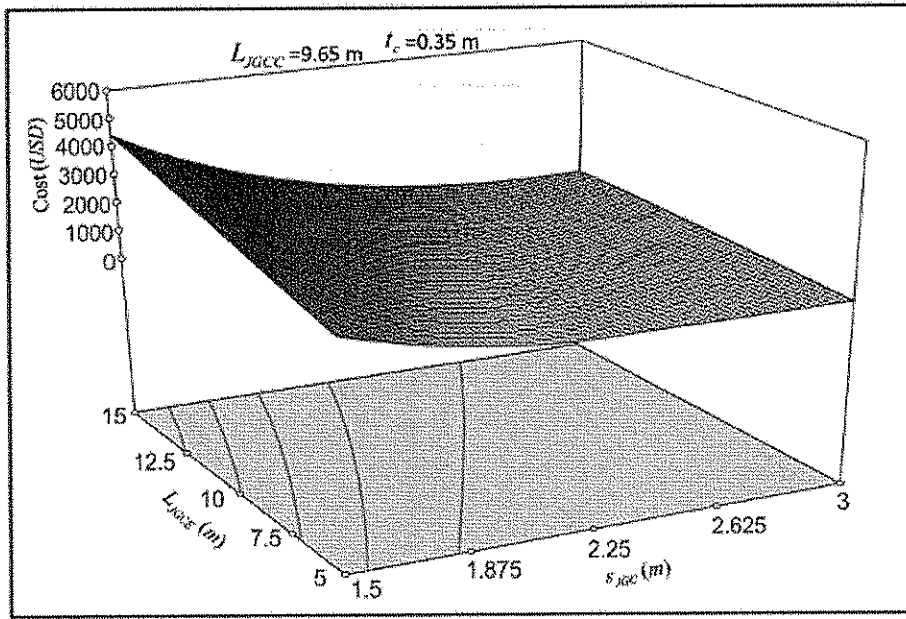
Şekil 2.13. 3B SE analiz sonuçlarına bağlı olarak Algın, (2016) tarafından belirlenmiş, jet grout kolon uzunluklarının radye tasarım katsayılarına olan etkisi



Şekil 2.14. 3B SE analiz sonuçlarına bağlı olarak Algın, (2016) tarafından belirlenmiş, radye tasarım katsayılarına yastık tabaka kalınlığının etkisi.



Şekil 2.15. Tasarım faktörleri ile tasarım parametreleri arasındaki bazı ilişkiler (Algın, 2016).



Şekil 2.16. Jet grout kolon aralığının ve uzunluklarının maliyet üzerine etkisi.

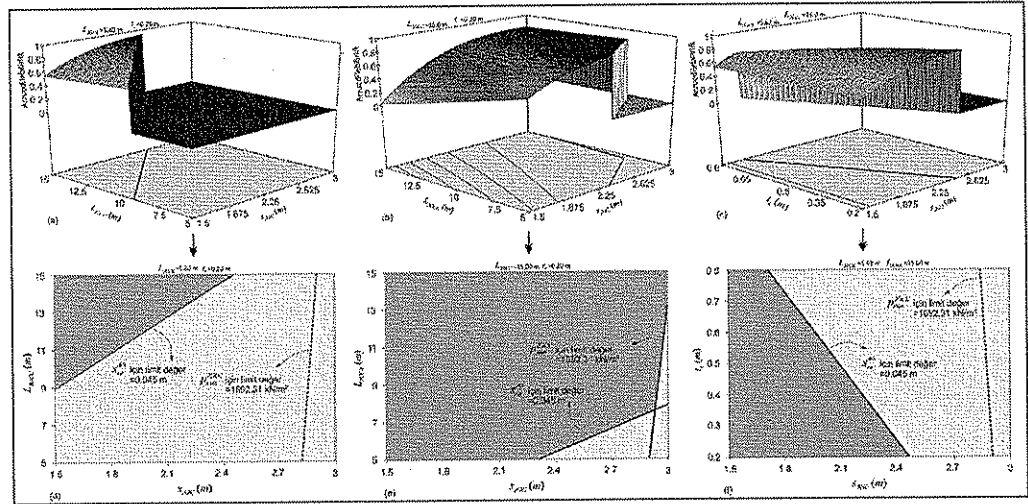
Algın (2016) tarafından tepki yüzey metodu kullanılarak optimizasyon analizi yapılmıştır. Çizelge 2.3., bu optimizasyon analizinden elde edilen ilk 18 optimum çözümü ve Şekil 2.17., bu optimizasyon analizinden elde edilen arzu edilebilirlik fonksiyonunun varyasyonunu göstermektedir. Çizelge 2.3.'te verilen optimum çözümler tanımlanan üst ve alt limitleri sağlayan niteliktedir ve 0.9292 ile 0.9113 arasında değişen yüksek arzu edilebilirlik değerlerini gösterir. Şekil 2.17.(a) ile 2.17.(c), Çizelge 2.3.'de verilen birinci çözüm için tasarım faktörleri açısından değişen 3B arzu edilebilirlik fonksiyonunu göstermektedir. Şekil 2.17.(d-f) faktörleri gösteren eksenlerdeki istenilen yüzey tasarımı olan 2B'li kesişim çizimlerini göstermektedir. Şekil 2.17.(d) ile 2.17.(f) aynı zamanda tasarım optimizasyonunda olası optimum çözümlerin mevcut olduğunu gösteren arzu edilebilirlik yüzeyini etkileyen sınırlama, üst ve alt limit değerlerini de içerir. Şekil 2.17.(d-f)'deki 2B'li kesişimin çizimleri radyenin ortalama oturması (0,045 m) için kısıtlamaların ve merkez alan altındaki jet grout kolonlarının temelindeki maksimum düşey gerilmelerin optimize edilmiş çözümlerde daha dominant ve önemli olduğunu göstermektedir. Bu şekiller ayrıca, ortalama oturma kısıtlamasının ağırlıklı olarak s_{JGC} , L_{JGC} ve t_c 'nin optimizasyonlarını etkilediğini, buna karşılık p_{max}^{JGCC} 'nın kısıtının çoğunlukla L_{JGC} 'nin optimizasyonlarını etkilediğini göstermektedir. $s_{JGC} =$

2.49 m, $L_{JGCE} = 5.9$ m, $L_{JGCC} = 14.8$ m ve $t_c = 0.2$ m tasarım faktörleri için 0.9292 arzu edilebilirlik (uygun maliyet 7500.82 USD) ile tasarım değişkenine sahip en ekonomik çözüm elde edilmiştir. Bu durumda, yaklaşık olarak eşit jet grout kolon uzunluklarının pratik amaçla kullanılması kararlaştırıldıysa tasarım faktörleri $s_{JGC} = 2.66$ m, $L_{JGCE} = 9.8$ m, $L_{JGCC} = 9.95$ m ve $t_c = 0.2$ m olmakla birlikte, arzu edilebilirlik oranı 0.9113'tür (karşılık gelen maliyet 8331.56 USD'dir) ve elde edilen en yüksek arzu edilebilirlik düzeyinden biraz daha azdır.

Çizelge 2.3. 3B SE analiz verileri üzerinde yapılan tepki yüzey metodu optimizasyon sonuçları

Çözümler	Faktörler*				Tepkiler*															Fiyat	Arzu edilebilirlik
	s_{JGC}	L_{JGCE}	L_{JGCC}	t_c	ρ_{max}^{JGCE}	ρ_{max}^{JGCC}	τ_{max}^{JGCE}	τ_{max}^{JGCC}	σ_{max}^{JGCE}	σ_{max}^{JGCC}	σ_{max}^{JGCE}	σ_{max}^{JGCC}	σ_{max}^{JGCE}	σ_{max}^{JGCC}	σ_{max}^{JGCE}	σ_{max}^{JGCC}	σ_{max}^{JGCE}	σ_{max}^{JGCC}			
	2.49	5.90	14.8	0.20	1103.25	1363.02	42.82	65.03	3141.61	5421.19	0.045	0.0049	140.28	0.30818	0.4586	0.5233	7500.82	0.9292			
	2.47	5.79	15.0	0.22	1089.47	1350.03	42.77	65.01	3100.53	5383.73	0.045	0.0049	139.35	0.30504	0.4511	0.5198	7553.53	0.9280			
	2.45	6.52	13.5	0.20	1070.07	1332.99	42.99	65.09	3029.67	5326.94	0.045	0.0050	140.47	0.31183	0.4697	0.5240	7811.85	0.9225			
	2.59	7.06	13.6	0.20	1169.68	1430.51	43.09	65.18	3372.33	5589.96	0.045	0.0052	141.10	0.31105	0.4892	0.5264	7812.84	0.9225			
	2.50	6.20	15.0	0.28	1109.51	1371.90	42.79	65.01	3181.82	5433.07	0.045	0.0049	137.70	0.30078	0.4522	0.5137	7814.48	0.9224			
	2.54	7.32	12.9	0.20	1136.93	1400.07	43.17	65.19	3260.11	5501.75	0.045	0.0053	141.11	0.31240	0.4929	0.5264	7901.33	0.9206			
	2.53	7.59	12.5	0.20	1127.68	1392.10	43.25	65.23	3229.01	5475.37	0.045	0.0053	141.21	0.31302	0.4989	0.5268	7989.69	0.9187			
	2.57	7.83	12.3	0.20	1153.62	1417.79	43.29	65.26	3318.84	5542.60	0.045	0.0054	141.42	0.31278	0.5067	0.5276	8015.24	0.9181			
	2.45	6.73	13.8	0.20	1078.40	1334.53	42.09	65.66	3056.39	5356.26	0.044	0.0050	138.03	0.30479	0.4653	0.5149	8063.34	0.9171			
	2.59	8.10	12.1	0.20	1170.37	1434.72	43.36	65.29	3377.36	5584.95	0.045	0.0055	141.62	0.31263	0.5147	0.5283	8064.47	0.9171			
	2.62	8.41	11.8	0.20	1188.04	1452.67	43.44	65.34	3439.38	5629.16	0.045	0.0056	141.83	0.31234	0.5241	0.5291	8124.30	0.9158			
	2.59	8.78	11.0	0.20	1167.71	1434.51	43.54	65.37	3370.18	5573.79	0.045	0.0057	141.94	0.31227	0.5323	0.5295	8202.18	0.9141			
	2.64	9.05	10.9	0.20	1205.26	1469.38	43.59	65.42	3494.09	5664.77	0.045	0.0058	142.20	0.31143	0.5422	0.5305	8233.03	0.9134			
	2.45	7.98	11.4	0.20	1071.16	1338.74	43.37	65.25	3036.86	5320.77	0.045	0.0054	141.19	0.31420	0.5046	0.5267	8275.36	0.9125			
	2.62	9.56	10.0	0.20	1183.73	1452.56	43.74	65.47	3478.17	5610.98	0.045	0.0059	142.39	0.31028	0.5555	0.5312	8313.45	0.9117			
	2.65	9.78	10.0	0.20	1206.04	1474.33	43.77	65.49	3505.96	5668.06	0.045	0.0060	142.54	0.30968	0.5609	0.5317	8319.55	0.9116			
	2.64	9.70	9.95	0.20	1199.39	1467.99	43.77	65.49	3482.91	5650.87	0.045	0.0060	142.51	0.30972	0.5605	0.5317	8321.25	0.9115			
	2.66	9.80	9.95	0.20	1218.66	1486.70	43.79	65.51	3550.17	5700.00	0.045	0.0060	142.63	0.30923	0.5648	0.5321	8331.56	0.9113			
(*) Birimler: kN, m ve Fiyat USD(\$)																					

(*) Birimler: KN, m ve Fiyat USD(\$)



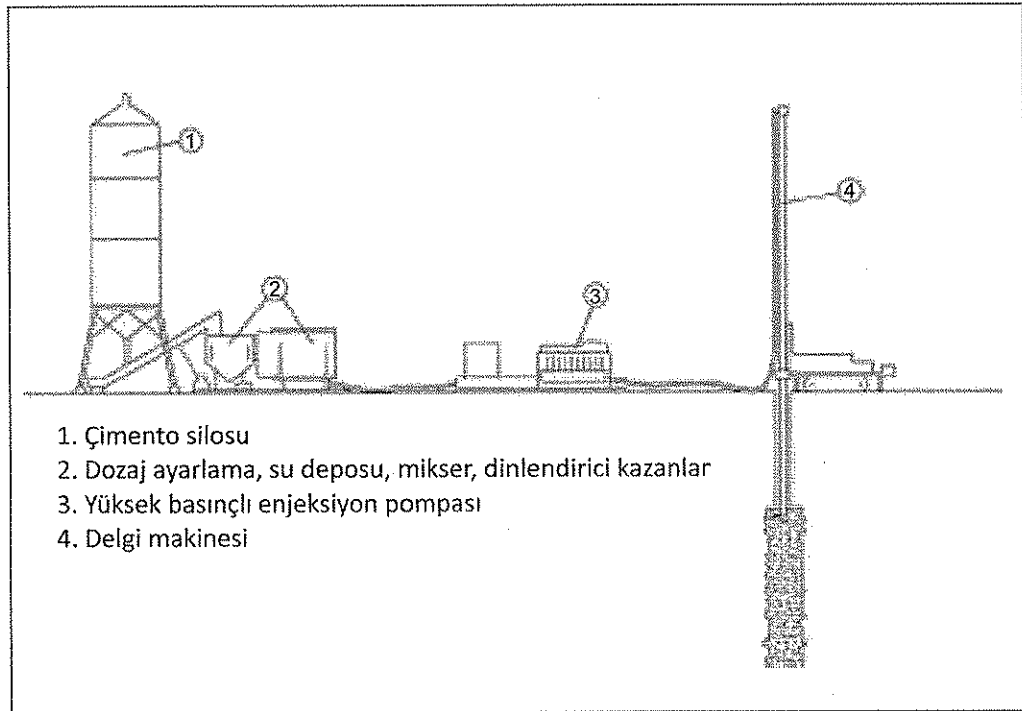
Şekil 2.17. Arzu edilebilirlik fonksiyonunun jet grout kolon aralığına bağlı değişim (a) merkez alandaki kolon uzunluğu (b) kenar alanındaki kolon uzunluğu (c) yastık tabakası kalınlığı ve örtüşme eksenlerinde ana sınırlayıcı tasarım parametreleri (Algın, 2016).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Jet grouting ekipmanları

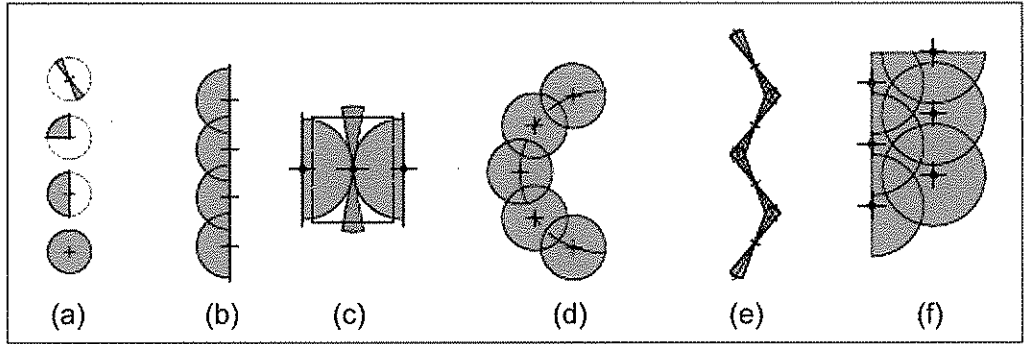
Jet grouting ekipmanlarının uygulama sahasında kurulması, klasik enjeksiyon yöntemine göre bir miktar farklılık göstermektedir. Jet grouting ekipmanları olarak, karışım, yüksek kapasiteli pompa, delgi ve enjeksiyon kısımları şeklinde özetlenebilir. Şekil 3.1.'de tipik bir tek akışkanlı sistem için jet grout imalatında gerekli olan ekipmanların tüm ana kısımları görülmektedir.



Şekil 3.1. Jet grout ekipmanları

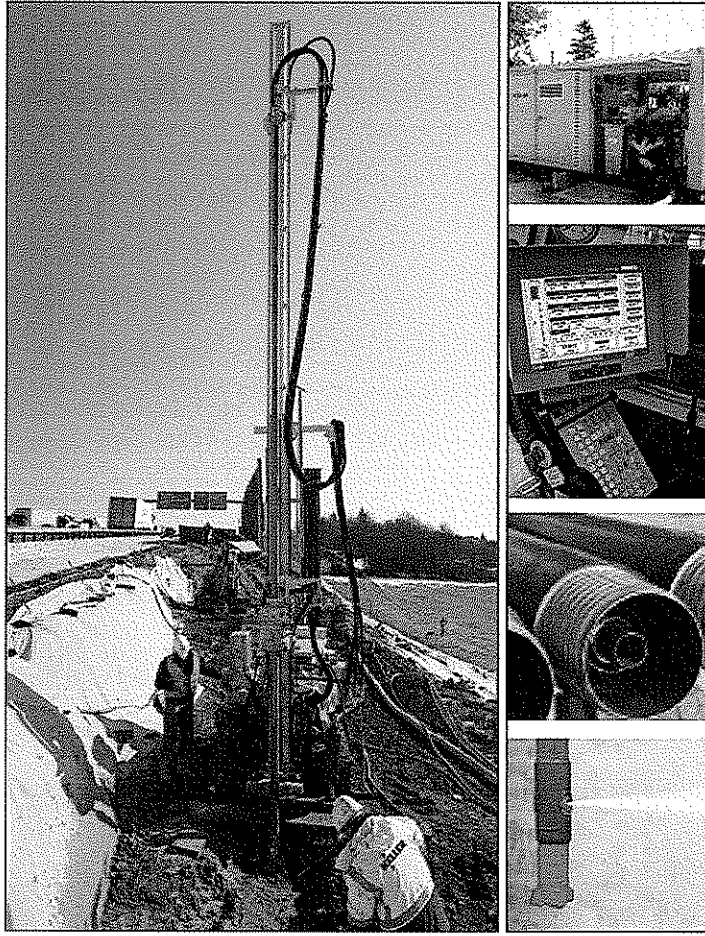
Kullanılan delgi yeraltı zeminine ve mevcut koşullara uygun olarak çalışabilmeli, tıjın dönmesini ve ilerlemesini sağlayan bağlantı halatlarını da otomatik olarak ayarlayabilmelidir. Her bir işlemdeki etkili yarıçap, oradaki zemin

özelliklerine ve uygulama değişkenliğine (dönme ve geri çekme hızları, uygulanan basınçlar) bağlıdır. Delgi noktaları birbirine bağlı veya ayrı olarak seçilebilir. Delgi için müsaade edilebilir düşeyden sapma uzunluğu, delgi boyunun %2'si kadardır. Delgide kullanılan tijlerin çapı 90 mm veya daha geniş çaplıdır. Bazı deliciler, dönme ve geri çekme hızları kontrol edilerek çok çeşitli geometrilerde (daire, daire yayı, yarım daire, panel) imalat yapma imkanı vardır (Şekil 3.2.).



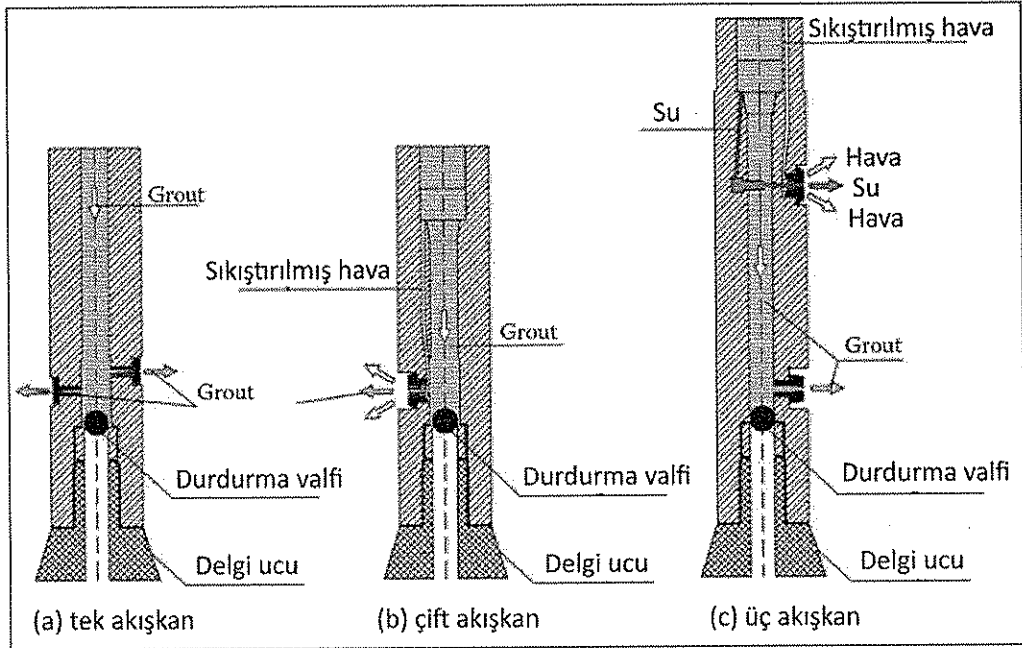
Şekil 3.2. Delici makinesinin dönme ve hız ayarları farklılaştırılarak elde edilebilen geometrilerden örnekler

Ekonomik sebeplerden dolayı delginin istenilen derinliğe kadar tek seferde yapılması tercih edilmektedir. Bu sebeple de uzun delgi direklerinin kullanılması gerekmektedir. Tek aşamada delgi yapılması, ayrıca düşeyden sapmayı da azaltmaktadır. Seçilen sisteme bağlı olarak iletim borusu yada boruları da tijin içinden geçen aynı eksenli bir, iki yada üç hattan oluşmakta olup, boyları delgi direği ile uyumlu olacak şekilde ayarlanır. Delginin yönü ve eğimi, malzemenin pompaj hızının yanı sıra dönme, ilerleme ve geri çekme hızları kontrol edilir. Bu amaç için kullanılan tipik bir delgi makinesi Şekil 3.3.'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Tipik bir jet grout delgi makinesi

Jet grout uygulamasında kullanılan delginin ucunda kullanılan ve üzerinde püskürtme ağızların bulunduğu kısımlar monitör (bit sapı) ve matkap (rock bit) Şekil 3.3.'de görülmektedir. Yüksek hızlı akışkan jeti, zemini aşındırmak ve grout ile karıştırmak amacı ile kullanılır.



Şekil 3.4. Monitörlerin şematik görünüşleri

Üç akışkanlı sistem kullanıldığında, yerinde karıştırma daha fazla olmakta, tek ve iki akışkanlı sistemlere göre daha fazla zeminde yer değiştirme meydana gelmektedir. Jet grout yönteminde en önemli adımı olan püskürtme işlemini gerçekleştiren monitördür. Jet grout makinesinde delici gövdenin sonunda, delici ucun hemen üzerinde, bulunan ve üzerinde püskürtme deliklerinin bulunduğu kısma monitör denilmektedir. Püskürtme ağzlarının sayısı, seçilen jet grout sistemine bağlı olup, bunlar tek, iki veya üç akışkanlı sistemlerdir. Her akışkan jeti için ki bunlar hava, su, grout dır, bir veya daha fazla püskürtücü ağız bulunur ve bunlar jetin tije dik olarak püskürtülmesini sağlamaktadır. Püskürtülen jetin hızı seçilen püskürtme ağızı çapına bağlı olup, bu kısım uygulanan basınç ile birlikte aşındırma enerjisini belirler. Bu üç farklı akışkanlı sistemlerde kullanılan monitörlerin şematik gösterimi Şekil 3.4.'de görülmektedir. Bu sistemlerde monitör yüksekliği, yer değiştirme ve yerinde karıştırma miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Yüksek oranda yerinde karıştırmanın istendiği uygulamalarda monitör yüksekliği azaltılabilir.

Killi zeminlerde yerinde karıştırmadan ziyade yer değiştirme daha çok tercih edilir. Monitör yüksekliğinin fazla olması durumunda aşağıda kalan grout daha hafif olan ayrılmış zemini yüzeye itmektedir. Püskürtme ağzlarının çapları 1.5- 6 mm.

arasında değişmektedir. Aşındırıcı akışkarın basıncı genelde 20-70 Mpa arasında değişmekte olup, jet basıncı zeminin özelliklerine bağlıdır. Jet grout elemanının çapının artırılması için en sağlıklı yaklaşım, püskürtme ağzı çapı, basınç, verilen grout hacmi ve geri çekme hızı olarak sıralaralanan parametrelerde artış yapmaktır. Basınçların dikkatli takibi ile püskürtücü ağızlarda oluşabilecek tıkanmalar kontrol edilir.

Hazırlanan grout yüksek basınç altında, delgi ve enjeksiyon için kullanılan makineye aktarılır. Jet grouting yönteminde kullanılan pompa sistemi yaklaşık 300-500 hp arasında bir güce sahip olup, bu pompalar klasik enjeksiyonda kullanılanlardan çok daha güçlüdür. Jet grout yönteminde kullanılan pompalar (özellikle üç akışkanlı sistemde) depoludur ve böylece tüm parametreler (hava, su ve enjeksiyon) kontrol edilip gözlemlenebilir. Bu pompalar 500 lt/dak'ya kadar pompalama yapabilmekte ve basınçlar 100 MPa'a kadar arttırılabilmektedir.

3.1.2. İyileştirilmiş zeminin bazı özellikleri

Jet grout kolonunun özellikleri enjeksiyon karışımına, kolonda kullanılan çimento miktarına ve uygulanan jet grout sistemine bağlıdır. Zeminin sıklığına, kıvamına, monitörün devir sayısına, çekme hızına, grout basıncına v.s. bağlıdır. Kumlarda 0.6-2 m arasında kolon çaplarına değişkenlerin uygun kullanılmasıyla ulaşılabilir. Monitörü döndürmeden sadece düşey yönde hareket ettirerek kalınlığı 2-12 cm arasında değişen bir perde duvar, 4-6 m yükseklikte oluşturulabilir (Şekil 3.2.(e)). Jet grout kolonlarından alınan numunelerde yapılan permeabilite deneyleri sonucunda permeabilitenin önemli bir miktarda azaltıldığı anlaşılmaktadır.

Jet grout işleminde mevcut zeminin bir kısmı enjekte edilen çimento bulamacı ile karıştığından sonuçta elde edilen karışımın dayanımı genel olarak bu zeminin özelliklerine de bağlıdır. Basınç dayanımı, kolonlardan alınan karot numuneler üzerinde laboratuvarda yapılan serbest basınç mukavemet deneyi ile doğrudan

belirlenir. Su/çimento oranının 0.8-1 arasında olduğu durumlarda genelde dayanım yüksek olarak belirlenmektedir. Organik zeminlerde m³ başına kullanılan çimento miktarı 450 kg'dan 600-700 kg'a yükseltilebileceği ifade edilmektedir. Bunun en önemli sebebi organik zeminler içersinde bulunan ve çimentonun bağlayıcı etkilerini azaltan asiti nötralize etmek olduğu ifade edilmiştir. Kil zeminlerde çakıldan daha fazla çimento gerekmede fakat elde edilen dayanım daha az olmaktadır. Jet grout uygulamalarında oluşturulan elemanların mekanik özelliklerini bilmek büyük önem taşımaktadır. Zira bu özellikler tasarım modellerinin davranışını yansıttığından analizler açısından son derece önemli olduğundan imalat sırasında kolonda kırılma olmadan malzemenin kesintisiz bir akım ile yüzeye ulaşması sağlanmalıdır.

Temel takviyesi uygulamalarında jet grout kolonlardan alınan numunelerin serbest basınç mukavemeti değerinin genelde en az 10 MPa olması uygun olmaktadır. Bu değerlere organik zeminler hariç, her tür zemin durumunda ulaşılabilir. Pratik uygulamalarda jet grout yöntemi ile 1.5 m kalınlığa kadar olan bir ara organik zemin tabakası jet grout ile yer değiştirebilir. Temel takviyesi uygulamalarında organik zemin tabakasının kalınlığı 1.5 m'yi geçiyor ise bu durumda kazık temel uygulamasına geçilebileceği ifade edilmektedir. Jet grout uygulanmış kohezyonsuz zeminlerde malzeme dayanımındaki artış, çimento harçlarının dayanım artışına benzediği ifade edilmektedir. Kohezyonlu zeminlerdeki dayanım artışının daha az ve yavaş oluşunun sebepleri ise, boşluk suyunun bir miktarının uzaklaşamaması, su jetinden çıkan suyun bir miktarının ortamda kalması ve groutun içerdiği suyun fazlasının ortamda kalması olarak ifade edilmektedir. Oluşan grout zemin karışımının dayanımı karışım oranına bağlıdır. Kohezyonsuz zeminlerde, grout karışım oranı ile dayanımın doğrusal ilişkilendirilmektedir. Maliyetin uygun düzeyde tutulabilmesi açısından kohezyonsuz zeminlerde optimum dayanım sadece zemin boşluklarının enjeksiyon ile doldurulmasıyla elde edildiği ifade edildiğinden bu durumda enjeksiyon oranının %25-30 dolaylarında olduğu belirtilmiştir.

Yüzeye çıkan artık malzemenin gözlenmesi, jet akım hızının kontrolü, karışımın kalitesi ve kolon geometrisinin kontrolü açısından önemli olduğu belirtilmektedir. Jet grout imalatında kalite parametrelerinden birisi elemanın homojen olmasıdır. Bu ise zeminin homojenliğinden, zeminin tabakalanma durumundan ve uygulanan jet grout imalatı tipinden etkilenir. Örneğin, geri çekme hızında bir ayarlama yapılmadan kumlu çakıl tabakadan silt tabakaya geçilmesi durumunda, kolon çapında ani bir düşüşün olduğu gözlenmiştir. Oluşturulan jet grout elemanının homojen olmasını engelleyen bir diğer sebep ise zeminde boyutu 60 mm'yi geçen iri çakıl ve blokların bulunması olarak ifade edilmekte ve kullanılan jetin gücünün bu boyuttaki danelerin arkasındaki malzemeyi kesmeye, karıştırmaya ve aşındırmaya yetmediği ifade edilmektedir.

Jet grout kolonların dayanımının tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı sistemlerin kullanımı ile nasıl değiştiği üzerine yapılan çalışmalar göstermiştir ki, tek, çift ve üç akışkanlı sistemler ile oluşturulan jet grout kolon çapları yaklaşık 0.8 m, 2.0 m ve 2.2 m olduğu, ancak eşit şartlarda imalatlar kıyaslandığında en yüksek dayanımın tek akışkanlı jet sisteminde elde edildiği belirtilmiştir.

Geçirimlilik esasen zeminin cinsine, grout-zemin karışımının özelliklerine ve karışım oranına bağlıdır. Yapılmış olan bazı araştırmalar jet grout kolonların permeabilitesinin 10-8 m/s'den küçük olduğunu göstermiştir. Atık sahaların geçirimsizliğinin sağlanmasında uygulanan çimento bentonit kil karışımlı grout uygulamalarında 10-11-10-9 m/s mertebesinde permeabilite değerlerine ulaşılabilmiştir.

Grout genel olarak zeminlerin geçirimliliğini azaltmak ve kayma mukavemetini arttırmak amacıyla kullanılır. Bu bağlamdaki enjeksiyon teknikleri olarak hydrofracture, sıkılaştırma enjeksiyonu, geçirimsizlik enjeksiyonu ve jet grouting harç püskürtme enjeksiyonları sayılabilir. Hydrofracture enjeksiyonunda çimento esaslı harç zemine yaklaşık 10 kg/cm² bir basınçla nüfuz ettirilerek zemin içinde enjeksiyon mercekleri ve tabakalar oluşturulur ve birbirleri ile bağlantılı

olmayan boşluklar bu sayede doldurulmuş olur. Bu uygulamada az bir miktar zemin sıkışması da sağlanabilir. Hydrofracture enjeksiyonu, genellikle çökelmiş zeminlere uygulanır. Çevre yapılar zarar verme riski büyüktür. Sıkıştırma enjeksiyonunda ise, grout 35 kg/cm² bir basınçla zemine enjekte edilir. Gevşek veya örselenmiş zeminleri sıkıştırmak ve zeminin birim hacim ağırlığını artırmak için kullanılır. Böylece, yoğun, üniform bir kütle oluşturulmuş olur. Hydrofracture enjeksiyonuna göre enjeksiyon yapılan noktadan çok uzağa gitmeyen bir enjeksiyondur. Zemin yüzeyine yakın kısımlarda kabarmalara yol açabilir. Sıkılaştırma enjeksiyonun harcı, çimentolu veya çimentosuz siltli kumdur. Bu harç gevşek zeminleri sıkılaştırmak için başarıyla kullanılmaktadır. Bu enjeksiyonun kullanıldığı başlıca yerler, gevşek dolgular veya gevşek doğal zeminlerin sıkılaştırılması, yapıların kaldırılması, temel pabuçlarının takviye edilmesidir. Geçirimsizlik enjeksiyonu durumunda ise, zeminlerin boşlukları, zeminin hacmi ve yapısı değiştirilmeden doldurulması olarak ifade edilebilir. Bu enjeksiyonda enjeksiyon harcı, zeminin granülometrik değişimine bağlı olarak çeşitlik gösterir, permeabilite katsayısı 10^{-3} cm/sn olan zeminlerde silikat esaslı, 10^{-4} cm/sn olan zeminlerde ise reçine esaslı harçlar kullanılmaktadır. Ayrıca, ince daneli çimento ile oluşturulan süspansiyonlar daha ince zeminlere enjeksiyon yapılmasını mümkün hale getirmektedir.

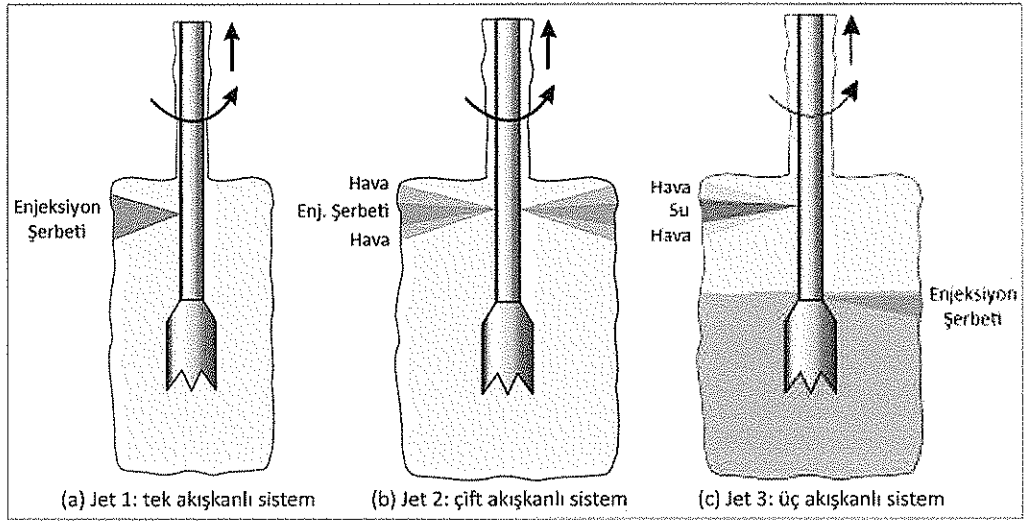
Enjeksiyon harcı türü olarak en basit harç, su içinde çimento süspansiyonudur. Çimento harçları zeminin bağlarının bozulduğu durumda kullanılabileceği gibi, bazı temel altı basınçlı çimento enjeksiyonu ile bir miktar oturmuş temelin kaldırılması mümkün olabilir. Çimento harçları, çimento ağırlığının su ağırlığına oranı olarak karakterize edilmektedir. Bu harçlar önemli ölçüde çökelmeye maruz kalırlar. Bu sebepten ötürü stabil olmayan harç ismini alırlar ve stabil olmayan harçlar sulandırılrsa da kumlara ve çakıllara yapılan enjeksiyonlarda kullanılmamalıdır. Bu durumda, kaba kumlarda ve kumlu çakıllarda kimyasal enjeksiyon kullanılır. Böylece temel altında istenilen düzeye kadar bir kütle blok oluşturulur. Enjeksiyon harçları üç sınıfa ayrılabilir, bunlar; daneli süspansiyonlar (çimento, kil, bentonit, bazen de kum ile hazırlanır, çökelme hızına göre stabil veya stabil olmayan harç olabilirler), kimyasal harçlar denilen solüsyonlar (bunlar Newton sıvıları olup, organik momomerlerden acrylamids, phenoplast, aminoplast kullanılır). Viskoziteleri

suyunkine yakındır ve piriz alıncaya kadar da sabit kalırlar. Bunlara organik reçine de denilmekte olup, yüzlerce çeşidi bulunmaktadır. Köpük enjeksiyonu, gazların emülsifiye edilmesi ile elde edilir ve enjeksiyon harcı olarak kullanılırlar. Bu köpükler kabarma sayısı ile tanımlanırlar ve kabarma sayısı gazın hacminin sıvının hacmine oranı olup, bu sayı zeminin boşluk oranına eşdeğer olarak alınabilir. Zeminin permeabilite katsayısı, zeminin enjeksiyon kabul edip etmeyeceğini anlamak için en iyi gösterge olarak kabul edilir. Kimyasal enjeksiyon harçları taneli olmadığı için kullanılabilmesi zeminin permeabilite katsayısına bağlıdır. Taneli enjeksiyon harçları alt permeabilite sınırları olarak, 5×10^{-4} m/s çimento harcı için, 1×10^{-6} m/s kimyasal harç için verilebilir.

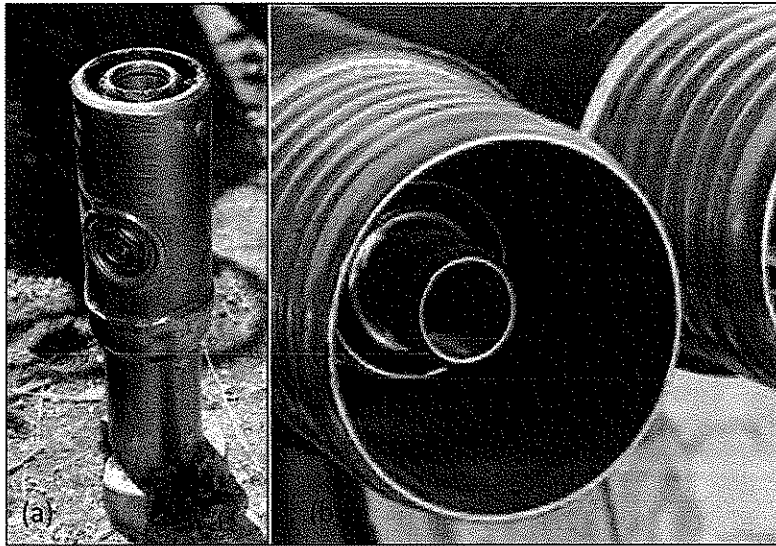
3.2. Yöntem

3.2.1. Jet grout uygulama yöntemleri

Genel uygulamalar göz önünde tutulduğunda, jet grout püskürtme ağızlarının yerleşimi, monitörün tipinde değişiklik ve kullanılan akışkan seçenekleri ile etkili yarıçap üzerinde değişim sağlanabilir. Bu değişik donanımlarla genelde üç farklı sistemde uygulama yapılmaktadır. Bu jet grout türlerinin hangisinin tercih edileceği, uygulama yapılacak zeminin cinsine, imalat sonucunda iyileştirilmiş zeminden beklenen geometrik ve mekanik özelliklere ve çevre koşullarına bağlıdır. Bu jet grout sistemleri, tek akışkanlı, iki akışkanlı ve üç akışkanlı sistemler olarak üzere üç çeşit olup, Şekil 3.5.'de şematik olarak gösterilmişlerdir.



Şekil 3.5. Genelde uygulanan jet grout sistemleri



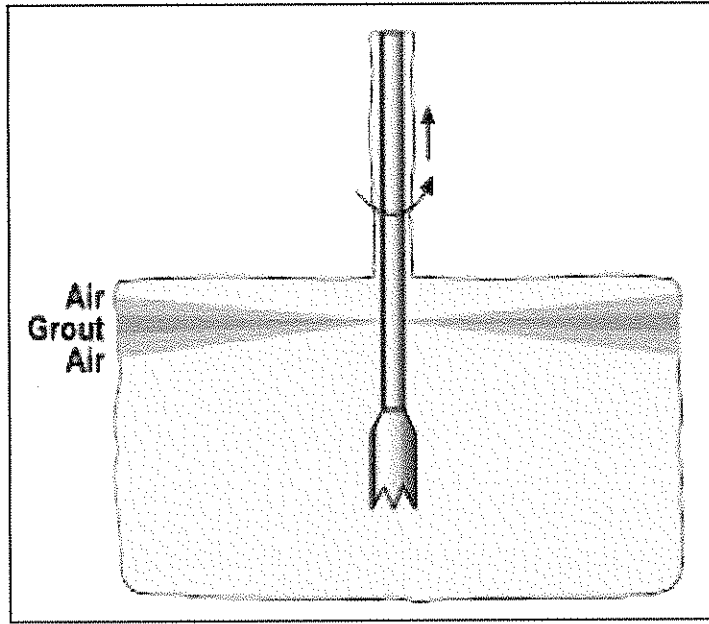
Şekil 3.6. Jet 2 ve Jet 3 sistemlerinde kullanılan ekipmanlardan örnekler

Tek akışkanlı sistem (Şekil 3.5.(a)) en yaygın kullanılan teknik olup, 70'li yılların başında Japonya'da, 70'lerin ortalarında ise İtalya'da kullanılmıştır. Bu sistemde tek akışkan olarak genellikle çimento şerbeti kullanılmakta ve tek bir akışkanın yüksek bir basınçla uygulandığı enjeksiyon işlemidir. Bu yöntemde delgi ve grout tek çeperli bir borudan ibarettir ve enjeksiyon boru dışına yaklaşık 200 m/sn hızla, 300-500 kg/cm² (bar) basınçla püskürtülür. Bu şekilde meydana gelen kolonlar genelde 0.6-1.2 m çapında olup, kolon çapları zemin türü ve uygulanan jet hız ve basıncı gibi parametrelerdeki değişimden önemli bir oranda etkilenmektedir.

İki akışkanlı sistemlerde (Şekil 3.5.(b)), zeminin parçalanması ve enjeksiyonlama için groutın yanında ikinci bir akışkan olarak hava jeti kullanılmaktadır. Enjeksiyon şerbeti orta borudan geçerken basınçlı hava (8-12 bar) ise dış borudan geçer. Bu uygulama sisteminde basınçlı hava kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığından meydana gele kolon çapları jet 1'e kıyasla %60- 80 daha büyük olmaktadır. Bu uygulama sisteminde kolon çapları orta sıkı zeminlerde yaklaşık 1.0 m'den, gevşek zeminlerde ise yaklaşık 1.8 m'den fazla kalınlığa sahip olabilirler. Jet 2 metodu kohezyonlu zeminlerde tek akışkanlı sisteme göre daha etkili sonuçlar vermektedir. Kum içindeki bir uygulamada, Jet 2 sistemiyle kolon oluşturulurken zeminin örselenmesi için 45 MPa basınç uygulanmış, monitör dönme hızı 8-10 devir/dk, harcanan çimento miktarı 930 kg/m, grout çıkış debisi 130 lt/dk, enjeksiyon birim hacim ağırlığı 16-17 kN/m³ değerlerine sahip olduğunda elde edilen ortalama kolon çapının 1.4 m olduğu ifade edilmiştir.

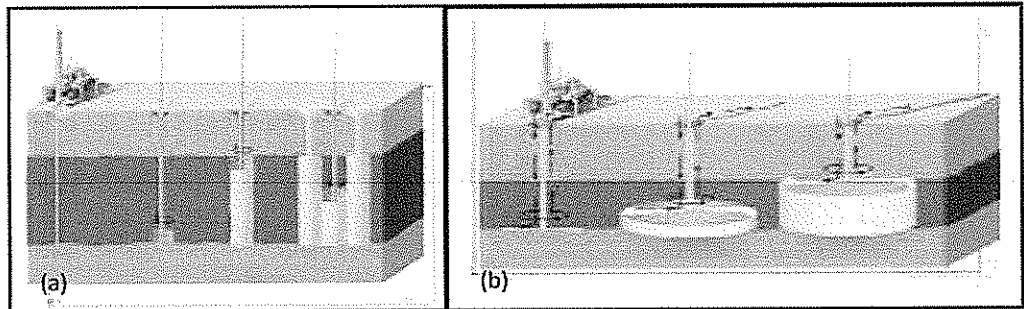
Üç akışkanlı sistemlerde (Şekil 3.5.(c)), zeminin parçalanmasının su jeti ile sağlandığı, enjeksiyonun ise eş zamanlı olarak ayrı bir nozzle ile yapıldığı jet enjeksiyon işlemidir. Şekil 3.6.(b)'de gösterildiği gibi iç içe üç borulu sistem kullanılan bu yöntemde 400-600 bar lık bir basınçlı su uygulaması ortadaki borudan, 8-12 bar basınçlı hava ara kısımdaki borudan geçilerek monitöre iletilmektedir. 30-80 MPa basınçlı enjeksiyon ise en dış borudan ayrı bir nozzleden, su-hava karışımı içine enjekte edilmektedir. Yapılan kolonlar bu yöntemle 2 m'den fazla çapa ulaşabilmektedir. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde oldukça etkilidir.

Son dönemlerde daha büyük jet grout kolon çapına ulaşmak için süper jet olarak adlandırılan bir yöntem de kullanılmaktadır. Bu yöntem ile 3-5 m çaplara kadar ulaşılabilir. Bu jet grout kolon imalatında öncelikli olarak 15 cm çapa sahip delgi istenilen noktaya indirilir ve monitörün üzerindeki nozzlelerden çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak zemin-çimento karışımı kolonlar oluşturulur. Bu yöntem Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Süper jet yöntemi

Şekil 3.8.'de standart yöntemle oluşturulmuş jet grout kolonlar (Şekil 3.8.(a)) ve süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar görülmektedir (Şekil 3.8.(b)). Özel durumlarda, su yerine daha farklı uygun süspansiyonlar veya sıvılar kullanılabilir. Bu jet grout uygulama sisteminde tijlerin dönme ve çekme hızları standart jet grout yöntemindekine göre çok daha düşük olup, işletim parametreleri olarak 3-4 devir/dakika dönüş hızı, 7 mm/dakika çekme hızı, 40 MPa enjeksiyon basıncı ile ortalama 4 m çapa sahip olacak şekilde jet grout kolon üretiminin mümkün olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 3.8. (a) standart yöntemle oluşturulmuş kolonlar, (b) süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar

Jet grout uygulama yönteminde parametreler, zemin özelliklerine, hedeflenen kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve seçilen jet grouting metoduna göre

değişiklik göstermektedir. Jet grout kolonunun imalatına başlanmadan önce farklı işletim parametreleri kullanarak test kolonları yapılır. Zemin yapısına uygun, istenen kolon çapının elde edildiği, kolonda sürekliliğin sağlandığı ve ekonomik olan parametreler tercih edilmektedir. Değişik uygulama parametrelerinin sonuçları farklı oranda etkilendiği görüldüğünden, bu parametrelerin neler olduklarını bilmek önemlidir. Bunlar, enjeksiyon Sistemi, grout uygulama basıncı, nozzle sayısı ve çapı, tij dönme hızı, tijin yukarı çekilme hızı, su/çimento oranı ve pompa kapasitesi olarak sayılabilir. Bu parametrelerin tipik değerleri Çizelge 3.1.'de sunulmuştur. Bu parametrelerdeki değişikliğe bağlı olarak oluşan ortalama kolon çap değerleri değişmektedir. Ülkemizde genellikle jet grout uygulamalarında Jet 1 ve Jet 2 sistemleri kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Jet grout yöntemlerinde kullanılan tipik parametreleri

SİSTEM	ENJEKSİYON TİPİ	BASINÇ	NOZZLE ADEDİ ve ÇAPI	ÇEKME HIZI	DÖNME HIZI	SU / ÇİMENTO ORANI	POMPA KAPASİTESİ
		(bar)	(adet, mm)	(cm/dak)	(rpm)	-	(lt / dak)
JET1	Çimento	400 - 550	1 - 2 x 2 - 5	15 - 100	5 - 15	1,0 - 1,5	70 - 600
JET2	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

Enjeksiyon basıncı sınıflandırılırsa, 200-250 bar aralığı düşük, 300-400 bar aralığı orta ve 400-700 bar aralığı da yüksek basınç olarak tanımlanabilir. Basınç, hedeflenen çapın oluşmasında önemli bir parametredir. Basınç ile jet grout kolonu çapı arasında direk bir bağlantı olduğu ve basıncın artmasıyla kolon ortalama çapının arttığı ifade edilmektedir. Ayrıca, hedeflenen ortalama çapta homojen bir kolon elde etmek için sadece basınç parametresi yeterli bir kriter değildir. Bu zaman faktörü ile

de ilişkilidir. Bazı zemin şartlarında, sadece basıncı arttırmak, çapın artmasını sağlayamayabilir.

Tijlerin dönme işlemi delgi makinesinde bulunan tijlerin belli bir hızla kendi eksenleri etrafında dönmesi olup, zemin ile enjeksiyon malzemesinin homojen olabilmesi amacıyla, takım dönüş hızı belirli bir değerden fazla olmamalı, takım çekme hızı da iyileştirilen zemin bölgede süreklilik sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Dönüş hızı genellikle 10-20 devir/dakika aralığında alınabilir. Ancak, bazı özel durumlarda 30 devir/dakika'ya kadar çıkabilmektedir. Takımı yukarı çekme işlemi, kademeli ve sürekli olmak üzere iki şekilde olabilir. Bu iki ayrı tip yukarı çekme yöntemi, genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlıdır. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli, hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, genelde her kademede 4 cm'lik bir ilerleme ve her kademede 6-10 sn bekleme yapılmaktadır. Yukarı çekme hızı, zemin özelliklerine ve birim hacme iletilen enjeksiyon miktarına bağlıdır. Kohezyonlu zeminlerde, jetin gerekli kesme işlemini ve homojen karışımı sağlayabilmek amacıyla, genellikle daha uzun süre gerektirebilir. Tijin dönme ve yukarı çekme hızı, iyileştirilecek zeminde kullanılan jet grout uygulama yöntemine bağlıdır. İki ve üç akışkanın kullanıldığı jet grout sistemleri daha büyük çaplar hedeflediğinden iyileştirilen zemin hacmi daha büyük olduğundan ötürü daha uzun süreye ihtiyaç duyacaktır.

Genel olarak jet grout kolonları için su/çimento oranı 1 ($w/c = 1$) ve özgül ağırlık $1410-1570 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmaktadır. Bu oran seçilen jet grout uygulama yöntemine ve hedef dayanım değerine göre değişiklik gösterir. Bu oranın su geçirmez perde oluşturulmasında karışıma bentonit katılması durumu hariç 0,7'nin altında bir değer olarak kullanılması uygun görülmemektedir. Genel olarak, 1 m^3 iyileştirilmiş zemin içindeki çimento miktarı $350-700 \text{ kg}$ arasında değişiklik göstermektedir. Yapılan bazı incelemeler göstermiştir ki, su-çimento oranının 1 ve iyileştirilmiş zeminde çimento dozajı ortalama 450 kg/m^3 alınması durumunda, kil, silt, kum ve çakıl zemin çeşitleri için elde edilen ortalama serbest basınç mukavemeti değerleri sırasıyla, 3, 5, 10 ve 14 MPa olarak belirlenmiştir.

Jet grout karışımı içerisine bazı katkıların ilave edildiği durumlarda bulunmakta olup, yüksek debili zemin suyu bulunan durumlarda enjeksiyon şerbetine 1-3 oranında sodyum silikat ilavesi önerilmektedir. Organik içerikli zeminlerde çimento dozajı 450 kg/m^3 'den 700 kg/m^3 '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, yakınında işlem görmemiş zeminin özelliklerini de iyileştirmektedir. Jet grouting yönteminin bu ikinci etkisi sayesinde, iyileştirilmiş zeminin SPT değerleri doğal zemininkine göre % 20-25 civarında daha yükseldiği belirtilmektedir. 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. Bu da Jet 3 metodunun içerdiği çok miktardaki sudan kaynaklanmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez araştırmasının amacı, sığ temellerin jet grout grup kolonları takviyesi sonrası, oluşan karmaşık tasarımı dikkate alacak şekilde, performanslarını görüntü işleme tekniği kullanarak geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar (3D SE) modellemesi ile tespit etmek ve bu tekniğin bu türden karmaşık problemlerin analiz edilmesi için geçerli bir yöntem olduğunu göstermektir. Geoteknik uygulamaları göz önüne alındığında, bu tez çalışması kapsamında yürütülen tasarım senaryosunun ve koşullarının, sığ temeller ile etkilenen bitişik tarihi binalar dahil olmak üzere, jet grout enjeksiyonu temelli takviye sistemlerinde kullanılabileceğini ve kullanılan yöntemlerle gerçekçi olarak modellenebileceğini açıklamaktadır. Bu kapsamda oluşturulan 3D SE modellemesine temel teşkil eden uygulama projesi olarak Armijo (2002) tarafından açıklanan uygulama çalışması baz alınmıştır. Bu uygulamanın aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

Armijo (2002) tarafından açıklandığı üzere, bu uygulama, Morristown, NJ, USA'da, yeni bir banka binasının inşası için mono akışkan sistemi jet enjeksiyonuyla yapılmış bir takviye uygulamasıdır. Mevcut iki katlı binanın yıkılmasından sonra, yeni yapının bodrum katına ulaşmak için gevşek kumlu dolgu malzemesi içersinde bir kazı yapılması gerekliliği doğmuştur. Bu jet enjeksiyonu, hem kazı desteği hem de kalıcı temel oluşturmak için bir takviye sistemi olarak seçilmiş olup, bu takviye sistemi sayesinde bitişik bina oturması en aza indirmektedir. Bu iki bitişik binanın altında yapılmış secant dikey ve eğimli jet grout kolonları bir istinat yapısı mantığıyla oluşturulmuştur. Klasik jet enjeksiyon kontrol yöntemlerinin yanı sıra, jet enjeksiyonu gerçekleştirilirken, tüm sondaj ve enjeksiyon parametreleri "Slogger" adı verilen tescilli bir sistem tarafından kaydedilmiştir. Ayrıca, jet enjeksiyonunun gerçekleştirilmesinden sonra, kayıt sisteminin uygulanması ile yenilikçi bir kontrol tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, üretilen kolonlardan bazıları yeniden delinmiş ve elde edilen sondaj parametreleri ile aynı yaş test sütunları için elde edilenler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Sözü edilen mevcut koşullar altında ve geleneksel temel teknikleriyle karşılaştırıldığında, bu proje, uygun yönetim ve sonuç kontrolü ile jet

enjeksiyonunun hızlı olabileceğini ve takviye sisteminin bina yapısal istikrarını koruyabildiğini ve aynı zamanda mevcut bina oturumlarını en aza indirgeyen bir sistem olabileceğini göstermiştir.

First Morris Bank and Trust Company'nin yeni bir şubesi olarak, 2000 yılında NJ, USA, Morristown'da inşa edilmiş olan bina için Moretrench and Geocisa firmaları beraber çalışmışlardır. Bu işin hizmet alımı kısmını alt yüklenici V. A. Spatz & Sons, Berkeley Heights, NJ yapmıştır. Yeni bina, North Park Palace ve Washington caddelerinin kesiştiği yerde 24 North Park Place adresinde bulunmaktadır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Yeni yapılmış binanın genel görünümü, First Morris Bank, Trust Company, NJ, Morristown, USA (Armijo, 2002)

Bu bina, yaklaşık 186 m² oturum alanını kapsayan tam bir bodrum katına haiz, üç katlı bir yapı olup, maksimum kolon yükü 136 ton olarak belirlenmiştir. Tanımlanan binanın inşası için, bodrum katının mevcut iki katlı yapısının yıkılmasından sonra, yüzeyden 1.05-2.30 m derinlikte yeni bir bodrum katına ulaşmak için bir kazı yapılması gerekmiş olup, bu kotun bitişik 3 katlı binaların temelinden 0.90-2.15 m derinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.2.). Bu kazı, değişken

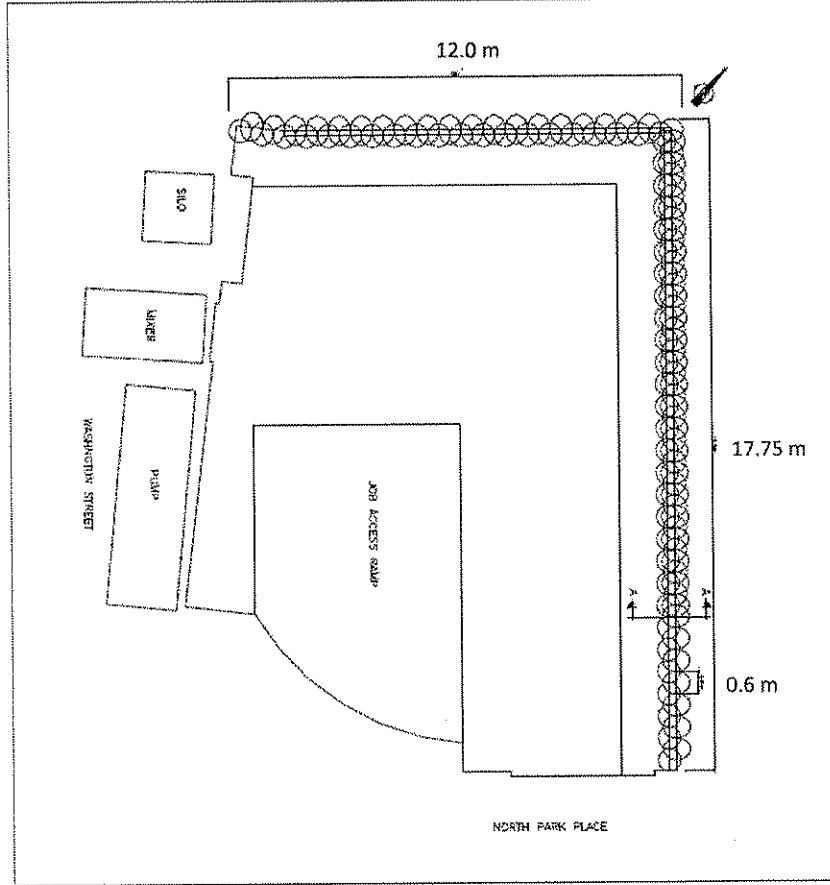
ama genellikle az miktarda gevşek bir dolgu malzemesini takiben çakıl ve silt içeren ince-iri daneli kumdan oluşmuştur. Bu tabaka, mevcut bodrum katının tabanından, kırılmış ve yıpranmış şist ana kayanın üstü arasında 1.85 ila 3.65 m arasında değişen bir kalınlığa sahiptir. Mevcut şartlar nedeniyle, geleneksel tekniklerle (kazı takviyesi, mini kazık vb.) karşılaştırıldığında, jet grout enjeksiyonu bu metotlardan daha hızlı olduğundan bu takviye metodu kalıcı destek amaçlı kullanılmıştır.



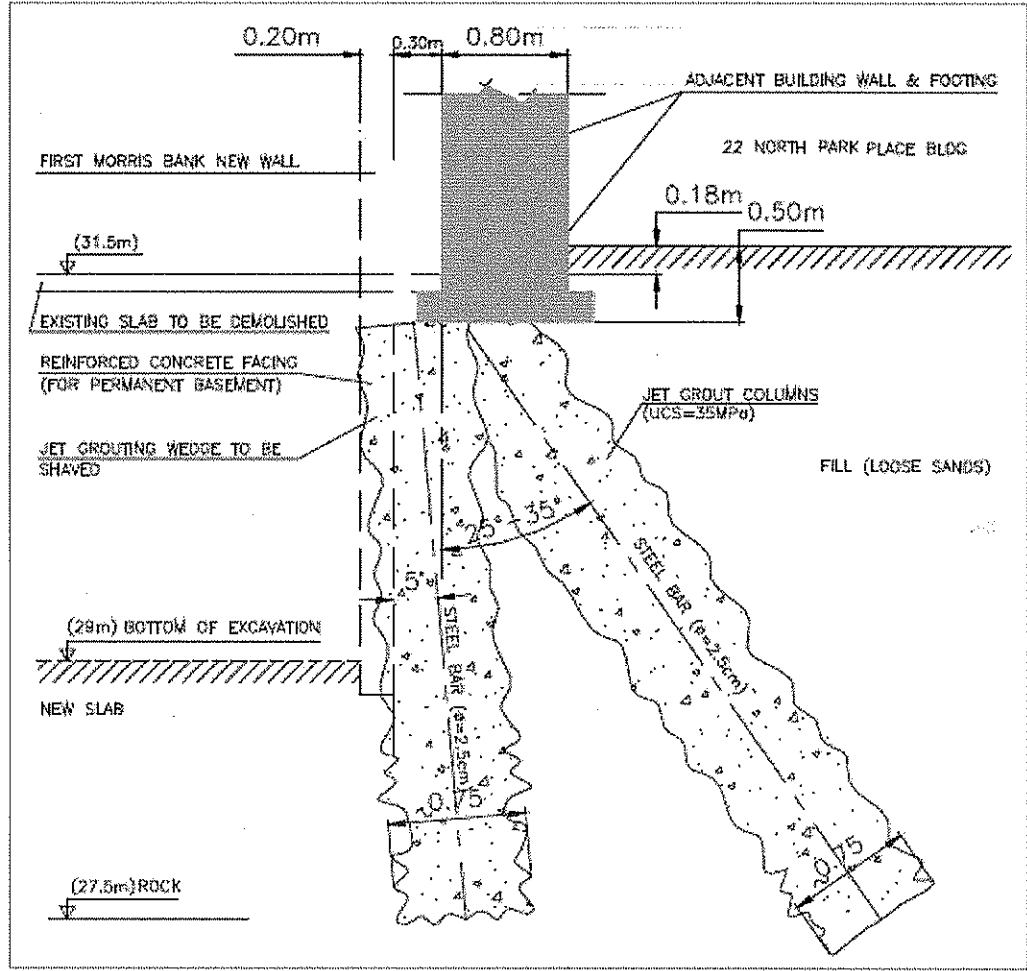
Şekil 4.2. Mevcut binanın yıkımından sonra uygulama alanın görünümü (Armijo, 2002)

Jet grout, arazi şartlarında yerinde, çimento ile kısmi değiştirme ve/veya karıştırma işlemi olduğundan, grout, monitör üzerindeki, nozullardan zemine enjekte edilerek, dönel hareketle kolonlar oluşturmaya işlemidir. Monitörün ucundaki delici sayesinde delme işlemi gerçekleştirilir. Enjeksiyon, monitörünün dönerek yüksek pompalama basıncı ile zemine nozullardan iletilir. Enjeksiyon esnasında dönüş, işlenmiş bir kolon yarıçapı oluşturur. Enjeksiyon nozulu, bir matkap ile öngörülen bir derinliğe kadar ilerletilirse, o zaman bu derinlikten yukarıya kadar döndürülerek geri çekilir ve bu derinlikler arasında bir radyal zemin zonu karışmış olur. Zemin grout kolonu veya elemanı olarak bilinen etki alanının çapı ve mukavemeti, zemin tipi, enjeksiyon basıncı, geri çekilme oranı, grout akış hızı, grout kompozisyonu ve diğer faktörlere bağlıdır. Daha önce belirtildiği gibi genel olarak üç jet grout enjeksiyon

sistemi bulunmaktadır ve bu uygulama kapsamında tek akışkan sistemi kullanılmıştır. Bu uygulamada, mevcut yüzeysel temelin yapısal stabilitesi korunurken, aynı zamanda yeni bina kazılarında bir takviye sistemi olarak jet grout kullanılmıştır (Şekil 4.3. ve 4.5.). Çeşitli temel konfigürasyonları dikkate alınarak yeterli takviye desteği sağlamak amacıyla toplam 138 jet grout kolon yapılmıştır.

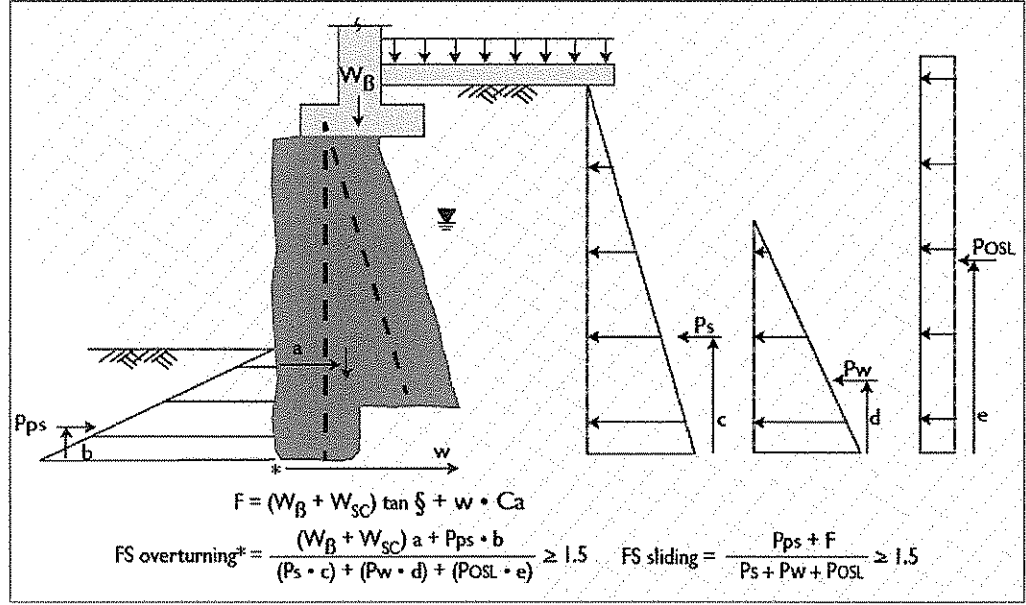


Şekil 4.3. Jet grout uygulamasının şematik planı (Armijo, 2002)



Şekil 4.4. Jet grout uygulamasının şematik kesit görünümü (A-A kesiti, Şekil 4.3.)

Şekil 4.5.'de görüldüğü üzere, temel sisteminin tasarım aşamasında, devrilmeye ve 1.5'den fazla emniyet faktörü ile kaymaya karşı dirençli birbirine bağlı jet enjeksiyon kolonlarının geometrisinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu takviye sisteminin homojen bir kütle olduğu varsayılmıştır. İç gerilimlerin kritik noktalarda kontrolüyle serbest basınç dayanım değeri ile kıyaslamalar yapıldığı belirtilmiştir. Bu tasarım kontrolleri için temel varsayımlar; zemin türü: gevşek-orta sıkı, ince-orta sıkı kum kabul edilmiştir, ana kayaya kadar olan derinlik jet enjeksiyonunun tabanını aşacak şekilde düşünülmüştür. yeraltı suları ile karşılaşılması. jet enjeksiyon kolon çapı ortalama 0.75 m alınmıştır. jet enjeksiyon kolon uzunluğu 1.8-3.6 m, kolon merkezleri arasındaki mesafe 0.6 m, kazı derinliği 1.2-2.4 m ve jet enjeksiyon kolonunun serbest basınç dayanımı 3.5 MPa ve jet enjeksiyon çekme mukavemeti %7.5 UCS = 2.6 MPa olarak alınmıştır.

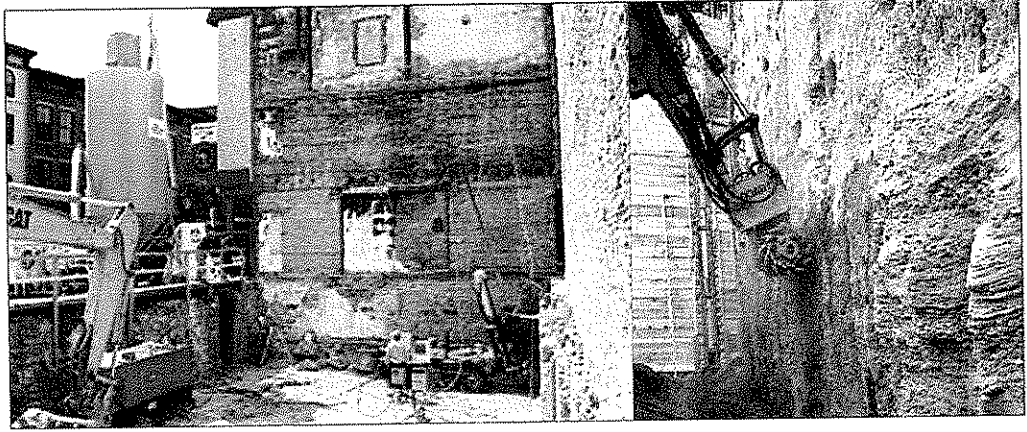


Şekil 4.5. Analitik hesaplamalarda jet grout duvarının istinat duvarı gibi düşünülmesi

Armijo (1993), Langbehn (1986) ve Miki ve Nakanishi (1984) tarafından verilen ampirik ilişkileri kullanarak ortalama kolon çapı ve serbest basınç mukavemeti, zemin tipi ve yoğunluğu (SPT darbe sayısı 10'un altında), uygulanan jet grout türü (Jet 1), enjeksiyon basıncı (350-500 bar), kolon metre başına enjekte edilecek çimento miktarı (300-400 kg) değişkenleri açısından tahmin edilmiştir. Bu uygulama projesinde dikkate alınan yapısal yükler ise, yeni yapılacak bina duvar yükü 7.5 t/m ve bitişik bina duvarlar yükü için 5 t/m dir.

Kayma ve devrilmenin yanında, oluşturulan tahkimat istinat yapısı tabanında, eşdeğer taban genişliği varsayılarak taşıma kapasitesi ve reaksiyon kuvvetinin yeri de kontrol edildi (Şekil 4.5.). Buna ek olarak, basınç ve çekme iç gerilmeleri, duvarın jet grout kolonlarında kontrol edildi. Her iki durumda da varsayılan tasarım gerilmeleri fazlasıyla yetersiz kalmıştır. Oturma, jet enjeksiyon sütunlarının anakaya sokulacağından ve deformasyon modülü normalde serbest basınç dayanımının yaklaşık 500 katı olduğu varsayılarak Armijo (2002) tarafından ihmal edilmiştir. Halbuki, bir analiz neticesinde bu oturma sayısal olarak ihmal edilebileceğinin onaylanması gerekirdi. İşte bu tez çalışması kapsamında projenin bu eksik kalan oturma analizleri 3B SE analizleriyle yapılmıştır.

Jet grout kolon ve temel arasındaki bütünlük açısından, 0.20 m betonarme döşeme ile tamamlanan bodrum duvarının bir parçası olarak ek çıkıntı yapılarak temel tasarımına dahil edilmiştir. Bu amaçla, kazı işlemi sırasında jet grout kolonları Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi tıraşlanmıştır.



Şekil 4.6. Jet grout uygulaması ve kolonların kazı aşamasında tıraşlanması

Bu proje için, planlarda mevcut komşu temellerin seviyesine yerleştirilen ekipmanlarla bir çimento grout matrisi kullanılmıştır. Bu matris, tek akışkan sistemi kullanılarak püskürtme enjeksiyonu ile aşağıdan yukarıya zemine uygulanmıştır. Uygulamada, jet grout monitörünün bir trikon biti ile hedef derinliğe ilerletilmesi suretiyle inşa edilmiştir. Geri çekme sırasında, iki adet 2.2 mm çaplı nozullar kullanılmıştır. Çimento enjeksiyonu 1/1 su/çimento oranıyla enjekte edilmiştir. Enjeksiyon işlemi başlatıldığında, monitör geri çekildi ve sürecin parametrelerinin "gerçek zamanlı" izlenmesinden gelen geri bildirimle belirlenen bir oranda döndürüldü. Karışımın hidratasyonu esnasında büzülmeyi önlemek amacıyla temelin üstünde ek bir grout kısmı yapılarak jet enjeksiyon kolonu ve taban arasında temas korunmuştur. Hedeflenen üst yüksekliğe ulaşıldığında, yüksek basınç altında çimento enjeksiyonu durdurulmuştur. Monitör daha sonra geri çekilmiş, bir sonrakine enjeksiyon noktasına yerleştirilen sondaj işlemi tekrarlanmış ve işleme devam edilmiştir.

Nihai jet grout kolon aralığı, Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi 0.6 m olarak alınmıştır. Enjeksiyon kolonlar aralıklarla yerleştirilmiş ve çimento ile karıştırılmış zeminin sonraki enjekte edilen ögeyle bozulmasını önlemek amacıyla en az 24 saat

süreyle prize izin verilmiştir. Jet enjeksiyon sırası, herhangi bir günde jet grout elemanları arasında en az iki enjeksiyon elemanı aralığı mesafesinin (minimum 2 m) muhafaza edildiği şekilde yapılmıştır (Çizelge 4.1.). Tüm jet enjeksiyon kolonlarının bir uygulama kaydı sağlanmıştır.

Çizelge 4.1. Uygulanan jet grout parametreleri

Jet grout parametreleri	Alt ve üst sınırlar	Tipik değerler
Su/çimento oranı (ağırlıkça)	0.7-2	1
Çimento miktarı (kolonun kg/m'sindeki değer)	150-450	200-350
Grout enjeksiyon basıncı (kg/cm ²)	50-800	350-450
Groutın akış oranı (lt/s)	1-3	1-3
Monitörün dönme oranı (grout kafasının dakikadaki dönüş sayısı rpm)	6-20	8-10
Monitörün yukarı çekilme oranı (dak/m)	4-12	4-8
Nozulun çapı (mm)	1.5-6	2-3
Kolonlar arası minimum aralık (m), 24 saat	-	1.5
Bitişik kolonlar arası minimum inşa zamanı (saat)	-	24

Her kolonun sondaj deliği gerekli derinliğe kadar tamamlandıktan sonra, jet enjeksiyonu önceki test programı sırasında belirlenen parametrelere (Kolon Onayı Testi (CCT), aşağıda tartışılmıştır) göre başlatılmıştır. Çimento enjeksiyonunun (basınç ve akış) hızı, monitör dönüşü ve monitör geri çekme oranı ekipman kontrol sistemine programlandı. Bu, derinlik, çap, homojenlik, örtüşme ve enjeksiyon kalitesinin kurulan gereksinimlerini karşılayan gerekli bir adımdı. Derz dolgu işlemi için gereken süreyi (ve dolayısıyla monitörün geri çekilmesi için gerekli hızı hesaplamak için) özel bir tescilli bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu programı kullanarak, bu gerekli süre, ağırlığa göre su/çimento oranı: 1: 1, kolon metre başına çimento ağırlığı: 325 kg/m, enjeksiyon basıncı: 400 kg/cm², püskürtme uçlarının sayısı ve çapı: 2.2 mm çaplı 2 adet, jet enjeksiyon ana parametrelerine dayanarak belirlenmiştir (Şekil 4.7.).

JET-GROUTING: PARAMETERS FOR TREATMENT IN MORRISTOWN UNDERPINNING			
values in red are variables			
CEMENT DENSITY (t/m ³):	3,05	Cement consumption	kg/m 325
DOSAGE	WATER: 1	Injection speed (*)	cm/min 22,9
(by weight)	CEMENT: 1	Length of treatment	m 3,66
		Time of treatment	min 16,0
PRESSURE AT THE PUMP (kg/cm ²):	400	(*) Time of persistence per each step of:	
		4 cm	seconds 10,5
NOZZLES	NUMBER: 2	Degree of substitution (1)	20%
	DIAMETER (mm): 2,2	Percentage of spoil (2)	20%
RESULTS :	Theoretical	Average Diameter (m)	0,75
GROUT DENSITY (T/m ³):	1,51	With losses of	5,00 %
SPEED AT THE NOZZLES (m/s):	228,27		216,85 m/s
GROUT FLOW RATE (l/min):	104,13		98,92 l/min
AMOUNT OF CEMENT (kg/min):	78,42		74,49 kg/min

(1) Proportional part of cement in the soil-cement column

(2) Relationship between lost volume of cement and volume of cement used to make the column

Şekil 4.7. Jet enjeksiyon parametre programı çıktısı

Bu program ve önceki deneyimlere dayalı seçilmiş temel parametreler (Tablo 1), test kolonlarının jet grout çekilme süresini hesaplamak için kullanılmıştır. Kolon Onay Testi (CCT) tamamlandıktan sonra elde edilen verileri kullanarak, jet enjeksiyonlu kolon uygulamaları yapılmıştır. Kolon Onay Testi (CCT) veya Kolon Doğrulama Testi (CCT), tasarım gereksinimlerine uyumun doğrulanması ve uygulama usullerinin ayarlanması ihtiyacının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. CCT, kolon üretimi başlamadan önce üretim ekipmanı ve prosedürleri kullanılarak, yapılan elemanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen iki noktada iki adet deneme kolonu imalatı yapılmış, çapı ve şekli için bunları görsel olarak incelenmiş ve üst kısımları belli bir derinliğe kadar kazılmıştır (Şekil 4.8.). ASTM D2938-86 uyarınca 3, 7 ve 28 inci günlerde serbest basınç testi için her bir elemandan 6 numune alınmıştır (Şekil 4.9. ve 4.10.). Karot numune işlemi, püskürtme enjeksiyon kolonu merkezinin ekseninden radyal olarak dışarı doğru en az 6 inç mesafeden alınmıştır. Numuneler, 0.30 m derinlik için işaretlenmiştir. Numuneler test etme işlemine kadar nemi korumak için sarılmıştır. Bundan sonra, jet grout kolonları aşağıdakilere dayanılarak imal edilmiştir.

- 3 günlük testlerin sonuçları. Bu sonuçlardan, önceki benzer işlerde (Andromalos ve Gazaway, 1989) elde edilen zamana bağlı basınç dayanımının değişimi kullanılarak 28 günlük test sonuçları tahmin edilmiştir.

- Donanımına bağlı bir tescilli kayıt sistemi ("SLOGGER") kullanarak sondaj ve enjeksiyon parametrelerinin analizi yapılmıştır.



Şekil 4.8. Bir test jet grout kolonunun incelemesi



Şekil 4.9. Test kolonunun karot numune işlemi



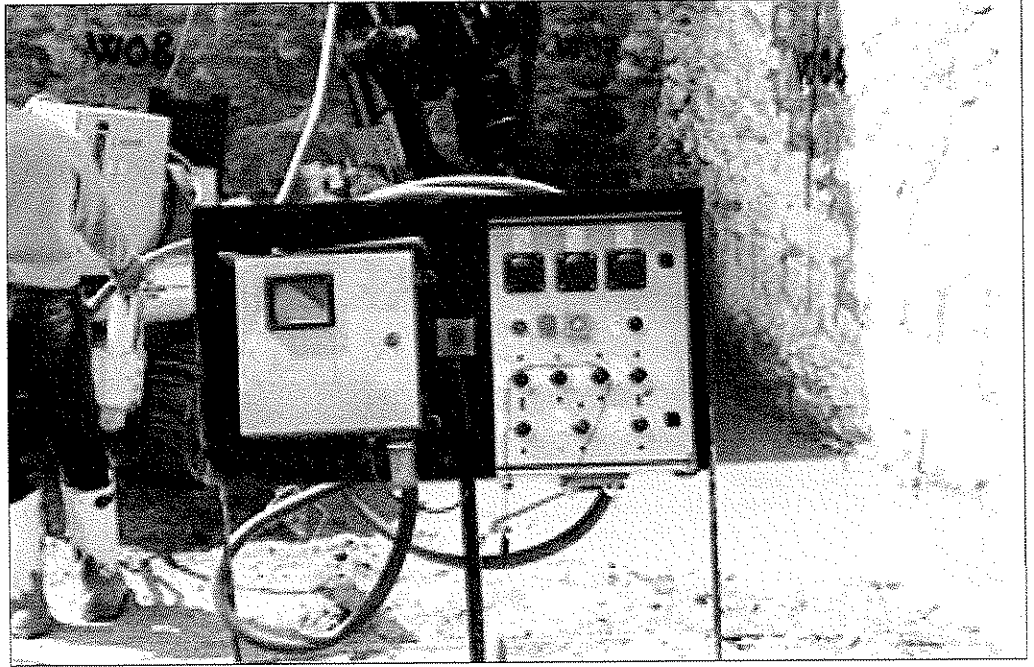
Şekil 4.10. Jet grout kolondan alınan numuneler

Enjeksiyon yoğunluğu grout karışımında su/çimento oranının doğrudan bir ölçümü olduğu düşünülmüş ve kalitesini izlemek için grout yoğunluğu, özel bir yoğunluk ölçer kullanarak turbo karıştırıcıda kontrol edilmiştir. Ağırlığa göre 1:1 su/çimento oranı için, çimento yoğunluğunun 3.05 t/m^3 'e eşit olduğu varsayılarak, harç yoğunluğu 1.51 t/m^3 olarak alınmıştır.

Çıkan çamur yoğunluğu da aynı cihaz kullanılarak belirlenmiş olup, ortalama ölçülen değerler 1.62 t/m^3 olmuştur. Buna dayanarak, ilk varsayımlara göre, arazide şerbet ile karıştırılan zemin miktarı ve dolayısıyla yer değiştirme derecesi zeminin % 20'si civarında olduğu tahmin edilmiştir. Günlük ve nihai raporlar proje şartnamesine uygun olarak yapılmış ve derz deliği geometrisi, her kolonun başlama ve bitiş tarih ve saati, enjeksiyon basıncı, dönme ve çekme oranları, zemin özellikleri ve bozulma miktarı ve yoğunluğu, kaydedilen veriler olmuştur. Jet enjeksiyon performansı kayıtlarından elde edilen tüm veriler, zeminin sıklığının (düşük, orta, yüksek) ve çıkan çamura (hiç, orta, toplam) derinlik açısından ortalama bir seri elde etmek üzere derlendi ve kayıtlara işlendi. (5 üretilen kolon için 1 grafik). Bu kolon türleri, dağılımın kronoloji ve derinlik açısından açıkça tanımlanacağı şekilde oluşturulmuştur. Ek olarak, jet enjeksiyon ana parametreleri, aşağıda açıklanan

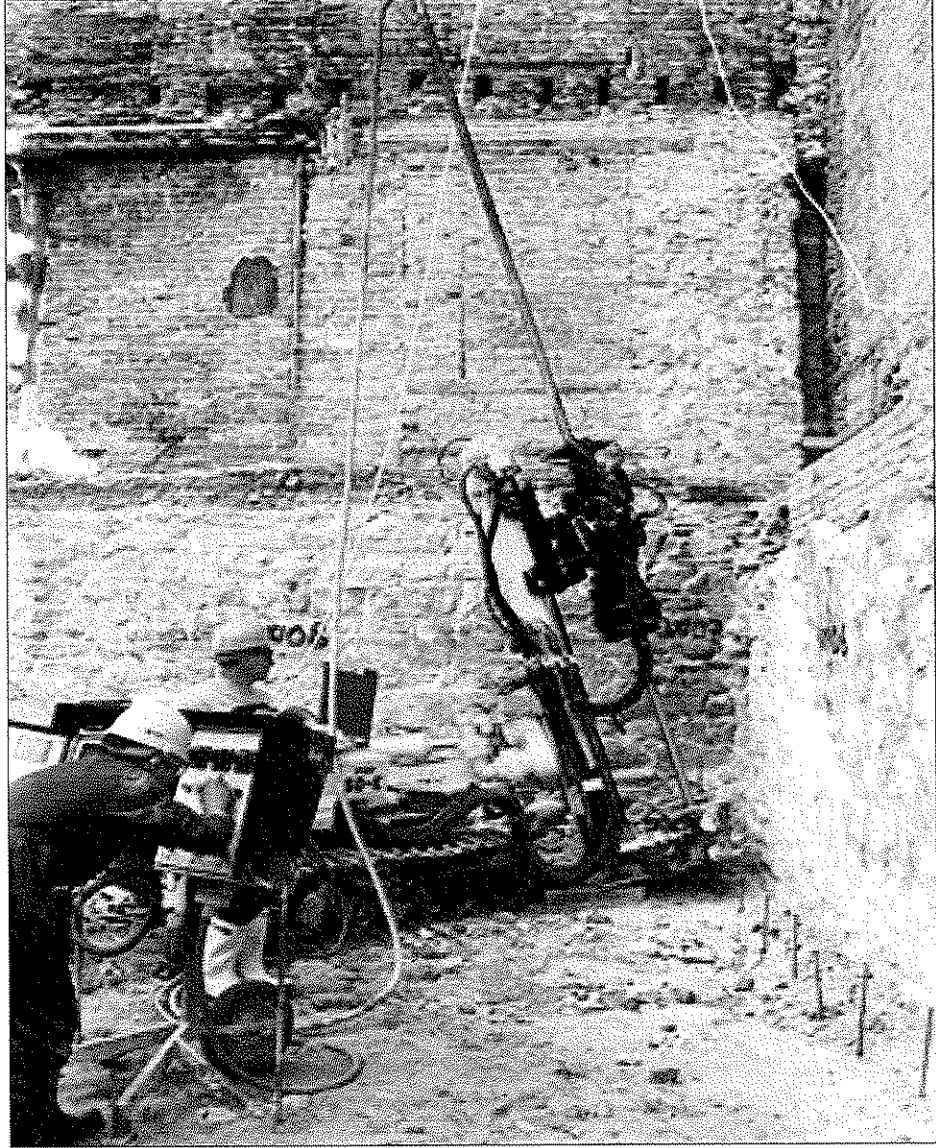
sondaj ve jet enjeksiyon ekipmanına ekli tescilli bir kayıt sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, günlük sondaj ve enjeksiyon logu olarak sunulmuştur.

Sondaj ve enjeksiyon parametrelerini izlemek ve kaydetmek için "SLOGGER" adı verilen tescilli bir kayıt sistemi kullanılmış olup, ekipman kontrol paneli Şekil 4.11.'de gösterilmektedir. Üretim sırasında zemin içine delme aşamasında, delme hızı, dönme hızı, tork basıncı, matkap besleme basıncı, derinlik parametreleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.11. Delme makinesi kontrol paneli ve kayıt sistemi

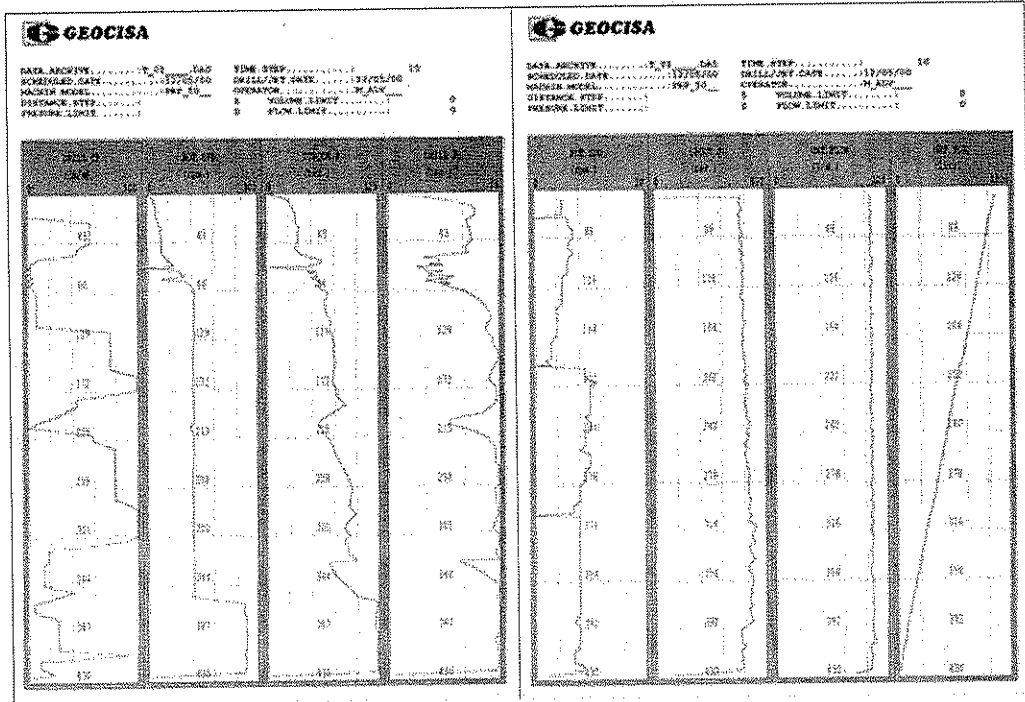
Jet enjeksiyon ekipmanı, jet enjeksiyonu ile ilgili parametrelerin doğru ve sürekli ayarlanmasına izin veren kontrollerle donatılmıştır (Şekil 4.12.). Buna ek olarak, bu ekipman, gerçek zamanlı olarak bütün enjeksiyon parametrelerini görüntüleme ve daha sonra doğrulama ve ölçüm amaçları için bir basılı kopya sunma yeteneğine sahip bir otomatik enjeksiyon parametre kayıt sistemi ile donatılmıştır. Kaydedilen parametreler iyileştirme derinliği, çekme hızı, dönme hızı, grout basıncı, grout akış hızı, şeklinde olmuştur.



Şekil 4.12. Operatör jet enjeksiyon parametrelerini ayarlarken

Tipik sondaj ve enjeksiyon parametrelerinin kayıtları Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Bu parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi çok önemlidir. Bir mekanik arıza meydana gelmesi durumunda (basınç veya akış hızı düşmesi veya püskürtme uçlarının tıkanması gibi), makine operatörü bunu derhal ekranda algılayabilir ve gerekli önlemleri alabilir. Buna ek olarak, operatör bu gibi durumlarda yüzey altı koşullarında herhangi bir değişiklik olup olmadığını da belirleyebilir. Bu bilgilere dayanarak, operatör jet enjeksiyon işlemini gerektiği gibi değiştirebilir. Bu özel işte, veri günlüğü sistemi vasıtasıyla, işin doğru bir şekilde ve tasarım sınırları dahilinde gerçekleştirildiğinden emin olarak işin yürütülmesi

izlenmiştir. Buna ek olarak, kayıt sistemi, ölçülen miktarların derinlikteki değişimini gösteren grafik çıktıların hazırlanması için manyetik olarak depolanan verilerin kullanılmasına izin verilmiştir (Şekil 4.13.)

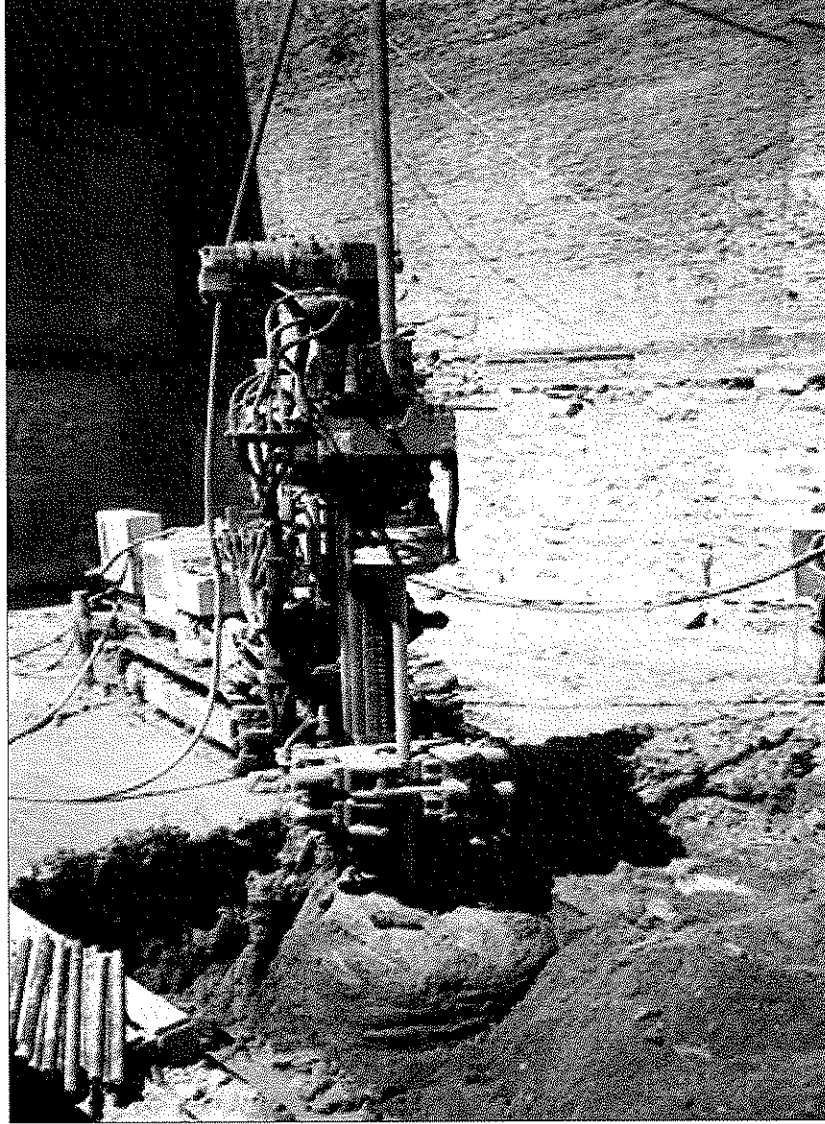


Şekil 4.13. Delme parametre ve grouting parametre logları

Püskürtme enjeksiyonunun uygulanması esnasında desteklenen temelin hareketi (oturma veya kabarma kaynaklı olarak) izlenir. Genel ve yerel denetimler yapılmıştır. Jet enjeksiyonuna başlamadan önce, bir araştırmacı yapı üzerinde referans noktalar oluşturmuştur. Bağlı yükseklik ölçümleri, iyileşmeden etkilenmeyen sabit ölçütler kullanılarak yapılmıştır. En az 6 puan dış, 6 iç nokta belirlenmiştir. Referans noktaları hem dikey hem de yatay yüzeylerde, bitişik binaların içinde ve dışında oluşturulmuştur. Etkin jet enjeksiyonunun yapıldığı günde bir kez okumalar yapılmıştır. Yerel hareketleri saptamak ve gerekirse işlemi derhal durdurmak için her jet enjeksiyonu kolonu oluşturulması sırasında sütun çevresindeki etrafında gözlem yapılmıştır. Hareketin sınırlayıcı hedef seviyesi, işin başlamasından önce işin sahibi/geoteknik mühendis tarafından 3 mm olması gerektiği konusunda uzlaşmıştır. Bu sınırı biraz geçen değerler, yalnızca eğimli kolonların bazılarının uygulanması sırasında olmuştur. Bundan dolayı komşu binalarda küçük çatlaklar oluşmuştur. Bu durumda, iş geçici olarak durdurulmuş ve bir acil durum planı

uygulanmıştır. Bu planın sonucu olarak kolon eğimi dikey doğrultuyla ilişkili olarak maksimum 30^0 ile sınırlandırılmıştır ve bir ön iyileştirme olarak kabul edilmiştir. Bu ön-iyileştirme vasıtasıyla, bazı seçilmiş lokasyonlarda deliklerin üst kısmında nispeten düşük basınçlı bir enjeksiyon iki ana amaçla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlar, (a) bitişik yapı temelleri ile zemin arasındaki boşlukları doldurmak ve (b) yeniden delinecek deliklerin çeperlerinde herhangi bir tıkanmayı önleyecek ve delik duvarları ile matkap arasındaki halka şeklindeki boşluk boyunca pasanın serbestçe akmasını sağlamaktır. Bu ön işlemin sonucu tam bir başarı sağlamış ve hareketler durdurulmuştur. Sondaj borusundan daha büyük boyutlu matkap uçları kullanılarak serbest bir akış sağlanmıştır.

Ölçülen test kolon çaplarının tümü 0.75 m'nin üzerindeydi. Aynı kolonlardan alınan karot numunelerden elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri, 28 gün sonrası için, 7-13 Mpa arasında, 3-5 gün sonrası için ise 5 MPa'dan büyük olmuştur. Bu nedenle ön görülen sistem parametreleri kabul edilmiş ve onaylanmıştır. Bu kolonlar, kayıt sistemi takılı olan sondaj makinesi ile yeniden açılmış ve elde edilen serbest basınç mukavemet değerleri, kolon geometrik karakteristikleri ile karşılaştırılmış ve kaydedilmiş sondaj parametreleri kullanılmıştır. Bu karşılaştırmanın bir sonucu olarak, aynı matkap ucu, dönme hızı, matkap basıncı ve tork için 5 MPa serbest basınç mukavemetinden büyük olan karışım sondaj hızının 100 cm/dakikanın altında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bazı sondaj ve/veya enjeksiyon loglarında küçük değerlerin bulunduğu seçilen lokasyonlarda altı üretim kolonu tam uzunluğunda yeniden açılmıştır (Şekil 4.14.). Tüm durumlarda sondaj hızı 50 ila 100 cm/dakika arasında kalmıştır. İş 4 hafta içinde tamamlanmış olup, çalışmaların tamamlanmasının ardından derin kazı işlemi yapılmış ve jet enjeksiyon çözümünün jet grout kolon sürekliliği, çap ve minimum örtüşme ile ilgili proje gerekliliklerini karşıladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.14. Deney kolonu tekrar delme işlemi

Sonuç olarak, belirtilen mevcut koşullar altında ve geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, uygun yönetim ve kontrol mekanizmasıyla, jet grout enjeksiyon tekniği yüzeysel temellerin takviyesi işleminde alternatif bir çözüm olmaktadır. Ek olarak, yukarıda belirtilen geleneksel tekniklerden daha hızlı olunabilir, bina yapısal stabilitesini koruyabilir ve aynı zamanda mevcut bina oturmaları en aza indirgeyen bir takviye sistemi olarak kabul edilebilir. Uygun yönetim ve sonuç kontrolü, bu işin icrası sırasında kullanıldığı gibi bir kayıt sistemi kullanarak, grout enjeksiyon ve delgi parametrelerinin gerçek zamanlı olarak sürekli kayıt edilmesi uygulama açısından önemlidir. Aynı kayıt sisteminden yararlanarak, sonuç kontrolü olarak yenilikçi bir teknik başarıyla uygulanmıştır. Üretim kolonlarından bazıları yeniden

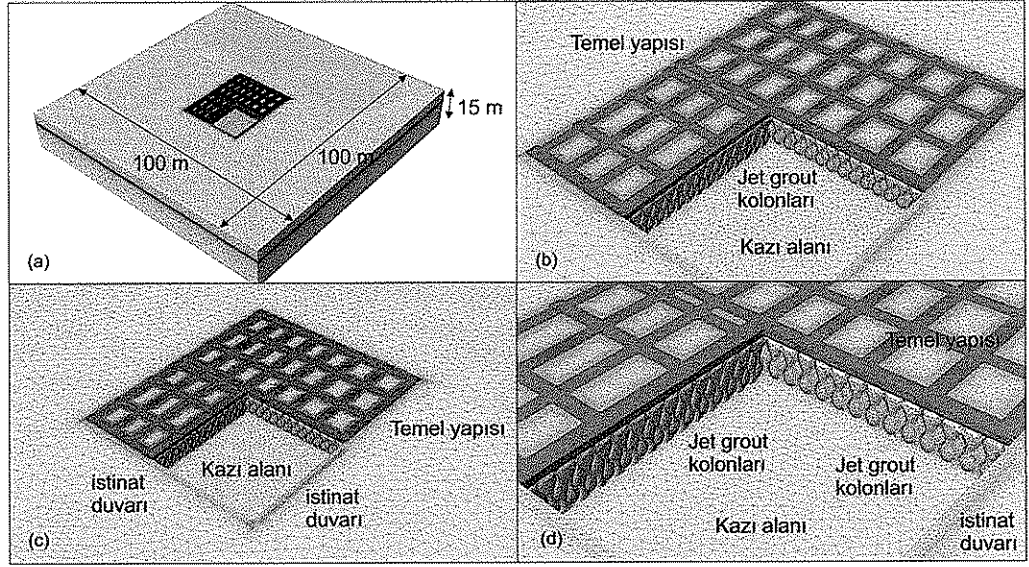
delinmiş ve elde edilen sondaj parametreleri ile aynı test kolonları için elde edilenler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. 100 cm/dakikanın altındaki delme hız durumunda serbest basınç dayanım değerleri 5 Mpa dan büyük olarak tespit edilmiştir. Zemin dayanımı nedeniyle komşu yapıların hasar görmesini önlemek için, eğim delikleri 30° ile sınırlandırılmıştır.

Bu tez araştırmasında, yüzeysel temellerin jet grout grup kolonlarla takviyesi sonrası, oluşan karmaşık tasarımı dikkate alacak şekilde, temel performanslarının görüntü işleme tekniği kullanarak geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar (3D SE) modellemesi ile tespit edilmesi ve bu tekniğin bu türden karmaşık problemlerin analiz edilmesi için geçerli bir yöntem olduğu açıklanmaktadır. Geoteknik uygulamaları göz önüne alındığında, bu tez çalışması kapsamında yürütülen tasarım senaryosunun ve koşullarının, yüzeysel temeller ile etkilenen bitişik tarihi binalar dahil olmak üzere, jet grout enjeksiyonu temelli takviye sistemlerinde kullanılabileceğini ve kullanılan yöntemlerle gerçekçi olarak modellenebileceğini açıklanmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan 3D SE modellemesine temel teşkil eden uygulama projesi olarak Armijo (2002) tarafından gerçekleştirilen yukarıda açıklanan uygulama baz alınmıştır.

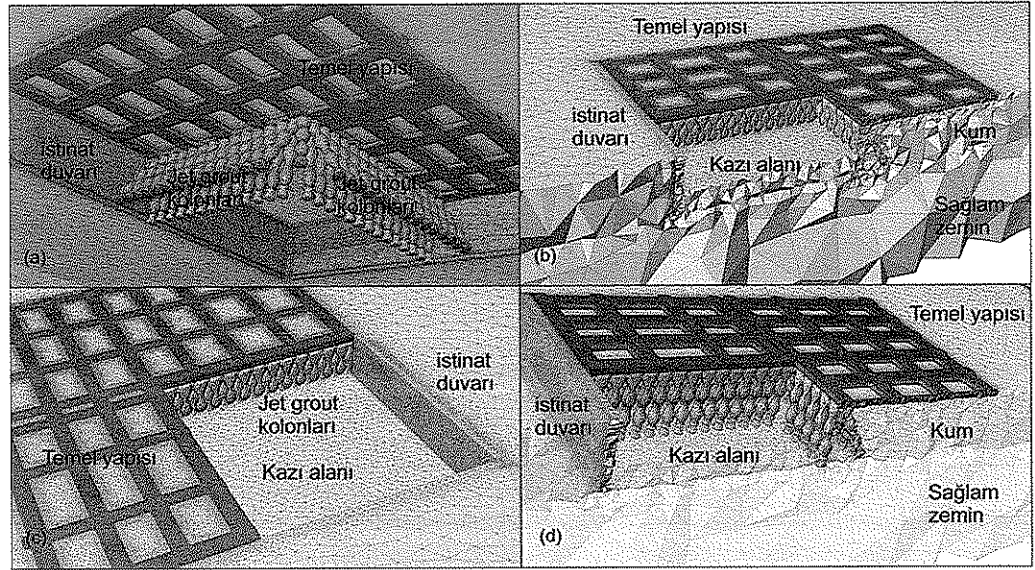
Bu tez araştırmasında Armijo (2002) tarafından jet deneme kolonunun tam geometrisi çıkartılmadığından yapılacak 3B SE modellemesi için gerekli olan jet grout kolonun derinliğe bağlı geometrik değişimi için Algın (2017) tarafından açıklanmış olan bir geometrik kabul kullanılacaktır. Şekil 2.2.'de açıklanan bu kabulde, Modoni ve Bzowka (2012) tarafından sunulan deneme kolonunun eksik geometrik değişimi tamamlamak amacıyla dönmüş sinisodial fonksiyonun kullanılabileceği açıklanmıştır. Bu çalışmada da eksik bu geometrik değişim için benzer zemin şartları gözlemlendiğinden, Algın (2017)'de açıklanan dönmüş sinisodial fonksiyon kullanılarak oluşturulmuş geometrik değişim kullanılmıştır. Şekil 4.8.'de baz alınan projenin jet grout deneme kolonunun incelemesi görselinden anlaşılabileceği üzere, kolon geometrisindeki değişim dönmüş sinisodial fonksiyon kabulündeki gibi bir değişim yapmaktadır. Bölüm 2'de açıklanan görüntü işleme tekniği kullanılarak yukarıda detayları verilen uygulamanın 3B SE modelleri

oluşturulmuştur. Bu modellerin mesh'leri ile ilgili bazı görseller Şekil 4.15.-4.17.'de sunulmuştur.

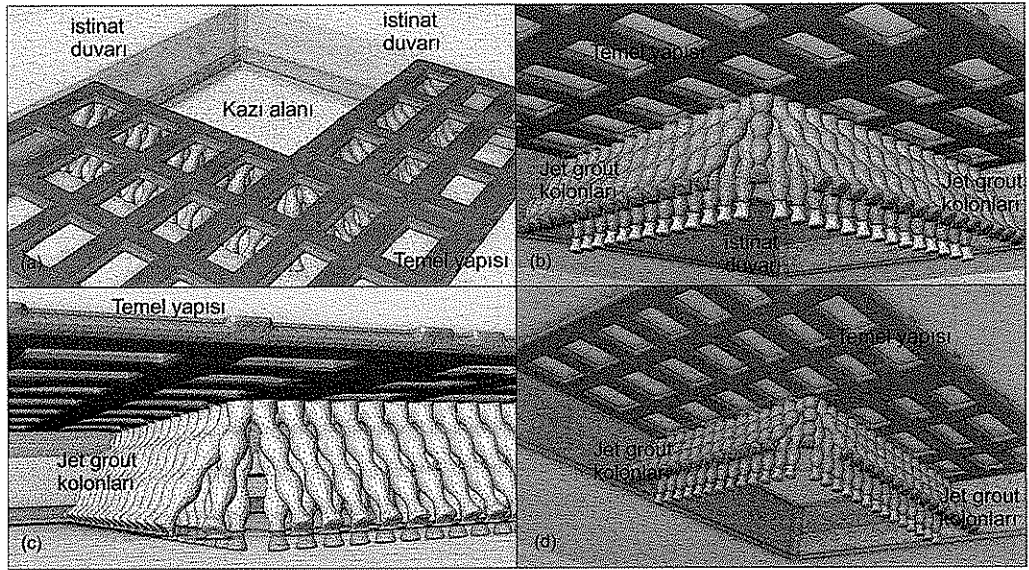
Şekil 4.15.-4.17.'de sunulan bu 3B SE meshleri yüzeysel temelleri destekleyen jet grout kolonlarla takviye edilmiş bu tür kompleks temel sistemi tasarımlarının üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) modellemelerinin görüntü işleme tekniği kullanılarak yapılabileceğini göstermektedir. Geoteknik uygulamalar dikkate alınarak, yüzeysel temeller ile etkilenen bitişik tarihi binalar da dahil olmak üzere, uygulama temel tasarım senaryoları dahilinde gerçek arazi koşulları altında, kompleks jet grout takviyeli temel tasarımlarının 3B SE modellerinin yapılarak nümerik oturma analizlerinin gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Döndürülmüş sinüzoidal fonksiyon yaklaşımı kullanılarak kolonların derinliğe bağlı geometrik değişim kabulleri temelinde üç boyutlu olarak modellenebileceği açıklanmıştır. Jet grout kolonlu takviye sistemi için 3B SE meshleri bu varsayıma dayalı olarak modellenmiştir. Şekil 4.18.-4.19.'da gerçekleştirilen oturma analizlerinden bazı sonuç görselleri verilmektedir. Şekil 4.19.'daki 3B SE oturma analizi sonuçları, yüzeysel temeller için jet grout takviye uygulamasının yaklaşık % 80 düzeyinde oturmada bir azalma sağladığını göstermiştir. Bu yüksek lisans tezi, bu derece karmaşık bir temel sisteminin 3B SE modellemesi temelinde daha gerçekçi çözümler sağlayan görüntü işleme tekniği kullanılarak üç boyutlu olarak analiz edileceği sonucuna varmıştır.



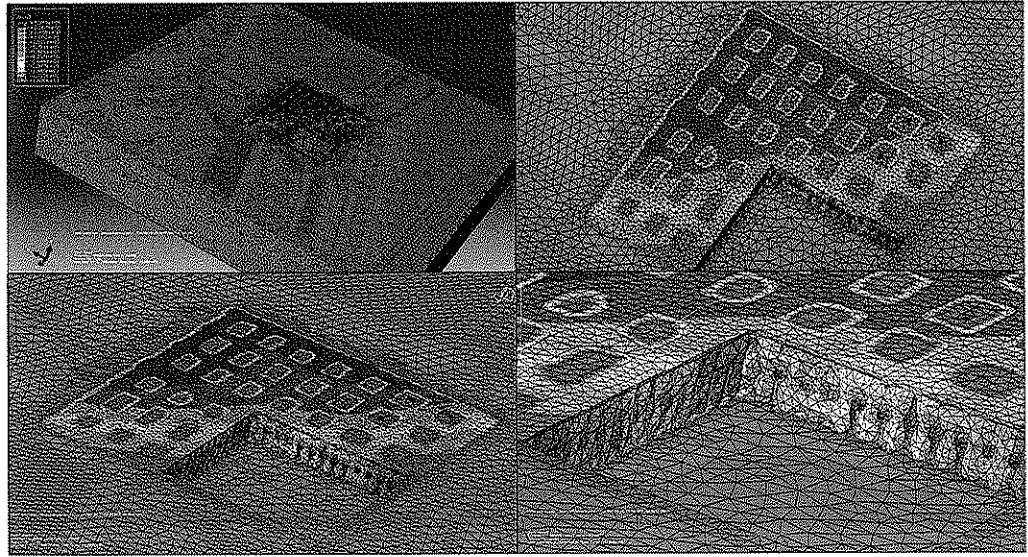
Şekil 4.15. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (komşu temel yapısı ve kazı alanın yakın plan görselleri)



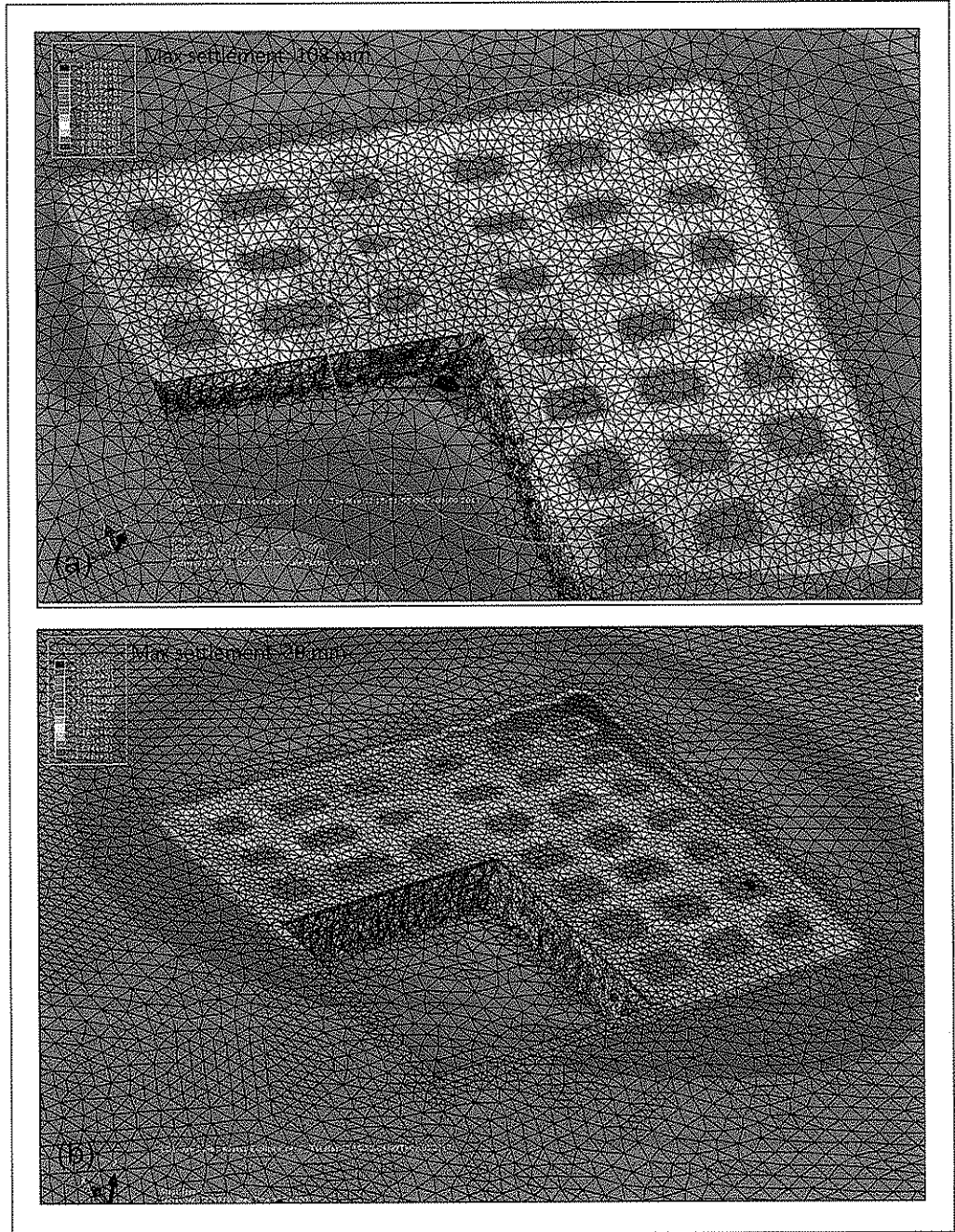
Şekil 4.16. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (zemin tabakaları, içsel mesh ve jet grout kolonları yakın plan görselleri)



Şekil 4.17. 3B SE modelinin mesh görüntüleri (eğimli jet grout kolonları ve temel altından yakın plan görselleri)



Şekil 4.18. 3B SE analiz sonuçları



Şekil 4.19. 3B SE analiz sonuçlarının jet grout takviyesiz ve takviyeli durumla karşılaştırılması, (a) takviye yapılmadan kazının gerçekleşmesi senaryosu durumunda oturma, (b) jet grout kolon takviyesi yapıldıktan sonra kazının gerçekleşmesi durumunda oturma

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması göstermiştir ki, belirtilen mevcut koşullar altında ve geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, uygun yönetim ve kontrol mekanizmasıyla, jet grout enjeksiyon tekniği yüzeysel temellerin takviyesi işlemine alternatif bir çözümdür. Uygun iş yönetimi ve kontrolü, bu işin icrası sırasında kullanılabilecek kayıt sistemi, grout enjeksiyon ve delgi parametrelerinin gerçek zamanlı olarak sürekli kayıt edilmesinin uygulama açısından önemli olduğu görülmektedir.

Bu tez araştırmasında, yüzeysel temellerin jet grout grup kolonlarla takviye edilmesi sonrasındaki sistemin davranışını ve yükleme senaryolarını dikkate alacak şekilde, bir bütün olarak komşu temeller de dikkate alınarak temel mekanizmasının görüntü işleme tekniği kullanarak geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar (3D SE) modellemesi ile tespit edilebildiği ve bu tekniğin bu türden karmaşık problemlerin analiz edilmesi için geçerli bir yöntem olduğu açıklanmıştır. Geoteknik uygulamaları göz önüne alındığında, bu tez çalışması kapsamında yürütülen tasarım senaryosunun ve koşullarının, yüzeysel temeller ile etkileşen yakın bina temelleri ile birlikte, jet grout kolon takviye sistemlerinde kullanılabileceğini ve kullanılan yöntemlerle gerçekçi bir şekilde modellenebileceği açıklanmıştır. Döndürülmüş sinüzoidal fonksiyon yaklaşımı kullanılarak kolonların derinliğe bağlı geometrik değişim kabulleri temelinde üç boyutlu olarak modellenebileceği açıklanmıştır. 3B SE oturma analizi sonuçları, yüzeysel temeller için jet grout takviye uygulamasının yaklaşık % 80 düzeyinde oturmada bir azalma sağladığını göstermiştir. Bu yüksek lisans tezi, bu derece karmaşık bir temel sisteminin 3B SE modellemesi temelinde daha gerçekçi çözümler sağlayan görüntü işleme tekniği kullanılarak üç boyutlu olarak analiz edileceği sonucuna varmıştır.

Bu kapsamsamda bir sonraki ileri aşama bu konuda bir parametrik çalışma yapılarak jet grout kolon takviyeli yüzeysel temellerin tasarım stratejileri belirlenerek, optimum tasarım temelinde ön görülen tasarım parametrelerinin nasıl

değiştiği konusunda bir araştırma yaparak bu temel takviye sistemlerinin tasarımı için pratik bir tasarım çizelgesi sunmak olmalıdır.

KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2012. Abaqus Dassault Systèmes, USA, 6-12.
- AGI., 2012. Jet Grouting Guidelines. Associazione Geotecnica Italiana, Italy, 69p.
- ALGIN, H. M., ve EKMEN, A. B., 2015. NATM Tüneli İle Köprü Temel Etkileşiminin Üç Boyutlu Sayısal Analizi, 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana, 26-27 Kasım, s.20-27.
- ALGIN, H. M., ve EKMEN, A. B., 2016. DKTK Grupları Üzerindeki Radyelerin Tepki Yüzey Metodu İle Optimizasyonu. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, 13-14 Ekim, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, s.122-130.
- ALGIN, H. M., 2013. Jet-Grout Kolon-Zemin Etkileşiminin Realistik Modellemesi ve Arayüz Geometrisinin Geoyapısal Sistemin Davranışına Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Adana, 5-7 Aralık, s.40-47.
- ALGIN, H. M., EKMEN, A. B., YENMEZ, L. and SARAÇ, I. H., 2017. The Shallow Foundation Underpinning with Jet Grouting, First Morris Bank, Morristown, New Jersey, ICOCEE, Cappadocia, Nevsehir, Turkey, pp.25-26
- ALGIN, H. M., 2016. Optimised Design Of Jet-Grouted Raft Using Response Surface Method. Computers and Geotechnics, 74: 56-73.
- ALGIN, H. M., 2017. Optimised Design Of Jet-Grouted Rafts Subjected To Nonuniform Vertical Loading, KSCE, Korean Society of Civil Engineers, 1-15.
- ALGIN, H. M., ve EKMEN, A. B., 2016. Jet Grout Kolonlarla Desteklenmiş Radye Temellerin Tasarım Prensipleri. 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 12 Ekim, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, s.69-77.
- ARMJO, G. E., 2002. Jet Grouting Underpinning of a Building in the U.S., Proceedings - Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations, Article (DFI- Deep Foundations Institute) Nice, France. 964p.
- ARMJO, G., 1993. Foundation Underpinning: Jet Grouting Applications, Geocisa's Internal Report, Madrid, 34p.
- BELL, A. L., 1993. Jet grouting. Ground Improvement. Moseley M.P. (Ed.), Boca Raton, Florida, Blackie,. 149-174.
- BEN-GAL, I., 2005. On the Use of Data Compression Measures to Analyze Robust Designs. Ieee T Reliab, 54(3): 381-388.
- BEREZENTZEV, VG., 1965. Design of deep foundation. Proc, 6th Int Conf of Soil Mechanics and Foundation Engineering, University of Toronto Press Montreal, Canada, pp.234-237.
- BOTTO, G., 1985. Developments in the Techniques of Jet Grouting. 12th Ciclo di Conferenze di Geotecnica. Torino, Trevi, Italy, pp.81-90.
- BOWLES, J. E., 2001. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill Companies, New York, 807p.
- BS-EN-12716., 2001. Execution of Special Geotechnical Works Jet Grouting. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 38p.
- BS-EN-1994-1., 2004. Eurocode 7-Geotechnical Design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 168p.
- BUSTAMANTE, M., 2002. Les Colonnes De Jet Grouting. Report of the Seminar, Pathologies des Sols et des Foundations France, 120p.

- BZÓWKA, J., and PIECZYRAK, J., 2008. Pull Out And Load Tests For Jet Grouting Columns. Proc, XI Baltic Sea Geotechnical Conf, Polish Committee on Geotechnics and Gdansk Univ of Technology. Gdansk, Poland, pp. 929-933.
- BZÓWKA, J., 2009. Współpraca Kolumn Wykonywanych Technika Iniekcji Strumieniowej Z Podłożem Gruntowym (Interaction Of Jet Grouting Columns With Subsoil). Silesian University of Technology. Gliwice, Poland, 112-123.
- CHU, EH., 2005. Turbulent Fluid Jet Excavation in Cohesive Soil, With Particular Application to Jet Grouting. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1120-1133.
- CIPPO, P. A., TORNAGHI, R., 1985. Soil Improvement by Jet Grouting. In: Underpinning. Surrey. Surrey University Press, Thorburn, S., and Hutchison, J. F., eds., United Kingdom, pp.276-292.
- CORNELL, J. A., 1990. How to Apply Response Surface Methodology, The Basic References in Quality Control. Statistical Techniques. Wisconsin, ASQC Quality Press, USA, 1137p.
- CROCE, P., FLORA, A., and MODONI, G., 2014. Jet Grouting Technology, Design and Control. Boca Raton, Taylor, Florida & Francis, 302p.
- CROCE, P., and FLORA, A., 1998. Effects Of Jet Grouting In Pyroclastic Soils. Rivista Italiana di Geotecnica, 29(2): 5-14.
- CROCE, P., GAJO A., MONGIOVI, L., and ZANINETTI, A., 1994. Una verifica Sperimentale Degli Effetti Della Gettiniezione. Riv Ital Geotec, 28(2):91-101s.
- CUNHA, R. P., POULOS, H. G., and SMALL, J. C., 2001. Investigation Of Design Alternatives For A Piled Raft Case History. J Geotech Geoenviron, 127(8): 635-41.
- DAVIE, J., PYIAL, M., ANVER, A., and TEKINTURHAN, B., 2003. Jet-Grout Columns Partially Support Natural Draft Cooling Tower. Proceedings of the 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cambridge MA, ASCE GeoInstitute USA, pp.365-376.
- DAVIS, E. H., and TAYLOR, H., 1962. The Movement of Bridge Approaches and Abutments on Soft Foundation Soils. Civil Engineering Laboratories, University of Sydney, Sydney, Australia, 1164-1176.
- DIN-4093., 2012. Design Of Ground Improvement Jet Grouting, Deep Mixing, Or Grouting. Standard of the Deutsches Institut für Normung, Dusseldorf, Germany. 17p.
- FALCAO, J., PINTO, A., and PINTO, F., 2001. Case Histories And Work Performance of Vertical Jet Grouting Solutions. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement. Finnish Geotechnical Society, Helsinki, Finland pp.165-171.
- FLORA, A., and LIRER, S., 2011. Interventi Di Consolidamento Dei Terreni, Tecnologie E Scelte Di Progetto. Proceedings of the 24th National Conference of Geotechnical Engineering Innovazione tecnologica nell'Ingegneria Geotecnica, Napoli, Italy, pp.87-148.
- FLORA, A., MODONI, G., LIRER, S., and CROCE, P., 2013. The Diameter of Single, Double and Triple Fluid Jet Grouting Columns. Prediction Method and Field Trial Results. Geotechnique, 63(11): 934-945.
- GARASSINO, A. L., 1997. Design Procedures for Jet Grouting. Seminar organised by THL Foundation Equipment Pte., Ltd., Singapore, 119p.

- GI-ASCE., 2009. Jet Grouting Guideline. Geo Institute of ASCE-Grouting Committee-Jet Grouting Task Force., USA, 29p.
- HENG, J. 2008. Physical Modelling of Jet Grouting Process. University of Cambridge, Cambridge, UK, 276p.
- HEN S. L., WANG, Z. F., YANG, J., and HO, C. E., 2013. Generalized Approach for Prediction of Jet Grout Column Diameter. *J Geotech Geoenviron.*, 139(12): 2060-2069.
- HO, C. E., 2007. Fluid-Soil Interaction Model For Jet Grouting. Grouting for Ground Improvement. Hurley, T. M., (Ed.), Johnsen, L. F., (Ed.), Innovative Concepts And Applications. American Society of Civil Engineers, Reston pp.1-10.
- HORIKOSHI, K., and RANDOLPH, M. F., 1998. A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts. *Geotechnique*, 48(3): 301-317.
- JAKY, J., 1944. The Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 78(22): 355-358.
- JJGA., 2005. Jet Grouting Technology, JSG Method, Column Jet Grouting Method. Technical Information of the Japanese Jet Grouting Association, Japan, 80p.
- KUTZNER, C. 1996. Grouting of Rock and Soil. Rotterdam, A.A. Balkema, Netherlands, 167p.
- LANGBEHN, W. K., 1986. The Jet Grouting Method, Applications in Slope Stabilization and Landslide Repair, Master of Engineering Report, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, May 12, 72p.
- LANGHORST, O. S., SCHAT B. J., DE WIT, J. C. W. M., BOGAARDS, P. J., ESSLER, R. D., and MAERTENS, J., 2007. Design and Validation of Jet Grouting for the Amsterdam Central Station. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE). IOS Press, Madrid, Spain, pp.18-21.
- LESNIK, M., 2001. Methods to Determine the Dimension of Jet-Grouted Bodies. Proceedings of the 14th Young Geotechnical Engineers Conference. Plovdiv, Bulgaria, pp.363-371.
- LEUNG, Y. F., KLAR, A., and SOGA, K., 2010. Theoretical Study on Pile Length Optimization of Pile Groups and Piled Rafts. *J Geotech Geoenviron*, 136(2): 319-330.
- LIANG, F. Y., CHEN, L. Z., and SHI, X. G., 2003. Numerical Analysis of Composite Piled Raft with Cushion Subjected to Vertical Load. *Comput Geotech.*, 30(6): 443-453.
- MAERTENS, J., and MAEKELBERG, W., 2001. Special Applications of the Jet Grouting Technique for Underpinning Works. Proceedings of the 15th ICSMFE. Istanbul, Turkey pp.1795-1798.
- MIKI, G., and NAKANISHI W., 1984. Technical Progress of the Jet Grouting Method and Its Newest Type, Proc. Int. Conf. In Situ Soil and Rock Reinforcement, Paris, Oct. 9-11, pp.195-200.
- MODONI, G., and BZOWKA, J., 2012. Analysis of Foundations Reinforced with Jet Grouting. *J Geotech Geoenviron*, 138(12): 1442-1454.
- MODONI, G., CROCE, P., and MONGIOVI, L., 2006. Theoretical Modelling of Jet Grouting. *Geotechnique*, 56(5): 335-347.
- MONGIOVI, L., CROCE, P., and ZANINETTI, A., 1991. Analisi Sperimentale Di Un Intervento Di Consolidamento Mediante Gettiniezione. Il Convegno Nazionale Dei Ricercatori Del Gruppo Di Coordinamento Degli Studi Di

- Ingegneria Geotecnica Del CNR. Associazione Geotecnica Italiana, Ravello, Italy, pp.101-118.
- MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C., and ANDERSON-COOK, C. M., 2009. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley, 892p.
- NAKANISHI, K., and TAKEWAKI, I., 2013. Optimum Pile Arrangement in Piled Raft Foundation by Using Simplified Settlement Analysis and Adaptive Step-Length Algorithm. *Geomech Eng.*, 5(6): 519-540.
- OCHMANSKI, M., MODONI, G., and ZOWKA, J., 2015. Prediction of the Diameter of Jet Grouting Columns with Artificial Neural Networks. *Soils Found.*, 55(2): 425-436.
- POPA, A., 2001. Underpinning of Buildings by Means of Jet-Grouted Piles. *Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement*. Helsinki, Finland, pp.221-227.
- PRADEEP, G., 2008. Response Surface Method. VDM Verlag Publishing, Saarbrücken, Germany, 309p.
- REUL, O., and RANDOLPH, M. F., 2004. Design Strategies For Piled Rafts Subjected To Nonuniform Vertical Loading. *J Geotech Geoenviron.*, 130(1): 1-13.
- RUSSO, G., and VIGGIANI, C., 1998. Factors Controlling Soil-Structure Interaction For Piled Rafts. *Proc, Int Conf On Soil-Structure-Interaction in Urban Civil Engineering*, Darmstadt Univ. of Technology, Darmstadt, Germany, pp.297-321.
- SAGLAMER, A., DUZCEER, R., GOKALP, A., and YILMAZ, E., 2001. Recent Applications of Jet Grouting for Soil Improvement in Turkey. *Proceedings of the 15th ICSMGE*. Istanbul, Turkey, pp.1839-1842.
- SCHANZ T., 1998. Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien. Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany, 290p.
- SHAHU, J. T., 2006. Non-Uniform Granular Pile-Mat Foundations, Analysis and Model Tests. *Geotech Geol Eng.*, 24(4): 1065-1087.
- SHARMA, V. J., VASANVALA, S. A., and SOLANKI, C. H., 2014. Behaviour of Load-Bearing Components of a Cushioned Composite Piled Raft Foundation Under Axial Loading. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 22(4): 25-34.
- SHEN, S. L., WANG, Z. F., HORPIBULSUK, S., and KIM, Y. H., 2013. Jet Grouting with a Newly Developed Technology, The Twin-Jet method. *Eng. Geol.*, 152(1): 87-95.
- SHIBAZAKI, M., and OHTA, S., 1982. A Unique Underpinning of Soil Solidification Utilizing Super High-Pressure Liquid Jet. *Proceedings of the Conference of Grouting in Geotechnical Engineering*. American Society of Civil Engineers, New Orleans, Louisiana, United States, pp.680-693.
- TORNAGHI, R., and PETTINAROLI, A., 2004. Design and Control Criteria of Jet Grouting Treatments. *Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France, pp.295-319.
- WANG, Z. F., SHEN, S. L., HO, C. E., and KIM, Y. H., 2013. Investigation of Field-Installation Effects of Horizontal Twin-Jet Grouting in Shanghai Soft Soil Deposits. *Can Geotech J.*, 50(3): 288-297.

- WANG, Z. F., SHEN, S. L., and YANG, J., 2012. Estimation of the Diameter of Jet-Grouted Column Based on Turbulent Kinematic Flow Theory. Proceedings of the Conference on Grouting and Deep Mixing 2.: ASCE Geotechnical Special Publication, New Orleans, Louisiana, United States. pp.2044-2051.
- WHITCOMB, P. J., and ANDERSON, M. J., 2004. RSM Simplified, Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments. Taylor, New York & Francis, 320p.
- WRIGHT, S. J., and REESE, L. C., 1977. Drilled Shaft Design and Construction Guidelines Manual, Construction of Drilled Shafts and Design for Axial Loading. U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 190p.
- XANTHAKOS, P. P., ABRAMSON, L. W., and BRUCE D. A., 1994. Ground Control and Improvement. John Wiley & Sons, New York, USA. 178p.
- YAHIRO T., and YOSHIDA H., 1973. Induction Grouting Method Utilizing High Speed Water Jet. Proc, VIII Int Conf Soil Mechanics and Foundation Engineering, USSR National Society, Moscow, Russia, pp.402-404.
- ZANGENEH, N., AZIZIAN, A., LYE, L., and POPESCU, R., 2002. Application of Response Surface Methodology in Numerical Geotechnical Analysis. 55th Canadian Society for Geotechnical Conference. Canadian Society, Hamilton, Ontario, Canada. pp.1-8.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İsmail Hakkı SARAÇ
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri Ve Tarihi : Şanlıurfa / 20.05.1983
Telefon : 532 740 74 22
e-mail : ismailhakkisarac@gmail.com

EĞİTİM	Adı, İlçe, İl	Yıl
Lise	Şanlıurfa Anadolu Lisesi, Merkez, Şanlıurfa	2001
Üniversite	Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balcalı, ADANA	2008
Yüksek Lisans:	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Merkez /Şanlıurfa	2017

İŞ DENEYİMLERİ

2006 – 2007	Güney Toroslar Yapı denetim	Proje Kontrol Elemanı
2007 – 2008	Vera Ltd. Şti.	Proje Yöneticisi
2008 – 2009	Surlu İnşaat Mühendislik Ltd. Şti	Şantiye Şefi
2010 – 2011	Tuyat Mimarlık Mühendislik	Şirket Ortağı
2011 – Devam	Hidrogrup SYDF	Proje Koordinatörü

YABANCI DİLLER

İngilizce - Orta
Almanca - Az

YAYINLAR

ALGIN H.M., EKMEN A.B., YENMEZ L. ve SARAÇ İ.H., 2017. The Shallow Foundation Underpinning with Jet Grouting, First Morris Bank, Morristown, New Jersey, ICOCEE, Cappadocia, Nevsehir, Turkey.