

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEMİRYOLU ALTYAPISININ JET ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilüfer KÜÇÜKALİ

**AĞUSTOS 2008
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


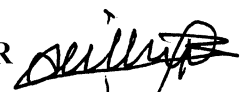

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMİRYOLU ALTYAPISININ JET ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE
İYİLEŞTİRİLMESİ

İnşaat Mühendisi Nilüfer KÜÇÜKALİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.08.2008
Tezin Savunma Tarihi : 10.09.2008

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN 
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER 
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fikri BULUT 

Enstitü Müdürü V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında sırasıyla zemin iyileştirme teknikleri, enjeksiyon kavramları, kuralları ve sitemi, enjeksiyon malzemesi türleri, karışım tasarımı ve kontrol denemesi, ekipman ve kontrol sistemleri, jet enjeksiyonu, jet enjeksiyon yönteminin kullanıldığı vaka çalışması verilmiştir.

Tezin her aşamasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN' a teşekkür ederim.

Tezimin konusu kapsamındaki verilere ulaşmamdaki yardımlarından dolayı TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü Varyantlar Şubesi'ne teşekkürlerimi borç bilirim. Son olarak da tez çalışmam sırasında gerek destek gerekse teşviklerinden dolayı babam İnş.Yük. Müh Adnan KULEYİN, eşim Jeoloji Müh. Özgür KÜÇÜKALİ ve İnş. Yük. Müh. Ercan GÜZELLER' e ve bugünlere gelmemde büyük katkısı olan aileme çok teşekkür ederim.

Nilüfer KÜÇÜKALİ
TRABZON, 2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Stabilizasyon.....	2
1.2.1. Mekanik Stabilizasyon	3
1.2.2. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon	5
1.2.2.1. Kireç ile Stabilizasyon.....	5
1.2.2.2. Çimento ile Stabilizasyon.....	5
1.2.2.3. Uçucu Kül ile Stabilizasyon	7
1.2.2.4. Bitüm ile Stabilizasyon.....	7
1.2.3. Derin Sıkıştırma.....	8
1.2.3.1. Dinamik Kompaksiyon.....	8
1.2.3.2. Patlama ile Sıkıştırma	9
1.2.4. Vibrokompaksiyon	10
1.2.5. Düşey Drenler	11
1.2.5.1. Kum Drenler	11
1.2.5.2. Bant Drenler	11
1.2.6. Elektriksel Metotlar	12
1.2.6.1. Elektro-Osmoz.....	12
1.2.6.2. Elektronik Zemin Stabilizasyonu	12
1.2.7. Termik Metotlar.....	12
1.2.7.1. Isıtma ile Stabilizasyon.....	12
1.2.7.2. Dondurma ile Stabilizasyon.....	13

1.2.8.	Ön Yükleme ile Sıkıştırma	14
1.2.9.	Taş Kolonlar	15
1.2.10.	Enjeksiyon	17
1.2.11.	Kavramsal Tasarım.....	17
1.2.12.	Zemin Mühendisliğinde Enjeksiyon Kullanımı	18
1.2.13.	Zemin Mühendisliğinde Enjeksiyon Türleri.....	19
1.2.13.1.	Permeasyon (Emdirme) Enjeksiyonu	20
1.2.13.2.	Kaya Enjeksiyonu.....	20
1.2.13.3.	Çatlatma Enjeksiyonu.....	20
1.2.13.4.	Kompaksiyon Enjeksiyonu.....	21
1.2.13.5.	Jet Enjeksiyonu.....	22
1.2.13.6.	Kompansasyon Enjeksiyonu.....	22
1.2.14.	Enjeksiyonun Uygulanabilirlik Tayini	23
1.2.15.	Etkili Enjeksiyonu Etkileyen Faktörler	23
1.2.16.	Risk Analizi	24
1.2.17.	Arazide Sağlık ve Güvenlik Koşulları.....	25
1.3.	Enjeksiyon Kavramları, Kuralları ve Sistemi.....	26
1.4.	Enjeksiyon Tekniği ve Türleri.....	26
1.5.	Enjeksiyon Uygulamalarında Gözlemsel Yaklaşımın Kullanımı.....	30
1.6.	Enjeksiyon Sisteminin Bileşenleri.....	30
1.7.	Enjeksiyon Uygulamasının Amaçları ve Tasarımı.....	30
1.8.	Arazi Seçimi	31
1.9.	Enjeksiyon Testleri ve Arazi Denemeleri.....	32
1.10.	Enjeksiyon Malzemesi Türleri.....	32
1.11.	Enjeksiyon Malzemesinin Yerleştirilmesi.....	33
1.11.1.	Tube-a-Manchette (TaM)	34
1.11.2.	Sondaj Contası (Packer)	35
1.12.	Enjeksiyon Süreci	36
1.12.1.	Delme Sistemi.....	36
1.12.2.	Delme Modeli ve Sondaj Deliği Tasarımı	38
1.12.3.	Enjeksiyon Sırası	38
1.12.4.	Enjeksiyon Basıncı	39
1.13.	Enjeksiyon Malzemesi Türleri, Karışım Tasarımı ve Kontrol Denemesi	39

1.13.1.	Enjeksiyon Malzemesi.....	39
1.13.2.	Enjeksiyon Malzemelerinin Sınıflandırılması	40
1.13.2.1.	Çimento Tabanlı Enjeksiyon Malzemeleri	42
1.13.2.2.	Silikat Tabanlı Enjeksiyon Malzemeleri	44
1.13.2.3.	Reçineler	44
1.13.2.4.	Diğer Enjeksiyon Malzemeleri	45
1.13.3.	Enjeksiyon Karışımı Tasarımı	46
1.13.4.	Enjeksiyonun Test Edilmesi	47
1.14.	Ekipman ve Kontrol Sistemleri	47
1.14.1.	Delme Ekipmanı	48
1.14.2.	Karıştırma ve Enjeksiyon Malzemesi Hazırlama	48
1.14.2.1.	Depolama.....	48
1.14.2.2.	Kümelenme ve Karıştırma.....	48
1.14.2.3.	Kontrol Testleri.....	49
1.14.3.	Pompalama ve İletim	49
1.14.4.	Enjeksiyon ve Yerleştirme.....	49
1.14.5.	İzleme, Kontrol ve Test Etme	50
1.15.	Jet Enjeksiyonu.....	51
1.15.1.	Tarihsel Gelişimi	51
1.15.2.	Fiziksel Prensipler	52
1.15.3.	Jet Enjeksiyon Tesisi ve Ekipmanı.....	54
1.15.4.	Jet Enjeksiyon Uygulamaları.....	57
1.15.5.	Jet Enjeksiyonu Sınırlamaları.....	58
1.15.6.	Jet Enjeksiyon Teknikleri	58
1.15.6.1.	Tekli Jet Sistemi (JET1)	59
1.15.6.2.	İkili Jet Sistemi (JET2)	59
1.15.6.3.	Üçlü Jet Sistemi	60
1.15.7.	Jet Enjeksiyon Sistemlerinin Karşılaştırılması	61
1.15.8.	Çalışma Parametreleri.....	63
1.15.8.1.	Basınç	63
1.15.8.2.	Enjeksiyon Harcı Dozajı.....	64
1.15.8.3.	Dönme ve Çekme Hızı	64
1.15.8.4.	Nozzlelar.....	67

1.15.9.	Jet Enjeksiyonu Kolonlarının Çeşitli Zeminlerde Teşkili	68
1.15.9.1.	Kohezyonlu Zeminler	69
1.15.9.2.	Kohezyonsuz Zeminler	69
1.15.10.	Uygulama Sonrası Zeminin Fiziksel Özellikleri	71
1.15.11.	Jet Enjeksiyon Uygulaması Avantajları ve Dezavantajları	73
1.15.12.	Jet Enjeksiyonu Tasarımı.....	74
1.16.	Kolon Tasarımı	75
1.17.	Uygulamanın Başarısını Belirleyen Etmenler	78
1.17.1.	Zemin-Çimento Karışımı Özellikleri.....	78
1.17.2.	Kolonların Bütünlüğü ve Boyu.....	80
1.17.3.	Kolonların Çapı	81
1.17.4.	Kolonların Geçirimsizliği	82
1.17.5.	Kolonların Taşıma Gücü	82
1.17.6.	Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Etkileyen Diğer Etmenler	83
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	84
2.1.	Ulukışla-Gümüş Arasında Meydana Gelen Göçüklerin İncelenmesi.....	84
2.1.1.	Ön Bilgi	84
2.1.2.	İnceleme Anınının Genel Jeolojisi.....	87
2.1.3.	Geoteknik Etüdler	87
2.1.4.	Yapılan Çalışmalar	89
3.	İRDELEME	93
4.	SONUÇLAR.....	106
5.	KAYNAKLAR.....	108
6.	EKLER	110

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Zemin iyileştirme teknikleri, zayıf yeraltı koşullarına sahip alanlardan faydalanmayı sağlaması ve bu zayıf yeraltı koşullarına rağmen ihtiyaç duyulan projelerin tasarımına ve inşasına olanak tanınması nedeniyle yeni inşaat projelerinde giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Zemin ıslahı, uygulandığı zeminin mekanik özelliklerini değiştirmeyi ve iyileştirmeyi hedefler. Bu kapsamda zeminin özellikle basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri artarken, geçirgenliği azalır. Bu sonuçlara ulaşmada en başarılı sistemlerden biri de Jet Enjeksiyonu metodudur.

Jet Enjeksiyonu sistemi, özünde diğer zemin iyileştirme tekniklerinden farklılık gösterir. Bu sistem zemin yapısını tamamen bozar ve daha sonra sertleşecek homojen bir zemin oluşturmak için yüksek basınç altında zeminin harçla karışmasını sağlar. Jet Enjeksiyonu tekniği geçirgenlik ve dane çapı dağılımına bakılmaksızın çok farklı zeminlerin iyileştirilmesinde başarıyla kullanılabilir. Bu sebepten bu tekniğin kullanıldığı alanlar hızla artmaktadır.

Bu tez, yerinde uygulanan bir zemin iyileştirme tekniği olan Jet Enjeksiyonun tarihsel, teorik ve pratik geçmişini kapsamaktadır. Buna ilaveten bu tekniğin türleri, tasarımı, uygulaması, parametreleri, uygulama alanları, avantajları ve dezavantajları bu çalışma dahilinde ele alınmıştır. Son olarak zayıf zemin koşulları yüzünden oturma yapan bir demiryolu altındaki Jet Enjeksiyonu uygulaması vaka çalışması kapsamında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirmesi, enjeksiyon çeşitleri, jet enjeksiyon.

SUMMARY

Soil Improvement by Jet Grouting

Soil improvement techniques are used increasingly for new projects to allow utilization of sites with poor subsurface conditions and to allow design and construction of needed projects despite poor subsurface conditions. Soil improvement modifies and increases the mechanical characteristics of the treated soil, most notable its compressive strength and modulus of elasticity, while simultaneously decreases its permeability. The jet grouting method is one of the most successful systems to achieve these results.

Jet grouting system differs substantially from the other ground improvement techniques – it breaks up the soil structure completely and performs deep soil mixing to create a homogeneous soil, which in turn solidifies. The jet grouting technique can be used in treating a wide range of soil types regardless of permeability or grain size distribution. Therefore the application fields of jet grouting are rapidly increasing.

This thesis covers the historical, theoretical and practical background of an in situ ground modification technique, jet grouting. In addition its types, design, execution, parameters, application fields, advantages and disadvantages are presented in this study. Finally this thesis also discusses a jet ground application performed under a railway subjected to differential settlement due to poor soil conditions.

Key Words: Soil stabilization, grouting techniques, jet grouting.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sayfa No</u>	
Şekil 1.	Zemin stabilizasyon yöntemleri 3
Şekil 2.	Mekanik stabilizasyon için en çok kullanılan aletlerin şematik çizimleri..... 4
Şekil 3.	Çimento ile stabilizasyon uygulaması..... 6
Şekil 4.	Uçucu kül ile iyileştirilmiş yol yapımı 7
Şekil 5.	Dinamik kompaksiyon uygulaması 9
Şekil 6.	Patlatma ünitesi 10
Şekil 7.	Vibrokompaksiyon uygulaması..... 10
Şekil 8.	Önyükleme ile sıkıştırma örneği 15
Şekil 9.	Oturmanın zamanla değişimi..... 15
Şekil 10.	Taş kolon uygulaması..... 16
Şekil 11.	Enjeksiyon türleri 19
Şekil 12.	Kaya Enjeksiyonu..... 19
Şekil 13.	Düşey yönde çatlakların oluşumu ve yatay sıkıştırma 21
Şekil 14.	Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi..... 20
Şekil 15.	Jet enjeksiyonu uygulamasına ait şematik çizim..... 22
Şekil 16.	Enjeksiyon kuralları ve yöntemleri 26
Şekil 17.	Tube a' Manchette sisteminin detayı..... 35
Şekil 18.	Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması 40
Şekil 19.	Jet enjeksiyonu oluşum şeması..... 52
Şekil 20.	Jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulmuş paneller (yüksek çimentolu/düşük bentonitli çamur)..... 53
Şekil 21.	Jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulmuş paneller (düşük çimentolu çamur/yüksek bentonitli 53
Şekil 22.	İdeal jet enjeksiyonu tesisi 54
Şekil 23.	Jet enjeksiyonu ekipmanı 55
Şekil 24.	Yüksek basınç pompası 56
Şekil 25.	Delgi makinesi..... 56
Şekil 26.	Delgi makinesi parçaları..... 57
Şekil 27.	Jet enjeksiyonu uygulamaları 58
Şekil 28.	Jet 1 uygulaması 59

Şekil 29.	Jet 2 uygulaması	60
Şekil 30.	Jet 3 uygulaması	60
Şekil 31.	Oluşturulan kolon çapı ve basıncı arasındaki ilişki	64
Şekil 32.	Tahmini kolon çapı ile tijin çekim hızı arasındaki ilişki	66
Şekil 33.	Tek delikli nozzle	67
Şekil 34.	Nozzle resmi	68
Şekil 35.	Jet enjeksiyon yöntemi ile oluşturulmuş kolonlar	68
Şekil 36.	İyileştirilmiş zeminde meydana gelen basınç mukavemeti artışı	72
Şekil 37.	Enjekte edilen çimento miktarı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki	73
Şekil 38.	Jet enjeksiyonu kolonlarında oluşan kayma yüzeyi	76
Şekil 39.	Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması	78
Şekil 40.	Jet enjeksiyon kolonlarından alınan karot örnekleri	79
Şekil 41.	Karot numunelerinin basınç mukavemetinin ölçümü	79
Şekil 42.	Integrity test uygulaması	80
Şekil 43.	Kolon çapı ölçümü	81
Şekil 44.	Basınç ve yükleme deneyi uygulaması	82
Şekil 45.	Basınç ve yükleme deneyi uygulaması	82
Şekil 46.	İnceleme alanının yer buldu haritası	85
Şekil 47.	İnceleme alanının resmi	86
Şekil 48.	Ulukışla-Gümüş arası 1000 m'lik bölümdeki jet enjeksiyon yerleşim planı	90
Şekil 49.	İslah gerçekleştirilecek alanda jet enjeksiyon uygulaması	91
Şekil 50.	Jet enjeksiyon uygulaması çalışmaları	91
Şekil 51.	Deneme kolonu	92
Şekil 52.	Jet enjeksiyon uygulamasından sonra sahanın durumu	92
Şekil 53.	İdealize zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri ve SPT(N) –derinlik değişimi	94
Şekil 54.	SPT(N) değeri ve plastisite indisine bağlı olarak f_l değerinin hesaplanması	95
Şekil 55.	İslah öncesi konumu dolgu orta noktası düşey gerilmeler	98
Şekil 56.	İslah öncesi konumu dolgu kenar noktası düşey gerilmeler	98
Şekil 57.	İslah öncesi konumu jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler	99
Şekil 58.	İslah sonrası konumu dolgu orta noktası düşey gerilmeler	99
Şekil 59.	İslah sonrası konumu dolgu kenar noktası düşey gerilmeler	100

Şekil 60.	Islah sonrası konumu jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler.....	100
Şekil 61.	Islah öncesi ve sonrası dolgu orta noktası düşey gerilmeler.....	101
Şekil 62.	Islah öncesi ve sonrası dolgu kenar noktası düşey gerilmeler.....	101
Şekil 63.	Islah öncesi ve sonrası jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler.....	102
Şekil 64.	Islah öncesi düşey gerilme.....	103
Şekil 65.	Islah sonrası düşey gerilme dağılımı	104

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Enjeksiyon yöntemlerinin kullanım yerleri	24
Tablo 2. Enjeksiyon teknikleri ve ilgili zemin türleri	27
Tablo 3. Farklı enjeksiyon türlerinin uygulanması için gerekli bilgiler	29
Tablo 4. Farklı delme metotları ve teknikleri	37
Tablo 5. Sondaj delikleri arasındaki mesafe tahminleri.....	38
Tablo 6. Farklı püskürtme/jet sistemlerinin karşılaştırılması	62
Tablo 7. Enjeksiyon debisi / nozzle ilişkisi	66
Tablo 8. Jet enjeksiyonu çalışma parametreleri.....	70
Tablo 9. Zemin çeşitleri ve beklenen permeabilite katsayıları	71
Tablo 10. Çeşitli uygulamalarla elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değeri.....	72
Tablo 11. Granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri	77
Tablo 12. Kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri	77
Tablo 13. Numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları.....	88
Tablo.14. İşletim parametreleri.....	89
Tablo 15. Sondaj esnasında geçilen zemin tabakaları	94
Tablo 16. 0.0-20.0m Orta katı siltli-kumlu kil mühendislik parametreleri.....	95
Tablo 17. Orta sıkı siltli-killi çakıl tabakası için belirlenen mühendislik parametreleri	96
Tablo 18. İyileştirme sonrası jet enjeksiyon için mühendislik parametreleri	96
Tablo 19. İslah öncesi düşey gerilmeler	97
Tablo 20. İslah sonrası düşey gerilmeler	97
Tablo 21. Kolon boyları	105

SEMBOL DİZİNİ

- A_b : Kolon kesit alanı
 S_u : Drenaj sız kayma mukavemeti
 ϕ : İçsel sürtünme açısı
 k : Permeabilite katsayısı
 K_0 : Yatay toprak basıncı katsayısı, sükunette
 K_S : Yatay yatak katsayısı
 L : Kolon uzunluğu
 N_q^* : Taşıma gücü faktörü, derin temeller için
 q_u : Azami taşıma kapasitesi
 z : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik
 α : Adhezyon için azaltma faktörü
 δ : Zemin-kolon sürtünme açısı
 γ : Zemin yağ birim hacim ağırlığı
 α_{VO} : Düşey basınç
 ξ : Kolon uç mukavemeti azaltma faktörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat mühendisliği projeleri genelde mevcut kentsel gelişimden dolayı kısıtlı alanlarda, aşırı nüfuslu bölgelerde veya başka faktörlerden dolayı konumu önceden belirlenmiş yerlerde tasarlanır ve gerçekleştirilir. İnşaat sahası olarak kullanılabilen bu kısıtlı alanlar üzerine yapılacak çeşitli inşaat mühendisliği yapılarının gerçekçi ve ekonomik temel ve temel zemini mühendislik tasarımları, ancak detaylı bir geoteknik modelleme sonucu gerçekleştirilebilir. Bu modelleme sonucunda, bazı durumlarda hedeflenen projenin yüklerini desteklemek için alttaki zayıf zeminin iyileştirilmesi gerekebilir. Herhangi bir yük etkisi altında kalarak, yenilme riski taşıyan zeminlerde oluşabilecek deformasyonları engellemek için çok çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır.

Zemin iyileştirmesi, inşaat mühendisliği alanında uygulanmakta olan en eski yöntem olsa da, hala çok ilgi çeken ve sürekli gelişim gösteren bir tekniktir. Bundan yaklaşık üç bin yıl önce, Babil Tapınağının yapımında zemin iyileştirmesi kullanılmaktaydı. Çinlilerin ise geçmişte odun kullanarak zemin iyileştirdikleri bilinmektedir. Geçen yüzyılda ise herhangi bir yapı inşası sırasında mevcut zeminin kaldırılarak yerine iyileştirilmiş zemin getirilmesi ekonomik olmamakla beraber çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdi. Günümüzde ise zemin iyileştirmesinde giderek artan bir şekilde enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Zemin iyileştirmesinde, zeminin yetersiz taşıma gücü zemin iyileştirme yöntemleri ile artırılarak yapı yüklerini karşılamaya yeterli hale getirilmektedir. Zemin iyileştirmesi, zemin mekanik özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda zeminin özellikle basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri artarken, geçirgenliği azalmaktadır. Bu sonuçlara ulaşmada en başarılı sistemlerden biri de Jet Enjeksiyonu metodudur.

Jet Enjeksiyon metodu yüksek basınçla nozzellardan enjekte edilen çimento harcı ile zeminin kesilmesi ve karıştırılması evrelerini içerir. Bu yöntem killerden iri daneli çakıllara kadar, dane çapı dağılımı ve boşluk oranından bağımsız olarak her türlü zemine uygulanabilir. Jet Enjeksiyonu yöntemi yaklaşık olarak 15-20 yıldır ülkemizde

uygulanmakta olup diğer iyileştirme yöntemlerinden daha hızlı, güvenilir ve ekonomik bir çözüm alternatifidir.

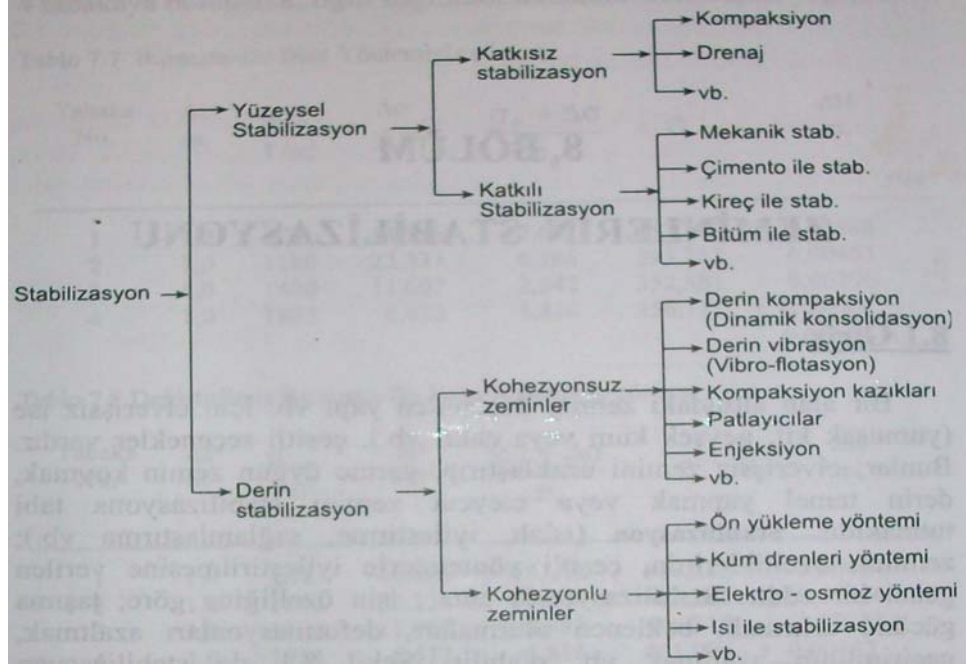
Bu tez çalışmasında sırasıyla zemin iyileştirme teknikleri, enjeksiyon kavramları, kuralları ve sitemi, enjeksiyon malzemesi türleri, karışım tasarımı ve kontrol denemesi, ekipman ve kontrol sistemleri, jet enjeksiyonu, jet enjeksiyon yönteminin kullanıldığı vaka çalışması verilmiştir.

1.2. Stabilizasyon

Zeminin mevcut kapasitesinin, üzerindeki yapıyı taşıyacak yeterlikte olmaması durumunda yapabileceğimiz problemlili zemini olduğu gibi kabul etmek, zemini kaldırıp uygun zeminle değiştirmek ya da zemini iyileştirmektir. İlk iki yöntemde külfetli ve ekonomiklikten uzaktır. Bu bölümde ben üçüncüsü olan zemin iyileştirmesi konusu üzerinde duracağım.

Her yapının zemin durumu ve problemi farklıdır bu nedenle de zemin ve yer altı suyu durumuna bakılarak zemin iyileştirme yöntemlerine karar verilebilir. Aşağıda yazılı olan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri veya birkaçı karşılaştığımız bir zemin probleminin çözümünde kullanılabilir. Kullanacağımız zemin iyileştirme yöntemini tespit etmeden önce çok sayıda arazi ve laboratuvar deneyi yapmamız, zemin yapısı ve yeraltı suyu durumunu belirlememiz gerekir. Örneğin problemlili bir zemin koşulunda dinamik kompaksiyon, kimyasal ve diğer enjeksiyon sistemleri, vibrokompaksiyon ve ağırlık düşürme yöntemleri çözüm olmayacaktır. Kum ve çakıllardan oluşan problemlili bir zeminde ise ön yükleme, taş kolon yöntemleri uygun olmayabilecektir [1].

Stabilizasyon yöntemleri şekil 1'de gösterilmiştir[2].



Şekil 1. Zemin stabilizasyon yöntemleri

1.2.1. Mekanik Stabilizasyon

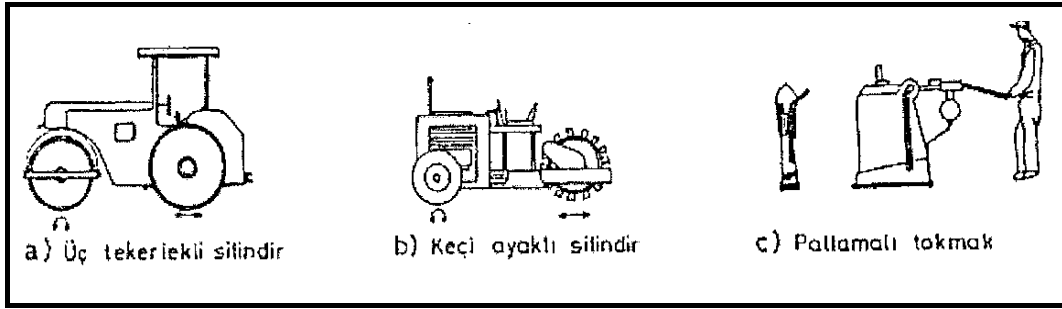
Mekanik stabilizasyon dolgu ya da yol üst yapısının silindir vasıtasıyla ince tabakalar halinde sıkıştırılarak içindeki boşlukların azaltılması yani havanın vibrasyonlu ya da vibrasyonsuz sıkıştırıcılar kullanılarak dışarı atılmasıdır. Hava dışarı atılırken su muhtevasında bir değişiklik meydana gelmediğinden zeminin doygunluğu artar. Bu tekniğin uygulaması yapılırken aşağıdaki özelliklere göre değişecektir.

- Zemin tipine
- Zemin derecelenmesine
- Su muhtevasına
- Malzeme miktarına
- Sıkıştırılacak tabakanın kalınlığına

Su muhtevası belli olan zemininde mekanik kompaksiyon sonrasında daneler birbirine yaklaşacak ve zeminin kuru birim hacim ağırlığı artacaktır. Zemin içinde kalan hava iyice azalana kadar devam edecek ve bir müddet sonra artık zeminin hacminde bir değişme olmayacaktır. Su muhtevası düşük ise zeminin sıkışması zorlaşacaktır. Zeminin su muhtevası artırılarak zeminin yumuşaması sağlandığından daha kolay sıkışması mümkün olacaktır.

Laboratuarda yapılan standart proktor ve modifiye proktor deneyi ile zeminin optimum su muhtevası ve buna karşılık gelen kuru birim hacim ağırlığının olduğu grafikler kullanılabilir.

Mekanik stabilizasyon için en çok kullanılan aletlerin şematik çizimleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Mekanik stabilizasyon için en çok kullanılan aletlerin şematik çizimleri

Kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında en etkili olanı keçi ayaklı silindiridir. İyi bir sıkıştırma için her tabakada en az 24 geçiş yapılmalı ilk geçişte alçak kısımlar sonrasında orta ve yüksek kısımlar sıkıştırılmalıdır ve sıkıştırılan tabaka kalınlığı kullanılan keçi ayak kalınlığından maksimum 50 mm fazla olmalıdır. Bu silindirdeki etkili temas basıncı 1500–7500 Kn/m² arasında olabilir.

Tekerlekli silindirler, inişli çıkışlı arazilerde ve kumlu killi zeminlerin sıkıştırılmasında kolaylık sağlar. Bu silindirlerde etkili temas basıncı 300/400 Kn/m² kadar yüksek olabilirler. Tekerlekli silindirler sıkıştırma sırasında dikey titreşimler de uygulayabilirler. Bu silindirler ince zeminlerde kullanılırken sıkıştırma esnasında zemine düzgün yayılı bir ağırlık uygulayamazlar.

Lastik tekerlekli silindirler zemine 100 tona kadar yük aktartabilirler. Killi zeminler için uygun değildir. Kumlu ve siltli zeminlerde etkili sonuçlar vermektedir. Bu silindirler de etkili temas basıncı 600/700 kN/m²’ye ulaşmaktadır. Bu silindirler kullanılarak 125-130 mm kalınlığındaki zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığa ulaşması için 4-8 geçiş yeterlidir.

Vibratörlü silindirler iri daneli zeminlerin stabilizasyonunda hızlı ve verimlidir. Tabakalı kalınlığı silindirin ağırlığına ve vibrasyon frekansına göre değişir. Frekansı yüksek ağırlığı az olan silindirler ince dolgularda, frekansı az ağırlığı fazla olan silindirler

1.2.2. Katkı Maddeleri ile Stabilizasyon

Katkı maddeleri ile stabilizasyon kireç, çimento, uçucu kül ve bitüm ile yapılabilir.

1.2.2.1. Kireç ile Stabilizasyon

Kireç ile stabilizasyon killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Zemine kirecin ya da kireç tozunun karıştırılması ile kimyasal reaksiyon oluşur kil sertleşerek plastik halden katı hale gelir. Kireç ile stabilizasyon da kalsiyum hidroksit ya da kalsiyum magnezyum hidroksit ve magnezyum oksit karışımları kullanılır. Kohezyonsuz zeminlerde uçucu kül ve diğer katkı maddelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu yöntem ile:

- Plastiklik limiti artar.
- Likit limiti azalır.
- Rötne limiti artar.
- Optimum su muhtevası artar.
- Kuru birim ağırlık azalır.
- Taşıma kapasitesi artar.
- Oturma azalır.

Uygulamanın etkinliğini ölçmek için CBR ve üç eksenli deneyler yapılarak ortaya konmaktadır. Kireç ile stabilizasyon uygulandıktan sonra zemin suyla daha zor parçalanmaktadır. Uygulama dolgularda, yol dolgusunda, derin hendeklerde kullanılır.

1.2.2.2. Çimento ile Stabilizasyon

Çimento, ile stabilizasyon son yıllarda çok kullanılan bir yöntemdir. Özellikle otoyol ve toprak dolgu barajlarda uygulanır. Çimento ile stabilizasyon kumlu ve killi zeminleri güçlendirmek için kullanılabilir, killi zeminler için çimento stabilizasyonu likit limitin 45–50 arasında olması durumu ve plastisite indisinin 25'in altında olması durumunda etkili sonuç verir. Çimento ile stabilizasyonda mevcut zayıf zemine belirli bir çimento-su karışımı (0.5:5) uygulanarak zemin stabilizasyonu yapılmış olur. Böylelikle zeminin taşınıp yerine sağlam zeminin getirilmesine gerek kalmadığından, ekonomik de olmaktadır. Çoğunlukla

çimento içeriği %2 ile %10 arasında olur. Çimentonun oranı iyi ayarlanmalıdır aksi takdirde az olursa uygun karışım oluşmaz, fazla olması durumunda çatlaklar ve büzülme oluşur. Çimento ile stabilizasyonla:

- Serbest basınç dayanımı artar.
- Şişme ve büzülme azalır.
- Donma ve erime dereceleri kontrol edilir.
- Donma derecesini yükseltmektedir.
- Dayanımı artar.

Organik zeminlerde çimento ile stabilizasyon yapılmaz. Ayrıca kalsiyum killerine çimento ile stabilizasyon, sodyum ve hidrojen killerine ise kireç ile stabilizasyon uygulanır. Bu nedenle uygun stabilizasyon için doğru malzeme seçmek gerekir. Şekil 3'de çimento ile stabilizasyon uygulamasına ait resim verilmiştir.



Şekil 3. Çimento ile stabilizasyon uygulaması

1.2.2.3. Uçucu Kül ile Stabilizasyon

Uçucu kül termik santrallerden toz haldeki kömürün yanması sonucunda oluşur. Uçucu kül ile zemin istenilen özellikleri kazanmakta bu sayede atık üründe değerlendirilmiş olmaktadır. Uçucu kül zemin iyileştirmelerinde ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme zemin içindeki boşlukları doldurmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde kireç ve çimento ile birlikte kullanılabilmekte, ayrıca bitümlerle birlikte kullanıldığında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 4’de uçucu kül ile iyileştirme uygulaması verilmiştir.



Şekil 4. Uçucu kül ile iyileştirilmiş yol yapımı

1.2.2.4. Bitüm ile Stabilizasyon

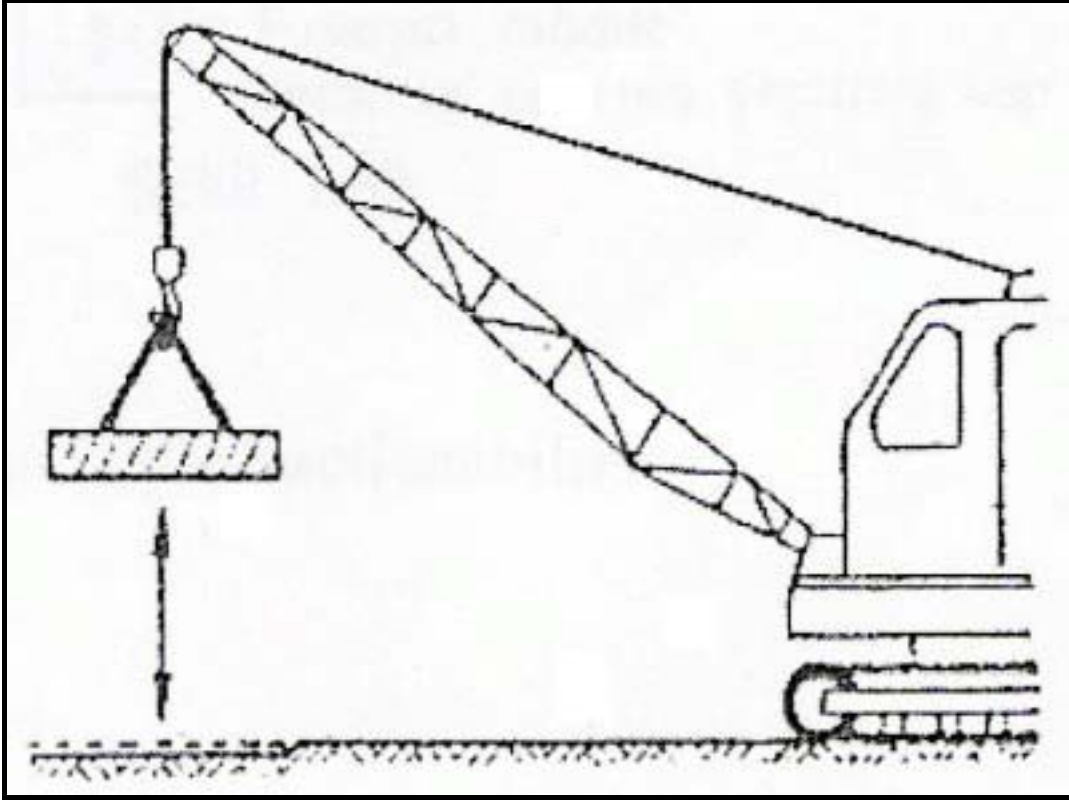
Petrolün buharlaşması ya da damıtılması sonucu elde edilen atık malzemedir. Bitümlü malzeme zemin cinsine ve iklim şartlarına göre seçilir. Bitümlü malzeme su yalıtımında ve daneli zeminlere kohezyon eklenmesinde kullanılır. Su yalıtımı özelliğinden dolayı nemli bölgelerde çok kullanılan bir stabilizasyon malzemesidir. Pahalı bir malzemedir.

1.2.3. Derin Sıkıştırma

Derin sıkıştırma dinamik kompaksiyon, patlatma ile sıkıştırma ve vibrokompaksiyon olarak üçe ayrılır.

1.2.3.1. Dinamik Kompaksiyon

Zemin sıkıştırmada en eski yöntemdir. 10-200 Kg. ağırlığındaki çekiç yaklaşık 40 m. yükseklikten zemine düşürülmesi suretiyle zeminin boşluk oranının azaltılması suretiyle zeminin iyileştirilmesidir. Yöntem birkaç geçişle uygulanır. Her geçişte ağırlık belirlenen yere tekrarlanarak düşürülür. Kompaksiyon noktaları arasındaki mesafe takip eden seferlerde azaltılır ve kompaksiyon önceden sıkıştırılmış noktalar arasına uygulanır. Son seferde (demirleştirme seferi) genellikle düşük enerji ile ağırlaşmış tokmak düşürülerek uygulanır. Amaç tekrar şekil verilen zaten sıkıştırılmış dip katmanlar hariç yüzeysel katmanları sıkıştırmaktır. Dinamik kompaksiyon granüler ve dolgu zeminlerde kullanılır. Uygulamanın yapıldığı yerde yapı olmaması gerekir, yaydığı güçlü titreşim nedeni ile yapılara zarar verebilir. Yöntemin uygulanabilirliği yer altı su seviyesi, kompaksiyon ağı, kompaksiyon sefer sayıları ve sefer aralarındaki zamana bağlıdır. Şekil 5’de dinamik kompaksiyon uygulamasına ait şematik çizim verilmiştir.



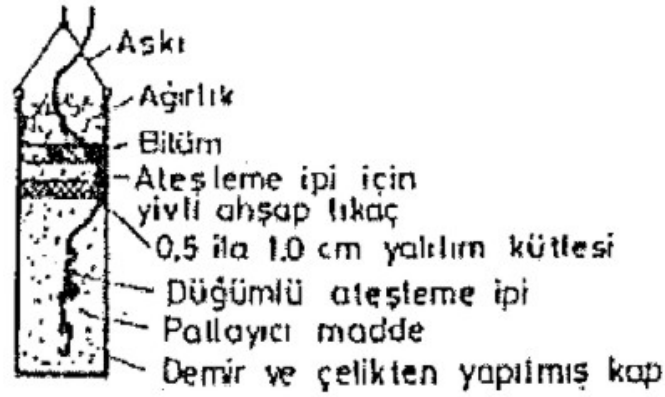
Şekil 5. Dinamik kompaksiyon uygulaması

1.2.3.2. Patlama ile Sıkıştırma

Zemin tabakaları arasında yaklaşık 1/2 ile 3/4 derinliğine yerleştirilen patlayıcılarla şok dalgaları oluşturarak zemin danelerinin küçük parçalara dönüştürülmesi suretiyle zeminin önceki durumuna göre daha kompakt hale getirilme işlemidir. Patlatma sıkıştırması tekniği kısaca borunun yıkanması, iki kapsülün doldurulması, borunun çekilmesi, patlatma kapsülünün sıkılanması, ateşleme yapılması olarak tanımlanabilir.

Patlayıcı madde olarak genellikle amonyum nitrat, TNT ve değişik katkı maddelerinden oluşan bir karışım kullanılır.

Patlama kapsülü yüksekliği çapının 3 veya 4 katı olan bir silindirden oluşmaktadır. Uygun bir derinlik için patlama kapsülünün konstrüksiyonu şekilde gösterilmektedir. Şekil 6'da patlatma ünitesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Patlatma ünitesi

1.2.4. Vibrokompaksiyon

Kalın tabakalı gevşek granüler zeminlerin (58 m'ye kadar) vibratör sondaj ile sıkıştırılmasını sağlayan yöntemdir. Bu iyileştirme tekniği ile iyileştirilecek ideal zemin %10-15' den az silt içeren malzeme, ağırlıklı olarak kaba kumdan oluşan zeminlerdir. Şekil 7'de vibrokompaksiyon uygulaması verilmiştir.



Şekil 7. Vibrokompaksiyon uygulaması

Vibrokompaksiyon kolay uygulanabilmesinden dolayı zamandan da kazanım sağlar. Zemini değiştirme ya da zemini nakil yoluyla uzaklaştırma yapılmasına gerek kalmadığından ekonomiktir. Dinamik kompaksiyon gibi titreşim yapmadığından komşu yapılara zarar vermez.

1.2.5. Düşey Drenler

Drenler vasıtasıyla su toplanır bir drenaj yoluna verilip sahadan uzaklaştırılır, zeminde düşey olarak yerleştirilmiş drenlerde konsolidasyonun hızı suyun düşey yönde drene olma hızı ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla konsolidasyon zamanının kısaltılmasında drenler arasındaki mesafeye bağlıdır. Suyun hızlı drene olması sonucu zeminde de hızlı bir mukavemet kazanımı olur.

Düşey drenler kum drenler ve bant drenler olarak ikiye ayrılır.

1.2.5.1. Kum Drenler

Kum drenler, tabakalı zeminlerde yüksek geçirgenliklerinden dolayı oldukça etkilidirler. Bununla beraber kum drenler su uzaklaştırma sistemleri ile birlikte kullanılırlarsa daha etkili ve ekonomik olurlar. Drenler arası mesafe sahanın büyüklüğüne göre 1-4 metre olabilir. En çok kullanılan 1,5-2,5 metre aralıklardır. Kum drenlerin yüksekliği konsolide olması istenen zemin yüksekliği kadar olmalıdır. 20 metrenin üzerindeki derinliklerde kum drenler ekonomik olmaktadır. En yaygın kullanılan kum dren çapı ise 65 milimetredir. Yöntemde bir dökme borusu gevşek kum içerisine sarsılarak veya çakılarak sokulur. Daha sonra boru sarsma yardımı ile içine kum doldurularak çekilir. Burada zeminin sıkıştırılması hem borunun çakılması sırasında püskürtme, hem de bundan sonraki dinamik etki yardımı ile olur.

1.2.5.2. Bant Drenler

Bant drenler zeminin tipine göre çeşitli sondaj teknikleri (yıkamalı, darbeli sondaj, vibrasyonlu kaplama) kullanılarak inşa edilebilir. Kum drenlerden daha büyük derinliklere yerleştirilebilirler. Çeşitli bant drenleri mevcuttur. Genelde plastik drenaj kanallarının bulunduğu bir çekirdek ve etrafını çevreleyen ince filtre tabakalarından oluşmuşlardır. Bant drenlerin kapasiteleri çeşitlilik göstermekle birlikte kullanılan drenin tipine ve efektif toprak basıncına bağlıdır. Bant drenler genel olarak yer değiştirme metodu ile inşa edilirler. Bant drenler 40-60 metre derinliklere kadar inşa edilebilirler.

1.2.6. Elektriksel Yöntemler

Elektriksel yöntemler elektro-osmoz ve elektronik zemin stabilizasyonu olmak üzere ikiye ayrılırlar.

1.2.6.1. Elektro-Osmoz

Kohezyonlu yumuşak zeminlerde anot ve katot kurularak oluşturulan elektrik alan ile zemindeki suyu direne edilip konsolidasyonun hızlandırılmasıdır. Elektro-osmoz ile zemin suyunun kirliliği temizlenir, mukavemeti artar, konsolidasyonu hızlanır. Zemin içinde oluşturulan doğru akım devresi ile anottan (+) katoda (-) doğru boşluk suyu hareket ettirilir. Katotta biriken su pompa ile tahliye edilir. Sınırlı hacimdeki zemin için uygulanan yöntem konsolidasyon için ekonomik bir yöntemdir.

1.2.6.2. Elektronik Zemin Stabilizasyonu

Elektronik zemin stabilizasyonu elektro-osmozun bir uygulamasıdır. Uygulama sıvılaştıran kumlu zeminlerde enjeksiyon uygulaması ile stabilizasyon yapılamadığı yerlerde kullanılır. Bu işlem için kullanılan kimyasallar silikat, bentonit, alüminyum hidroksit kullanılır. Uygulamanın kullanıldığı zeminler ise kumlu zeminler, oynak, akışkan, yumuşak zeminler ve kazı atıklarıdır.

1.2.7. Termik Yöntemler

Termik yöntemler ısıtma ve dondurma olmak üzere iki adettir.

1.2.7.1. Isıtma ile Stabilizasyon

Zemin ısıtma işlemi zemine bağlı olarak 300–1000 °C arasında bir sıcaklıkla (elektrik akım kullanılarak) ısıtılarak zeminin fiziksel karakteri değiştirilir. Isıtma işlemi zemin taneciklerini bozarak kristalimsi veya camsı ürünler oluşturur. Isıtma işlemi ile killer büyük ölçüde nem almayacak hale gelir. Geçici olarak kesme kuvveti ve deformasyon

modülü artar. Lös zeminlerde de uygulanır sürtünme açıları ve kohezyonlarını artırıp sıkışabilirliğini azaltır. Zemin ısıtma işleminde yakın çevrede bulunan yapılarda dikkate alınmalıdır.

1.2.7.2. Dondurma İle Stabilizasyon

Zemin dondurma işi yaklaşık 100 yıl önce Poetsch tarafından uygulanmıştır. Zemin dondurması arazinin jeolojik ve hidrolojik koşullarından etkilenmektedir. Zemin dondurulmasında % 100 suya doygunluk tercih edilmesine rağmen % 10 olan zeminlerde de bu uygulama yapılabilmektedir. Zeminin dondurulması zemin içine sokulan borular içinden soğuk taşıyıcı akışkan dolaştırılarak zemin suyunun dondurulması esasına dayanır. Dondurma işlemi esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır bunlar: yer altı suyu tuzlu yada kirliyse bu donma noktasını düşürür, içinde çözünmüş tuzların bulunduğu yer altı sularında dondurma işlemi yapılmadan önce kimyasal incelemeler yapılmalı ve donma sıcaklığı önceden belirlenmelidir. Deniz suyunda donma sıcaklığının normal suyun 3 °C derece altında olmasından dolayı sorun yaşanmaz. Donmuş bir zemin tabanı geçirimsiz bir tabaka üzerinde olmalıdır ki yer altı suyu kazı içine sızmasın. Geçirimsiz bir tabaka bulunmuyorsa borulanmaya ve kabarmaya karşı önlem alınmalıdır. Yer altı suyu akış hızı 1,5 m/gün'den fazla olan yerlerde dondurma işlemi etkili olmaz. Bu gibi durumlarda akış hızını azaltacak önlemler alınmalı ya da ikinci bir soğutma sistemi devreye sokulmalıdır. Sıvının daha hızlı sirküle edilmesi ile bu problemin üstesinden gelinebilir. Dondurma ile önceki durumuna göre daha büyük dayanıma sahip ve su geçirimsiz bir zemin elde edilmiş olur.

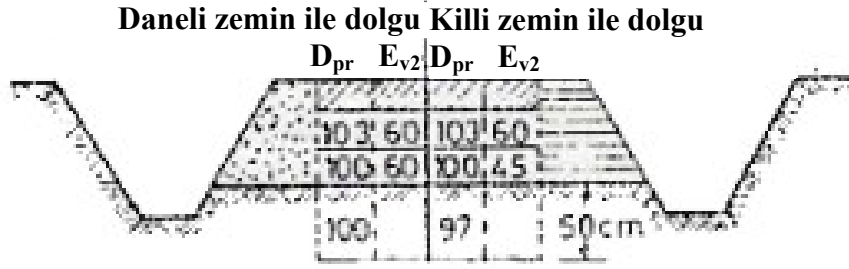
Soğutma maddesi olarak genellikle amonyak ve karbondioksit, soğuk taşıyıcı akışkan olarak da magnezyum klor ve kalsiyum klor kullanılır.

Yöntemin kullanıldığı iri daneli az donmuş zeminlerdeki mukavemeti kontrol eden en önemli faktör daneler arasındaki sürtünme direncidir. Kohezyon ise azalan ısı ile artmakta fakat zaman içinde azalım göstermektedir. Donmuş zeminlerdeki kil malzeme miktarının fazla olması donmamış su miktarının fazla olması demektir. Dolayısıyla killi zeminlerin serbest basınç mukavemeti azalan ısı ile artmaktadır Dondurma işlemini gerçekleştirebilmek için sürekli enerji harcamak gerekmektedir. Bu nedenle acil durumlar için kullanılan yöntem geçici olarak kayma mukavemetini ve deformasyon modülünü artırır.

1.2.8. Ön Yükleme ile Sıkıştırma

Belli derinlikteki su içeren yüksek sıkışabilirlikli normal konsolide killerde, inşaat yapımından sonra meydana gelebilecek büyük çaplı oturmaları engellemek için sürşarj yükü yardımıyla kil zeminin bina inşasından önce yüklenmesidir. Yüzey yükü olarak sonradan kaldırılacak olan çakıl ve kum dolgular kullanılır. Konulan dolgu malzemesinin bir kısmı sıkılaşıma ve yanlara kaçma nedeniyle zemin içine batar ve orda kalır. Yapı bu kum ve çakıl tabakası üzerine inşa edilir.

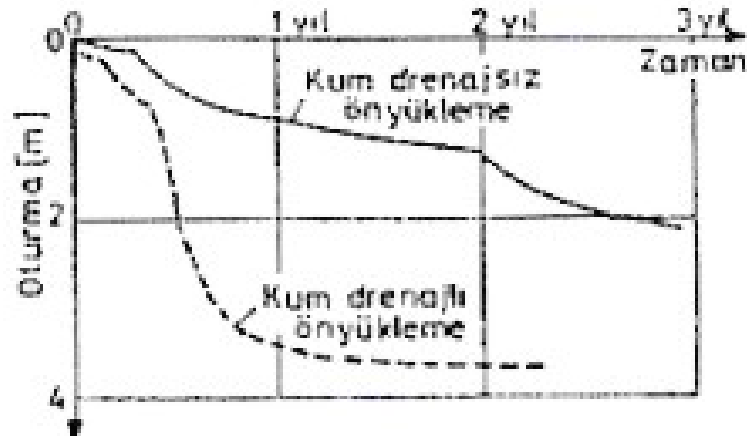
Ön yüklemeden oluşan sıkışma kohezyonsuz zeminlerde boşluk hacminin azalması biçiminde ortaya çıkar ve yük konulduktan hemen sonra tamamlanır. Kohezyonlu zeminlerde ise sıkışma, boşluk suyunun dışarı kaçma hızına bağlı olarak uzun bir zamana ihtiyaç gösterir. Bu nedenle konsolidasyonsuz sıkıştırma yönteminde, konsolide olmuş kalın bir tabakadaki sıkıştırılmış boşluk suyu uzun bir düşey dren yolunu geçmek zorundadır. Bu durumda boşluk suyunun dışarı atılması için çok uzun bir zaman beklemek gerekir. Eğer ön yükleme için kohezyonlu bir zemin öngörölmüş ise, suyun dışarı atılma süresi daha da artar. Böyle durumlarda geçirimsiz ağırlık zemini ile sıkıştırılan zeminin üst yüzeyi arasına amacına uygun bir kum filtresi konularak, hiç olmazsa drenaj olanağı sağlanmış olur. Kum drenajsız ve kum drenajlı önyüklemeler altındaki oturmaların zamana bağlılığı aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Ön yükleme organik siltler, tabakalı siltler ve killer, yumuşak kilde uygulanır. Dizayn esnasında taşıma kapasitesini, kayma dengesini, konsolidasyon derecesini dikkate almak gerekir. Bu uygulama ile kolonlu yapıların oturmasının azaltılması, ikincil oturmaların azaltılması, sıkılık, taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi mümkündür. Şekil 8'de ön yükleme ile sıkıştırma örneğinin şematik çizimi verilmiştir. Şekil 9'da ön yükleme ile sıkıştırmaya ait oturma-zaman grafiği verilmiştir.



D_{pr} : Sıkışma Derecesi

E_{v2} : Deformasyon Modülü

Şekil 8. Önyükleme ile sıkıştırma örneği



Şekil 9. Oturmanın zamanla değişimi

1.2.9. Taş Kolonlar

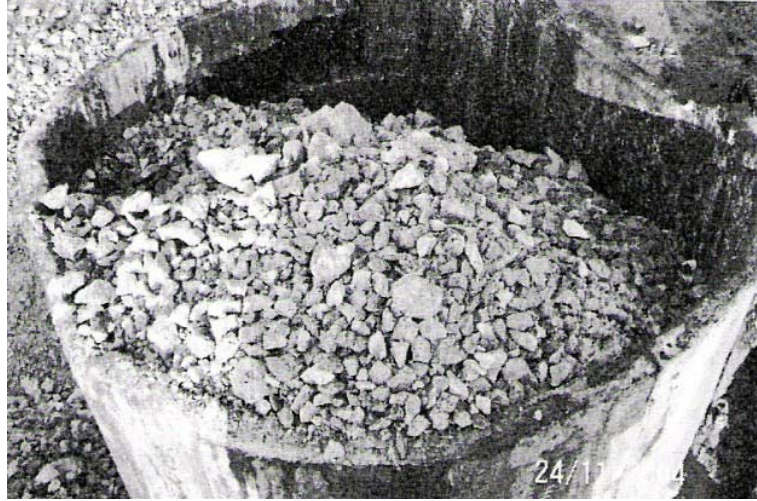
Ülkemizde son yıllarda uygulanmaya başlanmış bir zemin iyileştirme yöntemidir. Şekil 10'da taş kolon uygulaması verilmiştir. Genellikle orta ve yumuşak killi zeminlerde kullanımı tercih edilir. Taşıma gücünü, oturma hızını artırır, oturmaları azaltır ve deprem sırasında sıvılaştıran veya kayma dayanımını kaybeden zeminlerin sağlamlaştırılmasını sağlar. Yapım yöntemi [1]:

- Vibroflotasyon ataşmanları (su veya hava) ile kolonların oluşturulması
- Klasik forajla problemlili zeminin dışarı atılarak yerine çakıl yerleştirilmesi ve sıkıştırılması

- Boru çakma veya itme ile zemin sıkıştırılması ve kolonların oluşturulması imalatları yapılabilmektedir.

Uygulandığı yerler:

- Dolgu üzerinde yapılaşma izni
- Sığ temelli yapılaşma izni
- Temel oturmasında azalma
- Sıvılaşma riskinin azaltılması
- Taşıma kapasitesinde artmadan dolayı temel pabuç boyutlarında azalma
- Kayma dengelenmesi



Şekil 10. Taş kolon uygulaması

Taş kolonlar 0,6-1 m çapında olup, imalatta kullanılan taşın temiz, incelik oranı %5-10 arasında, 10-50 cm boyutunda olması gerekir. Taş kolonun yerleşim planı üçgen veya kare şeklinde olur. Yerleşim planında taş kolonlar ne kadar sık yapılırsa o kadar verimli olur. Yapımı sırasında zemin koşullarına, doygunluk derecesine, görelî yoğunluğa ve permeasyon parametrelerine dikkat etmek gerekir. Taş kolon uygulaması işçiliği fazla ama ekonomiktir.

1.2.10. Enjeksiyon

Zemin Mühendisliğinde enjeksiyon, materyalin genelde geçici sıvı haldeyken zeminin ve kayanın içine doğru kontrollü enjeksiyon süreci olarak tanımlanabilir. Sürecin devamında materyal katılarak geoteknik mühendisliğine dayalı sebeplerden dolayı zeminin fiziksel özelliklerini düzeltir ve geliştirir.

Bu tür bir durumda şerbetleme, pompalanabilir materyalin zemine uzaktan yerleştirilmesi esnasında materyalin reolojik özelliklerinin ayarlanıp ve yerleştirme parametrelerinin (basınç, hacim ve akış hızı) yönlendirilmesi ile dolaylı olarak kontrol edilmesi sürecidir.

1.2.11. Kavramsal Tasarım

Zemin Mühendisliğinde enjeksiyon kullanmayı seçmeden önce, yapılacak işin hedeflerinden emin olmak ve bu hedeflere zeminden kaynaklanan sınırlamalar ve problemin geometrisi doğrultusunda enjeksiyon ile ulaşılabileceğini belirlemek önemlidir. Ulaşılabilir sonuçlar sıkça işin ve sahanın koşullarına bağlıdır. Zemin her farklı durumda ne yapılabileceğini belirler ve zeminin kabul etmeyeceği teknikleri uygulamak hem israftır, hem de yakın yapılara muhtemelen zarar verebilir. Zemin ve koşullar kullanılacak şerbetlemenin biçimini belirleyeceğinden, enjeksiyon gerektiren işlerin tasarımlarında esnekliği korumak önemlidir. Zemin araştırması, şerbetleme sürecine uygun olmalıdır.

Enjeksiyon şerbeti, zeminin özelliklerine tamamen duyarlı olduğundan, enjeksiyonun ve enjeksiyona karşı tepkilerin kaydı ve izlenmesi, hem bir kontrol aracı hem de kullanılan tekniklerin koşullara adaptasyonun işareti olarak kullanılır. En iyi sonuçlar için kabul edilmiş kavramlar bütün iş boyunca ve bitinceye kadar sürekli gözden geçirilmeli ve gerektiğinde değiştirilmelidir. Gözleme dayalı bir yaklaşım benimsenmelidir. Tasarım başlangıçtaki belirlemelerle kalmamalıdır. Plan iş sırasında zemin koşullarının daha iyi anlaşılması sonucu ortaya çıkabilecek değişikliklere olanak sağlayabilmelidir.

Her teknik ve enjeksiyonun sınırlı uygulama aralığı vardır. En iyi sonuçlar yaklaşık olarak uygun aralığın ortasında olurlar. Heterojen zeminler için birkaç tekniğin ya da enjeksiyonun kombinasyonu gerekli olabilir. Enjeksiyon ve teknikler en iyi benimsedikleri koşullarda uygulanmazlarsa, istenilen hedeflere ulaşamama riski artar.

Uygulama aralığının sınırlarında yapılan enjeksiyon ve tekniklerin genelde maliyeti çoktur ve başarı oranı azdır.

Zemindeki enjeksiyon sonuçların tahminleri için revizyon sağlayan sürekli bir kalibrasyon süreci olarak dikkate alınmalıdır. Genellikle maliyet ne kadar yüksekse sonuçların kalitesinin o kadar iyi ve temel yapı seçimlerinin o kadar doğru olması beklenir.

İşleyiş sistemi, sorumluluğun yerini ve tanımını, anlaşmadaki işin tanımını, metodun hassasiyetini ve gözden geçirme ve kabul kriterlerini içermelidir. Taraflar arasında, uygulama aşamasında özellikle tasarım, izleme ve adaptasyon alanlarında belli bir dereceye kadar ortak sorumluluk gerekmektedir.

Sayısal modelleme, enjeksiyon sürecinin tamamen anlaşılmasında çok kullanışlıdır. İki ve üç boyutlu programlar (FLAC ve CRISP) enjeksiyon faaliyetlerine bağlı olarak yapılan yapılardaki gerilmeleri net bir şekilde tahmin etmek için kullanılırlar. Bu sayısal modellerin karmaşıklığı giderek artmaktadır. Ancak günümüzdeki enjeksiyon projelerindeki yapı parametrelerini belirlemek ve yer hareketlerini tahmin etmek için kullanılan modeller dikkatlice seçilmelidir.

1.2.12. Zemin Mühendisliğinde Enjeksiyon Kullanımı

Enjeksiyon kullanımı yeni tekniklerin ve otomatik kontrol sistemlerinin gelişimiyle son yıllarda çok çeşitli ve farklı alanlara yayıldı. Özellikle ana kentlerin yeraltındaki altyapılarının gelişimi daha fazla zemin kontrolünü gerektirmektedir.

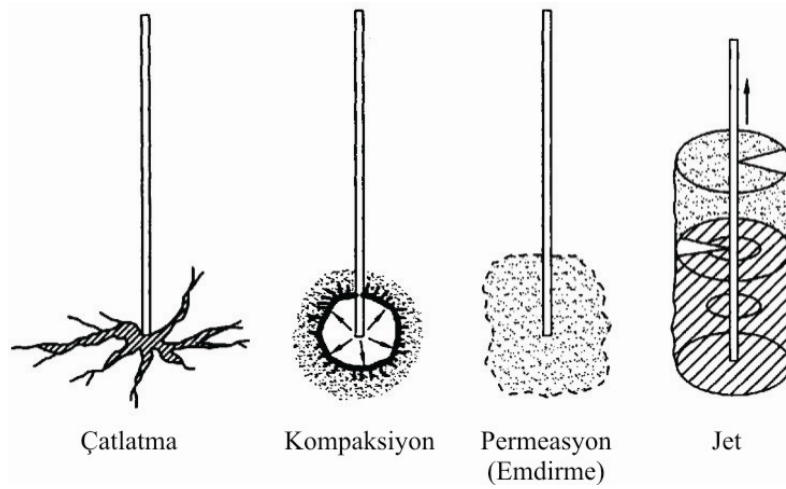
Enjeksiyon şu alanlarda kullanılabilir:

- Zemin geçirgenliğini azaltır
- Zemine suyun ya da kirliliğin girmesini bariyer ya da cut off oluşturarak engelleme
- Sıvılaşmayı önler
- Tünel inşaatlarında tünel aynasının stabilizasyonunu sağlamak
- Sondaj ve numune alımı esnasında su problemlerinin çözümünde
- Zemin içerisindeki boşlukların doldurulup aşırı oturmaların engellenmesinde
- Zemin stabilizasyonunu sağlayarak tünel veya kazı çalışmalarını kolaylaştırmak
- Temel kazılarında, tünellerden kaynaklanan gerilmeleri azaltmak
- Yeraltı yangınlarının söndürülmesi

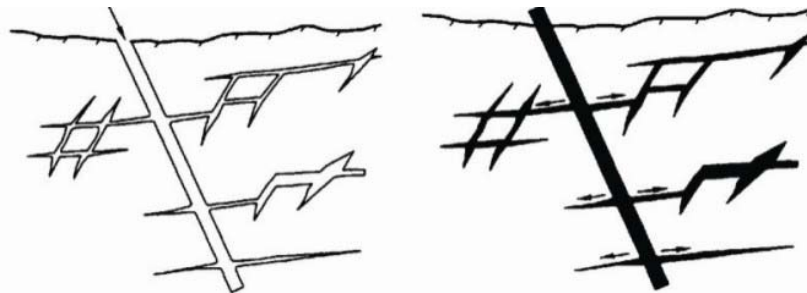
- Tünel kazımı sırasında yüzeyde veya yakın çevrede bulunan yapıların oturmasını engelleme

1.2.13. Zemin Mühendisliğinde Enjeksiyon Türleri

Zemin mühendisliğinde enjeksiyon belli guruplara ayrılır: Emdirme (permeasyon) enjeksiyonu, Kaya enjeksiyonu, Çatlatma enjeksiyonu, Kompaksiyon Enjeksiyonu, Jet Enjeksiyonu ve Kompansasyon Enjeksiyonu. Kompansasyon Enjeksiyonu bir enjeksiyon süreci değildir fakat çatlatma, permeasyon ve kompaksiyon enjeksiyonları gibi enjeksiyon süreçlerini içerebilir. Bu enjeksiyon türleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiş ve anlatılmıştır. Şekil 11’da çatlatma, kompaksiyon, emdirme ve jet enjeksiyon uygulamasına ait şematik çizimler verilmiştir. Şekil 12’de ise kaya enjeksiyonu uygulamasına ait şematik çizim verilmiştir.



Şekil 11. Enjeksiyon türleri



Şekil 12. Kaya Enjeksiyonu

1.2.13.1. Permeasyon (Emdirme) Enjeksiyonu

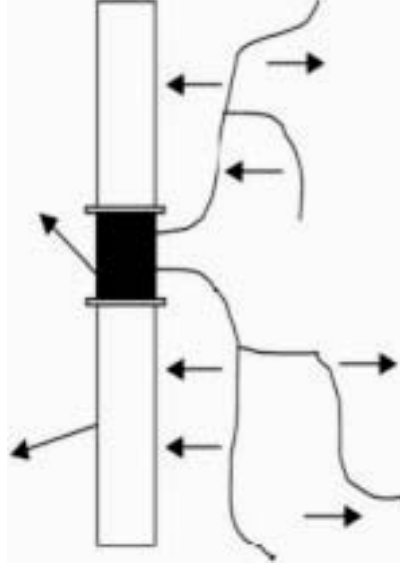
Geçirimli bir zeminde katı parçacıklar arasındaki ulaşılabilir boşlukların viskozitesi düşük enjeksiyon malzemesi ile düşük basınçta doldurulmasıdır. Bu şekilde uygulanmasından dolayı zeminin hacminde ve yapısında değişiklik meydana getirmez. Bu teknik genelde zemin geçirgenliğini azaltmada ve yeraltı sularının akışını kontrol etmede kullanılsa da, zeminin sertleştirilmesinde ve güçlendirilmesinde de kullanılabilir.

1.2.13.2. Kaya Enjeksiyonu

Kaya enjeksiyonu, bir kaya kütleindeki ince ve kalın çatlakların veya bunların birleştiği yerlerin geçirgenliğini azaltmak ve kaya kütlelerini sertleştirmek amacıyla, yeni çatlaklara neden olmadan veya var olan çatlakları genişletmeden enjeksiyon malzemesi ile tam olarak veya kısmen doldurulmasıdır.

1.2.13.3. Çatlatma Enjeksiyonu

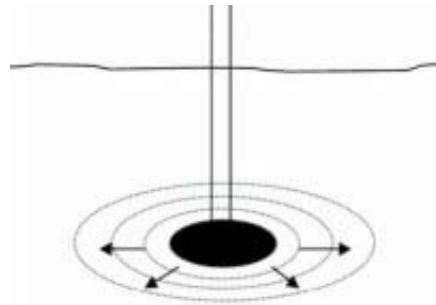
Çatlatma enjeksiyonu yüksek basınç altında (4 Mpa) enjeksiyon malzemesi kullanarak zeminin kasıtlı olarak çatlatılmasıdır. Bu enjeksiyon tekniği genelde permeasyon enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirimsizliğe sahip, ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde uygulanır. Çoğunlukla zeminin sıkıştırılması ve sertleştirilmesi için ya da ulaşılabilen boşluklara ulaşarak zeminin geçirgenliğini azaltmak için kullanılır. Ayrıca yapılarda kontrollü kabarmaları oluşturmada kullanılmaktadır. Şekil 13' de çatlatma enjeksiyonunda oluşan düşey yönde çatlakların oluşumu ve yatay sıkıştırma şematik çizimi verilmiştir[3].



Şekil 13. Düşey yönde çatlakların oluşumu ve yatay sıkıştırma

1.2.13.4. Kompaksiyon Enjeksiyonu

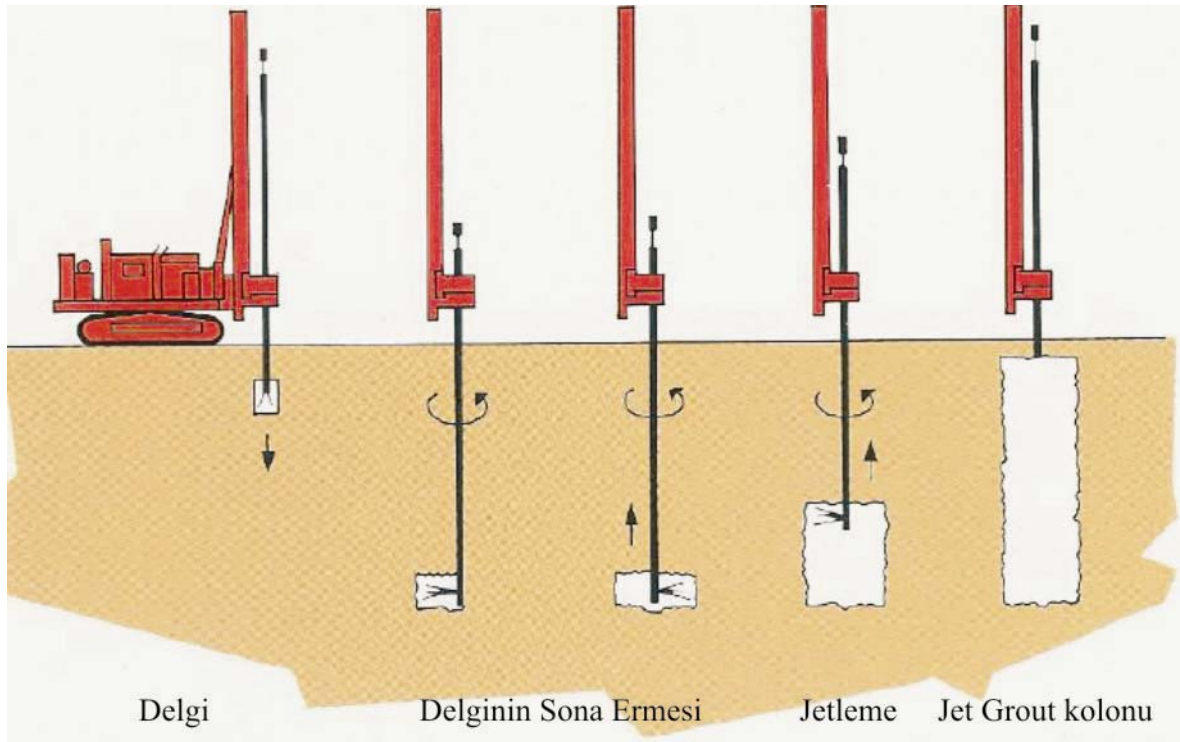
Kompaksiyon enjeksiyonu, çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminin yer değiştirmesi veya sıkıştırılması için yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar kum içeren katı ve yüksek vizkositeli enjeksiyon malzemesinin çok yüksek basınçta (3.5 Mpa) zemin boşlukları içerisine girmeden enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturarak etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştırarak şekilde yüksek basınçlarda enjekte edilmesidir. Buna ek olarak kompaksiyon enjeksiyonu temelin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrolünde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin iyileştirilmesinde ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde uygulanmaktadır. Şekil 14' de kompaksiyon enjeksiyonunun şematik çizimi verilmiştir[4].



Şekil 14. Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi

1.2.13.5. Jet Enjeksiyonu

Jet enjeksiyonu genellikle su-çimento karışımı bir malzemenin yüksek basınç altında zemine enjekte edilmesiyle zeminin, yapısının değiştirilerek, taşıma gücü ve elastisitesinin artırılıp, geçirgenliğinin ve sıkışabilirliğinin azaltıldığı bir zemin iyileştirme yöntemidir. Ayrıca mevcut ihtiyaç ve olanak ve koşullara göre bentonit, kil, organik reçineler ya da kimyasal nitelikli malzemeler enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilir. Bu yöntemde enjeksiyon malzemesi zeminle karışarak yapısı tamamen farklı homojen bir yapı oluşturmaktadır. Bu yöntem ile sert, taşıyıcı, geçirimsiz çoğunlukla birbirine bağlı kolonlar veya paneller oluşur. Şekil 15’de jet enjeksiyon uygulamasına ait şematik çizim verilmiştir[5].



Şekil 15. Jet enjeksiyonu uygulamasına ait şematik çizim

1.2.13.6. Kompansasyon Enjeksiyonu

Kompansasyon enjeksiyonu var olan bir yapı ile mühendislik uygulaması (özellikle tünel kazısı) arasındaki kompaksiyon, permeasyon (emdirme) veya çatlama enjeksiyonun

tepkisel kullanımınıdır. Burada amaç var olan yapıyı etkileyecek zemin hareketini en aza indirmektir.

1.2.14. Enjeksiyonun Uygulanabilirlik Tayini

Bir enjeksiyon tasarımını formüle etmek ve enjeksiyon uygulanabilirliğine karar vermek dört farklı bilgi gerektirmektedir.

1. Enjeksiyon amaçlarının tanımı ve kontrol kriterleri
2. Yeterli, acil, yerel zemin bilgisi, özellikle araziden enjeksiyonla alakalı geçirgenlik, jeolojik, geotekniksel ve hidrojeolojik veriler
3. Çevresel şartların neden olduğu kısıtlamalar, yakın yapıların uygulamaya etkisi veya uygulamanın yakın yapılara etkisi (binalar, temeller ve tüneller) ve uygulama tekniğinin ve enjeksiyon karışımının seçimini etkileyecek herhangi bir parametre
4. Karşılaştırılabilir şartlarda veya aynı alanda uygulanmış başka bir enjeksiyon projesini referans olarak alma.

Karşılaştırma deneyiminin olmadığı ve enjeksiyon kullanımının projenin kritik noktası (tekniksel ve ekonomik olarak) olduğu durumlarda doğru enjeksiyon yöntemine karar vermek için arazi denemeleri yapılmalıdır.

1.2.15. Etkili Enjeksiyonu Etkileyen Faktörler

Enjeksiyon esnasında problemlerin oluşabileceğini veya tamamlanmış bir enjeksiyon uygulamasının beklenenden daha düşük performans gösterebileceğini kabul etmek gerekir. Tablo 1’de enjeksiyon yöntemlerinin kullanım yerleri verilmiştir. Etkili enjeksiyonu etkileyen faktörler şunlardır.

- Düşük kalitede ve yetersiz arazi incelemesi
- Uygun olmayan enjeksiyon tekniğinin kullanımı
- Enjeksiyon uygulamasının yerinde yetersiz kontrolü
- Atıkların imhasına ait yetersiz prosedürler
- Çevresel etkinin yetersiz değerlendirilmesi
- Enjeksiyonun dayanıklılığını etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması

Tablo 1. Enjeksiyon yöntemlerinin kullanım yerleri

KULLANIM YERİ	ENJEKSİYON YÖNTEMİ					
	Permeasyon	Kaya	Çatlatma	Kompaksiyon	Jet	Kompansasyon
Zemin geçirgenliğini azaltma	√	√	√			
Zemine suyun ya da kirli akışın girmesini bariyer ya da cut off oluşturarak engelleme	√	√			√	
Zeminleri sertleştirerek temel tepkilerini iyileştirme	√			√	√	
Zeminleri sertleştirerek kazı ve temel stabilizasyonunu iyileştirme	√				√	
Sıvılaşmayı önler				√		
Yapıların veya üst yapıda delgi tabancası kullanımı			√	√		
Yapıların temellerinin desteklenmesinde					√	
Zemin stabilizasyonunu sağlayarak tünel veya kazı çalışmalarını kolaylaştırma	√		√		√	
Temel kazılarında, tünellerden kaynaklanan gerilmeleri azaltma	√		√			√

1.2.16. Risk Analizi

Enjeksiyon projesinin doğasına bağlı olarak aşağıdaki iki madde risk analizi kapsamında dikkate alınmalıdır:

- İnşaat yerinde, komşu hizmet ve yapılarda enjeksiyonun nedeniyle oluşan zemin gerilme ve zorlanmalarının etkisi
- Çevresel etki

Enjeksiyon projelerinde, kirlilik şu nedenlerden oluşabilir...

- Teçhizatın yıkanması veya arazinin temizlenmesi
- Enjeksiyon malzemesinin yeraltı suyuna sızması
- Enjeksiyonların bozulmasına neden olacak zor şartlar altında uzun süre kalmaları dolayısıyla içindeki kirli kimyasalların yer altı suyuna karışması.

Üçüncü maddenin meydana gelme olasılığı azdır. Kirliliğin temel kaynağı teçhizatın yıkanması anına veya enjeksiyon esnasına dayanır.

Herhangi bir çevresel etki analizi iki bağımsız araştırmaya bağlı olmalıdır:

1. Özellikle yeraltı suyunun durumuna dikkat ederek işe başlamadan önce var olan koşulları analiz etmek gerekmektedir.
2. Enjeksiyondan beklenen kirlenme etkisi ve bunun süresi, oluşacak kirliliğin yapısı da dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Bir arazideki çevresel etki riskleri şunları içerir:

- Zemin hareketine neden olunması
- Yer altı su seviyesindeki değişiklikler
- Enjeksiyonun hedeflenen sınırların dışına yayılması
- Yeraltı suyunun kirlenmesi ve kimyasallarla yüzey suyunun kirlenme potansiyeli
- Hava yoluyla yayılma (Toz).

1.2.17. Arazide Sağlık ve Güvenlik Koşulları

Çalışma alanının güvenliği çok önemlidir. Ziyaretçilerin ve yakın çevrede yaşayanlar alınan güvenlik koşullarına dahil edilmelidir.

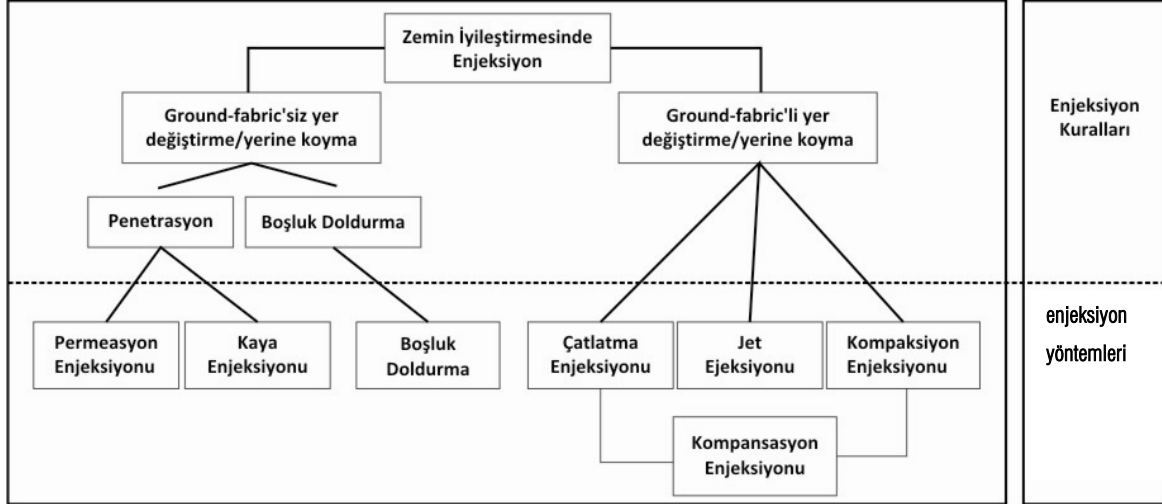
Enjeksiyon yöntemi kullanılırken aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

- Temas yada hava yoluyla zararlı olabilecek kimyasal tozlar
- Sıvı enjeksiyon malzemesinden çıkan zararlı gazlar
- Uzun vadede zararlı olan enjeksiyon bileşenleri veya enjeksiyon malzemesi ile tensel temas
- Yeraltı suyunun kirlenmesi
- Yüzey suyunun kirlenmesi
- Kimyasalların suda çözülmeden kuru haldeyken karıştırılmasının patlamaya neden olabilmesi
- Atık suyun imhası
- Ses

Enjeksiyonda kullanılan kimyasalların bazı bileşenleri deriye zarar verir. Bu yüzden enjeksiyon işlemi esnasında her zaman koruyucu kıyafetler giyilmeli, gözlük ve eldiven takılmalıdır. Enjeksiyondan kaynaklanan zararlı gazların solunabileceği kapalı alanlarda çalışan işçilerin yüz maskesi takmaları gerekir.

1.3. Enjeksiyon Kavramları, Kuralları ve Sistemi

Enjeksiyonun zeminin ya da kayanın içine girişi ground-fabric'li veya ground-fabric'siz zeminin yerinin değiştirilmesi veya başka bir zeminle değiştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Şekil 16'da enjeksiyon kuralları ve yöntemleri verilmiştir.



Şekil 16. Enjeksiyon kuralları ve yöntemleri

1.4. Enjeksiyon Tekniği ve Türleri

Enjeksiyon çalışmalarının derecesi ve amacı uygulanacak tekniği belirler. İyileştirme tekniği her ayrı proje için özel olarak tasarlanmalıdır. Enjeksiyon uygulaması permeasyon, çatlatma, yer değiştirme ve zeminin karıştırılması ile amaçlarına ulaşabilir. Bazı durumlarda alternatif teknikler kabul edilebilir ve birkaç tekniğin birleşimi uygun olabilir.

Tablo 2'de farklı zemin türlerine uygulanabilecek enjeksiyon tekniklerini ve türlerini göstermektedir. Deneyimler göstermektedir ki arazi araştırmaları her zaman belirli bir enjeksiyon türüne ve iyileştirme tekniğine kesin olarak karar vermek için yeterli olmamaktadır.

Tablo 2. Enjeksiyon teknikleri ve ilgili zemin türleri

Zemin Türü	Permeasyon	Kaya Enjeksiyonu	Kompaksiyon/Çatlatma/ Jet Enjeksiyonu
Zemin			
Çakıl, iri daneli kum, kumlu çakıl $k = 5 \times 10^{-3}$ m/s	Saf çimento süspansiyonu, çimento tabanlı süspansiyon		Harç, çimento tabanlı süspansiyon
Kum, orta daneli kum $5 \times 10^{-3} < k < 1 \times 10^{-5}$ m/s	Mikro süspansiyon, çözelti		Çimento tabanlı süspansiyon
İnce daneli kum, silt (siltli kil) $5 \times 10^{-4} < k < 1 \times 10^{-6}$ m/s	Belirli Kimyasallar (phenolic, arcylic)		Çimento tabanlı harç, Çimento tabanlı süspansiyon
Çatlamış Kaya			
Kırıklar, çatlaklar, karstik aşınma $e > 100$ mm		Çimento tabanlı harç, çimento tabanlı süspansiyon (dolgu malzemesi kil)	Çimento tabanlı süspansiyon
Çatlaklar, yarıklar $0,1 \text{ mm} < e < 100 \text{ mm}$		Çimento tabanlı süspansiyon, Mikro süspansiyon	Çimento tabanlı süspansiyon
Mikro çatlaklar $0,05 \text{ mm} < e < 0,1 \text{ mm}$		Mikro ve aşırı ince çimento tabanlı süspansiyon Silikat Jel	Çimento tabanlı süspansiyon
$e < 0,05 \text{ mm}$		Belirli Kimyasallar (epoxy, phenolic, arcylic)	Çimento tabanlı süspansiyon

$k =$ Geçirgenlik Katsayısı, $e =$ Çatlak genişliği

Enjeksiyon malzemesi öncelikle zeminin geçirgenliğinden etkilenir. Doğal zemin ve kayaların geçirgenliğindeki belirgin değişim verimli bir iyileştirme için farklı enjeksiyon malzemeleri ve enjeksiyon teknikleri gerektirmektedir.

Bu yüzden geçirgenlik değerlendirmeleri arazi çalışmalarının önemli bir bölümünü oluşturmakta ve geçirgenlik değerlerindeki olası farklılıklar, bu değerlerin

belirlenmesinde uygun yöntemlerin kullanılmasının ve zemindeki geçirgenlik değerlerinin dağılımının değerlendirilmesinin gerekliliğini göstermektedir. Enjeksiyonun tasarımına başlamadan önce zemin içindeki birbirine bağlı boşlukların (etkin porozite) veya kaya içindeki birbirine bağlı çatlakların boyutları bilinmelidir. Bu özellikle filtre kriterlerinin ve arazinin hidrolik eğimindeki karışımın kararlılığının araştırılması gereken süspansiyonlarla ilişkilidir.

Zeminlerde deneysel enjeksiyon uygulanabilirlik oranı (zeminin %15' ini temsil eden parçacık boyutunun enjeksiyon parçacıklarının %85' ini temsil eden parçacık boyutuna oranı olarak tanımlanır D_{15}/d_{85}) enjeksiyon malzemesinin nüfus edilebilirliğini değerlendirmede kullanılabilir. Kayalarda maksimum parçacık boyutunun çatlak genişliğine oranı değerlendirilir. Tablo 3'de farklı enjeksiyon türlerinin uygulanması için gerekli bilgiler verilmiştir.

Tablo 3. Farklı enjeksiyon türlerinin uygulanması için gerekli bilgiler

Anahtar Bilgi	Permeasyon	Kaya	Çatlatma	Kompaksiyon	Jet	Kompansasyon
Zemin Profili	√	√	√	√	√	√
Zemin Geçirgenliği	√	√	√	√		√
Dane Çapı Dağılımı	√	√	√	√	√	√
Zemin Sıklığı				√		
Porozite	√	√	√	√		√
Zemin Sınıflandırması	√		√	√	√	√
Zemin Mukavemeti	√	√	√	√	√	√
Zemin Gerilme Durumu	√	√	√	√		√
Zemin veya Kaya yoğunluğu				√	√	
Yeraltı suyu bilgisi (kimyası, akışı)	√	√	√	√	√	√
Süreksizlik açıklığı	Uygun Değil	√	Uygun Değil	Uygun Değil	Uygun Değil	Uygun Değil
Süreksizlik özellikleri		√		Uygun Değil	Uygun Değil	Uygun Değil
Komşu yapıların ayrıntıları	√	√	√	√	√	√
Yapıların kabul edilebilir hareketleri	√		√	√	√	√
Araziye Erişim	√	√	√	√	√	√
Güç kaynağı	√	√	√	√	√	√
Su kaynağı	√	√	√	√	√	√
Yeraltı tesisatı	√	√	√	√	√	√
Tanzim gereksinimleri	-	-	-	-	√	-

1.5. Enjeksiyon Uygulamalarında Gözlemsel Yaklaşımın Kullanımı

Enjeksiyon çalışmaları yürütülürken gözlemsel bir yaklaşım önerilir, öyle ki tüm gözlemler, tasarım parametreleri ve varsayımları ile karşılaştırılmalıdır. Eğer gözlemler tasarımla büyük farklılıklar gösterirse, bu sapmanın nedeni araştırılmalı ve tasarı veya enjeksiyon uygulama kriterleri uygun şekilde yeniden ayarlanmalıdır.

Enjeksiyon uygulaması tasarımı, kontrol kriterlerini ve enjeksiyon uygulamasının amaçlarının karşılandığını doğrulamak amacıyla yapılması gereken testleri belirlemelidir. Enjeksiyon uygulaması için yapılan plan, gözlemsel bir yaklaşımın kullanımını mümkün kılmalıdır.

1.6. Enjeksiyon Sisteminin Bileşenleri

Enjeksiyon Sisteminin bileşenleri aşağıdaki gibidir:

- Enjeksiyon uygulamasının amaçları ve tasarımı
- Enjeksiyon uygulama testleri ve mümkünse arazide enjeksiyon denemeleri
- Enjeksiyon türleri, malzemeleri ve hazırlanması
- Enjeksiyonun yerleştirilmesi
- Denetleme, izleme ve kontrol

1.7. Enjeksiyon Uygulamasının Amaçları ve Tasarımı

Bir enjeksiyon uygulamasının tasarımına başlandığında, uygulamanın amaçları tanımlanmalıdır. Bir tasarım aşağıdaki konuları içermelidir:

- Enjeksiyon uygulaması yapılacak zeminin fiziksel özellikleri
- Enjeksiyon karışımının bileşimi ve uygulama sonunda ulaşılması beklenen ölçülebilir özellikler
- Delme metodu ve düzeni
- Enjeksiyon tekniği, süreçleri ve uygulanacak yöntemler
- Enjeksiyonların aralıkları ve düzeni
- Enjeksiyon uygulama sınırları (Enjeksiyon basıncı, akış hızı ve enjekte edilecek malzemenin miktarı)

- Ön ve kontrol testleri
- Denetleme ve izleme aletleri

Enjeksiyon uygulamasının, zeminin veya kayanın davranışlarındaki değişkenliklere veya yerel zemin şartlarındaki beklemeyen değişimlere kolayca adapte olması için tasarı sırasında ve enjeksiyon uygulamasının planlanmasında esnek bir yaklaşım benimsenmelidir.

Başarılı bir enjeksiyon uygulaması için, uygulanacak enjeksiyon türünün, enjeksiyon sürecinin ve ekipmanının zeminle uyumlu olması gerekmektedir.

Kavramsal aşamada ve enjeksiyon esnasında aşağıdaki konular önemlidir:

- Mevcut zemin araştırma bilgisinin güvenilirliği ve eksiksizliği
- Enjeksiyondan beklenen performans
- İlgili yapıların varlığı ve durumu
- Enjeksiyon uygulamasının sonucunda arazide oluşabilecek boşluk basıncı ve gerilme durumu değişimleri
- Mevcut yeraltı suyu şartları ve uygulamadan sonra beklenen şartlar
- Enjeksiyon malzemelerinin ve uygulama sonuçlarının zehirliliği
- Enjeksiyon malzemesinin saklanacağı, karıştırılacağı ve enjekte edileceği çevre koşulları
- Enjeksiyon malzemesinin mevcudiyeti
- Enjeksiyon ve kontrol sistemleri
- Güvenlik ve çevre kısıtlamaları
- Atık tanzimi

1.8. Arazi Seçimi

Enjeksiyon uygulamasının tasarımı formüle edilirken, enjeksiyonla alakalı yeterli geoteknik ve hidrojeolojik veri gerekmektedir. Çevresel faktörlerden kaynaklanan sınırlamalar (komşu yapılar, temeller ve enjeksiyon karışımının ve yerleştirme tekniğinin seçilmesini etkileyebilecek diğer faktörler) hesaba katılmalıdır. Ayrıca su ve enerji kaynağına kolay ulaşımda önemlidir.

Arazi araştırması titiz bir şekilde yapılmalı ve aşağıdaki bilgileri sağlamalıdır:

- Mevcut yapıların konumları ve koşulları
- Delmeye karşı potansiyel engeller

- Zeminin ve yeraltı sularının fiziksel ve kimyasal özellikleri
- Eş yönlü olmayan tabakalar, zemin yapıları, gevşek veya yumuşak zemin
- Kayalardaki çatlakların aralık genişliği ve sıklığı ile dolgu malzemesinin yapısı
- Boşlukların konumu ve yapısı
- Yeraltı sularının seviyeleri ve akışları

Uygun enjeksiyon tekniğinin seçilebilmesi için enjeksiyon uygulamasının yapılacağı tabakanın geçirgenliği yeterli bir hassasiyetle belirlenmelidir.

Enjeksiyon çalışmasının tasarımı ile alakalı diğer bilinmesi gerekenler şunları içermektedir:

- Arazi koşulları (boyut, eğim, sınırlamalar, çevresel ve hukuki kısıtlamalar)
- Enjeksiyon çalışmasından etkilenmesi beklenen mevcut yapıların incelenmesi ve denetlenmesi
- Enjeksiyon çalışmasını etkileyebilecek eş zamanlı ve sonraki faaliyetler
- Enjeksiyon çalışmalarının test edilmesi, izlenmesi ve denetlenmesi için ilave gereksinimler.

1.9. Enjeksiyon Testleri ve Arazi Denemeleri

Karşılaştırılabilir bir deneyimin mevcut olmadığı durumlarda, arazi enjeksiyon denemeleri enjeksiyon metodunun ve kullanılacak malzemenin tanımlanmasında yardımcı olur. Önerilen herhangi bir enjeksiyon çalışmasında belirsizlikleri azaltmak ve böylece zaman ve para kaybını minimuma indirmek için enjeksiyon denemeleri yapılır.

Denemeler arazi araştırmasının bir bölümünü, enjeksiyon çalışmasının bir bölümünü (küçük projeler) yada ayrı bir enjeksiyon denemesini (büyük projeler) oluşturabilirler.

Denemeler, sondaj deliği aralığı, enjeksiyon basıncı gibi konularda bilgi elde etmek, beklenen performansı görmek ve önerilen enjeksiyon metodu için diğer sınırlama kriterlerini gözlemlemek amacıyla kullanılmaktadır.

1.10. Enjeksiyon Malzemesi Türleri

Enjeksiyon malzemeleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Harç

- Macun
- Süspansiyon
- Jelâtinimsi madde
- Çözelti

Enjeksiyon malzemeleri şunları içerir:

- Hidrolik bağlayıcı ve çimento
- Kil malzemesi
- Kum ve dolgu malzemesi
- Kimyasal ürün ve karışımlar
- Su
- Diğer bileşenler

1.11. Enjeksiyon Malzemesinin Yerleştirilmesi

Enjeksiyon sürecini, her geçişteki enjeksiyon malzemesinin hacmi, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon malzemesi ile zeminin direnci arasındaki ilişki oluşturur. Tasarı, enjeksiyon malzemesinin yerleştirilmesi esnasında bu süreçlere karşı zeminin vereceği tepkiye nasıl uyum sağlanacağını belirtmelidir. Her geçişteki enjeksiyon malzemesinin hacmi, hacimsel orana (malzemenin hacmi/iyileştirilmiş zeminin hacmi) ve zemin iyileşmesinin geometrisine (delikler arası aralık ve enjeksiyon geçişinin uzunluğu) dayanmaktadır. Enjeksiyon parametreleri (basınç, hacim ve akış oranı) istenmeyen zemin deformasyonu ve yer değiştirmesini engelleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Uygun enjeksiyon basınçlarına karar vermek için enjeksiyon çalışmasının başlangıcında enjeksiyon denemeleri yürütülebilir.

Enjeksiyon malzemesi yerleştirme yöntemleri projenin türüne bağlıdır. Zemin koşulları, proje gereksinimleri ve malzemenin türü yerleştirme metodunun seçiminde etkilidir. Yerleştirme esnasında ve malzemenin ve malzeme bileşenlerinin taşınması sırasında herhangi bir sızıntıyı engellemek için önceden gerekli önlemler alınmalıdır.

Çoğunlukla aşağıdaki yerleştirme yöntemleri kullanılmaktadır:

- Stabil zeminlerdeki desteksiz sondaj deliklerine aşamalı enjeksiyon
- Daha önce sondaj deliklerine geçici olarak yerleştirilmiş tube-a-manchette boruları veya süzgeç tüpleri aracılığıyla enjeksiyon

- Stabil olmayan zeminlerde delgi şeridi içinden enjeksiyon, genelde bu yöntem ön enjeksiyon safhası olarak dikkate alınır.
- Kompaksiyon enjeksiyonu

Tablo 4’te kaya ve zeminlerdeki enjeksiyon malzemesi yerleştirme yöntemlerini özetlemektedir. Bir safha, deliğin tabanı ve tek yada bir çift sondaj contası ile sınırlandırılmış ve önceden belirlenmiş enjeksiyon uzunluğu olarak tanımlanır.

Tek safhalı süreçte enjeksiyon deliği içinde enjeksiyon tek safhada uygulanır. Tek safhalı enjeksiyon uygulaması değişkenlik gösteren zeminler için uygun değildir. Yükselen safhalı enjeksiyonda enjeksiyon deliği sonuna kadar delinir ve bu yüzden enjeksiyon aşamalı olarak deliğin zemininden yukarı doğru uygulanır. Genelde tek sondaj contası ve artan safha uzunlukları enjeksiyon uygulamasının bileşenleridir. Ancak çift sondaj contası ve sabit safha uzunluğu da kullanılabilir. Yükselen safhalı enjeksiyon eğer amaç kompaksiyon enjeksiyonu ise sadece stabil kayalarda ve stabil yada stabil olmayan zeminlerde kullanılır.

Alçalan safhalı enjeksiyonda enjeksiyon deliği kısa safhalarla delinir. Bir sonraki safha delinmeden önce her safhaya enjeksiyon malzemesi yerleştirilip üstüne tek sondaj contası monte edilir. Bu teknik genelde stabil olmayan ve sondaj contalarının kolay monte edilemediği kayaların iyileştirilmesinde kullanılır. Eğer birden fazla deliğe enjeksiyon uygulaması yapılacaksa tüm delikler içinde, en üstteki delinir ve enjeksiyon malzemesi yerleştirilir. Daha sonraki safhada komşu delikler delinir ve enjeksiyon malzemesi yerleştirilir.

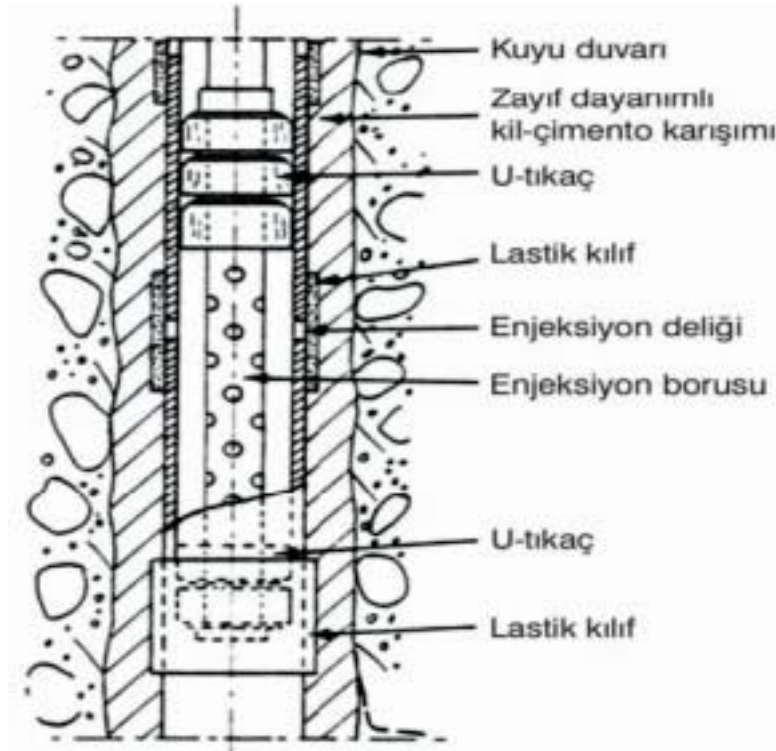
Çok safhalı enjeksiyon genelde zeminlerde ve sondaj contası monte edilemeyen kayalarda uygulanır. Enjeksiyon safhaları genelde zeminlerde 0.25-1 metre ve kayalarda 3-10 metre uzunluğundadır.

1.11.1. Tube-a-Manchette (TaM)

Tube-a-manchette üzerinde belirli aralıklarla küçük delikler bulunan bir enjeksiyon borusu olup destek malzemesinin kullanımı ile zemine kalıcı olarak mühürlenir. Şekil 17’de tube-a manchette şematik çizimi verilmiştir.

Tube-a-manchette’nin avantajları:

- Enjeksiyon noktalarının revizyonu yapılabilir.
- Proje süresince stabil kalan bir sondaj deliği enjeksiyonu sağlar.



Şekil 17. Tube a' Manchette sisteminin detayı[3]

1.11.2. Sondaj Contası (Packer)

Sondaj contaları enjeksiyon deliğinin bir kısmını mühürlemek yada izole etmek için kullanılır. Bu sayede enjeksiyon malzemesi basınç altında deliğin belirli bir bölümüne enjekte edilebilir ve malzemenin eksensel hareketini engeller. Sondaj contaları enjeksiyon malzemesinin enjeksiyon uygulanan ortamdan kaçma riskini en aza indirecek şekilde uzun olmalıdırlar. Sondaj contaları enjeksiyon deliğinin duvarı ve enjeksiyon borusu arasında maksimum enjeksiyon basıncında sıkı bir sızdırmazlık sağlarlar. Bazı kayalarda bu uygulama pratik değildir. Kaçan malzemeyi temizlemek için basınçlı su ile temizleme sistemi kurulmalıdır. Kayalarda safha uzunluğu en az 3 metre ve en fazla 5-10 metre olmalıdır. Yoğun çatlak içeren kayalarda bu uzunluk gerektiği kadar azaltılmalıdır.

1.12. Enjeksiyon Süreci

Permeasyon enjeksiyonu gözenek boşluklarındaki mevcut gözenek sınırlarını enjeksiyon malzemesi ile yer değiştirerek doldurmayı hedefler. Bu uygulamada, gözenek boşluklarına ait geçit deliklerinin parçacıklarla bloke edilmesi ve enjeksiyon malzemesinin akışkanlığı bir direnç unsuru olabilir.

Çatlatma enjeksiyonunda enjeksiyon basıncı zemini çatlatmak için kullanılır. Çatlatma basıncı gerilmenin durumuna, zeminin mukavemetine ve çatlak yönüne bağlıdır. Düşük akışkanlı enjeksiyon malzemesi çatlak boyunca daha ince ve kapsamlı bir penetrasyonla sonuçlanır. Akışkan malzemeler ise çatlak boyunca penetrasyonun alanını sınırlar ve kalın çatlaklara neden olur.

Jet enjeksiyonu genellikle sıvının dönen radyal jetlerini kullanarak sondaj deliğini zemin erozyonuyla genişletir. Jetlerin yavaş, sürekli ve düzenli olarak deliğin görünen yüzeyinin üzerinden geçmesi, yavaş yavaş yüzeyi aşındırarak, deliğin boyutlarını genişletir. Genişlemenin büyüklüğü, ve enjeksiyon malzemesinin hacmi uygulanan jet enerjisine, jetleme sürecinin verimliliğine ve zeminin erozyona karşı direncine bağlıdır. Malzeme genişletilmiş sondaj deliğine enjekte edilir ve erozyona uğramış zeminle karışır yada onun yerini alır. Böylece katı zemin-çimento sütunlar oluşur.

Kompansasyon enjeksiyonu permeasyon, çatlatma ve kompaksiyon enjeksiyonlarının kombinasyonundan oluşur.

1.12.1. Delme Sistemi

Enjeksiyon deliği şu şekillerde oluşturulabilir:

- Rotari sondaj
- Harici çekiç kullanarak darbeli rotari sondaj
- Muhafazalı darbeli rotari sondaj
- Çok kollu kurtarma kancası ve keski

Farklı delme yöntemleri ve teknikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Farklı delme yöntemleri ve teknikleri

	Rotari	Darbeli Rotari	Delinecek Zemin			
			Marn, kil	Kum, Aluviyon	Yumuşak kaya	Sert kaya
			Sondaj deliği Çapı (mm)			
			60 – 100	60 – 100	60 – 100	38 – 75
1. Delme Aleti						
Trikone bitleri	√		1	1	2	3
Darbe		√	3	2	1	1
Elmas	√		3	3	1	1
Balık kuyruklu delme ucu	√		1	2	2	
Matkap	√		1	2		
2. Flushing Medya						
Hava	√	√	3	1	1	1
Su	√	√	1	1	1	1
Killi çamur/bentonit	√		3	2		
Biyolojik olarak bozunmuş köpük/sıvı çamur	√			2		
Kil malzeme /bentonit çimento	√		1	1	1	
3. Muhafaza borusu						
Dubleks	√		2	1		
Geleneksel	√		2	2		
4. İzlenen Parametreler						
Penetrasyon oranı	√	√	1	1	1	1
Matkap ucundaki basınç	√	√	1	1	1	3
Akışkan basıncı	√	√	1	1	1	1
Dönüş hızı	√	√	3	3	1	1
Etki/Enerji		√				

Uygulanabilirlik Oranı

1=Yüksek

2=Orta

3=Düşük

1.12.2. Delme Modeli ve Sondaj Deliği Tasarımı

Enjeksiyon uygulaması yapılacak zemindeki enjeksiyon noktalarının göreceli konumunu aşağıdakilere dayanmaktadır:

- İyileştirilecek bölgenin geometrisi
- Sondaj deliklerinin pozisyonunu etkileyen fiziksel kısıtlamalar
- Sondaj deliklerinin beklenen yönsel toleransı
- Zeminde enjeksiyon malzemesinin beklenen hareket mesafesinin değerlendirilmesi

Sondaj deliklerinin ve enjeksiyon noktalarının sayısı, konumu, aralığı, derinliği, çapı, eğimi ve oryantasyonu jeolojik koşullara, enjeksiyon uygulanacak yapının türüne, yapılacak işin ölçeğine, ulaşılması gereken amaçlara, enjeksiyon metoduna, kullanılacak enjeksiyon malzemesinin türüne ve enjeksiyon basıncına bağlıdır. Sondaj delikleri arasındaki mesafe tahminleri Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Sondaj delikleri arasındaki mesafe tahminleri

Enjeksiyon uygulanacak ortam	Tanımlama	Delikler arasındaki mesafe (m)	
Zemin Derinliği (<25 m)	İnce kum	0,8 – 1,3	Permeasyon Enjeksiyonu
	Kum, kum ve akıl	1,0 – 2,0	Permeasyon Enjeksiyonu
	akıl	2,0 – 4,0	Permeasyon Enjeksiyonu
	Kum ve akıl	3,0 – 5,0	Permeasyon Enjeksiyonu
	$k_H \square k_v$		
Kaya Derinliği (<25 m)	İnce süreksizlik	1,0 – 3,0	Kaya Enjeksiyonu
	Açık süreksizlik	2,0 – 4,0	Kaya Enjeksiyonu

1.12.3. Enjeksiyon Sırası

En basit haliyle, bir geçiş deliğin belirli bir uzunluğu için durmaksızın yapılan tek bir enjeksiyonu kapsar. Yerleştirme süreci birçok delik üzerinde birçok safhadan oluşabilir. Her safha aynı veya farklı bir sıra enjeksiyon türünün uygulamasını içerebilir.

Tasarım aşağıdaki değişkenleri açıkça belirtmelidir:

- Enjeksiyon uygulanacak zemindeki iyileştirmenin ne biçimde yapılacağı.

- İkincil veya birbirini takip eden olası enjeksiyon uygulama safhalarının tanımlanması.
- Her safha için jet enjeksiyonu sayısı.
- Her geçiş için kullanılan enjeksiyon türü.

Enjeksiyon çalışmalarının planlanması arazi yönetimini de içeren interaktif ve süreklilik gösteren bir süreçtir.

1.12.4. Enjeksiyon Basıncı

Artan enjeksiyon basıncı genelde enjeksiyon malzemesinin penetrasyonunu sağlayacaktır. Bu yüzden eğer malzemenin akışkanlığı veya zemin içindeki akış mesafesi artarsa belirli bir penetrasyon mesafesi için yüksek enjeksiyon basıncı gerekmektedir.

Kayalarda etkin enjeksiyon basıncı kayaların kırılmaya başladığı andaki basınçla veya mevcut iyileştirilmiş çatlakların genişlemeye başlamasıyla alakalıdır.

İzin verilebilir enjeksiyon basıncı ortamda istenmeyen bir deformasyona neden olmayacak şekilde enjeksiyon malzemesinin ortama uygulandığı maksimum basınçtır.

1.13. Enjeksiyon Malzemesi Türleri, Karışım Tasarımı ve Kontrol Denemesi

1.13.1. Enjeksiyon Malzemesi

İngiliz Standartları Kurumu, Yapı ve inşaat mühendisliği terimleri sözlüğü enjeksiyon malzemesini “çatlakları ve boşlukları doldurmak için kullanılan ve uygulamadan sonra sertleşen akıcı madde” olarak tanımlar. ISO 6707/1 ise enjeksiyon malzemesini “çatlakları ve delikleri doldurmak için kullanılan ve uygulamadan sonra sertleşen ince agrega, su ve bağlayıcı içeren bir sıvı karışım” olarak açıklar. Enjeksiyon uygulamasında kullanılan terimler ve tanımlar sözlüğüne göre de enjeksiyon malzemesi zemin yada kaya formasyonuna enjekte edilen, zamanla sertleşen ve dolayısıyla enjekte olduğu yapının fiziksel özelliklerini değiştiren malzemedir.

Tanımların çeşitliliği enjeksiyon malzemesinin geniş uygulama aralığını yansıtır. Malzemeler zayıf jellerden 100 MPa ezilme gücüne sahip çimentolu materyallere, çok düşük akışkanlıktaki kimyasal çözeltilerden sadece yüksek basınçta akıcılık kazanan jellere

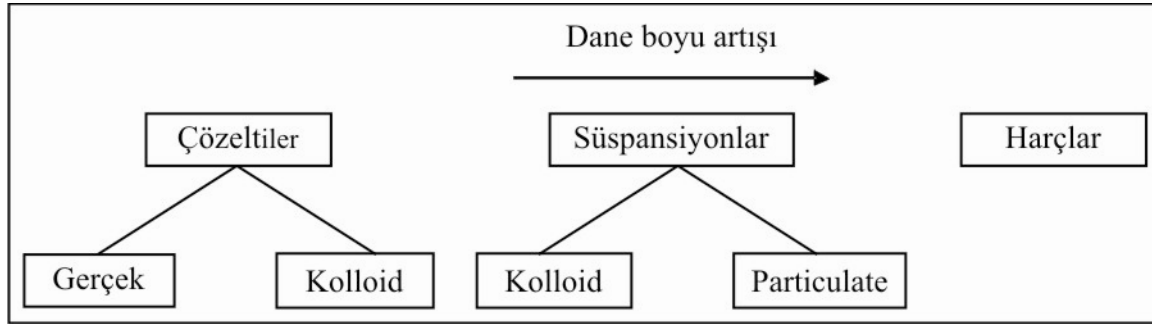
kadar farklılık gösterirler. Enjeksiyon malzemelerinin özelliklerinin farklılık göstermesinin nedenleri arasında boşlukların veya çatlakların boyutları, mukavemet gereksinimleri, akış özellikleri, büzülme veya şişme özellikleri ve maliyet sayılabilir.

Enjeksiyon malzemesini oluşturan materyaller alt gruplara ayrılabilir:

- Hidrolik bağlayıcılar ve çimento
- Kil mineralleri
- Kum ve dolgu malzemesi
- Kimyasal katkı maddeleri
- Su
- Diğer bileşenler

1.13.2. Enjeksiyon Malzemelerinin Sınıflandırılması

Enjeksiyon malzemeleri harç, macun, süspansiyon, jelâtinimsi madde (kolloid) ve çözelti olarak sınıflandırılabilir. Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması Şekil 18' de verilmiştir.



Şekil 18. Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması

Süspansiyon malzemeleri suda çözünmeden duran ve akışkanlık ve sertleşme özelliklerini geliştirmek için katkı maddesi eklenmiş su ve katı maddeleri içerir.

Süspansiyondaki katı maddelerin yerçekiminden dolayı çökme eğilimleri ve basınç altında süzülme eğilimleri enjeksiyon uygulaması yapılacak zeminin veya kayanın özellikleri ve yapısı ile ilişkilendirilerek dikkate alınmalıdır.

Süspansiyonları tanımlayan özellikler:

- Sedimentasyon oranı ve oluşabilecek toplam sedimentasyon miktarı (Denge)
- Su-katı madde oranı (suyun ağırlığının katı maddenin ağırlığına oranı)
- Filtre kaybı (Kontrol altındaki şartlarda standart filtre ortamı boyunca su kaybı)
- Katı parçacıkların dane boyu dağılımı
- Reolojik özellikler
- Zamana bağlı davranış.

Çok küçük daneli süspansiyonlar genelde 20 µm 'dan küçük parçacıkları içeren süspansiyonlardır. Katı parçacıkların topaklanma eğilimi dikkate alınmalıdır.

Kolloid süspansiyonları yerçekimi altında hiç oturma olmayacak kadar küçük daneli parçacıkları içeren süspansiyonlardır.

Solüsyonlar genellikle katı parçacıklar içermezler ve yerleştirme sırasında genelde jel kıvamındadırlar. Enjeksiyon uygulamasında kullanılan tamamıyla inorganik solüsyonlar genelde sodyum silikatın sulu solüsyonları ve inorganik ayıraçlardır. İyi tasarlanmayan silikat malzemeler zamanla kararsız hale gelebilirler, bunlar kullanılırken karışım ve nötrleşme oranı dikkate alınmalıdır. Asidik şartlarda jelleşen malzemeler en fazla dayanıklılık gösterir. Ancak belirli kirlilik içeren bazı solüsyonlar malzemenin geçirgenliğini etkileyebilirler. Bazı ülkelerde ve bazı özel uygulamalarda böyle kirlilikleri ortadan kaldırmak için karışımdan önce temel kimyasal solüsyonu santrifüj yapmak gerekebilir.

İyileştirilmiş zeminin özellikleri ve geoteknik çevredeki özellikle uzun vadedeki etkiler üzerindeki sinerisis etkisi zemin iyileştirmesinden önce değerlendirilmelidir. (Sinerisis enjeksiyon malzemesinin yapısının sıkışmasından dolayı gerilimsiz haldeki yerleştirilmiş jelden sıvının kaçmasıdır.) Genelde bu durum ince daneli zeminlerde bir problem değildir. Ancak silikat alüminat ve diğer yumuşak jel sistemleri daha az kalıcı olabilirler ve sinerisis etkisi daha fazladır. Sinerisisin iyileştirilmiş zeminlerin özellikleri üzerindeki etkisinin tam olarak anlaşılabilmesi için daha fazla çalışma gerekmektedir.

Enjeksiyon malzemesinin yerleştirilmesi sırasındaki sıcaklık değişikliklerinin malzemenin davranışı üzerine etkisi dikkate alınmalıdır.

Harç veya macun halindeki malzemenin katı parçacıkları süspansiyon içinde birbirleri ile fiziksel temas halinde olabilirler.

Kompaksiyon enjeksiyonu veya boşlukların doldurulması için kullanılan yüksek içsel sürtünmeli harçlar ve macunların uygulanabilirliği genelde çökme testi ile belirlenir.

Kendi ağırlığı sayesinde akan harçlar ve macunlar boşlukları, büyük çatlakları, delikleri ve yarıkları doldurabilirler.

1.13.2.1. Çimento Tabanlı Enjeksiyon Malzemeleri

Çoğunlukla zemini güçlendirmek ve su bariyerleri oluşturmak için kullanılan çimento tabanlı enjeksiyon malzemeleri spesifik su-çimento oranı ve toplam kuru materyal-su oranı ile karakterize edilirler.

Çimento bazlı enjeksiyon malzemelerinin özellikleri bileşenleriyle ilgilidir. Genelde bunlar kararlı, dayanıklı ve su-çimento oranı ile güçlü ilişkileri olan malzemelerdir. Çimento tabanlı enjeksiyon malzemeleri:

- Kolay hazırlanır
- Kapsamlı uygun bileşen içerir
- Kullanımı kolaydır
- Maliyeti düşüktür.

Çimento tabanlı enjeksiyon malzemeleri dört alt guruba ayrılabilir:

- Saf çimento süspansiyonları
- Kil/bentonit-çimento enjeksiyon malzemeleri
- Dolgu materyalli enjeksiyon malzemeleri
- Özel çimento tabanlı enjeksiyon malzemeleri.

Saf çimento süspansiyon malzemeleri saf çimentonun suyun içinde 1 ile 2,5 arasındaki su-çimento oranında bulunduğu kararsız süspansiyonlardır. Ancak günümüzde bu tür malzemeleri yarı kararlı yada kararlı hale getirebilecek kimyasal katkı maddeleri bulunmaktadır.

Eğer su-çimento oranı 0.5'den küçük ise karıştırıcının türüne bağlı olarak enjeksiyon malzemesinin katkı maddesiz sedimentasyonu azalabilir. Bu tür malzemeler öncelikle kaya enjeksiyonunda ki çatlaklar için kullanılır.

Kil-çimento-bentonit gurubu genellikle kararlı süspansiyonlardır. Kil ve sodyum bentonit genelde kullanılır.

Aşağıdakiler için stabilizasyon yapılır:

- Geniş aralıkta reolojik özellikleri olan homojen kolloid karışımlar elde etmek için
- Enjeksiyon sırasında çimento sedimentasyonunu önlemek için
- Su kaybını azaltmak için

- Yerleşim zamanını artırmak için
- Konsolide edilmiş zeminlerde geçirgenliği artırmak için
- Geniş aralıklı mekanik özellikler elde etmek için.

Malzeme/karışım oranları enjeksiyon uygulamasının hedefleri doğrultusunda değişmektedir. Dolgu katkılı malzemeler çimento veya kil-çimento olup bunlara ince malzeme eklenir. Dolgu katkıları malzemeye çimentonun yerine akışkanlığı ayarlamak ve düşük maliyet sağlamak için eklenir. Bilinen dolgu katkıları doğal kum, uçucu kül ve volkanik harçları içerir. Kumun kullanımı diğerlerine göre daha nadirdir. Harçlar enjeksiyon malzemeleri içinde dolgu katkısı olarak en çok kum içerirler.

Özel çimento tabanlı enjeksiyon malzemeleri şunları içerirler:

- sertleşme süreci kontrol altındaki çabuk yerleşen enjeksiyon malzemeleri
- genişleyen enjeksiyon malzemeleri
- genişletilmiş veya havalandırılmış enjeksiyon malzemeleri
- köpüklü enjeksiyon malzemeleri
- geçirgenliği, mekanik mukavemeti ve boşalmaya karşı direnci geliştirilmiş enjeksiyon malzemeleri.

Çabuk yerleşen enjeksiyon malzemeleri kimyasal reaksiyonun oranını artırmak için hızlandırıcı katkı maddeleri (Kalsiyum klorit yada sodyum silikat) içerirler.

Genişleyen enjeksiyon malzemelerinde malzemenin hacmi yerleştirildikten sonra genişler. Bu genişleme %100'den fazla olabilir.

Havalandırılmış enjeksiyon malzemelerinde hacim karışıma hava eklenerek artırılır. Hacim genelde enjeksiyon uygulamasından önceki hacme göre %30-50 oranında artar.

Köpüklü enjeksiyon malzemeleri çimentolu malzemenin su kullanılarak ayrı bir şekilde hazırlanmış köpükle karıştırılması sonucu oluşturulurlar.

Geçirgenliği geliştirilmiş enjeksiyon malzemeleri normalden küçük delikler ve çatlaklarda geçirgenliği sağlamak için oluşturulmuşlardır. Bu şu şekilde sağlanmıştır:

- Malzemenin parçacık boyutunu azaltarak
- Malzemenin akışkanlığını ve jelin mukavemetini azaltarak
- Aktifleştirici ekleyerek süzme etkilerine karşı direnci artırarak

1.13.2.2. Silikat Tabanlı Enjeksiyon Malzemeleri

Sodyum-silikatlı enjeksiyon malzemeleri şöyle karakterize edilirler:

- Silika-soda oranıyla alakalı yoğunluk
- Silikat içeriğine ve silikat-soda oranına dayanan ön akışkanlık
- Malzeme yerleşene kadarki akışkanlıktaki değişimler
- Kontrol edilebilir yerleşim süreci
- Yerleşim boyunca ve sonrası suyun kaçması
- Yerleşimden sonraki boşalmaya karşı direnç

Silikat tabanlı enjeksiyon malzemeleri az yada çok inceltilmiş sıvı haldeki sodyum silikata dayanmaktadır. Karşımın akışkanlığı zamanla değişir ve katı hale gelir. Silikat tabanlı enjeksiyon malzemeleri genelde geçirgenliğin az olduğu ve küçük gözenek boyutlarının süspansiyon malzemesinin kullanımına izin vermediği zeminlerde kullanılır.

Sodyum-silikat tabanlı enjeksiyon malzemelerinin temel özellikleri şunlardır:

- Düşük ve orta dereceli başlangıç akışkanlığı
- Ayarlanabilir yerleşim zamanı
- İyi mekanik mukavemet
- İyi su geçirmezlik performansı

Yukarıdaki özellikler ve bu özelliklerin değiştirilebilme özelliği enjeksiyon malzemesini enjeksiyon için uygun hale getirir. Silikatın ısısı düştüğünde, akışkanlığı hızlı bir şekilde artar. Silikatın özelliklerindeki herhangi bir değişim riskini ortadan kaldırmak için ısının sıfır derecenin altına düşmemesi gerekmektedir.

1.13.2.3. Reçineler

Reçineler normal sıcaklık şartlarında veya kapalı bir ortamda spesifik mekanik özellikleri olan bir jelin oluşmasına neden olabilen su içinde veya susuz bir çözücü olarak organik ürünlerin çözeltileridir.

Reçineler, iki şekilde var olurlar:

- Polimerizasyon, kataliz eden elemanın eklenmesi neden olur
- Polimerizasyon ve polikondansiyon, iki bileşenin kombinasyonunun kullanılması neden olur.

Genelde yerleşim zamanı ayarlanabilir. Reçine malzemeler şunlarla karakterize edilir.

- Çok düşük dereceli akışkanlık
- Yüksek mekanik mukavemetin çabuk ulaşım (birkaç saat içinde)
- Birkaç dakikadan birkaç saate kadar ayarlanabilir yerleşim zamanı
- Suya karşı iyi direnç
- Spesifik ve kontrol edilebilir reolojik özellikler
- Yer altı suyunun reaktivitesi
- Muhtemel önemli zehirlilik

Reçine enjeksiyon malzemeleri diğer kimyasal enjeksiyon malzemelerinden çok daha pahalıdır. Genelde diğer enjeksiyon malzemelerinin kullanılmadığı yerlerde kullanılırlar. Reçine türleri şunlardır:

- Akrilik reçine
- Değiştirilebilir akrilik reçine (sodyum silikatla ve polimerlerle)
- Fenol reçine
- Aminoplast reçine
- Poliüreten reçine

1.13.2.4. Diğer Enjeksiyon Malzemeleri

Diğer enjeksiyon malzemeleri organik bileşiklerden veya reçinelerden oluşmaktadır:

- Bitüm
- Lateks
- Polyester
- Epoksi
- Furanik reçineler

Bitüm enjeksiyon malzemeleri akışkandan katıya kadar farklılık gösterirler, sıcakken akıcı olurlar veya emülsiyon halinde olabilirler. Su geçirmezliği sağlamak için kullanılırlar. Lateks enjeksiyon malzemeleri pıhtı şeklinde polimer emülsiyonlardır. Polyester tabanlı enjeksiyon malzemeleri çözelti içinde polimer içerirler ve katalizör eklenerek sertleştirilebilirler. Epoksi enjeksiyon malzemeleri sertleştirme etmeni içeren sıvı polimerlerdir. Genelde yüksek sıkıştırma ve bağ mukavemeti gösterirler. Furanik reçineler bir asit katalizörünün varlığında furfurilik alkolün polimerleşmesinden elde edilir. Silikon

enjeksiyon malzemeleri katalizör etmenlerin kullanımı ile sertleşebilecek polimerlerdir. Oluşan reçineler esnektir ve mükemmel kimyasal dirence sahiptirler.

1.13.3. Enjeksiyon Karışımı Tasarımı

Enjeksiyon karışımı tasarımı, arazideki sıcaklık şartlarına, akışkanlıkla ilgili zaman faktörüne ve süreç ve yerleştirme süresince izin verilen maksimum ve minimum enkesiyon malzemesi sıcaklıklarına bağlı sertleşme özelliklerine uygun olmalıdır. Enjeksiyon malzemesinin türü ve yapısı aşağıdaki faktörlere uygun olarak seçilmelidir:

- İyileştirmenin amacı
- Zemin ve kaya koşulları
- Hedeflenen yerleştirme, zamanlama ve sıralama
- Enjeksiyon malzemesinin reolojik özellikleri
- Enjeksiyon bileşenlerinin uygunluğu
- Enjeksiyon malzemesinin yerleştirme ve sertleşme zamanları
- Yerleştirmeden sonraki fiziksel özellikler
- Erozyon etkileri

Enjeksiyon karışımı tasarımında hangi şartlar altında değişiklik yapılabileceğine işin başında karar verilmelidir. Bu şartlar beklenmeyen zemin hareketlerine ve tasarlanan karışımla istenilen hedefe ulaşılamamasını içerebilir. Geoteknik ve çevresel şartlar şunları içermektedir:

- Enjeksiyon malzemesi ile doldurulacak açıklıkların büyüklüğü
- Enjeksiyon malzemesinin enjekte edildiği ortamın geçirgenliği ve malzemenin geçirimsizliği
- Yer altı suyunun ve zeminin kimyası
- Enjeksiyon malzemesinin yüzeye çıkmasına bağlı olarak kuruması riski ve etkileri
- Enjeksiyonun karıştırılmasının, uygulanma sürecinin ve yerleştirilmesinin çevresel etkileri ve enjeksiyonun kirletme potansiyeli
- Zeminin ve enjeksiyon malzemesinin sıcaklıkları

1.13.4. Enjeksiyonun Test Edilmesi

Enjeksiyon malzemesini oluşturan bileşenlerin örnekleme ve test edilmesi tasarım şartlarını sağlamak için belirli aralıklarla yapılmalıdır.

Enjeksiyon uzmanı aşağıda listelenmiş ilgili enjeksiyon özelliklerini test edebilir:

Reoloji

- Akışkanlık
- Jel mukavemeti
- Uygulanabilirlik
- Geçirimsizlik

Dayanıklılık

- Büzülme veya genişleme
- Sineresis

Diğer Enjeksiyon Özellikleri

- Yoğunluk
- Dane boyu dağılımı
- Bozunma
- pH
- Sedimentasyon
- Mukavemet
- Yüzey gerilimi
- Uygulanabilirlik
- Su tutma kapasitesi

1.14. Ekipman ve Kontrol Sistemleri

Enjeksiyon ekipmanı aşağıdaki uygulamalar için kullanılan ekipmanları içerir:

- Enjeksiyon deliği açılması
- Enjeksiyon malzemesinin hazırlanması ve karıştırılması
- Enjeksiyon malzemesinin pompalanması
- Enjeksiyon malzemesinin enjekte edilmesi ve yerine yerleştirilmesi
- İzleme, kontrol ve test edilmesi

Kullanılacak ekipman beklenen maksimum enjeksiyon basıncına güvenli bir şekilde dayanacak şekilde tasarlanmalı ve uygulanan enjeksiyon tekniği ile uyumlu olmalıdır.

1.14.1. Delme Ekipmanı

Delme işlemi sırasında bazı parametreler otomatik olarak kaydedilir. Bunlar:

- Geçirimsizlik oranı
- Sıvı basıncı
- Akım hızı
- Dönüş hızı
- Delme biti üzerindeki ağırlık
- Sondaj deliği uzunluğu

Kaydedilen parametrelerin yorumu jeolojik ve geoteknik varyasyonlara kullanışlı veri sağlar.

1.14.2. Karıştırma ve Enjeksiyon Malzemesi Hazırlama

1.14.2.1. Depolama

Enjeksiyon bileşenleri sıcaklıktaki ve nemdeki değişimlere duyarlıdır ve dış kaynaklı kirlenmeden etkilenebilirler.

1.14.2.2. Kümelenme ve Karıştırma

Enjeksiyon malzemesi bileşenlerinin yüzdelere belirli tolerans seviyelerine sahip ölçme cihazları tarafından karar verilir. Otomatik kümelenme ve sıkıştırma süreçleri önerilmektedir. Kimyasal enjeksiyon malzemeleri ve sıvı karışımlarda doğruluk için küçük hacimli kümelenme kullanılır.

Karışım yapılırken kümelenme süreci düzenli aralıklarla izlenmeli ve kaydedilmelidir.

Karıştırıcıların amacı karışımda homojenliği sağlamaktır. Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin ve reçinelerin karışımı esnasında, seçilen enjeksiyon malzemesinin jel zamanı duyarlılığına göre gerekli kümelenme bileşenlerinin doğruluğu hesaba katılmalıdır.

1.14.2.3. Kontrol Testleri

Enjeksiyonun kalitesi ve sürekliliği iş esnasında istenen özelliklerle uyumluluğun izlendiği kontrol testleri yapmakla sağlanabilir. İyileştirilen zemindeki enjeksiyon malzemesinin varlığını değerlendirmede iz belirteçleri kullanılabilir.

Süspansiyonların dane boyu dağılımı kontrol edilmeli ve izlenmelidir. Arazide enjeksiyon malzemeleri üzerinde en azında rutin kontrol testleri yapılmalıdır.

1.14.3. Pompalama ve İletim

Enjeksiyon pompaları ve enjekte sistemi amaçlanan enjeksiyon tekniğine göre seçilir. Enjeksiyon pompaları seçilirken şu kriterler dikkate alınmalıdır.

- Enjeksiyon malzemesi ve tekniği beklenen basınçla ve iletim hızı ile uygun olmalıdır.
- Enjeksiyon malzemesinin ayarlanabilir iletim hızı
- Yeterli miktarda malzemenin enjekte edilmesini sağlayacak pompa çıkışı
- Enjekte etme hızının düzenlenmesi
- Ayarlanabilir maksimum basınç kontrolü
- Bakım ve temizleme kolaylığı
- Enjekte edilen malzemenin reolojisine uygun valf çapları

1.14.4. Enjeksiyon ve Yerleştirme

Çoğu enjeksiyon metodu ve uygulaması enjekte edilme aşamasında sondaj contalarının kullanılmasını gerektirir. Sondaj contaları enjeksiyon deliğini bir bölümünü izole ederek malzemenin sadece belli bir alana gitmesini sağlarlar. Sondaj contaları pasif, mekanik veya pnömatik olup farklı konfigürasyonlarda kullanılabilir. Tek bir sondaj contası sondaj deliğinin tabanı ile kendisi arasındaki zemin bölümünün iyileştirilmesini

sağlar. İki ayrı sondaj contası bu iki sondaj contası arasında kalan zemin bölümünün iyileştirilmesini sağlar. Çift sondaj contaları malzemenin tek sondaj contası geçme riskini azaltmak için çoğu zaman kullanılır.

Kullanılan sondaj contası türleri

- Mekanik
- Pnömatik
- Vidalı

1.14.5. İzleme, Kontrol ve Test Etme

Tasarımda enjeksiyon işleminden önce, enjeksiyon işlemi sırasında ve enjeksiyon işleminden sonra izleme ve kontrol kriterleri belirtilmelidir. Parametreler ve izleme yöntemleri açıkça tanımlanmalıdır. Tasarım enjeksiyon işleminin amaçlarını karşılayacak şekilde kontrol kriterlerini ve test etme şekillerini açıkça belirtmelidir.

İzlenmesi gereken parametreler şunları içermelidir:

- Enjeksiyon süreci ve yerleştirme esnasında malzemenin özellikleri
- Sondaj deliğinin yönü ve eğimi için kabul edilebilir toleranslar
- Her geçilen bölüm için enjekte etme işlemini sonlandırma kriterleri
- Her enjeksiyon safhasından ve projenin bitiminden sonra ulaşılan sonuçlar
- Yer hareketleri ve deformasyonlar
- Yer altı suyunun ve karışım suyunun kimyası
- Mevcut kuyularda ve gözlem sondaj deliklerinde su seviyeleri

Enjekte etme işleminin sonlandırılma kriterleri şunlara dayanmaktadır:

Zeminlerde

- Belirtilmiş basıncı veya hacmi sınırlandırma
- Enjeksiyona bağlı yer hareketlerinin tolerans edilebilecek değeri aşması
- Malzemenin yüzeye ya da komşu deliklere kaçışı
- Malzemenin sondaj contalarını geçmesi

Kayalarda

- Belirtilmiş basıncı veya hacmi sınırlandırma
- Yer hareketleri
- Malzemenin yan alanlara doğru kabul edilemez kaybı

Enjeksiyon iyileştirmesi delme ve arazi testleri ile değerlendirilebilir:

- Çekirdek delme
- Yıkıcı delme
- SPT
- Presiyometre testi
- Dilometre testi
- Su testleri (Geçirgenlik azaltma iyileştirmesi)
- Malzemedden numune alma

İzleme, kontrol ve test etme ekipmanından gelen sonuçlar enjeksiyon süreci boyunca sürekli analiz edilmelidir. Tasarımcılar bu sonuçlardan gelen değişiklikleri karar verme sürecine dahil etmelidirler.

1.15. Jet Enjeksiyonu

1.15.1. Tarihsel Gelişimi

Jet enjeksiyonu uzmanlık gerektiren bir geotekniksel süreç olup İngiltere’de bulunmuş ve 1965 yılında Yamakado kardeşler tarafından Japonya’da uygulanmaya başlanmıştır. 1970 yılında Nakanishi ve arkadaşları “CCP jet enjeksiyonu” (chemical churning plant) tekniğini geliştirmişlerdir. Yöntem ile yüksek basınçtaki karışımın enjeksiyonu sırasında tijin kendi etrafında dönmesi ve yukarı çekilmesi ile zemin-çimento kolonları oluşturulmaktadır.

1972 yılında Nakanishi ve arkadaşları CCP jet enjeksiyonu tekniğini geliştirerek “JSG” (jumbo jet special grout) oluşturmuşlardır. Bu sistem ile çimento jetinin hızı artırılmış ve sıkıştırılmış hava kullanılmıştır. CCP yöntemi ile elde edilen kolonlardan 1.5-2 kat daha büyük çaplı kolonlar üretilmesine olanak sağlamıştır.

1980 yılında CCP gurubu çok geniş çaplı kolonlar üretmek amacıyla “super soil stabilization management” tekniğini geliştirmişlerdir. Yüksek hızlı su jeti ile zeminin örselenmesi suretiyle bir delik açılmakta ve içi çimento harcı ile doldurulur. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde yöntem iyi sonuçlar vermektedir.

Jet enjeksiyon yöntemi Avrupa’ya da yayılmıştır. Özellikle İtalya’nın tekniğin gelişmesinde ve yaygınlaşmasında büyük rolü olmuştur.

Son üç yılda ilerleyen teknoloji sayesinde enjeksiyon pompası basıncı, enjeksiyon, hızı arttırılmış böylelikle kullanılan araçların güvenilirliği arttırılmış, insan gücü ihtiyacı azaltmış, hazırlık çalışmalarının daha çabuk yapılmasını sağlamıştır [6].

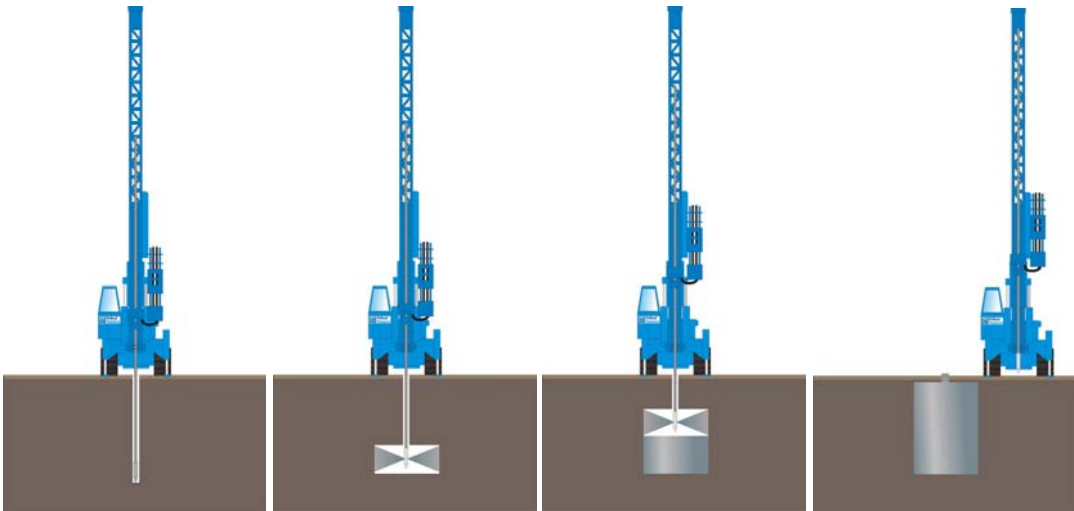
1.15.2. Fiziksel Prensipler

Doğal zemin yapısı, yüksek basınçlı su ile veya enjeksiyon jetleri ile aşındırılır ve geriye kalan zemin ise, tasarıma göre ya kısmen yada tamamen enjeksiyonla karıştırılır veya kaldırılarak, temiz çimentolu malzeme ile yer değiştirilir. Katı, göreceli olarak geçirimli olmayan, genelde birbiriyle bağlı enjeksiyon kolonları veya panelleri oluşturulur. Bunlar:

- Zeminin fiziksel özelliklerini geliştirirler (geçirgenliğini azaltır, mukavemet ve sıklığı artırırlar).
- Sıvı akışına karşı bariyer gibi davranırlar.
- Zemin enjeksiyon karışımını içindeki contaminant belirler.

Jet enjeksiyonu kolonları genelde malzeme enjekte edilirken jet monitörünün döndürülmesi ve kaldırılması ile oluşturulurlar. Jet enjeksiyonu kolonları yüzeye ulaşmadan sonlandırılırlar. Gereken enjeksiyonlu zemin hacmi, üst üste gelen sayısız kolondan elde edilebilir. Enjeksiyonun panelleri, jet monitörünün az ya da hiç döndürmeden çekilmesi ile oluşturulabilir.

Şekil 19'da jet enjeksiyonu oluşum şeması verilmiştir.



Şekil 19. Jet enjeksiyonu oluşum şeması

Şekil 20’de jet enjeksiyon yöntemi ile oluşturulmuş panellerin resmi verilmiştir.
(yüksek çimentolu /düşük bentonitli çamur)



Şekil 20. Jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulmuş paneller (yüksek çimentolu /düşük bentonitli çamur)

Şekil 21’de jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulmuş panellerin resmi verilmiştir.
(yüksek bentonitli /düşük çimentolu çamur)



Şekil 21. Jet enjeksiyonu yöntemi ile oluşturulmuş paneller (yüksek bentonitli /düşük çimentolu çamur)

Bu teknik çok yönlü olup, zayıf killeri, kumları, sulu çamurları, sıkı killeri ve ince tabakalı kumları da içeren birçok zemin türünü iyileştirilmesinde kullanılabilir. Problemlerli zeminler ve tabakalar hedeflenebilir, kritik bölgeleri iyileştirmek için enjeksiyon yapıları oluşturulabilir.

1.15.3. Jet Enjeksiyon Tesisi ve Ekipmanı

Harç karışımını sağlayan karıştırma ünitesi (mikser) ve pompalama tesisine (çimento pompası) ek olarak, jet enjeksiyonu şu ekipmanları gerektirmektedir:

- Jet enjeksiyonu için uyarlanmış delgi makinası; Uygulama projesinde öngörülen derinliğe kadar yukarıdaki yöntemlerden biri ile delgi yapabilecek ve jet enjeksiyonu kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesidir.
- Çimento silosu; Dökme çimento depolayabilen ve jet enjeksiyonu mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek çimento silosu ve konveyörüdür.
- Su deposu; 15-25 ton kapasiteli sağlam su tankı-havuzu ve su pompası olmalıdır.
- Hava kompresörü; 8-12 bar basınçlı kompresör
- Kaynak makinesi ve elektrik kesintilerinin olması halinde 50 KVA'lık bir jeneratör.

Karıştırma ünitesinde enjeksiyon uygulaması için hazırlanan karışım otomatik olarak hazırlanmalıdır. Sonra bu karışım pompa ünitesine aktarılır. İdeal jet enjeksiyonu tesisi Şekil 22'de gösterilmiştir[5].



Şekil 22. İdeal jet enjeksiyonu tesisi

Jet enjeksiyonunda değiştirilmiş bir delgi makinası kullanılır. Tijin devir ve geri çekilme hızı ve istenilen kolon çapı bu uyarlanmış delgi makinasındaki kontrol panelinden ayarlanmaktadır. Delgi ve enjeksiyon işleminde aynı tij kullanılır. Delgi makinası deliği oluşturur ve kesici akışkan ve enjeksiyon malzemesi valfler aracılığıyla enjekte edilir. Eğer sert zemin tabakaları veya temellerle karşılaşırsa enjeksiyon deliğini delmek için normal tip delgi kullanılır. Genelde işlem tek enjeksiyon safhasında yapılır. Yükseklik sınırlamaları veya yüksek enjeksiyon derinliklerinden dolayı bunun mümkün olmadığı durumlarda bu işlem birkaç safhada yapılacak şekilde tasarlanmalıdır.

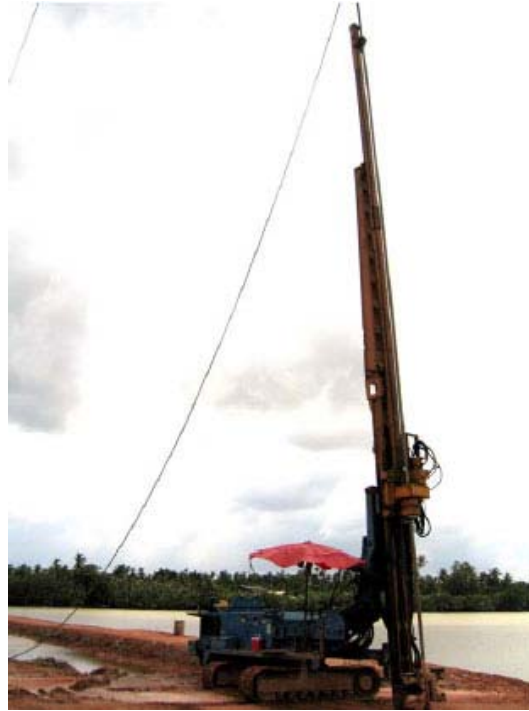
Enjeksiyon sistemi kullanılacak ekipmanı belirler. Tek fazlı enjeksiyon ekipmanı dibinde bir veya daha fazla enjeksiyon nozzle'ı olan içi oyuk gövdeli boruyu içermektedir. İki fazlı enjeksiyon sisteminde enjeksiyon malzemesi borunun içini ve basınçlı hava ise iç boru ile dış boru arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Enjeksiyon malzemesi ve onu çevreleyen hava ikili nozzle ile enjekte edilir. Üç fazlı enjeksiyon ise aynı merkezli üçlü boru sistemi kullanır. Bu sistem hava borusunun içinde su borusunu ve bunları çevreleyen enjeksiyon malzemesi borusunu içermektedir. Bu sistemde enjeksiyon malzemesi farklı bir nozzle'dan enjekte edilir. Jet nozzle'larının çapı çok farklılık göstermektedir. Ancak eğer çap çok küçük olursa sıvı basıncının artacağı göz önünde tutulmalıdır. Diğer taraftan eğer nozzle çapı çok büyük alınırsa, bu yüksek akış oranına, düşük sıvı basıncına ve küçük çaplı jet kolonlarına neden olur. Şekil 23'de çimento silosu, mikser ünitesi ve pompa ünitesi verilmiştir. Şekil 24'de yüksek basınç pompası, Şekil 25'de delgi makinesi, şekil 26' da ise delgi makinesi parçaları verilmiştir.



Şekil 23. Jet enjeksiyonu ekipmanı [5].



Şekil 24. Yüksek basınç pompası [5].



Şekil 25. Delgi makinesi

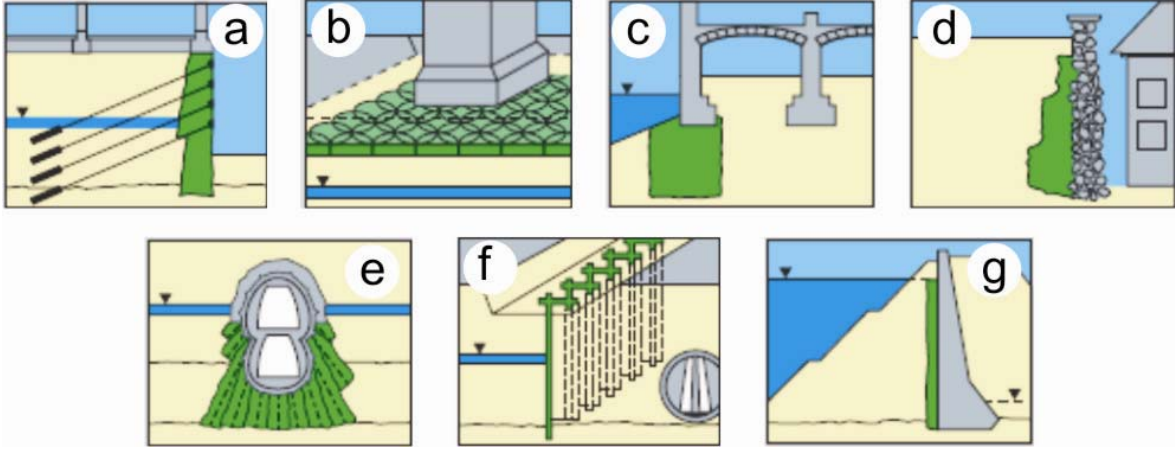


Şekil 26. Delgi makinesi parçaları

1.15.4. Jet Enjeksiyon Uygulamaları

Jet enjeksiyonu kolayca uyum sağlanabilen bir zemin iyileştirme tekniği olup gerek geçici gerekse kalıcı işler için çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Şekil 26’da jet enjeksiyon uygulamalarına ait şematik çizimler verilmiştir. Genelde büyük şantiyeler gerektirmediğinden, bu teknik erişim sıkıntısı olan alanlarda kullanılabilir. Uygulama alanları şunlardır:

- a) Var olan temellerin ve yapıların takviye edilmesinde
- b) Geçirimsiz perde teşkilinde
- c) Tarihi binaların temellerinin restorasyonunda
- d) İstinat duvarlarının takviyesinde
- e) Tünel inşaatlarında tünel aynasının ve tünel tavanının desteklenmesinde
- f) Panel duvarı oluşturmada
- g) Baraj gövdesini desteklemede
- h) Otoyol dolgularında
- i) Yeni inşaatlarda normal temel kazıkları yerine jet enjeksiyonu kolonları oluşturmada
- j) Kazı yüzeylerinin desteklenmesi
- k) Şev ve heyelan stabilizasyonunda
- l) Atık sahaların geçirimsizliğini sağlamada
- m) Köprü, viyadük ve liman temellerini oyulmaya karşı korumak amacıyla
- n) Mevcut inşaatlarda temel yüklerini daha derinde olan taşıyıcı zemine aktarmada
- o) Geniş temel alanlarında zemin iyileştirmesinde
- p) Sıvı akışına karşı dikey yada yatay bariyerler oluşturulmasında
- q) Deforme olan alanların rehabilitasyonu



Şekil 27. Jet enjeksiyonu uygulamaları [7]

1.15.5. Jet Enjeksiyonu Sınırlamaları

Jet enjeksiyonunda üç ana kısıtlama vardır.

1. Zemin şişmesini minimuma indirmek veya ortadan kaldırmak için jet enjeksiyon sürecinin atık dönüşümüne bağlı iyi kontrolünün sürekliliğinin sağlanması önemlidir. Aşırı zemin şişmesi yer altı hizmetlerine komşu yapılara veya temlerle zarar verebilir.
2. Atık dönüşümleri engellenebilir; eğer jet enjeksiyonunda ısrar edilirse zeminde çatlaklar oluşabilir.
3. Çok miktarda çamurlu atık oluşabilir. Örnek olarak bir jet enjeksiyon birimi her vardiya için 50 m^3 atık oluşturur. Bunun hacminin %33'e kadar olanı, seçilen jet enjeksiyon süreci ve malzemeye bağlı olarak katı malzemeden oluşabilmektedir.

1.15.6. Jet Enjeksiyon Teknikleri

Jet enjeksiyonunda ilk aşama bir enjeksiyon deliği açmaktır (genelde 100-200 mm. çapında). Jet borusu genelde delme ekipmanının bir parçasıdır ve çimentolu zemin kolonunun temeli için gereken derinliğe yerleştirilir. Zor zemin şartlarında sondaj deliği önceden delinmiş olabilir.

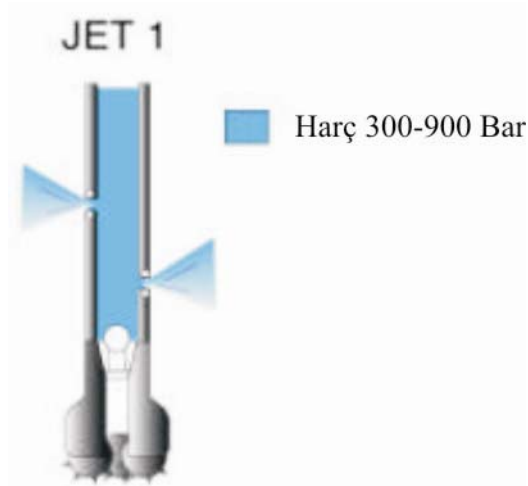
Enjeksiyon malzemesinin veya su ile enjeksiyon malzemesinin yüksek basınçla jetlenmesi sondaj deliği çevresindeki zemini aşındırır ve malzeme zeminle karışır veya malzeme zeminin yerini alır. Jet monitörünün döndürülmesi ve çekilmesi sonucunda

sadece çimento yada zemin ve çimento kolonları oluşur. Sonra jet enjeksiyon aleti yeni bir konuma götürülür ve süreç tekrar edilir.

Şu anda kullanımda olan üç jet enjeksiyonu sistemi vardır

1.15.6.1. Tekli Jet Sistemi (JET1)

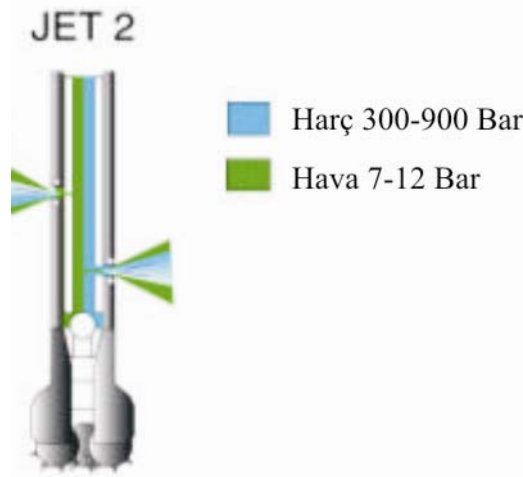
Bu en basit ve en yaygın tekniktir. Enjeksiyon malzemesinin 5-10 mm çapındaki bir veya birkaç nozzleden yüksek basınçla (60 Mpa, 600 bar) zemine enjekte edilmesidir. Enjeksiyon jeti püskürttüğü harç ile zemini aşındırarak zemin-çimento karışımı meydana getirir. Bu sistemde atık az olur. Jet 1 uygulaması şematik çizimi Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Jet 1 uygulaması [8].

1.15.6.2. İkili Jet Sistemi (JET2)

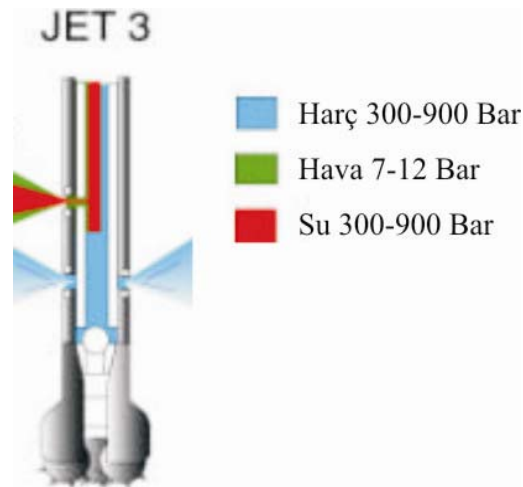
Çift çeperli bir boru takımının delici olarak kullanıldığı bir sistem olup tekil sistemin bir uzantısıdır. Enjeksiyon jetinin (iç boru) genellikle 0,2–1,5 Mpa (2-15 bar) basınçlı hava (dış boru) ile çevrelendiği bir sistemdir. Kinetik enerji kayıplarındaki tekli sisteme göre azalma daha yüksek hacimde bir zeminin iyileştirilmesini sağlar. İç borudaki malzemenin hava ile çevrenmesi jettin kesme kabiliyetini artırır. Jet 2 uygulaması şematik çizimi Şekil 29’da verilmiştir.



Şekil 29. Jet 2 uygulaması [8].

1.15.6.3. Üçlü Jet Sistemi

Bu sistem zemini aşındırmak için basınçlı hava ile çevrelenmiş bir basınçlı su ve malzemenin enjeksiyonu için ayrı nozzle kullanmaktadır. Hava, su ve malzemeyi farklı basınçlarda enjekte edebilmek için iç içe üçlü bir boru sistemi gerekmektedir. Genelde hava için 0,2–1,5 Mpa (2–15 bar), su için 4 Mpa (40 bar) ve enjeksiyon malzemesi için 0,5–3 Mpa (5–30 bar) basınç uygulanmaktadır. Jet 3 uygulaması şematik çizimi Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Jet 3 uygulaması [8].

Yakın zamanda, yukarıdaki sistemlerden farklı olarak yeni bir çiftli sistem uygulamasına geçildi. Bu sistem, yukarıdakilerden ayırmak için çiftli su sistemi olarak adlandırılabilir. Üçlü sisteme çok benzemekle beraber, burada basınçlı suyu çevreleyen basınçlı hava bulunmamaktadır. Püskürtme pompaları ve ilgili donanımdaki devam eden gelişim ve düzenleme sayesinde günümüzde daha yüksek püskürtme enerjileri elde etmek mümkün olmaktadır. Bu da çiftli püskürtme sistemlerinin kullanımını arttırmakta ve dolayısıyla üçlü sistemin etkinliğini giderek azaltmaktadır.

1.15.7. Jet Enjeksiyon Sistemlerinin Karşılaştırılması

Tek enjeksiyon sistemi temelde enjeksiyon ve enjeksiyon malzemesinin zemin ile karışması ile sonuçlanır. İkili ve üçlü enjeksiyon sistemleri daha fazla atık oluşturur. Bu fazla miktardaki atık bu sistemlerin yarı karışım ve yarı yer değiştirme süreçleri içerdiğini göstermektedir. Tablo 6' da farklı jet sistemlerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 6. Farklı püskürtme/jet sistemlerinin karşılaştırılması

	Tekli	Çift	Üçlü
İyileştirilmiş zemin tipi	İri taneli zeminler, Zayıf ayrılmış kaya	İri taneli zeminler ve zayıf kaya ve bazı killi zeminler	Herhangi bir taneli zemin, killi zeminler, sert veya sıkı zeminler, karışık alüvyon ve bazı zayıf kayalar
Kolon Çapı	En küçük (enerji soğuruluyor.) Genelde 0,5 – 0,6 metre	Orta dereceli	En büyük (basınçlı havanın çevrelediği püskürtmenin penetrasyonu nedeniyle) Genelde 1,0–2,0 metre
Uygulama	Yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesi zemine direk enjekte edilir.	Basınçlı hava ile çevrelenmiş yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesi zemine direk enjekte edilir.	Aşınma için basınçlı hava ile çevrelenmiş basınçlı su; enjeksiyon malzemesi zemine düşük basınçla enjekte edilir.
Zemin Hareketi	Atık dönüşündeki tıkanıklık yüksek basınç oluşmasına neden olabilir, siltlerde ve killerde çatlaklar oluşabilir ve sonucunda zemin hareketleri görülebilir.	Atık dönüşündeki tıkanıklık yüksek basınç oluşmasına neden olabilir, siltlerde ve killerde çatlaklar oluşabilir ve sonucunda zemin hareketleri görülebilir.	Hava sızıntısı oluşabilir ve bu sızıntı zayıf zemin yüzeylerinin aşınmasına neden olabilir.
Basınçlar	Enjeksiyon malzemesi 30-50 Mpa (Grout) (300-500 bar)		
Maliyet	Genelde halledilemsi gereken daha az atık madde Daha az tesis ve donanım Daha fazla kolon gerekliliği toplam maliyeti artırabilir.	Orta dereceli; tekliye göre daha fazla tesis, üçlüye göre daha fazla kolon	Diğer sitemlerden daha fazla tesis Daha az kolon gerekliliği toplam maliyeti azaltabilir.
Diğer	Daha zayıf kolonlar oluşur. Teknik olarak ikili ve üçlü sisteme göre daha düşük niteliklidir.	Orta dereceli	Su jeti daha az viskoz, daha iyi akan enjeksiyon malzemesine olanak sağlar

1.15.8. Çalışma Parametreleri

Jet enjeksiyonu çalışma parametreleri uygulanacağı zeminin şartlarına, elde edilecek kolon çapına, ulaşılması hedeflenen taşıma gücüne ve uygulanacak yöntemle göre tespit edilir. Çalışma parametreleri şunlardır:

- basınç
- enjeksiyon harcı dozajı
- dönme ve çekme hızı
- nozzle

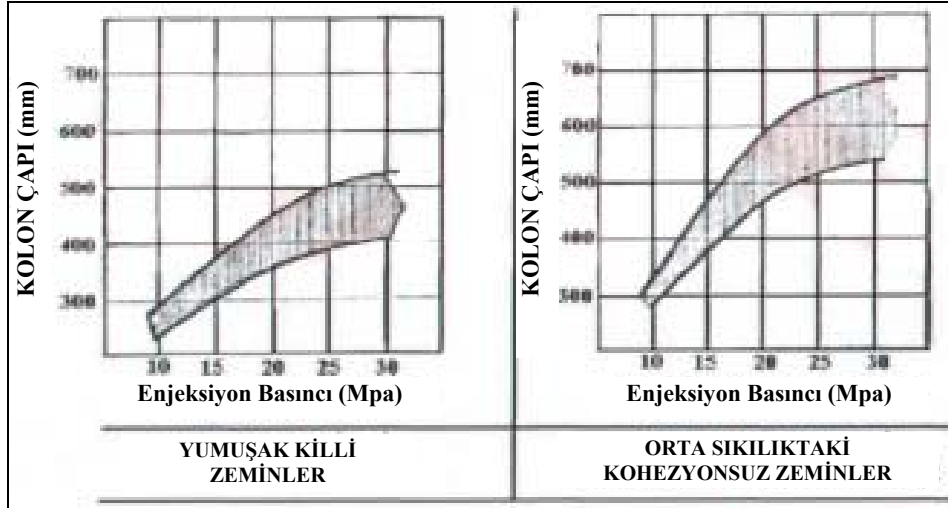
1.15.8.1. Basınç

Hedeflenen kolon çapının elde edilmesinde en önemli parametre enjeksiyon basıncıdır. Genellikle enjeksiyon basıncındaki artış ile kolon çapı da artış sağlar. Her zaman kullanılan enerjideki artış istenilen kolon çapı artışını meydana getirmeyebilir. Bunun nedeni kohezyon ve yapım süresidir. Zeminin kohezyonu azalıp, kaba dane oranı artıkça kolon çapı artmaktadır[9,10].

Enjeksiyon basıncı şu şekilde sınıflandırılır[10]:

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

Şekil 31’de çap ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki yumuşak-killi zeminler ile kohezyonsuz zeminlerde gösterilmektedir.



Şekil 31. Oluşturulan kolon çapı ve basıncı arasındaki ilişki [11].

1.15.8.2. Enjeksiyon Harcı Dozajı

Enjeksiyon harcında en iyi sonuçların alındığı su-çimento oranı 0,7-0,8 limitleri arasındadır. Bu orandaki su-çimento karışımına akışkanlığını ve işlenebilirliğini artırmak amacıyla %2-3 oranında bentonit ilave edilir. Böylelikle su-çimento karışımı 1,0 yükseltilmiş olur. Su-çimento oranındaki artış serbest basınç mukavemetinde büyük bir değişiklik yapmaz [12].

Enjeksiyon harcının özgül ağırlığı $1410-1570 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir. Çimento miktarı $350-700 \text{ kg/m}^3$ arasında değişir fakat standart olarak 450 kg/m^3 kullanılır. Enjeksiyon harcını iyileştirme etkisini artırmak amacıyla katkı maddeleri ile yeniden düzenlemek mümkündür. Bu katkı maddeleri enjeksiyon harcına katılımı çimento ağırlığının % 0.03-% 0.04 arasında olmalıdır.

1.15.8.3. Dönme ve Çekme Hızı

Zemin ile enjeksiyon harcının etkili bir şekilde karıştırılabilmesi için tijin dönme hızı ve çekme hızı önemli parametrelerdir. İyileştirilmesi düşünülen zeminde tijin dönme hızının yavaş ve çekme hızının ise homojen bir dağılım sağlayabilecek düzeyde olması tercih edilir [10].

Kohezyonlu zeminlerde yapılan uygulamada iyi bir karşım meydana getirebilmek ve zemini etkili bir şekilde parçalayabilmek için daha fazla zamana ihtiyaç duyulur. Tijin çekilme miktarı 2-8 cm halinde adımlardan oluşmaktadır. Yapılan uygulamalardan en uygun miktarın 4 cm olduğuna karar verilmiştir. Enjeksiyon tijinin yukarı doğru çekilme hızı zemin karakterine göre:

- Gevşek kum,çakıl içeren zeminlerde 5 sn/4 cm
- Orta sıkılıkta çakıl içeren zeminlerde 12-17 sn/4 cm
- Siltli zeminlerde 18-120 sn/ 4cm

değişebilmektedir [12].

Tijin dönme ve çekme hızı uygulamada kullanılan jet enjeksiyon tekniğine göre ve iyileştirilecek zeminin hacminin büyüklüğüne de bağlıdır. İyileştirme yapılacak zeminin hacminin büyük olması nedeni ile daha büyük çapta kolon oluşturmak gerektiğinden Jet2 ve Jet3 tekniği Jet1 tekniğine göre daha fazla zaman almaktadır. Dönme hızı 10-20 devir/dakika arasında değişmekte nadiren 30 devir/dakika olmaktadır. Tahmini kolon çapı ile tijin çekim hızı arasındaki ilişki Şekil 32’de gösterilmiştir.

Jet enjeksiyon uygulamasında kullanılan tekniğe ve planlanan mukavemete bağlı olarak jet enjeksiyon kolonunun bir metresinde kullanılacak olan çimento miktarı hesaplanabilmektedir. Enjeksiyonun su-çimento oranı ve birim hacim ağırlığı (γ) bilinmesi şartıyla uygulanan enjeksiyon basıncı (P_i) altında eşit yükseklik (h) aşağıdaki gibi hesaplanabilir[10].

Eşit yükseklik: $h = P_i / \gamma$

Enjeksiyon çıkış hızı: $V = (2gh)^{1/2}$

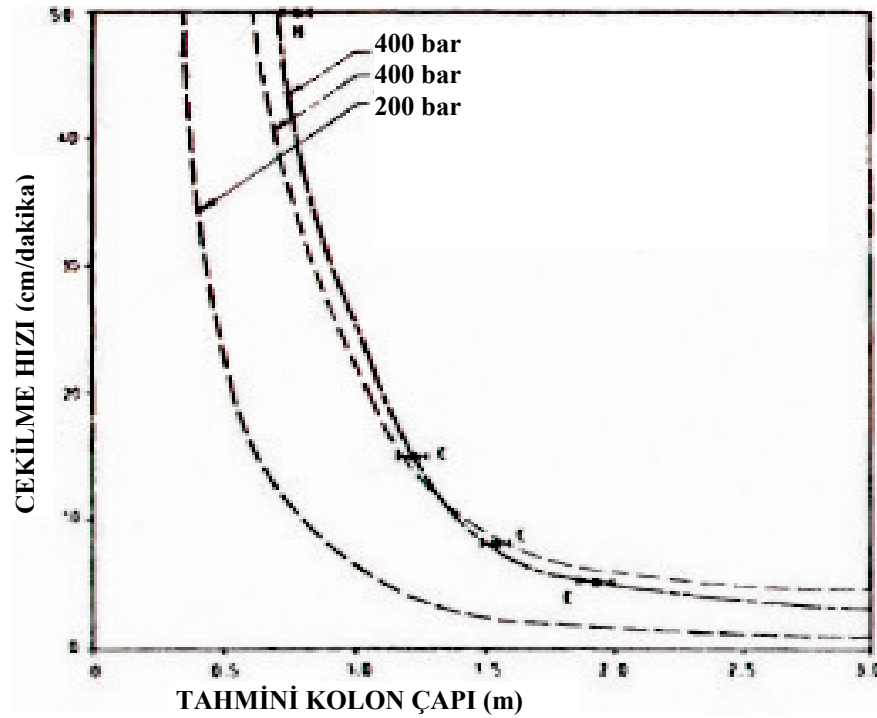
Enjeksiyon müktaarı: $Q = V/A$

Tablo 7’de nozzle çaplarına ve basınçlarına göre enjeksiyon miktarları gösterilmiştir [10].

Tablo 7. Enjeksiyon debisi / nozzle ilişkisi [10]

SU/ÇİMENTO =1						ENJEKSİYON ÖZGÜL AĞIRLIĞI = 1,52					
NOZZLE ÇAPLARI (mm)											
	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5
NOZZLE'LARDAN ENJEKSİYONUN ÇIKIŞI											
BASINÇ	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak
300	18	24	30	37	53	73	83	95	114	148	188
350	20	26	32	40	58	79	90	103	123	160	203
400	21	27	35	43	62	84	96	110	131	171	217
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	182	230
500	23	31	39	48	69	94	108	123	147	192	242
550	25	32	41	50	72	98	113	129	154	201	254
600	26	34	42	52	76	103	118	134	161	210	266

Şekil 31'de tahmini kolon çapı ile tijn çekim hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir[13]



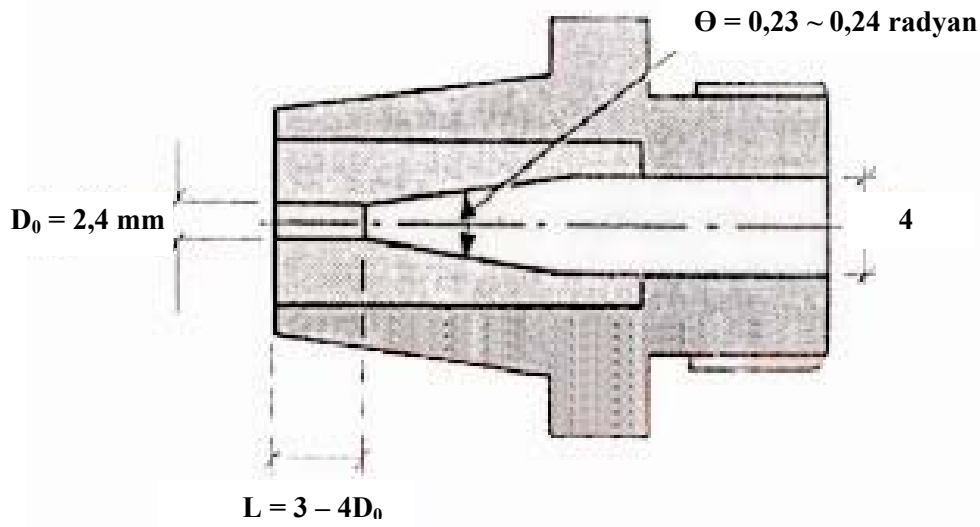
Şekil 32. Tahmini kolon çapı ile tijn çekim hızı arasındaki ilişki

1.15.8.4. Nozzlelar

Jet enjeksiyon yönteminin verimli bir şekilde uygulanabilmesi için önemli parametrelerden biride püskürtme memelerinin tasarımıdır. Püskürtme harcının debisi ve enerjisi, enjeksiyon harcının girdiği ve püskürtüldüğü delik çapları ile enjeksiyon basıncının fonksiyonudur.

Püskürtme memeleri (nozzle) enjeksiyon tijinin uç kısmında yer alan monitörün üzerinde bulunurlar. Püskürtme memeleri (nozzle) sayısı kullanılan jet enjeksiyonu uygulamasına göre değişmektedir. Örneğin tek akışkanlı jet uygulamasında bir yada iki nozzle varken, iki akışkanlı jet uygulamasında genellikle bir tane nozzle vardır. Enjeksiyon harcının yayılması, nozzle çapı küçüldükçe artmaktadır. az ise enerji kaybı da az olmaktadır [10,12,14].

Nozzle çapları 1.5-8 mm arasında değişmektedir. Şekil 33'de tek delikli nozzle formunun şematik çizimi gösterilmiştir. Şekil 34' de nozzle resmi verilmiştir.



Şekil 33. Tek delikli nozzle [14]



Şekil 34. Nozzle resmi [15].

1.15.9. Jet Enjeksiyonu Kolonlarının Çeşitli Zeminlerde Teşkili

Jet enjeksiyon kolonları ile başarılı bir zemin iyileştirmesi yapabilmek için işletim parametrelerinin çok dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Zemin iyileştirmesinde kullanılacak basınç değeri ve enjeksiyon süresi zeminin direncine göre tespit edilmelidir. Aşağıda iki farklı zemin çeşidi için karşılaşılan durumlar verilmiştir. Şekil 35’de jet enjeksiyon yöntemi ile oluşturulmuş kolonlar görülmektedir.



Şekil 35. Jet enjeksiyon yöntemi ile oluşturulmuş kolonlar

1.15.9.1. Kohezyonlu Zeminler

Kohezyonlu zeminde oluşturulması düşünülen elemanın düzgün ve sürekli olması için küçük çaplı enjeksiyon memeleri kullanılmalıdır. Nozzle çapları 1.6 mm-2.0 mm arasında değişmektedir. En fazla 2 adet nozzle kullanılmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde kullanılan yüksek basıncın (500-600 bar) zeminde kırılma , kabarma ve parçalanma meydana getirmesinden dolayı basıncın ve enjeksiyon malzemesinin azaltması gerekir. Kesilen zeminin çeşitli nedenlerden dolayı enjeksiyon forajını tıkamasından dolayı aşırı olan zeminin dışarı atılmasını engeller. Enjeksiyon işlemine devam edilmesi durumunda aşırı basınçla kuyu içerisinde bulunan bulamacın çevrede bulunan zemini enjeksiyon borusu istikametinde itmesi ile kolonlarda süreksizliğe ve yüzeyde kırılma ve çatlamalara neden olur.

Kohezyonlu zeminlerde yapılan iyileştirme işleminde zorluk yaşıyorsa çift nozzle yerine tek nozzle kullanılmalıdır. Böylelikle yüksek basınç altında meydana gelen enerji kaybı kontrol edilebilir. Bu tür zeminlerde 250 -300 barda ön yıkama yapılması önerilmektedir.

1.15.9.2. Kohezyonsuz Zeminler

Bunlar çakıllar ya da granüler zeminlerde denilebilir. Bu çeşit zeminlerde kullanılan enjeksiyon basıncı ve nozzle çapı kohezyonlu zeminlerde kullanılanlardan farklıdır. Enjeksiyon basıncı 400-500 bar ve püskürtme memesi çapı 2.5-3.0 mm arasında değişir. Bu nedenle de zemine daha fazla miktarda karışım enjekte edilebilmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde Jet1,Jet2 ve Jet 3 tekniklerinin hepsi uygulanabilmektedir.

a) Jet 1: Genellikle bir veya iki adet püskürtme memesi kullanılmaktadır. Daha az sayıda nozzle kullanımıyla enerji kaybı az olmakta ve bu nedenle eşit iyileştirme alanları oluşmaktadır. Daha küçük çapta püskürtme memesi kullanımında meydana gelen enerjideki kayıp enjeksiyonun püskürtme memesinden çıkışını ve etrafa yayılımını etkilemektedir. Nozzle çapı artırılırsa enjeksiyonun etrafa yayılımında azalma meydana gelir.

b) Jet 2: Genellikle bir püskürtme memesi kullanılmaktadır. Nozzle çapları 2.5-4.0 mm arasında değişmektedir. Bunun nedeni; şayet iki nozzle kullanılacak olursa hava bu iki nozzle birinden çıkabilir ve operatör bunu farkında olmayabilmektedir. Bu durumda da zemin iyileştirmesi gerektiği gibi yapılamaz.

c) Jet 3: Jet 2' deki geçen hususlar bu yöntemde de geçerlidir.

Enjeksiyon basınç değerleri ve diğer hususlar Tablo 8'de verilmiştir[10].

Tablo 8. Jet enjeksiyonu çalışma parametreleri

PARAMETRELER		JET ENJEKSİYONU TEKNİKLERİ		
		JET 1	JET 2	JET 3
ENJEKSİYON BASINCI				
SU	(bar)	OY (200-300)	OY (200-300)	300-500
ENJEKSİYON	(bar)	300-600	300-600	40-60
HAVA	(bar)	-	8-12	8-13
AKIŞ ORANLARI				
SU	(lit/dak)	ÖY	OY	70-100
ENJEKSİYON	(lit/dak)	60-150	100-150	150-250
HAVA	(lit/dak)	-	10-30 000	10-30 001
NOZZLE ÇAPLARI				
SU	(mm)	OY (1.6-2.4)	ÖY (1.6-2.4)	1.8-2.5
ENJEKSİYON	(mm)	1.6-3.0	2.0-4.0	3.5-6.0
NOZZLE SAYILARI				
SU	n	OY (1)	ÖY(1)	1-2
ENJEKSİYON	n.	2-6	1-2	1
TİJİN DÖNME HIZI				
	(devir/dak)	10-30	10-30	10-30
TİJİN ÇEKİLME SÜRESİ / ADİM (4 cm)				
	sn	8-15	10-20	15-25
KOLON ÇAPI				
ÇAKILLI / KUMLU ZEMİNLER	(m)	0.6-1.0	1.0-2.0	1.5-2.5
KILLI ZEMİNLER	(m)	0.5-1.0	1.0-1.5	1.0-2.0
SU/ÇİMENTO ORANI (w/c)				
		0.8/1'den 2/1'e kadar		
TÜKETİLEN ÇİMENTO MİKTAR]				
SLAII EDİLEN ZEMİN BİRİM IIACM	(kg/m ³)	400-800	400-800	400-800
ZEMİN-ÇİMLNTO MUKAVEMETİ				
ÇAKILLI / KUMLU ZEMİNLER	(kg/cm ²)	100-300	75-250	75-200
KILLI ZEMİNLİ-R	(kg/cm ²)	15-100	15-85	15-75

NOT : ÖY- ÖN YIKAMA

1.15.10. Uygulama Sonrası Zeminin Fiziksel Özellikleri

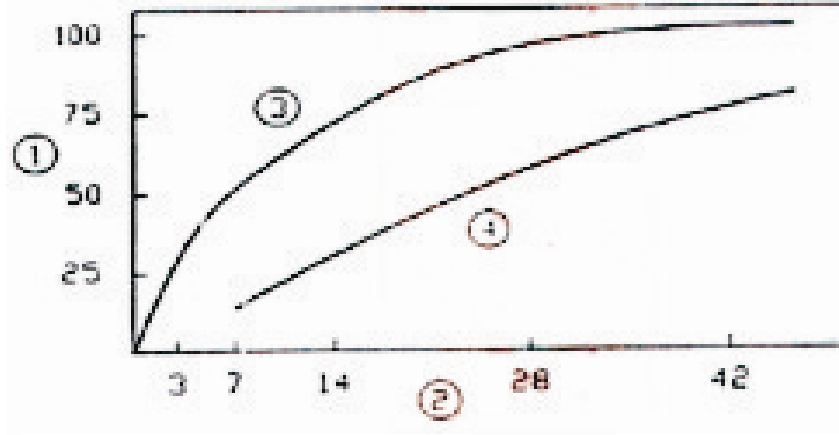
Jet enjeksiyon uygulaması ile iyileştirilmiş zeminin özellikleri uygulanan sisteme, kullanılan enjeksiyon karışımına ve jet enjeksiyon kolonunda bulunan çimento miktarına bağlıdır [9].

1. Kumlu zeminlerde kesici jet tesiri tijin devir sayısına, çekme hızına, basınca, zeminin cinsine, sıklığı v.s parametrelerine bağlı olarak 0.6-2.0 m arasında değişen çapa sahip jet enjeksiyon kolonları elde edilebilir [12].
2. Enjeksiyon tijinin döndürülmeden sadece düşey yöndeki hareketi ile 12 cm ile 2 cm arasında değişen perde duvarlarının kalınlığı uzayarak 4 ile 6 metre arasında bir değer alabilmektedir.
3. Uygulanmış jet enjeksiyon kolonlarından alınan numuneler üzerinde yapılmış permeabilite deneylerine göre permeabilite katsayısı değişik zemin çeşitlerine göre Tablo 9'da gösterilmiştir [13].

Tablo 9. Zemin çeşitleri ve beklenen permeabilite katsayıları

Siltli kil-kil	$10^{-7} - 10^{-9}$ m/s
Killi silt-silt	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s
Siltli veya çakıllı kum-kum	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s
Kumlu çakıl-çakıl	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s

4. Jet enjeksiyon uygulamasında mevcut zeminin bir kısmı ejeksiyonu yapılan çimento harcı ile karışmasından ötürü ortaya çıkan malzemenin serbest basınç mukavemeti çoğunlukla mevcut zeminin cinsine de bağlıdır. Jet enjeksiyon kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti ile basınç mukavemeti belirlenebilmektedir. İyileştirilmiş zeminde meydana gelen basınç mukavemeti artışı Şekil 36'da verilmektedir [9].



1) Basınç mukavemeti artış %'si
3) Kohezyonsuz zeminler

2) Sertleşme süresi
4) Kohezyonlu zeminler

Şekil 36. İyileştirilmiş zeminde meydana gelen basınç mukavemeti artışı

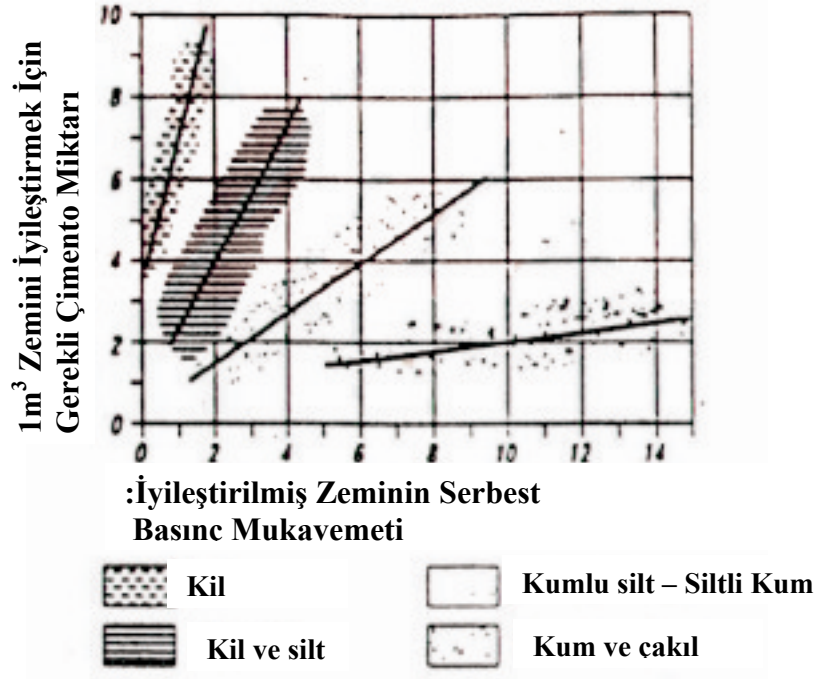
Jet enjeksiyon uygulamasında su/çimento=1 ve çimento dozajı 450 kg/m^3 kullanılması ile çeşitli uygulamalarla elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değerleri Tablo 10'da verilmiştir [10].

Tablo 10. Çeşitli uygulamalarla elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değeri

Organik zeminler	3 kg/cm^2
Kil	$18-30 \text{ kg/cm}^2$
Silt	$30-45 \text{ kg/cm}^2$
Kum	$60-90 \text{ kg/cm}^2$
Çakıl	100 kg/cm^2

Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti arasındaki ilişki şekil 37'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kil zeminde çakıl zemine göre kullanılan çimento miktarı fazla olmakta ama kil zeminde meydana gelen mukavemet çakıl zeminden az olmaktadır[10].

5. Jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmiş zeminde elde edilen SPT/N değeri doğal zeminde elde edilen SPT/N değerinden %20-25 daha fazla olmaktadır.



Şekil 37. Enjekte edilen çimento miktarı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki

1.15.11. Jet Enjeksiyon Uygulaması Avantajları ve Dezavantajları

Jet enjeksiyon uygulamasının avantajları aşağıda verilmiştir [10,12,16,17].

- Çoğunlukla tüm zeminlerde uygulanabilmektedir.
- Diğer yöntemlere kıyasla daha küçük ve hafif ekipmanla yöntem uygulanabilir.
- Uygulamada kimyevi madde kullanılmadığından çevre kirliliği yaratılmadan zemin iyileştirmesi gerçekleştirilebilir.
- Uygulamada küçük boyutlu makinelerin kullanılabilmesi sınırlı alanlarda çalışma kolaylığı sağlamaktadır..
- Zeminde küçük çaplı bir delik delinerek (10 cm) büyük çaplı kolonlar teşkil edilebilmektedir (50-300 cm).
- Yöntem zararlı titreşimler meydana getirmediğinden hassas yapıların yakınında da uygulanabilir.
- Kolonlar istenilen derinlikten başlayıp istenilen derinlikte bitirilebilir.
- Gerekli permeabilite ve istenilen mukavemet sağlanabilir.
- Geometrik ölçülerin önceden belirlenmesi sayesinde malzeme sarfiyatının önceden hesaplanmasına olanak verir.

- Arazi şartlarına bağılı olarak yöntem inşaat süresini %30-60 kısaltır.
- Çok riskli inşaatlarda can güvenliği sağlanmasına olanak verir.

Jet enjeksiyon uygulamasının dezavantajları aşağıda verilmiştir [16].

- Zemin çeşidine bağılı olarak kolon çapları istenilenden farklı olabilmektedir.
- Uygulamada kullanılan çok büyük basınçlar zeminde çatlak ve kırıklara neden olmakta buda zeminin taşıma gücünün azalmasına ve istenmeyen oturmaların meydana gelmesine neden olur.
- Bazen de kolon çapları istenilenden büyük olmasından ötürü ekonomik olmamaktadır.
- Uygulama için basit bir dizayn yöntemi geliştirilemediğinden tecrübelerle dayanarak yöntem gerçekleştirilmektedir.
- İkili jet ve üçlü jet için daha kompleks araçlar gerekmesi ve sıklıkla yenilenmesinin gerekmesi durumunda daha pahalı olmaktadır.
- Zemin çeşidine göre fazla çimento tüketimi olabilmektedir.
- Enjeksiyon akışı çok iyi takip edilmelidir. Şayet enjeksiyon yolunda bir tıkanıklık olursa bu zeminde şişmeye bunun sonucunda da kolonların oluşmamasına neden olur.

1.15.12. Jet Enjeksiyonu Tasarımı

Jet enjeksiyonu uygulaması önceleri sadece granüler zeminlere uygulanabileceği düşünölmüş ve bu tür zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Sonraları tekniğın zamanla ilerlemesi sayesinde ince daneli zeminlerde de kullanılabileceği anlaşılmış ve başarılı olunmuştur.

Jet enjeksiyonu uygulamasının kesin ve basit bir hesaplama yönteminin olmaması nedeniyle uygulama birçok amprik ve teorik içeriğe dayandırılmıştır. Tasarım yöntemleri tasarımcının yapmış olduğu birçok çalışma sonucunda elde etmiş olduğu tecrübelerle dayalı olarak ekonomikliğın göz önünde bulundurulması suretiyle iyi, güvenli ve kesin tasarımın yapılmasına olanak veren yol gösterici öğelerdir.

Tasarım yöntemi uygulanmadan önce yapılması gerekenler aşağıda maddeler halinde verilmiştir [11,17].

- İyileştirme yapılacak zeminle alakalı tüm verilerin toplanması
- Zeminin mekanik olarak modellenmesi

- Yükleme koşullarının seçimi
- Yüklemelerin hesaplanması
- Malzemenin seçimi

Bunlar yapıldıktan sonra tasarımcı yapılacak olan uygulamanın zemin iyileştirmesi mi yoksa yapı elemanı mı olacağını tespit etmelidir. Sonraki aşamada yapılacak olan tasarımda dikkate alınması gereken parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Zemin çeşidi ve parametreleri
- Kullanılacak enjeksiyon harcının parametreleri
- Zemin ve enjeksiyon karışımları
- Teşkil edilecek elemanlarda kullanılacak olan çelik donatısı, tipi ve geometrisi
- Katkı malzemelerinin özellikleri

Son aşama olarak tasarımcı jet enjeksiyon yöntemlerinden uygun olanını seçmelidir.

1.16. Kolon Tasarımı

Zeminde düşey olarak teşkil edilen tekil jet enjeksiyon kolonları kazık elemanlar gibi düşünülerek hesapları yapılmaktadır. Jet enjeksiyon kolonlarının taşıma kapasitesi aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır [10]:

$$q_u = q_{uç} + q_s$$

$$\text{Granüler zeminler için} \quad : q_{uç} = A_b \cdot q_b + \pi D_a \int \gamma \cdot z \cdot K_s \cdot \tan \delta \cdot dz$$

$$\text{Kohezyonlu zeminler için} \quad : q_u = A_b \cdot q_b + \pi D_a \int \alpha \cdot c_u \cdot dz$$

Bu formülde:

A_b : kolon tabanı alanı

q_b : $(1+2K_0) \cdot \sigma_{vo} \cdot N_q^* \cdot \xi$ (kumda)

q_b : $9 \cdot c_u$ (kohezyonlu zeminde)

D_a : kolon çapı

N_q : taşıma gücü faktörü

σ_{vo} : düşey toprak basıncı

γ : zeminin birim hacim ağırlığı

K_0 : sukünetteki zemin basıncı katsayısı

K_s : zemin basıncı katsayısı

δ : zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı

α : adhezyon azaltma katsayısı

c_u : drenajsız kayma mukavemeti

z : derinlik

ξ : kolon uç mukavemeti azaltma faktörü

Jet enjeksiyon yöntemi ile imal edilen kolonların çevresinde azdan çokta doğru sıkışma oluşmakta ve derinliğin artması ile de kolonlar üniform oluşturulamamaktadır [10].

Jet enjeksiyon kolonunun çevresinde oluşabilecek kayma yüzeyi Şekil 38'de verilmiştir [10].

Kayma yüzeyine bağlı olarak kriterler aşağıda gösterilmiştir [10]:

- Granüler zeminlerde

$$K_s > 1$$

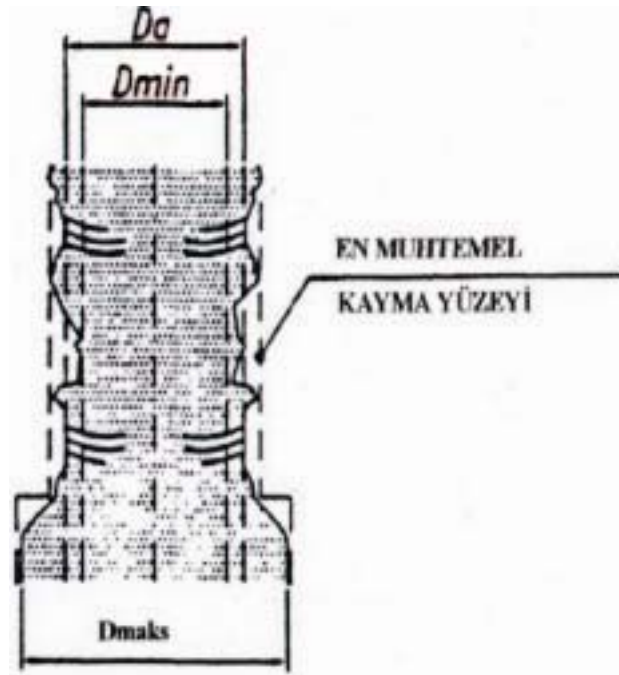
Tablo 11'de granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerler verilmiştir [10].

- Kohezyonlu zeminlerde

$$\alpha = 1 \text{ normal konsolide olmuş zeminlerde}$$

$$\alpha = 0.45 \text{ aşırı konsolide zeminler}$$

Tablo 12'de kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri verilmiştir [10].



Şekil 38. Jet enjeksiyonu kolonlarında oluşan kayma yüzeyi

Jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilen zemindeki kayma mukavemeti killerde 4 Mpa, kumlu ve çakıllı zeminlerdeki kayma mukavemeti ise 12 Mpa olabilmektedir. Ön yıkama yöntemi ile killerde bu değer daha yukarılara çıkabilmektedir.

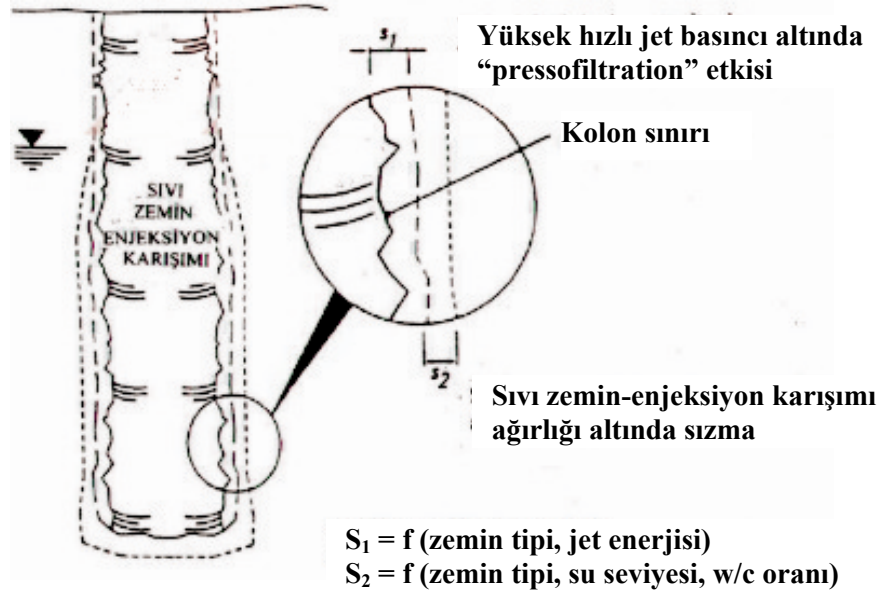
Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması Şekil 39’da verilmektedir.

Tablo 11. Granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri

Kazık Tipi	Sürtünme kapasitesi azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç kapasitesi azaltma faktörü
	δ/ϕ	K_s	τ (kPa)	ξ
Fore kazık	0.6	0.5-0.65	100-200	0.33-0.5
Çakma kazık(açık uç)	2/3	0.65-0.95	120	0.7-0.8
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75	1.0-1.5	120-180	1.0
Jet Enjeksiyon Kolon	1	1.0-2.0	≥ 180	1.0

Tablo 12. Kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri

Kazık Tipi	Sürtünme kapasitesi azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç kapasitesi azaltma faktörü
	α (Normal konsolide)	α (Aşırı konsolide)	τ (kPa)	ξ
Fore kazık	0.9	0.35	275	0.66
Çakma kazık(açık uç) (e: dış, i: iç)	0.95e 0.80i	0.40e 0.35i	200	0.7
Çakma kazık (kapalı uç)	0.95	0.45	200	0.8
Jet Enjeksiyon Kolon	1	0.45	280	1.0



Şekil 39. Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması

1.17. Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Belirleyen Etmenler

Jet enjeksiyon yöntemi ile teşkil edilmiş kolonların ve iyileştirme yapılmış zeminin proje kriterini sağlayıp sağlamadığının kontrolü çok önemlidir. Kalite kontrol testleri uygulamanın başarısında önemli bir faktördür.

Jet enjeksiyon yöntemi ile teşkil edilen kolonların yeterli olup olmadığı aşağıdaki değişkenlerin değerlerinin ölçülmesi ile tespit edilebilir.

1.17.1. Zemin-Çimento Karışımı Özellikleri

Jet enjeksiyon yöntemi kullanılarak teşkil edilmiş kolonlardan alınan karot numunelerin üzerinde yapılan deneyler ile zemin-çimento karışımı birim hacim ağırlığı tespit edilir. Bu değer pratikte 16-22 Kn/m² arasında değer almaktadır.

Jet enjeksiyon kolonunun yapımında kullanılacak çimento yeterince ince daneli olmalı ve çimento/su oranı 1/1 olmalıdır.

Jet enjeksiyonu yöntemiyle yapılan kolonların mukavemetini ise imalinden en az 28 gün geçtikten sonra alınan karotların laboratuvara gönderilerek bunların serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü tespit edilmesi ile belirleriz. Zemin-çimento karışımı

mukavemeti karışımında bulunan çimentonun miktarına ve zeminin çeşidine bağlıdır. Şekil 40'da alınan ve laboratuvara gönderilen karotlar görülmektedir [18].



Şekil 40. Jet enjeksiyon kolonlarından alınan karot örnekleri

Şekil 41'de karot numunelerinin basınç mukavemetinin ölçümü resmi verilmiştir [19].



Şekil 41. Karot numunelerinin basınç mukavemetinin ölçümü

1.17.2. Kolonların Bütünlüğü ve Boyu

Kolonların bütünlüğü ve kullanılan malzemenin kalitesini tespit etmek amacıyla imalinden 28 gün sonra alttan 0.5 m kalana kadar devamlı karot alınır.

Kolonun boy ve kesitindeki düzensizlikleri tespit etmek amacıyla Pile Integrity test yapılır. Bu yöntem ile kolonda düzensizlik tespit edilmez ise kolon boyu da belirlenebilir.

Integrity test jet enjeksiyon kolonunun üst kısmına küçük bir çekiçle vurularak jet enjeksiyon üstüne yerleştirilmiş ivme ölçer ile yansıma sinyali kaydı esasına dayanır. Integrity testin sonuçlarını yorumlayabilmek için kolonun geometrisi, zemin ile kolon arasındaki yüzey ve zemin koşulları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Şekil 42'de integrity test uygulaması verilmiştir.

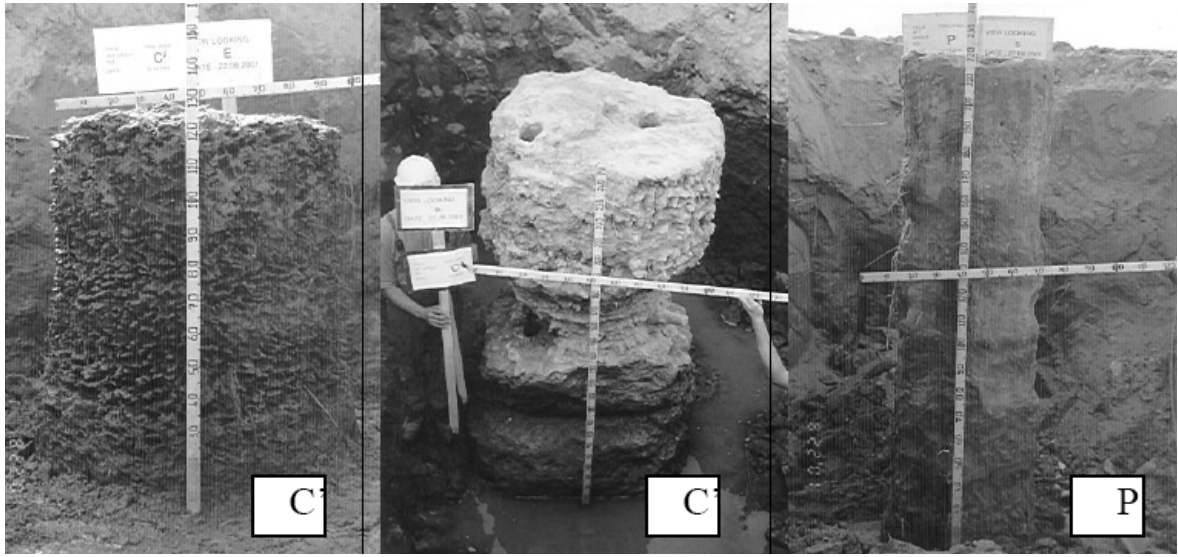


Şekil 42. Integrity test uygulaması

1.17.3. Kolonların Çapı

Kolon çapı jet enjeksiyon yönteminin başarısını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Çoğunlukla imal edilmesi düşünülen minimum kolon çapı proje kriteri olarak belirlenir. Seçilen sistem parametreleri ile kolon çapının istenilen şekilde oluşup oluşmadığı kolonların etrafı açılarak çeşitli seviyelerden çevresinin ölçülmesi suretiyle mümkün olur. Farklı zemin tabakalaşmalarında özellikle ince daneli zeminlerde seçilen parametreler altında en küçük çap oluşacağından tasarım bu çap baz alınarak yapılabilir. Japonya’da yeni bulunan teknoloji sayesinde her zeminde üniform çap elde edilebilmektedir [20].

Ülkemizde henüz kullanılmaya başlanmamıştır. Şekil 43’de kolon çapı ölçümü resimleri verilmiştir [5].



Şekil 43. Kolon çapı ölçümü

Jet enjeksiyon yöntemiyle oluşturulan kolonların çapları ve özellikleri aşağıdaki kriterlere dayanmaktadır:

- Zeminin cinsi ve özellikleri
- Enjeksiyon karışımının içeriği
- Püskürtme basıncı
- Delgi borusunun dönme ve yukarı çekilme hızı

1.17.4. Kolonların Geçirimsizliği

Jet enjeksiyon kolonların yapılış amacı geçirimsizlik sağlamak ise ağılan karot deliklerinde sabit seviyeli geğergenlik deneyi yapılabilir.

1.17.5. Kolonların Taşıma Gúcü

Jet enjeksiyon kolonları taşıyıcı eleman olarak tasarlanmış ise üzerinde çekme ve yükleme deneyleri yapmamız gerekir. şekil 44 ve şekil 45’de basınç ve yükleme deneyi uygulaması resmi verilmiştir [5].



şekil 44. Basınç ve yükleme deneyi uygulaması



şekil 45. Basınç ve yükleme deneyi uygulaması

Yükleme deneyi önce test kolonları, daha sonrada uygulama için kullanılacak kolonlar üzerinde kontrol amaçlı yapılır. Test kolonları üzerinde yapılan yüklemeye deneyleri daha sonra uygulamada kullanılacak kolonların imalinde kullanılacak parametreleri belirlemek amacıyla yapılır. Yüklemeye deneyine test kolonlar göçene kadar yada maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar devam edilir.

Uygulanacak deney yükü en az proje yükü kadar olmalı tercihen proje yükünün 1.5 katı olmalıdır. Yapılan deneyler kontrol amaçlı olup imal edilen kolonların yeterliliğinin ölçülmesinde kullanılır.

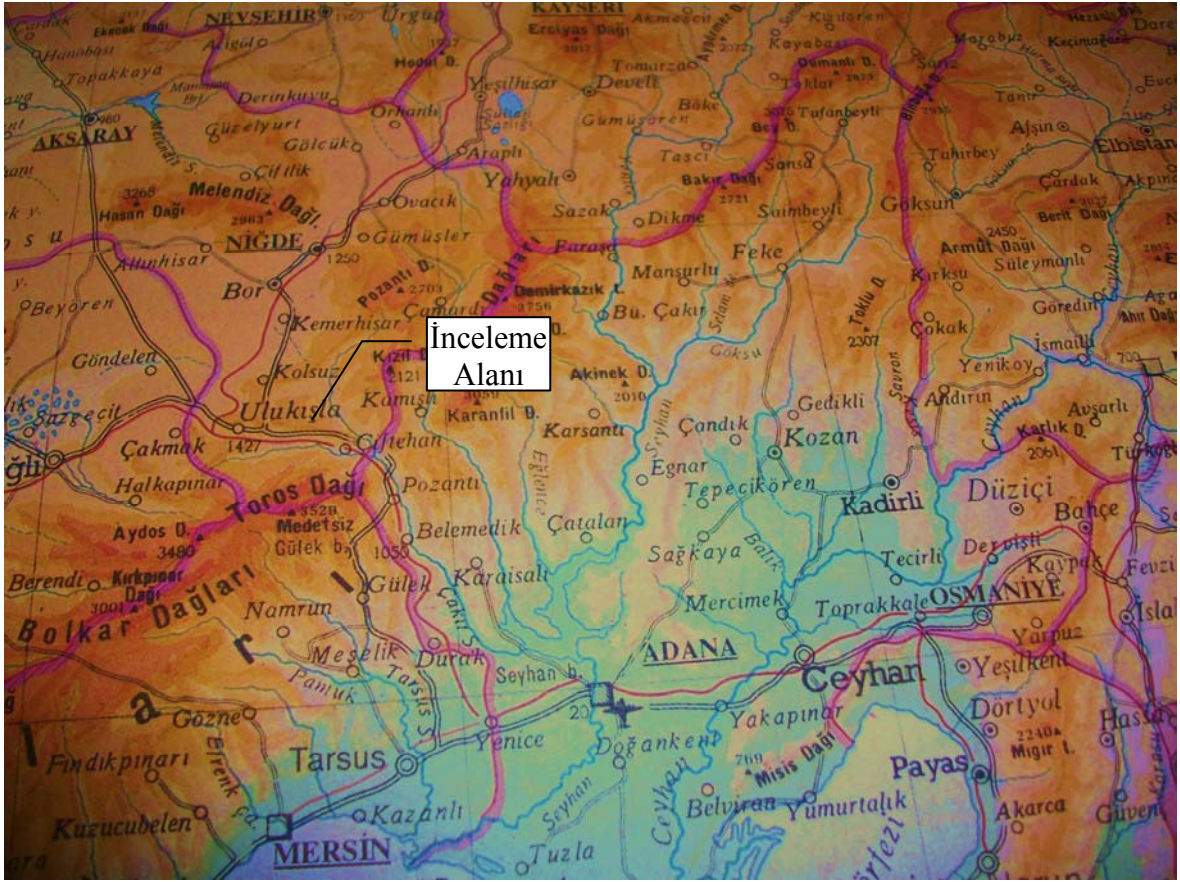
1.17.6. Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Etkileyen Diğer Etmenler

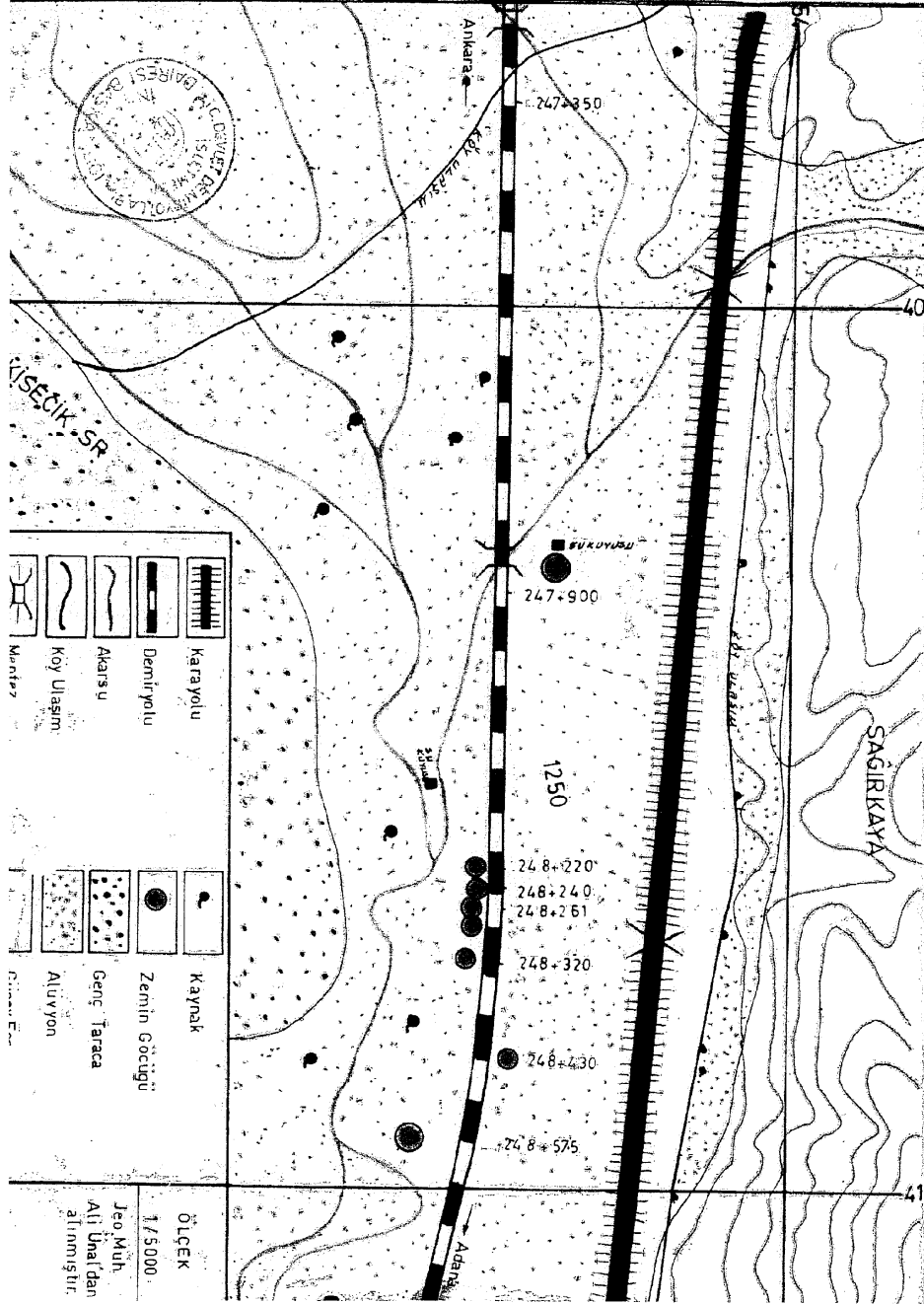
1. Malzeme Kontrolü: Çimento harcı kullanılmadan önce kontrol edilip içerdiği çimento miktarı kaydedilmelidir.
2. İmalat Bilgileri: Kolonların imal edilmesi ile ilgili parametreler kaydedilmelidir.
3. Süreklilik Gözlemleri: Kolonların imali sırasında meydana gelen sorunlar örneğin basılan harcın kusması gibi kayıt edilmeli ve sebepleri incelenmelidir.
4. Enjeksiyon Malzemeleri: Enjeksiyon malzemeleri olan suyun; ph, sertlik , klorür ve organik madde içeriğine çimentonun dane boyu dağılımına ve birim hacim ağırlığına, karışımın ise birim hacim ağırlığı, viskozite ve basınç mukavemetini kontrol etmek gerekir.
5. Kullanılmayacak Kısımlar: Jet enjeksiyon kolonlarının yüzeye yakın yaklaşık 50 cm'lik kısmı istenen özellikleri sağlamadığından kırılarak alınır.
6. Yapım Sırası: Kolonları yapım sırası önemlidir. Jet enjeksiyon kolon imali bitiminden 2-3 gün geçtikten sonra yanındaki kolonun imaline başlanılmamalıdır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Ulukışla-Gümüş Arasında Meydana Gelen Göçüklerin İncelenmesi

2.1.1. Ön Bilgi





Şekil 46. İnceleme alanının yer buldu haritası



Şekil 47. İnceleme alanının resmi

İnceleme alanının yer buldu haritasında gösterimi Şekil 45’ de verilmiştir. İnceleme alanı resmi Şekil 46’da verilmiştir. Ulukışla-Gümüş hattı arasında 1000 m.’lik sahada silt, kil, kum ve çakıl içerisinde anhidrit ve jipslerin bulunduğu yaptığımız sondajda tespit edilmiştir. Çalışma alanının yakınından geçen Darboğaz Çayı boyunca yer altı su seviyesi yaklaşık 1 metrededir. Yeraltı suyunun Darboğaz Çayını besleyen bölümünün kalınlığı ise yaklaşık 6 metredir ve yeraltı suyunun akım yönü de derenin akım yönü olan güney yönüne doğrudur. İşte bu 6 metrelik kısımda ve alüvyonun içerisinde bulunan anhidrit ve jipslerin eğim boyunca akıntı oluşturan temiz yeraltı suyu ile yıkanarak erimesi sonucunda zeminde yüzeyden fark edilmeyen boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşlukların oluştuğu bölümlerde meydana gelen göçmeler herhangi bir belirti vermeden aniden meydana gelmiş oldukları için, seyrüsefer emniyeti açısından çok fazla tehlike arz etmektedir. Bu kısımda oluşan göçüklerin derinlikleri yaklaşık 1,5 ile 5 metre arasında olup çapları da yaklaşık 2 metre ile 10 metre arasındadır.

2.1.2. İnceleme Alanının Genel Jeolojisi

Bölge Tersiyer başında, içinde volkanik bir adayayının gelişmekte olduğu kapanan bir okyanus durumundadır. Kapanma kuzeyden güneye ilerleyen Kıta/Adayayı/Kıta çarpışması şeklinde gelişmiştir. Bu çarpışma sonucunda okyanusal çukurluk içinde yer alan Ulukışla ve çevresinde derin denizel paleocoğrafik koşullar egemendir.

Bölgede hakim yapıyı, sıkışma kuvvetlerin oluşturduğu saptanmıştır. Bunun sonucunda ters faylar, bindirmeler ve dar amplitüdlü kıvrımlar gelişmiştir [21]. Bu oluşan denizel paleocoğrafik koşullar neticesinde oluşan okyanusal çökellerin üst kısmında yaklaşık 100-150 metre kalınlığında silt, kil, kum ve çakıl içeren zemin istiflenmiştir.

2.1.3. Geoteknik Etüdler

Ulukışla-Gümüş hattı arasında 1000 m.'lik sahanın etütleri Varyantlar Şubesi tarafından yapılmıştır. Sondajda her 1,5 metrede Standart Penetrasyon Testi (SPT) yapıp sonuçlar kaydedilmiştir. Etüdün yapıldığı çalışma sahasına sondaj makinesi ile girme güçlükleri nedeniyle, son oluşan göçüğe yaklaşık 50 metre mesafede 1 adet mekanik sondaj yapılmıştır. Yapılan bu sondajda (SK1) 42 metre derinliğe kadar ilerlenmiştir. Sondaj esnasında 3 adet Shelby tüpü ile örselenmemiş (UD) numune alınmıştır. Diğer bölümler ise numune çukurları marifetiyle taranmıştır.

Darboğaz Çayı alüvyonundan oluşan çalışma alanında yapılan sondajdan elde edilen verilere göre yer altı su seviyesi ise 1 metrededir. Çalışma alanı zemini 4.derecede deprem bölgesinde olmasından dolayı yerel zemin sınıfı Z2 yani B grubu zemin sınıfındadır. SPT-N değeri ise 18 metre derinliğe kadar ortalama 13 ve 18 metrenin altında ise ortalama 24'tür. Tablo 13'de numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları verilmiştir.

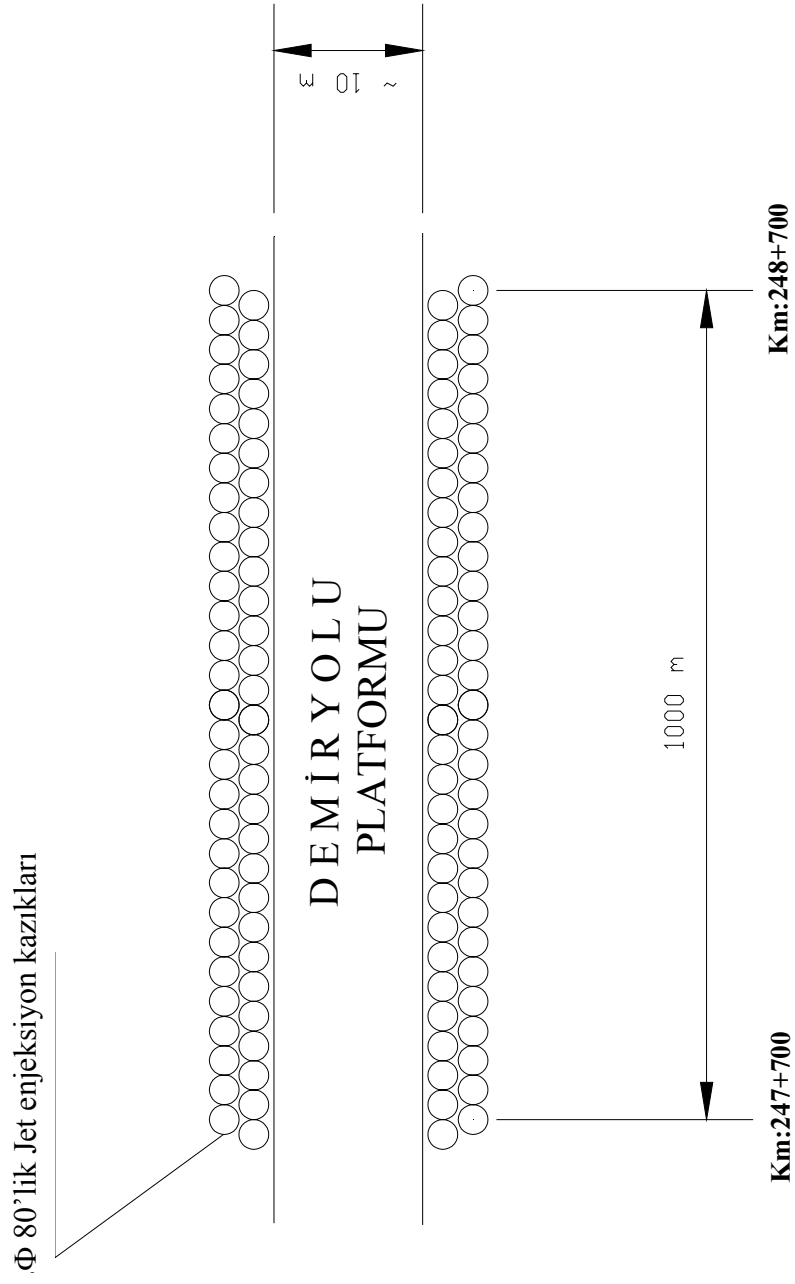
2.1.4. Yapılan Çalışmalar

Ulukışla-Gümüş hattı arasında 1000 m.'lik sahada yapılan geoteknik etüt sonucu elde edilen verilere göre buradaki zemin göçükleri; Darboğaz Çayının getirdiği temiz yer altı suyu akıntısı ile zeminde bulunan jips ve anhidritin reaksiyonu girerek erimesi nedeniyle oluşmaktadır. Zeminde oluşan bu boşlukların yüzeyden fark edilememekte, herhangi bir belirti vermeden aniden göçmektedir. Bu durum seyrüsefer emniyetini tehlikeye düşürmektedir.

Yol tabanında, bu ani göçmeleri engelleyecek stabil bir yapı elde etmek gerekmektedir. Bu da, yol platformu altında, platformun her iki tarafından açılı olarak birbirlerini kesecek şekilde, yani platformun altında (V) şeklinde 125 adet $\Phi 80$ 'lik jet enjeksiyon kolonları oluşturulmuştur. Jet enjeksiyon kolonlarının imalatı için tek akışkanlı sistem kullanılmıştır. Jet enjeksiyon kolonlarının işletim parametreleri uygulama öncesi zemin şartları dikkate alınarak seçilmiştir. Kolonların imalatı için su/çimento oranı sabit olarak 1 ve çimento olarak Portland çimentosu 42.5 kullanılmıştır. Seçilen işletim parametreleri Tablo 15'de verilmiştir. Şekil 48'de Ulukışla-Gümüş arası 1000 m'lik kısımda jet enjeksiyon yerleşim planı verilmiştir.

Tablo 14. İşletim parametreleri

Püskürtme Basıncı	Bar	450
Nozzle Adeti	-	2
Nozzle Çapı	Mm	2.2
Borunun Rotasyon Hızı	RPM	16
Borunun Çekilme Hızı	s/m	100



Şekil 48. Ulukışla-Gümüş arası 1000 m'lik bölümdeki jet enjeksiyon yerleşim planı



Şekil 49. İslah gerçekleştirilecek alanda jet enjeksiyon uygulaması



Şekil 50. Jet enjeksiyon uygulaması çalışmaları



Şekil 51. Deneme kolonu



Şekil 52. Jet enjeksiyon uygulamasından sonra sahanın durumu

3. İRDELEME

Jet Enjeksiyonu iyileştirme öncesi ve sonrası zemin tabakasında beklenen zemin davranışları (gerilme-deplasman) Phase 6.018 sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle inceleme alanında gerçekleştirilen sondaj esnasında geçilen zemin tabakaları Tablo 15’ de verilmiştir. Yer altı su seviyesi 1 m’dir.

Tablo 15. Sondaj esnasında geçilen zemin tabakaları

Derinlik	Zemin
1m	nebati zemin
1-8 m	yer yer ince çakıl içeren az kumlu siltli kil
8-10 m	ince çakıllı, siltli, killi kum
10-12.5 m	kumlu siltli kil
12.5-13.5	çakıllı siltli killi kum
13.5-20.0 m	yer yer ince çakıl içeren az kumlu siltli kil
20-39 m	az killi, bol siltli ince çakıl
39-42 m	az çakıllı kumlu kil tabakası

Hesap kolaylığı açısından temel altı zemini 20 m kalınlığında orta katı siltli-kumlu KİL ve bunun altında yerleşik orta sıkı siltli killi ÇAKIL olmak üzere iki tabaka ile idealize edilmiştir. İdealize zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri, deney sonuçları ve ampirik formüllerle elde edilen değerlerin birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Orta Katı ($N_{ort}=12$) Siltli-Kumlu KİL için serbest basınç değerinden elde edilen drenajsız kohezyon değeri ($c_u=68$ kPa) kullanılmıştır. Bununla birlikte, drenajsız kohezyon değeri Stroud 1974, tarafından verilen formülle de uyumludur [22]. N ortalama SPT değeridir.

$$c_u=f_1.N$$

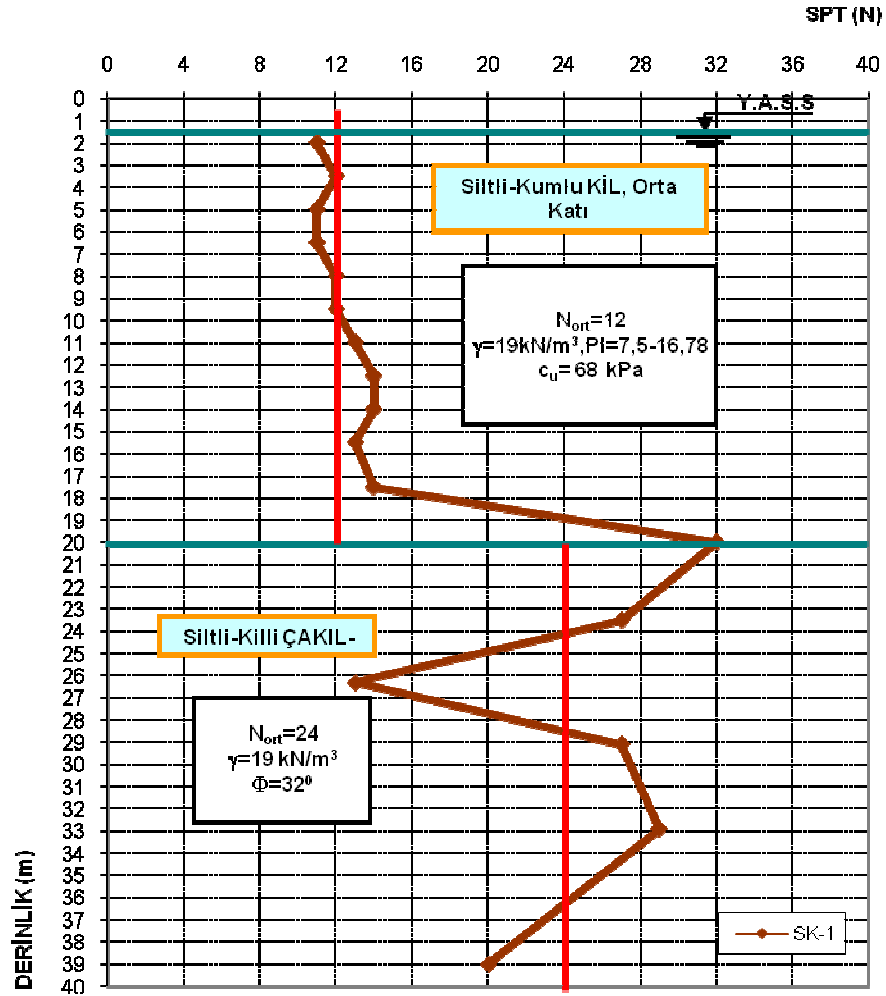
Formüldeki f_1 plastisite indisine bağlı bir katsayıdır. f_1 plastisite indisi ilişkisi Şekil 54’de verilmektedir. Grafikten plastisite indisine bağlı olarak $f_1=6$, dolayısıyla drenajsız kohezyon $c_u=72$ kPa olarak bulunabilir.

Orta Katı kil tabakası için elastisite modülü Das [23] tarafından verilen drenajsız kohezyona bağlı formülle belirlenebilir.

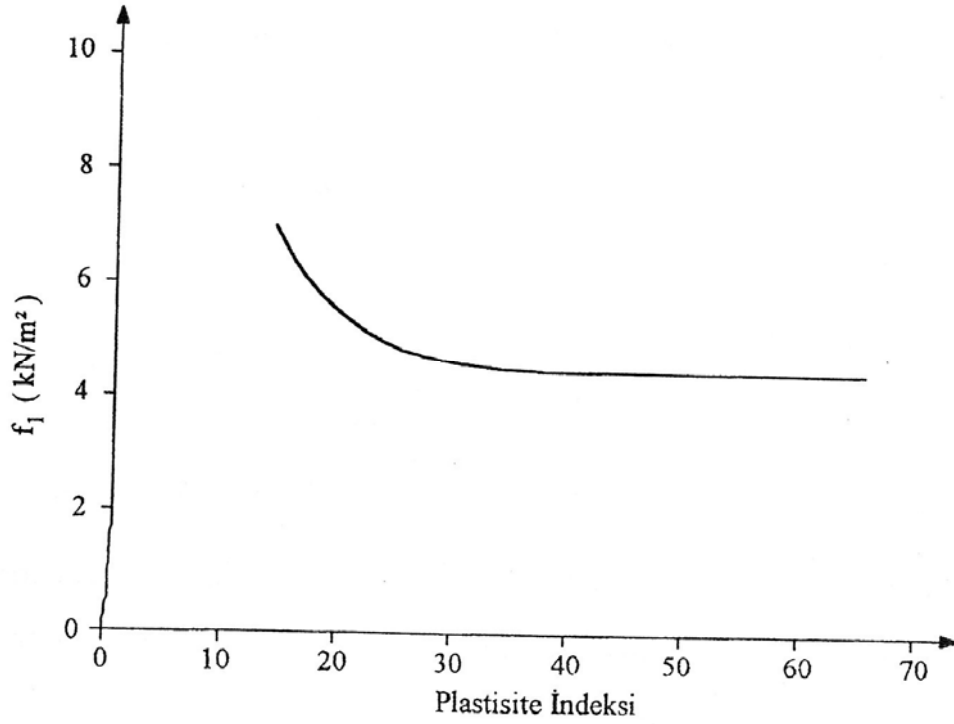
$$E_s=(250c_u -500c_u)$$

Burada konservatif tarafta kalmak için 250 değeri kullanılarak $E_s=17000\text{kPa}$ bulunmuştur.

Şekil 53’de idealize zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri, siltli-kumlu KİL ve siltli-killi ÇAKIL tabakaları için SPT(N) değerinin derinlikle değişimi verilmektedir.



Şekil 53. İdealize zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri ve SPT(N) –derinlik değişimi



Şekil 54. SPT(N) değeri ve plastisite indisine bağlı olarak f_1 değerinin hesaplanması

Aşağıda Tablo 16'da orta katı siltli-kumlu kil tabakası için belirlenen mühendislik parametreleri verilmektedir.

Tablo 16. 0.0-20.0m Orta katı siltli-kumlu kil mühendislik parametreleri

SPT (N)	12 (11-14)
Birim hacim ağırlığı	19 KN/ m ³
Drenajsız Kohezyon	68 kPa
Plastisite İndisi	7,5-16.78
Elastisite Modülü	17000kPa

Orta sıkı kum için içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık değerleri SPT(N) değerine bağlı olarak sırasıyla 32^0 ve 19kN/m^3 seçilmiştir. Yine elastisite modülü Bowles tarafından SPT değerine bağlı olarak verilen aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır [24].

$$E_s = 7,5 + 0,5N \text{ (MPa)}$$

Buradan $N_{ort} = 24$ alınarak $E_s = 19500\text{kPa}$ hesaplanmıştır.

Aşağıdaki Tablo 17’de orta sıkı siltli--killi çakıl tabakası için belirlenen mühendislik parametreleri verilmektedir. 20.0-40.0m Orta Katı Siltli-Killi ÇAKIL

Tablo 17. Orta sıkı siltli-killi çakıl tabakası için belirlenen mühendislik parametreleri

SPT (N)	24 (13-32)
Birim hacim ağırlığı	19 KN/ m ³
İçsel sürtünme açısı	32 ⁰
Plastisite İndisi	7,5-16.78
Elastisite Modülü	19500 kPa

İyileştirme sonrası hesap için jet enjeksiyon için verilen mühendislik parametreleri Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. İyileştirme sonrası jet enjeksiyon için mühendislik parametreleri

Birim hacim ağırlığı	22 KN/ m ³
İçsel sürtünme açısı	40 ⁰
Kohezyon	10 kPa
Elastisite Modülü	2850000 kPa (Beton elastisite modülünün onda biri)

Phase 6.018 ile gerçekleştirilen analizler sonucunda, ıslah öncesi ve sonrasında temel altı zemininde yer değiştirmelerde önemli bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni jet enjeksiyon derinliğinin sadece zemindeki boşlukları doldurmaya yetecek uzunlukta seçilmesi ve uygulamanın lokal bir uygulama olmasıdır. Bununla birlikte ıslah öncesi ve sonrası düşey gerilme dağılımında önemli değişiklikler görülmekte, zemine göre daha rijit olan jet enjeksiyon kolonlarında daha yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Analiz sonuçları ek 2’de verilmektedir.

Tablo 19 ve Tablo 20’de ıslah öncesi ve ıslah sonrası düşey σ_1 gerilmelerinin dağılımı dolgu orta noktası, dolgu kenar noktası ve jet enjeksiyon sınırı için verilmektedir. Şekil 55, Şekil 56 ve Şekil 57’de ıslah öncesi, Şekil 58, Şekil 59 ve Şekil 60’da ise ıslah sonrası düşey σ_1 gerilmelerinin dağılımı grafik olarak verilmektedir. Düşey σ_1 gerilmelerinin değişimi ıslah öncesi ve sonrası birlikte Şekil 61,Şekil 62 ve Şekil 63’de verilmektedir.

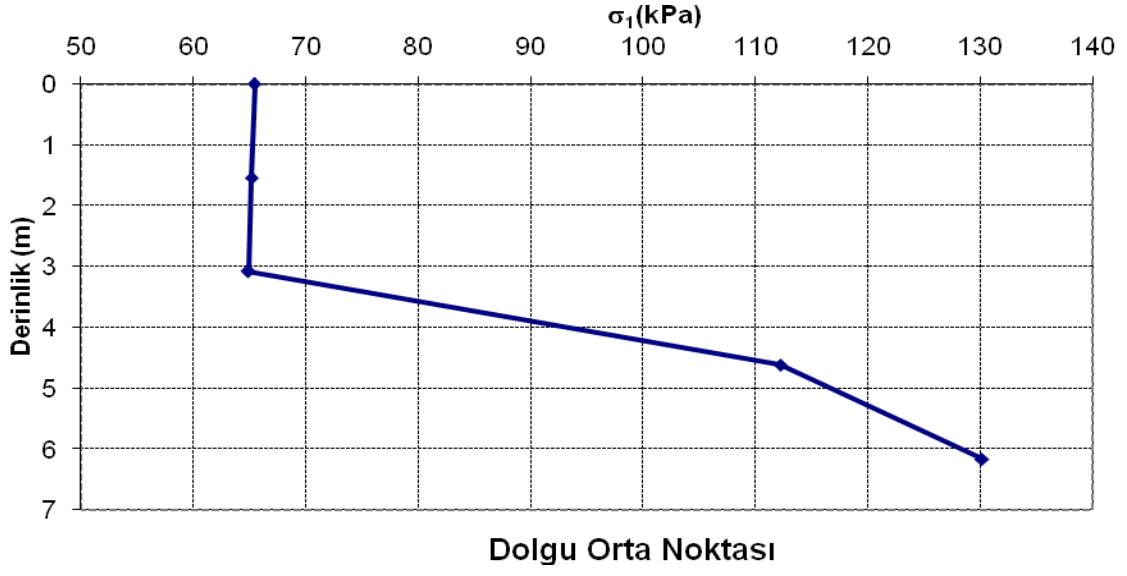
Islah öncesi ve sonrası gerilmelerin model üzerinde gösterimi Şekil.63 ve Şekil 64'de görülmektedir.

Tablo 19. Islah öncesi düşey gerilmeler

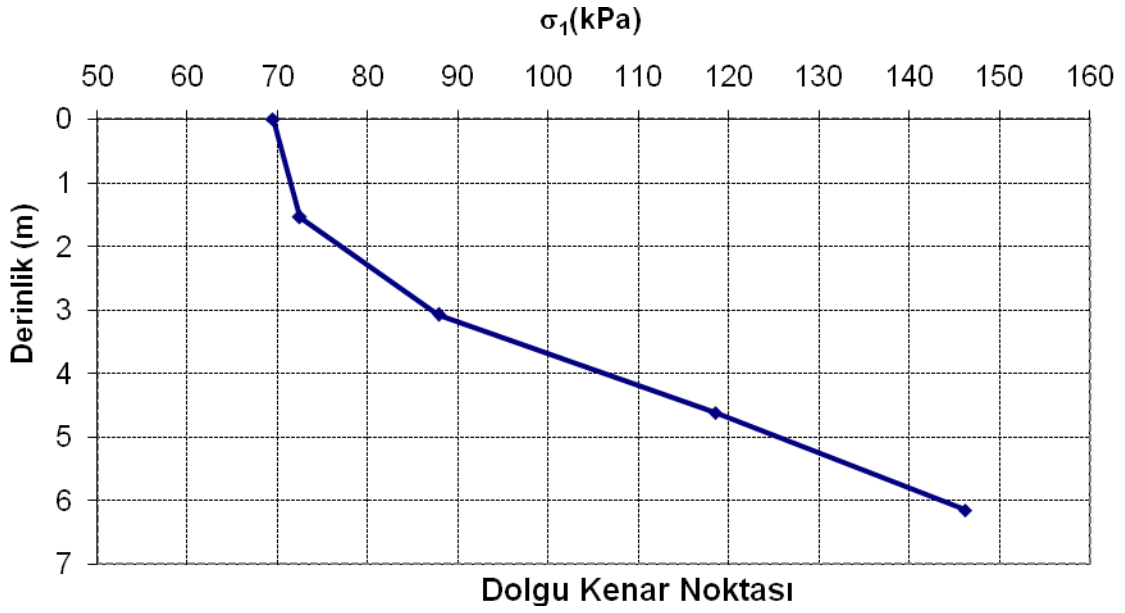
Konum:Dolgu Orta Noktası		Konum:Dolgu Kenar Noktası		Konum:Jet Enjeksiyon Sınırı	
Derinlik(m)	σ_1 (kPa)	Derinlik(m)	σ_1 (kPa)	Derinlik(m)	σ_1 (kPa)
0	65.46	0	69.48	0	49.79
1.54	65.18	1.54	72.47	1.54	57.25
3.08	64.91	3.08	87.82	3.08	71.54
4.62	112.23	4.62	118.5	4.62	101.86
6.16	130.17	6.16	146.22	6.16	130.59

Tablo 20. Islah sonrası düşey gerilmeler

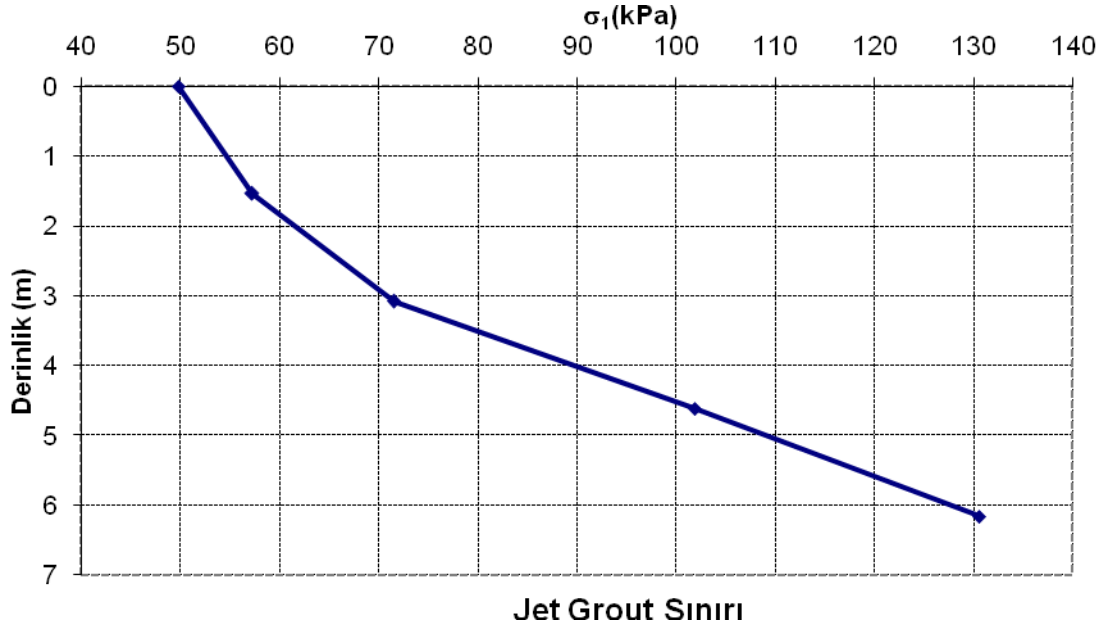
Konum: Dolgu Orta Noktası		Konum:Dolgu Kenar Noktası		Konum:Jet Enjeksiyon Sınırı	
Derinlik(m)	σ_1 (kPa)	Derinlik(m)	σ_1 (kPa)	Derinlik(m)	σ_1 (kPa)
0	68.79	0	75	0	60
1.54	82.1	1.54	80	1.54	72.83
3.08	95.41	3.08	92	3.08	86.17
4.62	184.14	4.62	120.32	4.62	111.59
6.16	185.6	6.16	151.61	6.16	138.65



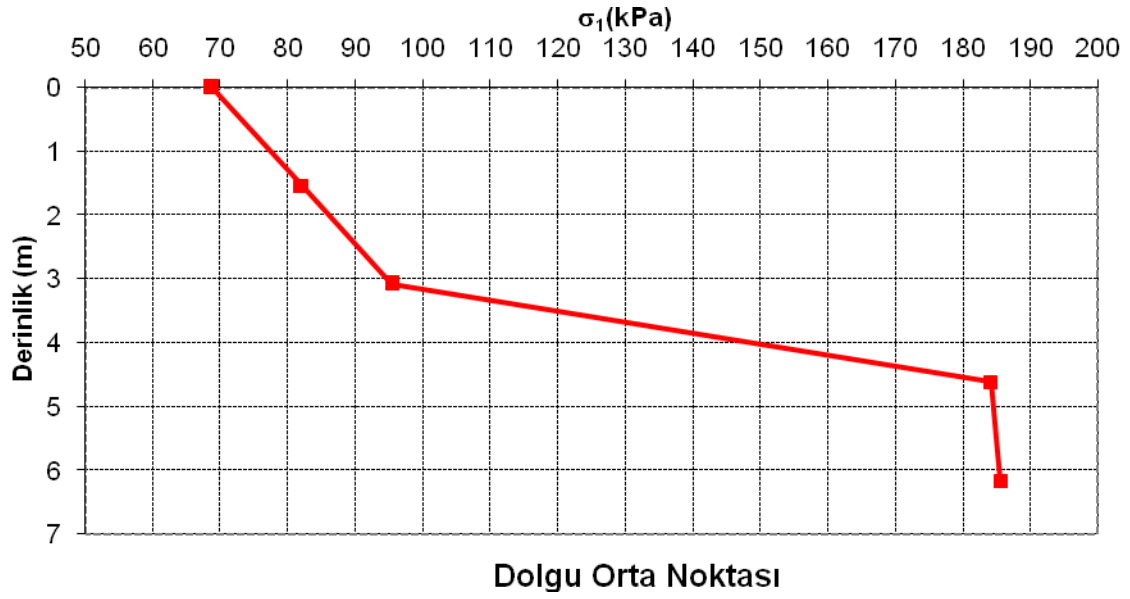
Şekil 55. Islah öncesi konumu dolgu orta noktası düşey gerilmeler



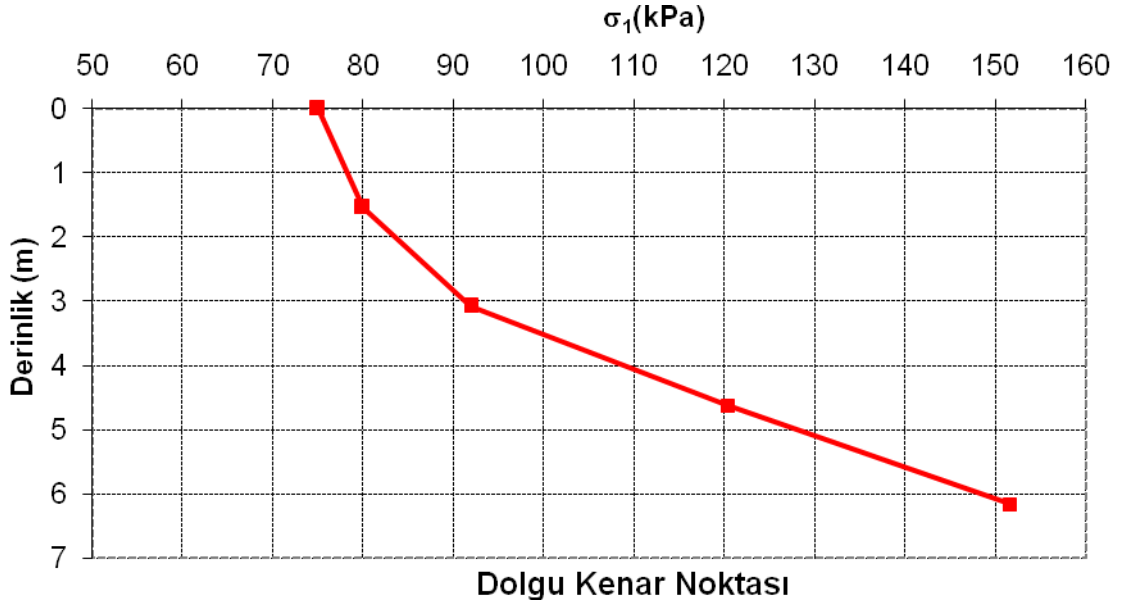
Şekil 56. Islah öncesi konumu dolgu kenar noktası düşey gerilmeler



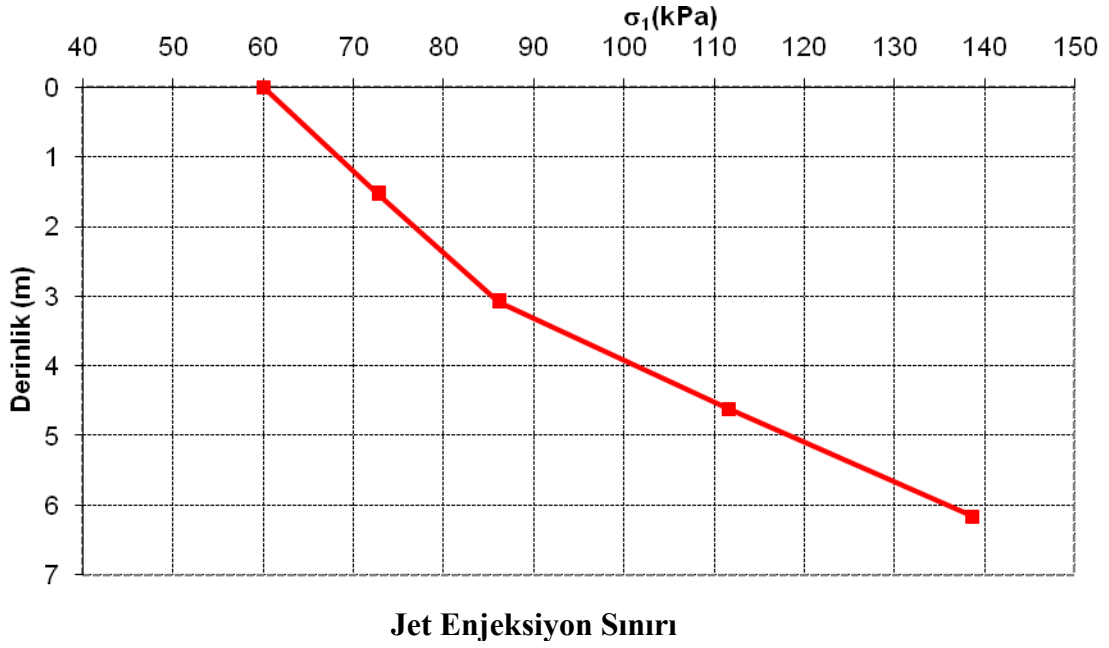
Şekil 57. Islah öncesi konumu jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler



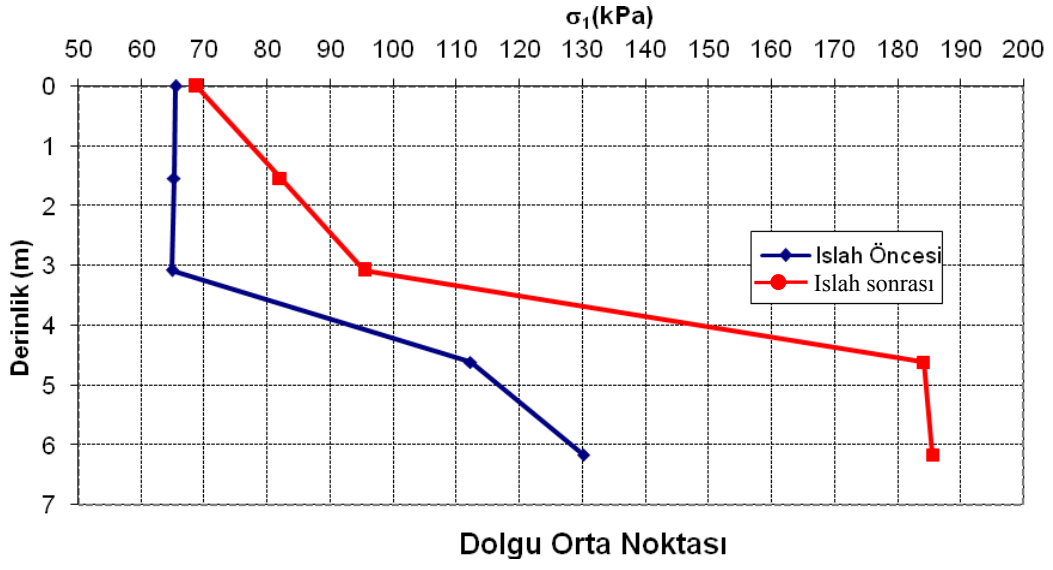
Şekil 58. Islah sonrası konumu dolgu orta noktası düşey gerilmeler



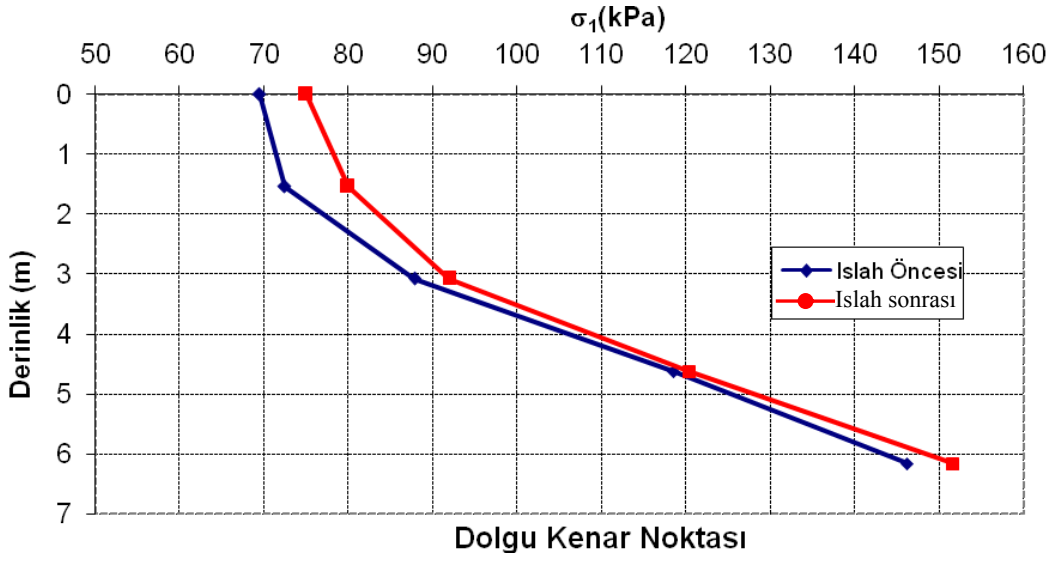
Şekil 59. Islah sonrası konumu dolgu kenar noktası düşey gerilmeler



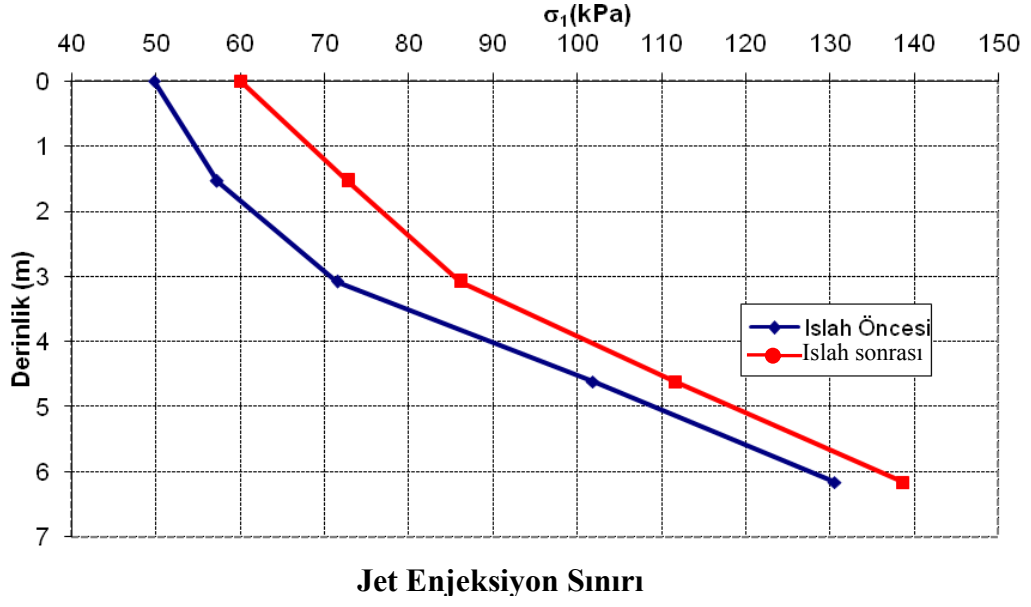
Şekil 60. Islah sonrası konumu jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler



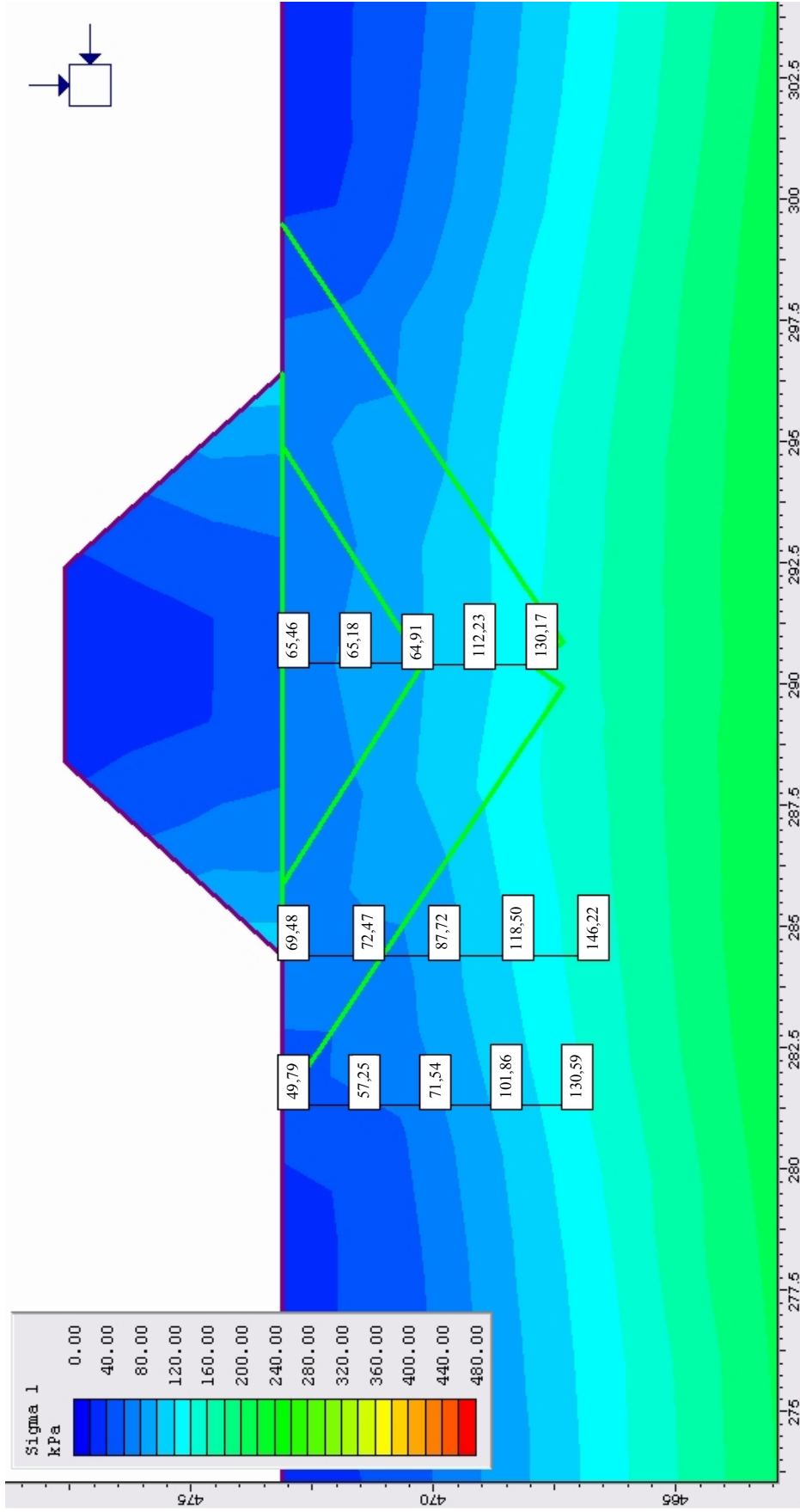
Şekil 61. Islah öncesi ve sonrası dolgu orta noktası düşey gerilmeler



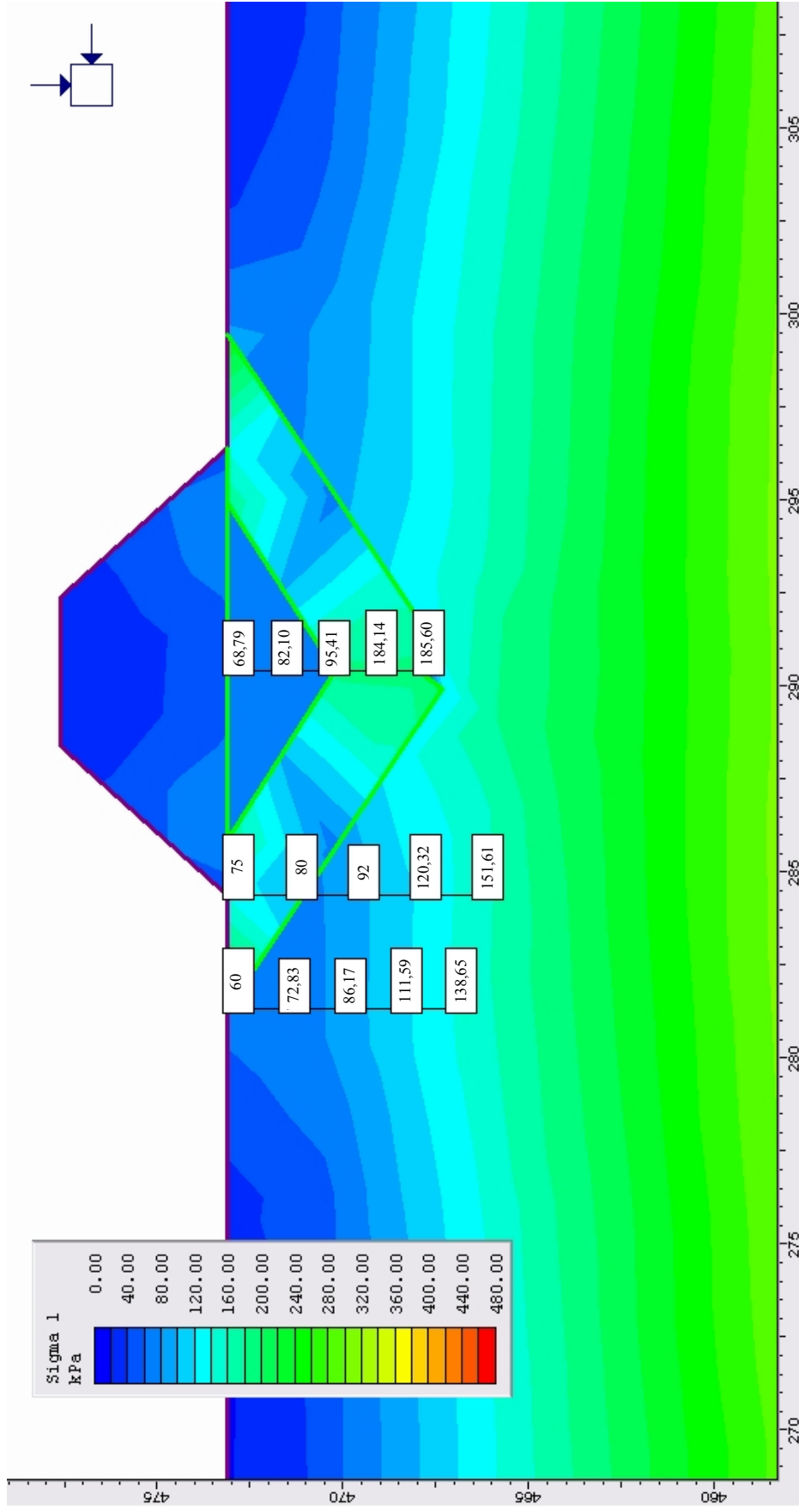
Şekil 62. Islah öncesi ve sonrası dolgu kenar noktası düşey gerilmeler



Şekil 63. Islah öncesi ve sonrası jet enjeksiyon sınırı düşey gerilmeler



Şekil 64. Islah öncesi düşey gerilme



Şekil 65. Islah sonrası düşey gerilme dağılımı

Uygulama sonrasında kalite kontrol amaçlı olarak iyileştirilmiş zeminde jet enjeksiyon kolonlarından karotlar alınarak kolon boyları tespit edilmiştir. Bu nedenle, kolon boylarının belirlenmesi için ayrıca pile integrity testlerinin yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Tablo 21. Kolon boyları

2 Nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sağ tarafı)	40. km	1.sıra	7.34 m
		2.sıra	8.53 m
6 Nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sol tarafı)	120. km	1.sıra	7.14 m
		2.sıra	8.53 m
10 nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sağ tarafı)	180. km	1.sıra	7.22 m
		2.sıra	8.42 m
14 nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sol tarafı)	280. km	1.sıra	7.32 m
		2.sıra	8.49 m
25 nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sağ tarafı)	500. km	1.sıra	7.23 m
		2.sıra	8.34 m
29 nolu Kolon Boyları (Adana yönü demiryolu hattı sağ ve sol taraf)	580. km	1.sıra	7.13 m
		2.sıra	8.28 m

Bu tip zemin ıslah projelerinde çok önemli ıslah sonrası kontrol enstrümanları olan SPT ve CPT deneyleri, uygulamanın sadece kohezyonlu zemin bölümünde ve zeminde oluşan boşlukları doldurmak amacıyla yapılması nedeniyle uygulanmamıştır.

4. SONUÇLAR

Ulukışla-Gümüş demiryolu hattında 1000 m'lik mesafede önemli göçükler tespit edilmiştir. Sahada yapılan geoteknik etüt sonucu elde edilen verilere göre buradaki zemin göçükleri; Darboğaz Çayının getirdiği temiz yer altı suyu akıntısı ile zeminde bulunan jips ve anhidritin reaksiyona girerek erimesi nedeniyle oluşmaktadır. Zeminde oluşan bu boşluklar yüzeyden fark edilememekte, herhangi bir belirti vermeden aniden oluşmaktadır. Bu durum seyrüsefer emniyetini tehlikeye düşürmektedir.

Bu göçüklerin önlenmesi amacıyla V şeklinde 125 adet 80 cm çapında, 6-8m boyunda jet enjeksiyon kolonları oluşturulmuştur. Uygulama sonuçları Phase 6.018 sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda

- İslah öncesi ve sonrasında temel altı zemininde yer değiştirmelerde önemli bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni jet enjeksiyon derinliğinin sadece zemindeki boşlukları doldurmaya yetecek uzunlukta seçilmesidir.
- Düşey gerilme dağılımında önemli değişiklikler görülmektedir. Jet enjeksiyon tekniği ile yapılan ıslah sonrasında düşey gerilme dolgu orta noktasında % 43, dolgu kenar noktasında % 8, jet enjeksiyon sınırında %27 artmıştır. En yüksek gerilme artışı dolgu ortasında gerçekleşmiştir. Böylelikle zemin emniyet gerilmesinde yeterli artış sağlanmıştır.
- Jet enjeksiyon kolonlardan alınan karotlarla proje uzunluklarının sağlandığı belirlenmiştir. Bu nedenle şartnamece kolon boylarının tespiti için öngörülen pile integrity testleri gerçekleştirilmemiştir.
- Uygulamada kolonların imalatı için su/çimento oranı sabit olarak 1 ve çimento olarak Portland çimentosu 42.5 kullanılmıştır. Jet 1 tekniği uygulanmış püskürtme basıncı 450 bar, nozzle adeti 2, nozzle çapı 2.2 Mm, borunun rotasyon hızı 16 Rpm, borunun çekilme hızı 100 s/m olarak alınmıştır.
- Bu tip zemin ıslah projelerinde çok önemli ıslah sonrası kontrol enstrümanları olan SPT ve CPT deneyleri, uygulamanın sadece kohezyonlu zemin bölümünde ve zeminde oluşan boşlukları doldurmak amacıyla yapılması nedeniyle uygulanmamıştır.

- Gerçekleştirilen jet enjeksiyonu kolon uygulaması ile temel altı zeminde oluşan göçüklerin önüne geçilmiştir. Başlangıçta yapılması düşünülen dren kazıklarının yapılmasına uygulamanın yeterli sonucu vermesinden dolayı vazgeçilmiştir. Seyrüsefer emniyeti tekrar sağlanmıştır.

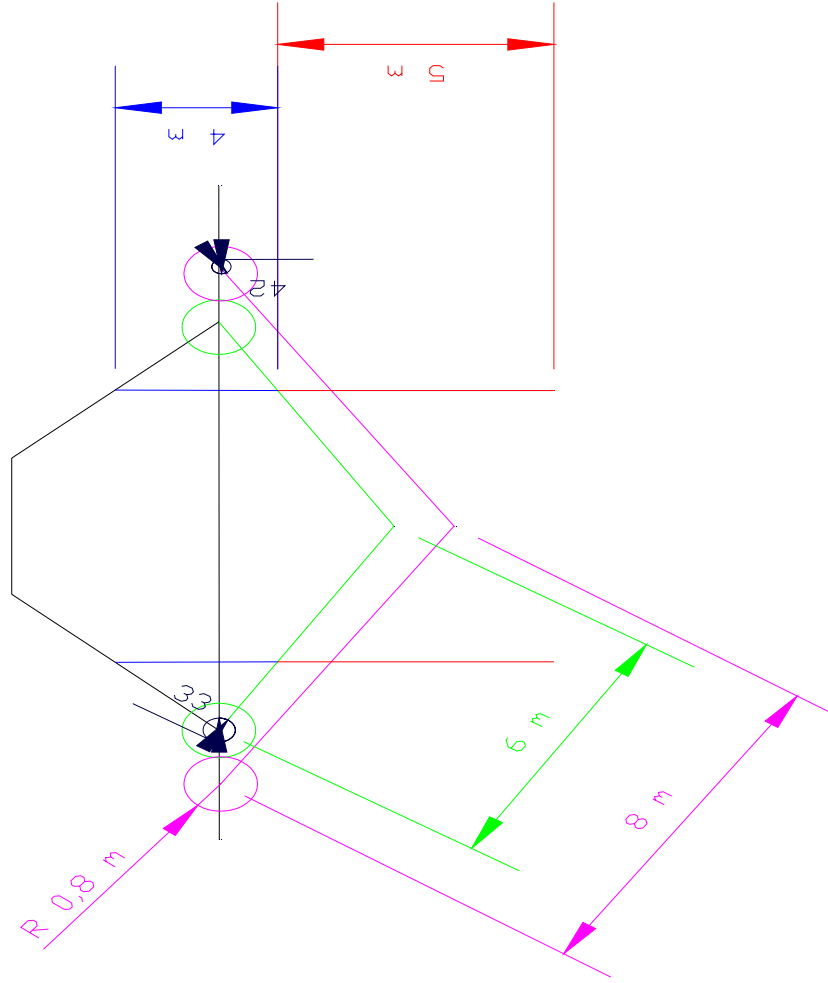
5. KAYNAKLAR

1. Nalçakan, S.N., Problemlı Zeminlerde Geoteknik özümler, TMH Türkiye Mühendislik Haberleri , 430, 2 (2004).
2. Uzuner. B., Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, 2000.
3. Tunçdemir, F., Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğıyle İyileştirilmesi, TMH Türkiye Mühendislik Haberleri, 430, 2 (2004).
4. Tunçdemir, F., Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik ve Pratik Yaklaşımlar, İMO Teknik Dergi, 269 (2007) 4069-4080.
5. Durgunoğlu H.T., Zeminlerde Karşılaşılan Problemler ve Zemin İyileştirilmesi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Deprem ve Yapı Bilimleri Ana Bilim Dalı Bahar Sempozyumu, Mayıs 2008.
6. Welsh,P.(editor), Soil Improvement-A Ten Year Update, Geotechnical Special Publication, No: 12,ASCE,New York, 1987.
7. www.KellerGrundbau.com Jet Enjeksiyonu Uygulamaları. 10 Şubat 2008.
8. www.Geoconstruction.com Jet Uygulamaları. 26 Mart 2008.
9. Kutzner, C., Grouting of Rock and Soil, A.A. Balkema,Rotterdam, 1996.
10. Melegari, C. and Garassino, A.L., Seminar on Jet Grouting, CI-Premier Pte. Ltd, Singapore, 1997.
11. Xanthakos,P.P., Abramson L.W.And Bruce D.A., Ground Control and Improvement, John Wiley, New York, 1994.
12. Okyay,S., Yüksek Basınçlı Enjeksiyon, Dahili Rapor, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul, 1987.
13. Moseley,M.P., Ground Improvement,Chapman and Hall,Boca Raton, 1993.
14. Shibazaki,M.,Ohta.S., A Unique Underpinning of Soil Solidification Utilising Super-High Pressure Liquid jet Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, 1982, 680-693s.
15. www.hercules.com Jet Enjeksiyonu. 5 Temmuz 2007.

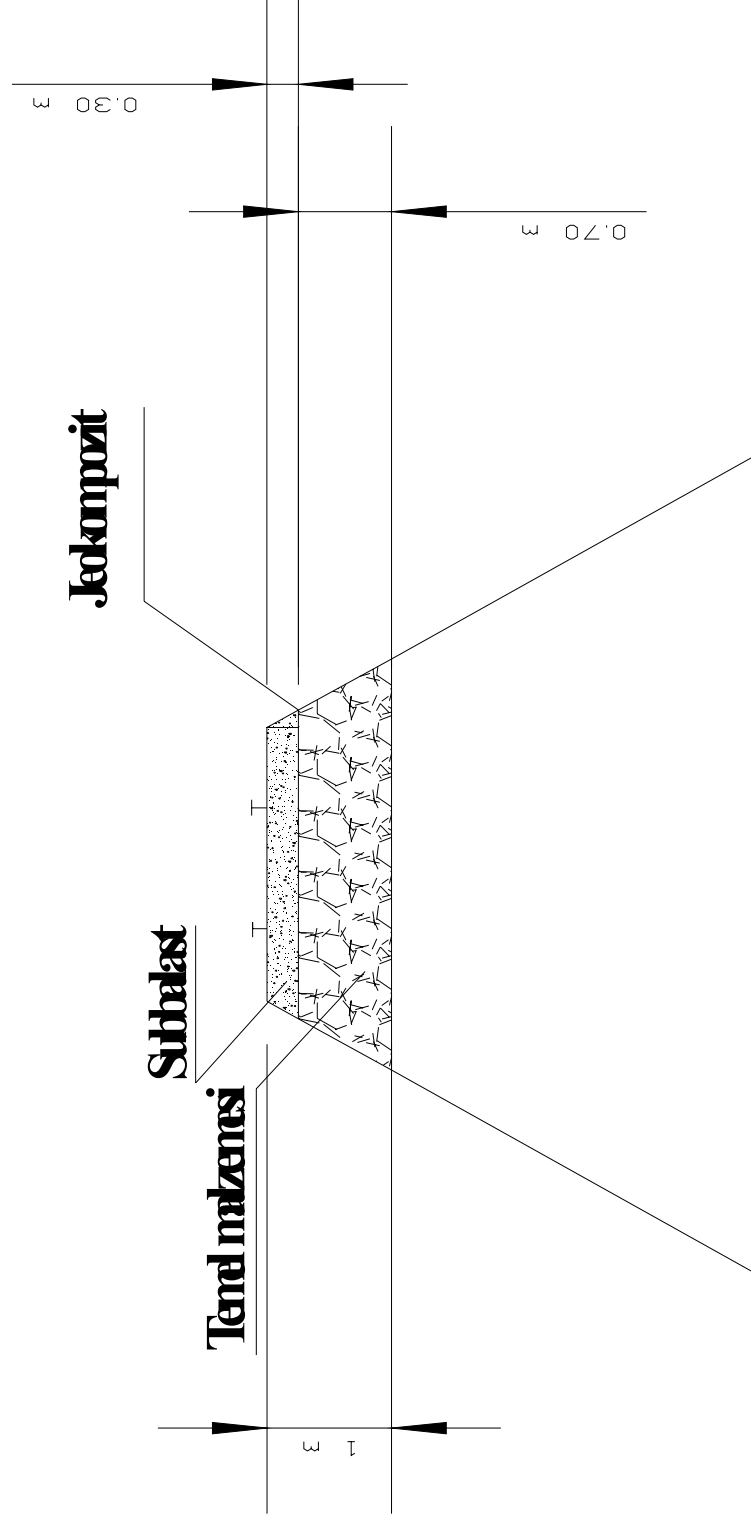
16. Kauschinger, J.L.; Perry, E.B. and Hankour, R., Jet Grouting: state of the Practice, 1992. Proceedings of the Conference of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, New Orleans, 25 -28 Şubat 1992, Louisiana, ASCE, New York.
17. Trevi., Columnar Treatment, Illustrative Report, Cesena, 1994.
18. www.trevispa.com Jet Enjeksiyonu. 10 Ekim 2007.
19. www.foundation-engineering.bilfingerberger.com Jet enjeksiyonu. 25 Şubat 2008.
20. Durgunoğlu, H.T., Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, 16-17 Eylül 2004, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
21. Sonel, N ve Sarı, A. J., Fac. Eng. Arch. Gazi Üni. 19,4, 1997.
22. Yıldırım, S., Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, 2002.
23. Das, Braja, M., Principles of Foundation Engineering, Fourth Edition, P.W.S. Publishing, 1998.
24. Bowles, J.E., Foundation Analysis And Design, Fourth Edition, Mc Graw Hill Book, 1988.

6. EKLER

Ek-1: Ulukışla-Gümüş arası 1000 m'lik bölümde jet enjeksiyon metrajları



Ek-2: Ulukışla-Gümüş arası 1000 m'lik bölümde yolun sıyrma ve yeniden montajı kesiti

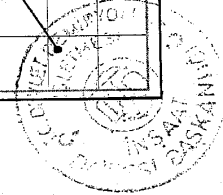


Ek-3: Ulukışla -Gümüş arası 1000 m'lik bölümde sondaj logu sonuçları 1

SONDAJ LOGU

Proje : Ulukışla Km:247+700/248+700 Arası Tasman Etüdü
 Sondaj Yeri : NİĞDE Sondaj No : SK-1
 Tarih : Mayıs 2004 Sayfa No : 1
 Sondaj Derinliği : Sondör :
 Y.A.S. Seviyesi : 1 m Mühendis :

Derinlik (m)	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Numune Derinliği	Numune Türü	Muh. Bor.	SPT			SPT GRAFİĞİ
						15	30	45	
1,0		Nebati Toprak							
2,0		Yer Yer İnce Çakıl İçeren Az Kumlu Siltli Kil	1,50-2,00	Shelby-1					
			2,00-2,45	SPT-1		3	5	6	
3,0			3,00-3,50	Shelby-2					
			3,50-3,95	SPT-2		3	6	6	
4,0			4,50-5,00	Shelby-3					
			5,00-5,45	SPT-3		2	5	6	
5,0			6,00-6,50	Shelby-4					
			6,50-6,95	SPT-4		3	6	5	
6,0			7,50-8,00	Shelby-5					
			8,00-8,45	SPT-5		4	6	6	
8,0			Çakıllı, İnce Çakıllı Siltli, Killi Kum	9,00-9,50	Shelby-6				
		9,50-9,95		SPT-6		3	5	7	
9,0		Kumlu, Siltli Kil	10,50-11,00	Shelby-7					
			11,00-11,45	SPT-7		4	6	7	
11,0			12,00-12,50	Shelby-8					
			12,50-12,95	SPT-8		3	6	8	
12,0		Yer Yer Çakıllı, Siltli, Killi, Kum	13,50-14,00	Shelby-9					
			14,00-14,50	SPT-9		3	7	7	
13,0			15,00-15,50	Shelby-10					
		Yer Yer İnce Çakıl İçeren Az Kumlu	15,50-15,95	SPT-10		2	6	7	
15,0			17,00-17,50	Shelby-11					
		Siltli Kil	17,50-17,95	SPT-11		3	6	8	
17,0			20,00-20,45	SPT-12		13	20	12	
18,0									
19,0									
20,0									
21,0									

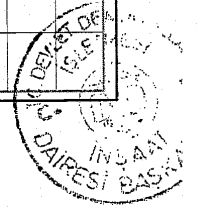


Ek-4: Ulukışla -Gümüş arası 1000 m'lik bölümde sondaj logu sonuçları 2

SONDAJ LOGU

Proje : Ulukışla Km:247+700/248+700 Arası Tasman Etüdü
 Sondaj Yeri : NİĞDE Sondaj No : SK-1
 Tarih : Mayıs 2004 Sayfa No : 2
 Sondaj Derinliği : 42 m Sondör :
 Y.A.S. Seviyesi : 1 m Mühendis :

Derinlik (m)	Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	Numune Derinliği	Numune Türü	Muh. Bor.	SPT			SPT GRAFİĞİ
						15	30	45	
22,0									
23,0									
24,0		Yeşilimsi Gri Renkli Az Killi Bol Siltli İnce Çakıllı Çakıl	23,50-23,95	SPT-13		30	13	14	
25,0									
26,0			26,30-26,75	SPT-14		5	7	6	
27,0									
28,0									
29,0			29,10-29,55	SPT-15		10	12	15	
30,0									
31,0									
32,0									
33,0		Yeşilimsi Gri Renkli Az Killi Bol Siltli İnce Çakıllı Çakıl	32,90-33,35	SPT-16		10	13	16	
34,0									
35,0									
36,0									
37,0									
38,0									
39,0			39,00-39,45	SPT-17		7	10	10	
40,0		Az Çakıllı, Kumlu Kil							
41,0									
42,0									



Ek-5: Ulukışla -Gümüş arası 1000 m'lik bölümde deney sonuçları 1

DENEY SONUÇLARI
Proje Adı : Ulukışla Km 247+700/248+700 Tasman Etüdü

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Wn %	γ_n (t/m ³)	γ_k (t/m ³)	Gs	S %	e %	n %	Elek Analizi			Atterberg Limitleri				L ₁	USCS	Serbest Basınç (kg/cm ²)	Üç Eksenli (UU)		
										No:4 %	No:200 %	Cu %	Cr	LL %	PL %	PI %				Ic	c	Φ
SK-1	Auger	1,00-1,50	25.12			2.61				0.00	63.72			26.92	18.06	8.86	0.203		CL			
	Shelby-1	1,50-2,00	23.14			2.61				4.23	73.2			27.86	18.1	9.76	0.277		CL			
	SPT-1	2,00-2,45	24.43			2.61				0.00	84.48			25.84	18.34	7.50	0.188		CL			
	Auger	2,45-3,00	24.61			2.60				0.00	82.08			26.86	18.91	7.95	0.283		CL			
	Shelby-2	3,00-3,50	29.76	1.90	1.46	2.60	100.0	0.78	0.44	0.00	98.00			37.03	20.25	16.78	0.433		CL	0.68		
	SPT-2	3,50-3,95	27.08			2.59				0.00	98.00			34.21	18.90	15.31	0.466		CL			
	Auger	4,00-4,50	26.67			2.59				0.00	98.00			34.13	22.37	11.76	0.634		CL			
	Shelby-3	4,50-5,00	25.46			2.58				0.00	98.00			31.41	19.04	12.37	0.481		CL			
	SPT-3	5,00-5,45	24.67			2.59				0.00	98.00			31.00	18.81	12.19	0.519		CL			
	Shelby-4	6,00-6,50	23.78			2.58				0.00	98.00			30.54	19.47	11.07	0.611		CL			
	SPT-4	6,50-6,95	27.81			2.57				0.00	98.00			30.76	19.54	11.22	0.263		CL			
	SPT-5	8,00-8,45	26.12			2.58				0.00	98.00			31.01	19.70	11.31	0.432		CL			
	Shelby-6	9,00-9,45	19.05			2.58				20.23	31.28			23.34	18.72	4.62	0.929		SC-SM			
	SPT-6	9,50-9,95	15.74			2.59				9.41	35.29			24.57	19.02	5.55	1.591		SC-SM			
	Auger	10,00-10,50	20.33			2.58				10.17	58.28			23.54	18.30	5.24	0.613		CL-ML			
	Shelby-7	11,00-11,45	18.18																CL-ML			
	SPT-7	12,00-12,50	16.92			2.60				9.29	55.84			25.42	18.65	6.77	1.256		CL-ML			
	Shelby-8	12,50-12,95	18.18			2.59				24.02	29.37			24.62	18.98	5.64	1.142		SC-SM			
	SPT-8	12,50-12,95	17.31			2.60				14.62	45.28			25.66	19.06	6.60	1.265		SC-SM			

Ek-7: Analiz Sonuçları

Ulukışla-Gümüş Arası Islah Öncesi
Phase 2 Analysis Information

Document Name

islah oncesi

Project Settings

General

Project Title: Project1

Number of Stages: 2

Analysis Type: Plane Strain

Solver Type: Gaussian Elimination

Units: Metric, stress as kPa

Stress Analysis

Maximum Number of Iterations: 10000

Tolerance: 0.001

Number of Load Steps: Automatic

Convergence Type: Absolute Energy

Tensile Failure: Reduces Shear Strength

Groundwater

Method: Piezometric Lines

Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³

Field Stress

Field stress: constant

Sigma one: 10 kPa (compression positive)

Sigma three: 10 kPa (compression positive)

Sigma Z: 10 kPa (compression positive)

Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Ek-7'nin devamı

Mesh

Mesh type: graded

Element type: 3 noded triangles

Number of elements on Stage 1: 1635

Number of nodes on Stage 1: 870

Number of elements on Stage 2: 1659

Number of nodes on Stage 2: 883

Mesh Quality

2 of 1659 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements

0 of 1659 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio

2 of 1659 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle

0 of 1659 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle

(elements can be of poor quality for more than one reason)

Mesh Quality Statistics

The worst element has (ratio = 3.40), (min angle = 17.13) (max angle = 119.66)

10.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 41.2) (max angles > 84.2)

20.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 44.1) (max angles > 78.4)

30.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 46.1) (max angles > 75.4)

40.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 47.6) (max angles > 73.3)

50.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 49.0) (max angles > 71.7)

60.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 50.3) (max angles > 70.0)

70.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 51.8) (max angles > 68.5)

80.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 53.3) (max angles > 67.0)

90.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 54.5) (max angles > 65.2)

100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 56.3) (max angles > 63.6)

Ek-7'nin devamı

Poor quality elements are those with:

(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00

Minimum interior angle < 20.0 degrees

Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: DOLGU

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m³

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 40000 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 35 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Elastic

Piezo to use: None

Ru value: 0

Material: Orta Katı KİL

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m³

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 17000 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 0 degrees

Peak cohesion: 68 kPa

Material type: Plastic

Ek-7'nin devamı

Dilation Angle: 0 degrees

Residual Friction Angle: 0 degrees

Residual Cohesion: 68 kPa

Piezo to use: None

Ru value: 0

Material: Orta Sıkı ÇAKIL

Initial element loading: field stress only

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 19500 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 32 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Elastic

Piezo to use: None

Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 2

Material: DOLGU, Area Filled: 36.000 m²

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

External Boundary Area: 3730.307 m²

External Boundary Perimeter: 268.748 m

Stage 1

External Boundary Area: 3693.306 m² (-37.0002 m² change from original area)

Ek-7'nin devamı

External Boundary Perimeter: 268.662 m (-0.0858938 m change from original perimeter)

Stage 2

External Boundary Area: 3691.979 m² (-38.3273 m² change from original area)

External Boundary Perimeter: 268.645 m (-0.102702 m change from original perimeter)

Displacements

Displacement data is not available for Stage 1 until total displacement is viewed in a window

Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 270

Number of yielded mesh elements on Stage 2: 302

List of All Coordinates

External boundary

335.154	473.086
300.388	473.086
299.460	473.086
296.388	473.086
292.388	477.586
288.388	477.586
284.388	473.086
281.318	473.085
242.801	473.078
242.801	453.086

Ek-7'nin devamı

242.801	433.078
335.154	433.086
335.154	453.086

Material boundary

242.801	453.086
270.169	453.086

Material boundary

281.318	473.085
289.943	467.310
290.388	467.975

Material boundary

290.388	467.975
290.833	467.310
299.460	473.086

Material boundary

290.388	470.214
285.861	473.086

Material boundary

290.388	470.214
294.914	473.086

Material boundary

270.169	453.086
311.388	453.086

Ek-7'nin devamı

Material boundary

311.388	453.086
335.154	453.086

Material boundary

296.388	473.086
294.914	473.086
285.861	473.086
284.388	473.086

Ulukışla-Gümüş Arası Islah Sonrası

Phase2 Analysis Information

Document Name

islah sonrasi

Project Settings

General

Project Title: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Solver Type: Gaussian Elimination
Units: Metric, stress as kPa

Stress Analysis

Maximum Number of Iterations: 10000
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Convergence Type: Absolute Energy
Tensile Failure: Reduces Shear Strength

Ek-7'nin devamı

Groundwater

Method: Piezometric Lines

Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³

Field Stress

Field stress: constant

Sigma one: 10 kPa (compression positive)

Sigma three: 10 kPa (compression positive)

Sigma Z: 10 kPa (compression positive)

Angle from the horizontal to sigma 1: 0 degrees (counter-clockwise)

Mesh

Mesh type: graded

Element type: 3 noded triangles

Number of elements on Stage 1: 1635

Number of nodes on Stage 1: 870

Number of elements on Stage 2: 1659

Number of nodes on Stage 2: 883

Mesh Quality

2 of 1659 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements

0 of 1659 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio

2 of 1659 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle

0 of 1659 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle

(elements can be of poor quality for more than one reason)

Mesh Quality Statistics

The worst element has (ratio = 3.40), (min angle = 17.13) (max angle = 119.70)

Ek-7'nin devamı

10.0% of elements have: (ratios > 1.5), (min angles < 41.2) (max angles > 84.1)
 20.0% of elements have: (ratios > 1.4), (min angles < 44.1) (max angles > 78.3)
 30.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 46.1) (max angles > 75.3)
 40.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 47.7) (max angles > 73.3)
 50.0% of elements have: (ratios > 1.3), (min angles < 49.1) (max angles > 71.6)
 60.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 50.4) (max angles > 70.1)
 70.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 51.8) (max angles > 68.5)
 80.0% of elements have: (ratios > 1.2), (min angles < 53.3) (max angles > 67.0)
 90.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 54.6) (max angles > 65.3)
 100.0% of elements have: (ratios > 1.1), (min angles < 56.3) (max angles > 63.7)

Poor quality elements are those with:

(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00

Minimum interior angle < 20.0 degrees

Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: DOLGU

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m³

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 40000 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 35 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Elastic

Piezo to use: None

Ru value: 0

Ek-7'nin devamı

Material: Orta Katı KİL

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 19 kN/m³

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 17000 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 0 degrees

Peak cohesion: 68 kPa

Material type: Plastic

Dilation Angle: 0 degrees

Residual Friction Angle: 0 degrees

Residual Cohesion: 68 kPa

Piezo to use: None

Ru value: 0

Material: Orta Sıkı ÇAKIL

Initial element loading: field stress only

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 19500 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 32 degrees

Peak cohesion: 0 kPa

Material type: Elastic

Piezo to use: None

Ru value: 0

Ek-7'nin devamı

Material: Jet Grout

Initial element loading: field stress & body force

Unit weight: 22 kN/m³

Elastic type: isotropic

Young's modulus: 2.85e+006 kPa

Poisson's ratio: 0.3

Failure criterion: Mohr-Coulomb

Tensile strength: 0 kPa

Peak friction angle: 40 degrees

Peak cohesion: 10 kPa

Material type: Elastic

Piezo to use: None

Ru value: 0

Areas of Excavated and Filled Elements

Stage 2

Material: DOLGU, Area Filled: 36.000 m²

Excavation Areas

Original Un-deformed Areas

External Boundary Area: 3730.307 m²

External Boundary Perimeter: 268.748 m

Stage 1

External Boundary Area: 3693.225 m² (-37.0813 m² change from original area)

External Boundary Perimeter: 268.673 m (-0.0744381 m change from original perimeter)

Stage 2

External Boundary Area: 3691.956 m² (-38.3507 m² change from original area)

Ek-7'nin devamı

External Boundary Perimeter: 268.669 m (-0.0782079 m change from original perimeter)

Displacements

Displacement data is not available for Stage 1 until total displacement is viewed in a window

Displacement data is not available for Stage 2 until total displacement is viewed in a window

Yielded Elements

Yielded Mesh Elements

Number of yielded mesh elements on Stage 1: 277

Number of yielded mesh elements on Stage 2: 302

List of All Coordinates

External boundary

335.154	473.086
300.388	473.086
299.460	473.086
296.388	473.086
292.388	477.586
288.388	477.586
284.388	473.086
281.318	473.085
242.801	473.078
242.801	453.086
242.801	433.078
335.154	433.086
335.154	453.086

Ek-7'nin devamı

Material boundary

281.318	473.085
289.943	467.310
290.388	467.975

Material boundary

290.388	467.975
290.833	467.310
299.460	473.086

Material boundary

290.388	470.214
285.861	473.086

Material boundary

290.388	470.214
294.914	473.086

Material boundary

242.801	453.086
335.154	453.086

Material boundary

284.388	473.086
285.861	473.086
294.914	473.086
296.388	473.086

Ek-8: Analiz Sonuçları

Ulukışla-Gümüş Arası Islah Öncesi

Evre 2 Analiz Bilgisi

Dokuman adı

islah oncesi

Proje Ayarları

Genel

Proje Adı: Proje1

Aşama Sayısı: 2

Analiz Türü: Düzlemsel Deformasyon

Çözücü Tipi: Gauss Eleme Yöntemi

Birimler: Metre sistemi, gerilim kPa

Gerilim Analizi

Maksimum yineleme sayısı: 10000

Tolerans: 0.001

Yükleme Aşaması Sayısı: Otomatik

Yakınsaklık Türü: Mutlak Enerji

Gerilim Yenilimi: Kayma mukavemetini azaltır

Yeraltı Suyu

Metot: Piezometrik Çizgiler

Boşluk Akışkan Birim Ağırlığı: 9.81 kN/m³

Çevre Basıncı

Çevre basıncı: Sabit

Sigma bir: 10 kPa (pozitif basınç)

Sigma üç: 10 kPa (pozitif basınç)

Sigma Z: 10 kPa (pozitif basınç)

Yatay ile sigma arasındaki açı 1: 0 derece (saat yönü tersine)

Elek

Elek Türü: dereceli

Ek-8'in devamı

Element tipi: 3 düğümlü üçgenler

Birinci aşamadaki element sayısı: 1635

Birinci aşamadaki düğüm sayısı: 870

İkinci aşamadaki element sayısı: 1659

İkinci aşamadaki düğüm sayısı: 883

Elek Kalitesi

2 of 1659 Elementler (0.1 % of elementler) düşük kalite elementler

0 of 1659 Elementler (0.0 % of elementler) kenar uzunluk oranından dolayı düşük kalite elementler

2 of 1659 Elementler (0.1 % of elementler) minimum dahili açıdan dolayı düşük kalite elementler

0 of 1659 Elementler (0.0 % of elementler) maksimum dahili açıdan dolayı düşük kalite elementler (elementler birkaç farklı nedenden dolayı düşük kalitede olabilirler)

Elek Kalite İstatistikleri

En kötü eleman (oran = 3.40), (min açı = 17.13) (mak açı = 119.66)

Elemanların 10.0% : (oranlar > 1.5), (min açılar < 41.2) (mak açılar > 84.2)

Elemanların 20.0% : (oranlar > 1.4), (min açılar < 44.1) (mak açılar > 78.4)

Elemanların 30.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 46.1) (mak açılar > 75.4)

Elemanların 40.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 47.6) (mak açılar > 73.3)

Elemanların 50.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 49.0) (mak açılar > 71.7)

Elemanların 60.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 50.3) (mak açılar > 70.0)

Elemanların 70.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 51.8) (mak açılar > 68.5)

Elemanların 80.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 53.3) (mak açılar > 67.0)

Elemanların 90.0% : (oranlar > 1.1), (min açılar < 54.5) (mak açılar > 65.2)

Elemanların 100.0% : (oranlar > 1.1), (min açılar < 56.3) (mak açılar > 63.6)

Düşük kaliteli elemanlar:

(maksimum kenar uzunluğu) / (minimum kenar uzunluğu) > 10.00

Minimum dahili açı < 20.0 derece

Ek-8'in devamı

Maksimum dahili açı > 120.0 derece

Malzeme Özellikleri

Malzeme: DOLGU

İlk yükleme Elemanı: çevre basıncı ve gövde kuvveti

Birim Ağırlığı: 19 kN/m³

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 40000 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 35 degrees

Tepe kohezyonu: 0 kPa

Malzeme türü: Elastik

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Malzeme: Orta Katı KİL

İlk yükleme Elemanı: çevre basıncı ve gövde kuvveti

Birim Ağırlığı: 19 kN/m³

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 17000 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 0 degrees

Tepe kohezyonu: 68 kPa

Malzeme türü: Plastik

Genişleme Açısı: 0 degrees

Artık sürtünme açısı: 0 degrees

Artık kohezyon: 68 kPa

Ek-8'in devamı

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Malzeme: Orta Sıkı ÇAKIL

İlk yükleme Elemanı: sadece çevre basıncı

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 19500 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 32 degrees

Tepe kohezyonu: 0 kPa

Malzeme türü: Elastik

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Kazılmış ve Doldurulmuş Alan Elementleri

Aşama 2

Malzeme: DOLGU, Doldurulan Alan: 36.000 m²

Kazılmış Alanlar

Orjinal deforme olmamış alanlar

Harici Sınır Alanı: 3730.307 m²

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.748 m

Aşama 1

Harici Sınır Alanı: 3693.306 m² (-37.0002 m² orjinal alnadan değişmiş)

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.662 m (-0.0858938 m orjinal çevre uzunluğundan değişmiş)

Aşama 2

Harici Sınır Alanı: 3691.979 m² (-38.3273 m² orjinal alnadan değişmiş)

Ek-8'in devamı

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.645 m (-0.102702 m orjinal çevre uzunluğundan değişmiş)

Yer değiştirme

Toplam yerdeğiştirme ekranda görünene kadar birinci aşama için yer değiştirme verisi mevcut değildir.

Toplam yerdeğiştirme ekranda görünene kadar ikinci aşama için yer değiştirme verisi mevcut değildir.

Cökme Elementleri

çökme elek elementleri

Aşama 1'deki çökme elek elementleri sayısı: 270

Aşama 2'deki çökme elek elementleri sayısı: 302

Tüm Koordinatların Listesi

Dış Sınır

335.154	473.086
300.388	473.086
299.460	473.086
296.388	473.086
292.388	477.586
288.388	477.586
284.388	473.086
281.318	473.085
242.801	473.078
242.801	453.086
242.801	433.078
335.154	433.086
335.154	453.086

Materyal Sınırı

242.801	453.086
---------	---------

Ek-8'in devamı

270.169 453.086

Materyal Sınırı

281.318 473.085

289.943 467.310

290.388 467.975

Materyal Sınırı

290.388 467.975

290.833 467.310

299.460 473.086

Materyal Sınırı

290.388 470.214

285.861 473.086

Materyal Sınırı

290.388 470.214

294.914 473.086

Materyal Sınırı

270.169 453.086

311.388 453.086

Materyal Sınırı

311.388 453.086

335.154 453.086

Materyal Sınırı

296.388 473.086

294.914 473.086

285.861 473.086

Ek-8'in devamı

284.388 473.086

Ulukışla-Gümüş Arası Islah Sonrası
Phase2 Analysis Information

Doküman Adı

Islah sonrası

Proje Ayarları

Genel

Proje Adı: Proje1

Aşama Sayısı: 2

Analiz Türü: Düzlemsel Deformasyon

Çözücü Tipi: Gauss Eleme Yöntemi

Birimler: Metre sistemi, gerilim kPa

Gerilim Analizi

Maksimum yineleme sayısı: 10000

Tolerans: 0.001

Yükleme Aşaması Sayısı: Otomatik

Yakınsaklık Türü: Mutlak Enerji

Gerilim Yenilimi: Kayma mukavemetini azaltır

Yeraltı Suyu

Metot: Piezometrik Çizgiler

Boşluk Akışkan Birim Ağırlığı: 9.81 kN/m³

Cevre Basıncı

Çevre basıncı: Sabit

Sigma bir: 10 kPa (pozitif basınç)

Sigma üç: 10 kPa (pozitif basınç)

Sigma Z: 10 kPa (pozitif basınç)

Yatay ile sigma arasındaki açı 1: 0 derece (saat yönü tersine)

Ek-8'in devamı

Elek

Elek Türü: dereceli

Element tipi: 3 düğümlü üçgenler

Birinci aşamadaki element sayısı: 1635

Birinci aşamadaki düğüm sayısı: 870

İkinci aşamadaki element sayısı: 1659

İkinci aşamadaki düğüm sayısı: 883

Elek Kalitesi

2 of 1659 Elementler (0.1 % of elementler) düşük kalite elementler

0 of 1659 Elementler (0.0 % of elementler) kenar uzunluk oranından dolayı düşük kalite elementler

2 of 1659 Elementler (0.1 % of elementler) minimum dahili açıdan dolayı düşük kalite elementler

0 of 1659 Elementler (0.0 % of elementler) maksimum dahili açıdan dolayı düşük kalite elementler (elementler birkaç farklı nedenden dolayı düşük kalitede olabilirler)

Elek Kalite İstatistikleri

En kötü eleman (oran = 3.40), (min açı = 17.13) (mak açı = 119.70)

Elemanların 10.0% : (oranlar > 1.5), (min açılar < 41.2) (mak açılar > 84.1)

Elemanların 20.0% : (oranlar > 1.4), (min açılar < 44.1) (mak açılar > 78.3)

Elemanların 30.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 46.1) (mak açılar > 75.3)

Elemanların 40.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 47.7) (mak açılar > 73.3)

Elemanların 50.0% : (oranlar > 1.3), (min açılar < 49.1) (mak açılar > 71.6)

Elemanların 60.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 50.4) (mak açılar > 70.1)

Elemanların 70.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 51.8) (mak açılar > 68.5)

Elemanların 80.0% : (oranlar > 1.2), (min açılar < 53.3) (mak açılar > 67.0)

Elemanların 90.0% : (oranlar > 1.1), (min açılar < 54.6) (mak açılar > 65.3)

Elemanların 100.0% : (oranlar > 1.1), (min açılar < 56.3) (mak açılar > 63.7)

Düşük kaliteli elemanlar:

Ek-8'in devamı

(maksimum kenar uzunluğu) / (minumum kenar uzunluğu) > 10.00

Minimum dahili açı < 20.0 derece

Maksimum dahili açı > 120.0 derece

Malzeme Özellikleri

Malzeme: DOLGU

İlk yükleme Elemanı: çevre basıncı ve gövde kuvveti

Birim Ağırlığı: 19 kN/m³

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 40000 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 35 degrees

Tepe kohezyonu: 0 kPa

Malzeme türü: Elastik

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Malzeme: Orta Katı KİL

İlk yükleme Elemanı: çevre basıncı ve gövde kuvveti

Birim Ağırlığı: 19 kN/m³

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 17000 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 0 degrees

Tepe kohezyonu: 68 kPa

Malzeme türü: Plastik

Genişleme Açısı: 0 degrees

Artık sürtünme açısı: 0 degrees

Ek-8'in devamı

Artık kohezyon: 68 kPa

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Malzeme: Orta Sıkı ÇAKIL

İlk yükleme Elemanı: sadece çevre basıncı

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 19500 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 32 derece

Tepe kohezyonu: 0 kPa

Malzeme türü: Elastik

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Malzeme: Jet Grout

İlk yükleme Elemanı: çevre basıncı ve gövde kuvveti

Birim Ağırlığı: 22 kN/m³

Elastik tipi: izotropik

Elastisite Modülü: 2.85e+006 kPa

Poisson oranı: 0.3

Yenilme kriteri: Mohr-Coulomb

Çekme direnci: 0 kPa

Tepe sürtünme açısı: 40 derece

Tepe kohezyonu: 0 kPa

Malzeme türü: Elastik

Kullanılan basınç: Yok

Ru değeri: 0

Ek-8'in devamı

Kazılmış ve Doldurulmuş Alan Elementleri

Aşama 2

Malzeme: DOLGU, Doldurulan Alan: 36.000 m²

Kazılmış Alanlar

Orjinal deforme olmamış alanlar

Harici Sınır Alanı: 3730.307 m²

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.748 m

Aşama 1

Harici Sınır Alanı: 3693.225 m² (-37.0813 m² orjinal alnadan değişmiş)

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.673 m (-0.0744381 m orjinal çevre uzunluğundan değişmiş)

Aşama 2

Harici Sınır Alanı: 3691.956 m² (-38.3507 m² orjinal alandan değişmiş)

Harici Sınırın Çevre Uzunluğu: 268.669 m (-0.0782079 m orjinal çevre uzunluğundan değişmiş)

Yer değiştirme

Toplam yerdeğiştirme ekranda görünene kadar birinci aşama için yer değiştirme verisi mevcut değildir.

Toplam yerdeğiştirme ekranda görünene kadar ikinci aşama için yer değiştirme verisi mevcut değildir.

Cökme Elementleri

çökme elek elementleri

Aşama 1'deki çökme elek elementleri sayısı: 277

Aşama 2'deki çökme elek elementleri sayısı: 302

Tüm Koordinatların Listesi

Dış Sınır

Ek-8'in devamı

335.154	473.086
300.388	473.086
299.460	473.086
296.388	473.086
292.388	477.586
288.388	477.586
284.388	473.086
281.318	473.085
242.801	473.078
242.801	453.086
242.801	433.078
335.154	433.086
335.154	453.086

Materyal Sınırı

281.318	473.085
289.943	467.310
290.388	467.975

Materyal Sınırı

290.388	467.975
290.833	467.310
299.460	473.086

Materyal Sınırı

290.388	470.214
285.861	473.086

Materyal Sınırı

290.388	470.214
294.914	473.086

Ek-8'in devamı

Materyal Sınırı

242.801	453.086
335.154	453.086

Materyal Sınırı

284.388	473.086
285.861	473.086
294.914	473.086
296.388	473.086

ÖZGEÇMİŞ

Nilüfer KÜÇÜKALİ, 1977'de Samsun'da doğdu. İlkokulu Büyükata İlkokulu'nda bitirdikten sonra orta öğrenimini Silifke Ortaokulu ve Erzurum Lisesinde tamamladı. 1995 yılında kazanmış olduğu KTÜ İnşaat Mühendisliği bölümünden 2000 yılında mezun oldu. 2000-2001 yılları arasında İngiltere'de dil eğitimi aldı. 2001-2006 yılları arasında KTÜ' de Avrupa Birliği Ofisi'nde çalıştı. 2005 yılında KTÜ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Geoteknik bilim dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2006 yılında TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü İnşaat Dairesinde inşaat mühendisi olarak göreve başladı, halen aynı görevde çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.