

T.C
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖPRÜ YAKLAŞIM DOLGULARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÜNAL YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. MUSTAFA KARAŞAHİN

İSTANBUL, 2019

Ünal YILDIRIM tarafından hazırlanan “Köprü Yaklaşım Dolgularının İyileştirilmesi “ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ İLE /OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN

İnşaat Mühendisliği, Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan: Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Yücel ÜRÜŞAN

İnşaat Mühendisliği, Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Teslim Tarihi:/...../2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ALKAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum veriler, bilgiler ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ünal YILDIRIM

...../.....2019

KÖPRÜ YAKLAŞIM DOLGULARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ünal YILDIRIM

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Bursa’da yapımı düşünülen karayolları köprüsünün yapılacağı sahanın istenilen servis yüklerini taşıyamayacağı ve yapılan yaklaşım dolgularından dolayı oturma ve taşıma gücü problemlerinin ortaya çıkacağı öngörülmüştür. Köprü ile yaklaşım dolgularında herhangi bir iyileştirme yapılmadan ve iyileştirme yapıldıktan sonraki durumları değerlendirilmiş ve yapılan zemin iyileştirmeleri sonucunda zeminde meydana gelen taşıma kapasitesi ve mukavemet artışı amaçlanmıştır. Buna göre, jet grout, taş kolon ve geopier kolon ile zeminde iyileştirme yöntemleri kullanılarak ve farklı çaplara sahip deneme kolonları yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Yaklaşım dolgusunda meydana gelen stabilite kayıpları ise geogridler kullanılarak sınırlanmıştır. Yapılan çözüm sonucunda meydana gelen problemin, zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak oluşan oturma değerlerinin kabul edilebilir seviyelere düştüğü görülmüştür. Elde edilen oturma değerlerinin yanı sıra en ekonomik yöntem maliyet analizleri yapılarak belirlenmiştir. Bu çözümler PLAXIS programı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda zeminde ve dolguda stabilite sorunları aşılmış, taşıma kapasitesi artmış ve zeminin mukavemet özellikleri iyileştirilmiştir. Yapılacak köprünün dolgu yüzeyinde meydana gelebilecek çatlaklar sınırlanacaktır. İmalat sırasında ihtiyaç duyulan granüler malzeme veya dolgu ihtiyacında azalma olacaktır. Ülkemizde uygulama pratiği ve kolaylığı sayesinde ve elde edilen hesaplar sonucunda jet grout yöntemi ile zeminin iyileştirilmesi ve geogrid ile dolgunun güçlendirilmesi daha ekonomik ve pratik sonuçlar oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler : Köprü, jet grout, oturma, taş kolon, geopier, deplasman, PLAXIS, sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Sayısı : 144

Danışman : Prof.Dr.Mustafa KARAŞAHİN

TO BETTER APPROUCH FILLING AT BRIDGES

(M. Sc. Thesis)

Ünal YILDIRIM

GELİŞİM UNIVERSITY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

July 2019

ABSTRACT

It is foreseen that the area where the construction of the highways bridge which is planned to be constructed in Bursa cannot carry the desired service loads and problems of seating and bearing power will arise due to the approach fillings and bridge and approach fills without any improvement and improvement after the situation has been evaluated and as a result of soil improvements to the bearing capacity and strength to the end of the increase was aimed. According to this, results were obtained by using jet grout, stone column and geopier column on the ground by using improvement methods and experiments with different diameters. Stability losses in the approach fill are limited by geogrids. It is seen that the problem of the result of the solution has decreased to acceptable levels by using the soil improvement methods. In addition to the living values, the most economical method was determined by cost analysis. These solutions were calculated using the PLAXIS program and the finite element method. As a result of these studies, the stability problems on the soil and the fill were exceeded, the bearing capacity was increased and the strength properties of the soil were improved. The cracks on the filling surface of the opened bridge will be limited. There will be a reduction in the need for granular material or filler during manufacturing. Thanks to the practicality and ease of application in our country, the improvement of the soil with jet grout method and the strengthening of geogrid with the result of the calculations will be more economical and practical results.

Key Words :Bridge, jet grout, oturma, stone column, geopier, displacement, PLAXIS, Finite Element Method

Page Number :144

Supervisor :Prof.Dr.Mustafa KARAŞAHİN

TEŞEKKÜR

Yapılan her çalışma değerlidir ve önemlidir. Yapılan her türlü çalışma ülkemize ve insanlarımıza ve inşaat sektöründe bulunan çalıŐanlarımıza için büyük önem atfetmektedir. Bu alıŐma kapsamında köprü yaklaşım dolguları incelenmiş ve var olan problemler ile ilgili bir çalışma yaptım. Bu alıŐma süresince desteğini esirgemeyen birçok çalışma arkadaŐım, kurum ve kuruluŐtan destek aldım. Ancak bu süreçte asıl desteklerini gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN ve bu çalıŐmam sırasında maddi ve manevi desteğini gördüğüm “ERC İNŞAAT ERDOğAN ASLAN” ve değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
TABLolarIN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	3
2.1. Jet Grout Yöntemi.....	4
2.1.1 Jet Grout Yöntemi Literatür Taraması	4
2.1.2 Jet Grout Yöntemine Genel Özellikleri.....	12
2.1.2. Jet Grout Yönteminin Tarihçesi.....	13
2.1.3. Jet Grout Yöntemi Uygulama Sistemleri	14
2.1.3.1. Tek Akışkanlı Sistem (Jet 1).....	15
2.1.3.2. Çift Akışkanlı Sistem(Jet 2)	16
2.1.3.3. Üç Akışkanlı Sistem (Jet 3)	17
2.1.3 Jet Grout İmalat Aşamaları	18
2.1.3.4. Delme Aşaması.....	19
2.1.3.5. Enjeksiyon Aşaması.....	19
2.1.4. Jet Yönteminin Uygulama Alanları.....	20
2.1.5. Jet Grout Yönteminin İmalat Parametreleri	24
2.1.5.1. Enjeksiyon Basıncı	24
2.1.5.2. Çekme Hızı.....	27
2.1.5.3. Çimento Dozajı.....	29
2.1.6. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar	30
2.1.7. Jet Grout Yöntemi Kalite Kontrol Testleri	33
2.1.7.1. Kolon Çapı	33
2.1.7.2. Bütünlük Testi	34

2.1.7.3.	Jet Grout Kolonu Yükleme Deneyi	35
2.1.7.4.	Serbest Basınç Testi	36
2.1.8.	Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Sınırlamalar	37
2.1.8.1.	Jet Grout Yönteminin Avantajları.....	37
2.1.8.2.	Jet Grout Yönteminin Sınırlamaları.....	37
2.2.	Taş Kolon Yöntemi	39
2.2.1.	Taş Kolon Yönteminin Tarihçesi.....	39
2.2.2.	Taş Kolon Yöntemi Literatür Taraması.....	40
2.2.3.	Taş Kolon İmalat Yöntemleri.....	44
2.2.3.1.	Vibro Sıkıştırma Yöntemi.....	45
2.2.3.1.1.	Vibro-Sıkıştırma ile İyileştirme Tekniği	46
2.2.3.2.	Vibro Yerdeğiştirme Yöntemi.....	47
2.2.3.2.1.	Üstten Beslemeli Islak Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi.....	48
2.2.3.2.2.	Üstten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi	50
2.2.3.2.3.	Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi	51
2.2.4.	Vibratörler.....	52
2.2.5.	İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması	52
2.2.6.	Taş Kolon Malzemelerin Özellikleri.....	52
2.2.6.1.	Taş Kolon Çapı.....	53
2.2.6.2.	Taş Kolonların Yerleşim Aralıkları ve Alan Yerdeğiştirme Oranı	54
2.2.6.3.	Taş Kolonların Boyu.....	55
2.2.6.4.	Taş Kolon Malzemesinin İçsel Sürtünme Açısı	55
2.2.6.5.	Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı	55
2.2.7.	Taş Kolon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	55
2.2.7.1.	Taş Kolon Kullanımının Avantajları	55
2.2.7.2.	Taş Kolonların Dezavantajları ve Sınırlamalar	56
2.2.8.	Taş Kolonların Davranışını Etkileyen Faktörler	56
2.2.8.1.	Taş Kolon İmalat Tekniği	56
2.2.8.2.	Zemin Tipi ve Konsolidasyon Etkisi	57
2.2.8.3.	Taş Kolonlarda Kullanılan Dolgu Malzemesi	58
2.2.8.4.	Grup Etkisi.....	59
2.2.8.5.	Yerdeğiştirme Oranı.....	60
2.2.9.	Taş Kolonların Uygulama Alanları	60

2.3.	Geopier Yöntemi	62
2.3.1.	Geopier Yöntemi Literatür Taraması	62
2.3.2.	Geopier Yöntemi Uygulama Alanları	63
2.3.3.	Geopier Yöntemi Uygulama Yöntemleri	64
2.3.4.	Geopier Kolon Çeşitleri ve İmalat Aşamaları	65
2.3.4.1.	Geopier Sistemi ile Kolon Oluşturma	66
2.3.4.1.1.	Geopier Sistemi İmalat Yöntemi	66
2.3.4.2.	Impact Sistemi ile Kolon Oluşturma	67
2.3.4.2.1.	Impact Sistemi İmalat Yöntemi	68
2.3.4.3.	GeoConcrete Sütunları ile Kolon Oluşturma	69
2.3.4.3.1.	GeoConcrete Sütun Sistemi İmalat Yöntemi	69
2.3.5.	Darbeli Kırmataş Kolon Yapımını Etkileyen Parametreler	70
2.3.5.1.	Geopier Kolon Çapı	70
2.3.5.2.	Geopier Kolon Boyu	70
2.3.5.3.	Geopier Kolon İçsel Sürtünme Açısı	71
2.3.5.4.	Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı	72
2.4.	Geosentetikler	73
2.4.1.	Geosentetiklerin Kullanım Alanları	73
2.4.2.	Geogridler	79
2.4.2.1.	Geogrid Kullanımının Sağladığı Faydalar	79
3.	SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS	81
3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi	81
3.2.	Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı	83
3.3.	Zemin Davranışının Modellenmesi	84
3.4.	PLAXIS Paket Programı	86
3.4.1.	PLAXIS Yazılımı Genel Kullanım İlkeleri	87
3.4.2.	PLAXIS Modülü Çalışma Prensibi	87
3.4.2.1.	Zemin Modelleri	87
3.4.2.1.1.	Linear Elastik Zemin Modeli	88
3.4.2.1.2.	Mohr-Coulomb Zemin Modeli	88

3.4.2.1.3.	Hardening-Soil Zemin Modeli	89
3.4.2.1.4.	Jointed Rock Zemin Modeli	90
3.4.2.1.5.	Soft Soil Zemin Modeli	90
3.4.2.1.6.	Soft Soil Creep Zemin Modeli	91
3.5.	Köprü Yaklaşım Dolguları ve Sahanın Özellikleri	92
3.5.1.	Proje Bilgileri	92
3.5.2.	Zemin Etüdü ve Amacı	92
3.5.3.	Proje Alanının Tanıtılması	92
3.5.4.	Çevresel ve Topoğrafik Etkiler	94
2.1.8.3.	Sahanın Mühendislik Durumu Hakkında Bilgiler	94
2.1.8.4.	Sahanın Tektonik Değerlendirmesi	95
2.1.8.5.	Bursa Fay Yapısı	96
3.5.5.	Sahanın Mühendislik Özellikleri	96
3.5.5.1.	Yeraltı ve Yerüstü Suları	97
3.5.5.2.	Standart Penetrasyon Deneyi(SPT)	98
3.5.5.3.	SPT Deneyinin Uygulama Alanları	98
3.5.6.	Laboratuvar Deneyleri ve Analizler	98
3.5.6.1.	Su Muhtevası Analizleri	99
3.5.6.2.	Elek Analizi	99
3.5.6.3.	Kıvam Limitleri Analizi	100
4.	PROBLEMİN ÇÖZÜLMESİ VE HESAPLAR	102
4.1.	Kullanılan Zemin Parametreleri	103
4.2.	Başlangıç Durumunu Göre Analizlerin Yapılması	104
4.3.	İyileştirme Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Analizler	107
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	130
	KAYNAKLAR	132
	EKLER	137
	ÖZGEÇMİŞ	144

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Gerilme Dağıtım Parametresi- Eshelby Tensörü İlişkisi [2]	5
Şekil 2.2 Çalışma alanında çöküntü sınırını belirlemek için açılmış hendek[5].....	7
Şekil 2.3 Ordu Üniversitesi Tıp Fakültesi zemininde teşkil edilen jet kolonların yükleme deneyleri[6]	8
Şekil 2.4 Zemin Islahı Öncesi ve Sonrası Ortalama Elastisite Modülü Değerleri[7]	9
Şekil 2.5 Terzaghi taşıma kapasitesi sınır durum gösterimi[67].....	11
Şekil 2.6 Zemin Profili ve Sonlu Elemanlar Ağı[66]	12
Şekil 2.7 Zemin özelliklerine göre enjeksiyon uygulaması[8]	13
Şekil 2.8 Jet Grout yönteminin imalat aşamaları[8]	14
Şekil 2.9 Jet Grout Sistemleri: (a) tek akışkanlı sistem, (b) iki akışkanlı sistem, (c) üç akışkanlı sistem[12]	15
Şekil 2.10 Jet 1 tek akışkanlı sistemin şematik gösterimi[8]	16
Şekil 2.11 Jet 2 çift akışkanlı sistemin şematik gösterimi[8].....	17
Şekil 2.12 Üç Akışkanlı Sistemin şematik gösterimi[8].....	17
Şekil 2.13 Jet grout yöntemi uygulama aşamaları [15].....	19
Şekil 2.14 Jet grout yöntemi ile yapı ve istinat yapı temelleri güçlendirilmesi[5]	21
Şekil 2.15 Jet grout istinat yapısı uygulamaları[12]	21
Şekil 2.16 Jet grout geçirimsizlik teşkili için imal edilen kesişen kolonlar[12]	22
Şekil 2.17 Jet grout yöntemin tünel inşaatında kullanımı[18]	23
Şekil 2.18 Enjeksiyon basıncı ile oluşan kolon çapı arasındaki ilişki[19].....	25
Şekil 2.19 Basınç - Bekleme Süresi - Kolon Çapı İlişkisi[19]	26
Şekil 2.20 Enjeksiyon gövdesinin çekilme hızının iyileştirme yapılan zeminin hacmine etkisi[19]	28
Şekil 2.21 Su / çimento mukavemet arasındaki ilişki[9]	30
Şekil 2.22 Jet grout delgi makinesi[20]	31
Şekil 2.23 Jet grout kolon teşkili için kullanılan enjeksiyon ve pompa ünitesi[21]	31
Şekil 2.24 Mikser Ünitesi[22].....	32
Şekil 2.25 Çimento Silosu[22].....	32
Şekil 2.26 Jet grout deneme kolonları örnekleri ve çap kontrolü[23].....	34
Şekil 2.27 Deneme kolonlarının derinlik boyunca çap değişimi[10]	34
Şekil 2.28 Jet grout deneme kolonları bütünlük testi[25]	35
Şekil 2.29 Jet grout yükleme sistemini şematik gösterimi[23]	36
Şekil 2.30 Jet grout kolonlarından karot numunesi alınması[26]	37
Şekil 2.31 Problemin Sonlu Elemanlar Modeli[29].....	41
Şekil 2.32 Eksenel Simetrik Birim Hücre Modeli[30].....	42
Şekil 2.33 Farklı Kolon Malzemesinin Konsolidasyon Süresine Etkisi[29].	43
Şekil 2.34 Vibro sıkıştırma yöntemi imalat aşamaları[34]	46
Şekil 2.35 Vibro-sıkıştırma tekniğiyle zeminlerin iyileştirilmesi[12]	46
Şekil 2.36 Vibro-sıkıştırma yöntemi için uygun zemin gradasyonları[12].....	47
Şekil 2.37 Taş kolon yöntemi genel imalat tekniği şematik gösterimi[37]	49
Şekil 2.38 Islak üstten beslemeli taş kolon yöntemi[37]	49

Şekil 2.39 Kuru tabandan beslemeli taş kolon yöntemi[37]	50
Şekil 2.40 Kuru tabandan beslemeli taş kolon uygulaması[37].....	51
Şekil 2.41 Dipten beslemeli kuru vibro-yerdeğiştirme tekniğinin şematik gösterimi[12]...51	
Şekil 2.42 Zeminin mukavemet değerlerinin kolon çapı oluşumuna etkisi[17]	54
Şekil 2.43 Taş kolon eşkenar üçgen dizilimi[35].....	54
Şekil 2.44 Taş kolon imalatında kullanılan granüler malzemesi[38]	59
Şekil 2.45 Taş kolon ile sürtünme kazığının yük transfer mekanizmasının karşılaştırılması[27]	59
Şekil 2.46 Taş kolon tekniklerinin dane dağılımına bağlı olarak uygulanabilirliği[12]	61
Şekil 2.47 DKK elemanlarının diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması[42].....	64
Şekil 2.48 Geopier sistemlerinin imalat adımları [43].....	66
Şekil 2.49 Geopier yöntemi ile kolon oluşturma[42].....	67
Şekil 2.50 Impact Sistemi ile Darbeli Kırmataş Kolon İmalatı[39].....	69
Şekil 2.51 GeoConcrete kolonların imalat tekniği[42]	69
Şekil 2.52 Geoconcrete sütun tekniğiyle teşkil edilmiş kolon[45]	70
Şekil 2.53 $Q_{impact} / DKK \text{ Boyu} - SPT N_{tem}$. [46]	71
Şekil 2.54 Arazi kesme deneyi yapılmış DDK kolonları[17]	72
Şekil 2.55 Darbeli kırmataş kolonların imalatında kullanılan kırmataş malzemesi[47].....	72
Şekil 2.56 Dolguların geogridler ile iyileştirilmesi[49]	74
Şekil 2.57 Geosentetiklerin zemin malzemelerinin ayrılmasında kullanılması[50]	75
Şekil 2.58 Geotekstiller kullanılarak güçlendirme yapılması[51]	76
Şekil 2.59 Geotekstillerin drenaj fonksiyonu[52].....	77
Şekil 2.60 Geotekstillerin erozyonların kontrolünde kullanılması[53].....	77
Şekil 2.61 Geosentetiklerin filtrasyon fonksiyonu[54].....	78
Şekil 2.62 Geotekstillerin yalıtım işlerinde kullanılması[55]	79
Şekil 3.1 Modelin sonlu elemanlara bölünmesi[57]	82
Şekil 3.2 Tipik 2 Boyutlu Elemanlar[58].....	83
Şekil 3.3 Hiperbolik malzeme modeli[57].....	85
Şekil 3.4 Modelde eksen görünümü[57].....	85
Şekil 3.5 PLAXIS yazılımı genel görünümü	86
Şekil 3.6 Üç eksenli deney çalışmaları sonucunda elde edilen Eo ve E50 modülleri [59]..	89
Şekil 3.7 Hiperbolik gerilme ve birim şekil değiştirme ilişkisi[59].....	90
Şekil 3.8 Hacimsel birim şekil değiştirme ve efektif gerilme ilişkisi[59]	91
Şekil 3.9 Projenin yapılacağı sahanın haritası[60].....	93
Şekil 3.10 Yerel zemin sınıfları[67].....	93
Şekil 3.11 Türkiye deprem tehlike haritası[61]	96
Şekil 3.12 İnce daneli zeminlere ait plastisite kartı[63].....	101
Şekil 4.1 Yaklaşım dolguları iyileştirilen köprünün genel görünümü	103
Şekil 4.2 PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde hesap adımları	105
Şekil 4.3 Analiz sonucunda hesap adımlarının görünümü.....	106
Şekil 4.4 Deplasman grafikleri için yaklaşım dolgusunun yüzeyinde seçilen noktalar.....	106
Şekil 4.5 İyileştirme yapılmadan önceki saha durumu ve meydana gelen toplam oturma miktarı	107

Şekil 4.6 PLAXIS sınır aralığı ve düğüm noktası seçim menüsü.....	108
Şekil 4.7 Problemin modellenmesi ve sınır koşullarının belirlenmesi	109
Şekil 4.8 PLAXIS malzeme veri girişi penceresi	110
Şekil 4.9 PLAXIS veri girişi ekranı	111
Şekil 4.10 Yaklaşım dolgusu ve temel altında jet grout kolon yerleşimi yapılırken	112
Şekil 4.11 Jet grout iyileştirme yöntemi malzeme parametre girişi.....	112
Şekil 4.12 Sayısal modelin mesh aralığı	113
Şekil 4.13 Boşluk suyu basıncı konturların oluşturulması.....	113
Şekil 4.14 Kazı aşamasının tamamlanması.....	114
Şekil 4.15 Yaklaşım dolgusu ve konsolidasyonların grafiksel gösterimi	115
Şekil 4.16 Yaklaşım dolgusu altında jet grout kolonlu modelde oluşan toplam oturma ...	115
Şekil 4.17 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 100 cm çapında jet grout kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı.....	116
Şekil 4.18 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 120 cm çapında jet grout kolonlu modelde oluşan deplasman miktarı	116
Şekil 4.19 Zeminde taş kolonlar kullanılarak iyileştirme yapılması.....	117
Şekil 4.20 Yaklaşım dolgusu altında 80 cm çapında taş kolonu modelde oluşan toplam oturma miktarı.....	118
Şekil 4.21 Yaklaşım dolgusu altında 100 cm çapında taş kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı.....	118
Şekil 4.22 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 120 cm çapında taş kolonlu modelde oluşan deplasman miktarı	119
Şekil 4.23 Geopier kolonları kullanılarak iyileştirme yapılması	120
Şekil 4.24 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 80 cm çapında geopier kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı.....	120
Şekil 4.25 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 100 cm çapında geopier kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı.....	121
Şekil 4.26 Jet grout kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki	121
Şekil 4.27 Taş kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki.....	122
Şekil 4.28 Geopier kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki	122
Şekil 4.29 Taş kolonların yerleşim aralığına bağlı olarak oluşan toplam oturma miktarı. 123	
Şekil 4.30 Zemin iyileştirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra elde edilen oturma miktarı grafiksel dağılımı.....	126
Şekil 4.31 Kolon çapı, uzunluğu yerleşim aralığı aynı olması durumunda oluşan maliyet oranları	127
Şekil 4.32 Jet grout kolonları ve geogridler kullanılarak yaklaşım dolgularının iyileştirilmesi.....	128
Şekil 4.33 Jet grout kolonları ve geogridler kullanılarak yaklaşım dolgularının iyileştirilmesi sonucunda oluşan deplasmanlar.....	128
Şekil 4.34 Geogrid malzeme özelliklerinin tanımlanması[48]	129

TABLOLARIN LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1 Dolgu malzemesi özellikleri [1]	1
Tablo 2.1 Jet Grout kolon teşkili sırasında kullanılan ekipmanların özellikleri[4]	6
Tablo 2.2 İslah öncesi ve sonrası durum için analiz sonuçları[65].....	10
Tablo 2.3 Jet grout sistemleri karşılaştırılması[14].....	18
Tablo 2.4 Jet kolonlarının mukavemet değerlerinin imalat parametreleriyle değişimi[5]...24	24
Tablo 2.5 Jet grout kolonlarının oluşturulmasında gerekli imalat parametreleri[19]	27
Tablo 2.6 Enjeksiyon gövdesinin çekilme hızı ile iyileştirme yapılan zemin hacmi ile arasındaki ilişkisi[19].....	29
Tablo 2.7 Oturma azaltma faktörü ve iyileştirme faktörü değerlerinin karşılaştırması[33]	44
Tablo 2.8 Zemin iyileştirmede kullanılan vibratörlerin teknik özellikleri[12]	52
Tablo 2.9 Taş kolon uygulamasında kullanılan taş kolon gradasyonu[37]	53
Tablo 2.10 DKK teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları[17]	65
Tablo 2.11 Geosentetik çeşitleri[48].....	73
Tablo 2.12 Geosentetiklerin işlevlerine göre özellikleri[48]	75
Tablo 3.1 Ölçülen yeraltı suyu seviyesi ve sondaj kuyuları derinlikleri[60].....	98
Tablo 3.2 Zeminlerin su içeriği[60]	99
Tablo 3.3 Elek analizi deney sonuçları[60]	100
Tablo 3.4 Kıvam limitleri deney sonuçları tablosu[60]	100
Tablo 4.1 H30-S24 köprü tasarımı sırasında kullanılan kamyon yükü[64].....	102
Tablo 4.2 Zemin güçlendirme yöntemlerine ait zemin parametreleri[59].....	108
Tablo 4.3 Dolgu malzemesine ait zemin parametreleri[59].....	109
Tablo 4.4 Kum ve Kil malzemesine ait zemin parametreleri[59].....	110
Tablo 4.5 İyileştirme yöntemine bağlı olarak oluşan oturma miktarları	123
Tablo 4.6 Geopier kolon birim fiyat analizi.....	124
Tablo 4.7 Jet grout birim fiyat analizi.....	124
Tablo 4.8 Taş kolon birim fiyat analizi.....	125
Tablo 4.9 Zemin iyileştirme yöntemlerine ait maliyet analizleri.....	125
Tablo 4.10 Ø 120 cm çapındaki kolonlar ile iyileştirme yapılması durumunda oluşan maliyet oranları	126

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki simge ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
%	Yüzde
Mm	Milimetre
M	Metre
Cm	Santimetre
M₃	Metreküp
M²	Metrekare
D_r	Rölatif sıklık
ϕ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
ν	Poisson oranı
σ	Gerilme
γ	Birim hacim ağırlık
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
KN	Kilo Newton
g	Yerçekimi ivmesi
Km	Kilometre
E	Elastisite Modülü
EI	Eğilme Rijitliği
EA	Eksenel Rijitlik
R_{inter}	Mukavemet azaltma faktörü
Ψ	Dilatasyon açısı
K₀	Sükûnetteki toprak basıncı katsayısı

Kısaltma**A.B.D****AASHTO****Bkz.****FEM****MC****HS****JR****LE****PLAXIS****SEY****SS****Vb.****Vd.****Vs.****Açıklamalar**

Amerika Birleşik Devletleri

Amerika Devlet Karayolu ve Ulaşım Görevlileri Birliği

Bakınız

Finite Element Method

Mohr-Coulomb Model

Hardening Soil Model

Jointed Rock Model

Lineer Elastik Model

Finite Element Code for Soil and Rock Analysis

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Soft Soil Model

Ve benzeri

Ve diğerleri

Ve saire

1. GİRİŞ

Günümüzde kentlerde ve sanayileşmiş bölgelerde nüfusun giderek artması sonucunda bina, otoyol, köprü vb. mühendislik yapılarının uygun olmayan, taşıma gücü kapasitesi zayıf zeminler üzerinde yapılmasına neden olmuştur. Turba zeminler, yumuşak killer, gevşek kumlar ve yeraltı su seviyesi yüksek olan yumuşak alüvyonlar zayıf zemin olarak kabul edilmektedir. “Yollar Fenni Şartnamesine göre Tablo 1.1’de verilen şartlara uygun olmayan bütün kazı malzemeleri “zayıf zemin” olarak nitelendirilmektedir” [1].

Tablo 1.1 Dolgu malzemesi özellikleri [1]

Deney Adı	Limit Değer	Standart No
Likit Limit (LL)	<70	TS1900 AASHTO T-89
Plastisite İndeksi	<40	TS1900 AASHTO T-89
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (standart proktor)	>1.450 t/m ³	TS1900 AASHTO T-89

Diğer bir ifadeyle, “Zayıf zeminler, yol üst yapısını ve yol yapılarını (dolgu, yarma, köprü, viyadük, tünel vb.) işletme süresince problem çıkarmadan emniyetli ve ekonomik bir şekilde taşıyamayan zeminlerdir” [1] şeklinde ifade edilmiştir. Köprü yapılarının ulaşım uzun süre ve kesintisiz hizmet verebilmesi için, köprü kenar ayaklarının oturma ve dönme miktarlarının köprü açıklık miktarı ve mesnetlenme koşullarına bağlı olarak ön görülen sınırlar içinde kalması en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Ancak bazı kamusal maliyetler ve fiziki şartlardan dolayı köprü yaklaşım dolguları ve köprü yapısı mukavemet özellikleri zayıf olan yumuşak zeminler üzerinde projelendirilmesi gerekmektedir. Kabul edilen genel yaklaşım ise köprü ayak temellerinin sağlam zemin sahaları üzerinde, yüzeysel temel olarak veya derin temeller üzerinde tasarlanması ve oturma miktarının proje kriterlerine göre uygun olarak azaltılması ve sınırlandırılmasıdır. Yumuşak zeminler üzerinde yer alan yaklaşım dolguları ve köprü temel ayakları kalıcı yük ve hareketli trafik yüklerinin etkisi altında önemli miktarda farklı oturmalar meydana gelmektedir. Bu durum yol üst yapısında yapısal hasarların oluşmasına neden olmakta ve bu durum sürüş kalitesinin düşmesine, kullanım süresinin azalmasına bakım masraflarının azalmasına neden olmaktadır. Bu tezin çalışma konusu olan Bursa İli, Demirtaş Mahallesiinde yapımı düşünülen Avdancık köprüsü ve yaklaşım dolgusu yumuşak ve zayıf zemin tabakaları üzerine oturmaktadır. Yaklaşım dolguları ve köprü ayak temeli altındaki zeminlerin mukavemet özellikleri, zaman faktörüne bağlı olarak gösterdikleri toplam oturma miktarı,

kayma dayanımı ve niteliği zeminin kabarma durumunu etkilemektedir. Zayıf zemin tabakalarının değiştirilmesi veya kaldırılması ekonomik açıdan mümkün olmayan kalınlıkta olması durumunda ise iyileştirme yöntemlerine başvurulur. Köprü kenar ayakları ve yaklaşım dolgu tabanındaki zayıf zeminlerde meydana gelen toplam ve farklı oturmaların azaltılması ve sınırlandırılması amacıyla çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında köprü ayak temelleri ve yaklaşım dolgusu tabanındaki zayıf zeminler jet grout, taş kolon ve geopier zemin güçlendirme teknikleri kullanılarak oturma miktarları üzerindeki etkisi PLAXIS 2D yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Kolon çapı artırılarak problemin çözülmüş tekrarlanmış ve toplam ve farklı oturma değerindeki azalma gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda aynı oturma değerine bağlı olarak en ekonomik zemin iyileştirme yöntemi belirlenmiştir.

2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Günümüzde şehir merkezlerinde nüfus yoğunluğunun artması sonucunda, yapılaşmaya uygun sahaların azaldığı ve yapılaşmanın zorunlu hale geldiği turba zeminler, yumuşak killer, gevşek kumlar ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak alüvyon zemin sahalarında yapılaşmalar başlamıştır. Yapının inşa edileceği sahanın, taşıma gücü ve oturma açısından sorunlu bir zemin olması durumunda ise;

- Yapının arsa alanının değiştirilmesi,
- Mevcutta bulunan zayıf zeminin kaldırılması ve yerine mühendislik açıdan uygun özellikler taşıyan granüler bir başka malzeme ile doldurulup ve sıkıştırılması
- Yapılan tasarımın mevcut sahanın zemin özelliklerine ve taşıma kapasitesine uygun hale getirilmesi,

Şeklinde düşünülen bu çözümler fiziki ve kamusal sınır şartlarından dolayı ekonomik olmamakla birlikte tasarımcı ve kullanıcı için çeşitli kısıtlamalar getirecektir. İstenilen projenin zayıf zemin sahalarında yapılabilmesi için zemin mukavemet özelliklerinin güçlendirilmesi ve kalıcı yükleri taşıyabilecek kapasiteye ulaşmasının yanı sıra hareketli trafik yüklerini sorunsuz şekilde aktarabilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı Geoteknik Mühendisliğince çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Zemin iyileştirme yöntemleri iyileştirme yapılacak olan sahanın durumu, zeminin mukavemet özellikleri, sıkışabilirliği, servis yüklerine karşısında gösterdikleri kayma direnci ve taşıma kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle problemlili zeminlerin uygun iyileştirme tekniğiyle güçlendirilmesi daha başarılı sonuçlar vermektedir. Buna bağlı olarak teknolojinin gelişimi Geoteknik Mühendisliği alanında da gelişmelere önemli katkılar sağlamaktadır. Teknoloji faktörüne bağlı olarak yapılaşmanın zor olduğu ve problemlili sahaların iyileştirilmesi ve yapılaşmaya elverişli hale getirilebilmesi için zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Zemin iyileştirme yöntemleri olarak sıklıkla kullanılan ve bu çalışma kapsamında incelenen jet grout, taş kolon ve geopier sistemler olarak özelleşmişlerdir. Bu sistemler kendi içinde avantaj ve sınırlamaları ile uygulandıkları sahada farklı performans göstermektedirler. Yapılan bu çalışma kapsamında bu yöntemlerin ana hatları ile ilgili literatür taraması, şartname ve yapılan araştırma sonuçları incelenerek zemin iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

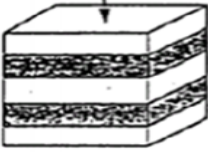
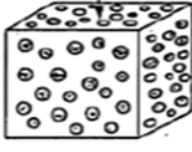
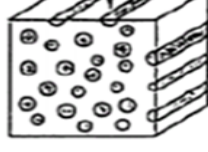

2.1.Jet Grout Yöntemi

Jet grout yöntemi bir zemin güçlendirme yöntemi olup, zayıf zemin içerisinde daha rijit kolonların yüksek basınç altında oluşturulması esasına dayanmaktadır. Su ve çimento karışımından meydana gelen karışımın zemine enjekte edilmesi ve zemin içerisindeki boşlukların grout harcı ile doldurulması ve zemin ile yoğrulması sonucunda yüksek mukavemetli yeni bir zemin profili elde edilmiş olur. Bu yöntemin uygulanmasında en önemli aşama tasarımıdır. Tasarımının yapılabilmesi için kolon çapı ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum ise uygulamanın yapıldığı zeminin mukavemet özelliklerine ve jet grout uygulama tekniğine bağlıdır. Tasarım ve imalat aşamaları belirlendikten sonra yapılan imalatın proje kriterlerine uygun olup olmadığı çeşitli test ve kontroller ile belirlenmektedir.

2.1.1 Jet Grout Yöntemi Literatür Taraması

Jet grout tekniği zayıf ve yumuşak zeminlerin güçlendirildiği, zemindeki problemlerin güçlendirildiği ve istenilen kapasiteye ulaşmak için zemin içerisinde rijit elemanlar oluşturulur. Zemin içerisinde oluşturulan bu kolonlar geliştirilen belirli yaklaşımlar ile incelenebilmektedir. Jet grout yöntemiyle güçlendirilen zeminlerde Omine vd. tarafından sayısal modeli oluşturulan ve Şekil 2.1’de önerilen homojenleştirme yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada yapı temeli altında teşkil edilecek jet grout kolonları güçlendirme yapılan bölgede kolon ile zeminin kompozit bir birleşim oluşturduğu ve meydana gelen yeni durumun ise sonlu elemanlar yöntemiyle kolay ve hızlı bir şekilde modellenip çözülebilmektedir. ”Küsin, Yıldız ve Örnek (2009)” tarafından yapılan analizler sonucunda deneysel çalışmalar sonucu elde edilen göçme yükü ile sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen göçme yüküne oldukça yakın sonuçlar çıkmıştır ancak deformasyonlar arasında farklı sonuçlar meydana gelmiştir. Bu durum ise araştırmacılar tarafından şu şekilde ifade edilmiştir: “Bunun nedeni, homojenleştirme yönteminde deformasyon davranışının lineer elastik model yerine zemin davranışını gerçeğe daha yakın bir şekilde modelleyebilen ileri zemin modellerinin kullanılması sonuçların daha güvenilir olmasını sağlayacaktır” [2]. Jet grout kolonlarının teşkili sırasında uygulanan yüksek basınçlı enjeksiyon sonucunda oluşan kolonun etrafındaki zemin malzemesinde meydana gelen durumun dikkate alınması, sonuçların doğru değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Şekil 2.1’de gerilme dağıtım parametresine ait formül ve ifadeler verilmiştir. Jet grout yöntemi ülkemizde oldukça sık kullanılan ve zayıf zeminlerin ıslahında

sıklıkla tercih edilen başlıca zemin güçlendirme tekniklerinden birisidir. Gelişmiş uygulama tekniklerinin yanı sıra her türlü zemin koşullarında uygulanabilirliği ve bunun yanında ekonomik olması gibi avantajlar sunması açısından oldukça sık kullanılır. İmalatın kolay ve planlanan projede başarılı sonuçlar vermesi açısından imalata başlamadan önce sahanın belli bir bölgesinde yapılacak olan deneme kolonlarının projede belirtilen çap, uzunluk ve taşıma gücü gibi parametrelerin istenilen kriterleri sağladıktan sonra zemin iyileştirmeye işlemine başlanır.

	Yatay Tabakalanma	Daire Elemanlardan Oluşan Karışım	Kazık Elemanlardan Oluşan Karışım	Düşey Tabakalanma
Karışım Tipleri				
Kabuller	Sabit Gerilme	Sabit Gerilme Enerjisi	Sayısal Analize Şarh Yaklaşım	Sabit Gerilme
Gerilme Dağıtım Parametresi	$\left(\frac{E_z}{E}\right)^n = \left(\frac{E_z}{E}\right)^0 = 1$ Burada, n=0	$\left(\frac{E_z}{E}\right)^{\frac{1}{2}} = 1$ Burada, n=1/2	$\left(\frac{E_z}{E}\right)^{\frac{1}{3} - \frac{1}{6}}$ Burada, n=1/3-1/6	$\left(\frac{E_z}{E}\right)^1$ Burada, n=1
Eshelby's Tensörü Sıııı	1	7/15-9/15 (için v=0~0,5)	5/8-3/4 (için v=0~0,5)	0
1-Sıııı	0	1/2	3/8-1/4	1

Şekil 2.1 Gerilme Dağıtım Parametresi- Eshelby Tensörü İlişkisi [2]

Ancak jet grout kolonlarının analiz adımları sırasında kullanılmak üzere gerekli olan sonlu elemanlar yöntemine (SEY) ihtiyaç vardır. “Akan ve Keskin (2014)” tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise bazı zemin gruplarında ve jet grout kolon teşkilinde kullanılan imalat parametreleri çoklu regresyon ve bulanık mantık analizleri kullanılarak jet grout kolonlarının serbest basınç dayanımları tahmin edilmeye çalışılmıştır. “Yapılan bulanık mantık ve çoklu regresyon analizleri sonucunda parametreler ve serbest basınç dayanımı arasında anlamlı ilişkiler olduğu görülmüştür” [3]. Teşkil edilen jet grout kolonlarının serbest basınç dayanımları; SPT sayısı, nozul çapının artırılması ile arttığı ve imalat sırasında tijin çekme hızının artması ve zemindeki ince dane oranını artması ile azaldığı sonucuna varılmıştır. Özetle bu çalışmada analizler sonucunda elde edilen tahmini sonuçlar ile saha değerlerinin uyduğu sonucuna varılmıştır. Jet grout yöntemi ile kolonların teşkili üç farklı enjeksiyon tekniği ile oluşturmak mümkündür. İmalat sırasında kullanılan teknikler, tek akışkanlı

sistem, çift akışkanlı sistem ve üç akışkanlı sistem olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu sistemler kendi içerisinde ve kullanıldıkları zemin mukavemetlerine göre farklılaşmaktadır. Tek akışkanlı sistem ile imalat yapılırken kullanılan enjeksiyonun gücü ve deformasyon özellikleri incelenmiştir. Jet grout yönteminin kullanıldığı ve sıklıkla tercih edildiği bir diğer alan ise tünellerin yapımıdır. Tünellerde stabilitenin sağlanabilmesi için yatay jet grout kolonları ile tünel için de kazı sonrası güçlendirme yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise tek akışkanlı yöntemin gücü ve deformasyon özellikleri incelenmiştir. Jet grout kolonlarının gücünü test etmek amacıyla 41 adet örnek numune incelenmiştir. Kullanılan enjeksiyon malzemesinin su/çimento oranı 1'dir. Çimento ise Kanada Standartlarına uygun özellikler gösteren Portland çimentosu kullanılmıştır ve ortam sıcaklığı 8 C° olarak ayarlanmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında rijit kolonların teşkili sırasında kullanılan ekipmanların özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Jet Grout kolon teşkili sırasında kullanılan ekipmanların özellikleri[4]

Parametre	Mesafe	Tip
Kuyu Çapı (mm)	76~115	
Jet Sayısı	2~4	
Nozel Çapı(mm)	1,5~3	2
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	30~60	40
Su/çimento oranı	0,8~2,0	1
Delme Hızı (RPM)	10~20	15
Çekme Hızı (m/dak)	0,25~0,5	0,4

Yapılan bu çalışmada 6, 12 ve 24 saatlik gibi periyotlarda grout harcında meydana gelen mukavemet artışı incelenmiştir. Grout harcındaki artış doğrusal olarak devam etmiştir. Sıcaklık ve zaman faktörünün enjeksiyon harcı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Jet grout yöntemi kullanıldıkları sahanın mukavemet özelliklerini değiştirmeyi amaçlanmaktadır. Zeminde rijit kolonlar teşkil edildikten sonra mevcut sahada ise meydana gelen deplasman miktarının sıralanması beklenmektedir. Sakarya'da yapılması planlanan bir endüstri projesinin vaka analizi incelenmiştir. Yapılan bu çalışma kapsamında vaka analizi ile ilgili sonuçlar sunulmuştur. Sakarya'da yapılması düşünülen bir endüstri yapısının inşaatı sırasında zeminde karşılaşılan sorunların giderilmesi için jet grout ve kazık gibi zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak zemin güçlendirilmiştir. Yapı tek katlı bir fabrika binası olarak teşkil edilecektir ve yapı yaklaşık olarak 8200 m²'lik bir arsa üzerine inşaatı yapılacaktır. İyileştirme yapılacak sahada toplamda 11 adet sondaj yapılmış ve toplam 220

m uzunluğunda sondaj yapılmıştır. Sahada 5 adet CPT yapılmıştır. Deneylemler sonucunda zemin profilinin genel değeriendirilmesi şu şekildedir, zemin yüzeyinde yumuşak ve yüksek plastisiteki killerden meydana gelmektedir. 8 m ile 10 m arasında sıvılaşılabılır kumlu ve siltli zemin tabakası bulunmaktadır. 7,50 m de orta sıkı kumların başladığı ve 12 m derinliğine kadar devam etmektedir. Yer altı suyu seviyesinin 1,70 m ile 2,00 m kotlarında olduğu ve sıvılaşma riskinin yüksek olması nedeniyle zeminde 11 m derinliği boyunca iyileştirme yapılmasını sonucuna varılmıştır. “İyileştirme yöntemi olarak jet-grout ile oluşturulacak yüksek modüllü kolonlar düşünölebileceği gibi temel yüklerinin sağlam zemine aktarılabileceği kazıklı temel sistemleri de düşünölebilir. Makine ve yapı temelleri için; üst metrelerde bulunan sıkılaşabılır kil tabakaları nedeni ile hem oturma limitlerinin sağlanması hem de taşıma gücünün istenen düzeye yükselmesi amacı ile şerit temel altında kazıkların kullanılması önerilmektedir”[5].



Şekil 2.2 Çalışma alanında çöküntü sınırını belirlemek için açılmış hendek[5]

Jet grout yöntemi tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı olarak farklı uygulama teknikleri vasıtasıyla hemen her türlü zemin gruplarında zemin mukavemetlerine bağlı olarak seçilecek olan jet tekniği yardımıyla zemin ıslahı sağlanacaktır. Söz konusu yöntemin ekonomik olması, inşa pratiğinin yüksek olması sayesinde oldukça sık uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Ülkemizde son dönemde uygulanan “Ordu İli Altınordu İlçesinde yapılan kamu binalarında, zemin emniyet gerilmesinin (emniyetli taşıma gücünün) düşük olduğu kum ve alüvyon türü zeminlerde gerçekleştirildiği bilinmektedir”[6]. Ve yapılan zemin iyileştirme sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

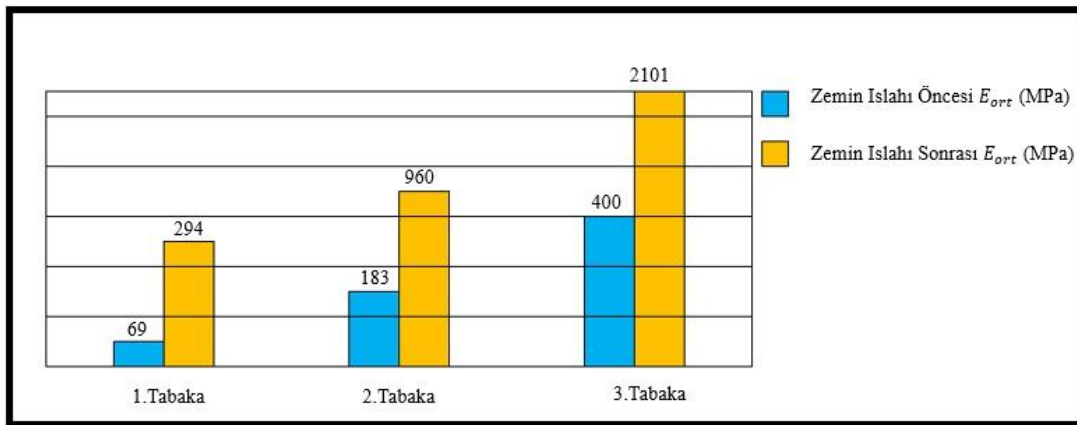
- Üst yapının zeminden bağımsız olarak projelendirilmesi mümkün olmamaktadır.
- Jet grout kolonlarının teşkili sırasında, enjeksiyon hızı, tijn dönme ve çekme hızı, enjeksiyon harcı su/çimento gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.
- Projenin yapılacağı sahanın kıyı ilçesini oluşturan zeminin taşıma gücü zayıftır.
- Zeminin mukavemet değerlerinin düşük olmasından dolayı bina temellerinde oturmalardan dolayı kısmen de olsa düşey eksen kaymaları meydana gelmektedir.
- Jet grout uygulama tekniği yeterli bilgi ve teknik altyapı yeni yeni oluşmaktadır.



Şekil 2.3 Ordu Üniversitesi Tıp Fakültesi zemininde teşkil edilen jet kolonların yükleme deneyleri[6]

Zeminlerin ıslahı öncesinde ve sonrasında meydana gelen durum sismik dalga ve hız ölçümleri yapılarak zeminin elastisite modülü hakkında fikir yürütülebilir. Bu bağlamda yapılan bir çalışma kapsamında Samsun İli Canik İlçesinde yapımı düşünülen 1344 Konut İnşaatı İşi kapsamında jet grout zemin iyileştirme tekniği kullanılarak problemlili zeminin güçlendirilmesi sağlanmıştır. Zemin güçlendirme yapılacak olan sahada 80 cm çapında ve 2,20 m aralıklarla ve 15 m uzunluğunda jet grout kolonlar teşkil edilmiştir. “Zemin ıslahı öncesi ve sonrasında sismik dalga (kayma dalgası ve basınç dalgası) hız ölçümleri yapılarak meydana gelen değişimler karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur”[7]. Zeminde jet grout kolonlarının teşkili sonrasında zemin tabakalarının elastisite modülü değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Zeminin ıslahı sonrasında yapılacak olan daha büyük yükleme durumlarında zeminin elastik davranış gösterme özelliğinde artış meydana gelmektedir ve bu artışın şematik gösterimi Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Yapı yükleri ve zemin mukavemet

değerleri zayıf olan zeminlerde yapılan servis yükleri sonucunda meydana gelen yüksek oturma değerleri ve sıvılaşma problemi olan sahaların iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında “Özel olarak taşıma gücü ve oturmalar açısından problemlili olan turbalık ve bataklık zeminler üzerinde inşa edilmiş olan Kayseri ili, Anbar bölgesindeki Alibeyoğlu Hırdavat A.Ş. Binası zeminini iyileştirme yöntemi olarak Jet Grout seçilmiştir”[4]. Yapılan bu çalışmada jet grout kolonları ile güçlendirme yapılan zeminde kolon merkezinden itibaren etkili olduğu alanın belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.4 Zemin Islahı Öncesi ve Sonrası Ortalama Elastisite Modülü Değerleri[7]

“Çalışmada kolon merkezinden “D ve 1,5D” mesafede SPT deneyleri içeren sondaj çalışmaları ile jeofizik çalışmalar yapılarak etki bölgesi belirlenmeye çalışılmıştır. Jet uygulanmayan bölgedeki çalışmalar ile uygulanan bölgedeki deneysel çalışmalar karşılaştırılmış. Çalışmalardaki sonuca göre çalışma yapılan zemin koşulları için iyileştirilmiş alan olarak yaklaşık 2D’lik bir etki alanı olduğu belirlenmiştir”[7]. Jet grout yöntemi zemin iyileştirme yöntemleri arasında en çok tercih edilen ve kullanılan tekniktir. Bu yöntemin modellenmesinde ise çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. PLAXIS yazılımı jet grout tekniğinin analiz edilmesine olanak sağlayan yazılımlardan biridir. Bu paket program sonlu elemanları kullanarak çözümlere ulaşabilmektedir. Yapılan önceki çalışmalarda ise sayısal analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçların yanı sıra deneysel çalışmalar karşılaştırılmış bir çalışma olan ve İlky Tonyalı ile A. H. Volkan Özdemir (2017) tarafından yapılan çalışmada, jet grout yöntemi kullanılarak konut yapısı temeli altındaki zayıf zemin tabakaları güçlendirme sonucunda meydana gelen taşıma gücü artışlarındaki değişimler deneysel yöntemler ve PLAXIS 2D yazılımı ile incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda jet grout tekniği ile iyileştirilen zeminlerde mukavemet artışının meydana geldiği saptanmıştır.

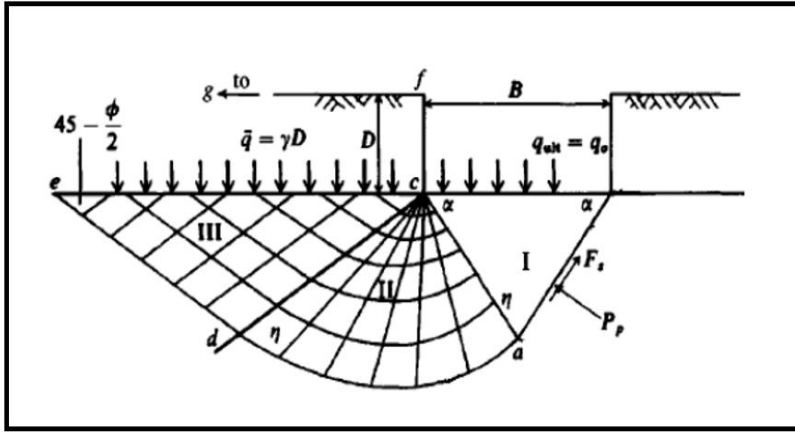
Çalışma kapsamında oturma problemi beklenen yapı temeli altında 80 cm çapında 15 m uzunluğunda ve 2,20 m aralıklarla jet grout kolonları teşkil edilmiştir. Zemin güçlendirmesi öncesinde ve sonrasında taşıma gücü değerlerinin elde edilebilmesi için çeşitli arazi, laboratuvar ve jeofizik deneyler yapılmıştır. “İslah öncesi emniyetli zemin taşıma kapasitesi değerleri, laboratuvar deney sonuçlarına göre "Terzaghi (1943) Yöntemi" ve jeofizik deney sonuçlarına göre "Türker (2004) Yöntemi" baz alınarak gerçekleştirilmiştir”[65]. Yapılan deneysel çalışma ve sayısal analiz çözümleri sonucunda yapılan yükleme altında meydana gelen toplam oturma miktarları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 İslah öncesi ve sonrası durum için analiz sonuçları[65]

İnceleme No	Yükleme(kPa)	Oturma (mm)
İslah Öncesi-01	100	53,45
İslah Öncesi-02	110	68,16
İslah Öncesi-03	122,5	107,5
İslah Öncesi-04	195	*
İslah Sonrası-01	110	17,24
İslah Sonrası-02	122,5	24,3
İslah Sonrası-03	195	40,53
İslah Sonrası-04	300	87,3

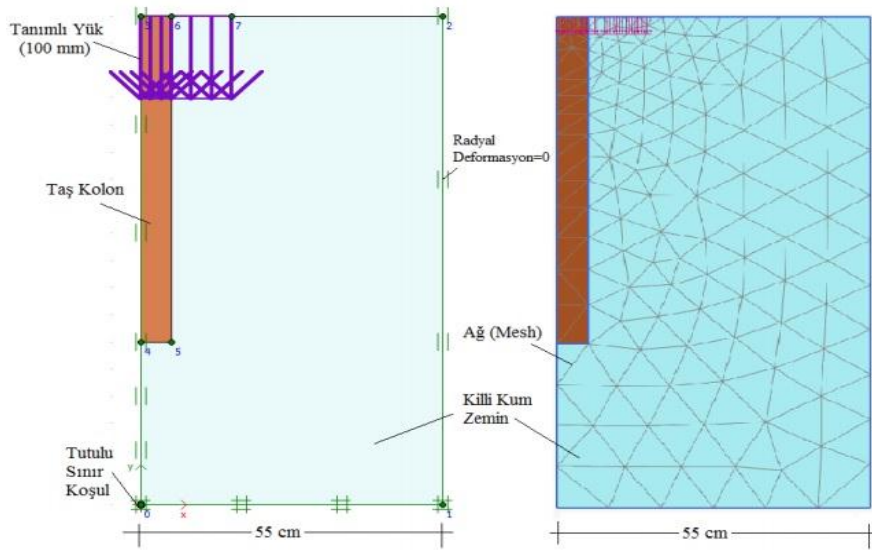
*Göçme durumu meydana gelmiştir

Sahada yapılan arazi yükleme deneyi sonuçları referans alınarak, “Arazi yükleme deneyi sonuçları temel alındığında, laboratuvar test sonuçları, Terzaghi (1943) ve Kumar (2010) Yöntemleri ile hesaplanan ıslah sonrası zemin emniyet gerilmesi değerinin, %4,19 oranında yakınlık gösterdiği görülmektedir”[65]. Temellerin taşıma gücü hesaplarının yapılabilmesi için temel denklemler Terzaghi tarafından geliştirilmiştir. Terzaghi tarafından yapılan çalışmalar neticesinde zeminin taşıma gücü limit değerine ulaştığı andaki davranışı Şekil 2.5’de verilmiştir. Bunun yanında, “Jeofizik deney sonuçları ile Türker (2004) Yaklaşımı kullanıldığında, bu oranın %1,72 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.5 Terzaghi taşıma kapasitesi sınır durum gösterimi[67]

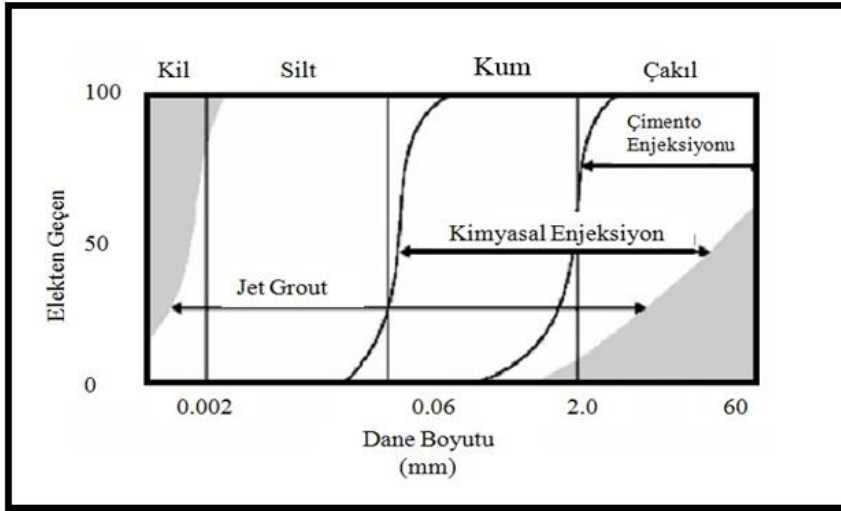
Sayısal modellemeler neticesinde, benzer yükleme koşulları altında, zemin ıslahı öncesi ve sonrası elde olunan oturma değeri oranlarının, %25,29-%22,60 mertebelerinde olduğu görülmektedir”[65]. Yapılan diğer bir çalışma da ise, taş kolonların PLAXIS 2D yazılımı ile analizi jet grout yöntemi analiz adımlarına benzer işlemler ile tekrar edilmektedir. PLAXIS yazılımı ile oluşturulan taş kolon ve zemin modeli Şekil 2.6’da verilmiştir. Taş kolonlar için yapılan “S. DEMİR, M.R. KURTOĞLU, C. AKGÜNER, ve M. BERİLGİN” tarafından deneysel ve sayısal analizi gerçekleştirilen çalışma kapsamında “taş kolonların farklı drenajsız kayma mukavemetine sahip zeminlerdeki davranışı incelenmiş ve sayısal olarak modelleme yapılarak laboratuvar model deneyleriyle karşılaştırılmıştır”[66]. Yapılan deneysel çalışmalar ve sayısal analiz sonucunda elde edilen sonuçları şöyledir; Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda taş kolonların imal edildiği alanda taş kolonların dibinde ve içerisinde boşluk suyunun biriktiği gözlenmiştir. Bu durum ise taş kolonlar ile güçlendirilen zeminlerde mukavemet artışının meydana geldiği ve bunun yanında taş kolonlar zemin içerisinde düşey dren görevi yaptığı anlaşılmaktadır. “Zemin numunesi üzerinde yapılan drenajsız kayma mukavemeti ölçümleri ile taş kolon imalatı sonrasında yapılmış ölçümler arasında bir artışın meydana gelmediği görülmüştür”[66]. Bunun yanında problemlili zeminde taş kolon imalatının grup olarak teşkil edilmesi durumunda ise yanal çeperlere yapılacak olan itki sayesinde zeminin drenajsız kayma mukavemetini arttırıcı yönde katkı sağlayacağı şeklinde yorumlanmıştır. “Sayısal analizler sonucunda elde edilen verilerin model deneyler sonucunda elde edilen verilerle örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sayısal modelin arazide tasarımı yapılacak uygulamalar için yol gösterici olduğu düşünülmektedir”[66].



Şekil 2.6 Zemin Profili ve Sonlu Elemanlar Ağı[66]

2.1.2 Jet Grout Yöntemine Genel Özellikleri

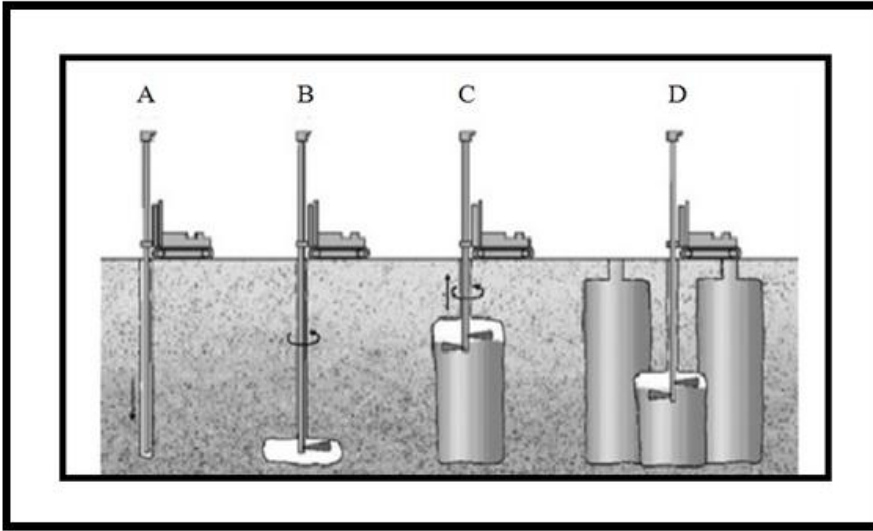
Bu bölüm kapsamında jet grout kolonları tarihçesi, kullanım alanları, avantaj ve sınırlamaları hakkında bilgiler verilecektir. Jet grout yöntemi yüksek basınç ile zeminin parçalanarak uzaklaştırılması ve oluşan boşluğu grout harcı ile doldurulması prensibine dayanmaktadır. Ülkemizde son dönemlerde yapılaşma hızının artması ile birlikte jet grouting yöntemi de zemin güçlendirme projelerinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Hızlı uygulanabilmesi ve zemin her türlü zemin koşullarında uygulanabilmesi nedeniyle sıklıkla tercih edilirler. Jet grout yönteminin uygulama aralığı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Çimento sarfiyatının fazla olması jet grout yönteminin kullanımı için başlıca sınırlayıcı etken olmasında etkilidir.



Şekil 2.7 Zemin özelliklerine göre enjeksiyon uygulaması[8]

2.1.2. Jet Grout Yönteminin Tarihçesi

Jet grout yöntemi yüksek basınçlı su jeti yardımıyla zayıf zeminlerin parçalanarak, zeminde bir boşluğun açılması ve bu boşluğun çimento esaslı grout malzemesi ile doldurulması esasına dayanmaktadır. Yöntemin ilk uygulamalarının 1950'li yıllarda İngiltere'de karşımıza çıkmaktadır. 1970 ve sonrasında ise Avrupa'da uygulanmaya başlanmıştır ve kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir. "1990'lı yılların başından bu yana, maliyet ve program gerekçesiyle önemli ölçüde daha büyük bir kolon geliştirmeye olanak tanıyan yeni Jet Grouting yöntemleri geliştirilmiştir"[11]. Jet grout yöntemi imalat sırasında kullanılan parametre ve ekipmanlara bağlı olarak üç uygulama tekniği geliştirilmiştir. Yöntemin çeşitleri Şekil 2.8'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin teşkili sırasında kimyasal enjeksiyon kullanılmaktadır. "Enjeksiyon harcı 1,2 ile 2,0 mm çapında ve delme borusunun alt ucunda bulunan püskürtme uçlarında yatay olarak püskürtülüyordu. Enjeksiyon esnasında delme borusu eksenini etrafında döndürülerek yukarı çekiliyordu. Fakat kısa zaman sonra çevreye zarar verilmesini önlemek için çimento bazlı enjeksiyon malzemesi kullanımına geçildi. 1973 yılında CCP yöntemi ilk defa ticari olarak uygulandı. Ayrıca 1970'lerin başlarında jet grout tekniği Avrupa'da da kullanılmaya başlanmıştır"[19].

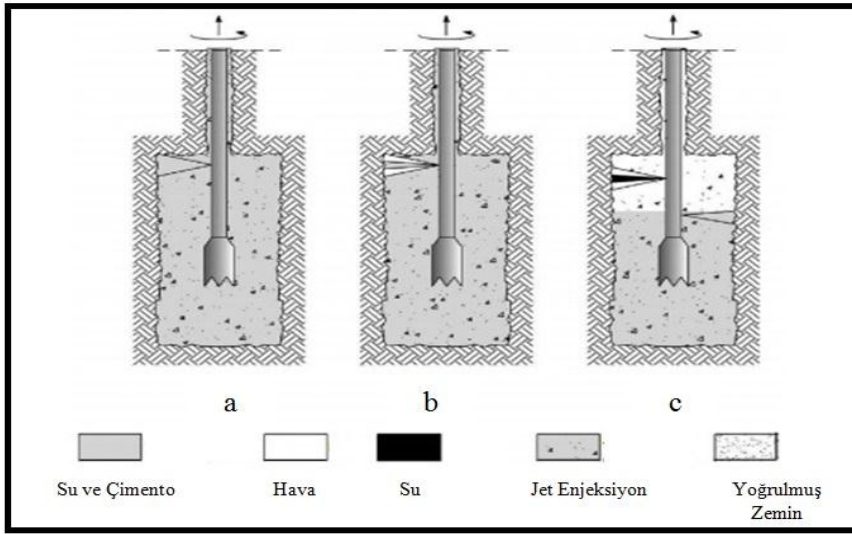


Şekil 2.8 Jet Grout yönteminin imalat aşamaları[8]

- A istenilen derinlik boyunca zemin delinir,
- B tijin ucundaki nozzle yardımıyla enjeksiyon kuyu dibinden yüzeye kadar püskürtülür,
- C zemin içerisinde rijit kolonlar oluşturur,
- D işlemler tamamlanarak jet grout yöntemiyle zayıf zemin içerisinde kolonlar oluşturularak zemin güçlendirilmiş olur.

2.1.3. Jet Grout Yöntemi Uygulama Sistemleri

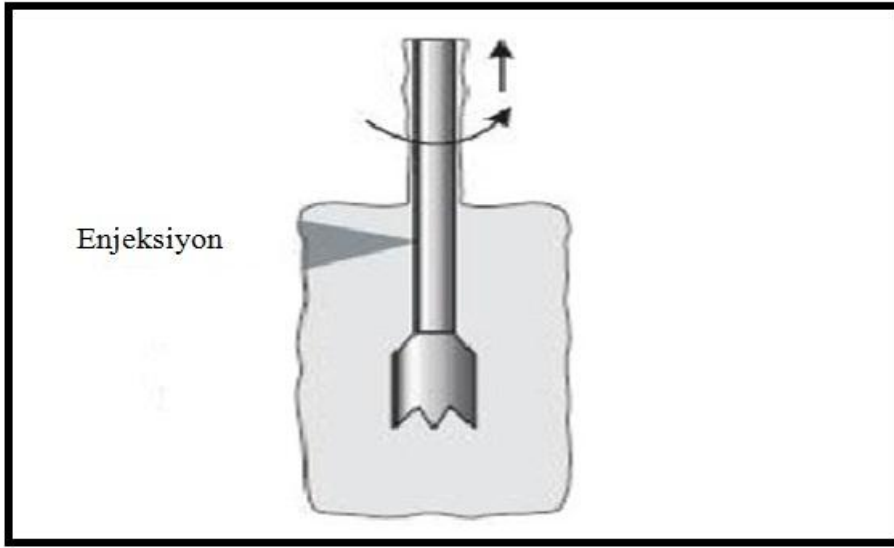
Jet grout tekniği zemin iyileştirme sırasında kullanılan ekipman özellikleri ve akışkan sayısına göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar zeminin sadece enjeksiyon ile parçalandığı sistem olan jet 1, enjeksiyonun yanında basıncın kullanıldığı sistem jet 2 ve son olarak enjeksiyon ve basıncın yanında daha mukavemetli sayılabilecek olan zeminlerde su jetinin de kullanıldığı sistem jet 3 olarak adlandırılmaktadır. Jet grout sistemleri Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmiştir. Zemin iyileştirme yapılırken kullanılacak sistemin seçimi sırasında; zemin özellikleri, oluşturulmak istenen kolon çapı ve geçirgenlik gibi faktörler göz önüne alınarak seçim yapılacaktır.



Şekil 2.9 Jet Grout Sistemleri: (a) tek akışkanlı sistem, (b) iki akışkanlı sistem, (c) üç akışkanlı sistem[12]

2.1.3.1. Tek Akışkanlı Sistem (Jet 1)

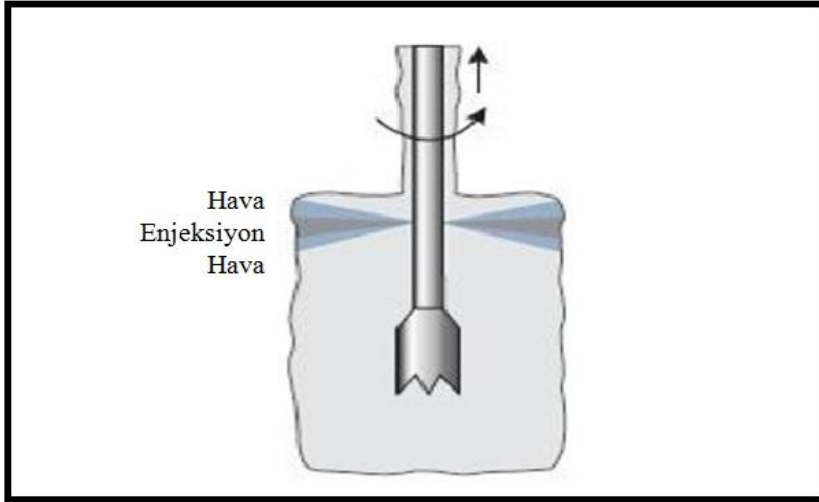
Tek akışkanlı sistemde zemine yüksek basınç ile çimento şerbetinin enjekte edilmesidir. En basit enjeksiyon sistemidir ve şematik gösterimi Şekil 2.10'da verilmiştir. Yumuşak ve kohezyonsuz zeminlerde kolaylıkla uygulanabilir elde edilen jet kolonlarının mukavemet değerleri oldukça düşüktür. Zemin mukavemet özellikleri ve seçilen parametrelere göre değişmekle birlikte küçük çaplı kolonlar elde edilmektedir. Kumlu ve çakıllı zeminlerde 1000 mm ve killi zeminlerde ise 600-800 mm arasında jet grout kolonları oluşmaktadır. “Granüler zeminlerde mukavemeti en yüksek elemanlar, tek akışkanlı sistem ile oluşturmaktadır. Zemindeki boşluk oranları ise diğer iki sistem ile yapılanlara göre daha az olmaktadır”[13].



Şekil 2.10 Jet 1 tek akışkanlı sistemin şematik gösterimi[8]

2.1.3.2.Çift Akışkanlı Sistem(Jet 2)

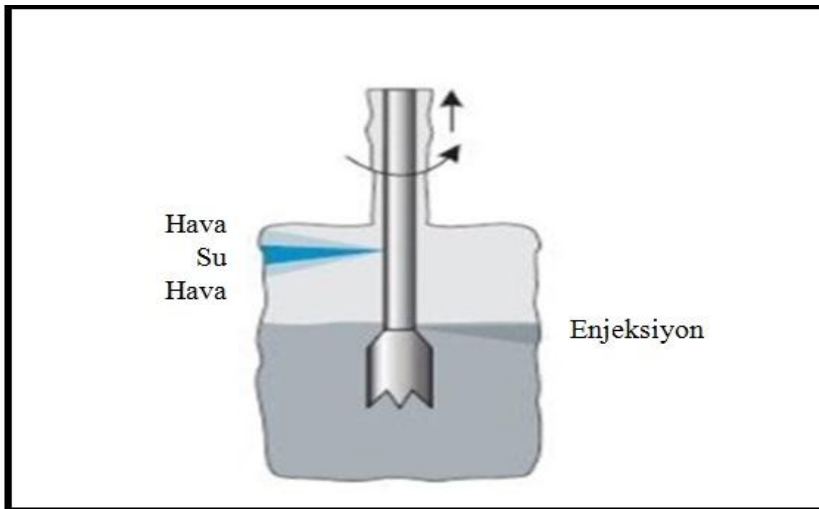
Jet 1 sistemine göre mukavemet özellikleri daha yüksek olan rijit zeminlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.11’de görüleceği gibi jet 1 sistemine ilave olarak imalat sırasında basınç kullanılmasıyla tek akışkanlı sistemden ayrılmaktadır. Bu yöntemde delgi, yüksek basınçlı enjeksiyon ekipmanı aynı eksenli iç içe iki ayrı borudan oluşmaktadır. Enjeksiyon orta borudan basınçlı hava (8-12 bar) dış borudan zemine verilmektedir. Bu yöntemde kolonlar oluşturulurken zemin basınçlı harç ve basınçlı hava ile aşındırılır. “Jet 2 yöntemi ile yapılan kolonlar jet 1 yöntemine oranla %60-%80 daha küçük çaplı jet grout kolonu oluşmaktadır. Bu yöntemle oluşan jet grout kolon çapları orta sıkı zeminlerde 1000 mm’den, gevşek zeminlerde ise 1800 mm’den daha büyük olmaktadır. Bu yöntemin hava içeriği artar ve zemin/çimento karışımının mukavemeti düşer”[11]. Bu jet tekniğinin diğer tekniklere göre zemin ve çimento karışımının mukavemet değeri daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni ise enjeksiyon sırasında uygulanan hava basıncının zemin daneleri içerisinde boşluk oluşturmasıdır.



Şekil 2.11 Jet 2 çift akışkanlı sistemin şematik gösterimi[8]

2.1.3.3. Üç Akışkanlı Sistem (Jet 3)

Jet 3 veya üç akışkanlı sistem ile zeminlerin güçlendirilmesi zeminin parçalanması hızlı bir su jeti ve basınç yardımı ile yapılmaktadır. Bu sistem parçalanması daha zor olan ve yüksek mukavemetli zemin tabakalarında uygulanmaktadır. Su jeti ile parçalanan zemin basınçlı hava ile oradan uzaklaştırılmakta ve düşük bir hızla çimento şerbeti zemine akıtılmakta ve zemin ile karışım sağlanmaktadır. Bu sayede daha büyük çap da jet grout kolonları elde etmek mümkün hale gelmektedir. Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 2.12’de mevcuttur.



Şekil 2.12 Üç Akışkanlı Sistemin şematik gösterimi[8]

Üç akışkanlı sistem uygulama sırasında diğer jet grout sistemlerine göre daha karmaşık ve kompleks sistemdir. Genellikle parçalanması zor olan kohezyonlu zeminlerde uygulanır ve

elde edilen kolon çapı 150 cm ve kohezyonsuz zeminlerde ise iki katı büyüklükte çapa erişmek mümkün olmaktadır. Tablo 2.3’de jet grout sistemlerinin uygulanabildikleri zemin tipi ve uygulanan jet tipine bağlı olarak elde edilen kolon çapı ve mukavemet özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.3 Jet grout sistemleri karşılaştırılması[14]

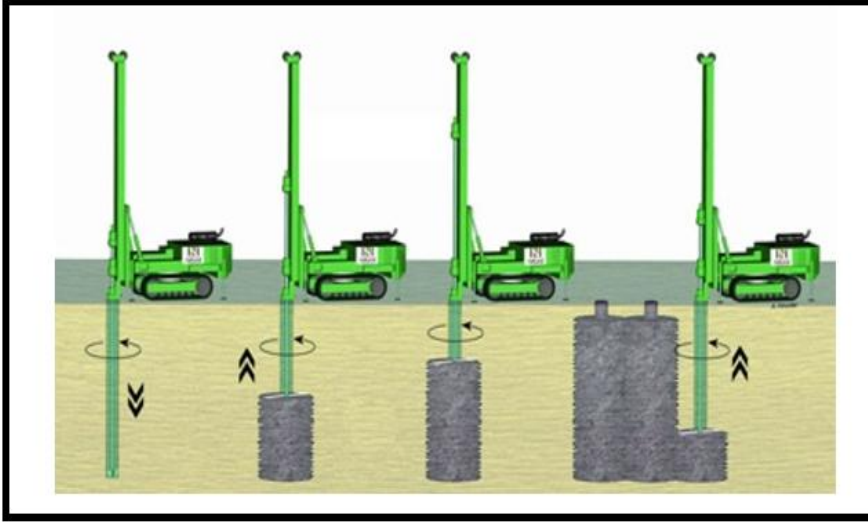
Zemin Cinsi	Kolon Çapı	JG Kolon Dayanımı
Jet 1 Sistemi	60 cm~90 cm	70~250 kg/cm ² 20~100 kg/cm ²
Kum ve Çakıl	110 cm	
Kil	60 cm~90 cm	
Jet 2 Sistemi	90 cm~180 cm	35~140 kg/cm ² 10~70 kg/cm ²
Kum ve Çakıl	300 cm	
Kil	90 cm~150 cm	
Jet 3 Sistemi	150 cm~240 cm	35~105 kg/cm ² 10~50 kg/cm ²
Kum ve Çakıl	90 cm~180 cm	
Kil		

Jet grout kolonlarının oluşturulması için seçilen jet sistemi iyileştirme yapılan zeminin mukavemet özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Jet grout uygulama sistemi tercih edilirken yumuşak ve mukavemet özellikleri düşük, parçalanabilme özelliği yüksek zeminlerde, sıkışabilirliği ve geçirimsizlik özelliği yüksek olan zeminler için jet 1 veya jet 2 tercih edilebilir. Daha mukavemetli kohezyonlu zeminlerde ise jet 3 yöntemi tercih edilmesi gerekir.

2.1.3 Jet Grout İmalat Aşamaları

Jet grout yöntemiyle zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde delme ve enjeksiyon aşamalarından meydana gelmektedir. Jet grout ile kolon imalatı yapılan sahanın temiz olması ve enjeksiyon sırasında çıkan malzemenin sahadan uzaklaştırılması gerekmektedir. Zayıf zemin tabakalarına yüksek basınç ile çimentonun enjekte edilmesiyle jet grout kolonları oluşturulmuş olur. İmalat aşamasına geçildiğinde ise çok küçük bir delikten 1000 mm varan çapta bir kolon oluşturmak mümkündür. Zayıf zemin küçük çaplı sondaj tiji ile delinir ve nozullar projede öngörülen derinliğe ulaştığı an delme işlemi tamamlanmış olur. İkinci aşama enjeksiyon işlemine başlanır ve tiji kendi ekseninde döndürülerek yukarı

doğru çekilir ve saha yüzeyine ulaşıldığında enjeksiyon işlemi tamamlanmış olur. Jet grout kolon teşkili için imalat adımları Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Jet grout yöntemi uygulama aşamaları [15]

2.1.3.4.Delme Aşaması

Projenin gerektirdiği jet grout kolonun imal edileceği derinliğe kadar Ø10 cm kalınlığındaki ekipmanın delici ucu basınçlı su yardımı ile delme borusu zemin içerisinde istenilen derinlik boyunca indirilir. “Bunun için döner delgi sistemi ile kil matkabı, üç konili matkaplar ve dayanıklı tijler kullanılmaktadır”[11]. Delme işlemi sırasında çok çeşitli delici ekipmanlar kullanılmaktadır ve delme işlemini kolaylaştırmak ve sistemin enerjisini düşürmek için delme işlemi çeşitli kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Kullanılan bu katkı malzemeleri olarak su, bentonit ve çimento şerbeti olmaktadır. Zeminlerin mukavemet değerlerine göre, jet grout tekniği seçilmesi zeminin delinme işlemi daha kolay olacaktır.

2.1.3.5.Enjeksiyon Aşaması

Enjeksiyon karışımı suyun ve çimentonun belirli oranlarda karıştırıcıda birleştirilmesi sonucunda oluşur. Zemin güçlendirmesi yapılacak olan sahanın mukavemet özelliklerine bağlı olarak su/çimento oranı ayarlanır. Karıştırıcıda oluşturulan karışım dinlendirilir ve pompalar yardımıyla iyileştirme yapılacak kuyuya enjeksiyon malzemesi kuyu dibine iletilir. Zeminde delme işlemi tamamlandığında hazırlanan enjeksiyon malzemesi zemin tabakalarına pompalanırken delgi borusu belirlenen hızda ve adımlarla yukarı doğru çekilecektir. Yapılan bu enjeksiyon işleminde su/çimento karışımından meydana gelen grout

malzemesi zayıf zemin malzemesini aşındırarak karışmasını sağlar ve istenilen çapta dairesel kolonların teşkili sağlanmış olur. “Basınçlı enjeksiyon esnasında, delici takımın etrafından dışarıya belirli bir miktar zemin materyali taşması uygun görülür. Bu durum groutla karıştırılan zemin içinde aşırı basınç oluşmadığına işaret eder. Çünkü aşırı basınç oluşması halinde, basıncın fazlası delme borusu çapı ile delinen delik çapı farkından oluşan boşluktan dışarı kaçır. Basınçlı enjeksiyon esnasında taşan materyal miktarı zeminin geçirgenliğine ve türüne bağlıdır. Bu miktar, killi zeminlerde daha fazla, kumlu-çakıllı zeminlerde daha az olacaktır, ortalama olarak enjekte edilen miktarın %10’u alınabilir”[11].

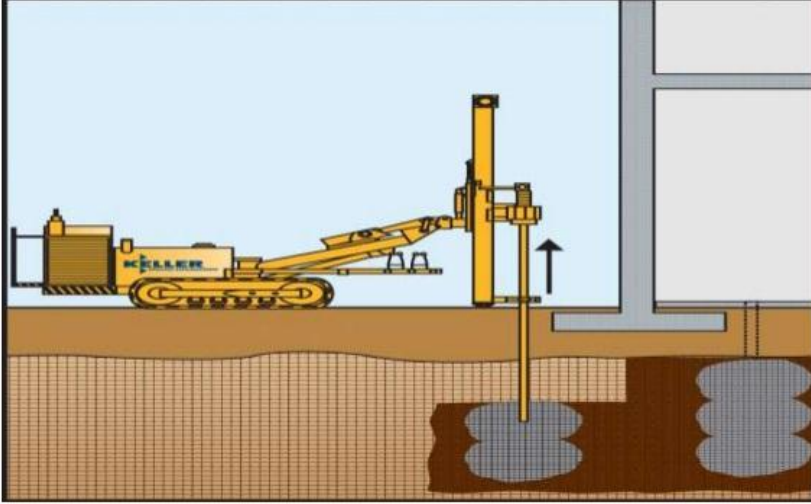
2.1.4. Jet Yönteminin Uygulama Alanları

Geoteknik Mühendisliğinde zayıf ve yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi ve istenilen servis yüklerini taşıyacak kapasiteye getirilmesinde kullanılan jet grout tekniği önemli bir iyileştirme yöntemidir. Jet grout yöntemi zeminlerde değişik derinlikler boyunca ve istenilen çaplarda uygulanabilmektedir. Bu yöntem ile geliştirilen zeminlerin geçirimsizlik sağlanması, mukavemet artışı, taşıma gücü artışı, elastisite modülü artışı ve oturmaların azalması gibi iyileştirmeler yapılabilmektedir. Çok geniş bir uygulama alanı vardır ve hemen her türlü zemin şartlarında kolaylıkla uygulanabilmektedir. Jet grout yöntemi uygulama alanları olarak şu şekilde ayrılmıştır;

- Temel sistemlerinin iyileştirilmesinde,
- İstinat yapılarının desteklenmesinde,
- Geçirimsizlik yapılarının teşkilinde,
- Tüneller,
- Diğer uygulama alanları

Temel Takviyesi

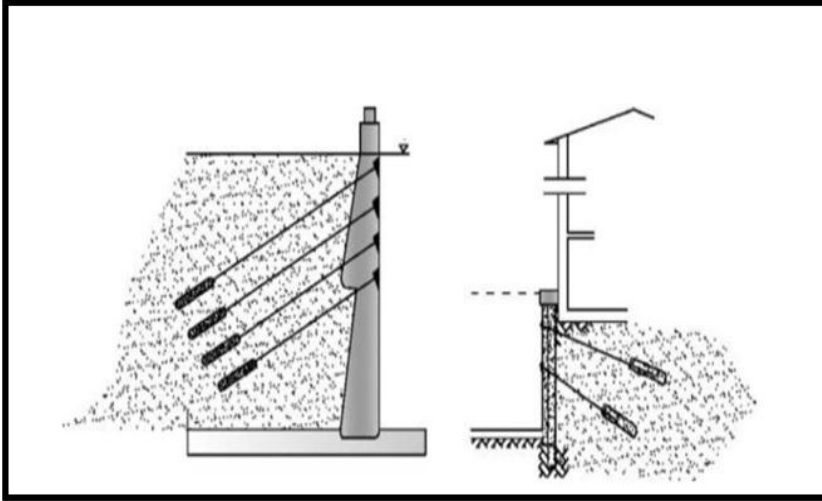
Jet grout yöntemi bina temellerinde, istinat yapı temellerinde ve tarihi yapıların temellerinin desteklenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tarihi yapıları temellerinin güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Uygulama tekniği oldukça önemlidir, yanlış uygulanması durumunda zayıf zemin içerisinde oluşturulan jet kolonu yanal çeperlere baskı yaparak zemin kabarmalarına neden olur ve bunun sonucu olarak üst yapıda yapısal hasarlar oluşabilir. Şekil 2.14’de bir istinat yapısının temelinde jet grout uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Jet grout yöntemi ile yapı ve istinat yapı temelleri güçlendirilmesi[5]

İstinat Yapılarında

İstinat yapılarının desteklenmesi, kalıcı veya geçici istinat yapıları oluşturmak için uygulanabilmektedir(Şekil 2.15’de). “Garassino(1983) tarafından rapor edilen bir vakada ise mevcut bir binanın sınırında yapılan 8,5 m’lik bir kazı, 0,7 m çaplı kesişen paralel iki sıra jet kolonları ile oluşturulan bir dayanma yapısı ile desteklenmiştir”[17].

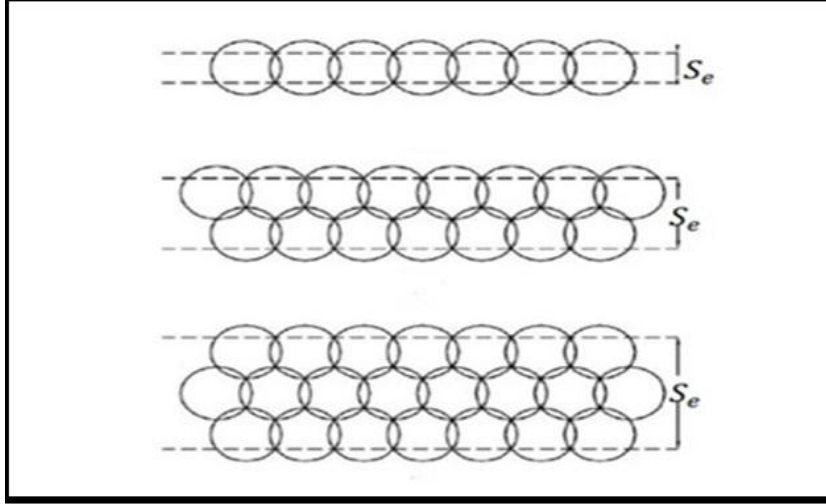


Şekil 2.15 Jet grout istinat yapısı uygulamaları[12]

Geçirimsizlik Yapıları

Jet grout yöntemiyle kazı yapılan sahalarda yeraltı suyu ve sızmaların olması durumunda teşkil edilecek, kesişen kolonlarla bu sızma önlenir. Baraj yapıları, köprü ayakları ve su

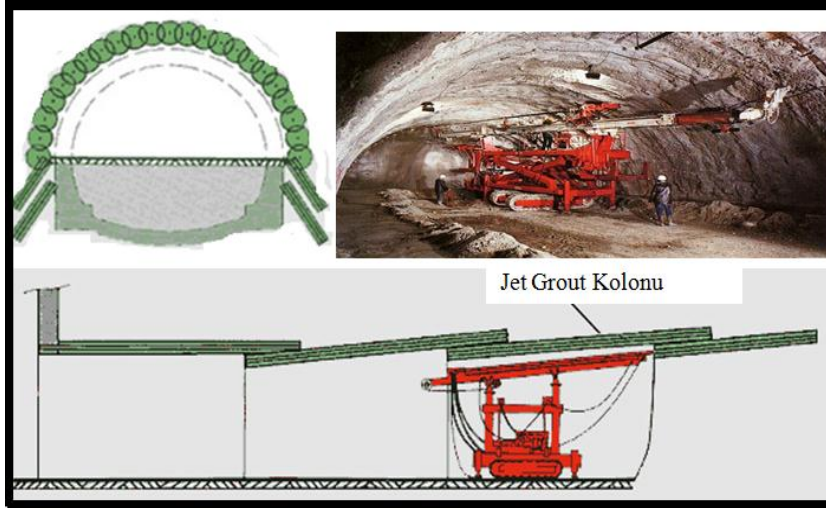
içi yapıların inşasında veya yeraltı suyunun yüksek olduğu ve kazı derinliğinin fazla olduğu zeminlerde uygulanması durumunda oldukça başarılı sonuçlar vermektedir(Şekil 2.16'de).



Şekil 2.16 Jet grout geçirimsizlik teşkili için imal edilen kesişen kolonlar[12]

Tüneller

Jet grout yönteminin uygulandığı diğer bir alan ise tünel yapılarıdır. Yatay olarak yapılan jet grout imalatı ile kohezyonsuz zeminlerde yaşanan zorlukların giderilmesinde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Tünel inşaatları sırasında, kazı işleri yapılırken arazi yüzeyinden veya kazı sonrası tünel içerisinde destek yapısı ve geçirimsizlik bariyerleri oluşturmak için uygulanabilmektedir. Jet grout kolonlarının inşası tünel inşaatı foraj derinliğinde ise yüzeyden gerçekleştirilebilir ve bu durum tünel inşaatının süresinin kısıltacaktır. Ancak bazı durumlarda, tünel derinliği foraj miktarından çok daha derin bir noktada ise tek akışkanlı uygulama tekniği ile tünel içerisinde imalat gerçekleştirilir(Şekil 2.17'da)



Şekil 2.17 Jet grout yönteminin tünellerde kullanıldığını gösteren teknik çizimler ve fotoğraf.

Kazı Çukurlarının Desteklenmesi

Açık ve derin kazıların yapılması durumunda kazı güvenliğini sağlamak amacıyla kazı sınırının etrafına kolonlar ile destek teşkil edilebilir. Buna benzer uygulamalar ülkemizde de sıklıkla yapılmaktadır. Milan metrosunun uygulaması sırasında Sesto Giovanni çukurunda 1980 yılında İtalya'da uygulamalarına rastlanmıştır. Kolonların inşası sırasında zeminin mukavemet ve kohezyon değerine göre kolonların aralıkları değişiklik göstermektedir.

Şev Stabilitesinde

Şev yüzeylerinde ise kayma düzleminin engellemek için kullanılmaktadır. Kolon imalatının bir kısmı kayma yüzeyinde diğer kısmı ise kayma yüzeyinin gerisinde teşkil edilmelidir ve bu sayede kayma yüzeyinin kesme güvenliği artırılmış olur.

Sıvılaşma

Kohezyonsuz ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli oldukça yüksektir. Jet grout kolonlarının imalatı aşırı boşluk suyu basıncını önlemede ve sıvılaşmanın yaşanması durumunda meydana gelen deformasyonların engellenmesi veya minimize edilmesini sağlamaktadır.

Kıyı ve Liman Uygulamaları

Deniz tabanında kazı yapılmasını sağlayabilmek, rıhtım yapılarının temel güçlendirilmesinde ve güvenliğinin sağlanması için jet grout kolonları ile rijit elemanları teşkili sayesinde güçlendirme gerçekleştirilebilir.

2.1.5. Jet Grout Yönteminin İmalat Parametreleri

Jet grout yönteminde imalat parametreleri, iyileştirilecek zemin özellikleri, istenilen kolon çapı, taşıma gücü ve seçilen jet grout kolonu oluşturma sistemine göre seçilir. Jet grout imalatına başlamadan önce deneme kolonları imal edilir ve istenilen parametrelerin elde edilmesi sağlanır. İstenilen kolon çapı, kolonda sürekliliğin sağlanması gerekir. Jet grout yönteminde bir akışkanlı sistemin uygulanmasında, enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı, püskürtme ağız çapı ve sayısı, tijin dönme ve çekme hızı imalat yöntemi için karar verilmesi gereken parametrelerdir. Çift akışkanlı sistemde ise tek akışkanlı sistemdeki imalat parametrelerine basınç faktörünü de ekleyebiliriz. Üç akışkanlı sistemde bu saydığımız parametrelerin yanına su jeti ve basıncına projeci tarafından karar verilecektir.

“Stoel(2001) tarafından çeşitli zemin tiplerinde jet grout kolonlarının mukavemet değerlerin uygulanan imalat parametreleriyle değişimi Tablo 2.4’de verilmiştir”[5]. Bu bölümde jet grout kolonlarının oluşturulmasında etkili olan parametreler anlatılmıştır.

Tablo 2.4 Jet kolonlarının mukavemet değerlerinin imalat parametreleriyle değişimi[5]

Zemin Tipi	Serbest Basınç Mukavemeti(Mpa)	
	Alt Limit	Üst Limit
Organik Zemin	1	6
Kil	3	7
Silt	5	15
Kum	10	40
Çakıl	10	40

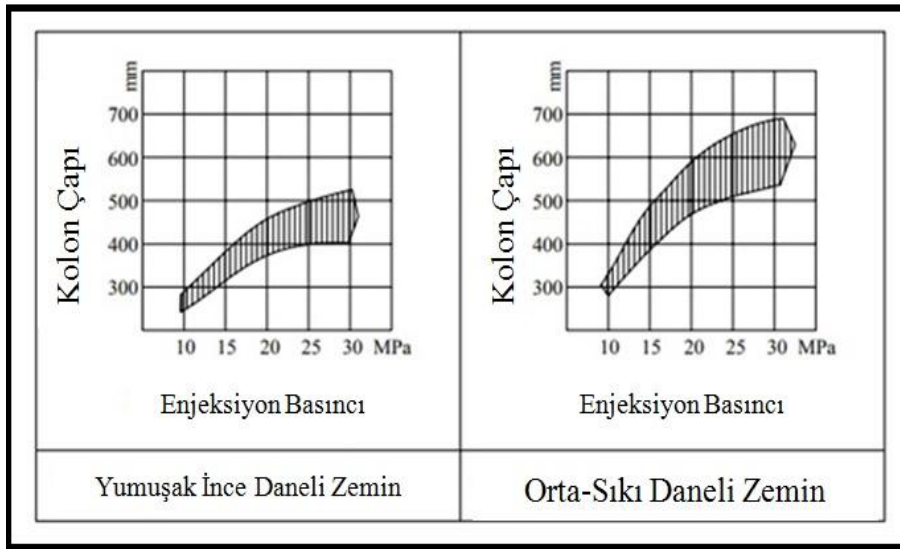
2.1.5.1.Enjeksiyon Basıncı

Jet grout kolonlarının elde edilmesinde imalat sırasında başlıca faktör uygulanan enjeksiyon basıncıdır. Enjeksiyon basıncı aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- DÜŞÜK 200 ile 250 bar,

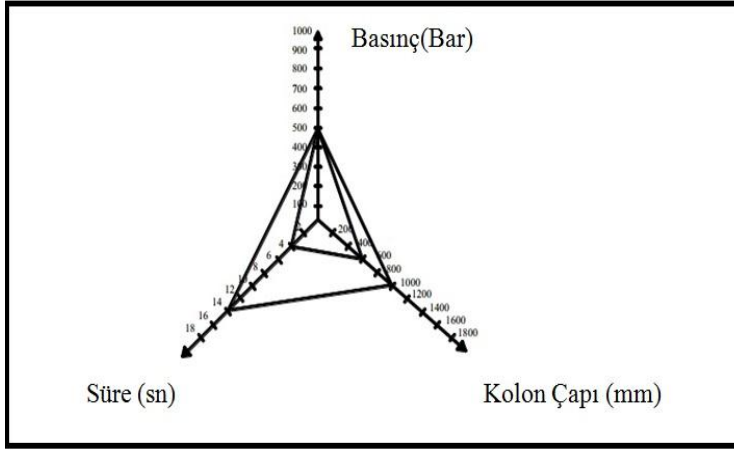
- ORTA 300 ile 400 bar,
- YÜKSEK 400 ile 700 bar arası enjeksiyon basıncı şeklindedir.

İstenilen kolon çapının elde edilmesinde enjeksiyon basıncı önemli parametrelerden biridir. Ancak enjeksiyon basıncı ile kolon çapı arasında doğrusal bir bağıntı yoktur. Kohezyonlu zeminlerde kolon çapı basınç ve zaman faktörüne bağlıdır ama kohezyonsuz zeminlerde ise basıncın artması kolon çap artışını sağlayabilir. Jet grout kolonlarının imalatı için gerekli olan imalat parametreleri Tablo 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.18 Enjeksiyon basıncı ile oluşan kolon çapı arasındaki ilişki[19]

Enjeksiyon basıncı sırasında jet kolonun oluşturulması sırasında geçen süre kolon çapının homojen ve sürekli olmasında birincil faktördür. Şekil 2.17’de yatay eksen enjeksiyon basıncı ve düşey eksen ise oluşan kolon çapını göstermektedir. Jet grout kolonu ile basınç arasında doğrudan bir ilişki vardır. Şekil 2.18’de görüleceği gibi basınç arttırıldığında kolon çapı da artmaktadır. Ancak kolon çapı oluşturulurken ulaşılmak istenen çapta homojen bir kolon elde etmek için yalnızca basınç faktörü yeterli bir parametre değildir. Kolon çaplarının bütün zemin profili boyunca aynı oluşması ve süreklilik meydana getirmesi açısından zaman faktörü de önemlidir. “Belirli zemin mukavemetinde imal edilen elemanların çapı, uygulanan spesifik enerjinin ve/veya etkili kesme süresinin artması ile artar. Bu ise dönme ve geri çekme hızları ile kontrol edilir”[16].



Şekil 2.19 Basınç - Bekleme Süresi - Kolon Çapı İlişkisi[19]

Tablo 2.5 Jet grout kolonlarının oluşturulmasında gerekli imalat parametreleri[19]

PARAMETRELER		JET GROUT SİSTEMİ	
		ÇİFT AKIŞKANLI	ÜÇ AKIŞKANLI
ENJEKSİYON BASINCI			
Su	Bar	Ön Yıkama (200~300)	300~500
Enjeksiyon Harcı	Bar	300~600	40~60
Sıkıştırılmış Hava	Bar	8~13	8~13
AKIŞ ORANLARI			
Su	l/dk	Ön Yıkama	70~100
Enjeksiyon Harcı	l/dk	100~150	150~250
Sıkıştırılmış Hava	m ³ /dk	1~3	1~3
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ BÜYÜKLÜĞÜ			
Su	mm	Ön Yıkama (1,6~2,4)	1,8~2,5
Enjeksiyon Harcı	mm	2,0~4,0	3,5~6,0
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ SAYISI			
Su		Ön Yıkama(1)	1~2
Enjeksiyon Harcı		1~2	1
TİJİN DÖNME HIZI			
	Devir/dk	10~30	3~8
TİJİN ÇEKİLME HIZI			
	sn/m	250~500	375~625
KOLON ÇAPI			
Kaba daneli zeminler	m	1,0~2,0	1,5~2,5
İnce daneli zeminler	m	1,0~1,5	1,0~2,0
SU/ÇİMENTO ORANI			
	s/ç	0,8:1~2:1	
TÜKETİLEN ÇİMENTO MİKTARI			
	kg/m	300~1000	500~2000
	kg/m ³	150~550	150~650
ZEMİN ELEMANININ MUKAVEMETİ			
Kaba daneli zeminler	Mpa	7,5~15	300~600
İnce daneli zeminler	MPa	1,5~5	1,5~7,5

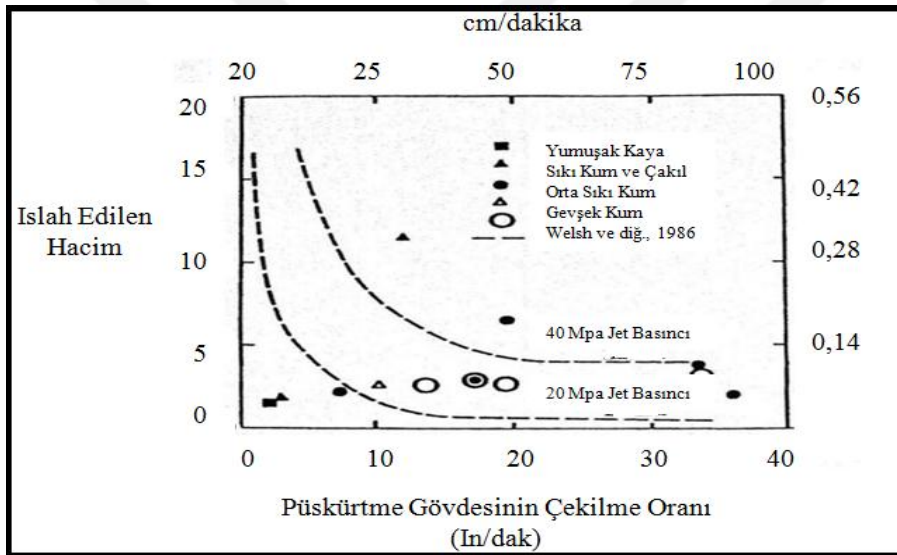
2.1.5.2.Çekme Hızı

İmalat sırasında delgi ekipmanında bulunan zemini delen veya parçalayan tijlerin belli bir hızda kendi eksenini etrafında dönme işlemidir. Bu dönme işlemi sırasında zemin ile bağlayıcı (grout) malzemenin karışım oluşturmaktadır. Tijlerin dönüş hızı ve takım çekme hızı iyileştirme yapılacak olan zemin tabakalarının derinliği boyunca sürekli ve homojenliği sağlayacak bir hızda olmalıdır. Tavsiye edilen dönüş hızı 10 ile 20 devir/da. Değerleri

arasında olmalıdır. Ancak parçalanması zor olan kohezyonlu veya sert zemin tabakalarında ise 30 devir/da. Kadar çıkartılabilmektedir. Kolon imalatında takım çekme hızı iki şekilde olmaktadır;

- Sürekli çekme
- Kademeli çekme olmaktadır.

Takım çekme yöntemi delici ekipmanın üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Bazı makinelerde her iki çekme yöntemi bulunurken, bazılarında ise kademeli çekme bulunur. Şekil 2.20'de iyileştirilen sahada elverişsiz zemin tabakalarının parçalanması sonrasında tijin çekilme hızının oluşacak kolon çapına etkisi sonucunda iyileştirilen alanın tijin çekilme ilişkisi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Enjeksiyon gövdesinin çekilme hızının iyileştirme yapılan zeminin hacmine etkisi[19]

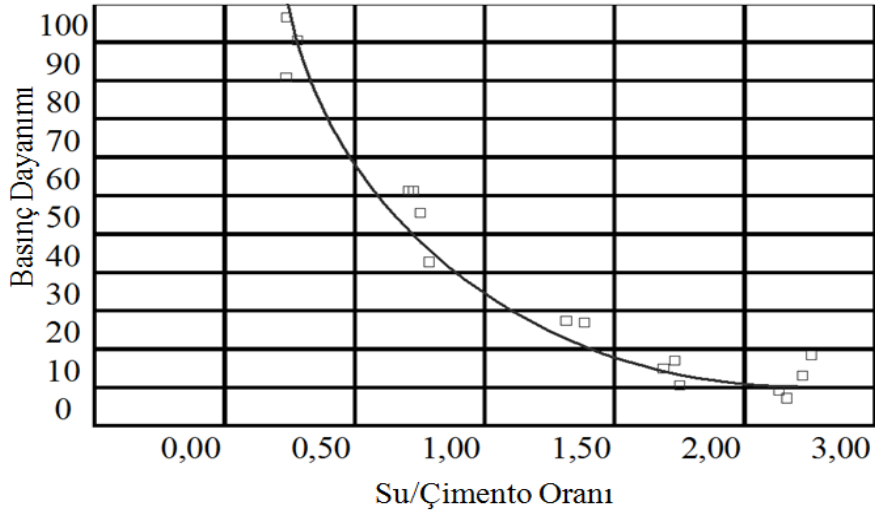
Jet grout yöntemiyle zeminlerin yırtılması direnci farklılık göstermektedir. Kohezyonsuz zeminlerin yırtılma direnci düşük olmaktadır ve grout malzemesinin zemin ile karışması kısa süre içerisinde gerçekleşmektedir. Ancak kohezyonlu zeminlerde ise bu süre daha uzun sürmektedir. Bu nedenle çekme hızı ve dönme hızı zemine enjekte edilecek olan grout malzemesinin miktarına bağlıdır. Çekme ve dönme hızlarının seçimi, iyileştirilecek zeminin durumuna, su muhtevasına ve uygulanacak olan jet grout tipine bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 2.6 Enjeksiyon gövdesinin çekilme hızı ile iyileştirme yapılan zemin hacmi ile arasındaki ilişkisi[19]

Zemin	Enjeksiyon Basıncı (MPa)	Çekme Hızı(cm/dk)	Islah Edilen Hacim(m ³ /m)	Kaynak
Yumuşak Kaya	39,3~48,9	2,3~9,4	0,1~0,2	Yahiro ve diğ.,1975
Sıkı Kum ve Çakıl	39,3~48,9	3~11,7	0,1~0,2	Yahiro ve diğ.,1975
	34,5~41,4	30,5	0,3~1,8	ENR, 1986
Orta Sıkı Kum	39,3~48,9	13,20~23,1	0,2~0,2	Yahiro ve diğ.,1975
	20~40	9,9~50	0,1~1,8	Welsh ve diğ.,1986
	38,6	91,4	0,2	ENR, 1986
	30,3	39,9	0,3	Ascieri ve diğ., 1973
	39,3~48,9	50,119,9	0,1~0,6	Yahiro ve diğ.,1975
	5,5~6,9	39,90~59,9	0,2~1	Broid ve diğ.,1981
Gevşek Kum	39,3~48,9	23,1~28,7	0,2~0,2	Yahiro ve diğ.,1975
Kil ve Silt	39,3~48,9	31~38,6	0,2~0,3	Yahiro ve diğ.,1975
	20~40	9,9~42,2	0,1~1,5	Welsh ve diğ.,1986
	30,3	39,9	0,3	Ascieri ve diğ., 1973
	39,3~48,9	50~48,9	0,1~0,5	
	5,5~6,9	39,9~59,9	0,1~0,4	Broid ve diğ.,1981

2.1.5.3.Çimento Dozajı

Hazırlanan grout harcının özgül ağırlığı 1410 kg/m³ ile 1570 kg/m³ arasında bir değer alınabilir ve su /çimento oranı ise 1 olarak kabul edilir. S/Ç oranının paydaki değerlerin artması jet kolonlarının basınç değerinin düştüğünü göstermektedir. S/Ç oranının seçiminde zeminin mukavemet parametreleri, uygulama yöntemi istenilen kolon çapı ve basınç değerine bağlı olarak değişmektedir(Şekil 2.21'de).



Şekil 2.21 Su / çimento mukavemet arasındaki ilişki[9]

2.1.6. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar

Jet grout imalat ekipmanları 5 parçadan oluşmaktadır. Bunlar;

- Delgi Makinesi,
- Pompa Ünitesi,
- Mikser Ünitesi,
- Çimento Silosu,
- Monitör

Şeklin de sıralanabilir.

Delgi Makinesi

Kolon oluşturulması ise gerekli donanımına sahip ekipmandır. Projede belirtilen ve istenilen derinliğe kadar zemini parçalayabilecek ve jet kolonları oluşturabilecek kapasiteye sahip olmalıdır(Şekil 2.22'de).

- Delgi makinesi tam hidrolik ve paletli olmalıdır,
- İstenilen derinlik boyunca herhangi bir ekipman ilavesi olmadan yapabilmelidir.
- Yüksek basınç ve tork sağlama kapasitesine sahip olmalıdır.



Şekil 2.22 Jet grout delgi makinesi[20]

Enjeksiyon Pompa Ünitesi

Jet grout yönteminde kullanılan bir diğer ekipman ise pompa ünitesidir. Pompa ünitesi projede belirtilen ve elde edilmek istenilen kolon çapı ve kolonun istenilen taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlayacak su/çimento oranını ayarlayan ve grout malzemesini pompa ünitesine aktaran ekipmandır(Şekil 2.23’de).



Şekil 2.23 Jet grout kolon teşkili için kullanılan enjeksiyon ve pompa ünitesi[21]

Mikser Ünitesi

Jet grout enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştıracak mikser ve dinlendiriciden oluşan, jet grout pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede mikser ünitesidir(Şekil 2.24’de).



Şekil 2.24 Mikser Ünitesi[22]

Çimento Silosu

İmalat süresince yeterli miktarda çimento depolayabilen ve jet grout pompasını besleyebilecek kapasiteye sahip ekipmandır(Şekil 2.25’de).



Şekil 2.25 Çimento Silosu[22]

Monitör Özellikleri

Jet grout zemin güçlendirme yöntemiyle hemen her türlü zayıf zeminler iyileştirilirken kullanılan monitörün özellikleri TS EN 12716’da belirtilen aşağıdaki özellikleri kapsamaktadır;

- “Tekli sistem için, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücü. Bu püskürtücüler aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir”[24].
- “İkili (hava) sistem için, hava ve enjeksiyon şerbetinin eş zamanlı jet haline getirilme işlemi için bir ya da daha çok çift püskürtücü (aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda). Hava püskürtücüsü, dairesel şerbet püskürtücüsünün çevresini bir halka şeklinde sarar”[24].
- “İkili (su) sistem için, suyun jet haline getirilmesi için bir ya da daha fazla püskürtücü ve çimento karışımını yollamak için bir ya da daha fazla daha derine yerleştirilen püskürtücü”[24].

2.1.7. Jet Grout Yöntemi Kalite Kontrol Testleri

Jet grout yöntemiyle iyileştirilen zeminlerde elde edilen kolonların tasarımda istenilen çap, süreklilik, taşıma gücü ve istenilen dayanımı göstermesi gibi parametrelerin amaca uygun olduğunu kontrol etmek için şu kontrol ve testler yapılmaktadır;

- Deneme kolonları ve çap kontrolü,
- Süreklilik testi,
- Jet grout kolonları yükleme deneyi
- Serbest Basınç Deneyi şeklinde sıralanabilir.

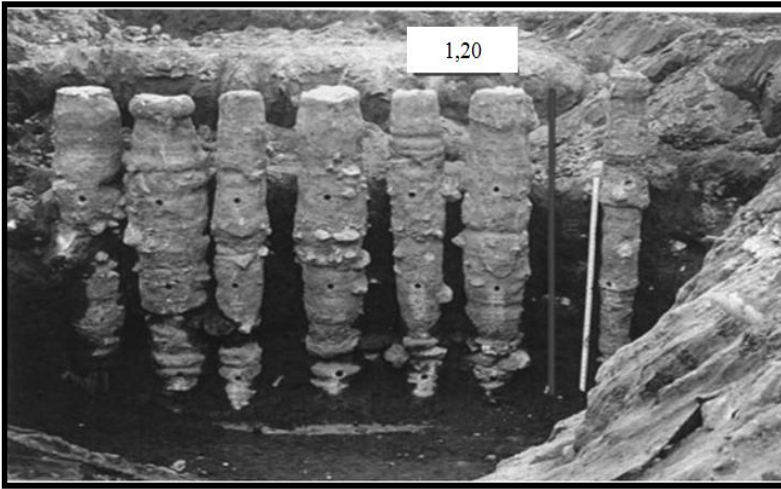
2.1.7.1.Kolon Çapı

Jet grout yönteminde en önemli parametre kolon çapıdır. Servis kolonlarının imalatına başlamadan önce deneme kolonları oluşturulur ve çap kontrolü yapılır(Şekil 2.26’de). Deneme kolonlarında jet tekniği sabit tutulur ve enjeksiyon basıncı, tijin çekme hızı, su/çimento oranı ve tijin dönme hızı gibi parametreler değiştirilir. İmalatı tamamlanan deneme kolonlarının etrafındaki toprak kaldırılarak kolon çapının en dar kesitinde ölçüm yapılarak çap kontrolü gerçekleştirilir.



Şekil 2.26 Jet grout deneme kolonları örnekleri ve çap kontrolü[23]

Kolonlar derinlik boyunca farklı kesitlerde oluşabilmektedir. Zeminlerin derinlik artışı ile birlikte efektif gerilmenin artışı nedeniyle kolon çapında azalmalar meydana gelmektedir(Şekil 2.27'de).



Şekil 2.27 Deneme kolonlarının derinlik boyunca çap değişimi[10]

2.1.7.2.Bütünlük Testi

Jet grout yönteminde bütünlük testi ile zemin içerisinde oluşturulan kolonları kontrol etmek için kullanılır. Bütünlük testi sayesinde zemini açmadan, zemin içerisindeki yapısal elemanın konumunu ve sürekliliğini kontrol edilebilmektedir yapılan bu test oldukça kolay ve ekonomik bir yöntemdir. Bu test yönteminde imal edilmiş olan jet grout kolonlarının üst

kısmına ivme ölçer yerleştirilir ve bir el çekici yardımıyla kolona vurarak kolon boyunca yansıyan sinyal kaydedilir(Şekil 2.28'de).

Bütünlük testinin avantajları şu şekildedir;

- Kolonlarda varsa imalat kusuru bunlar tespit edilir,
- Ekonomik ve hızlı ve sonuç odaklı bir yöntemdir,

Bu test yönteminin sınırlamalar ise;

- Deneme kolonları ile ilgili taşıma gücü kapasitesini belirleyemez,
- Küçük kusurlar kolaylıkla tespit edemeyebilir,
- Derinliği fazla ve sürtünme kazıkları için doğru sonuçlar vermesi oldukça zordur,
- Kolon ucunda meydana gelen deformasyonu tespitini yapamaz.



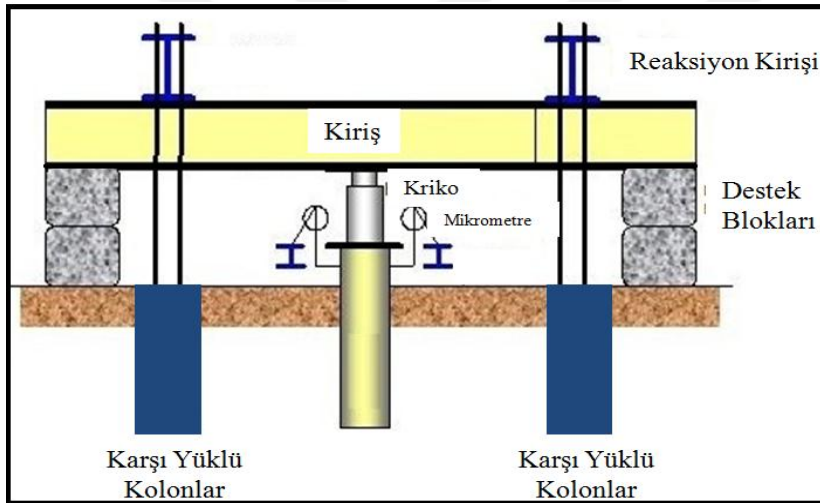
Şekil 2.28 Jet grout deneme kolonları bütünlük testi[25]

2.1.7.3. Jet Grout Kolonu Yükleme Deneyi

Jet grout yükleme deneyi projede belirtilen toplam taşıma kapasitesini ve yük oturma durumunu belirlemek amacıyla yapılan deneydir. Yükleme deneyi iki şekilde gerçekleştirilir. Yükleme testi için üç adet kolon imal edilir ve bunlardan ikisi kenarda çekme, ortadaki kolon ise basınca çalışır. Diğer yöntem ise deneme kolonları imal edilir ve şantiye bulunan beton blok veya inşaat demiri yükleme testi için kullanılabilir. Hazırlanan deney düzeneğine basınç yüküne çalışan jet kolonuna aksenal yükleme yapılır ve yük-oturma grafiği ile zaman-oturma grafikleri elde edilir. Jet grout kolonlarının servis yüklerini taşıma kapasitesi kolon ucu ve sürtünme çeperinin toplam miktarı kadardır ve yapılan yükleme testinde ise kolonların taşıma kapasitesinin %50 kadar yük artışı yapılabilir(Şekil

2.29’de). Deneme kolonları maksimum oturmanın meydana geldiği veya kolonlarda göçme durumu meydana gelene kadar yük artışına devam edilir. Yük artışı olmadığı ancak kolonlarda oturmanın devam ettiği durum, göçme durumudur. Maksimum oturma durumu kolon çapının %10 geçmesi durumunda yükleme tamamlanır. Kolon yükleme deneylerinde basınç kolonları için “ASTM D 1143-81” standartları kullanılmaktadır.

- Yükleme deneyi yapılan kolonlarda şu performans durumu beklenmektedir;
- Maksimum yük artışında toplam oturma servis yüklemesinin %50’sini geçmemesi,
- Kalıcı oturmanın, meydana gelen toplam oturma miktarının %50’sini sınırını geçmemesi ve jet grout kolonlarının uç kısmında meydana gelen toplam oturma miktarının ise 10 mm miktarını aşmamasını beklemekteyiz.



Şekil 2.29 Jet grout yükleme sisteminin şematik gösterimi[23]

2.1.7.4.Serbest Basınç Testi

Jet grout zemin iyileştirme yönteminde imalatı yapılan kolonların mukavemet değerleri oldukça önem arz etmektedir. Bu durum kolonların taşıma kapasitesini de doğrudan etkilemektedir. Jet grout uygulama tekniği, zemin özellikleri ve su/çimento oranı kolonların mukavemet değerlerini doğrudan belirleyebilmektedir. Şekil 2.30’da arazide imal edilen deneme kolonları üzerinde silindirik karot numuneleri alınmaktadır ve laboratuvar da serbest basınç deneyi gerçekleştirilir. TS 10465 standartlarına uygun ve kolon imalatı yapıldıktan 28 gün sonra karot numunesi alınır. Yapılan serbest basınç deneyi sonucunda kolonların basınç dayanımları tespit edilir.



Şekil 2.30 Jet grout kolonlarından karot numunesi alınması[26]

2.1.8. Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Sınırlamalar

2.1.8.1. Jet Grout Yönteminin Avantajları

- Jet grout kolonları hemen hemen bütün zemin gruplarında uygulanabilmektedir.
- İstenilen çap da ve büyüklükte kolonlar elde edilebilir,
- Tarihi yapılarda rahatlıkla uygulanabilmektedir,
- Malzeme sarfiyatı tam yaklaşık yöntemlerle büyük ölçüde tespit edilebilir,
- Zeminde istenilen derinlikte başlanıp ve istenilen seviyede bitirilebilir,
- Uygulama tekniğine ve su/çimento oranına göre kolon mukavemeti tespit edilebilir,
- Çevreci bir yöntemdir imalat sırasında su ve çimento kullanılır kimyasal malzeme oldukça az kullanılır
- Bu yöntem ile sınırlı alanlarda çalışılabilir,
- Diğer zemin iyileştirme ve enjeksiyon yöntemlerine göre oldukça kolaydır.

2.1.8.2. Jet Grout Yönteminin Sınırlamaları

- Zemin mukavemet özelliklerine göre öngörülen kolon çapı elde edilemeyebilir,
- Kolon imalatı için yüksek basınç ile zemin parçalanmaktadır ve bu durum zeminde istenmeyen türden oturmalara neden olabilir,
- İmalat sırasında istenilmediği halde kolon çapları büyük olmakta bu ise maliyet artışlarına neden olmaktadır,
- Bu yöntemde standart hale getirilemediğinden deneyim oldukça önemlidir,

- İmalat sırasında enjeksiyon ünitesi ve borusu takip edilmelidir herhangi bir tıkanıklık durumunda kolon oluşumun olumsuz etkiler,
- Çift akışkanlı ve üç akışkanlı tekniği ile kolon oluşumunda yataklanma oluşabilmektedir.
- Kohezyonsuz zeminlerde düşük mukavemetli kolonlar meydana gelmektedir,
- Tek akışkanlı imalat tekniği ile oluşturulan kolonlarda yüksek miktarda su/çimento oranı oluşmakta ve kolon dayanımı düşük olmaktadır.
- Çift akışkanlı ve üç akışkanlı sistemin uygulanmasında 20 ile 30 dereceye yakın eğiklik oluşturulmaktadır bu durum ise zemin parçalanırken örselenen zemin malzemesinin dışarı alınmasını sağlamaktır.



2.2. Taş Kolon Yöntemi

Geoteknik Mühendisliğince zayıf ve yumuşak zeminlerde yapıların inşa edilmesi oldukça güç bir durumdur. Çünkü söz konusu zeminlerde üst yapı kalıcı yükleri, yapı servis yüklerini ve hareketli yükleri güvenli bir şekilde taşıması ve aktarabilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla bu problemlerin giderilmesi için çeşitli çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geoteknik mühendisliğince geliştirilmiş ve özelleştirilmiş birçok zemin iyileştirme yöntemi bulunmaktadır ve bu zemin iyileştirme tekniklerinden biride taş kolon yöntemidir ve söz konusu zemin iyileştirme yöntemleri için;

- Sıkışabilir tabakanın kalınlığına bağlı olarak uç mukavemetli ya da sadece çevre sürtünmeli kolon imali
- Zeminin sıklık ve mukavemetinin artırılması ile inşaat sonrasında oturmaların azaltılması amacıyla önyükleme yapılması
- Oturmaların hızlandırılması amacıyla kum ya da fitil dren imali
- Yumuşak zeminin mühendislik özellikleri daha iyi olan bir malzeme ile değiştirilmesi ya da yüzen temel imali
- Taş kolon imali

şeklinde sıralanabiliriz [27]

Taş kolon uygulaması yumuşak ve zayıf zemin tabakalarında uygulanmakta diğer zemin iyileştirme yöntemleri gibi uygulandıkları zeminin taşıma kapasitesini, elastisite modülü ve zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesini sağlamaktadır. Taş kolon tekniğinde iyileştirme yapılacak olan zemin profilinde istenilen derinlik boyunca foraj çukuru açılır, proje ve şartnamelerde belirtilmiş olan uygun gradasyona sahip malzeme ile doldurulur ve sıkıştırma sağlanır. Bu teknik ile zemin ve kullanılan malzeme arasında kompozit bir yapı oluşturur. Zemin içerisindeki boşlukların azaltılması ve zeminin sıkıştırılması suretiyle zemin iyileştirilmiş olur.

2.2.1. Taş Kolon Yönteminin Tarihçesi

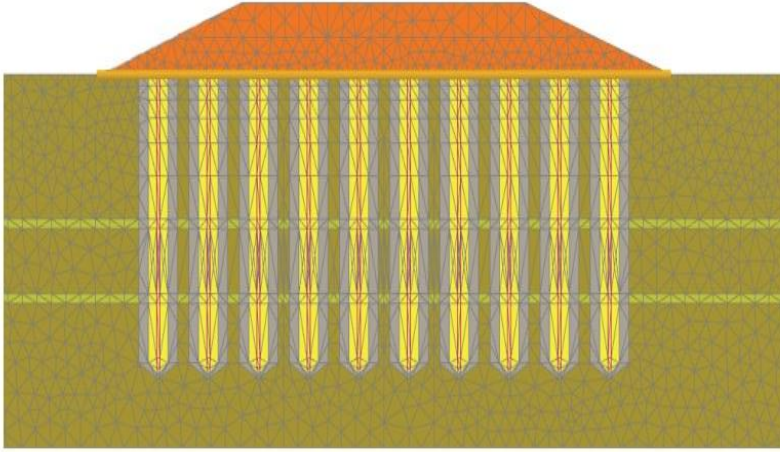
Taş kolon yöntemi tarihsel gelişim süreci oldukça eskiye dayanmaktadır. Fransa'da 1830'lu yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. Avrupa'nın genelinde ise 1950'den sonra ve 1972'de Amerika'da kullanımı yaygın hale gelmiştir. Son zamanlarda ülkemizde de kullanım alanları artmıştır. Vibratörlerin gelişimiyle birlikte zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaya başlanmış olan bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulanma prensibi geniş alanlarda ve derinliği

çok fazla olmayan ve aşırı yük artışının yaşanmadığı sahalarda uygulanmaktadır. Raylı sistemlerde, karayollarında, hava alanları ve pistlerde, depo alanlarında ve park alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Genel stabilitenin sağlanması, meydana gelen farklı ve toplam oturmaların azaltılması ve sıvılaşma gibi parametrelerin kontrol edilmesini sağlamaktadır. “1999 depreminde Sakarya bölgesinde meydana gelen sıvılaşma problemine karşın sıvılaşma riskini azaltmak amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır. Taş kolon uygulaması ile iyileştirilen zeminde aşağıdaki özelliklerin kazanılması beklenir” [28].

- Zeminin taşıma kapasitesinde artış meydana gelir
- Titreşim nedeniyle zeminin sıklığı artar ve meydana gelen oturma miktarı azalır
- Meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı azalır
- Taş kolon uygulaması sonucunda kolon çevresindeki zemin malzemesinin yanıl gerilme artışları meydana gelir.

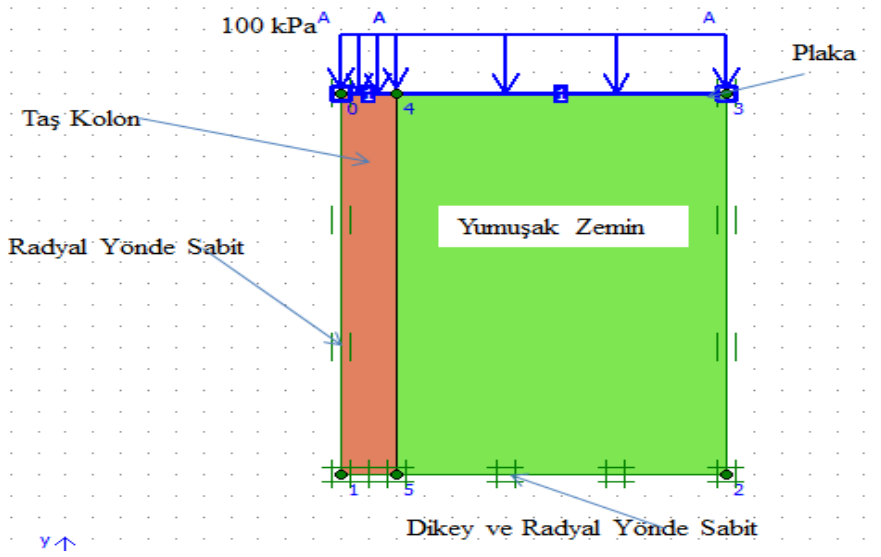
2.2.2. Taş Kolon Yöntemi Literatür Taraması

Taş kolon yöntemi, zayıf zemin tabakalarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Zayıf zemin tabakaları üzerinde inşa edilen üst yapı ve dolguların stabilizasyonunu sağlamak amacıyla tercih edilebilmektedir. Zemin içerisinde teşkil edilen taş kolonlar etrafındaki zemin malzemesine göre daha rijit oldukları için yapı ve dolgu temelleri altında meydana gelen toplam ve farklı oturmaları azaltmaktadırlar. Taş kolon elemanların kullanıldıkları bu çalışmada irdelenen durum ise, “Farklı kolon iyileştirme oranı ve farklı temel rijitliği kullanılması durumunda temel altında gözlenen deplasman profillerinin değişimler irdelenmiştir” [29]. PLAXIS yazılımı kullanılarak Şekil 2.31’de sayısal model ile elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmada esnek ve rijit temel modelleri dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir ve yapılan iyileştirme sonucunda da her iki alanda deplasmanların azalmıştır. “Analizler neticesinde; %12 ve %25 alan iyileştirme oranları için deplasmanların %32 ila %52 kadar azaldığı, esnek ve rijit temel uygulanması durumunda bu azalmaya ilaveten %25 civarında bir azalma daha gerçekleştiği söylenebilir” [29].



Şekil 2.31 Problemin Sonlu Elemanlar Modeli[29].

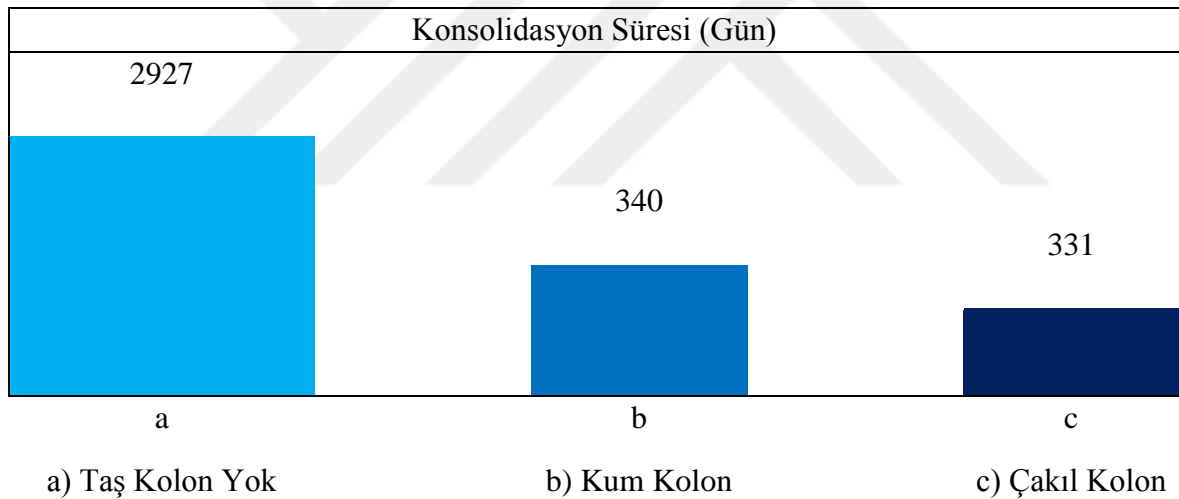
Yapılan iyileştirme sonucunda oluşan yeni zemin durumunda taşıma kapasitesi ve oluşan toplam oturma değerleri gibi zeminden beklenen davranışın teşkil edilen taş kolonların performansıyla doğru orantılıdır ve yapılan bir vaka analizinde ise taş kolonlar sayesinde zeminlerin taşıma gücü kapasite artışı, zeminlerin sıkışabilirliği azaltılır ve konsolidasyon süreci hızlandırır. Taş kolon yönteminin kullanılmasıyla zeminlerin güçlendirilmesi prensibinde zayıf zemin boyunca foraj yardımıyla zeminde açılan boşluğun daha rijit bir materyal ile doldurulması esasına dayanır. Bu kapsamda incelenen bir diğer çalışmada ise “Zayıf zeminlerin, tipik olarak %10-40’lık daha sert granüllü materyallerle değiştirilmesi gerekir”[30]. Zeminler yapısı gereği heterojen yapıya sahip ve doğrusal davranış sergilemeyen, kompleks ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapılan önceki çalışmalarda zemin içinde teşkil edilen taş kolonlar ve zeminlerin analizinde sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılmıştır ve SEY yaklaşımı karmaşık problemlerin daha doğrusal yer değiştirme profillerini elde edebilmek için en uygun çözüm yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. “Zeminlerin ve kayaçların mekanik davranışı çeşitli doğruluk derecelerinde modellenebilmektedir”[30]. Daha gerçekçi sonuçların elde edilmesinde SEY yaklaşımını kullanan PLAXIS yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Zemin modeli olarak pekleşen zemin modeli ve Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında 100 kN/m² ve 1000 kN/m² yük altındaki yumuşak zemin tabakası içerisindeki taş kolonların PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak zemin içerisinde veya beraber gösterdikleri davranış biçimi irdelenmiştir(Şekil 2.32’de).



Şekil 2.32 Eksenel Simetrik Birim Hücre Modeli[30]

Taş kolon elemanları kullanılarak zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ile zeminlerdeki deformasyonlar en aza indirilebilmektedir. Taş kolon tekniğinin tek ve grup olarak gösterdikleri performans durumları irdelenmiş ve “Zayıf yumuşak zeminlerin kuvvetlendirici elemanları olarak, tek ve grup taş kolonların etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirilmiştir”[30]. Sayısal modelleme ve yapılan kabullerin doğruluğunu teyit etmek adına tek bir kolon, grup etkileşimi gösteren taş kolonlar ve yumuşak zeminler modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise taş kolonlar kullanılarak takviye edilen zeminlerin taşıma gücü kapasitesi arttığı sonucu doğrulanmıştır. Taş kolon yönteminin uygulandığı bir diğer zemin problemi olarak sıvılaşma karşımıza çıkmaktadır. Sıvılaşan zeminlerde yapı inşa edilmesi zorunlu olan durumlarda ve sıvılaşan tabakanın kalınlığı oldukça fazla ise ve bu durumda yapısal eleman ile çözümün ekonomik olmaktan çıktığı durumlarda, yapı temelinin oturacağı alanın gerilme soğanı arttıracak işlemler yapılabilmesi için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulur. Yapılan bir vaka analizinde ise sıvılaşma durumu ele alınmıştır. Taş kolon yöntemi kullanılarak zayıf zeminlerin ve sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zemin gruplarının konsolidasyon süresini kısaltabilir. Taş kolon yöntemi kullanılarak yapılan bir zemin iyileştirmede, analizler iki boyutlu olarak geliştirilmiş ve sonlu elemanlar analizi ile temel sisteminin konsolidasyon özelliklerini araştırmak için birim hücre kavramı kullanılarak taş kolonlar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. “Yerleşme ve zaman içinde aşırı gözenek basıncı dağılımı için hesaplanan değerler, farklı alan değiştirme oranları için karşılaştırılmıştır”[31]. Taş kolonların modellenebilmesi ve sayısal yöntemler ile çözülebilmesi zeminin anizotropik davranışı ile birleştiğinde oldukça karmaşık bir hal

almaktadır ve PLAXIS 2D yazılımı bu karmaşıklığı sayısal analiz yöntemlerini kullanarak ve hesap aşamasında kademeli inşaat adımları takip edilerek problem oldukça basitleştirilebilir. Zayıf ve yumuşak zeminlerde taş kolonların uygulanması durumunda zeminlerin ıslahında sayısal analizin etkisi incelenmiştir. PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak zemin güçlendirmede kullanılan taş kolon malzemesinin; kolon çapının yüzey oturmaları, konsolidasyon süresi ve kolon derinliği boyunca düşey yer değiştirmeleri ile taş kolonun teşkil edildiği bölgedeki yüzey oturmaları dağılımı üzerindeki davranışını araştırmak için modellenmiştir. Analizler sırasında “Mohr-Coulomb Zemin Modeli” kullanılmıştır çalışmanın sonuçları olarak; “Çakıl kolonu kullanılmasının konsolidasyon süresini hızlandırma ve oturmaları azaltma üzerinde kum kolondan daha önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Büyük kolon çapı seçilmesi, taşıma kapasitesini arttırmakta ve oturmaları düşürmektedir. Ayrıca, yüzeyde gerçekleşen en büyük oturma, kolonun çapı artınca düştüğü fark edilmektedir”[29].



Şekil 2.33 Farklı Kolon Malzemesinin Konsolidasyon Süresine Etkisi[29].

Taş kolon tekniğinin kullanıldığı ve zemindeki sıkışabilirliğin azaltıldığı kıyı ve liman gibi sahaların konsolidasyon süresini kısaltarak zeminlerin ıslahını sağlamaktadır. Hong Kong’da 1980’lerde ve 1990’lı yıllarda yeni yerleşim alanları, liman, havalimanı ve altyapı tesislerinin inşası için zayıf zeminler güçlendirilmiş ve yeni yapılaşma sahaları oluşturulmuştur. “Hong Kong’u çevreleyen deniz dibi yüksek oranda sıkıştırılabilir çok yumuşak deniz ve alüvyal kil ve silt kalın tabakalarını içermektedir”[32]. Taş kolon tekniği ile zeminin konsolidasyonunu hızlandırılmış ve zemin güçlendirilmiştir. Taş kolonların teşkili sırasında kuru alttan beslemeli teknik kullanılmıştır. Taş kolonlar ile güçlendirilmiş

bir sahada istenilen ve beklenen sonuçlar şunlardır, zeminin taşıma kapasitesinin artması, farklı oturmaların azalması, sıvılaşma riskinin azalması gibi sonuçlardır. Taş kolonlar ile iyileştirilen zeminlerde oluşacak oturmaların önceden tahmin edilebilmesi Geoteknik Mühendisliği açısından önem arz etmektedir. “Taş kolonların oturmaların azaltılması üzerindeki etkisi üç farklı analitik yaklaşım yardımı ile araştırılmıştır. Bu analitik yaklaşımlarda, taş kolonların zamana bağlı davranışının araştırılmasına yönelik yapılmış deneysel çalışmalar ve deneysel çalışmalara ait sayısal analizler yardımı ile elde edilen parametreler kullanılmıştır”[33]. Öncelik olarak taş kolon parametrelerinin özellikleri araştırılmıştır ve parametrelerin analitik varsayımlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra taş kolonların ön tasarımı için iyileştirme faktörü (η) ve oturma azaltma faktörü (β) değerleri analitik yaklaşımlar yardımı ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2.7’de verilmiştir. Çalışmanın sonucunda literatürde yer alan oturmaların tahmini için sık kullanılan yöntemler analitik yöntemler ile incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 2.7 Oturma azaltma faktörü ve iyileştirme faktörü değerlerinin karşılaştırması[33]

Yöntem	η	β
Balaam ve Booker (1981)	1,2	0,83
Priebe (1995)	1,54	0,65
Priebe (1995)-Düzeltilmiş	1,51	0,66
Castro ve Segaseta (2008)	1,68	0,59

2.2.3. Taş Kolon İmalat Yöntemleri

Taş kolonlar ile zayıf zeminler iyileştirilirken kullanılacak olan dolgu malzemesinin gradasyonu oldukça önemlidir. Mıcır, kırmataş, taş, stabilize, çakıl ve grout gibi vb. malzemeler kullanılabilir. İmalat yapılacak olan sondaj çukurunun temiz olması ve kullanılacak dolgu malzemesinin kimyasal reaksiyon göstermemesi dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır. Zemin ile yapılacak olan kompozit imalatta dolgu malzemesinin doğal kırma taş olmasına özen gösterilmelidir. Taş kolonların imalatındaki temel aşamalar;

- Zemin içerisinde düşey bir foraj boşluğunun oluşturulması,
- Oluşturulan boşluğa malzemenin doldurulması,
- Sıkıştırma

Şeklinde sıralanabilir. Yapım metotları taş kolonun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Günümüzün gelişen teknolojisi, farklı ekipmanların daha kolay elde edilmesi ve

kullanım kolaylığı sağlaması sayesinde taş kolonların imalat metotları oldukça gelişmiştir. Temel seçim kriterleri ve iyileştirmeden beklenen sonuçlar göz önüne alındığında her metodun uygulama alanı neredeyse özelleşmiştir[21].

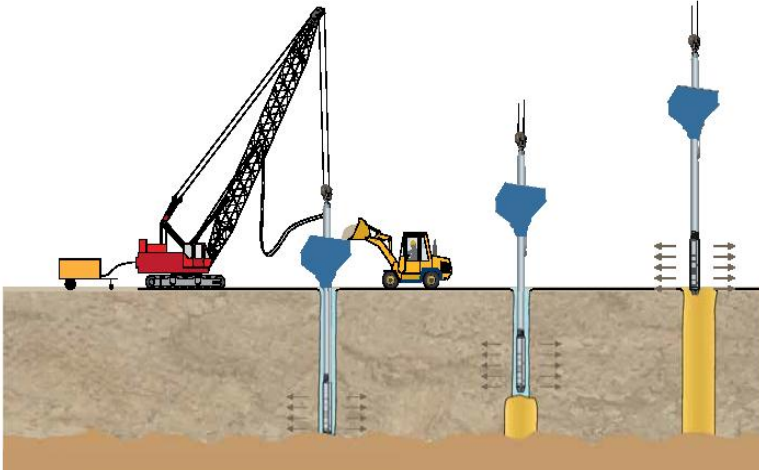
Taş kolonların imalat yöntemleri günümüzde genel olarak;

- Vibro Sıkıştırma Yöntemi (Vibro Kompaksiyon)
- Vibro Yerdeğiştirme Yöntemi

olmak üzere iki grupta sıralanabilir.

2.2.3.1.Vibro Sıkıştırma Yöntemi

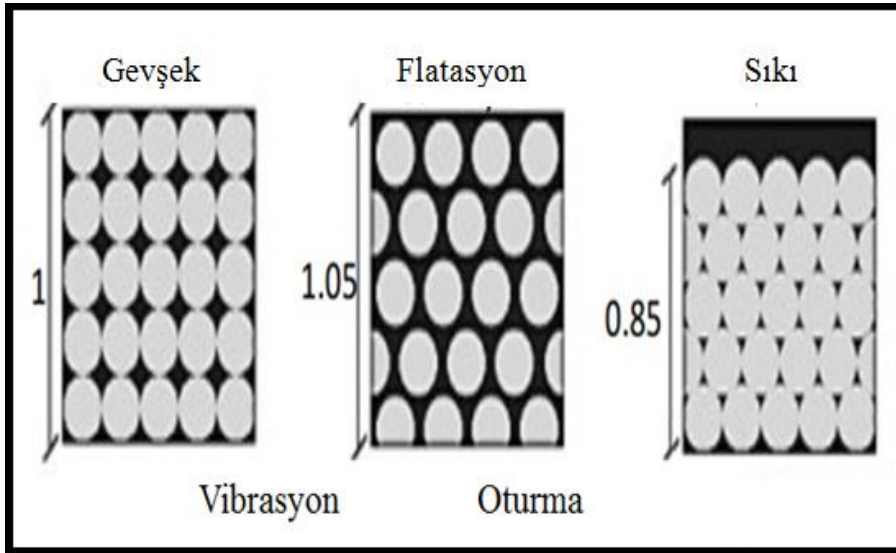
Vibro-sıkıştırma tekniğinde kohezyonsuz zeminlerde vibratörün uyguladığı titreşimler sonucunda zeminde boşluk açılır ve vibratör istenilen derinlik boyunca indirilir oluşan bu boşluğu kırmataş malzemesi doldurulur. Şekil 2.34’de görüleceği gibi kırmataş malzemesi ile 30 cm dolgu yapıldıktan sonra gerekli sıkıştırma yapılır ve bu işlemler yüzeye kadar devam ettirilerek istenilen seviyede bitirilir. Yapılan sıkıştırma sonucunda zeminde hacim azalması yaşanabilir böyle durumlarda ise aynı zemin malzemesinden veya kum malzemesi ilave edilerek arazi seviyesinin bütün yüzey boyunca aynı seviyede kalması sağlanır. “Vibro-sıkıştırma işlemi sonucunda, vibratörün çevresinde sıkıştırılarak yoğunluklu bir çekirdek bölgesi ve merkezden uzaklaştıkça yoğunluğu azalan iyileştirilmiş bir kütle oluşmaktadır. Bu kütlelerin çapı orijinal zeminin niteliğine ve uygulanan vibro-sıkıştırma yöntemi genellikle bağlı yoğunluğun %50’den az ve Standart Penetrasyon Deneyi direncinin (SPT-N) 20 darbe/30 cm’den düşük, ince malzeme oranının %15’ten az olduğu zeminlerde uygulanabilmektedir”[12].



Şekil 2.34 Vibro sıkıştırma yöntemi imalat aşamaları[34]

2.2.3.1.1. Vibro-Sıkıştırma ile İyileştirme Tekniği

Gevşek ve orta sıklıktaki temiz kumların vibro-sıkıştırma tekniğiyle zemin içerisindeki boşlukların azaltılması ve zeminin sıkıştırılması ile zemin iyileştirilmiş olur. Vibro-sıkıştırma sonucunda zeminde meydana gelen değişim Şekil 2.35’de gösterilmiştir.

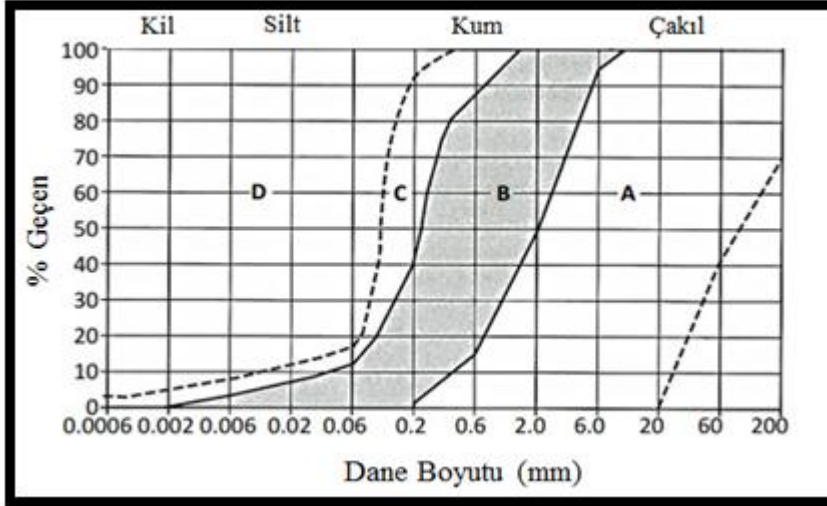


Şekil 2.35 Vibro-sıkıştırma tekniğiyle zeminlerin iyileştirilmesi[12]

Vibro-sıkıştırma tekniğiyle zeminlerin iyileştirilmesi sonucunda ve zeminlerin sıkışma derecesini etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Zeminin uygulama öncesi yoğunluğu,

- Danelerin büyüklüğü,
- Zemin danelerinin granülometresi,
- Derinlik,
- Zeminin sıkışabilirliği
- Vibrasyon süresi başlıca faktörlerdir.



Şekil 2.36 Vibro-sıkıştırma yöntemi için uygun zemin gradasyonları[12]

2.2.3.2. Vibro Yerdeğiştirme Yöntemi

Mukavemet değerleri daha yüksek kohezyonlu ve tabakalı zeminlerin iyileştirilmesinde yalnızca vibrasyon kullanılması zemini kolayla sıkıştıramaz. “Derin vibrasyon işlemleri ile iyileştirilebilecek zemin cinsleri sayısını arttırabilmek amacıyla taş kolon yöntemi geliştirilmiştir”[28]. Bu yöntemle zemin içerisinde kırmataş ve benzeri türevlerinden oluşan malzemeler ile zeminde taş kolonlar oluşturulur ve zemin içerisinde rijit elemanlar elde edilir. Teşkil edilen taş kolonların avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Temel altında meydana gelecek farklı ve toplam oturmaların azaltılması,
- Temel boyutlarının düşürülmesi için taşıma gücünün arttırılması,
- Zemin sıvılaşma problemlerinin giderilmesi,
- Şev stabilitesinin sağlanması,
- Zayıf zeminlerde sığ temellerin desteklenmesi,
- Serbest dolguların iyileştirilmesi.

Taş kolon uygulamasında zemin yüzeyini etkileyen yüklerin, tekil yük veya yayılı yük olarak tekil bir taş kolon elemanının üzerine gelen yüklerin 20 ton ile 50 ton arasında değiştiği

öngörülmektedir. Bu yöntemin en başarılı sonuç verdiği zeminler yüzeye yakın olan ince daneli, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan ve drenajsız zeminlerde elde edilebilmektedir. Bu yöntemde uygulama derinliği olarak 6 m ile 10 m arasında olduğu zaman diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olduğu yapılan çalışmalar ile teyit edilmiştir. “Zemin kayma dayanımının 100 kN/m^2 'yi aşması halinde vibratörlerin zemin içerisinde ilerlemesi mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda örneğin heyelan iyileştirme projelerinde taş kolonlar önceden yapılmış delgi (foraj) içerisinde teşkil edilmektedir”[12]. Vibro taş kolonlar performans şartlarına, zemin cinsine ve yükleme koşullarına bağlı olarak projelendirilir ve taş kolonların arasındaki mesafe 1,8 metre ile 3 metre arasında değişir. Güçlendirilmiş zeminlerde izin verilebilir yükler zemin durumu ve performans gerekliliklerine bağlı olarak değişir. Fakat kohezyonlu zeminlerde genellikle bu değer 48 kPa ile 240 kPa arasındadır. “Bununla birlikte daha yüksek değerler (96 kPa ile 480 kPa) granüler zeminlerde veya konsolidasyonun hızlı olması istenilen zeminlerde uygulanabilir”[28]. Taş kolon uygulamalarında üç yöntem tercih edilmektedir.

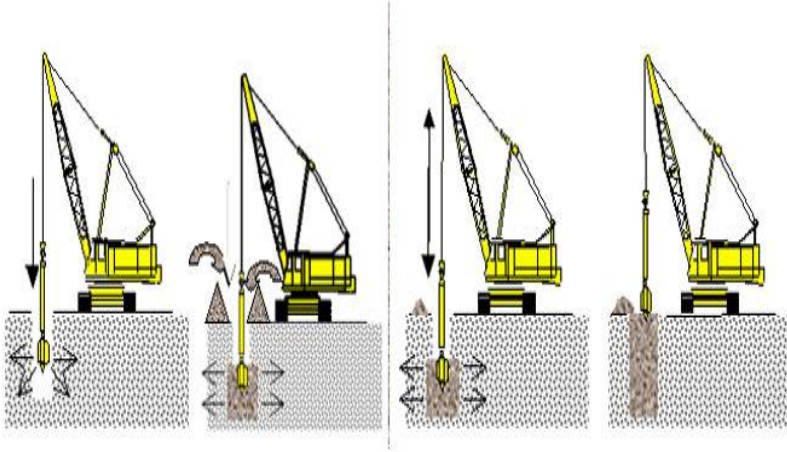
Bunlar;

- Üstten Beslemeli Islak Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi
- Üstten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi
- Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

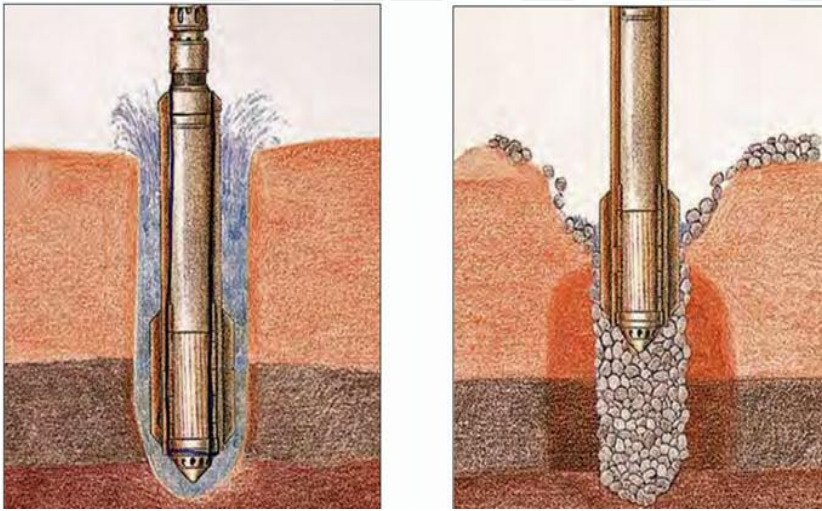
olarak adlandırılır.

2.2.3.2.1. Üstten Beslemeli Islak Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

Üstten beslemeli taş kolon yönteminde zeminde istenilen derinlik boyunca vibratör su jeti yardımıyla parçalanarak indirilir ve bu sayede vibratör etrafında bir boşluk oluşturur. Oluşan bu boşluk hacmi uygun gradasyona sahip kırmataş vb. malzemeler ile doldurularak vibrasyon yukarı doğru çekilir. Vibrasyon etkisiyle sıkışan taş malzemesi boşluk çukurunu yanal yüzeylerine basınç uygulayarak zeminin sıkışmasını sağlar ve bu şekilde zemin yüzeyine kadar tabakalar halinde devam eder ve böylece zemin profili boyunca istenilen çapta ve uzunlukta zemin içerisinde taş kolonlar elde edilmiş olur(Şekil 2.37). “Taş kolon yöntemi su altında ve drenajsız kayma dayanımının $c_u=10-30 \text{ kN/m}^2$ aralığında olan killer için uygun bir yöntemdir”[12]. Yöntemin uygulanması esnasında zamanda makine da yaşanacak güç kaybı veya sıkışmanın zorlaşmasından dolayı belli aralıklarla, yapılan sıkıştırma işleminin istenilen düzeyde olup olmadığı kontrol edilmelidir. Bu işlem kuyu yüzeyine kadar devam etmelidir.



Şekil 2.37 Taş kolon yöntemi genel imalat tekniği şematik gösterimi[37]



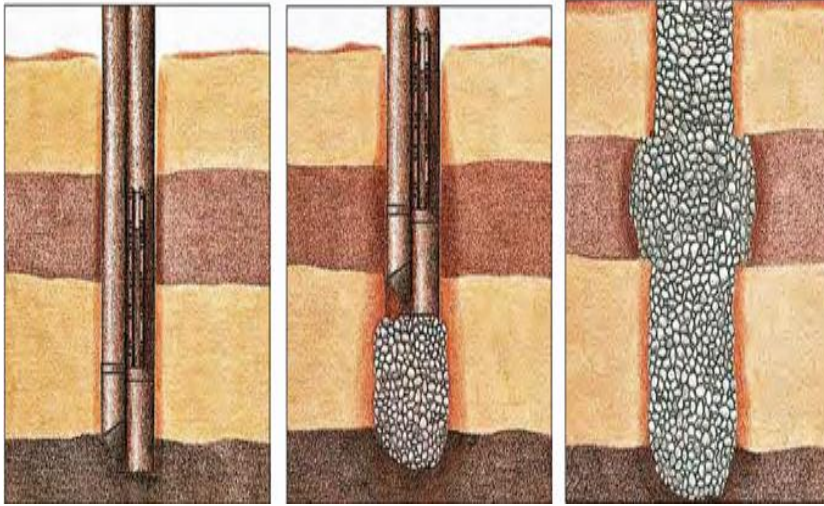
Şekil 2.38 Islak üstten beslemeli taş kolon yöntemi[37]

Uygulanan bu yöntemin avantajlarını şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Ekonomik ve hızlı olması,
- Kohezyonlu sıkı ve sert zeminlerde uygulanabilirliği,
- Kuyu stabilitesinin sağlanması ve istenilen çapta kolon teşkil edilebilmesi,
- Yüksek taşıma kapasitesine sahip taş kolonların imal edilmesi ve zeminde drenajın sağlanabilmesi.

2.2.3.2.2. Üstten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

Üstten beslemeli kuru vibro yerdeğiştirme yönteminin uygulanmasında vibratör istenilen derinlik boyunca hava jeti yardımıyla indirilir. Bu indirme işleminde vibratörün yanında içi boş bir boruda delginin yapıldığı alt kot seviyesine kadar indirilir. Zeminde boşluk oluşturulduktan sonra uygun gradasyona sahip kırmataş malzemesi bu boru içerisinde kuyu tabanına kadar indirilir. Bu yöntemde oluşturulacak kolon çapı zeminin mukavemet ve sıkışma parametrelerine göre değişmektedir. Vibratör yukarı doğru tabakalar halinde sıkıştırma yapılarak taş kolon oluşturulur(Şekil 2.39). “Drenajsız kayma dayanımının $c_u=30-50$ kN/m² aralığında değiştiği daha yüksek dayanımlı ve stabil killerde uygulanmaktadır”[37].



Şekil 2.39 Kuru tabandan beslemeli taş kolon yöntemi[37]

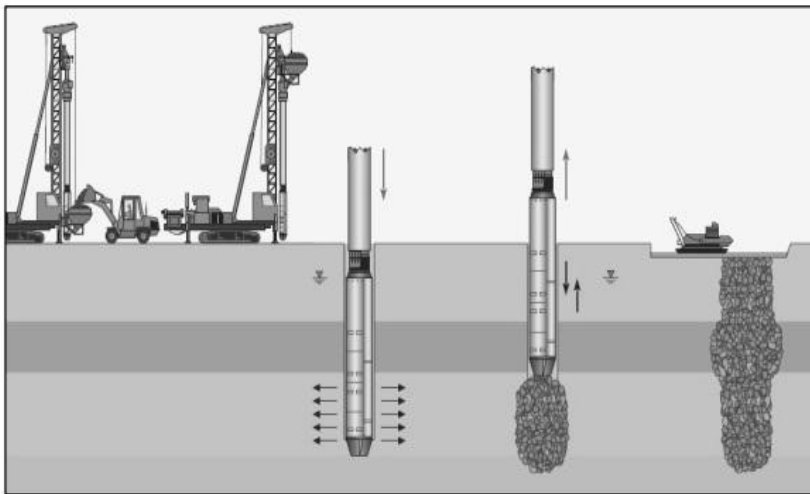
Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en belirgin özelliği zeminin açılması sırasında suyun ve su jetinin kullanılmaması. Bu yöntem daha stabil ve mukavemet parametreleri daha yüksek olan kohezyonlu zeminlerde uygulanması daha başarılı sonuçlar vermektedir. Vibratörün zemin içerisinde ilerlemesi zor olan tabakalarda ise hava jeti kullanılır ve iyileştirme yapılan zeminlerde yeraltı su seviyesinin zeminin iyileştirme derinliğinin altında olması gerekmektedir. Bu yöntem daha yavaş ve zemin iyileştirmenin uzun süre aldığı bir tekniktir. Bu yöntem, diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha küçük çaplarda taş kolonlar elde edilmektedir.



Şekil 2.40 Kuru tabandan beslemeli taş kolon uygulaması[37]

2.2.3.2.3. Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

Zayıf ve yumuşak olan zemin tabakalarında, kuyu stabilitesinin sağlanamadığı zeminlerde ve kuyu yüzeyinde çökmelerin yaşandığı durumlarda bu yöntem uygulanmaktadır. “Bu yöntem kayma dayanımı düşük killerde uygulanmaktadır ($c_u=10 \text{ kN/m}^2$)”[37]. Bu yöntemin uygulanmasında özel bir sistem geliştirilmiştir ve vibratör çelik borunun ucuna monte edilmiş ve besleme kovası tremi borusu şeklinde yerleştirilmiştir. İyileştirme yapılacak derinlik boyunca vibratör indirilir ve besleme kovasından kuyu tabanına taş malzemesi yerleştirilerek iyileştirme sağlanır.(Şekil 2.41’de)



Şekil 2.41 Dipten beslemeli kuru vibro-yerdeğiştirme tekniğinin şematik gösterimi[12]

2.2.4. Vibratörler

Vibratörler uygulama tekniğine göre farklılaşmışlardır ve bunlar hidrolik güçle çalışan veya elektrikli ekipmanlara sahiptirler. Zemin içerisinde ilerlemesini sağlayan titreşim dalgalarını oluşturmak için eksantrik bir kütleri çevrilerek itici bir kuvvet oluşturulur ve bu sayede vibratörlerin zemin içerisinde ileri geri hareket olanağı sağlamaktadır. “Uygulamada kullanılan değişik vibratörlerin boyut ve özellikleri Tablo 2.8’de özetlenmiştir”[12].

Tablo 2.8 Zemin iyileştirmede kullanılan vibratörlerin teknik özellikleri[12]

Ağırlık	2~4 ton
Boy	2~4,5 m
Çap	0,36~0,46 m
Güç	66~160 HP
Frekans	1800~3000 devir/dk
Eksantrik yanal itki	12~28 ton
Amplitüt	7~16 mm
İmalat hızı	10~30 m/saat

2.2.5. İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

- Vibro-Kompaksiyon yöntemi ile yapılan zemin iyileştirmelerinde silt ve kum karışık zeminlerde daha başarılı sonuçlar vermektedir,
- Kil ve siltli zeminlerde ise vibro-yerdeğiştirme yöntemi daha başarılı sonuçlar vermektedir,
- Vibro-Yerdeğiştirme yöntemi stabil zeminlerde uygulandığında daha hızlı ve pratik sonuçlar vermektedir,
- Vibro-yer değiştirmede ıslak yöntem kuru yöntemle göre daha pahalıdır,
- Vibro-Kompaksiyon yöntemi daha çevreci bir tekniktir,

2.2.6. Taş Kolon Malzemelerin Özellikleri

Taş kolon imalatında bulunabilmek için değişik gradasyona sahip kırmataş, çakıl ve kum karışımı malzemeler kullanılmaktadır. “Kırmataşın ayrışmamış, sert Los Angeles aşınma değerinin 5000 rotasyonda %45’ten az (ASTM C131) ve magnezyum sülfat direnci deneyinde (ASTM C88) ağırlık kaybının %15’i aşmayan sert kayalardan elde edilmesi önerilmektedir”[24]. Uygulama yöntemine göre dane çapı üstten beslemeli ıslak sistemde 100 mm, dipten beslemeli kuru sistemde ise kullanılacak gradasyona sahip malzeme dane

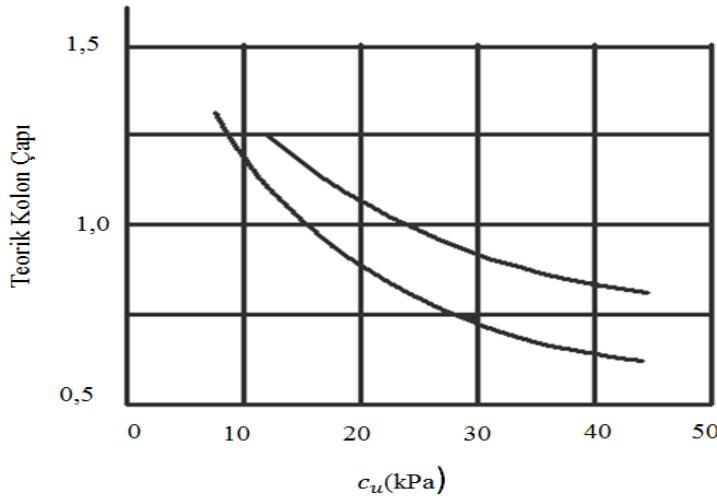
çapı 25 mm ile sınırlıdır. Taş kolon uygulama işleminde kullanılacak malzeme özellikleri açısından uygun gradasyona sahip malzemeler Tablo 2.9’da gösterilmiştir. Dolgu malzemesi olarak alternatif 1 ve 2 seçilmelidir.

Tablo 2.9 Taş kolon uygulamasında kullanılan taş kolon gradasyonu[37]

Elek Açıklığı(inç)	Alternatif 1(%)	Alternatif 2(%)	Alternatif 3(%)	Alternatif 4(%)
Geçen Miktar (%)				
4	~	~	100	~
3,5	~	~	90~100	~
3	90~100	~	~	~
2,5	~	~	25~100	100
2	40~90	100	~	65~100
1,5	~	~	0~60	~
1	~	2	~	20~100
0,75	0~10	~	0~10	Eki.55
0,5	0~5	~	0~5	0~5

2.2.6.1.Taş Kolon Çapı

Taş kolon uygulama tekniğinde farklı çaplarda kolon teşkil etmek mümkündür. Ancak kolon çapları uygulanan zeminin mukavemet özellikleri, imalat tekniğine göre ve uygulandığı derinlik boyunca farklılık gösterecektir bu nedenle oluşacak taş kolon çapı tasarım aşamasında kesin olarak saptanamamaktadır. Taş kolon uygulamalarında kolon imalat yöntemleri ile elde edilen kolon çapları, vibro-yer değiştirme tekniğinde 1000 mm civarında olmaktadır. Tokmaklı imalat tekniğinde ise kolon çapı yaklaşık olarak 800 mm civarında olmaktadır. “Besancon (1984) tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sonucu etkili kolon çapı ile kohezyonlu zeminin kayma mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.42’de gösterilmektedir”[17].



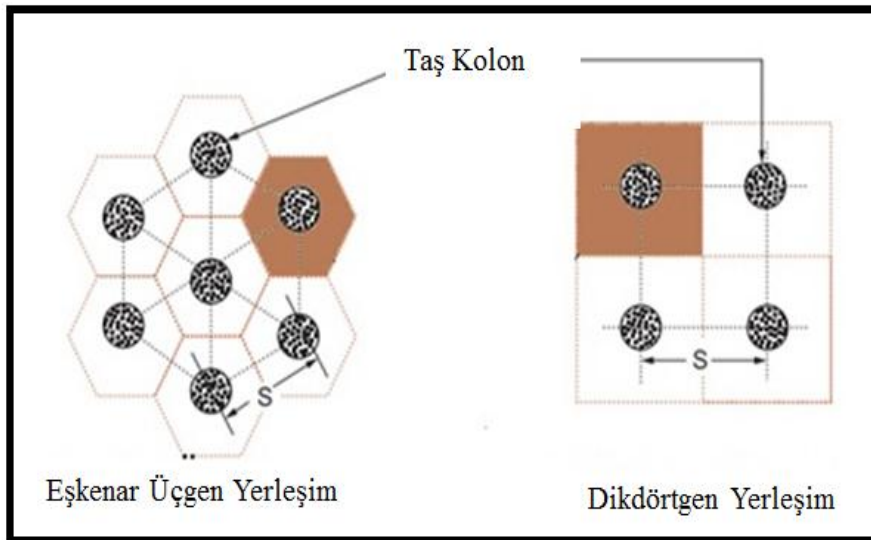
Şekil 2.42 Zeminin mukavemet değerlerinin kolon çapı oluşumuna etkisi[17]

2.2.6.2. Taş Kolonların Yerleşim Aralıkları ve Alan Yerdeğiştirme Oranı

Taş kolon uygulamalarında taş kolonların güçlendirme yapılacak sahada yerleşimleri oldukça önemlidir. Taş kolonlar yerleşim aksı genellikle iki şekilde olmaktadır;

- Eşkenar üçgen yerleşim
- Dikdörtgen yerleşim olarak uygulama teşkil edilebilmektedir.

Ancak uygulama kolaylık olması açısından dolayı genellikle dikdörtgen yerleşim tercih edilmektedir. Şekil 2.43'de taş kolon imalatında yerleşim oranları gösterilmiştir.



Şekil 2.43 Taş kolon eşkenar üçgen dizilimi[35]

2.2.6.3. Taş Kolonların Boyu

Zeminlerin güçlendirilmesinde temel prensip zemin içerisine yerleştirilmiş olan daha rijit yapıların zayıf zemin boyunca uzatılması ve sağlam zemine ulaştırılması esasına göre çalışırlar. Ancak taş kolon yönteminde en ekonomik imalat boyu 6 m ile 10 m arasındadır. Bu durumda taş kolon sürtünme kazığı gibi zemin içerisinde çalışacak ve herhangi kolon uç mukavemeti oluşmayacaktır. Taş kolonlar zayıf zeminlerde teşkil edilirken belirli bir etki derinliğine ulaşacak şekilde imalatı yapılmalıdır. Bunun yanında taş kolonlar boşluk suyunun sönümlenmesini hızlandırarak konsolidasyon süresini azaltır ve zeminde drenaj sağlanmış olur.

2.2.6.4. Taş Kolon Malzemesinin İçsel Sürtünme Açısı

Taş kolon teşkilinde kullanılan malzemenin parametrelerine bağlı olarak içsel sürtünme açısı 40° ile 45° arasında değer almaktadır. Uygulandığı saha şartları ve güvenlik katsayısı ve tasarım açısından içsel sürtünme açısının 38° olarak dikkate alınması önerilmektedir.

2.2.6.5. Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı

Taş kolon yöntemiyle zemin içerisinde rijit elemanların teşkil edilmesinde kullanılacak taş ve çakıl malzemesinin uygun gradasyona sahip olması oldukça önemlidir. Seçilen malzeme çapları 13 mm ile 17 mm arasındaki değerlere sahip olması gerekir ve kullanılan taş malzemesi iyi derecelendirilmiş ve yıkanmış malzeme olmalıdır.

2.2.7. Taş Kolon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

2.2.7.1. Taş Kolon Kullanımının Avantajları

- Çevresel bir zemin iyileştirme yöntemidir ses ve gürültü kirliliği de oluşturmaz ve bu yöntem ile yapılan delgi işleminde minimum zemin çıkarılır.
- Hızlı ve kolay uygulanabilirliği sayesinde ve bulunduğu sahanın zeminini inşaat malzemesi olarak iyileştirme sırasında kullanıldığında oldukça ekonomik sonuçlar üretmektedir. İmalat süresi oldukça kısadır ve hızlı yapılması planlanan inşaatların zeminlerinin güçlendirilmesinde bu yöntem kullanılabilir.
- Drenaj boyunu ve konsolide süresini kısaltmaktadır. Taş kolonlar farklı oturmaları sınırlamaktadır ve kontrol altına almaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde, taşıma kapasitesi yetersiz zemin gruplarında, sıvılaşma riski yüksek sahalarda kolaylıkla uygulanabilmektedir.

- Taş kolonların imalatları tamamlandığında grup halinde çalışan kolonlarda yanal basınç artışından dolayı zeminin drenajsız kayma dayanımı artmaktadır.
- Sünek davranış gösterdikleri için yük taşıma kapasiteleri yüksektir.
- En ekonomik davranışı sergiledikleri durum ise geniş alanlarda ve ince daneli zeminlerde 6 m ile 10 m arasında değişen uzunluklarda uygulanmaları durumunda oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir.

2.2.7.2.Taş Kolonların Dezavantajları ve Sınırlamalar

- Proje tasarımına bağlı olarak derinlik sınırı taşımalarından dolayı istenilen her sahada uygulanamaması,
- Sadece düşey imalatı gerçekleştirilebilir ve geniş bir çalışma sahası gerekmektedir,
- Donma ve çözülmenin yaşanması durumunda olumsuz davranış sergilemektedir ve kolonda bozulmalar meydana gelmektedir,
- Gelişmiş ve standart hale getirilmiş bir kalite kontrol yöntemi yoktur yapılan imalat tecrübeyle ve gözlem yolu ile kontrol edilmektedir,
- Uygulama yapılan sahada dolgu malzemesinin yetersiz olması, maliyet artışına neden olur,
- Taş kolonlar için optimum uzunluk 6 m ile 10 m arasındadır. Daha uzun olarak imal edilmesi sakıncalı olabilir.

2.2.8. Taş Kolonların Davranışını Etkileyen Faktörler

Taş kolon yöntemiyle güçlendirilmiş olan zeminlerin davranışını etkileyen parametreleri şöyle sıralayabiliriz;

- İmalat tekniği,
- Zemin çeşidi,
- Dolgu malzemesinin sahip olduğu özellikler,
- Taş kolonların grup çalışma prensibi,
- Taş kolonlarda yerdeğiştirme oranı olarak ifade edebiliriz.

2.2.8.1.Taş Kolon İmalat Tekniği

Taş kolon yöntemiyle iyileştirilen zayıf zeminlerin uygulanan imalat tekniği taş kolon davranışını önemli oranda etkileyecektir. Uygulanan imalat tekniği zemin içerisinde

oluşturulan taş kolonun çapını belirleyecektir. Benzer zemin gruplarında taş kolon teşkil etme metotları ile zemin ıslahı gerçekleştirildiğinde vibro-yerdeğiştirme tekniğiyle en büyük çapa sahip kolonlar elde edilebilmektedir. Diğer bir imalat tekniği olan vibro öteleme yöntemiyle elde edilen kolon çapı da tokmaklı yöntem veya tamponlu yöntem ile elde edilen kolon çapına göre daha büyük olmaktadır. Vibro-yerdeğiştirme ve vibro-öteleme yöntemleriyle yapılan imalatlarda kolon malzemesi oluşan düşey itki sayesinde hem düşey yönde hem de yatay yönde hareket edecektir. Bu sayede zemin içerisinde radyal yönde sıkışma sağlayacaktır. Tokmaklı yöntemde ise zemin yalnızca düşey olarak sıkıştırılmış olacaktır ve zemindeki yanal hareket vibrasyonlu yöntemlere göre daha az olacaktır. Genel olarak kolon etrafındaki zemin tokmaklı yöntem ile en az örselenmiş olur. İmalat sırasında meydana gelen;

- Yumuşak zeminin taş kolon malzemesiyle karışması durumunda, taş kolon malzemesinin taşıma kapasitesi düşer ve geçirimsizliği azalır.
- Vibro-yerdeğiştirme yöntemiyle yapılan imalatta su jeti kullanıldığı için zemin malzemesi ile granüler taş kolon malzemesinin karışması engellenir ancak bu durum kuru yöntem ile yapılan imalatlarda oldukça büyük bir problemdir ve engellenmesi çok zordur.
- Alttan beslemeli ve tokmaklı yöntemler ile yapılan imalatlarda kılıf kullanılarak zemin malzemesinin taş kolon malzemesi içine sızması önlenir.

2.2.8.2.Zemin Tipi ve Konsolidasyon Etkisi

Taş kolon imalatı yapıldığı sahanın zemin parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Taş kolon teşkil edildiği zeminin oluşturduğu çevre basıncı ile taş kolonun taşıma gücü ve mukavemet değerleri ile doğru orantılıdır. Zemin ile taş kolon arasındaki gerilme yoğunluğu, rasyonel olarak taş kolon ve zemin malzemesi arasındaki ilişkinin sıklık oranına eşdeğerdir. Zemin daneleri arasındaki boşluk oranı da taş kolon davranışını etkilemektedir. Güçlendirilmiş olan zemin üzerine herhangi bir yükleme yapıldığında, zeminin sıkışma oranı düşük ise etki edilen yükleme kolon ve zemine eşit olarak dağılır. Taş kolonların bir diğer işlevi ise zemin içerisinde düşey dren özelliği göstermesidir ve bu durumda zemine yapılan bir yüklemde zeminde oturmalar meydana gelir ve taş kolonlara gelen yük zamanla artış gösterecektir. Güçlendirme ve konsolidasyon hızının artmasında oluşan bu birleşik etki kolonların en önemli özelliğidir. Mühendislik özelliği açısından taş kolonların performansının analizi ve tahmini için kolonda oluşan sıvılaşma zonu dikkate alındığında

kum drenlerdeki radyal konsolidasyon teorisi kullanılabilir. “Ancak yöntemin bir sonucu olarak ortaya çıkan zemindeki etkilenme ve sıkışma sebebiyle sıvılaşma zonunun gerçekçi şekilde tahmini zordur”[27].

2.2.8.3.Taş Kolonlarda Kullanılan Dolgu Malzemesi

Taş kolon yönteminde kullanılacak dolgu malzemesi oldukça önemlidir. Kullanılacak malzeme kolonun taşıma gücü ve sıkışma derecesini etkileyecektir. Kolon malzemesinin seçiminde çok sayıda seçenek mevcuttur ancak seçilecek olan dolgu malzemesinin imalat tekniğine ve bulunma sıklığına bağlıdır. Agregası, kırmataş, kum malzemesi imalat sırasında kullanılacak en ekonomik malzemedir ancak bu malzemenin bulunmaması durumunda ise beton, cüruf ve tuğla vb. malzemeler kullanılabilir. İmalat için kullanılacak malzemenin kolon performansını etkilemeyecek ve iyi derecelenmiş malzeme olmasına dikkat edilmelidir.

“Kolon imalinde taş (ya da çakıl) kullanımı ile kum kullanımı karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılabilir(Şekil 2.44’de)”[27];

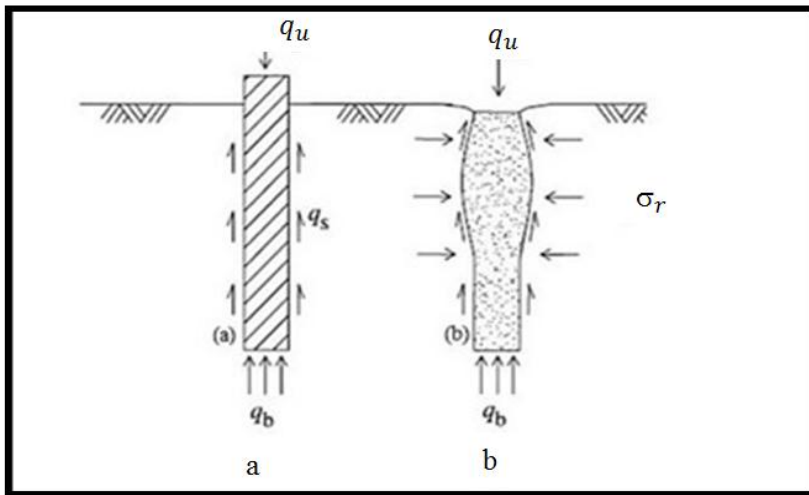
- Taş kolonlar kum kolonlara göre daha yüksek içsel sürtünme açısına sahip olurlar. Dolayısıyla aynı yerel zeminde, taş kolonun mukavemeti kum kolondan daha yüksek olur.
- Taş kolonların rijitliği kum kolonlardan daha fazladır dolayısıyla gerilme konsantrasyon oranı ve buna bağlı olarak da oturma azalışı daha yüksektir.
- Kum kolon doğal bir filtre tabakası oluşturur, kolonu çevreleyen zeminin kolona nüfuz etmesini ve buna bağlı olarak tıkanmayı engeller. Dolayısıyla taş ya da çakıl malzemenin de filtre özelliğini sağlayıp zeminin kolona nüfuz etmesini engelleyecek derecelenme ve dane çapı dağılımına sahip olması gerekmektedir.



Şekil 2.44 Taş kolon imalatında kullanılan granüler malzemesi[38]

2.2.8.4. Grup Etkisi

Taş kolonların tekil imalatından ziyade servis yükleri altında etkileşim içinde olacak grup halinde imalatlarının gerçekleştirilmesi gerekir. Taş kolonlar uygulama alanları, geniş alanlarda radye temellerin altında ve yapılan dolgu zeminlerin iyileştirilmesinde uygulanmaktadır. Tek olarak imal edilmiş taş kolonun servis yükleri altında, zayıf zemin tabakaları içerisinde oturma yapar ve bu durumda kolon ile zemin yüzeyi arasında kayma gerilmeleri oluşur(Şekil 2.45’de).



Şekil 2.45 Taş kolon ile sürtünme kazığının yük transfer mekanizmasının karşılaştırılması[27]

- a) Yüklendiştirme sirtünme kazığındaki gerilmeler,
- b) Yüklendiştirme taş kolondaki gerilmeler,

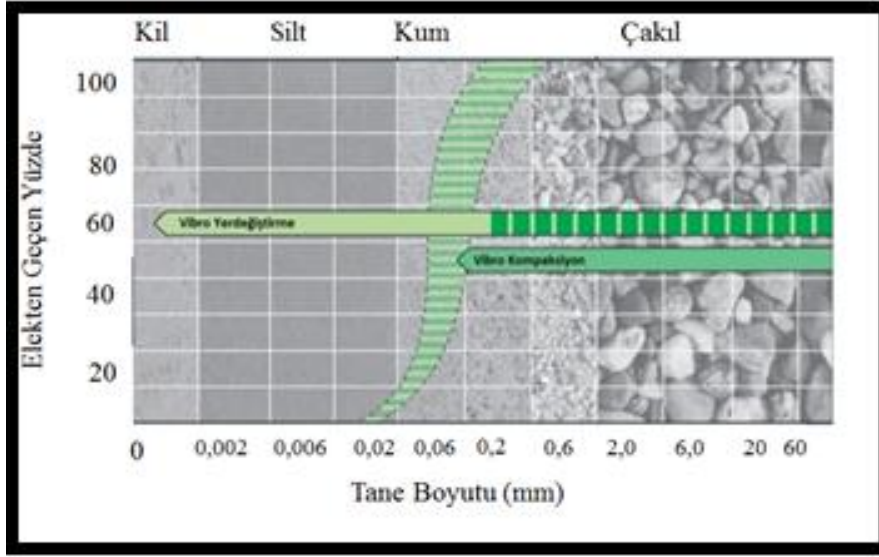
2.2.8.5.Yerdeğıştirme Oram

Taş kolon imalatında sıkıştırılan granüler taş malzemesinin zemin yanal çeperlerine uyguladığı itki ile bağlantılıdır. Bu durum Goughnour(1983) tarafından şu şekilde ortaya konulmuştur. Kolon çapının, kolonlar arasındaki mesafeye oranla çok küçük olduğu durumlarda zemindeki radyal şekil değıştirmeler çok küçük olacak ve toprak basıncı katsayısı, K_0 'a çok yakın bir değıer alacaktır. “Taş kolon çapının kolonlar arası mesafeye yaklaşması durumunda, radyal şekil değıştirmeler düşey şekil değıştirmelere nazaran büyük olacak ve toprak basıncı katsayısını değıeri $1/K_0$ 'a yaklaşacaktır. Dolayısıyla genel amaçlı uygulamalarda toprak basıncı katsayısının değıeri $1/K_0$ ile K_0 arasında alınabilir”[27].

2.2.9. Taş Kolonların Uygulama Alanları

Taş kolon yöntemi yumuşak zemin, turba zeminler, siltli kumların, gevşek kumlu granüler zeminlerin ve serbest dolguların iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Taş kolon yöntemiyle iyileştirme yapılan alanlar(Şekil 2.46'da);

- Serbest dolgular, barajlar, geniş yükleme yapılan alanlar,
- Yapı temellerinde,
- Silo, depo ve tankların temel zemini,
- Enerji nakil hatlarının temel zeminlerinin iyileştirilmesi şeklinde ifade edebiliriz.



Şekil 2.46 Taş kolon tekniklerinin dane dağılımına bağlı olarak uygulanabilirliği[12]

2.3.Geopier Yöntemi

Diğer bir zemin iyileştirme yöntemi olan geopier kolonlar uygulama noktasında yirmi yıldan fazla bir süredir ilk uygulamaları Amerika’da karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem ile zayıf zemin tabakalarında meydana gelen oturmaları sınırlandırmak veya kontrol altına almak ve zeminlerin taşıma kapasitesinde iyileştirmeler sağlamak için geliştirilmişlerdir. Geliştirilmesinin bir diğer nedeni ise kısıtlı sayıdaki zemin iyileştirme yöntemleri için yeni bir alternatif oluşturmak ve yapı maliyetini düşürecek farklı bir yöntem elde etmektir. Geopier yönteminde önceden hazırlanmış olan kuyulara ince daneli agrega malzemeleri ile doldurulur ve konik uçlu çekiç ile agrega tabakaları tokmaklanarak sıkıştırılır ve kolonlar meydana getirilmiş olur. Zemin içerisinde istenilen standartlarda sıkıştırılmış olan geopier kolonların, sıkıştırma yapılan bölgenin yataklanma katsayısını arttırmaktadır ve sıkıştırma sırasında kuyunun çeperlerine yanal basınç uygulayarak zemin tabakaları boyunca şekil değiştirme ve zemin içindeki boşlukların azalmasını sağlayacaktır.

2.3.1. Geopier Yöntemi Literatür Taraması

Çalışma kapsamında bu başlık altında daha önce yapılan araştırmalar ve laboratuvar deneyleri incelenmiştir. Geopier kolonları son dönemde artan bir ivme ile gelişim göstermektedir. Alternatif bir zemin iyileştirme yöntemidir ve diğer zemin iyileştirme yöntemlerine oranda daha yüksek bir enerji ile taş malzemesi zemin içerisinde sıkıştırılmaktadır. Bu nedenle kullanım alanı şu anki imalat tekniğine bağlı olarak sınırlamalar mevcuttur ancak gelişen teknolojiyle uygulama yelpazesi artacaktır. Yapılan örnek çalışmalardan biri olan malzeme ile oluşturulan dolgu sahasının darbeli kırmataş kolonları ile güçlendirilmesi sonucunda servis yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. “Seçilen vaka örneğinde bir liman konteynır stok alanı olarak kullanılacak bölgede, yüzeyden 16 m derinliğe kadar yer alan birimlerde rijit DKK elemanları ile sıvılaşmaya karşı direnci arttırılmış bir tabaka oluşturulması, statik ve deprem yükleri etkisinde oturma miktarlarının azaltılması ve farklı oturmaların minimize edilmesi hedeflenmiştir”[39]. Asaoka (1978) yöntemiyle arazide yapılan oturma değerleri kullanılarak nihai konsolidasyon tespit edilmiştir. Sahada yapılan yükleme sonucunda meydana gelen oturmaların uniform dağılım gösterdiği ve oturmaların büyük oranda azaldığı tespit edilmiştir. Geopier kolonların zayıf zeminlerin iyileştirilmesi sonucunda teşkil edilen rijit kolonların istenilen taşıma gücünü sağladığını tespit etmek adına imalatı yapılan deneme kolonları yükleme testi uygulanır ve taşıma kapasite durumu belirlenir. Yapılan diğer bir

çalışmada ise incelenen bir vaka analizinde Gaziantep İli örneği incelenmiştir. İncelenen çalışmada, 4.Organize Sanayi Bölgesi'nde yapımı tamamlanan bir fabrika binasının temel zemini geopier sistem ile güçlendirilmiştir. Söz konusu yapının tekil temelleri altında teşkil edilen darbeli kırmataş kolonları yükleme deneylerine tabi tutulmuştur. Teorik ve sayısal analiz yöntemleri ile geopier kolonların taşıma kapasitesi ve gösterdikleri deformasyon davranışları yapılan yükleme deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, “Yapılan ilk değerlendirmeler ışığında 3,6 m x 3,6 m boyutlu bir tekil temelin 150 kPa net gerilme altında yaklaşık 10 cm oturmaya maruz kalacağı anlaşıldığından zeminin iyileştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmış ve DKK imalatına karar verilmiştir. Temel altında 5,5-7,5 m boyunda ve 1,1 metre aralıkla uygulanan 50 cm çaplı DKK uygulaması sonrası oturmaların 2 cm mertebelerine ineceği öngörülmüştür”[40]. Yerinde yapılan yükleme deneyleri ile sayısal analiz metotları kullanılarak elde edilen sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Geopier kolonlar köprü yaklaşım dolgularının altındaki zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde gösterdikleri performansının araştırılmasına yönelik yapılan çalışmada ise Uşak-Afyon Devlet Yolu üzerindeki ve yapımı düşünülen Balmahmut Üst Geçit Köprüsü ve Yaklaşım Dolguları projesi geopier yöntemi kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında 11,0 m x 31,40 m boyutlarında bir menfez tipi üst geçit köprüsü 9,0 m yüksekliğe ulaşan yaklaşım dolguları yapılmıştır. Yapılan ilk değerlendirmeler sonucunda yaklaşım dolgusu altında yaklaşık 70 cm mertebelerin de konsolidasyon oturması meydana geleceği anlaşılması üzerine geopier yöntemiyle zeminin güçlendirilmesine karar verilmiştir. Yaklaşım dolgusu altında “50 cm çaplı DKK uygulaması sonrası oturmaların 5–10 cm mertebelerine ineceği öngörülmüş ve sahada yapılan ölçümler sonucunda bu ön hesaplamalarla uyumlu olarak oturmalar servis yükleri altında öngörülen aralığın üst sınırlarına yakın olarak 5–10 cm mertebelerinde gerçekleşmiştir”[41].

2.3.2. Geopier Yöntemi Uygulama Alanları

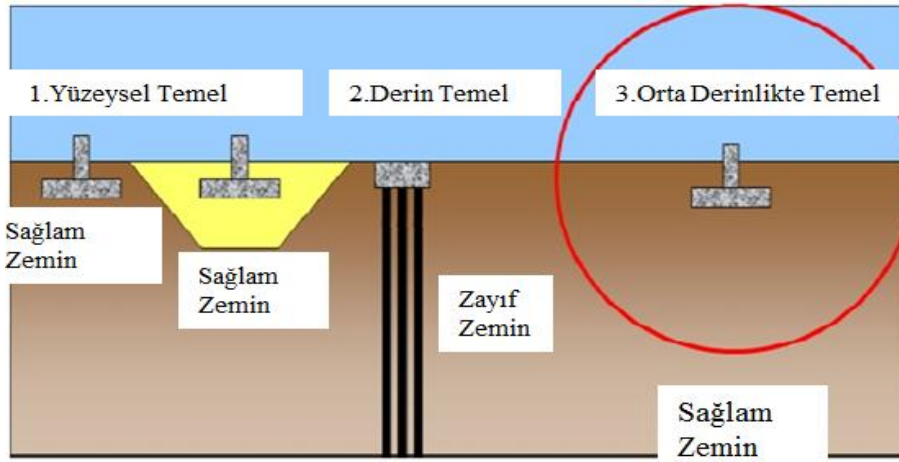
Kohezyonsuz zeminlerde açılan kuyu içerisine yerleştirilen kırmataş malzemesinin tokmaklanarak sıkıştırılır ve zeminin iyileştirilmesi sağlanır. Kohezyonlu zemin sınıflarında ise zemin içine daha rijit elemanlar yerleştirilerek iyileştirme sağlanır ve darbeli kırmataş kolon ile iyileştirme yapılan bir sahada artış gösteren parametreler şu şekildedir;

- Zeminin taşıma kapasitesi artmaktadır,
- Zeminde meydana gelen farklı oturmaların sınırlandırılmaktadır,
- Şev duyarlılığın artırılması ve stabil hale getirilmesi,

- Zeminin sıkışa birirliğinin azaltılması,
- Drenaj boyunun azaltılması ile konsolidasyon süresinin kısaltılması,
- Kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesi olarak tarif edebiliriz.

2.3.3. Geopier Yöntemi Uygulama Yöntemleri

Geopier kolon oluşturma imalatından projede belirtilen derinlik boyunca delici ekipman ile zeminde foraj çukuru açılır. Proje belirtilen gradasyonu uygun malzeme ile kuyu dibinde altlık oluşturulur. Daha sonra 30 cm tabakalar halinde kırmataş malzemesi kuyu dibine indirilebilir ve özel tasarlanmış olan konik uçlu bir çekic ile kırmataş malzemesi tokmaklanarak kuyu içerisindeki malzemeler tabakalar halinde sıkıştırılır ve bu işlem derinlik boyunca tekrarlanarak zayıf zemin iyileştirilmiş olur. “Darbeli kırmataş kolonlar; Şekil 2.47’de gösterildiği gibi birçok mühendislik yapısının desteklenmesini orta derinlikte temel çözüümü ile sağlamaktadır”[17].



Şekil 2.47 DKK elemanlarının diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması[42]

Geopier kolonlar birçok zemin gruplarının güçlendirilmesinde kullanılabilir. Bu zemin gruplarını Şekil 2.10’deki gibi sınırlandırılmıştır. Geopier yönteminin uygulama alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- Karayolları projelerinde,
- Tank temel zeminlerinde,
- Endüstri yapılarında,
- Yaklaşım dolgularında uygulanabilmektedir.

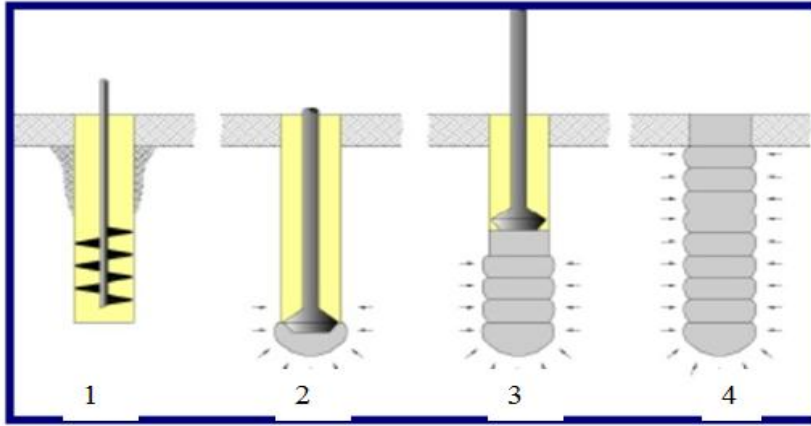
Tablo 2.10 DKK teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları[17]

Sistem					
Geopier					
Geopier 3					
Impact					
Rampact					
Zemin Türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil	Organik

2.3.4. Geopier Kolon Çeşitleri ve İmalat Aşamaları

Geopier yönteminin imalat aşamaları dört ayrı safhadan meydana gelmektedir. Projede belirtilen derinliğe boyunca teşkil edilecek kolon çapı genişliğinde kuyu açılır. Uygun gradasyona sahip kırmataş veya agrega malzemesi kuyu dibine malzeme serilir ve bu serme işlemi 30 cm ile 50 cm arasında değişen kalınlıkta zemin yüzeyine kadar tekrarlanır(Şekil 2.48’de). Kuyu içerisindeki kırmataş malzemenin düşey yönde sıkıştırılması ise yanal yönde hareket gösterecektir ve bu hareket tabakalar halinde zayıf zemin içerisindeki boşlukların azalmasına ve kapasite artışına neden olacaktır ve bu durum geopier kolonlarının imalatı tamamlandıktan sonra bütün saha boyunca zeminde ıslahın gerçekleştirildiği gözlenecektir. Bazı durumlarda zeminde güçlendirme yapılırken kırmataş ile çekme donatısı da kullanılacaktır. “Bu ise zayıf zemine ilave edilen rijit elemanların çekme donatıları ile beraber kullanıldığı zaman rüzgar ve deprem yükleri altında ilave çekme direnci de sağlamaktadır”[43]. Darbeli kırmataş kolonları üç farklı yöntem ile oluşturulabilir bunlar;

- Geopier Sistemi
- Impact Sistemi ve
- GeoConcrete Sistemi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.48 Geopier sistemlerinin imalat adımları [43]

Şekil 2.47’de geopier kolonlarının imalatı şematik gösterimi yapılmıştır. 1. Adımda zayıf zemin tabakası istenilen derinlik boyunca foraj makinesi ile delinir ve 2.adımda ise uygun gradasyona sahip kırmataş malzemesi ile kuyu dibine altlık oluşturulur ve darbeleme enerjisi ile kırmataş malzemesi sıkıştırılır. Diğer bir adım olan 3.adımda ise sıkıştırma işlemi yüzeye kadar devam ettirilir ve 4.adımda zemin içerisinde teşkil edilmiş geopier kolonu görülmektedir.

2.3.4.1. Geopier Sistemi ile Kolon Oluşturma

Geopier sistemi zeminde istenilen çap da ve derinlik boyunca çıkarılan zayıf zemin miktarı kadar zemine kırmataş malzemesi ilave edilerek zayıf zemin tabakaları güçlendirilmiş ve zemin ile kırmataş malzemesinden oluşan kompozit davranış sergileyen bir zemin elde edilir. Bu yöntemin uygulanması sonrasında zemindeki farklı oturmaların sınırlandırılması ve kontrol altına alınması sağlanmış olur. Zeminin sıkışabilirliğinin azaltılması ile birlikte zeminde büyük oranda taşıma kapasitesi artışı da sağlanmış olur.

2.3.4.1.1. Geopier Sistemi İmalat Yöntemi

Zayıf ve yumuşak zeminlerde, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zemin gruplarında ve taşıma kapasite sınırlı olan zeminlerin bu parametrelerinin geliştirilmesi için zemin içinde rijit elemanların teşkili ile mümkün olacaktır. Burgu ekipmanı ile zeminde delgi işlemi tamamlandıktan sonra zemin içine foraj hacmi kadar yerleştirilen kırmataş malzemesini düşey darbeleme enerjisi ile sıkıştırma prensibine dayanmaktadır ve bunun sonucunda zeminde meydana gelen dinamik yer değiştirmeler kontrol altına alındığı

gözlenebilir(Şekil 2.49'da). Darbeli kırmataş yöntemi ile projede belirtilen mühendislik parametreleri karşılanabilmektedir.

- İmalat gerçekleştirilirken 1,5 m ile 10 m arasında yapılan burgu ile zayıf zemin çıkarılır.
- Önceden hazırlanmış olan kuyu dibine yataklanma sağlamak için geniş bir altlık oluşturulur ve daha sonra uygun gradasyona sahip malzeme ile zemin profili boyunca kırmataş doldurularak patentli itme başlığı ile darbeleme yapılır. Zemin içerisinde bu sayede rijit geopier kolonlar oluşturulmuş olur. Yapılan darbeleme işlemi sonucunda yanal çeperlere basınç yapan kırmataş malzemesi sayesinde zemin sıkıştırılmış olur.
- Geopier yöntemiyle sığ temellerin güçlendirilmesi, şev stabilitesinin sağlanması ve köprü yaklaşım dolguların iyileştirilmesinde büyük avantajlar sağlamaktadır. Servis yüklerinin oluşturduğu büyük gerilmelerin zemin tabanlarında karşılanamadığı durumlarda darbeli kırmataş kolonları ile bu gerilmeler kontrol altına alınabilir.



Şekil 2.49 Geopier yöntemi ile kolon oluşturma[42]

2.3.4.2. Impact Sistemi ile Kolon Oluşturma

Impact Sistemi zeminlerin iyileştirilmesini imalat tekniği olarak, dipten beslemeli kuru sisteme benzetebiliriz. İyileştirilecek zayıf zeminin alt kotuna kadar mandrel indirilir ve mandrelin içinden kuyu dibine boşaltılan kırmataş malzemesi darbeleme enerjisi ile sıkıştırılır ve bu işlem yüzeye kadar devam ettirilir. Böylece zayıf zemin içerisinde geopier kolonlar oluşturularak zeminin güçlendirilmesi sağlanır. Diğer zemin iyileştirme tekniğinde anlattığımız gibi mandrelin darbeleme enerjisi ile kırmataş malzemesine uyguladığı düşey itki sayesinde, kırmataş malzemesi zeminin yanal çeperlerine basınç uygulayarak zemin

danelerin birbirine yaklaşmasını sağlar. Böylece zayif zeminin sıkışabilirliği azaltılmış ve kontrol altına alınmış olur. Bu yöntemin uygulandığı bölgede şu faydaları sağlanmaktadır;

- Toplam ve farklı oturmalar kontrol altına alınmış olur,
- Birleşik zemin tabakalarının taşıma kapasitesi iyileştirilmış olur,
- Düşey drenaj boyu azaltılarak konsolidasyon süresi azaltılmış olur,
- şev ve serbest dolguların stabil hale getirilmesinde kullanılır,
- Sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılır.

Bu yöntem anlattığımız diğer iki yöntemden farklı olarak, imalat sırasında kullanılan malzeme özellikleri noktasında jet grout kolonlarına benzer bir yönü de bulunmaktadır. Turba zeminler, yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde zemin içerisinde oluşturulan geopier kolonların rijitliğini arttırmak için imalat sırasında grout harcı kullanılabilir. İçi boş olan mandrel projede gösterilen imalat derinliğine indirilir ve ilk olarak çimento groutu daha sonra da imalat tekniğine uygun gradasyona sahip kırmataş malzemesi ile doldurulur. Bu işlem tamamlandıktan sonra mandrelin darbeleme enerjisi ile düşey itki sağlanır ve sıkıştırma sağlanır. “DKK elemanlarının imalatında çimento groutlu kırmataş karışımının darbelenmesi ile granüler malzemenin sıkışması ve kolon çevresindeki zeminde yanal gerilmelerin artması sağlanır”[44].

2.3.4.2.1. Impact Sistemi İmalat Yöntemi

Impact imalat yöntemi daha derin tabakalarında iyileştirme olanağı sağlamaktadır. Darbeleme enerjisi ile düşey itki sağlayan bir yöntemdir. Dolgular, şev stabilitesinde, zeminlerin taşıma gücü ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Impact tekniğiyle zeminlerin güçlendirilmesine ait şematik gösterim şekil 2.50’de verilmiştir. İmalat tekniği olarak şu adımlar takip edilmektedir;

- Yüksek kapasiteye sahip patentli mandrel ve düşey itki yardımıyla zemine çakılır ve çakma derinliği olarak 3 m ile 12 m arasında değişmektedir. Ancak bazı özel durumlarda maksimum 18 m derinliğe kadar inilebilir.
- Mandrel borusu içerisinde kırmataş malzemesi doldurulur ve mandrel çakma derinliğine indirilir. Mandrelin her 100 cm yukarı yönde düşey hareketi ve 67 cm aşağı yönde düşey hareketi ile 33 cm’lik bir sıkıştırma tabakası oluşturulmuş olur ve bu işlem derinlik boyunca uygulanır.
- Yöntem zeminin açılmasında ve sıkıştırma sağlaması sırasında herhangi bir kimyasal malzeme kullanılmadığı için oldukça çevreci bir yöntemdir.



Şekil 2.50 Impact Sistemi ile Darbeli Kırmataş Kolon İmalatı[39]

2.3.4.3. GeoConcrete Sütunları ile Kolon Oluşturma

GeoConcrete yöntemi forajsız ve donatısız beton kolon oluşturma sistemi olarak isimlendirilir. GeoConcrete elemanları yüksek modüllü ve yüksek mukavemete sahip rijit elemanlardır ve şematik gösterimi Şekil 2.51’de olduğu gibidir. Ağır servis yüklerine sahip temel zeminlerinin iyileştirilmesinde kullanılırlar. Ekonomik bir yöntem olmasının yanında jet grout ve derin iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen bir yöntemdir. Yöntem ile turba zeminler, yumuşak ve zayıf kil ve silt tabakları, serbest dolgular ve yeraltı suyu seviyesi altındaki zeminler iyileştirilebilmektedir.

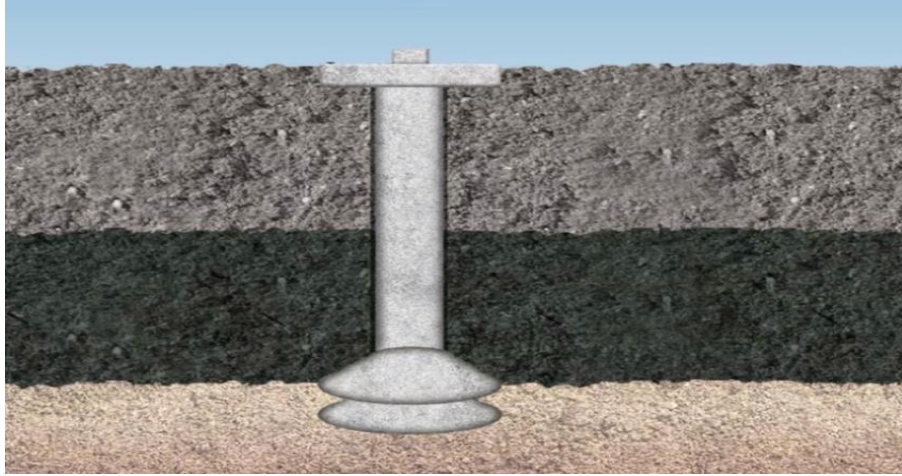


Şekil 2.51 GeoConcrete kolonların imalat tekniği[42]

2.3.4.3.1. GeoConcrete Sütun Sistemi İmalat Yöntemi

GeoConcrete sütun sistemi ile zayıf zeminler güçlendirilir. Bu yöntem kazık ve jet grout yöntemine alternatif olarak üretilmiş ve oldukça ekonomik bir iyileştirme yöntemidir. Yöntemin imalat tekniği adımları şu şekildedir(Şekil 2.52’de);

- Zemin içerisinde boşluk oluşturulacak şekilde mandrel zemine çakılır ve mandrelin ucu kapatılır. Böylece zemin malzemesinin mandrel içine girişi engellenmiş olur. Güçlendirme yapılacak zemin kotunun alt seviyesine kadar inilir ve bu uygulama tekniği kullanılarak 18 m'ye kadar iyileştirme gerçekleştirilir.
- Mandrel kontrollü basınç altında boru içine beton malzemesi yerleştirilir. İyileştirme sağlanacak zeminin dip kısmına indirilir ve dip soğanı oluşturulur. Daha sonra mandrelin 100 cm yukarı hareketi ve 67 cm aşağı yönde hareketi ile 33 cm tabakalar halinde zemin iyileştirme sağlanır. Zeminin yataklanma katsayısının artması için dip soğanı kolon orta bölgesinde veya yüzeyinde de oluşturulabilir.



Şekil 2.52 Geoconcrete sütun tekniğiyle teşkil edilmiş kolon[45]

2.3.5. Darbeli Kırmataş Kolon Yapımını Etkileyen Parametreler

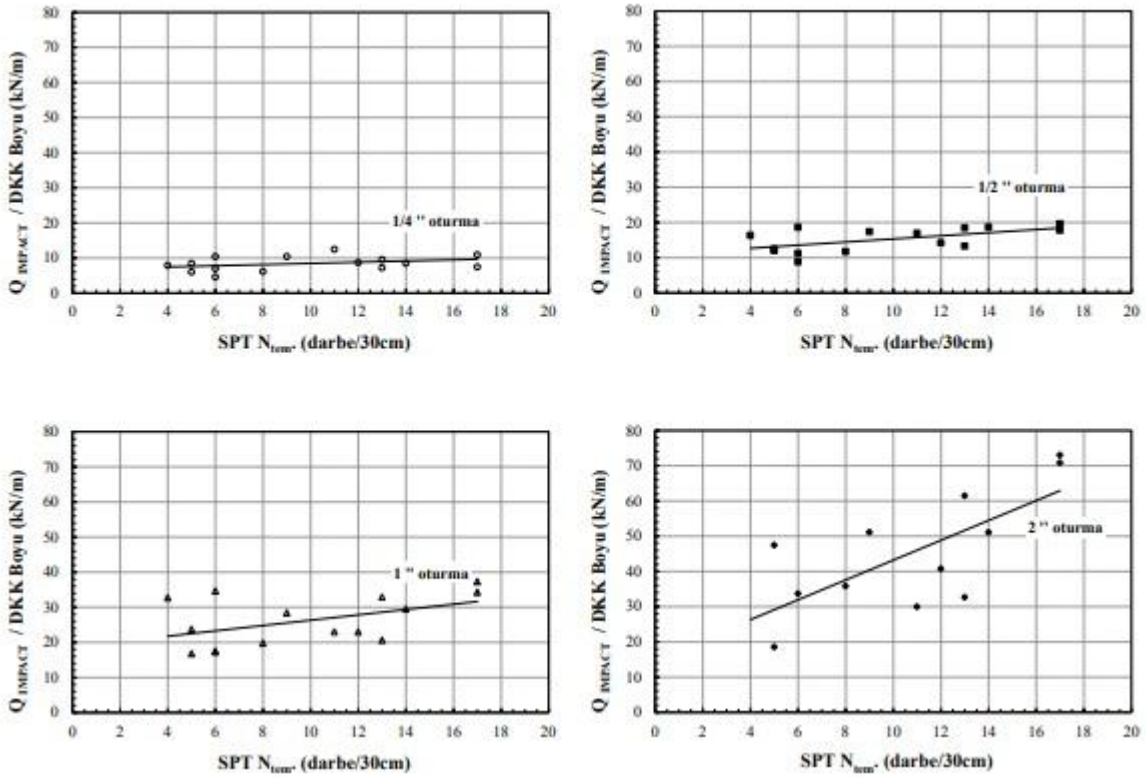
2.3.5.1. Geopier Kolon Çapı

Geopier kolon imalatında kullanılan kolon çapı uygulama yapılan zeminin mukavemet parametrelerine ve oluşan servis yüklerine bağlıdır. Ancak yapılan önceki çalışmalara göre zeminin kazılarak kolonun teşkil edilmesi durumunda oluşan kolon çapı 76 cm ve stabilite sorunu yaşanan ve kendini tutamayan zemin gruplarında ise yapılan kılıf imalatı kolon teşkilinde yaklaşık 50 cm çapında kolon elde edilmektedir.

2.3.5.2. Geopier Kolon Boyu

Darbeli kırmataş imalat tekniğine göre ve uygulanan zeminin mukavemet özelliklerine göre 1,5 m ile 10 m veya 3 m ile 12 m'ye kadar iyileştirme sağlanabilmektedir. Bazı özel durumlarda ise 18 m kadar zeminde güçlendirme sağlamaktadır. Darbeli kırmataş kolonları

ile yumuşak ve katı kil zeminlerde yükleme deneyleri yapılmıştır ve kolon boyu 8,0 m ile 16,5 m arasında değişmektedir. Impact Geopier sistemi ile imalatı teşkil edilmiş olan tekil kolonlar üzerinde yükleme deneyleri yapılmıştır. Güçlendirme yapılan zemin tabakalarında kolon boyları ile taşıma gücü ve rijitlik değerleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 2.53'de yük kapasitesi ile darbeli kırmataş kolonları arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuç kısmında belirtildiği üzere kolon boyu ile normalize edilen kolon direncinin yapılan teorik varsayımlar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

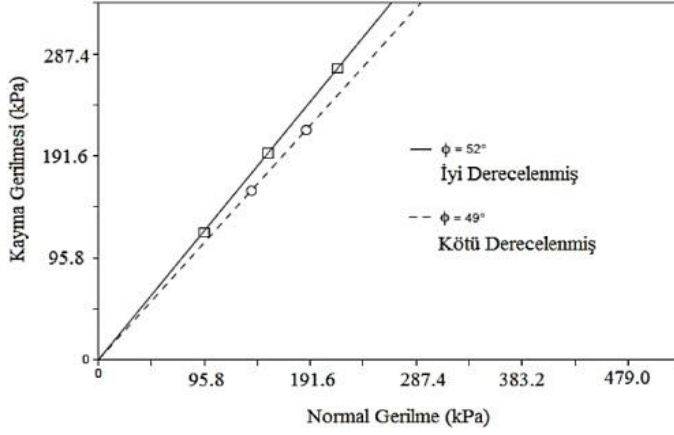


Şekil 2.53 $Q_{\text{impact}} / \text{DKK Boyu} - \text{SPT } N_{\text{tem}}$. [46]

2.3.5.3. Geopier Kolon İçsel Sürtünme Açısı

Geopier kolonlarının üç eksenli kesme deneyi ve arazi sonuçlarına ihtiyaç vardır. Araziden alınan numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyi ve kesme deneyleri yapılarak kolonların özellikleri belirlenmektedir. Yapılan laboratuvar kesme deneyleri sonuçlarında kullanılan malzeme granlometresine bağlı olarak ince dane oranının kullanılmadan yapılan kolon teşkilinde mukavemet özellikleri açısından değerlendirildiğinde, içsel sürtünme açısı 49° ve ince dane oranı %5 ile %10 arasında ince dane oranına sahip malzeme kullanılarak imal

edilen kolonlarda ise içsel sürtünme açısı 52° olmaktadır. Şekil 2.54'de laboratuvar deneyleri yapılan daneli kırmataş kolonlarının kayma dayanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.54 Arazi kesme deneyi yapılmış DDK kolonları[17]

2.3.5.4. Darbeli Kırmataş Kolon Malzemesinin Dane Çapı

Darbeli kırmataş kolonların teşkilinde akma dayanımı ve ASTM D-1143 yükleme standartlarını sağlamış olması gerekmektedir. Darbeli kırmataş kolon imalatında kullanılan malzemenin çapı oldukça önemlidir. Kolon imalatında kullanılan malzemenin gradasyon çapı minimum 13 mm ve maksimum 38 mm değerleri arasında değişmektedir (Şekil 2.55'de).



Şekil 2.55 Darbeli kırmataş kolonlarının imalatında kullanılan kırmataş malzemesi[47]

2.4.Geosentetikler

Geosentetikler, Geoteknik Mühendisliğinde günümüzde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Geoteknik Mühendisleri için yeni çözüm anlayışı sunan, hızlı, kolay ve kalıcı çözümler üreten bunun yanı sıra projeler için maliyet kriterinin düşürülmesi açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Karayollarının inşasında, yol güzergahının belirlenmesi artık oldukça zor hale gelmiştir. Arazi rayiç bedellerinin yüksek olması, kamulaştırma işlerinde yaşanan zorluklar ve bunun yanında mevcut sahaların problemlili zeminlerden oluşması nedeniyle planlanan projelerin gerçekleştirilmesinde büyük zorluklar ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle zayıf zemin sahalarının güçlendirilmesi için ya derin temel uygulamasına geçilmeli ya da zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak saha güçlendirilmeli bu iki durum ise ekonomik açıdan her zaman tercih edilen mühendislik çözümü olmayabilir.

2.4.1. Geosentetiklerin Kullanım Alanları

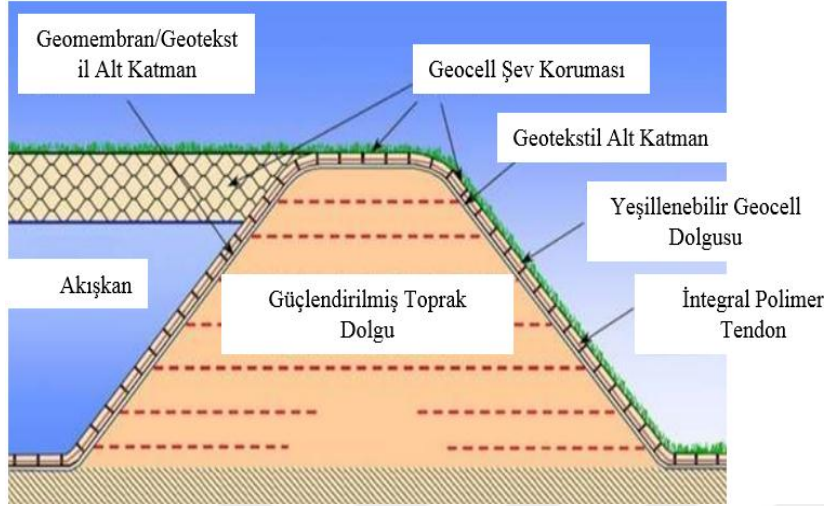
Geosentetikler inşaat mühendisliği projelerinde kullanılan zayıf zemin tabaklarının güçlendirilmesine olanak sağlayan ve bunu yaparken ekonomik çözümler üreten, sentetik polimer özellik barındıran yapı malzemeleridir. Geosentetikler, kullanım amaçlarına yönelik ve mekanik özelliklerine bağlı olarak değişik malzeme yelpazesine sahiptir. Tablo 2.12’de geosentetik malzeme çeşitleri görülmektedir.

Tablo 2.11 Geosentetik çeşitleri[48]

Geotekstilller	Örgüsüz
	Örgülü
Geomembranlar	Sentetik(HDPE, PP, PVC, vs.)
	Bitümlü
	Bentonitli
Geogridler	Ekstürüde geogrid
	Dokuma geogrid
	Yapıştırma geogrid
Geonetler	
Geomatlar	
Geohücreler	
Geokompozitler	

Geoteknik mühendisliğinde yapı temelleri genellikle dikdörtgen, kare, daire ve şerit halinde tasarlanabilmektedir. Yapının inşa edileceği arsanın özellikleri ve yapı yüklerinden dolayı

bazı durumlarda ise farklı geometriye sahip temeller seçilebilir. Zayıf zeminlere oturan yapı temellerinin, şevlerin ve dolguların güçlendirilmesinde ve servis yüklerinin doğru şekilde zemine aktarılmasında geogridler kullanılmaktadır(Şekil 2.56'da).



Şekil 2.56 Dolguların geogridler ile iyileştirilmesi[49]

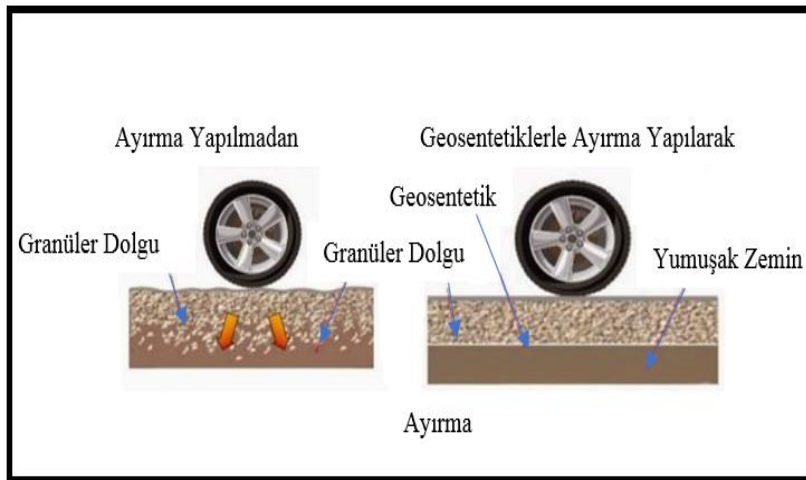
Geosetetikler kullanım alanlarına ve amaçlarına göre, drenaj yapılmasında, ayırma, filtrasyon, güçlendirme ve yalıtım işlerinde kullanılmaktadır. Geosetetiklerin barındırdıkları özellikleri sayesinde bu işlevleri yerine getirebilirler. Tablo 2.12'de geosetetikler işlevlerine göre kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 2.12 Geosentetiklerin işlevlerine göre özellikleri[48]

FONKSİYON	ÇEŞİT	TANIM
Filtrasyon	Geokompozit, örgüsüz geotekstil	Sıvı geçişine izin verir, zemin danelerini geçirmemek
Drenaj	Geonet, geokompozit	Sıvının taşınması
Ayırma	Geotekstil, geokompozit	İki malzemenin ya da zeminin karışmasını engellemek
Koruma	Örgüsüz geotekstil, geonet, geokompozit	Yapının zarar görmesini önlemek amaçlı
Geçirimsizlik	Geomembran, geokompozit	Sıvı bariyeri
Donatılı duvar	Tek yönlü geogridler, örgülü geotekstiller	Zeminin gelecek çekme kuvvetini karşılamak
Zemin iyileştirme	Çift yönlü, geogrid, örgülü geotekstil, geokompozit	Taşıma gücünü arttırmak
Asfalt ve beton donatısı	Çift yönlü geogrid	Gelebilecek çekme kuvvetini karşılamak
Erozyon kontrolü ve yüzey stabilitesi	Geomat, geohücre, biomat, bionet	Rüzgâr, yağmur gibi etkilerden zeminin taşınmasını ve ayrılmasını önlemek
Sınırlama	Geohücre	Zemin kütlelerinin yanal hareketlerini önlemek

Ayırma

İki farklı zemin malzemesini birbirine karışmasını engellemek ve karışmasını önlemek amacıyla kullanılır. Genellikle kaba daneli ve ince daneli zemin malzemelerinin karışmasını önler ve üst yapıdan gelen yüklerin zeminde uniform olarak dağılmasını sağlamaktadır.(Şekil 2.57’de)

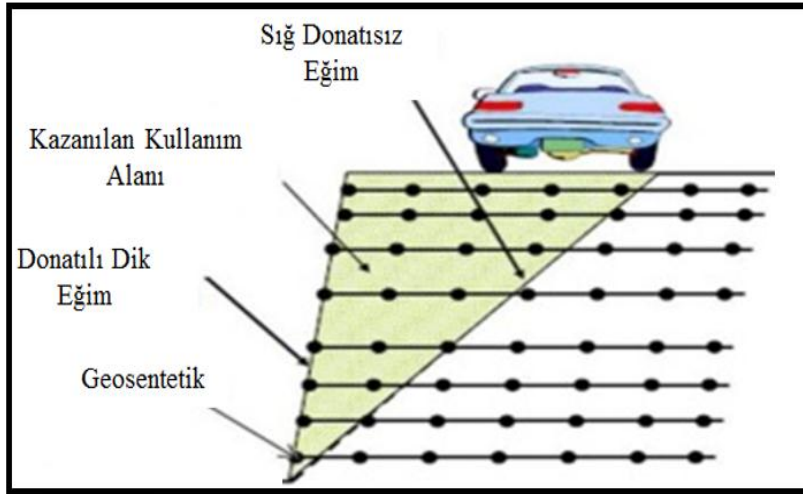


Şekil 2.57 Geosentetiklerin zemin malzemelerinin ayrılmasında kullanılması[50]

Zemin malzemelerinin ayırma amacıyla kullanılan geosentetik yapıları malzemeler bunun yanında ilave birçok özelliği de barındırmaktadır. Bu özelliklere örnek olarak, hareketli yükler altında ince daneli malzemelerin hareketini sınırladığı ve bunun yanında zeminin drenaj hareketine izin vermesi sonucunda yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

Zemin Güçlendirme

Geosentetik donatılı geodivar, otoyolların altında ve dolguların güçlendirilmesinde kullanılmaktadırlar. Yüksek çekme mukavemetine sahip olan geosentetikler bu gibi yapılarda kullanıldığı zaman sürtünme ve kitlenme etkileri ile sistemin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırarak zeminin güçlendirilmesini sağlayacaktır[Şekil 2.58’de].



Şekil 2.58 Geotekstillere kullanılarak güçlendirme yapılması[51]

Drenaj

Zeminlerin içerisinde bulunan ve kontrol edilmeyen aşırı miktardaki yeraltı suyu zeminin stabilitesini bozarak ve zeminin mukavemet özelliklerini düşürerek problemlere neden olabilir. Dolgu yapıları, istinat yapıları, otoyolların altında, tüneller ve şevlerde drenajın yapılması yapının uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Geosentetik malzemeler drenaj görevi yaparak düşük geçirimsizliğe sahip malzeme içerisinde su ve buhar geçişi sağlamaktadır. Heterojen zeminler ince ve kaba daneli zemin malzemeleri birlikte bulunur. Heterojen yapıya sahip zeminlerde geotekstil kullanılması durumunda zemin içerisindeki küçük daneler hareket ederek geotekstili tıkar. Homojen zeminlerde ise daneli malzemeler suyun geçişi kolaylıkla gerçekleşmektedir ve bu tip zeminlerde geotekstil malzemesi

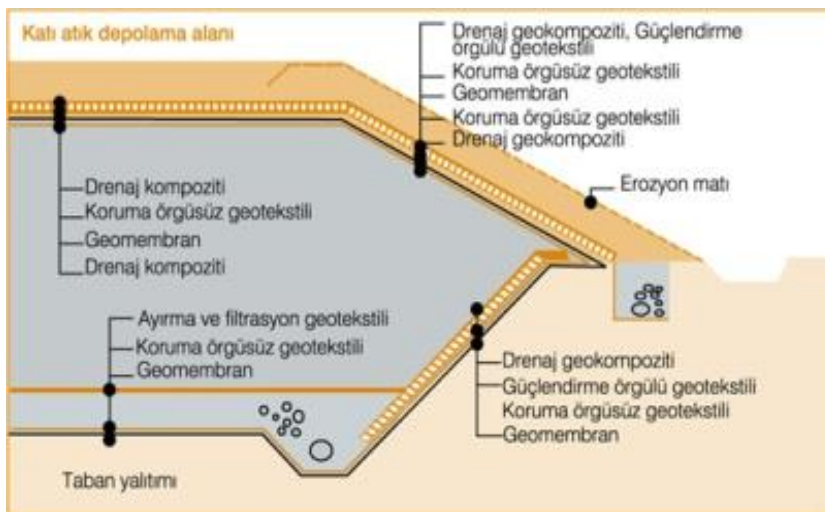
kullanıldığı zaman önemli ölçüde zeminde drenaj sağlanmış olur ve bu sayede yapılar aşırı miktardaki sudan korunmuş olur(Şekil 2.59'de).



Şekil 2.59 Geotekstillerin drenaj fonksiyonu[52].

Erozyon Kontrolü

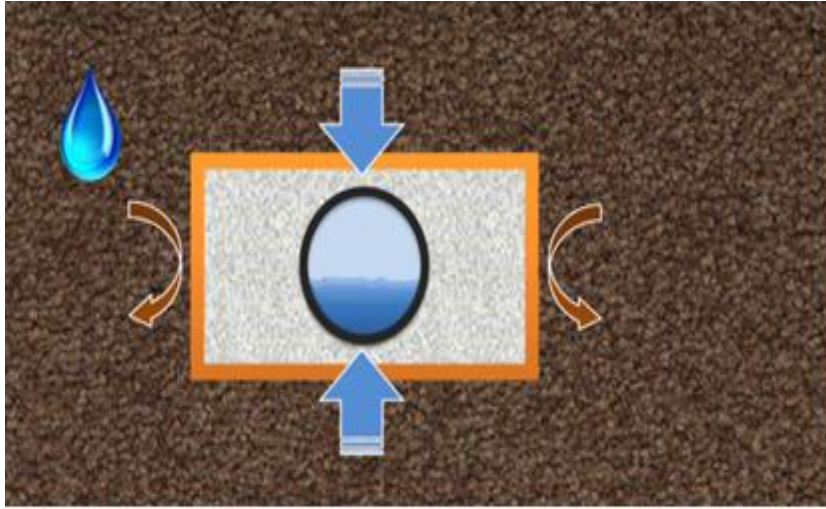
Zemin malzemesinin bir parçasının ayrılarak kendi doğal akışıyla hareket etmesini erozyon olarak ifade edebiliriz. Geosentetikler, eğimli yüzeylerde bitkisel toprağın yağmur, rüzgâr vb. doğal etkenlerin etkisiyle kaybedilmesini engellemek ve aşırı yüzeysel suların akışına olanak sağlamak amacıyla kullanılırlar(Şekil 2.60'da).



Şekil 2.60 Geotekstillerin erozyonların kontrolünde kullanılması[53]

Filtrasyon

Geosentetikler filtrasyon işlevi yaparken suyun akışına izin verirken, zemin malzemelerinde ince danelere sahip malzemenin geçişine izin vermez yalnızca malzemenin sürüklenmesine olanak sağlar (Şekil 2.61’de). Geosentetik malzemeler yerleştirilirken suyun akış yönü dikkat edilmelidir. Filtrasyon amaçlı kullanılan geosentetiklerden beklenen mukavemet özellikleri, yüksek poroziteli ve uygun gözenek yapısına sahip olmalıdır. Bunun yanında malzeme sıkışmasından çok az etkilenecek şekilde davranış sergilemesi beklenir.



Şekil 2.61 Geosentetiklerin filtrasyon fonksiyonu[54]

Yalıtım

Geomembranlar yalıtım işlerinde kullanılan geosentetik malzemelerin bir diğer çeşididir. Geçirimsiz bir tabaka oluşturmak için kullanılmaktadır. Geomembranlar ısıtıldığı takdirde esnek bir yapı kazanmakta ancak mukavemet özelliklerinde herhangi bir kayıp meydana gelmemektedir ve soğudukları zaman ise eski haline geri dönmektedirler. Özellikle yapı temelleri, tüneller ve çöp sahalarında geçirimsiz tabakalar oluşturmak için kullanılmaktadır(Şekil 2.62’de)



Şekil 2.62 Geotekstillerin yalıtım işlerinde kullanılması[55]

2.4.2. Geogridler

Geogridler kare veya dikdörtgen şeklinde imal edilen malzemelerdir. Yüksek çekme ve düşük sünme mukavemet özelliğine sahip geosentetik bir malzemedir. Geogridler zemin güçlendirmesinin yanında, donatılı duvarlarda, dolgularda ve karayolları projelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Geogrid ile çözüm geliştirilen yerlerden bazıları şu şekildedir;

- Zeminlerin drenajında,
- Köprü ayaklarının desteklenmesinde,
- Erozyon kontrolünün sağlanmasında,
- Dolgular,
- Şevlerin stabilitesinin sağlanmasında kullanılmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde zayıf zeminlerin ağırlığa ve servis yüklerine karşılama noktasında problemler oluşturmaktadır. Geogridler zayıf zeminlerin mukavemet özelliklerini iyileştirerek taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Geogridler üretim yöntemlerine göre oldukça çeşitli miktarda bulunmaktadır. “Dokuma geogridler, 800 kN/m dayanıma kadar ulaşan yüksek dayanımlı polyester lifler ile hem simetrik ve hem de asimetrik polietilen kaplamalı kompozit malzemelerdir”[56].

2.4.2.1. Geogrid Kullanımının Sağladığı Faydalar

- Zeminlerin iyileştirilmesi sonucunda taşıma kapasitesinde artışlar meydana gelir,
- Zeminde boşluk suyu basıncının sönümlenme süresi kısaltılır ve bu durumda konsolidasyon daha kısa sürede tamamlanır,

- İmalatların hızı artar ve proje kısa sürede gerçekleştirilir,
- İmalatın dona karşı dirençlerinde artış beklenir,
- İhtiyaç duyulan granüler malzemeye daha az ihtiyaç duyulur,
- Sahip oldukları elastik özellikleri ve sağlımlıkları sayesinde zeminde meydana gelen deformasyon hareketlerine uyum gösterebilmektedirler.



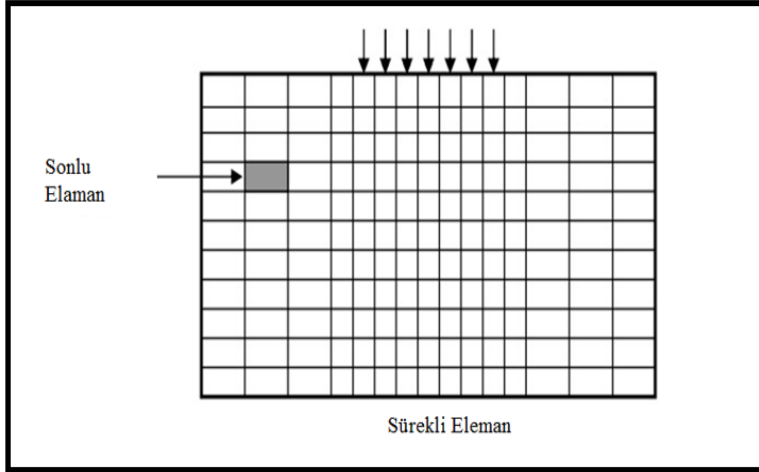
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE PLAXIS

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümünde sayısal analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin ortamının yapısı gereği heterojen ve anizotrop olduğu için zemin ve zemine gömülü yapıların özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve üst yapı ile zemin etkileşiminin gerçekçi olarak modellenmesi oldukça karmaşık ve çözülmesi zor bir problemdir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte birçok sonlu elemanlar yöntemi ve programı geliştirilmiştir. Bu yazılımların başında PLAXIS paket yazılımı gelmektedir. PLAXIS yazılımı ile çözülen problemlerde zemin yapısı nonlineer, zemin ile ilişkisi olan diğer yapı ve yapısal elemanlar ise lineer olarak modellenebilmektedir. Bu çalışmada kapsamında oturma problemlerinin yaşandığı yumuşak ve zayıf zemin üzerinde projelendirilen köprü ayakları altında ve yaklaşım dolguları tabanında meydana gelen toplam ve farklı oturma miktarları için PLAXIS 8.2 paket programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Çalışmada yaklaşım dolgularının yüzeyinde meydana gelen oturma miktarı ve köprü ayaklarını etkileyen parametreler araştırılmıştır. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve PLAXIS 2D 8.2 paket yazılımı ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

3.1.Sonlu Elemanlar Yöntemi

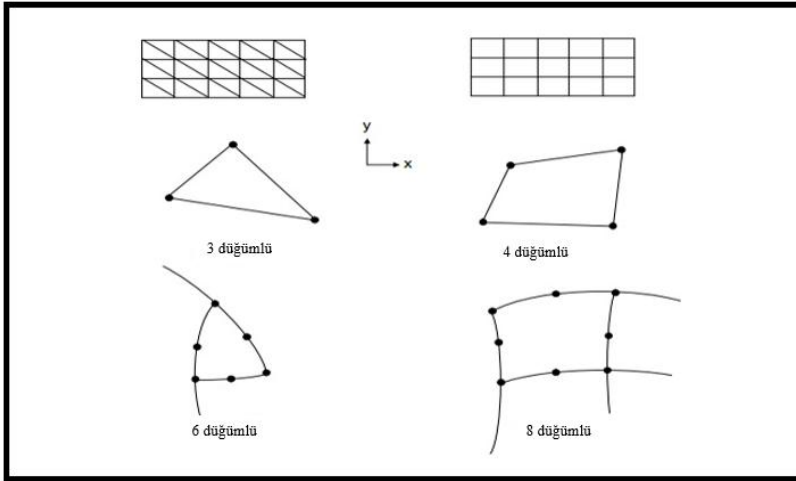
Geoteknik Mühendislik problemleri karmaşık ve doğrusal davranış sergilemeyen ve çözülmesi zor olan problemlerdir. Bu nedenle problemlerin çözümünde genellikle kabul edilebilir bir yaklaşım yöntemiyle hesaplamalar yapılır. Zemin yapısı gereği anizotropik davranış gösteren ve heterojen bir malzemedir ancak yapılacak kabuller ile birlikte zeminin homojen olduğu varsayılacak ve doğrusal davranış sergilediği düşünülerek problem çözülmeye çalışılacaktır. Geliştirilen bu çözüm tekniğiyle birlikte zamana bağlı durumun dikkate alınmadığı ve zeminin yapısının homojen kabul edilmesi yaklaşık bir yöntem olarak görünse de zeminin gerçek davranışının çok uzağında olmaktadır. Buna bağlı olarak gelişen teknoloji ile birlikte birçok çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler içerisinde en gelişmiş olan ve yapısal problemlere uygulanabilen çözüm tekniği sonlu elemanlar yöntemi (SEY) olup hemen hemen bütün Geoteknik problemlere uygulanabilmektedir. “Zeinkiewicz (1977) bu yöntemi matematiksel olarak açıklanan sürekli sistemlerin genel çözüm metodu olarak tarif etmiştir. Bu yöntem ile birlikte sürekli bir sistemi matematiksel olarak modelleme imkânı vardır. Bu metotta, “sürekli bir sistem, kendi içinde sonlu sayıda bileşen veya elemanlardan ve bu elemanları birleştiren düğüm noktalarından oluşan ayrık bir sistem olarak modellenmektedir” (Şekil 3.1) “[57].

Bunun anlamı ise; karmaşık geometriye sahip bir eleman veya sürekli bir ortamı sonlu sayıda elemana bölerek ve her elemanı matematiksel olarak bir denklem takımıyla ifade ederiz. Bu denklem takımları integre edilerek sistemin denklem takımı elde edilir. Sistemin diferansiyel denklem takımı, cebirsel denklem takımlarına indirgenmiş olur.



Şekil 3.1 Modelin sonlu elemanlara bölünmesi[57]

Sonlu elemanlar yönteminde, karmaşık geometriye sahip sürekli ortam daha basit alt bölgelere ayrılmaktadır. Elemanlar iki boyutlu seçilebileceği gibi üç boyutlu olarak seçilebilmektedir ve eleman tipi seçilirken düzgün bir geometrik formda olmayan elemanlar için eğrisel eleman seçilmektedir. Şekil 3.2’de görüleceği gibi iki boyutlu çözümlerde eleman tipi üçgen veya dörtgen şeklinde teşkil edilebilmektedir.



Şekil 3.2 Tipik 2 Boyutlu Elemanlar[58]

Bu yöntemin avantajları;

- Bilgisayar yardımıyla hızlı çözüm imkânı vermekte ve optimizasyon sağlamaktadır,
- Her türlü geometriye sahip ortam veya eleman modellenenbilmektedir,
- Veriye bağlı olarak gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir,
- Birçok probleme aynı formül takımıyla çözüm geliştirme,
- Zemin ve yapı etkileşimi, yük atama ve sınır koşulları tanımlanmaktadır.

3.2.Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

Sonlu elemanlar yöntemiyle Geoteknik Mühendisliğindeki bütün problemlerin çözümünde uygulanabilmektedir. Ancak zemin yapısı gereği birçok sınırlama ve kısıtlama oluşturmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi doğrusal davranış sergileyen problemlerin çözümünde ilk olarak kullanılmıştır. Daha sonra yöntemin gelişmesiyle birlikte doğrusal olmayan problemlere ve böylece zemin yapılarına ve zemin ile etkileşim içinde olan üst yapı elemanların çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin uygulanmasında malzemenin sergilediği davranış biçimi şekil değiştirme ve toplam gerilmeler arasındaki değişimler formülize edilir. Malzeme davranışı efektif gerilme cinsinden ifade edilmekte ve gerilme tensörü ise boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmelere bağlı olarak oluşmaktadır. Geoteknik Mühendisliği problemleri genellikle yapı ve zemin etkileşim halindedir ve bu tür problemlerin çözümünde ise yapısal elemanlar ile zemin malzemesi arasında ara yüzey kullanılmalıdır. Bunlardan bağımsız olarak dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise sınır koşulları ve seçilen sonlu elemanlar ağıda sonucun gerçekçi olmasını etkilemektedir. Sonlu

elemanlar analizinde problemi gerçeğe yakın modelleyebilmek için aşamalı inşaat adımları dikkate alınarak yapılmalıdır.

Problemin bu şekilde analiz edilmesinde sağlayacağı faydalar şu şekildedir;

- Modelin çözülmesi sırasında herhangi serbest dolgu yapılması veya kazı yapılarak zeminin kaldırılması durumunda modelin geometrisi sürekli olarak değişmektedir ve yapılan bu değişiklikler sonlu eleman ağına eleman ilave ederek veya çıkararak modellenmektedir.
- Yapılan analizlerde zeminin ağırlığı içinde toplam gerilmelerin değişmesinden dolayı her kademede zemin özellikleri değişmektedir.

Problemin analizi sonucunda Geoteknik Mühendisliği için anlam ifade eden; boşluk suyu basıncı, yatay ve düşey deplasman değerleri, efektif gerilmeler, şev duyarlılığı gibi parametreleri belirleyebilmekteyiz.

3.3.Zemin Davranışının Modellenmesi

Mühendislik problemlerinin çözülebilmesi için ve zemin davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilebilmesi için zeminin doğrusal olmayan zamana bağlı durumunun dikkate alınması gereklidir. Bu nedenle birçok zemin modeli geliştirilmiştir ve bu modeller içinde en çok kullanılan zemin modeli olan hiperbolik zemin modelidir. “Hiperbolik zemin modeli ilk defa Kondner (1963) tarafından önerilmiş, olmakla birlikte, Duncan ve arkadaşları tarafından kapsamlı bir şekilde geliştirilmiş olup, daha çok Duncan ve Chang modeli olarak bilinmektedir”[57]. Laboratuvarında yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonucu elde edilmiş ve gerilme deformasyon eğrisi yaklaşık olarak hiperbol şeklinde yorumlanmıştır. Modelin, drenajlı ve drenajsız ilavesiyle birlikte gerekli olan ve modeli ifade eden parametre sayısı dokuza çıkmıştır. Hiperbolik modeli tanımlayan denklem şu şekildedir;

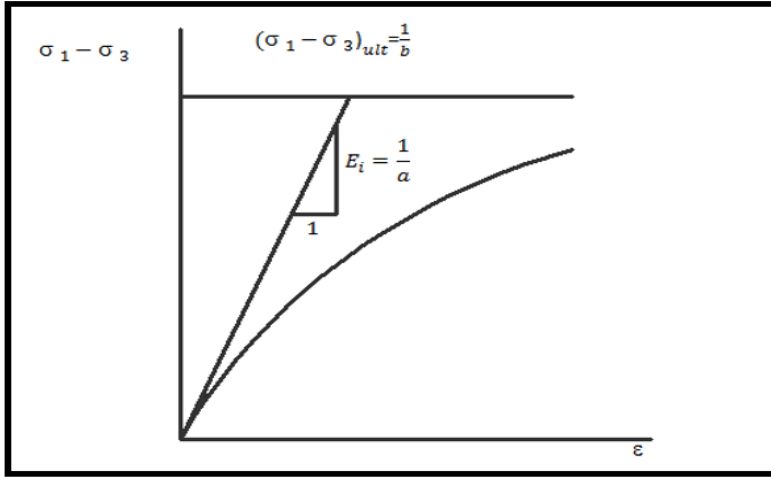
$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon}{a+b\epsilon} \quad (3.1)$$

$(\sigma_1 - \sigma_3)$:Gerilmeler arasındaki değişim

ϵ :Eksenel birim şekil değiştirme,

a ve b :sabit

denklem 3.1’deki gerilme değerleri eşitlendiğinde “a” malzeme sabitinin tersi başlangıç elastisite modülü olarak kabul edilmekte ve E_i ile gösterilmektedir. Diğer malzeme sabiti olan “b” ise Şekil 3.3’de görüldüğü gibi gerilme, deformasyon eğrisiyle asimptot olan fark gerilmesine eşit olmaktadır.

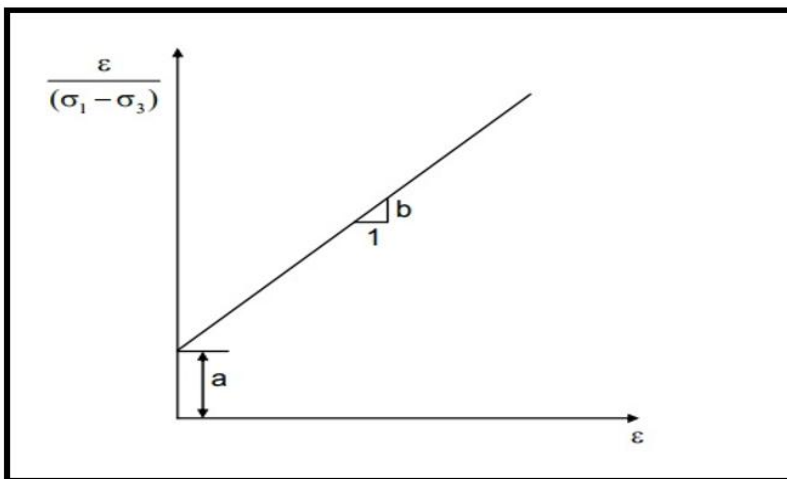


Şekil 3.3 Hiperbolik malzeme modeli[57]

Kondner(1963) tarafından yapılan eksen modifiyesiyle, laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen gerilme ve şekil değiştirme eğrisini Şekil 3.3'deki gibi düzenleyerek malzeme davranışını bulabileceğini göstermiştir. Denklem 3.1 benzer forma tekrar yazılırsa;

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\varepsilon \quad (3.2)$$

şeklini alır ve “a ve b” değerleri Şekil 3.4'deki gibi eksenel deformasyonun, fark gerilmesinin kestiği noktalar ve aynı zamanda eğimidir. Üç eksenli basınç deneyinin gerilme ve deformasyon eğrinin bu şekilde yazılması malzeme davranış parametresi olan “a ve b” sabitlerinin bulunmasını oldukça kolaylaştıracaktır.



Şekil 3.4 Modelde eksen görünümü[57]

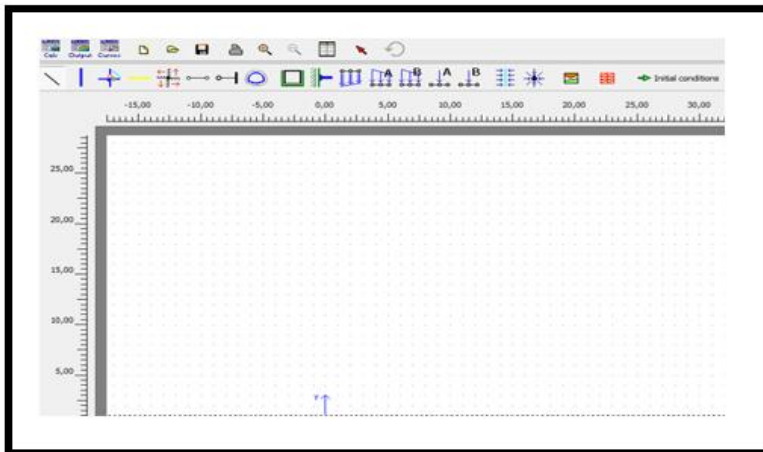
Sonlu elemanlar yönteminde malzemenin davranışını belirlemek için el edilmesi gereken bir diğer parametre ise teğet elastisite modülüdür ve Denklem 3.2'nin diferansiyeli alınır;

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon} = \frac{a}{(a + b\varepsilon)^2} \quad (3.3)$$

Bu adımlar sonucunda zeminlerin, doğrusal olmayan non-linear ve gerilmeye bağlı özelliklerini gösterebilmektedir. “Hiperbolik zemin modeli, zeminin gerilme-deformasyon davranışında, gerilmenin artımı ile deformasyonların da kademeli olarak artmasından, zeminin non-linear davranış gösterdiği durumu dikkate almaktadır. Bu durumda yük artışına bağlı olarak, her adımda zemin gerilme-deformasyonu şekli doğrusal alınıp ve bu davranışın her adım için Hooke kanununa uyduğu kabul edilir”[57].

3.4.PLAXIS Paket Programı

PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) ilk olarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesinde geliştirilmiş ve Geoteknik problemlerin çözümünde kullanılmıştır. PLAXIS paket programı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kompleks ve karmaşık problemleri diferansiyel denklemlerle ifade ederek çözüm geliştiren bir yazılımdır. Oturma analizleri, şev duyarlılığı, taşıma gücü temel problemleri çözmesinin yanında dinamik ve stabilite analizleri yapabilen ve zaman bağlı davranış durumunu analiz edebilen bir paket programdır. “İlk kez 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için



Şekil 3.5 PLAXIS yazılımı genel görünümü

tasarlanmıştır. Zamanla diğer Geoteknik Mühendisliği problemlerinin çözümünü de kapsayacak şekilde genişletilmiştir”[58]. Bu çalışma kapsamında PLAXIS 8.2 versiyonu kullanılmıştır. Analizler 2 boyutlu düzlem deformasyon olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde PLAXIS yazılımı ile ilgili genel prensipler anlatılmıştır ve PLAXIS yazılımının bünyesinde bulunan zemin modelleri tanıtılmıştır.

3.4.1. PLAXIS Yazılımı Genel Kullanım İlkeleri

PLAXIS yazılımı dört ayrı modülden oluşmaktadır:

- Input: Geoteknik problem ile ilgili veri girişinin yapıldığı, sınır koşullarının belirlendiği, malzeme ve zemin özelliklerinin tanımlandığı modüldür.
- Calculation: Hesap aşamalarının tanımlandığı, lineer analiz, dinamik analiz vb. analiz yöntemlerinin seçilebildiği modüldür.
- Output: Analiz adımları tamamlandıktan sonra, oluşan deformasyon, gerilme vb. verilen görüntülenebildiği modüldür.
- Curves: Verilen grafiksel ortama aktarılabilirdiği modüldür.

3.4.2. PLAXIS Modülü Çalışma Prensibi

Input modülünde yeni bir proje açılır. Açılan sayfada “lines” komutu ile Geoteknik problem çizilir. 6-düğüm noktalı veya 15-düğüm noktalı sonlu eleman ağı seçimi yapılabilir. Sonlu eleman ağı 15-düğüm noktalı seçilmesi durumunda gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesine olanak sağlar. Zemin tabakaları, yapısal elemanlar ve yüklemeler bu bölümde tamamlanır. Zemin modelleri “input” modülünde tanımlanır. Zemin ve malzeme tanımlamaları yapıldıktan sonra “generated mesh” sekmesine tıklanarak sayısal modelin sonlu eleman ağı oluşturulur ve “update” yapılarak eski menüye geri dönülür. “Initial conditions” sekmesine tıklanarak devam edilir. Yeraltı suyu seviyesi bu aşamada belirlendikten sonra hesap adımına geçmek için “calculation” sekmesine tıklayarak devam edilir. “Hesaplama adımları tamamlandıktan sonra sonuçların grafiksel ve sayısal olarak görüntülenebildiği modül “output” modülüdür ve bu sayısal değerlerin yorumlanabildiği ve grafik ortamına aktarabildiği kısım ise “curves” modülüdür.

3.4.2.1.Zemin Modelleri

PLAXIS yazılımında 6 farklı malzeme davranışını tanımlamamızı sağlayan zemin modelleri vardır. Bunlar şu şekildedir;

- Linear Elastik Zemin Modeli
- Mohr-Coulomb Zemin Modeli
- Hardening Soil Zemin Modeli
- Jointed Rock Zemin Modeli
- Soft Soil Zemin Modeli
- Soft Soil Creep Zemin Modeli

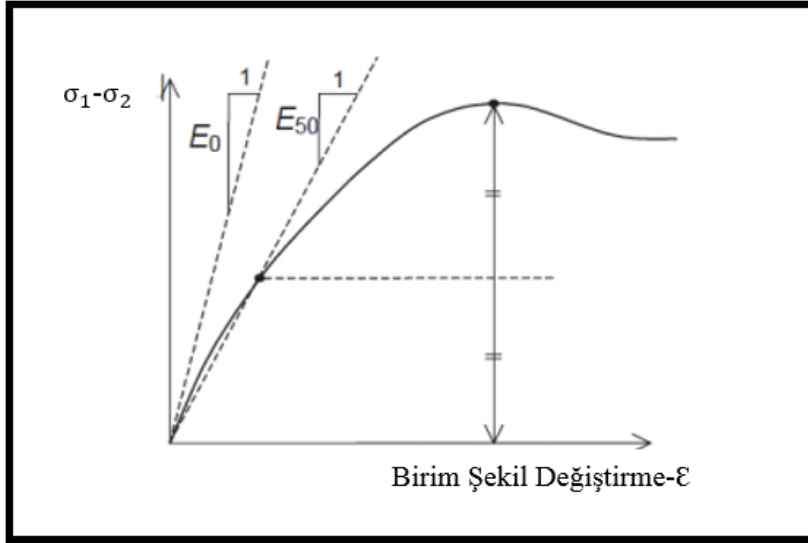
olarak sıralanabilir.

3.4.2.1.1. Linear Elastik Zemin Modeli

Bu zemin modelinin doğrusal davranış sergilediği ve zemin ortamında Hooke yasasına uyduğu kabul edilmektedir. Veri girişi olarak ihtiyaç duyulan parametreler; elastisite modülü, “E”, eğilme rijitliği “EI”, aksenal rijitlik “EA” ve poisson oranı “ ν ” değerleri sisteme girilir. Linear elastik model oldukça sınırlı ve basit problemlerin çözümüne uygulanabilecek zemin modelidir. Zemin içerisinde duvar, beton, kazık vb. rijit yapıları modellemek için kullanılır.

3.4.2.1.2. Mohr-Coulomb Zemin Modeli

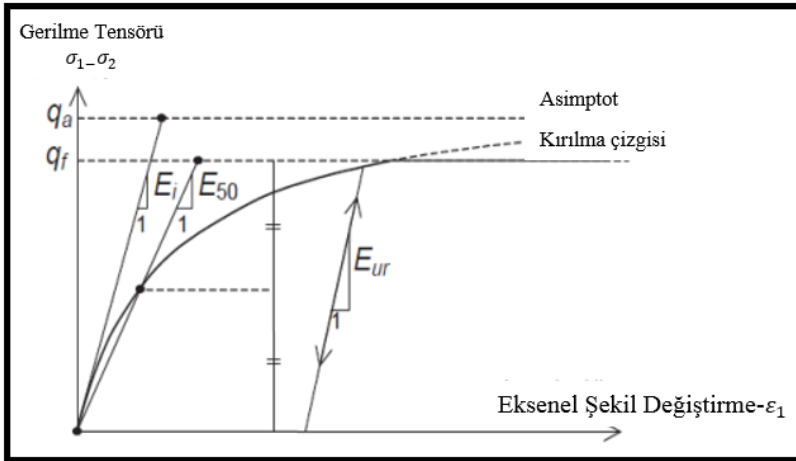
Mohr-Coulomb modeli elasto-plastik bir zemin modelidir. LE modeline göre daha gelişmiş bir zemin modelidir. Parametre girişi sayısı daha fazladır ve bunlar elastisite modülü, “E”, poisson oranı “ ν ”, kohezyon, “c”, içsel sürtünme açısı, “ ϕ ”, ve bir diğer parametre dilatasyon açısıdır, “ ψ ”. “Mohr-Coulomb Modeli zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin birinci konumunda elastik, ikinci sırada ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımına dayanır”[59]. Bu zemin modeli ile problemin ön çözümü kolay ve kısa sürede yapılabilir ve ön tasarım hakkında fikir edinilir. Problemlerin çözümünde kabul edilen temel varsayım derinliğin değişmesi ile birlikte zemin katmanlarında rijitliğinin sabit kaldığıdır ve bu yaklaşım gerçekçi sonuçlara ulaşılması noktasına oldukça uzaktır ancak hızlı ve kolay olmasının yanında az sayıda parametre girişi ile sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 3.6 Üç eksenli deney çalışmaları sonucunda elde edilen E_0 ve E_{50} modülleri [59]

3.4.2.1.3. Hardening-Soil Zemin Modeli

Hardening Soil model oldukça gelişmiş bir zemin modelidir. Geoteknik mühendisliğinde karmaşık ve kompleks problemleri çözmek için oldukça elverişli ve kolay çözüm sağlayan zemin modelidir. Bu zemin modeli ile her türlü zemin tipini modellemek mümkündür. Mohr-Coulomb modeline göre daha gelişmiş ev kompleks bir zemin modelidir. Problem çözümünde veri giriş için gerekli parametreler, elastisite modülü, “E”, poisson oranı “ ν ”, kohezyon, “c”, içsel sürtünme açısı, “ ϕ ”, ve bir diğer parametre dilatasyon açısıdır, “ ψ ”. HS model, gerilme bağımlı rijitlik modülünü dikkate almaktadır. “Bunun anlamı, zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır”[59].



Şekil 3.7 Hiperbolik gerilme ve birim şekil değişirme ilişkisi[59]

3.4.2.1.4. Jointed Rock Zemin Modeli

Elasto-plastik zemin modelidir. Anizotropik davranış göstermektedir ve plastik kaymanın sınırlı sayıda ve doğrultuda meydana geldiği modeldir. Jointed rock zemin modeli birleşik kayaların davranışını modelleyebilmek için kullanılır. Problemin çözümü için gerekli olan parametreler, elastisite modülü, “E”, poisson oranı “v”, kohezyon, “c”, içsel sürtünme açısı, “ ϕ ”, ve bir diğer parametre dilatasyon açısıdır, “ ψ ”dır.

3.4.2.1.5. Soft Soil Zemin Modeli

Yumuşak zemin modeli olarak zeminler Türkçeye çevirebiliriz ve zemin mekaniğinde yumuşak zemin olarak tarif edilen normal konsolide killer, turba ve siltli killerin modellenmesinde SS zemin modeli kullanılır. SSS zemin modeli için beş adet parametre girişi yapılmaktadır. Ve gerekli olan parametreler şu şekildedir;

λ^* : Modifiye sıkışma indisi

κ^* : Modifiye şişme indisi

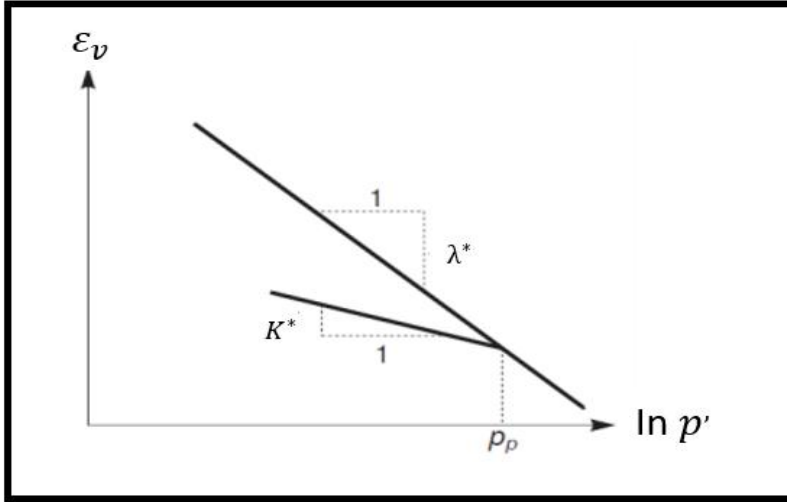
c: Kohezyon değeri

ϕ :İçsel sürtünme açısı

ψ :Dilatasyon açısı

v: Poisson oranı

Bu zemin modeli birincil sıkışma durumunda en iyi davranışı sergilemektedir.



Şekil 3.8 Hacimsel birim şekil değiştirme ve efektif gerilme ilişkisi[59]

3.4.2.1.6. Soft Soil Creep Zemin Modeli

Soft Soil Creep zemin modeli zayıf ve yumuşak zeminlerin, dolgu zeminlerdeki ve yük boşalmasının olduğu derin kazı davranışının zaman faktörüne bağlı olarak çözülmesinde kullanılmaktadır. Bu zemin modelinde parametre girişi için gerekli olan veriler;

c kohezyon,

ϕ içsel sürtünme açısı,

ψ dilatasyon açısı,

λ^* modifiye sıkışma indeksi,

κ^* modifiye şişme indeksi,

μ^* modifiye sünme indeksi değerleri kullanılmaktadır.

3.5.Köprü Yaklaşım Dolguları ve Sahanın Özellikleri

3.5.1. Proje Bilgileri

Bursa ilinde yapılması düşünülen köprünün yaklaşım dolgularında meydana gelen düşey deformasyonları; jet grout, taş kolon ve geopier kolonları ile iyileştirilmiş ve servis yüklerini taşıyacak duruma getirilmiştir. Kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili hesap sonuçları yorumlanmış, maliyet analizleri yapılmış ve bu proje için ekonomik ve sürdürülebilir olan iyileştirme yöntemi belirlenmiştir.

3.5.2. Zemin Etüdü ve Amacı

Bu projenin zemin etüt raporları ve Geoteknik değerlendirme raporları sahadan alınan numuneler üzerinde laboratuvarda yapılan çalışmalar sonucunda hazırlanmıştır. Sahada yapılan sondaj ve yüzey jeolojisi çalışmalarından oluşan zemin etütleri sonucunda arazinin Geoteknik özellikleri belirlenerek inşası tasarlanan bina yapı temellerini projelendirmeye yönelik gerekli verilerin sağlanması amaçlanmıştır. Söz konusu sahanın deprenselliği ve yapılaşmaya elverişliliği saptanmış ve araştırma sonuçları raporun ilgili bölümlerinde açıklanmıştır. Söz konusu saha üzerinde zemin sondajları yapılarak ve sahadan alınan zemin numuneleri üzerinde hangi Jeolojik birime ait olduğu tespit edilmiş ve örnek numuneler laboratuvar deneyleri yapılarak zeminlerin mühendislik parametreleri tespit edilmiştir.

3.5.3. Proje Alanının Tanıtılması

İnceleme alanı, Bursa İli, Osmangazi İlçesi, Demirtaş Mahallesiinde yer almaktadır. Topoğrafik olarak düz bir alanda bulunmaktadır. Ulaşım açısından ve malzeme temini için çalışma sahası açısından elverişli bir sahadır ve projenin yapılacağı sahanın haritası Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Projenin yapılacağı sahanın haritası[60]

Yapılan zemin etüt çalışmaları sonucunda zemin ait emniyet gerilmesi $\sigma=10 \text{ t/m}^2$ dır. Sahanın yataklanma katsayısı $k_v=2000 \text{ t/m}^3$ dır. Zemin sınıfı ve grubu olarak Z3/C dır.

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25 \text{ kPa}$) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Şekil 3.10 Yerel zemin sınıfları[67]

3.5.4. Çevresel ve Topoğrafik Etkiler

Köprü inşaatının yapılacağı bölgenin yüzey şekilleri oldukça engebelerdir ve bölgenin doğal bitki örtüsü Kuzey Anadolu veya Avrupa Sibirya Bitki sınıfına girmektedir. Uludağ yüksekliğine bağlı olarak çeşitli bitki örüntüsüne sahip bir bölgedir. Sahanın iklim özellikleri bakımından geçiş iklimine sahiptir diyebiliriz. Marmara İklim kuşağında yer almasının yanı sıra Akdeniz İklimi ve Karadeniz İklimi arasında bir geçiş alanına sahiptir. İklim özellikleri bakımından kışları çok soğuk geçmeyen ve yaz döneminde ise çok şiddetli bir kuraklık yaşanmamaktadır. Bursa, Marmara Bölgesinin en yüksek dağı olan Uludağ ile Bursa Ovası arasında geniş düzlüklerden oluşmaktadır. Bölgenin yıllık sıcaklık ortalaması ise 14 C° civarındadır. Bölgenin en soğuk geçen ayları ise Ocak, Şubat aylarıdır. Temmuz ve Ağustos ayları ise sıcaklık derecesinin en yüksek olduğu döneme denk gelmektedir. Kısa bir süreliğine bölgede yaz kuraklığı da yaşanmaktadır. Bu dönemsel geçiş ise Haziran ayının son dönemlerinden başlayıp Eylül ayının son dönemlerine kadar devam eden şiddetli olmayan ve kısa süren bir kuraklık yaşanmaktadır. Kış mevsiminde ise güney yönünde esen rüzgârlar etkili olmaktadır. “Bursa ‘da 1980 ve 1990 tarihlerinde Kasım ve Ocak aylarında yoğunlaşmış ve yıllık toplamının ortalama %45 ‘ini oluşturmuştur. Haziran ve Eylül aylarında ise buna benzer ve ortalama 680 mm olup 510 mm ile 870 mm arasında değişmektedir”[60]. Bunun yanında yağışların mevsimsel dağılımı Temmuz ve Ağustos dönemlerinde yoğunluğu oldukça azdır. Bölgede meydana gelen dere akımlarının ve taşkınların yaşanması ise Nilüfer havzası ve kollarındaki Uludağ kitesinden kaynaklanan yağışların yanı sıra Uludağ kitesinde kış dönemlerinde karların erimesinden de etkileneceği görülmektedir.

2.1.8.3.Sahanın Mühendislik Durumu Hakkında Bilgiler

Sahanın zemin etüdü yapılmış ve zemin profilleri incelenmiş ve sahanın jeolojik formasyonları yaşlıdan gence doğru sıralanmış ve özellikleri belirlenmiştir. İnceleme alanı ve yakın bölgesinde en yaşlı zemin birimi olarak, “Palezoik Yaşlı Uludağ karmaşığının çekirdeğini oluşturan granitler ve sahamız Güneyinde inceleme alanımızın da temelini oluşturan yüksek metamorfizma geçirmiş gnays, mikaşist, amfibol, kuvarsit ve mermerler oluşturur”[60]. Bunun yanı sıra bu birimler ile tektonik ilişkisi olan ve yüksek basınç yeşilşist fasiyesinde başkalaşım geçirmiştir. “Permo Triyas yaşlı bazik kökenli metatüf, metaspilitik lav barındıran ve çeşitli şistler, slaytfillat metasilttaşı, kalkşist, kuvars kloritşist, meta karbonat, grovak ve şely birimleri ile temsil edilen literatürde Karakaya Kompleksi olarak

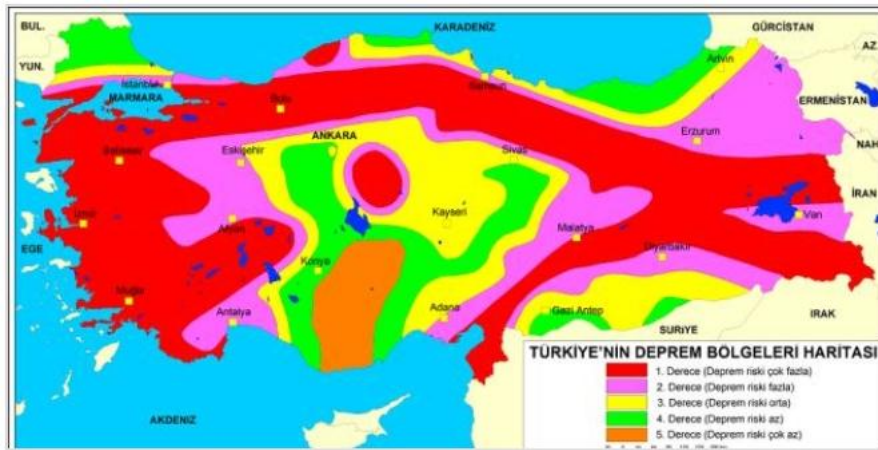
adlandırılan formasyon gelmektedir”[60]. Koglomera, kumtaşı ve kıltaşı seviyelerinde oluşan üst Triyas yaşlı Iğdır formasyonu Karakaya Formasyonu ile geçişlidir. Triyas yaşlı birimleri ise alt Jura yaşlı Bayırköy formasyonu ile uyumsuz olarak örtülüdür. Orta Jura ve Eosen zamanla kesiksiz olarak devam eden bir çökel istifi gelmektedir. Alt Jura Kretase’ye kadar çıkan ve Bilecik Kireçtaşı, Alt Üst Kretase yaşlı Vezirhan formasyonu ve Gölpazarı grubunun litolojik birimleri birbiriyle geçişlidir. Üst Kretase Paleosen geçişinde Selvîpınar Kireçtaşı çökelmiştir. Alt Eosen’den itibaren kaide kongleraması ile başlayan üste doğru karbonatlı kumtaşı geçen Üçpınar formasyonu gelmektedir. Eosen Miyosen zaman aralığında birbiriyle geçişli ve uyumlu alttan üste doğru Fındıçak formasyonu, Karabalçık Bazalt, Sarıkaya formasyonu, Dürdane formasyonu Gençali kireçtaşı ve Kurban Dağı ile temsil edilen Eosen çökel istifi gelmektedir. Bursa ve civarında geniş bir yayılım sunan Neojen birimleri konglomera kumtaşı Gölsel Kireçtaşı ve marn gevşek tutturulmuş çakıl, kum, silt ve kil litelajilerinden oluşan Gemiciköy formasyonu ile temsil edilir.

2.1.8.4.Sahannın Tektonik Değerlendirmesi

İnceleme alanı Paleo–Tetis ve Neo-Tetis okyanuslarının kapanması sırasında gelişmiş olan tektonik olaylardan yoğun bir şekilde etkilenmiş, kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Karakaya Kompleksi birimlerinde daha önce yapılan çalışmalarda, iki evrede gelişmiş deformasyon izleri belirlenmiştir. “Birinci evrede Karakaya Kompleksi birimleri üst üste gelmiş ve derine gömülen birimler metamorfizmaya uğramış ve kıvrılmıştır. İkinci evrede ise istif muhtemelen doğrultu atımlı faylanmaya bağlı olarak dik eğimli çatallanan makaslama zonları ile kesilmiş ve parçalanmıştır”[60]. Bursa Ovası da genel olarak yukarıda belirtildiği gibi Kuzey Anadolu Fayı’nın etkisindedir. Batıya doğru sıkışma sonucu Kuzey-Güney doğrultulu bindirmeler ve Doğu-Batı doğrultulu normal faylarla Kuzey-Güney yönünde açılmaya başlanmıştır. Diğer bir ifadeyle “Doğu–Batı yönlü sıkışma Kuzey-Güney yönlü gerilme ile karşılanmaya başlanmıştır. İnceleme alanında, yerel küçük fayların yanında, Kuzey Anadolu Fayı ile ilişkili gelişen büyük ölçekli faylar, genç birimlerin depolanmasını denetlemiştir. Bu nedenle Bursa Ovası, Neojen birimleri ve Alüvyonla örtülmüş bir tektonik çöküntü alanıdır. Dolayısıyla Bursa Ovası içinde, Neojen ve Alüvyon birimlerinin altında yer alan kayalarda fay oluşumları beklenmelidir”[60].

2.1.8.5.Bursa Fay Yapısı

Projenin yapılacağı sahanın fay yapısı genel itibari ile doğuda Derekızık ve Burhaniye Köyleri ile batıda ise Uluabat Gölü arasında uzanan sağ yanal ve doğrultu atımlı bir faydır. “Fayın uzunluğu yaklaşık olarak 45 km’dir”[60]. Bölgenin fayı, Uluabat ve Mustafa Kemalpaşa alt fay zonları ile birlikte Kuzey Anadolu fay sisteminin Marmara Bölgesindeki güney kısmını oluşturmaktadır. “Bursa Fayı Uludağ yükseliminin (2245 m) kuzey eteğinden geçer yer yer triyas-permiyen yaşlı metamorfileri ile jura yaşlı karbonatları ve miyosen yaşlı akarsu göl tortullarını keser ve bunları kuvaterner yaşlı alüvyonlarla tektonik dokunağa getiri”[60]. Fayın kuzey bloğu, güney bloğuna göre 2 km’ya kadar düşmüş olup bu durum Bursa fayının önemli miktarda normal birleşeni olduğunu gösterir. Bursa il olarak Bursa fayının düşen kuzey bloğu üzerinde ve fayın hemen bitiğinde kurulmuş bir bölgedir. Güney Marmara bölgesinin deprem riski yüksek olana sahalarından biridir. Ve bunun sonucunda “Bursa Fayından kaynaklanan en son yıkıcı depremler 28 Şubat 1855 ve 11 Nisan 1855 tarihinde oluşmuş Bursa İl Merkezinde ve yakın çevresinde yüksek can kaybı ve ağır hasara yol açmıştır”[60]. Bu iki büyük depremden sonra Bursa ili ve merkezinde yıkıcı sayılabilecek büyüklükte başka ir deprem meydana gelmemiştir. Bu durum ise Bursa fayı veya fay zonu yaklaşık olarak 150 yıldırı bir sismik boşluk niteliğindedir ve yıkıcı depremlerin olası ihtimali oldukça yüksek olan bir alandır.



Şekil 3.11 Türkiye deprem tehlike haritası[61]

3.5.5. Sahanın Mühendislik Özellikleri

Sahanın genel yapısı olarak düz bir topografyaya sahiptir ve araştırma alanı kuvaterner yaşlı alüvyon çökelleri ile örtülüdür. Zemin profili genel olarak heterojen ve belli bölgelerde ise

homojen dağılım gösteren ve kum, silt ve kil gibi malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Zemin etüdü raporundan elde edilen verilere göre zemin profilini meydana getiren zemin malzemesinin özellikleri aşağıda açıklanmıştır. Araştırma yapılan zemin profili ise 30,00 m derinliği boyunca gözlemlenmiştir.

Araştırma Çukurları

Araştırma sahasındaki jeolojik formasyonların yanal ve düşey deformasyonlar, yeraltı suyu durumu, şev stabilitesi, taşıma gücü ve sahanın jeolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için söz konusu sahada gerekli gözlem ve çevre yapılanma şartları incelenmiş ve arazi çalışmaları kapsamında 55 m derinlik boyunca 2 adet sondaj çukuru açılmıştır.

Sondaj Kuyusu 1

Yapılan birinci sondaj kuyusunda elde edilen zemin profili;

- 0,00-3,50 m arasında dolgu malzemesi bulunmaktadır.
- 3,50-12,00 m arasında kahve renkli katı kıvamlı, az çakıllı siltli kumlu kil bulunmaktadır.
- 12,00-20,00 m arasında kahverengimsi renkli sıkı yapılı az çakıllı siltli killi kum birimleri bulunmaktadır.
- 20,00-25,00 m arasında kahverengi renkli çok katı kıvamlı az çakıllı siltli kumlu kil birimleri bulunmaktadır.

Sondaj Kuyusu 2

Yapılan ikinci sondaj kuyusunda elde edilen zemin profili;

- 0,00-3,50 m arasında dolgu malzemesi bulunmaktadır.
- 3,50-30,00 m arasında gri kahverengi renklerde gevşek yapılı kil içerikli, az killi siltli çakıl birimleri bulunmaktadır.

3.5.5.1.Yeraltı ve Yerüstü Suları

İnceleme alanlarında yapılan çalışmalarda iş öncesi ve iş sonrası yeraltı suyu ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde YASS varlığına rastlanılmıştır. Yeraltı suyu seviyesi 7 m’de rastlanılmıştır. Tablo 3.1’de yapılan sondaj kuyuları ve yeraltı suyu gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Ölçülen yeraltı suyu seviyesi ve sondaj kuyuları derinlikleri[60]

Sondaj No	Derinlik(m)	YASS(m)
SK-1	25	-
SK-2	30	7

3.5.5.2. Standart Penetrasyon Deneyi(SPT)

İnceleme alanında, geçilen zemin tabakalarının Geoteknik özelliklerinin belirlemek amacı ile yapılan 2 adet Temel Araştırma Sondajları açılmıştır. Çalışmalar, Sondaj kuyularının açılması, yerinde deneyler yapılması ve numune alınması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sondaj Kuyularının açılması sırasında geçilen zemin tabakalarının fiziksel niteliklerini belirlemek amacı ile her 1,5 metre derinlikte hem Standart Penetrasyon deneyi yapılmış hem de örselenmiş numuneler alınmıştır. Geçilen zemin tabakalarının alt ve üst derinlikleri, tanımlama sonuçları ve derinlikleri numune alınan seviyeler, yeraltı su seviyesi ve diğer tüm gözlemler ile değerlendirmeler sondaj loglarına işlenmiştir. Yapılan Sondaj çalışmaları sırasında kayıt edilen “SPT N30 değerlerinin derinlikle değişimi ve zemin tanımlamaları Ek 9 ve Ek 10’da sunulmuştur”[60].

3.5.5.3. SPT Deneyinin Uygulama Alanları

“SPT deneylerinin uygulandığı alanlar şu şekilde sıralayabiliriz”[62];

- Yapı temellerinin taşıma gücü hesaplamalarında,
- Kumlu zeminlerde inşa edilen temellerin oturma miktarının pratik olarak belirlenmesinde,
- Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinin
- Zeminlerin rölatif yoğunluğunun belirlenmesinde,
- Zeminin içsel sürtünme açısının tahmininde,
- Kohezyonlu zeminlerde tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık olarak tahmininde uygulanır

3.5.6. Laboratuvar Deneyleri ve Analizler

Arazi çalışmaları sonucunda sahadan alınan 10 adet ve toplamda 167 m derinliğinde örselenmiş SPT numuneleri alınmıştır. Ve zemin numuneleri mühendislik parametrelerinin

belirlenmesi amacıyla laboratuvarında incelenmiştir. Bunun sonucunda zemin malzemesinin elek analizi, atterberg limitleri ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmış ve zemin özellikleri araştırılmıştır.

3.5.6.1.Su Muhtevası Analizleri

Sahadan alınan numuneler üzerinde yapılan su içeriği deneyi sonucunda numunenin sahip olduğu su muhtevası 3-21,40 değeri elde edilmiştir. Ve bu değer için ise, “su içeriği sınıflamasında değerlendirildiğinde zeminin cinsi genel itibarıyla ayrıışmış kuru ve ayrıışmış az kuru olarak bulunur”[60]. Zeminlerin su içeriğine ilişkin özellikler ve sınıflandırma parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Zeminlerin su içeriği[60]

W_n	Zemin Tipi
0~20	Ayrıışmamış~Kuru
20~40	Az Ayrıışmış~Az Kuru
40~70	Orta Derecede Ayrıışmış~Ortak Islak
70~90	Çok Ayrıışmış~Islak
90~100	Tamamen Ayrıışmış~Çok Islak

3.5.6.2.Elek Analizi

Sahada yapılan çalışmalar sonucu alınan zemin numuneleri ile laboratuvarında yapılan araştırmalar sonucunda Tablo 3.3’deki sonuçlar tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre zemin numunesi birçok malzemenin karışımından meydana geldiği ve ince dane oranının yüksek olduğu bir sahadır.

Tablo 3.3 Elek analizi deney sonuçları[60]

Sondaj No	Numune No	Derinlik(m)	Çakıl(%)	Silt+Kil(%)	Kum(%)
SK1	SPT~4	6,00~6,45	6	42	52
SK1	SPT~7	10,50~10,95	5	58	37
SK1	SPT~8	12,00~12,45	14	32	54
SK1	SPT~11	16,50~16,95	45	17	38
SK2	SPT~4	6,00~6,45	5	63	32
SK2	SPT~6	9,00~9,45	1	54	45
SK2	SPT~8	12,00~12,45	1	85	14
SK2	SPT~9	13,50~13,95	74	6	20
SK3	SPT~4	6,00~6,45	4	45	32
SK3	SPT~7	10,50~10,95	11	44	45
SK3	SPT~10	15,00~15,45	16	11	70

3.5.6.3.Kıvam Limitleri Analizi

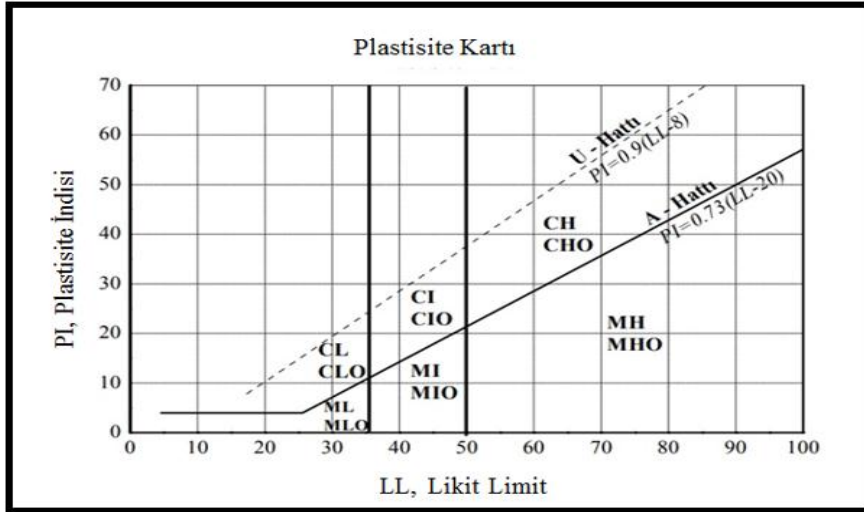
Yapılan sondaj çalışmaları neticesinde zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar araştırmaları sonucunda zeminin kıvam limitleri ve su içeriği tespit edilmiştir ve bu sonuçlara göre birleştirilmiş zemin sınıflandırma yöntemi kullanılarak inşaatın yapılacağı sahanın zemin özellikleri belirlenmiştir ve zemin kohezyonsuz nitelik taşımaktadır. Bundan dolayı zemin profiline ait kıvam değerleri bulunmuştur ve zemine ait I_c değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4 Kıvam limitleri deney sonuçları tablosu[60]

Sondaj No	Numune No	Derinlik(m)	W_n (%)	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	I_c (%)	Zemin Cinsi
SK1	SPT~5	7,50~7,95	21,4	32		14	0,76	CL
SK1	SPT~8	12,00~12,45	17,4	31		14		SC
SK1	SPT~11	16,50~16,95	13,7		N.P			SM
SK1	SPT~13	19,50~19,95	6,7	25		9		GC
SK1	SPT~15	22,50~22,95	19	40		20	1,05	CI
SK2	SPT~5	7,50~7,95	3,9		N.P			GM
SK2	SPT~9	13,50~13,95	11,9		N.P			GM
SK2	SPT~11	16,50~16,95	8,8		N.P			GM
SK2	SPT~14	21,00~21,45	12,1		N.P			GM
SK2	SPT~17	25,50~25,95	10,6		N.P			GM
SK2	SPT~20	30,00~30,45	3		N.P			GM

Bu değerlerden de belirleneceği gibi inceleme yapılan sahada zemin profilinde karşılaşılan kohezyonlu birimlerdeki zemin değerleri katı, çok katı ve sert kıvamlı olarak tespit

edilmiştir. Sahadan alınan numuneler üzerinde yapılan Atterberg deneyi neticesinde ise zeminin plastisite indisi değerleri 9-20 ve likit limit değeri ise 25-40 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler sonucunda ise plastisite indisi değerlendirmesi kullanıldığında zeminin cinsi CL düşük plastisiteli kil olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.12 İnce daneli zeminlere ait plastisite kartı[63]

4. PROBLEMİN ÇÖZÜLMESİ VE HESAPLAR

Problemin çözümünde PLAXIS 8.2 sürümü kullanılmıştır. PLAXIS paket programı ile problem modellenmiştir ve herhangi bir iyileştirme yöntemine başvurmadan problem kademeli inşaat aşamaları dikkate alınarak problem çözülmüştür. Sonraki aşamalarda ise iyileştirme yöntemleri kullanılarak problem tekrar çözülmüştür ve elde edilen veriler sonuç bölümünde karşılaştırılmıştır.

Karayolları Taşıt Yükleri

Bu çalışma kapsamında kullanılacak yükler için AASHTO standartları kullanılmıştır. AASHTO standartları ilk olarak 1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmaya başlanmış olan bir yönetmeliktir. Yönetmeliğin tarihi gelişim süresince meydana gelen depremler sonucu gerekli güncellemeler ve değişiklikler yapılmıştır. Bu nedenle AASHTO yönetmeliği yapılan bu güncellemeler sayesinde güncelliğini sürdürmektedir. Türkiye konumu itibari ile benzer depremsellik özelliklere sahip bir coğrafyadaki ülkenin yönetmeliğini kullanarak tasarım yapılabilir. Bu koşullar göz önünde bulundurulduğunda AASHTO Türkiye'de köprü tasarımı için kullanılan en kapsamlı yönetmeliktir. Ülkemizde köprülerin tasarımın hesapları için Tablo 4.1'deki veriler kullanılmaktadır. "Karayolları Köprülerinin tasarımında ülkemizde yaygın olarak H30-S24 kamyon yükü kullanılmıştır. Bu yükler ile ilgili veriler Tablo 4.1'de gösterilmiştir"[64]. Tasarımda kullanılacak olan yük H30-S24 kamyon yükü için 30 kN/m^2 hareketli yükü tasarım ve hesaplama adımlarında kullanılacaktır.

Tablo 4.1 H30-S24 köprü tasarımı sırasında kullanılan kamyon yükü[64]

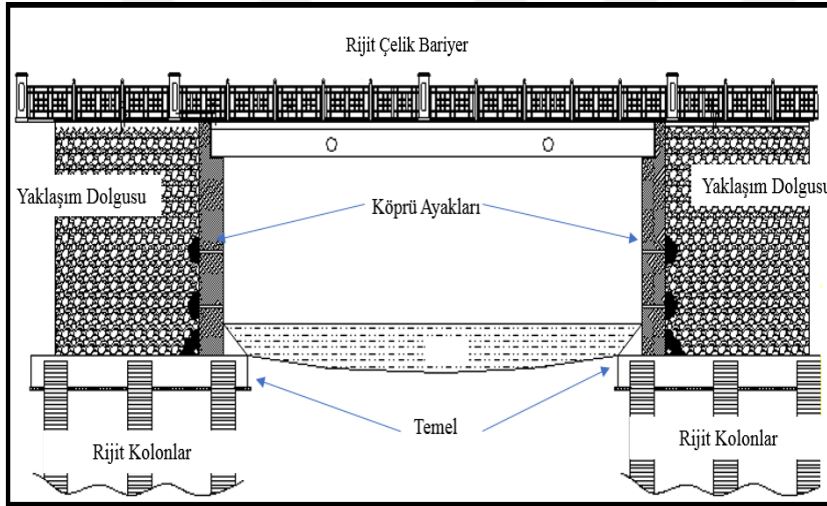
Standart Kamyon				
Şerit Yüğü		Yayılı Yüğü		
Yüğü Sınıfı		H30-S24	H20-S16	H15-S12
W Ağırlığı (Mpa)		30	20	15
P(Mp)	Eğilme Etkisi İçin	13,50	9,00	6,75
	Kesme Etkisi İçin	19,50	13,50	9,75
p(Mp/m)		1,50	1,00	0,75
s(cm)		75	50	38

Sahanın Zemin Profili ve Köprü Modeli

Zemin etüt raporundan elde edilen zemin profili;

- Dolgu malzemesi;0,00-3,50 m arasında Dolgu Malzemesi bulunmaktadır.
- Az Çakıllı Siltli Kumlu Kil; 3,50-12,0 m arasında kahve renkli, katı kıvamlı, az çakıllı siltli kumlu Kil birimleri bulunmaktadır.
- Az Çakıllı Siltli Killi Kum; 12,00-20,00 m arasında kahverengimsi renkli, sıkı yapılı, az çakıllı siltli killi Kum birimleri bulunmaktadır.
- Az Çakıllı Siltli Kumlu Kil; 20,00-25,00 m arasında kahve renkli, katı kıvamlı, az çakıllı siltli kumlu Kil birimleri bulunmaktadır.

Yeraltı suyu seviyesi 7,00 m rastlanılmaktadır. Köprüye ait görsel Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Yaklaşım dolguları iyileştirilen köprünün genel görünümü

4.1. Kullanılan Zemin Parametreleri

PLAXIS ile sayısal modelin oluşturup ve çözülebilmesi için yukarıda ifade ettiğimiz zemin profilini PLAXIS paket programında tanımlamamız gerekir. Bu tanımlama için önceki bölümlerde anlattığımız üzere birçok zemin modeli bulunmaktadır. Bu bölümde “Hardening Soil zemin modeli” ve “Mohr Coulomb zemin modelini” kullanarak gerekli olan parametre girişini sağlayacağız. Zemin modelinin seçiminde en belirgin faktör zemin etüt ve deneyler sonucu elde ettiğimiz parametre sayısına bağlıdır. Problemin çözümünde kullanacağımız zemin modelleri ile ilgili parametreler ve analiz adımları aşağıda anlatılmıştır.

4.2.Başlangıç Durumunu Göre Analizlerin Yapılması

Bu bölümde yapılması planlanan Bursa yapımı düşünülen karayolları köprüsü ve yaklaşım dolgularının iyileştirilmesi için farklı zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çözüm iki şekilde gerçekleştirilmiştir ve ilk çözümde sayısal analiz modeli kurulmuş ve doğal duruma göre analizler gerçekleştirilmiş ve meydana gelen gerilmeler, toplam oturma miktarı ve deformasyonlar gözlemlenmiştir. Daha sonra üç farklı zemin güçlendirme yöntemine ait parametre girişi PLAXIS programına parametre girişi yapılarak çözümler tekrarlanmıştır. İkinci çözüm sonucunda elde edilen yeni oturma değerleri ile doğal durum arasındaki ilişki irdelenmiş sonuçlar karşılaştırılmış ve öneriler ortaya konulmuştur. Zemin ıslahı için jet grout, taş kolon ve geopier yöntemi kullanılarak yapılmıştır. PLAXIS yazılımı ile zemin kotları ve köprü modellenmiştir. AASHTO kamyon yükü sisteme eklenmiştir. Doğal durum ile yapılan çözümde analiz adımları aşağıda sıralanmıştır;

- Doğal durum,
- Kazı aşamalarının tamamlanması
- Köprü temeli, köprü ayağı ve döşemesinin aktif hale getirilmesi
- Geri dolgu adımlarının tamamlanması 5 günlük dolgu süresinin belirlenmesi,
- Konsolidasyon adımlarının tanımlanması ve 200 günlük konsolidasyon süresi tanımlanmıştır,

Hareketin yükün aktif hale getirilmesiyle birlikte hesaplama adımları tamamlanır. PLAXIS hesap modülü ait ekran çıktısı ve tanımlanan hesap adımları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	0	N/A	N/A
→ başlangıç koşulları	1	0	Plastic	Staged construction
→ 1.kazı	2	1	Plastic	Staged construction
→ 2.kazı	3	2	Plastic	Staged construction
→ temel+duvar+döş.	4	3	Plastic	Staged construction
→ 1.dolgu	7	4	Plastic	Staged construction
→ 1.konso	8	7	Consolidation	Staged Construction
→ 2.dolgu	9	8	Plastic	Staged construction
→ 2.konso	10	9	Consolidation	Staged Construction
→ 3.dolgu	11	10	Plastic	Staged construction
→ 3.konso	12	11	Consolidation	Staged Construction
→ 4.dolgu	13	12	Plastic	Staged construction
→ 4.konso	14	13	Consolidation	Staged Construction
→ yük	15	14	Plastic	Staged construction

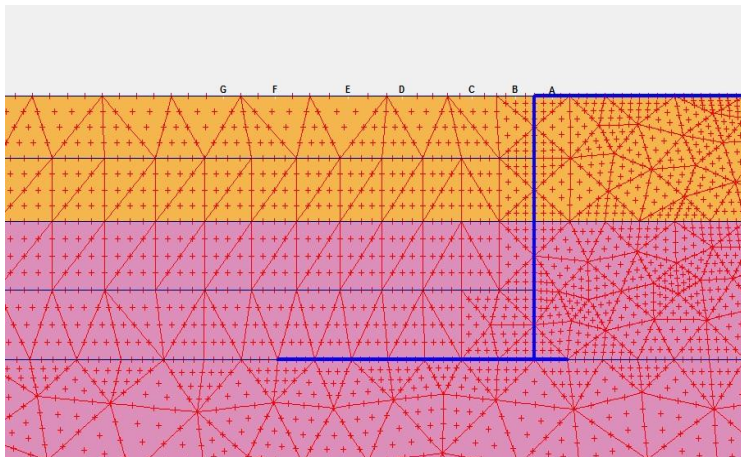
Şekil 4.2 PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde hesap adımları

Hesap adımları tanımlandıktan sonra analiz gerçekleştirilir ve analiz sonuçlandırıldığında her hesap adımının yanında Şekil 4.3'deki gibi yeşil tik oluşmaktadır. İstenilen hesap adımının üstüne tıkladığı durumda ise o aşamada meydana gelen deformasyon ve gerilme durumlarının sonuçları görüntülenebilmektedir. Yaklaşım dolgusu yüzeyinde seçilen deplasman noktaları Şekil 4.4'de verilmiştir. Problem çözüldükten sonra meydana gelen toplam deformasyon Şekil 4.5'de gösterilmiştir ve oluşan toplam oturma miktarı 387,89 mm seviyesindedir. Bu oturma miktarı kabul edilebilir seviyelerde değildir ve problem iyileştirme yöntemleri kullanılarak hesaplama adımları tekrarlanmış ve analizler yenilenmiştir.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	0	N/A	N/A
✓ başlangıç koşulları	1	0	Plastic	Staged construction
✓ 1.kazı	2	1	Plastic	Staged construction
✓ 2.kazı	3	2	Plastic	Staged construction
✓ temel +duvar +döş.	4	3	Plastic	Staged construction
✓ 1.dolgu	7	4	Plastic	Staged construction
✓ 1.konso	8	7	Consolidation	Staged Construction
✓ 2.dolgu	9	8	Plastic	Staged construction
✓ 2.konso	10	9	Consolidation	Staged Construction
✓ 3.dolgu	11	10	Plastic	Staged construction
✓ 3.konso	12	11	Consolidation	Staged Construction
✓ 4.dolgu	13	12	Plastic	Staged construction
✓ 4.konso	14	13	Consolidation	Staged Construction
✓ yük	15	14	Plastic	Staged construction

Şekil 4.3 Analiz sonucunda hesap adımlarının görünümü

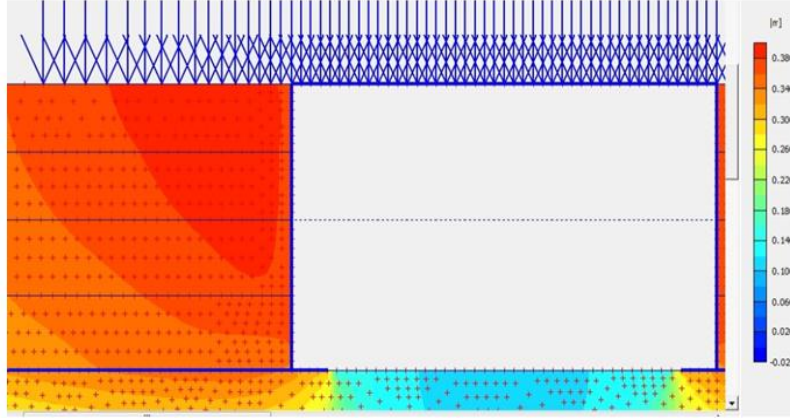
Şekil 4.5’deki yaklaşım dolgusu altında oluşan toplam oturma miktarı kabul edilebilir seviyelerde olmadığı görülmüştür ve bu durum servis yükleri sırasında istenilen performansı gösteremeyeceği sonucuna varılmış ve bu sonuçlardan hareketle bir sonraki bölümde jet grout, taş kolon ve geopier gibi zemin güçlendirme yöntemleri kullanılarak toplam oturma miktarının ve meydana gelen deformasyon davranış sonuçlarının kabul edilebilir seviyelere düştüğü gösterilecektir.



Şekil 4.4 Deplasman grafikleri için yaklaşım dolgusunun yüzeyinde seçilen noktalar

Dolgu altında herhangi bir zemin iyileştirme elamanı teşkil edilmeden önce dolgu yüzeyinde Şekil 4.4’deki gibi seçilen noktaların yapılan yükleme sonucu elde edilen deplasman değerleri Ek 1’de verilmiştir ve bu sonuçlar yorumlandığında ise dolgu yüzeyinde servis yüklerine karşı direnç gösteremeyeceği ve izin verilen sınırların üstünde oturma

miktarlarının oluşacağı görülmüştür. Bu durumun ise hareketli yük ve köprü kalıcı yükleri altında köprü ve yol üst yapısında yapısal hasarların oluşmasına ve ulaşımın olumsuz etkilenmesine yol açacaktır.



Toplam Deplasman =387,89 (mm)

Şekil 4.5 İyileştirme yapılmadan önceki saha durumu ve meydana gelen toplam oturma miktarı

4.3.İyileştirme Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Analizler

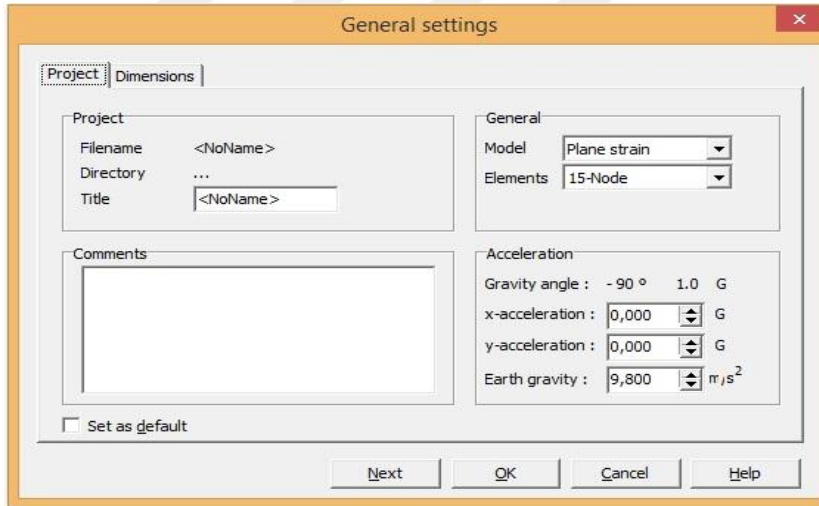
Jet Grout Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çözüm

Doğal durumda herhangi bir zemin iyileştirme yöntemi kullanılmadan elde edilen sonuçlar sürdürülebilir olmadığı ve servis yüklerini taşıyamadığı ve durumda ise zeminin güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu durumda çeşitli zemin güçlendirme teknikleri kullanılmıştır. Bu yöntemler sıklıkla tercih edilen jet grout, taş kolon ve geopier yöntemidir. Bu yöntemlere ait zemin parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Zemin güçlendirme yöntemlerine ait zemin parametreleri[59]

Tanım	Jet Grout	Taş Kolon	Geopier
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	20	21	21
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık(kN/m ³)	22	23	23
Permabilite k_x, k_y (m/gün)	0	100	100
Elastisite Modülü $E, kN/m^2$	5E+05	8E+04	1E+05
Poisson Oranı	0,3	0,25	0,25
Efektif İçsel Sürtünme Açısı	40	40	47
Kohezyon $c, kN/m^2$	5	0,5	4
Rinter	1	1	1

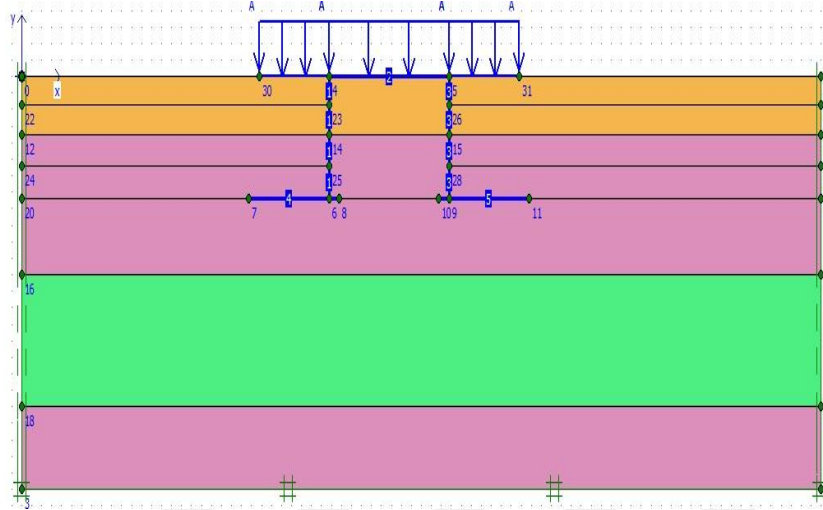
PLAXIS yazılımında yeni bir proje sayfası açılır ve açılan menüde projeye ait veri girişi yapılır ve PLAXIS çözümlerde sunmuş olduğu 6 düğüm noktalı veya 15 düğüm noktalı eleman seçilebilir. Sonuçların gerçeğe daha yakın olması için 15 düğüm noktalı eleman seçerek devam ediyoruz. Problemin sınır aralığını belirlemek için “dimensions” menüsünü kullanarak bu projemize ait veri girişini tamamlamış oluyoruz(Şekil 4.6’de).



Şekil 4.6 PLAXIS sınır aralığı ve düğüm noktası seçim menüsü

Açılan yeni menüde ise problemin çizilmesi ve zemin etüt raporundan elde edilen zemin profiline ait kalınlıklar çizilir(Şekil 4.7’de). Bu çizimler programın bünyesinde bulunan yardımcı elemanlar kullanılarak yapılır. “Lines” komutu ile zemin sınırı ve zemin kalınlıkları çizilmiştir. Köprü temeli, ayağı ve döşemesi “plate” komutu kullanılarak çizilmiştir. Sürsarj yükü, hareketli yük gibi yük atamaları ise “distributed load-load system

A” komutu kullanılarak yapılır. Problemimiz genel olarak sayısal ortamdaki modeli tamamlanmış olur ve “standart fixities” komutu kullanılarak deplasman sınırı tanımlanır.



Şekil 4.7 Problemin modellenmesi ve sınır koşullarının belirlenmesi

Yapılan bu tanımlamalardan sonra zemin parametre ait veri girişi yapılır. Veri girişi yapılırken Tablo 4.3’deki dolgu malzemesine ait zemin parametreleri kullanılır. Zemin etüt raporunun sonuçlarına göre 0,00 ile +3,50 kotları arasındaki zemin profili dolgu malzemesinden oluşmaktadır.

Tablo 4.3 Dolgu malzemesine ait zemin parametreleri[59]

Tanım	Dolgu
Zemin Modeli	Mohr-Coulomb Model
Drenaj Durumu	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	19
Suya Doymun Birim Hacim Ağırlık(kN/m ³)	19
Permabilite k_x, k_y (m/gün)	0
Elastisite Modülü $E, kN/m^2$	2E+03
Poisson Oranı	0,2
Efektif İçsel Sürtünme Açısı	20
Kohezyon $c, kN/m^2$	1
Genleşme Açısı ψ	0
Rinter	1

+3,5 ile +12,00 kotları arasında ise az çakıllı kumlu kil malzemesi bulunmaktadır ve +12,00 ile +20 kotları arasında ise az çakıllı killi kum malzemesine sahiptir. +20,00 ile +25,00 kotları

arasında yine kil tabakası mevcuttur. Bu zemin malzemelerine ait zemin parametreleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4 Kum ve Kil malzemesine ait zemin parametreleri[59]

Tanım	Az Çakıllı Kumlu Kil	Az Çakıllı Killi Kum
Zemin Modeli	Mohr-Coulomb Model	Mohr-Coulomb Model
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	16	19
Suya Doymun Birim Hacim Ağırlık(kN/m^3)	18	20
Permabilite k_x, k_y (m/gün)	1E-04	0,6
Elastisite Modülü, E_{ref}	3E+03	5E+04
Poisson oranı	0,333	0,3
Efektif İçsel Sürtünme Açısı	5	34
Kohezyon $c, kN/m^2$	30	1
Genleşme Açısı ψ	0	4

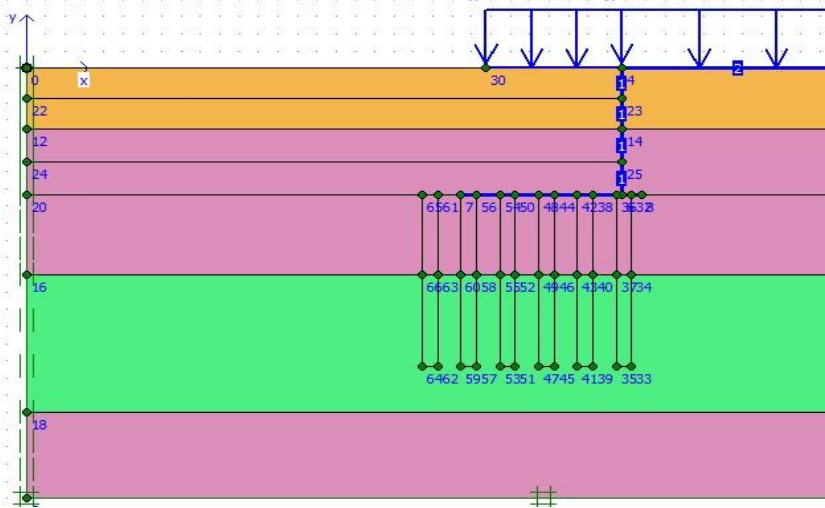
Probleme ait çizimleri oluşturduktan sonra hesaplamaların yapılabilmesi ve gerilmelerin, toplam oturmaların elde edilebilmesi için zemin malzemelerinin tanımlanması gerekir. PLAXIS’te zemin malzemesi tanımlayabilmek için “material sets” ikonuna tıklanır ve açılan menüde hazır sunulan zemin malzemeleri vardır ve yeni bir malzeme tanımlamak için “new” sekmesi açılır. Burada açılan pencerede zemine ait kuru birim hacim ağırlık, suya doymun birim hacim ağırlık ve zemine ait permabilite parametreleri girilir(Şekil 4.8’de).

Şekil 4.8 PLAXIS malzeme veri girişi penceresi

İkinci sekmede ise malzemeye ait elastisite modülü, poisson oranı, içsel sürtünme açısı, genişleme açısı ve kohezyon gibi değerleri girilebilmektedir(Şekil 4.9).

Şekil 4.9 PLAXIS veri girişi ekranı

Zemin malzemesine ait tanımlar yapıldıktan sonra bu çalışmada kullanılan zemin güçlendirme yöntemleri olan; jet grout, taş kolon ve geopier kolonlar yük altındaki davranışlarını elde edebilmek için zemin gibi tanımlıyor ve malzeme özelliklerini ise Tablo 4.2'deki verilen parametreleri kullanarak programa girişini sağlıyoruz. Yaklaşım dolgusu ve temel altında ilk uygulanan güçlendirme yöntemi olarak jet grout kolonu kullanılmıştır. Jet grout kolonları PLAXIS'te yine "lines" komutu kullanılarak istenilen çap, uzunluk ve aralık değerlerinin koordinatları girilerek çizilir.(Şekil 4.10'da)

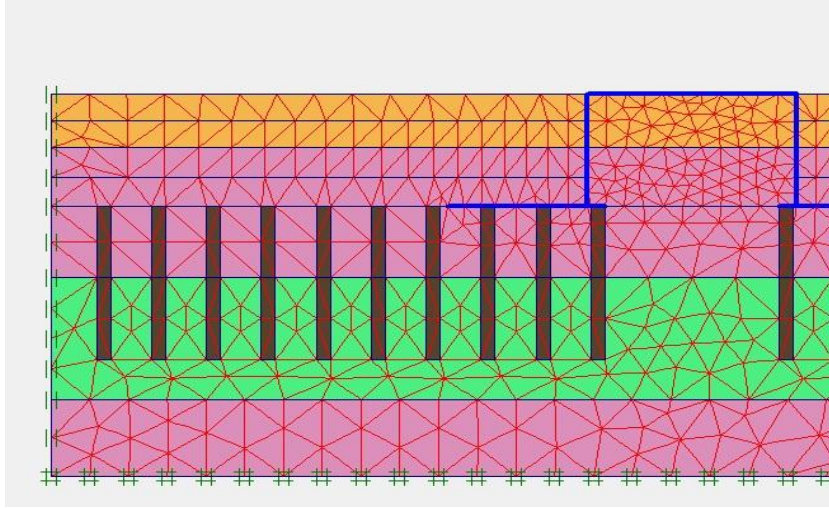


Şekil 4.10 Yaklaşım dolgusu ve temel altında jet grout kolon yerleşimi yapılrken

Jet grout kolonları çizimleri tamamlandıktan sonra malzeme tanımlama ikonundan jet grout malzeme tanımlaması yapılır ve Tablo 4.2'daki parametreler kullanılır. "Material sets" komutuna tıklanır ve bu menüden yeni malzeme tanımlanır. Açılan pencerede jet grout kolonlarına ait kuru birim hacim ağırlık, suya doydun birim hacim ağırlık ve permabilite değerleri girilir ve ikinci sekmede elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon değeri, içsel sürünme açısı ve genleşme açısı değerleri girişi yapılır(Şekil 4.11).

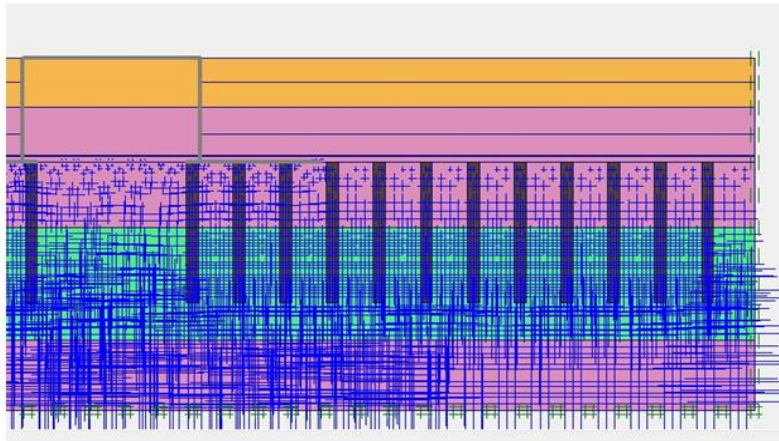
Şekil 4.11 Jet grout iyileştirme yöntemi malzeme parametre girişi

Geoteknik probleme ile ilgili sayısal modelleme ve malzeme tanımları yapıldıktan sonra "generate mesh" komutuyla sonlu elemanlar ağı oluşturulur(Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Sayısal modelin mesh aralığı

Mesh aralığı belirlendikten sonra “update” ikonoylu önceki menüye tekrar dönülür. “Initial conditions” komutuyla açılan menüde yeraltı suyunun seviyeni belirlenir. Zemin etüdü sırasında gözlem çukurlarında yeraltı suyu seviyesi +7,00 m de rastlanmıştır ve yeraltı suyu veri girişi yapıldıktan sonra “generate water pressures” komutuna tıklanır ve boşluk suyu basıncı oluşturulur ve “update” komutuyla önceki menüye dönüş yapılır(Şekil 4.13).



Boşluk Suyu Basıncı

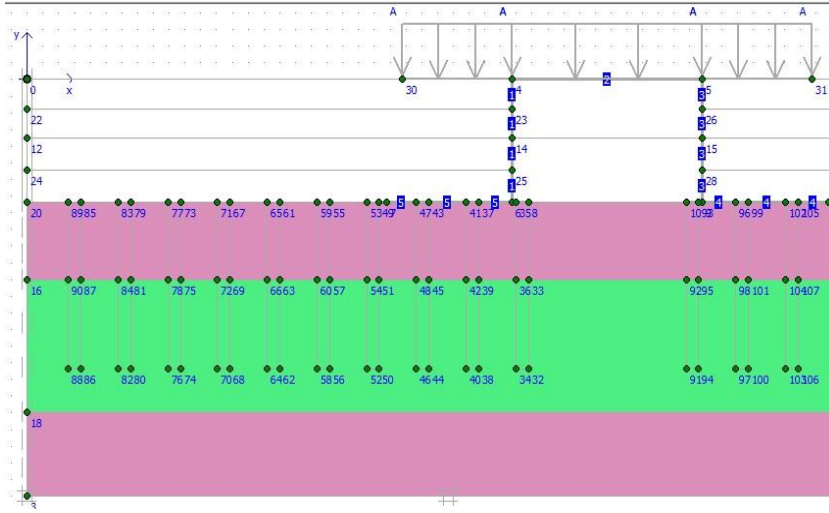
Şekil 4.13 Boşluk suyu basıncı konturlarının oluşturulması

“Generate initial stresses” komutuna tıklanarak başlangıç gerilimi hesaplanır. Zemin ağırlığı için toplam çarpan olan K_0 değeri 1 olarak kabul edilir. Bunun anlamı ise başlangıç gerilmelerinin oluşturulmasında tüm zeminlerin ağırlıklarınının kullanılmasıdır.

K_0 çarpanı ise Jaky formülüyle bulunur ve bu formül Denklem 4.1’de verilmiştir.

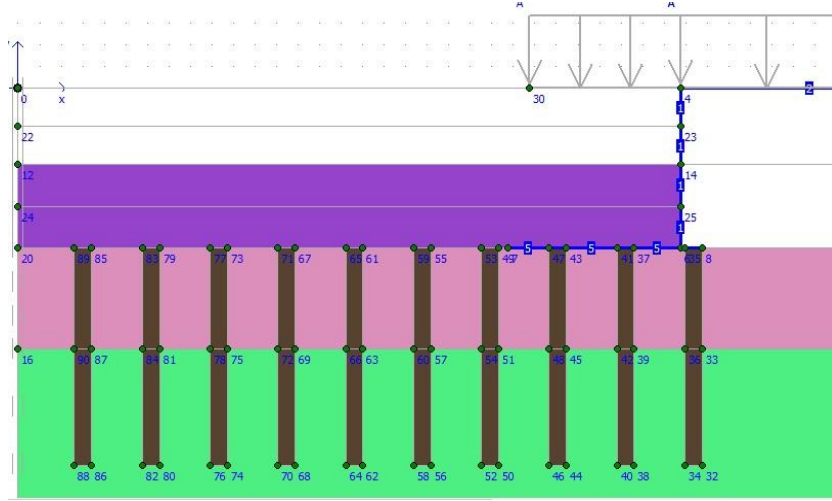
$$K_0=1-\sin\phi \quad (4.1)$$

“Calculation” komutuna tıklanarak hesap aşamasına geçilir. Açılan hesap menüsünde tasarımcı tarafından gerçek durumu temsil edecek şekilde kademeli inşaat aşamaları tanımlanmalıdır. Önceki bölümde doğal duruma göre çözüm yapılmıştır ve oluşan toplam oturma miktarı oldukça yüksek elde edilmişti. Bu bölümde ise jet grout yöntemi kullanılarak analizler tekrarlanacaktır. Hesap adımları oluşturulurken zeminin başlangıç doğal durumu dikkate alınır ve bu adımda zemin ile etkileşim halinde olan yapısal elemanlar ve jet grout kolonlarının inaktif durumda olmasına dikkat edilir. İkinci adımda belirlenen kotlarda kazılar yapılır(Şekil 4.14).



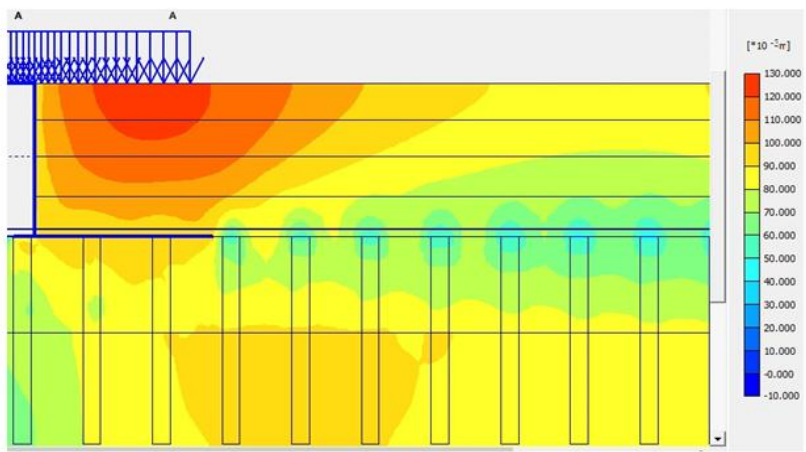
Şekil 4.14 Kazı aşamasının tamamlanması

Üçüncü aşamada jet grout kolonları aktif hale getirilir ve sonraki aşamada ise temel, köprü ayağı ile döşemesi inaktif durumdan çıkarılır. Yaklaşım dolgusunun inşası her biri 5 gün süren 4 aşamadan oluşur ve inşaat aşamasında sonra aşırı boşluk basınçlarının dağılmasına izin vermek için 200 günlük bir konsolidasyon süresi tanımlanır. Konsolidasyon analizi yapılırken hesap tip sekmesinden “consolidation” seçili duruma getirilir. Konsolidasyon analizinin doğru yapılması için kritik bir minimum değerden daha küçük bir sürenin seçilmesi gerilme dalgalanmalarına neden olur. Dolgular tanımlanırken geometrik konfigürasyon sekmesinden aktif hale getirilir. Hareketli yükler aktif hale getirildikten sonra analiz tamamlanır. Şekil 4.15’deki dolgu aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Yaklaşım dolgusu ve konsolidasyonların grafiksel gösterimi

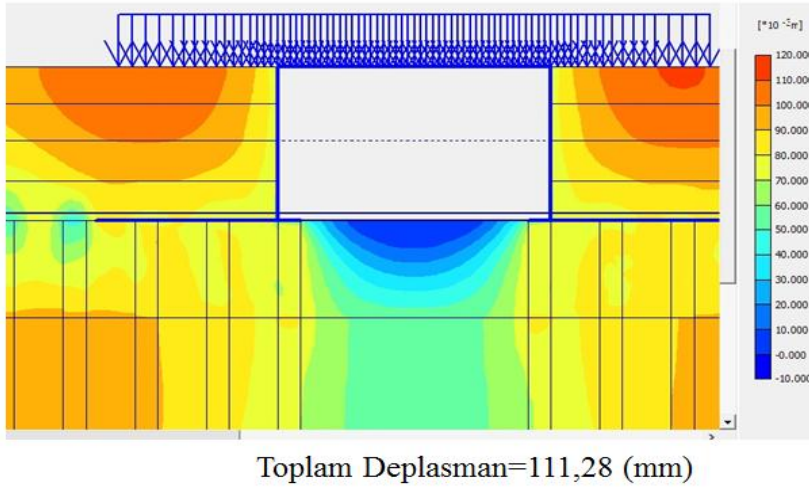
Zemin güçlendirmesinde kullanılan jet grout kolonları \varnothing 80 cm ve \varnothing 100 cm'lik çaplara sahiptir ve jet grout kolonu yaklaşım dolgusu altında derinlik boyunca 10 m boyunda ve 275 cm aralıklarla uygulanmıştır. Yapılan bu çözüm sonucunda ise yaklaşım dolgusunda oturumların kabul edilebilir seviyelere düşeceği görülmüştür.



Toplam Deplasman=126,16 (mm)

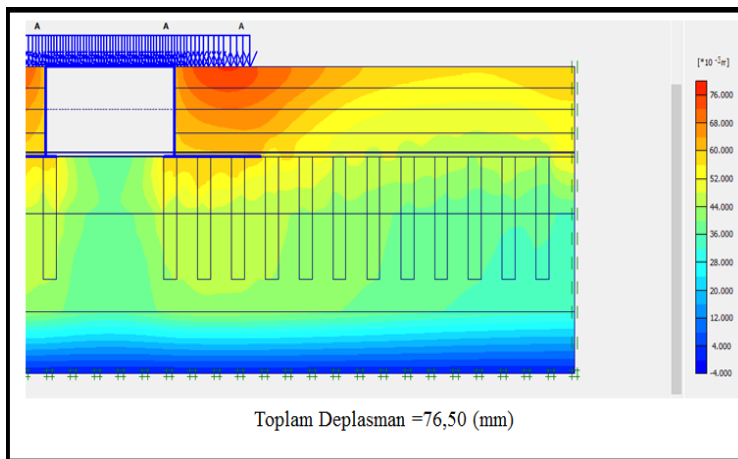
Şekil 4.16 Yaklaşım dolgusu altında jet grout kolonlu modelde oluşan toplam oturma

Köprü yaklaşım dolgusu altındaki zayıf zemin \varnothing 80 cm çapına sahip jet grout kolonları ile güçlendirildiğinde Şekil 4.16'daki görüleceği gibi meydana gelen toplam oturma miktarı 126,16 mm'dir.



Şekil 4.17 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 100 cm çapında jet grout kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı

Zayıf zemin tabakası \varnothing 100 cm çapındaki jet grout kolonları ile takviye edildiğinde ise oluşan kalıcı deformasyon miktarı Şekil 4.17’de görüleceği üzere 111,28 mm’dir. Aynı iyileştirme yöntemi kullanılarak, kolon boyu ve yerleşim aralığı sabit tutularak elverişsiz zeminde teşkil edilen kolon çapın artırılması durumunda oluşan oturma miktarının azalacağı görülmüştür. Yapılan diğer bir çalışmada ise jet grout kolonları yerleşim aralıkları ve kolon uzunluğu sabit tutularak yaklaşım dolgusu altında imal edilen kolon çapı \varnothing 120 cm genişliğine kadar artırılmış ve analizler yeni durum için tekrarlanmıştır.

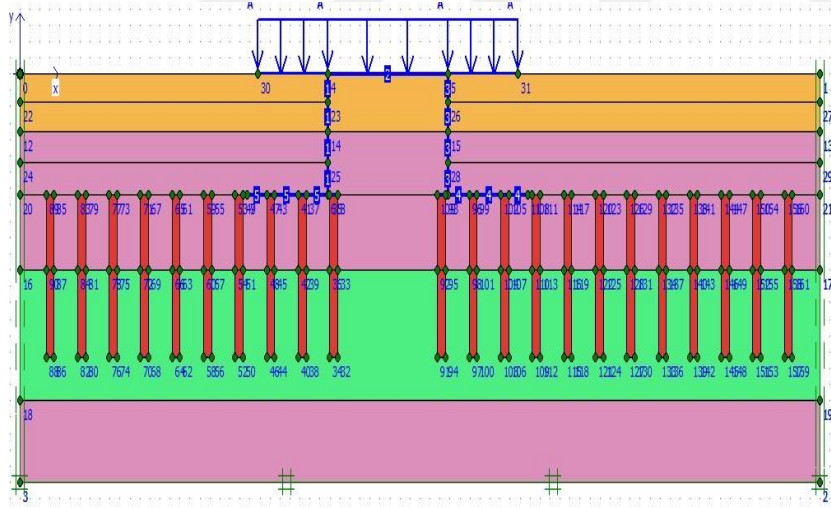


Şekil 4.18 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 120 cm çapında jet grout kolonlu modelde oluşan deplasman miktarı

Şekil 4.18 'de yaklaşım dolgusu altında \varnothing 120 cm çapında jet grout kolonları varken oluşan toplam oturma miktarı elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elverişsiz zemin tabakalarında kolon çapının artırılması zeminde oturma miktarını büyük ölçüde istenilen düzeye indirmekte ve zeminde sıkışma miktarının azalmasına yardımcı olmaktadır. Jet grout kolon çapı \varnothing 120 cm mertebelerine çıkarıldığı takdir de oluşacak toplam oturma miktarının ise 76,50 mm mertebelerinde oluşacağı gözlemlenmektedir.

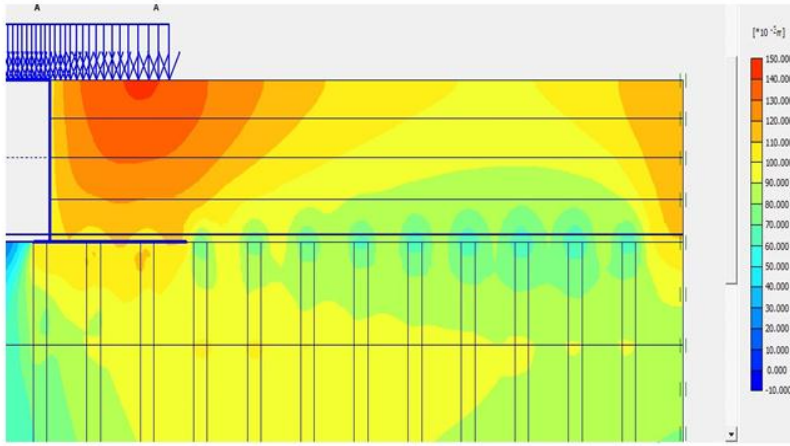
Taş Kolon Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çözüm

Bu bölümde ise taş kolon yöntemi kullanılarak zayıf zeminde güçlendirme yapılmıştır. Taş kolonların PLAXIS yazılımıyla yapılan analizlerinde jet grout kolonlarının hesap ve analiz adımları oluşturulurken kullanılan yaklaşım ile malzeme parametre girişleri yapılmış sayısal ağ modeli oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. İki farklı çapa sahip kolonlar kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Taş kolonlar \varnothing 80 cm ve \varnothing 100 cm'lik çaplara sahiptir ve yaklaşım dolgusu altında derinlik boyunca 10 m uzunluğunda uygulandığı kabul edilmiş ve 275 cm aralıklarla modellenmiştir(Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Zeminde taş kolonlar kullanılarak iyileştirme yapılması

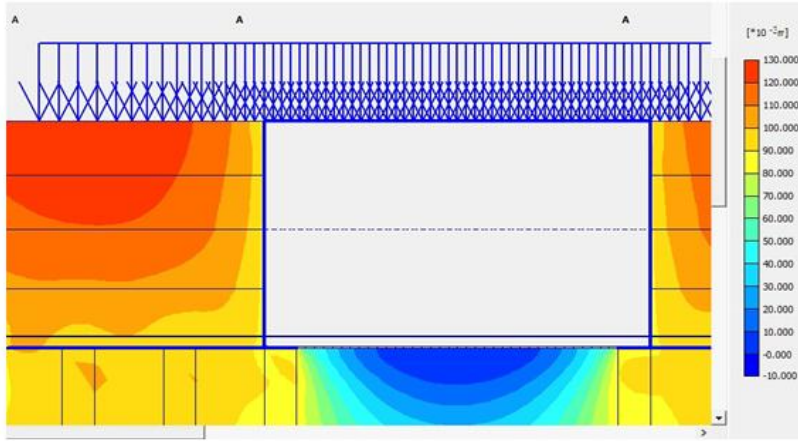
Yapılan bu çözüm sonucunda ise yaklaşım dolgusunda oturmaların kabul edilebilir seviyelere düşeceği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda Şekil 4.20'de görüleceği gibi \varnothing 80 cm'lik taş kolonların oluşturulması durumunda meydana gelen oturma miktarı 141,44 mm'dir.



Toplam Deplasman=141,44 (mm)

Şekil 4.20 Yaklaşım dolgusu altında 80 cm çapında taş kolonu modelde oluşan toplam oturma miktarı

Taş kolonlar ile zeminde \varnothing 100 cm çapında kolon elemanlar oluşturulması durumunda ise meydana gelen toplam oturma miktarı ise Şekil 4.21’de gösterilmiştir ve oluşan oturma miktarı 128,17 mm’dir. Zeminde teşkil edilen taş kolon çapı arttırılırken, kolon boyu ve yerleşim aralığı sabit tutulmuştur.

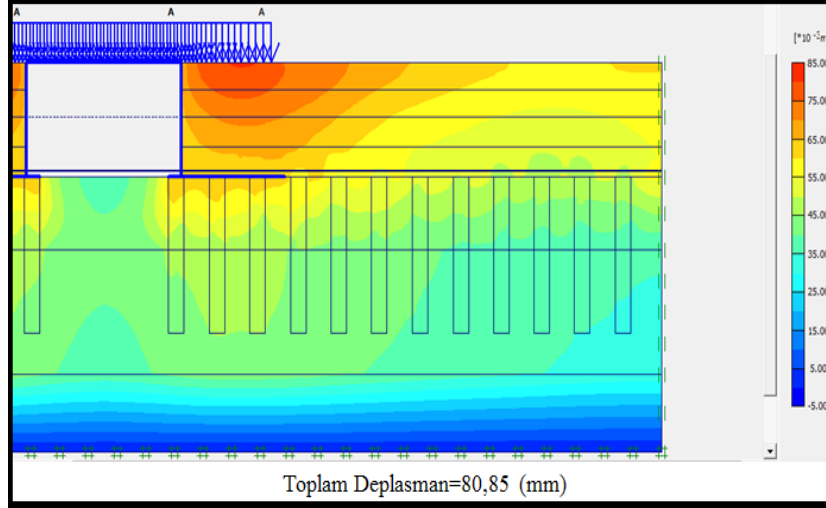


Toplam Deplasman=128,11 (mm)

Şekil 4.21 Yaklaşım dolgusu altında 100 cm çapında taş kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı

Problemlili zeminde taş kolonların oluşturulması ile yapılan diğer çözüm yönteminde ise taş kolonların yerleşim durumu ve zemin içindeki uzunluğu değiştirilmeden çap genişliği büyütülmüştür. Taş kolon \varnothing 120 cm çap genişliğinde sayısal model oluşturulup tekrar analiz

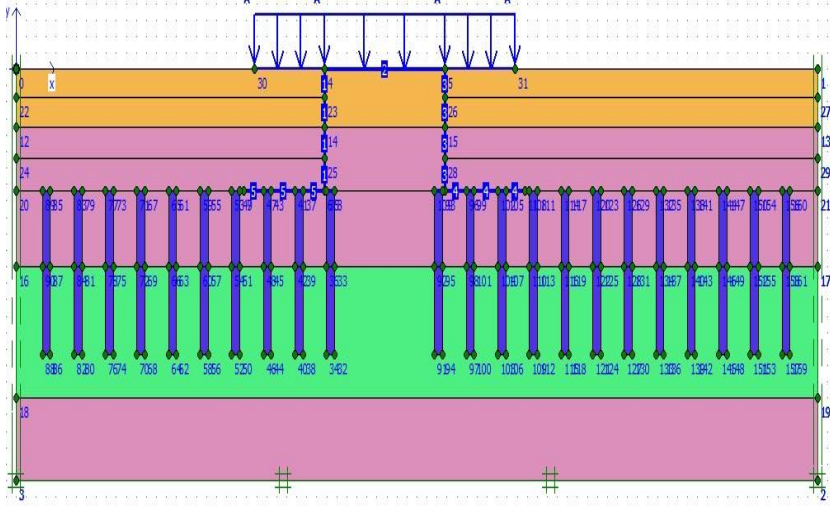
edilmiştir. Şekil 4.22’de görüleceği üzere yaklaşım dolgusu altındaki zayıf zemin tabakaları \varnothing 120 cm genişliğinde taş kolon elemanları ile güçlendirilmesi sonucunda meydana gelecek oturma miktarının 80,58 mm seviyelerine kadar düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.22 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 120 cm çapında taş kolonlu modelde oluşan deplasman miktarı

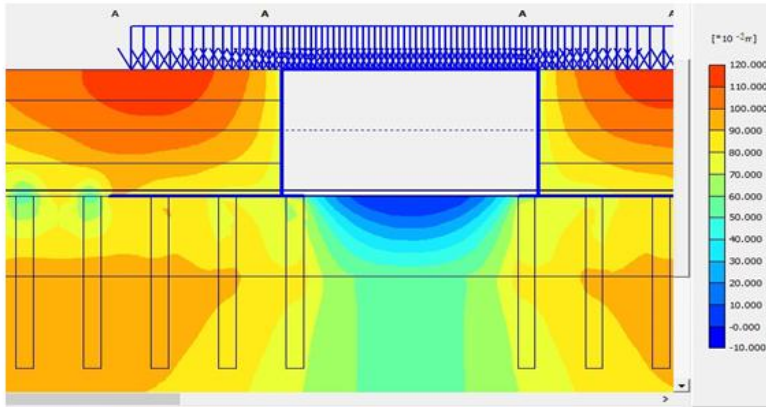
Geopier Kolon Yöntemi Kullanılarak Yapılan Çözüm

Bu bölümde ise geopier yöntemi kullanılarak zayıf zemin tabakalarının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Geopier yöntemi PLAXIS paket programı ile yapılan analizlerinde jet grout kolonlarının hesap ve analiz modeli oluşturulurken kullanılan yaklaşım ile malzeme parametre girişleri yapılmış ve sayısal ağ modeli oluşturulmuştur. Farklı çaplara sahip geopier kolonları kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Geopier kolonlar \varnothing 80 cm ve \varnothing 100 cm’lik çaplara sahiptir ve yaklaşım dolgusu altında derinlik boyunca 10 m zemin profili boyunca ve 275 cm aralıklarla uygulanmıştır(Şekil 4.23’de).



Şekil 4.23 Geopier kolonları kullanılarak iyileştirme yapılması

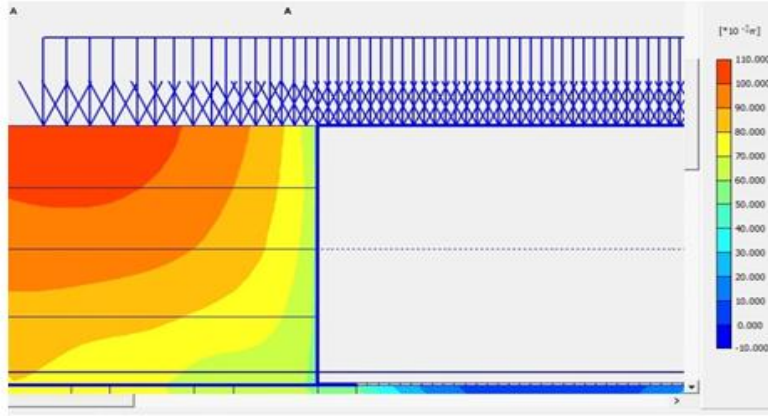
Oluşturulan sayısal model ve analizler sonucunda geopier kolonları kullanılarak yapılan bu çözüm neticesinde yaklaşım dolgusu altında oturmaların kabul edilebilir seviyelere düşeceği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda Şekil 4.24'deki gibi \varnothing 80 cm'lik geopier kolonların oluşturulması durumunda meydana gelen oturma miktarı 115,92 mm'dir.



Toplam Deplasman=115,92 (mm)

Şekil 4.24 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 80 cm çapında geopier kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı

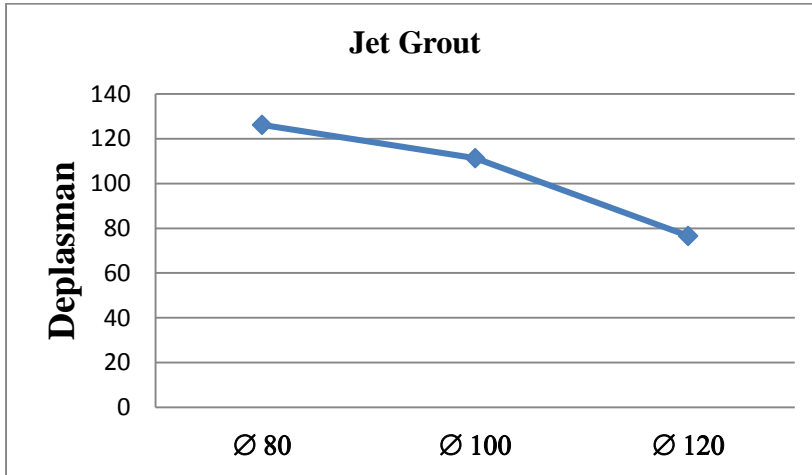
\varnothing 100 cm çapında oluşturulması durumunda meydana gelen toplam oturma miktarı ise Şekil 4.25 gösterilmiştir ve elde edilen oturma miktarı 104,68 mm'dir.



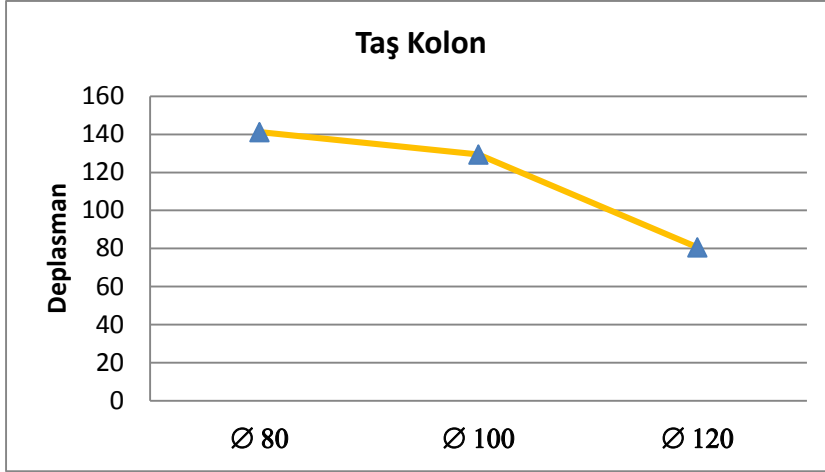
Toplam Deplasman=104,68

Şekil 4.25 Yaklaşım dolgusu altında \varnothing 100 cm çapında geopier kolonlu modelde oluşan toplam oturma miktarı

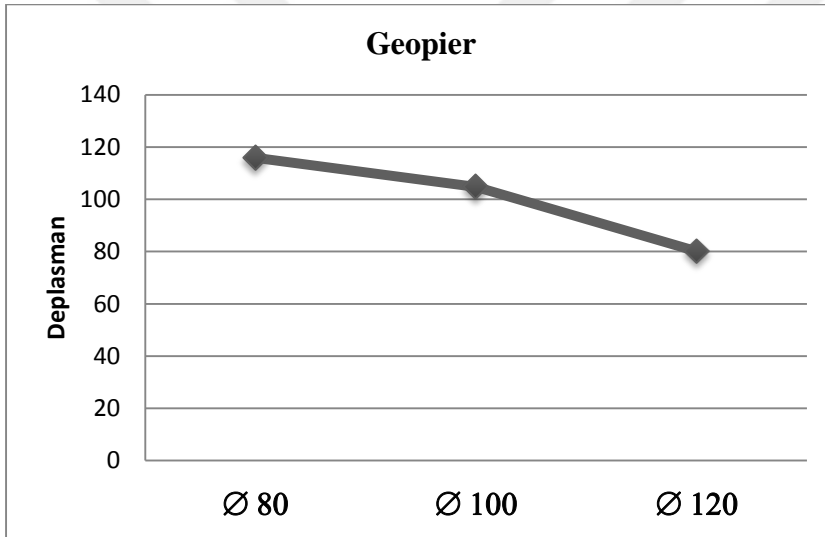
Jet grout yöntemi ve taş kolon yöntemi ile \varnothing 120 cm çapındaki kolonların teşkili sonucunda sayısal yöntemlerle yapılan analizler neticesinde oluşan toplam deplasman miktarı geopier kolon yöntemiyle ise elde edilen toplam oturma miktarı 80,15 mm civarında olmaktadır. Zemin güçlendirme yöntemlerinde kolonların grup olarak imal edilmesi durumunda çap artışı iyileşen zemin miktarını arttırmakta ve sıkışma oranında azalma oluşmaktadır.



Şekil 4.26 Jet grout kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki



Şekil 4.27 Taş kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki



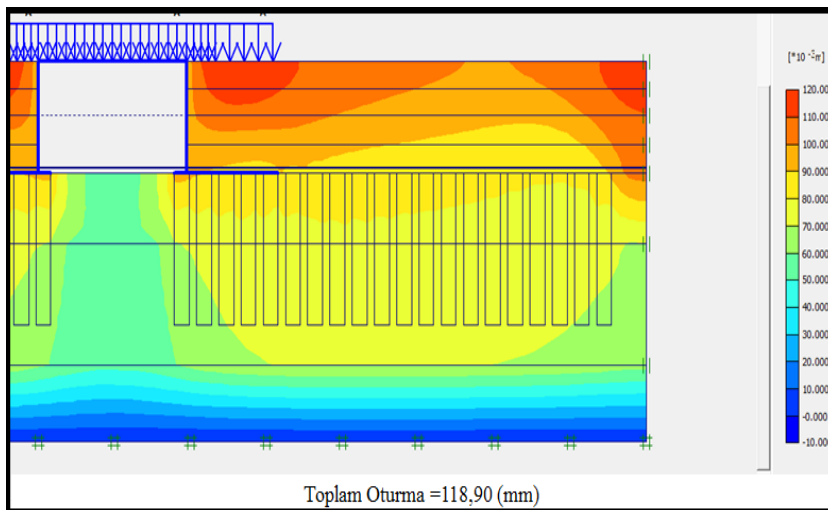
Şekil 4.28 Geopier kolon imalatında çap artışının oturma miktarı arasındaki ilişki

Yaklaşım dolguları jet grout, taş kolon ve geopier kolon yöntemleri ile farklı çaplarda rijit kolonlar modellenmiş ve bu yöntemlerin kullanıldıkları çaplara bağlı olarak oluşan oturma miktarları Tablo 9.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5 İyileştirme yöntemine bağlı olarak oluşan oturma miktarları

Kolon Çapı	Ø 80	Ø 100	Ø 120
	(mm)	(mm)	(mm)
Jet Grout	126,16	111,28	76,5
Taş Kolon	141,23	129,42	80,58
Geopier	115,92	104,68	80,15

PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler sonucunda Tablo 4.5’de veriler elde edilmiştir. Ancak elde edilen bu oturma değerlerine bağlı olarak hangi yöntemin daha avantajlı ve uygulama açısından maliyet kriterleri bakımından daha ekonomik olduğu sonucuna varamamaktayız. Buna göre kullanılacak zemin iyileştirme yöntemlerinin oturma değerleri birbirine yakın sonuçlar elde edilmesi durumunda oluşacak maliyet değerleri incelenmiştir. Tablo 4.5’deki elde edilen oturma değerleri incelendiğinde geopier yöntemi için Ø 80 cm çapında kolonların imal edilmesi durumunda oluşan oturma değeri 115,9 mm ve jet grout yönteminde ise bu değere en yakın oturma miktarı olarak 111,3 mm ve bu değere Ø 100 cm’lik çapa sahip kolonlar ile ulaşabilmekteyiz. Taş kolonlar için ise yerleşim aralığı 120 cm, kolon çapı 120 cm ve kolon uzunluğu 10 m olarak tasarlanması durumunda ise elde edilen oturma değeri Şekil 9.29’da görüleceği üzere oluşan yeni oturma değeri 118,9 mm mertebesindedir.



Şekil 4.29 Taş kolonların yerleşim aralığına bağlı olarak oluşan toplam oturma miktarı

İyileştirme öncesinde elde edilen deplasman değerleri ile iyileştirme sonrasında elde edilen deplasman değerleri arasında büyük değer farklılığı söz konusudur. Zayıf zemin sahalarında

inşa edilmesi planlanan yapıların proje tasarım kriterlerini yerine getirebilmesi için tercih edilen zemin iyileştirme yöntemi göstereceği güçlendirme performansının yanında ekonomik olmasına aranılan başlıca bir diğer parametredir. Kullanılan zemin iyileştirme ile imal edilen rijit elamanın zemin tabakalar içerisinde de 1000 m yakın teşkil edileceği varsayılarak maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Ekonomik kriterlerin belirlenmesinde kullanılan birim fiyat analizleri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018 yılına ait birim fiyat cetvelleri kullanılarak Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'deki veriler elde edilmiştir.

Tablo 4.6 Geopier kolon birim fiyat analizi

Poz No	Girdiler	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
	Delgi Ekipmanı:				
03.568/1A(Y)	Geopier kolon delgi ekipmanı ile delgi makinası'nın 1 saatlik ücreti	Saat	0,28	199,44	55,84
	Malzeme:				
04.001/052	63 mm'ye kadar kırmataş (en az iki tane sınıfı karıştırılarak hazırlanmış)	m ³	0,53	27,00	14,31
	İşçilikler:				
4.031	Su	m ³	0,65	6,62	4,30
1.409	Formen	Saat	0,25	18,25	4,56
1.501	Düz işçi	Saat	0,5	9,10	4,55
	Kâr ve genel giderler hariç toplam				83,57
	Kâr ve genel giderler % 25				20,89
	1 m kârlı birim fiyatı				104,46

Tablo 4.7 Jet grout birim fiyat analizi

Poz No	Girdiler	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
	Monitoring sistemli; yüksek basınç pompası, su pompası, kompresör, karıştırıcı ünitesi, silo, su tankı ve benzerinden oluşan ekipman ile delgi makinası				
03.642(Y)	Jet grouting ekipmanı ile delgi makinası'nın 1 saatlik ücreti	Saat	0,1	630,19	63,02
	İşçilikler:				
4.031	Su	m ³	0,65	6,62	4,30
1.409	Formen	Saat	0,25	18,25	4,56
1.501	Düz işçi	Saat	0,5	9,1	4,55
	Kâr ve genel giderler hariç toplam				76,43
	Kâr ve genel giderler % 25				19,11
	1 m kârlı birim fiyatı				95,54

Tablo 4.8 Taş kolon birim fiyat analizi

Poz No	Girdiler	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı
	Delgi Ekipmanı:				
03.642(Y)	Taş kolon delgi ekipmanı ile delgi makinası'nın 1 saatlik ücreti	Saat	0,085	630,19	53,57
	Malzeme:				
04.001/052	63 mm'ye kadar kırmataş (en az iki tane sınıfı karıştırılarak hazırlanmış)	m ³	1,19	27,00	32,02
	İşçilikler:				
4.031	Su	m ³	0,65	6,62	4,30
1.409	Formen	Saat	0,25	18,25	4,56
1.501	Düz işçi	Saat	0,5	9,10	4,55
	Kâr ve genel giderler hariç toplam				99,00
	Kâr ve genel giderler % 25				24,75
	1 m kârlı birim fiyatı				123,75

İyileştirme yöntemleri ile yapılan analizler sonucunda ise Tablo 4.9'deki değerler elde edilmiştir. Maliyet kriterleri açısından en ekonomik yöntemin jet grout yöntemi olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.9 Zemin iyileştirme yöntemlerine ait maliyet analizleri

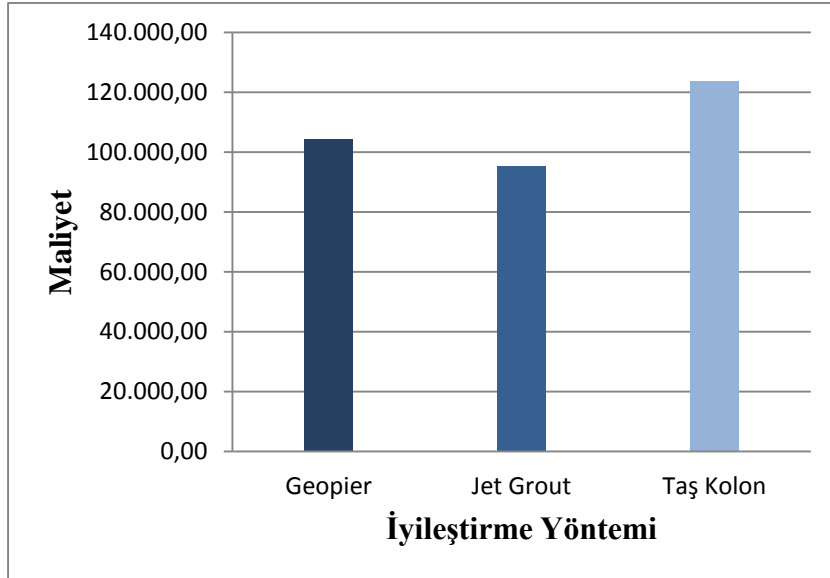
Zemin İyileştirme Yöntemi	Birimi	Miktarı	B.Fiyat(TL)	Tutar(TL)
Geopier	m	1000	104,46	104.460,00
Jet Grout	m	1000	95,54	95.540,00
Taş Kolon	m	1000	123,75	123.750,00

Tablo 4.9'deki veriler ışığında Şekil 9.30'daki parametreler elde edilmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada ise kullanılan iyileştirme yöntemlerinin Ø 120 cm çapında kolonlar ile zeminin güçlendirilmesi durumunda ise Tablo 4.10'daki oturma miktarları elde edilmiştir ve oluşan oturma miktarları oldukça yakın değerlerdir. Bu durum için maliyet oranları belirlendiğinde ise;

Taş kolon imalatı için harcanacak bedelin 123,75 TL olduğu,

Geopier kolon için harcanacak bedelin 126,60 TL olmakta,

Jet grout kolonları için harcanacak bedelin ise 114,80 TL olmaktadır. Bu bedellere göre 1000 m kolon elemanın teşkil edilmesi durumunda ise oluşacak maliyet Tablo 4.10'da verilmiştir.

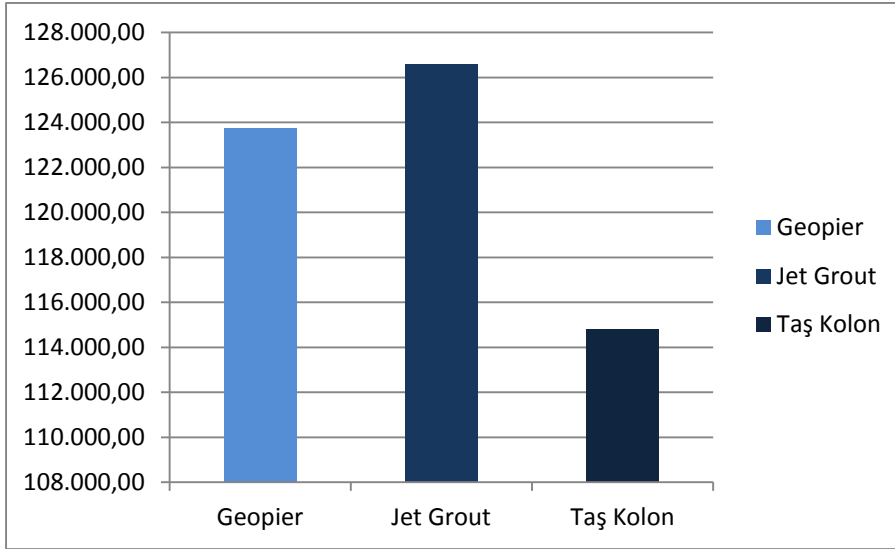


Şekil 4.30 Zemin iyileştirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra elde edilen oturma miktarı grafiksel dağılımı

Tablo 4.10 Ø 120 cm çapındaki kolonlar ile iyileştirme yapılması durumunda oluşan maliyet oranları

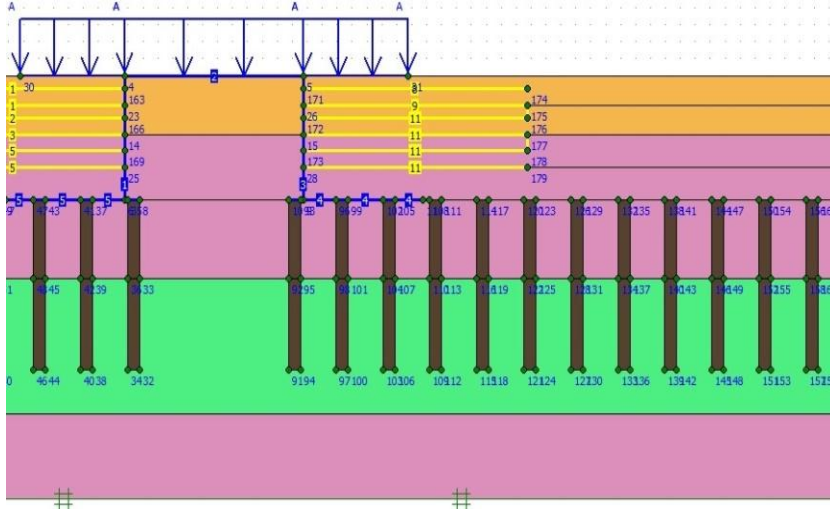
Zemin İyileştirme Yöntemi	Birimi	Miktarı	B.Fiyat(TL)	Tutar(TL)
Geopier	m	1000	123,75	123.750,00
Jet Grout	m	1000	126,6	126.600,00
Taş Kolon	m	1000	114,8	114.800,00

İyileştirme yöntemleri ile geliştirilen zemin aynı yerleşim aralığına sahip, aynı kolon uzunluk ve aynı büyüklükteki çaplara sahip olması durumunda ise oluşan oturma miktarları oldukça yakın miktarlardır ancak yöntemleri uygulama kriterlerine ve kullanılan malzeme sarfiyatına bağlı olarak farklı maliyet bedellerine sahiptir ve bu durum için Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak en ekonomik yöntemin taş kolon yöntemi olduğu sonucuna varılır.

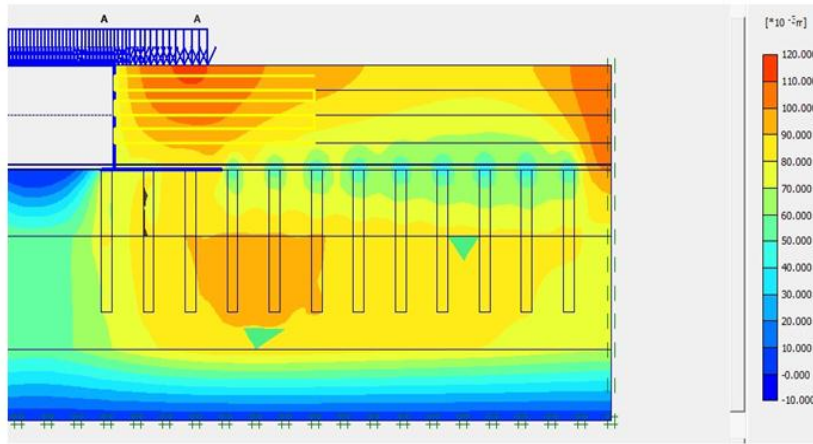


Şekil 4.31 Kolon çapı, uzunluğu yerleşim aralığı aynı olması durumunda oluşan maliyet oranları

Yapılan zemin güçlendirme işlemleri sonucunda toplam oturma değerleri ve maliyet kriterleri göz önünde bulundurularak tavsiye edilen zemin iyileştirme yöntemi jet grout tekniğidir. Yaklaşım dolguları altında 80 cm çapında jet grout kolonları varken 1,00 m düşey aralıklarla kullanılan geogridler ile yapılan analizler sonucunda elde edilen toplam oturma miktarının, 100 cm jet grout kolonları kullanılması sonucu oluşan toplam oturma değerine oldukça yakın çıktığı görülmüştür(Şekil 9.32). Jet grout kolonları ve geogrid ile yapılan analiz sonucunda oluşan toplam oturma miktarı Şekil 9.33’de gösterilmektedir. Geogrid malzemesi için PLAXIS veri girişi Şekil 9.34’deki gibi yapılmıştır.

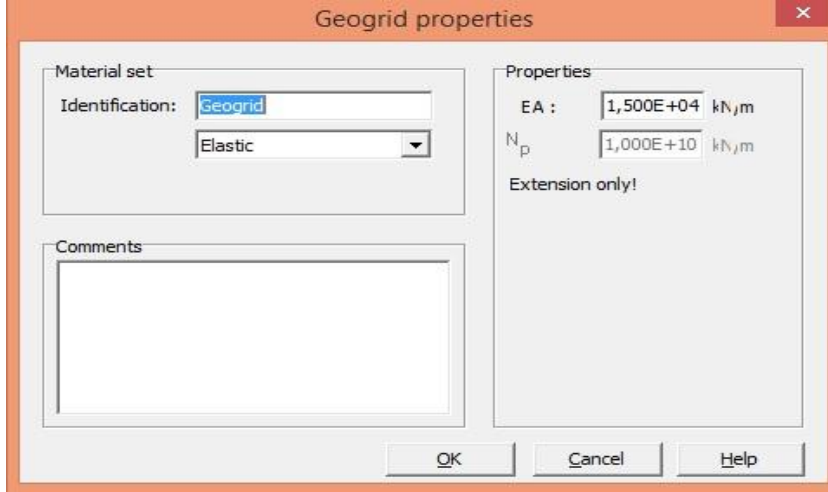


Şekil 4.32 Jet grout kolonları ve geogridler kullanılarak yaklaşım dolgularının iyileştirilmesi



Toplam Deplasman=113,18 (mm)

Şekil 4.33 Jet grout kolonları ve geogridler kullanılarak yaklaşım dolgularının iyileştirilmesi sonucunda oluşan deplasmanlar



Şekil 4.34 Geogrid malzeme özelliklerinin tanımlanması[48]

Hesap modülüne geçildiğinde jet grout kademeli inşaat adımları girilirken takip edilen hesap adımlar takip edilmiştir. Kazı aşamaları tamamlandıktan sonra yaklaşım dolgusu ve temel altındaki jet grout kolonları aktif hale getirilmiştir. Geri dolgular yapılmış ve geogrid aktif hale getirildikten sonra oturma değerlerin elde edilebilmesi için analiz tipinden konsolidasyon seçili hale getirilir ve bu işlemler yapılan her dolgu adımından sonra yüzeye kadar tekrarlanmıştır. Dolgu malzemesinde meydana gelebilecek çökmeler ve bozulmalar geogrid yardımıyla ve dolgu altındaki zayıf zemin tabakaları ile jet grout, taş kolon ve geopier gibi çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Jet grout ve geogrid ile zemin iyileştirme yapılırken dolgu yüzeyinden seçilen noktaların yükleme deplasman grafiği Ek 8’de verilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Köprülerin yapıldığı sahalarda topoğrafik özelliklerinden kaynaklanan kot farklarından dolayı köprü giriş ve çıkışlarında yaklaşım dolguları kullanılır. Dolgu altındaki zayıf zeminlerin servis yükleri altında istenilen performansı sergileyemediği durumlarda çeşitli yapısal elemanlar, zemin güçlendirme yöntemleri veya geosentetikler ile zayıf zeminler ve dolgular iyileştirilebilir. Bu çalışma kapsamında Bursa İli karayolları köprüsü giriş ve çıkışlarında yapılan yaklaşım dolguları altındaki zemin profili tasarlanan servis yükleri taşıyamadığı ve farklı oturmaların meydana geldiği ve oluşan gerilmeler ve oturma değerleri PLAXIS yazılımı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yaklaşım dolgusu altındaki yumuşak zemin tabaları çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak iyileştirilmiştir. Yaklaşım dolgusunda ise zamanla meydana gelebilecek yüzey suları ve servis yükleri altındaki etkiler nedeniyle oluşacak plastik deformasyonları kısıtlamak için geosentetik malzemeler ile belli bir etki alanı belirlenerek boğçalama yapılmıştır. Zeminlerin güçlendirilmesinde jet grout kolonları, taş kolon ve geopier kolonları ile zeminler iyileştirilmiş ve mukavemet özellikleri daha yüksek kompozit bir malzeme oluşturulmuştur. Hesap adımları oluşturulurken aynı çap oranına ve aynı uzunluğa sahip rijit elemanlar aynı aks aralığında yerleştirilmiş ve analizler tamamlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda ulaşılan sonuçla şu şekildedir;

Ø 80 cm çapında elde edilen en küçük oturma değeri geopier yönteminin uygulanması sonucunda elde edilmiştir ve toplam oturma değeri ise 115,92 mm civarındadır.

Ø 100 cm çapında kolonlar ile zeminin güçlendirilmesi durumunda ise jet grout elemanları ile sağlanmakta ve 111,28 mm mertebesinde deplasman elde edilmektedir.

Ø 120 cm çapında kolonların kullanılması sırasında ise en düşük oturma değeri jet grout kolonların teşkilinde oluşmakta ve oluşan değer ise 76,5 mm'dir.

Ancak oturma değerlerinin yanı sıra uygulama sırasında en ekonomik yöntem ve oturma değerleri açısından projede belirlenen servis yüklerini doğru bir şekilde aktarabilecek yöntem seçilmedi. Bu nedenle oturma değerleri açısından;

Ø 80 cm çapında geopier yöntemi,

Ø 100 cm çapında jet grout kolonları ve Ø 120 cm çapında ise taş kolonların yerleşim aralıkları değiştirilerek yapılan analizler sonucunda oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

Ø 80 cm çapında geopier kolonların kullanılması durumunda ise oluşan oturma değeri 115,9 mm,

Ø 100 cm jet grout kolonlarının kullanıldığında ise 111,3 mm değerinde deplasman oluşmakta,

Ø 120 cm çapında ve 120 cm aralıklar ile yerleştirilmesi durumunda ise deplasman miktarı 11,89 cm gibi bir değer elde edilmektedir. Bu iyileştirme yöntemleri kullanılarak maliyet analizleri yapıldığında ise en ekonomik yöntemin bu oturma değerlerine bağlı olarak jet grout yönteminin kullanılması durumunda sağlanmaktadır.

Yapılan diğer bir denemede ise Ø 120 cm çapında kolonlar aynı yerleşim ve aynı uzunluk boyunca analiz edilmesi durumunda elde edilen oturma miktarları oldukça yakın sonuçlar olmaktadır. Ancak maliyet oranları kıyaslandığında ise en ekonomik iyileştirme tekniği olarak taş kolon yöntemi olmaktadır.

Bu veriler ışığında şu sonuçlar elde edilebilir;

- Zayıf zemin içerisinde teşkil edilen rijit elamanların çapı büyüdükçe grup halinde imal edilmesi durumunda ise kolonun etrafını saran malzemenin yanıl çeperlerine etki eden itki sonucunda zeminin mukavemet değerlerinde artış oranı daha fazla olur,
- Aks yerleşim aralığının azalması grup imalatı halinde zeminin mukavemet artışlarında ciddi iyileşmeler sağlanır,

Yaklaşım dolgusu ise geosentetik özellikler yardımıyla güçlendirilmiştir ve güçlendirme sırasında geogrid malzeme ile bohçalama yapılarak zeminin mukavemet özelliklerinde artış sağlanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda ve yapılan literatür araştırması sonucunda ise güçlendirme işlemlerinin sağladığı faydalar şu şekildedir;

- Toplam ve farklı oturmalar kontrol altına alınmıştır,
- Zeminde yapılan kolon teşkili sırasında mevcut zemine yatay itki sağlayarak, gerilme soğanı genişletilmiştir,
- Toplam ve farklı oturmaların sınırlandırılması sonucunda, yapının ömrü uzatılmıştır,
- Maliyetler azaltılmıştır

Geogridlerin kullanılması sonucunda dolgunun stabilitesini artırmıştır ve kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri ile zayıf zemin tabakası güçlendirilmiştir. İyileştirme yapılarak elde edilen sonuçlar ile yapılmadan elde edilen sonuçlara göre maliyet, oturma, stabilite ve kullanım süresi açısından daha avantajlı sonuçlar vermektedir.

Yapılan analizler sırasında kullanılan parametreler dikkate alınarak, uygulamada yapılacak deneme kolonları ile yükleme deneyleri yapılarak elde edilen sonuca ile uygulama sonuçlarının kıyaslanması olanağı vardır. PLAXIS ile yapılan sayısal analizler diğer sayısal analiz yazılımları ile çözümlenip çıkan sonuçların karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayollarında Zayıf Zemin Problemleri Ve Önlemler, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 3.
2. Kusin C.C, Yıldız A. ve Örnek M. (2009). Jet Grout Kolonları İle İyileştirile Zeminlerin Homojenleştirme Yöntemiyle Sayısal Analizi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 121-129,
3. Akan R., ve Keskin N. S., (2014). Jet Grout Yönteminin Zemin İyileştirmesine Katkısının ve Bu Yöntemde Kullanılan Parametrelerin Etkilerinin İrdelenmesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 23-26.
4. Coulter S., Martin C.D, (2006). Tek Akışkanlı Jet Groutun Gücü ve Deformasyon Özellikleri, Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of Alberta, Canada, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
5. Sert S., Özocak A. ve Bol E., (2007) Endüstri Yapısı Temeline Yönelik Vaka Analizi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 101-111.
6. Köse B., Köse A. ve Khıdırov B.K., (2017) Jet Grout Uygulamalarında Ordu İli Örneği, İnşaat Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Ordu Üniversitesi, Ordu, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 2-9.
7. 6.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
8. <https://dokumen.tips/documents/birlestirilmis-tez.html>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
9. KANAT A.,(2018). Jet Grout Kolonlarının Oluşumu ve Davranışı Üzerinde Çok İnce Taneli Çimento ve Mikro Silika Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, KONYA, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 6-10.
10. Erol, Prof.Dr. A Orhan, Bayram, Dr. Zeynep Çekinmez, Jet Enjeksiyon Yöntemleri, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Ankara, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 6-10, 64-69.
11. Tachir Chousein., (2015). Samsun Terme Kombine Doğalgaz Çevrim Santrali Zeminlerinin Fore Kazık ve Jet Grout Yöntemleri İle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
12. Erol, Prof.Dr. A Orhan, Bayram, Dr. Zeynep Çekinmez, Kuruoğlu, Dr. Özgür, (2016). Vibro-Zemin İyileştirme Yöntemleri Vibro Sıkıştırma ve Taş Kolonlar, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Ankara, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 2-10, 15-23, 50-60.
13. Gürleyek Nur A., (2018). İnce Daneli Zeminlerde Tekil Kolon Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.
14. <http://anadoluzemin.com.tr/services/jet-grout-imalati/>, (Erişim Tarihi: 20/05/2019).

15. <http://bursazemin.com/jet-grout-yontemi-jet-enjeksiyon>, (Erişim Tarihi: 20/05/2019).
16. Özturun M., (2017). Enjeksiyon Yöntemi İle Zemin İyileştirme, Tezsiz Yüksek Lisans Bitirme Projesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, (Erişim Tarihi: 20/05/2019), 30-14.
17. Kurt E., (2011). Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi Ve Sonuçlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 20-30, 43-52.
18. <https://www.rodio.ch/rodio-geotechnik-ag/jet-grouting-rodio-geotechnik-ag.html>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
19. Erdil Burhan., (2008). Jet Grout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 13-20.
20. <http://agzemininsaat.com.tr/jet-grout.html>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
21. <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=224000&dil=TR>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
22. <http://www.erktas.com/faaliyet-alanlari/jet-grout/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
23. <http://www.zeminarastirma.com/jet-grouting/>, Erişim Tarihi: (26/05/2019).
24. Küsin Cemal Caner., (2009). Jet Grout Yöntemi İle İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 30-40, 40-50.
25. <https://geotest.com.tr/kazik-jetgrout-butunluk-testi-pile-integrity-test/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019)
26. Erkan İbrahim Hakkı., (2013). Jet Grout Kolonların Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 5-10, 35-45
27. Osmanoğlu, U., (1999). Yumuşak ve Gevşek Zeminlerin İyileştirilmesi: Yüksek Basıncılı Enjeksiyon Kolonları ve Taş Kolonlar, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri E. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 74-85.
28. Demir H., (2007). Taş Kolon Ve Geopier Uygulaması İle Zemin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 59-65.
29. Keleşoğlu K.M. ve Durmuş C., (2015). Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Yumuşak Zeminlerde Temel Rijitliğinin Etkisi, 6.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).

30. Ahmet A.K ve Dehghanuan K., (2019). Taş Kolonların Performans Analizi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
31. Ng K.S And Tan S.A. ,(2013). Design And Analyses Of Floating Stone Columns, Universiti Teknologi Mara, Faculty Of Civil Engineering, 40450 Shah Alam, Selangoe, Malaysia, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
32. Silva S. Implementation And Performance Of Stone Columns At Penney's Bay Reclamation In Hong Kong, Maunsell Geotechnical Services Limited, Hong Kong, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
33. Uysal F. ve Yıldız A., (2017) Taş Kolonların Oturmaların Azaltılması Etkisinin Analitik Olarak Değerlendirilmesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.
34. <http://kiltaszeminmuhendislik.com.tr/tas-kolon/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
35. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128170489000068>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
36. <http://zma.com.tr/spt-standart-penetrasyon-deneyi/>, (Erişim Tarihi: 28/04/2019).
37. <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=222000&dil=TR>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
38. <https://insapedia.com/tum-konular/page/7/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
39. Bal E.K, Öner L, Berilgen M.M ve Özaydın İ.K., (2014). Darbeli Kırmataş Kolonlar (Dkk) İle İyileştirilen Bir Sahada Oturma Davranışının Gözlemlenmesine İlişkin Bir Vaka Analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
40. Kurt E., Kemaloğlu H.F Ve Sayraç M.A., (2011). Darbeli Kırmataş Kolon (Dkk) Uygulaması ve Yükleme Deneylerine İlişkin Bir Vaka Analizi, Prof. İsmet Özdemir'i Anma Toplantısı ve 6. Odtü Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
41. Akyüzoğlu M., Kiziroğlu S. ve Kurt E., (2011). Üst Geçit Köprüsü & Yaklaşım Dolguları Temel Zeminlerinin İyileştirilmesinde Darbeli Kırmataş Kolon (Dkk) Uygulaması, 4.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
42. <http://sentezinsaat.com.tr/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
43. Kanmaz H., (2014). Rijit Kolonların Farklı Zemin Ortamlarındaki Performansı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
44. <http://sentezinsaat.com.tr/yontemler/geopier-impact/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).

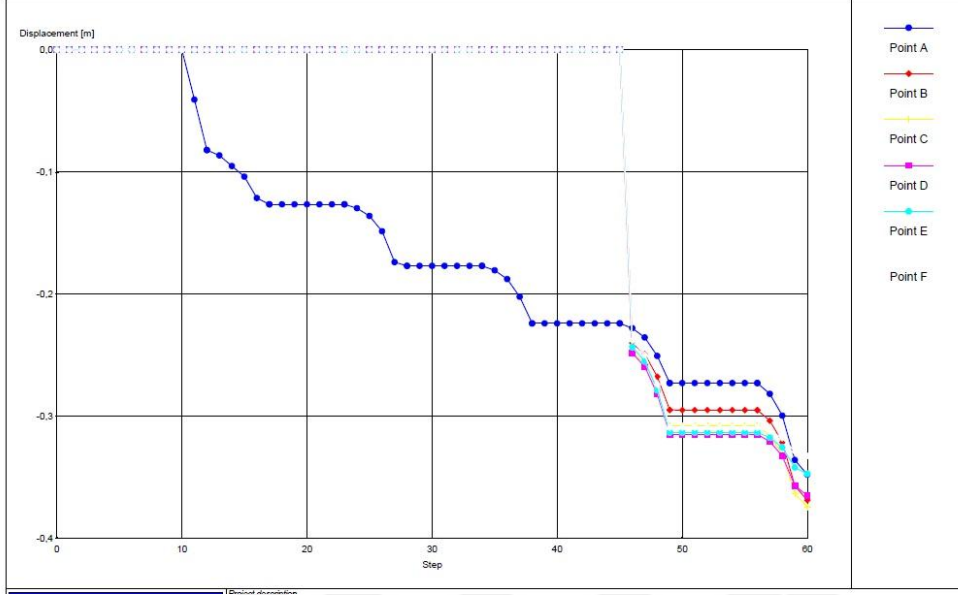
45. <https://www.geostructures.com/solutions/ground-improvement/geopier-system/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
46. Mekaniği, Z., & Kongresi, T. M. O. U. Darbeli Kırmataş Kolon (Dkk) Yükleme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
47. <https://www.insaathaber.org/turk-standartlarindaki-kirmatas-hammaddesinin-onemi/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
48. Karagül B.Ç, (2007). Yol Dolgularının Geogrid Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 3-15.
49. Akaydın M. Ve Yılmaz K., Geosentetiklerin Özellikleri, Fonksiyonları Ve Kullanım Alanları Üzerine Bir İnceleme, Paü Teknik Bilimler Myo, Tekstil Teknolojisi, Denizli, (Erişim Tarihi: 19/05/2019), 30-45.
50. http://tekstilkutuphane.blogspot.com/2014/11/geosentetiklerin-ozellikleri_8.html, (Erişim Tarihi: 25/05/2019).
51. Livaoğlu P., (2016)., İller Bankası Uygulamalarında Geosentetikler, Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi, (Erişim Tarihi: 25/05/2019), 25-30.
52. <https://tugrayapiizolasyon.com/drenaj/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
53. http://www.sams.com.tr/App_view.aspx?id=5, (Erişim Tarihi: 25/05/2019).
54. <https://www.movea.com.tr/geosentetiklerin-kullanim-alanlari-nelerdir/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
55. <https://www.geobera.com/urunler/geomembran/>, (Erişim Tarihi: 25/05/2019).
56. <https://www.teknomaccaferri.com.tr/geogrid-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
57. Bildik S., (2013). Farklı Zemin ve Yükleme Koşullarındaki Gömülü Boru Sistemlerinin Davranışının Araştırılması, Doktora Tezi, Çukurova Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
58. Civelek S., (2011). Tabakalı Zeminlere Oturan Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
59. Plaxis, 2018. User Manual. 2d, (Edited By Brinkgreve, R.J.B.), Delft University Of Technology&Plaxis B.V., The Netherlands.
60. Zemin Etüt Raporu.
61. <https://www.afad.gov.tr/tr/24212/Turkiye-Deprem-Tehlike-Haritasi>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).

62. <http://www.zeminarastirma.com/zemin-etudu/spt-standart-penetrasyon-deneyi/>, (Erişim Tarihi: 26/05/2019).
63. Özsağır M., Bol E., Sert S.ve Öntürk K., İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Özellikleri, Mühendislik Fakültesi, İnşat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, (Erişim Tarihi: 26/05/2019), 840-845.
64. American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO).
65. Tonyalı İ. Ve Özdemir A.H.V, Jet Grouting Yöntemi İle Zemin Islahı Sonrası Taşıma Gücü Değişimlerinin Değerlendirilmesi, 3rd International Soil-Structure Interaction Symposium-Izmir.
66. Demir S., Kurtoğlu M.R, Akgüner C. ve Berilgen M.,(2014). Model Taş Kolonların Sayısal Analizi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Beşinci Ulusal Kongresi 16 - 17 Ekim 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, (Erişim Tarihi: 25/05/2019), 631-637.
67. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018.
68. Tonyalı İ., (2011). Laboratuvar, Arazi Ve Jeofizik Deney Sonuçlarını Kullanan Zemin Taşıma Gücü Hesap Yöntemlerinin İncelenmesi Ve Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 37.

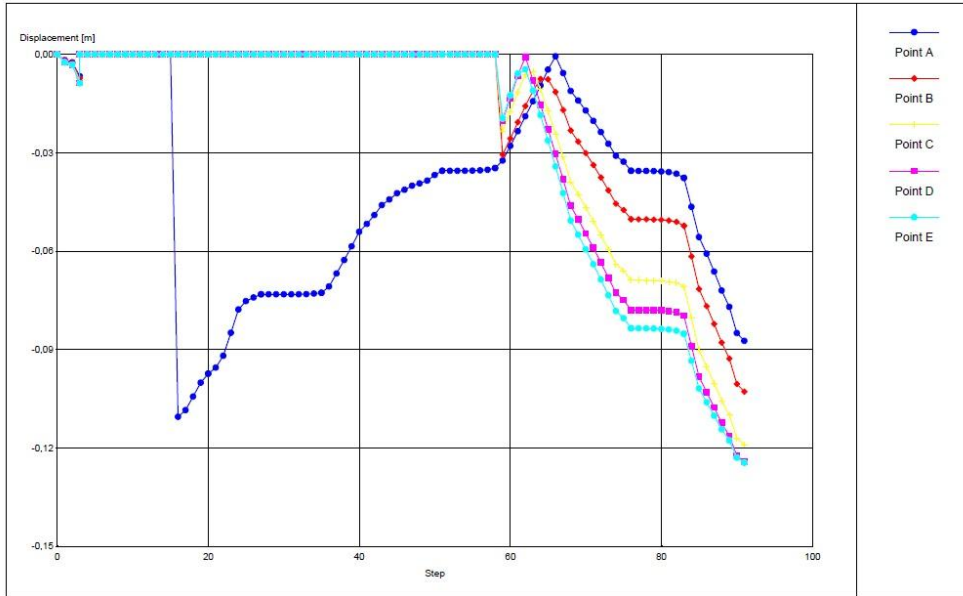


EKLER

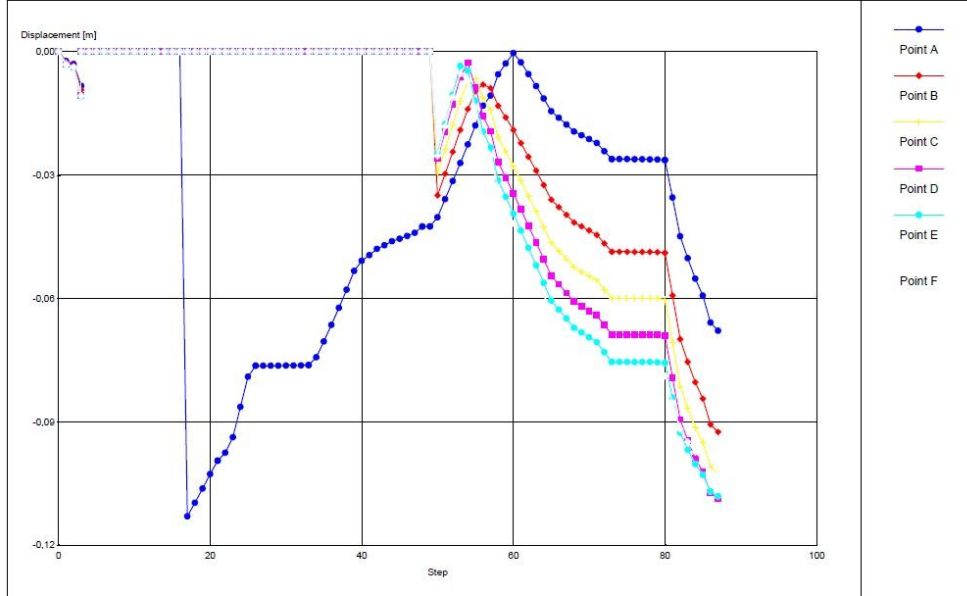
EK 1 Yaklaşım dolguları altında herhangi bir zemin iyileştirme yapılmadan önce dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



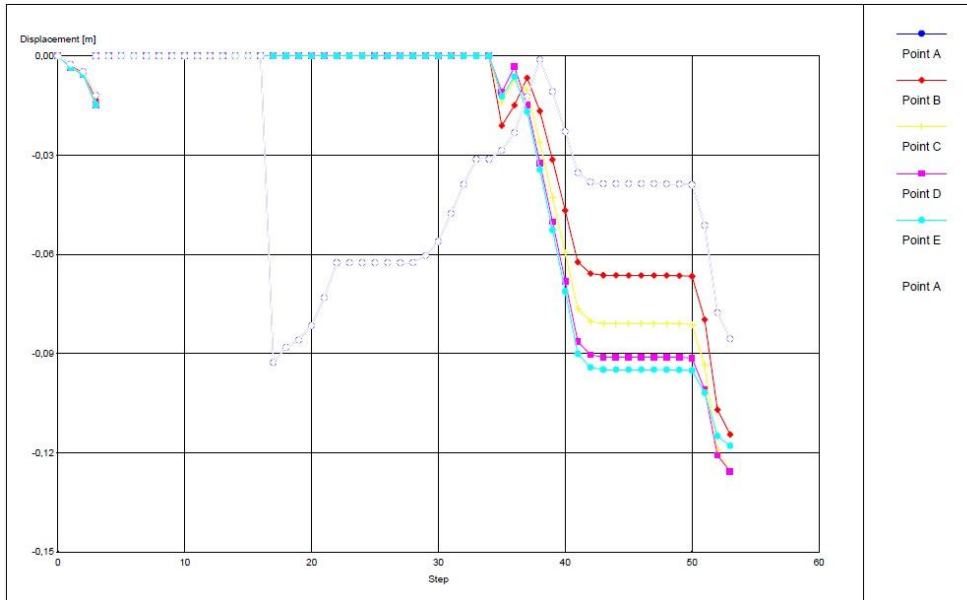
EK 2 80 cm çapında jet grout kolonları varken dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



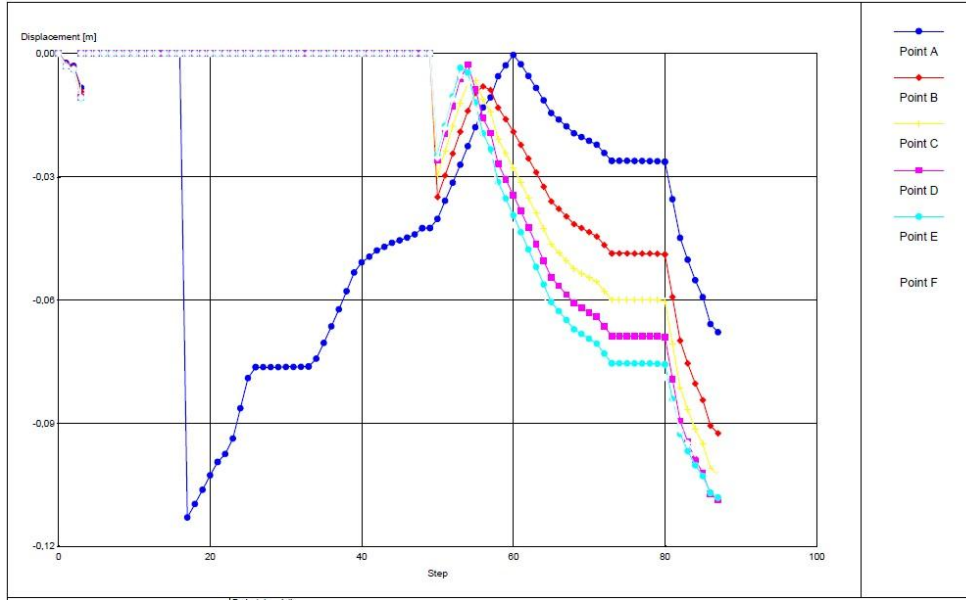
EK 5 100 cm çapında jet grout kolonları varken dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



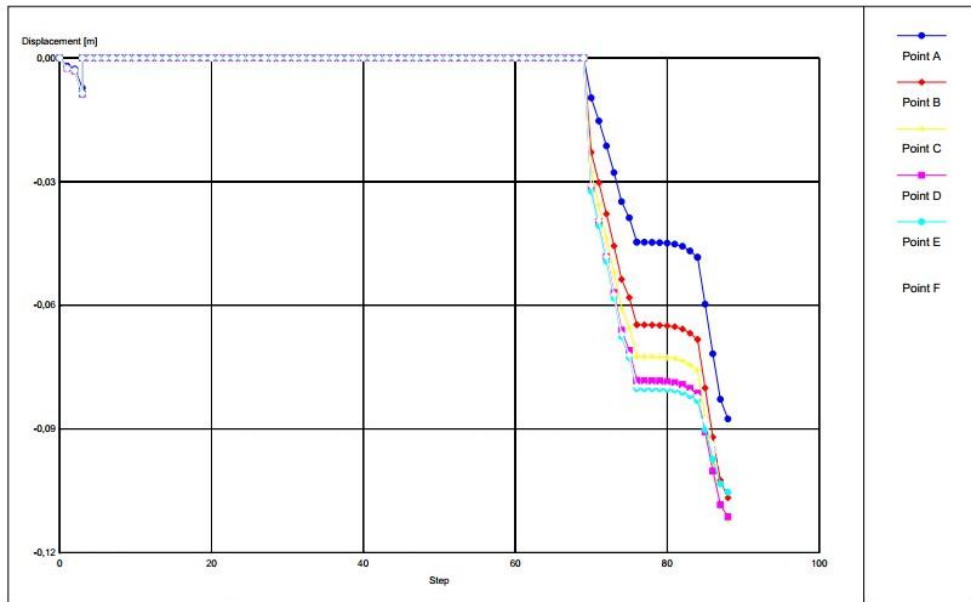
EK 6 100 cm çapında taş kolonlar varken dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



EK 7 80 cm çapına sahip geopier kolonlar varken dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



EK 8 80 cm çapına sahip jet grout kolonları ile birlikte geogrid varken dolgu yüzeyinde seçilen noktaların yükleme-deplasman grafiği



EK 9 SPT N30 değerlerinin derinlikle değişimi ve zemin profil tanımları[33]

Sondaj No	Derinlik(m)	SPT N30 Değerleri	Zemin Tanımlaması
Sondaj Kuyu No 1			
SPT-1	1,50-1,95	2	Dolgu Malzemesi
SPT-2	3,00-3,45	5	Dolgu Malzemesi
SPT-3	4,50-4,95	8	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-4	6,00-6,45	10	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-5	7,50-7,95	32	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-6	9,00-9,45	47	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-7	10,50-10,95	18	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-8	12,00-12,45	22	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-9	13,50-13,95	32	AzçakılısiltlikilliKUM
SPT-10	15,00-15,45	36	AzçakılısiltlikilliKUM
SPT-11	16,50-16,95	42	AzçakılısiltlikilliKUM
SPT-12	18,00-18,45	49	AzçakılısiltlikilliKUM
SPT-13	19,50-19,95	51	AzçakılısiltlikilliKUM
SPT-14	21,00-21,45	61	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-15	22,50-22,95	51	AzçakılısiltlikumluKİL
SPT-16	24,00-24,45	56	AzçakılısiltlikumluKİL

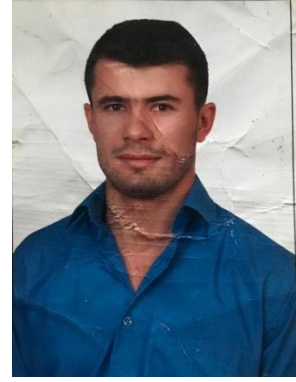
EK 10 SPT N30 değerlerinin derinlikle değişimi ve zemin profil tanımları[33]

Sondaj No	Derinlik(m)	SPT N30 Değerleri	Zemin Tanımlaması
Sondaj Kuyu No 2			
SPT-1	1,50-1,95	21	Dolgu Malzemesi
SPT-2	3,00-3,45	25	Dolgu Malzemesi
SPT-3	4,50-4,95	55	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-4	6,00-6,45	50/8	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-5	7,50-7,95	82	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-6	9,00-9,45	50/14	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-7	10,50-10,95	80	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-8	12,00-12,45	84	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-9	13,50-13,95	26	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-10	15,00-15,45	34	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-11	16,50-16,95	36	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-12	18,00-18,45	33	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-13	19,50-19,95	32	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-14	21,00-21,45	47	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-15	22,50-22,95	56	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-16	24,00-24,45	52	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-17	25,50-25,95	40	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-18	27,00-27,45	53	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-19	28,50-28,95	64	AzkillisiltliÇAKIL
SPT-20	30,00-30,45	70	AzkillisiltliÇAKIL

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIRIM, Ünal
 Uyuğu : T.C
 Doğum tarihi ve yeri : 12.06.1990/ARDAHAN
 Medeni hali : BEKAR
 Telefon : 0538-931-95-10
 Faks :
 e-mail : unalyildirim1991@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans		
Lisans	:Zonguldak Karaelmas Üniversitesi	03.07.2015
Lise	:Şehit Cengiz Sarıbaş Lisesi	12.06.2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
10.07.2015--	ERC İNŞAAT ERDOĞAN ASLAN	ŞANTIYE ŞEFİ

Yabancı Dil :İngilizce

Hobiler

Kitap, dergi ve makale okumak,
 Spor yapmak
 Yabancı dil aktivitelerinde bulunmak



ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR..