

**YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON (JETGROUTING)
YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş.Müh.Emel HACIALİOĞLU
(F501960271011)

98483

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Mayıs 1999

Tezin Savunulduğu Tarih: 17 Haziran 1999

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER
Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Ergün TOĞROL
Prof.Dr. Gökhan BAYKAL

[Handwritten signatures of Prof. Dr. Ahmet Sağlamer, Prof. Dr. Ergün Toğrol, and Prof. Dr. Gökhan Baykal]

HAZİRAN 1999

ÖNSÖZ

Çalışmalarımın her aşamasında ilgi ve teşviklerini esirgemeyen ve değerli bilgilerinden daima yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Zetaş Zemin Teknolojisi A.Ş. çalışanlarına gösterdikleri sıcak ilgi ve değerli katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 1999

Emel HACIALİOĞLU



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
SEMBOL LİSTESİ	IX
ÖZET	X
SUMMARY	XII
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	3
3. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ	6
3.1. Enjeksiyon Yöntemlerinin Uygulama Alanları	8
3.2. Enjeksiyon Yöntemleri	8
4. JETGROUTING YÖNTEMİ	10
4.1. Jetgrouting Yönteminin Tarihsel Gelişimi	11
4.2. Jetgrouting Yönteminin Uygulanışı	13
4.2.1. Delgi	14
4.2.2. Enjeksiyon	14
4.3. Jetgrouting Yapımında Kullanılan Ekipman ve Araçlar	17
4.4. Jetgrouting Yapım Teknikleri	23
4.4.1. Tekli Jet (Jet 1)	24
4.4.2. İkili Jet (Jet 2)	24
4.4.3. Üçlü Jet (Jet 3)	24
4.5. Çalışma Parametreleri	25
4.5.1. Basınç	25
4.5.2. Dönme ve Çekme Hızı	29
4.5.3. Dozaj	31
4.5.4. Püskürtme Memeleri	33
5. ÇEŞİTLİ ZEMİNLERDE JETGROUT KOLONLARININ YAPILIŞI	36
6. İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	39
7. JETGROUTING YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI, LİMİTLERİ VE UYGULAMADA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR	44
7.1. Jetgrouting Yönteminin Avantajları	44
7.2. Jetgrouting Yönteminin Limitleri	45
7.3. Uygulamada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	45
8. JETGROUT YÖNTEMİNİN TASARIM ESASLARI	46
8.1. Jetgrout Kolon Hesabı	47

9. UYGULAMANIN BAŞARISINI BELİRLEYEN DEĞİŞKENLER	53
9.1. Zemin Çimento Karışımının Kalitesi	53
9.2. Yapılmış Kolonları Bütünlüğü ve Boyu	56
9.3. Kolon Çapı	56
9.4. Kolon Geçirimsizliği	60
9.5. Zemin-Çimento Karışımının Mukavemeti	60
9.6. Kolonun Taşıma Gücü	60
9.7. Çeşitli	64
10. JETGROUT YÖNTEMİ UYGULAMA ALANLARI	69
11. JETGROUTING YÖNTEMİNİN KULLANILDIĞI VAKA ÇALIŞMASI	77
11.1. Giriş	77
11.2. Proje Bilgileri ve Planlanan Yapılar	78
11.3. Zemin Etüdları	78
11.4. Zemin Koşulları ve Geoteknik Modelleme	81
11.5. Temel Mühendisliği Değerlendirmeleri	84
11.5.1. Taşıma Gücü	87
11.5.2. Oturmalar	87
11.5.3. Temel Sistemi	88
11.5.4. Sıvılaşma Potansiyeli	89
11.6. Jetgrout Kolonların Teşkili	91
11.6.1. Uygulama Öncesinde Yapılan Çalışmalar	91
11.6.2. Jetgrouting Uygulaması	91
11.6.3. Kullanılan Ekipmanlar	95
11.6.4. Yükleme Testleri	95
11.6.5. Laboratuvar Deney Sonuçları	96
11.6.6. CPT Deneyleri	99
11.7. Sonuçların Değerlendirilmesi	101
12. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	107
EKLER	110

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Tablo 4.1.	Farklı zeminlerde gerçekleştirilen arazi deneylerinde belirlenen kolon çapları [4] 28
Tablo 4.2.	Enjeksiyon akış hızı ve enjeksiyon miktarı [16] 31
Tablo 4.3.	Farklı basınç ve enjeksiyon memesi çapları için belirlenmiş enjeksiyon miktarları [16] 32
Tablo 4.4.	Jetgrouting sistemleri ve çalışma parametreleri [16] 35
Tablo 6.1.	Zemin türleri ve beklenen permeabilite katsayısı değerleri [7] 39
Tablo 6.2.	Çeşitli uygulamalarda elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değerleri [16] 41
Tablo 8.1.	Jetgrout kolon tasarımında granüler zeminlerde kullanılan limit değerler [16] 51
Tablo 8.2.	Jetgrout kolon tasarımında kohezyonlu zeminlerde kullanılan limit değerler [16] 51
Tablo 11.1.	Laboratuvar deney sonuçları 82
Tablo 11.2.	Maliyet analizi 89
Tablo 11.3.	1900-1980 yılları arasında kaydedilen depremler 90
Tablo 11.4.	Episentral uzaklık-zemin ivmeleri 90
Tablo 11.5.	Uygulamada kullanılan çalışma parametreleri 93
Tablo 11.6.	Uygulamada teşkil edilen jetgrout kolon sayıları ve toplam uzunlukları 93
Tablo 11.7.	Yükleme deneyi sonuçları özeti 95
Tablo 11.8.	Karot numuneleri üzerinde yapılan basınç deneyi sonuçları 96

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Çeşitli zeminlerde uygulanabilen değişik zemin islah yöntemleri [8]	5
Şekil 3.1 : Zemin cinsine göre enjeksiyon sınırları [1]	7
Şekil 3.2 : Klasik enjeksiyon yöntemleri ve Jetgrouting [1]	9
Şekil 4.1 : Yüksek basınçlı enjeksiyon [1]	12
Şekil 4.2 : Jetgrouting yönteminin uygulanışı [2]	15
Şekil 4.3 : Enjeksiyonun püskürtme memelerinden çıkışı [20]	16
Şekil 4.4 : Farklı geometrik yapıdaki Jetgrout kolonlarının oluşturulması [21]	18
Şekil 4.5 : Tipik Jetgrouting tesisi [22]	19
Şekil 4.6 : Monitör, enjeksiyon memesi, kil matkabı [20]	19
Şekil 4.7 : Jetgrouting uygulamasında delgi ve enjeksiyon için kullanılan makina [23]	20
Şekil 4.8 : Jetgrouting tesisi karıştırma ünitesi [23]	21
Şekil 4.9 : Jetgrouting tesisi otomatik kontrol ünitesi [23]	21
Şekil 4.10 : Jetgrouting tesisi pompa ünitesi [23]	22
Şekil 4.11 : Jetgrouting sistemleri [2]	23
Şekil 4.12 : Jetgrouting sistemlerinde kullanılan akışkanlar [1]	26
Şekil 4.13 : Muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki [1]	27
Şekil 4.14 : Bir enjeksiyon memesi formu [1]	34
Şekil 5.1 : Çakıl zeminde gerçekleştirilen jetgrout kolonu [23]	38
Şekil 6.1 : Zemin, püskürtme enerjisi ve tesir mesafesi arasındaki bağıntı [1]	40
Şekil 6.2 : İyileştirilmiş zeminin basınç mukavemetindeki artış miktarı [4]	42
Şekil 6.3 : Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi [16]	43
Şekil 8.1 : Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonunun davranışı [16]	49
Şekil 8.2 : Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonu çevresinde oluşabilecek muhtemel kayma yüzeyi [16]	50
Şekil 8.3 : Jetgrouting uygulamasının mekanizması [16]	52
Şekil 9.1 : Deneme sahası [25]	54
Şekil 9.2 : Jetgrout kolonundan karot alınması [25]	55
Şekil 9.3 : Deneme kolonunun kazılarak ortaya çıkarılması [20]	58
Şekil 9.4 : Jetgrout kolon çapı tahkiki [20]	59
Şekil 9.5 : Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deney düzeneği planı	61
Şekil 9.6 : Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deney düzeneği kesiti	62

Şekil 9.7	: Çekme deneyinin yapıldığı saha uygulaması [26]	63
Şekil 9.8	: Jetgrout kolon üzerinde yapılan basınç deney düzeneği planı	65
Şekil 9.9	: Jetgrout kolon üzerinde yapılan basınç deney düzeneği kesiti	66
Şekil 9.10	: Basınç deneyinin yapıldığı saha uygulaması [26]	67
Şekil 10.1	: Yol, köprü ve viyadüklerde temel uygulamaları [27]	70
Şekil 10.2	: Çeşitli uygulamalar [28]	71
Şekil 10.3	: Tünel uygulamaları [27, 29]	73
Şekil 10.4	: Jetgrout kolonlarının sızdırmazlık için kullanıldığı uygulamalar [7]	74
Şekil 10.5	: Deforme olan alanların rehabilitasyonu [30]	74
Şekil 10.6	: Otoyol dolgularında yapılan uygulamalar [30]	74
Şekil 10.7	: Dolgu içerisinde cut-off duvar teşkili [27]	75
Şekil 10.8	: Kirlenmiş alanların düzenlenmesi [31]	76
Şekil 10.9	: Şev stabilitesi uygulamaları [27]	76
Şekil 11.1	: Fabrika tesisleri vaziyet planı	79
Şekil 11.2	: Zemin etüdü konumları	80
Şekil 11.3	: CPT deneyinde karşılaşılan zemin tabakalanması	83
Şekil 11.4	: SPT/N değerlerinin derinlikle değişimi	85
Şekil 11.5	: CPT'ye göre zemin parametreleri	86
Şekil 11.6	: Temel tipik kesiti	92
Şekil 11.7	: Jetgrout kolonları yerleşim planı	94
Şekil 11.8	: Deneme kolonu üzerinde yapılan yükleme deneyi	97
Şekil 11.9	: Yükleme deneyinde kullanılan hidrolik kriko	97
Şekil 11.10	: Yükleme deneyde kullanılan germe makinesi	98
Şekil 11.11	: CPT deneyi konumları	100
Şekil 11.12	: Drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi	102
Şekil A.1.	: PM3/T-1 kolonu yükleme deneyi oturma-yük grafiği	110
Şekil A.2.	: PM3/T-1 kolonu yükleme deneyi oturma-zaman grafiği	111
Şekil A.3.	: PM3/T-2 kolonu yükleme deneyi oturma-yük grafiği	112
Şekil A.4.	: PM3/T-2 kolonu yükleme deneyi oturma-zaman grafiği	113
Şekil A.5.	: PM3/T-3 kolonu yükleme deneyi oturma-yük grafiği	114
Şekil A.6.	: PM3/T-3 kolonu yükleme deneyi oturma-zaman grafiği	115
Şekil A.7.	: PM3/T-4 kolonu yükleme deneyi oturma-yük grafiği	116
Şekil A.8.	: PM3/T-4 kolonu yükleme deneyi oturma-zaman grafiği	117
Şekil A.9.	: PM3/T-5 kolonu yükleme deneyi oturma-yük grafiği	118
Şekil A.10.	: PM3/T-5 kolonu yükleme deneyi oturma-zaman grafiği	119
Şekil B.1.	: CPT 01 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	120
Şekil B.2.	: CPT 02 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	121
Şekil B.3.	: CPT 03 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	122
Şekil B.4.	: CPT 04 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	123
Şekil B.5.	: CPT 05 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	124
Şekil B.6.	: CPT 06 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	125

Şekil B.7.	: CPT 07 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	126
Şekil B.8.	: CPT 08 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	127
Şekil B.9.	: CPT 09 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	128
Şekil B.10.	: CPT 10 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	129
Şekil B.11.	: CPT 11 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	130
Şekil B.12.	: CPT 12 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	131
Şekil B.13.	: CPT 13 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	132
Şekil B.14.	: CPT 14 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	133
Şekil B.15.	: CPT 15 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	134
Şekil B.16.	: CPT 16 deneyi konumunda uç mukavemetinin derinlikle değişimi	135



SEMBOL LİSTESİ

A_b	: kolon kesit alanı
S_u	: drenajsız kayma mukavemeti
ϕ	: içsel sürtünme açısı
k	: permeabilite katsayısı
K_0	: yatay toprak basıncı katsayısı, sükunette
K_s	: yatay yatak katsayısı
L	: kolon uzunluğu
N_q^*	: taşıma gücü faktörü, derin temeller için
q_u	: azami taşıma kapasitesi
z	: zemin yüzeyinden itibaren derinlik
α	: adhezyon için azaltma faktörü
δ	: zemin-kolon sürtünme açısı
γ	: zemin yağ birim hacim ağırlığı
σ_{vo}	: düşey basınç
ξ	: kolon uç mukavemeti azaltma faktörü

YÜKSEK BASINÇLI ENJEKSİYON (JETGROUTING) YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında jetgrouting yönteminin uygulanışı, uygulamada kullanılan ekipman ve araçlar, uygulama teknikleri, uygulamanın başarısını belirleyen çalışma parametreleri, iyileştirilmiş zeminin fiziksel özellikleri, yöntemin avantajları, limitleri ve uygulamada dikkat edilmesi gereken hususlar, yöntemin tasarım esasları, uygulamanın kalite kontrolü, yöntemin uygulama alanları ile yöntemin uygulandığı bir vaka çalışması detaylı olarak incelenmiştir.

Vaka çalışması olarak, İpekkağıt San.ve Tic. A.Ş.'nin Yalova'nın Tokmakköyü Altınova Mevkii'nde yer alan fabrika tesisleri içerisinde inşa edilmesi planlanan ilave PM3 yapısının temel zeminini iyileştirmeye yönelik gerçekleştirilen jetgrouting uygulaması, projenin her aşamasında bizzat izlenerek detaylarıyla tez çalışmasına dahil edilmiştir.

Proje kapsamında PM3 yapısının zemin ve temel mühendisliği değerlendirmelerine yönelik zemin etüdları gerçekleştirilmiş olup elde edilen veriler ışığında yapılan analizler neticesinde sözkonusu zeminde oturma problemi ve sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

Bu durum neticesinde kazıklı temel ve jetgrout kolon uygulaması olarak iki alternatif temel sistemi önerilmiştir. Yapılan maliyet ve zaman analizleri sonucunda jetgrout kolon uygulaması İdare tarafından tercih edilmiştir.

Uygulanacak sistem ve çalışma parametreleri belirlenerek $\phi 60\text{cm}$ çaplı, toplam 23,600 m boyunda radye altı, kuşaklama (sıvılaşma potansiyeline karşı) ve test kolonu olmak üzere toplam 2174 adet jetgrout kolon teşkil edilmiştir. Projede tekli jet sistemi uygulanmış olup enjeksiyon basıncı 500-550 bar, tijin geri çekilme hızı 55 cm/dak., tijin dönme hızı 21 devir/dak., enjeksiyon memesi sayısı 2, enjeksiyon memesi çapı 2.0mm, çimento miktarı 450 kg/m^3 ve su/çimento=1 olarak kullanılmıştır.

Uygulamanın kalite kontrolü dört ayrı yöntem ile yapılmıştır. Çap ve düşeylik kontrolü için deneme kazısı yapılmış ve kolonlar belli bir seviyeye kadar açılarak

projede öngörülen çapın sağlanıp sağlanmadığı görülmüştür. Yapılan deneme kazılarında kolon çaplarının 60cm-90cm mertebesinde olduğu belirlenmiştir.

Kolonlardan karot numuneleri alınmış ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları 21.0 kg/cm^2 ile 113.0 kg/cm^2 olarak bulunmuştur.

Kolonların yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için ise beş (5) adet test kolonu üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneylerinde izin verilebilir kolon kapasitesi 60-65 ton olarak bulunmuştur.

Son olarak da sözkonusu sahada uygulamadan önce onaltı (16) ve uygulamadan sonra onaltı (16) adet olmak üzere toplam otuziki (32) adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. CPT deneylerinden elde edilen veriler ışığında, jetgrouting uygulamasının, PM3 yapısının teşkil edileceği alanda mevcut olan kumlu-siltli zemin tabakasını sıkılaştırdığı görülmüştür. Zemin yüzeyine yakın kil tabakasında da jetgrouting uygulamasından sonra yapılan CPT deneylerinde uç mukavemetinin %20-50 oranında arttığı belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen uygulama sonunda yapılan kontrol ve deney sonuçlarına göre istenilen mukavemet özellikleri ile zemin parametrelerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Uygulama 65 gün gibi kısa bir sürede başarılı bir şekilde tamamlanarak gerek maliyet ve gerekse zaman açısından istenilen sonucu sağlamıştır.

Jetgrouting yöntemi çok farklı zemin koşullarında ve çok geniş uygulama alanlarında uygulanabilmekte ve gerek maliyet, gerekse zaman açısından diğer zemin iyileştirme yöntemlerine geçerli bir alternatif olmaktadır.

Bunun yanında jetgrouting yöntemi ile diğer zemin iyileştirme yöntemleri arasındaki en büyük fark elde edilecek zemin parametreleri ve maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilmesidir.

Yöntemde kullanılacak çalışma parametrelerinin seçimi, arazide karşılaşılan zemin koşullarına ve teşkil edilecek kolonların istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Yüksek Basınçlı enjeksiyon yönteminin teknik ve ekonomik açıdan başarılı olması, bu yöntemin bağlı olduğu parametrelerin uygun biçimde seçimine bağlıdır. Uygulanacak sistem, teşkil edilmesi istenen kolon çapına göre seçilmelidir.

Jetgrouting yönteminde tek ve kesin bir hesap yöntemi oluşturmak mümkün değildir. Dolayısıyla, şantiyelerdeki deneyim sonuçlarının teori ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi bu inşaat metodunun geliştirilmesinde çok önemlidir.

SOIL IMPROVEMENT BY HIGH PRESSURE GROUT INJECTION (JETGROUTING)

SUMMARY

In my thesis work, application of jetgrouting, equipment that are used during grouting, application techniques, working parameters affecting the final performance, improved physical properties of the treated subsoil, design concepts, quality control, application fields of jet grouting and a case study is investigated in detail.

As a case study, subsoil improvement of İpekkağıt Corporation Factory PM3 Building in the vicinity of Tokmakköyü Altınova region of Yalova city is observed at each stage of application of jetgrouting and all works performed at the site is included in detail in my thesis.

In this soil improvement project, subsoil investigation for PM3 building were performed to make foundation engineering evaluations and as a result of the analyses performed by using obtained subsoil data, both liquefaction and settlement potential was determined for the considered region.

Consequently, two alternative types of deep foundations with piles or jetgrout columns was recommended as a foundation system for PM3 building.

After deciding on the foundation type as jetgrout columns and working parameters, total length of 23,600 m, $\phi 60$ cm diameter jetgrout column under the foundation slab, around the foundation to eliminate the liquefaction risk and as test columns with a total number of 2174 were applied at the site. As working parameters, single jet system was used with 500-550 bar pressure, withdrawal rate of 55 cm/min, rotation speed 21 RPM, 2 nozzles with 2.0 mm diameter, 450 kg/m³ cement and water cement ratio of w/c=1.

Quality control of the applied work was performed with four different methods. To check for the applied diameter and direction deflection, trial excavations were performed at the grout column locations. After inspection, it was determined that the diameter of applied columns were in the range of 60 cm–90 cm.

Besides, representative core samples were taken from the columns and compressional capacity of the samples were determined. After the tests,

compressional capacity of the core samples were obtained to be in the range of 21.0 kg/cm²-113.0 kg/cm².

For evaluating the vertical load carrying capacity of the applied columns 5 loading test were performed on different selected columns. After analyzing the test data, allowable load carrying capacity of tested jetgrout columns were determined to be in the range of 60-65 tonnes.

Finally, 32 CPT test were performed at the site to prove the subsoil improvement. 16 of these test were completed before the improvement and remaining test were performed after the improvement to evaluate the extent of improvement with comparison. As a result of the CPT test, it was determined that available silty sand subsoil was improved in terms of its engineering properties after the grouting works.

As a result of all performed quality checks, subsoil is observed to reach desired engineering properties. Application was completed in a short period of 65 days and planned cost and time requirements were achieved.

While jetgrouting method can be used for a wide range of subsoil conditions and application fields. It becomes an alternative to other soil improvement methods as a cost and time saving method.

Besides, a unique difference of jetgrouting method from other soil improvement methods is that subsoil parameters and cost of total work can be predicted prior to the application.

Working parameters of jetgrouting technique depends on the subsoil condition encountered at the subject site and physical and mechanical properties of the jetgrout columns to be formed. Success of the high pressure injection considering the technical and economic view of points depends on the application parameters mentioned above. Before starting the project jetting system should be selected by considering the column diameter to be applied.

In jetgrouting method a certain calculation method is hard to evaluate. For this reason, comparing obtained results and experience gained at the site with the theory is very important to improve this construction method.

1. GİRİŞ

Doğal arazide zemin özelliklerinin proje kriterlerini sağlayamadığı hallerde zemin mühendisinin yapacağı ilk çalışma, değişik yöntemler ile zemini ıslah ederek öngörülen kriterlere ulaşabilmektir [1].

Yüzeyden derine kadar zemini ıslah yöntemleri çok değişiktir. Temellerin oturacağı zeminin kayma mukavemetini arttırmak, yerli kayanın çatlaklarını doldurmak, zeminin geçirgenliğini (permeabilitesini) azaltmak için kullanılan enjeksiyon teknikleri zemin ıslah yöntemleri arasında yaygın olanlarıdır [1].

Yakın zamana kadar alışılmış klasik metotlarla iri daneli çakıl-kum zeminler çimento şerbeti ile orta ve ince daneli kumlu zeminler Natron-silicon ve silicat gibi kimyevi maddeler enjekte edilmek suretiyle ıslah edilmiş ve literatürde bu tarzdaki enjeksiyon tekniği geniş olarak muhtelif yönleri ile tartışılarak zemine bağlı uygulama sınırları tayin edilmiştir [1].

- Enjeksiyon yapılacak zemin içerisinde silt ve kilin tabakalar halinde bulunması,
- Silt oranının %15 - 20 yi aşması ve
- Kil oranının yüksek olması

gibi hallerde genel olarak klasik metodlardaki enjeksiyon teknikleri uygulanamamaktadır [1].

Bugün için bütün siltli zeminlerde hatta killi zeminlerde bile enjeksiyonu başarı ile uygulamak "Yüksek Basıncılı Enjeksiyon(Jetgrouting)" yöntemi ile mümkündür [1].

Jetgrouting, arazide çimentolu zemin geometrisi oluşturan zemin iyileştirme tekniği olarak tanımlanabilir [2].

Jetgrouting yöntemi, çakıldan kile kadar her türlü zeminin yüksek basınçlı enjeksiyon ile ıslahını mümkün kılmakta ve klasik enjeksiyon teknikleri ile diğer zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olmaktadır [3].

Jetgrouting yöntemi ile zemin ıslahı ilk olarak 1970'li yılların başlarında Japonya'da uygulanmaya başlanmış, daha sonra Avrupa'ya yayılmış ve son yıllarda da tüm dünyada giderek yaygınlaşan bir uygulama olmuştur [4].

Bu çalışmada jetgrouting yönteminin gelişimi, uygulanışı, yapım teknikleri, çalışma parametreleri, kalite kontrolü, uygulama alanları ve bu yöntemin uygulandığı bir vaka çalışması detaylı olarak incelenmiştir. ④

Jetgrouting yöntemi yaklaşık olarak 10-15 yıldır ülkemizde uygulanmakta olup günümüzde dünyada ve Türkiye'de hızlı bir gelişme göstermektedir.



2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

İnşaat mühendisliği çalışmalarının bir kısmı zemin içerisinde gerçekleştirilmekte olup bu çalışmalar esnasında kötü zemin koşulları ile karşılaşılabilir [5]. Bu durumda uygulanacak çözüm sözkonusu arazilerden kaçınmak, kötü zemin tabakasını uygun özellikteki zemin tabakası ile değiştirmek ya da mevcut zemini iyileştirmektir. Şehir içerisinde ve gelişmekte olan endüstriyel bölgelerde inşaat çalışmaları esnasında karşılaşılacak kötü zemini iyileştirmek, teknik ve ekonomik olarak en uygun ve en çok kullanılan çözümdür [6].

Zemin iyileştirilmesi, zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Zeminin iyileştirilmesi ile mevcut zeminin [6]:

- Kayma mukavemeti artar,
- Gerilme-deformasyon modülü artar,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınır,
- Permeabilitesi azalır,
- Çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimleri önlenir,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

Günümüzde, yeni yapılacak yapılar ile mevcut olan yapıların zemininde karşılaşılan problemlerin çözümünde uygulanan zemin iyileştirme tekniklerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [7].

Zeminin iyileştirilmesinde temel ilke, zemin içerisindeki mevcut boşlukların mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla

doldurulması, yeraltısu seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması ya da çeşitli elemanların kullanılması suretiyle mevcut zeminin güçlendirilmesidir [6,8]

Çok değişik zemin ıslah yöntemleri mevcuttur. İlk olarak zemin ıslah yöntemleri:

- Kohezyonlu zeminlerde uygulanabilen yöntemler,
- Kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilen yöntemler

olarak ikiye ayrılabilir. Çeşitli zeminlerde uygulanabilen değişik zemin ıslah yöntemleri Şekil 2.1’de verilmektedir [8].

Diğer bir sınıflandırmaya göre zemin iyileştirme yöntemleri üç ana gruba ayrılmaktadır [9]:

- Zemini geçici olarak iyileştirme teknikleri,
- Herhangibir madde katmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri,
- Çeşitli maddeler katarak zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri.

Yeraltısu seviyesinin düşürülmesi, ısıtma işlemleri (zeminin dondurulması) ve elektro-osmoz zemini geçici olarak iyileştirme teknikleri içerisinde yer almaktadır. Yüzey kompaksiyonu, patlatma ile sıkıştırma, vibro-kompaksiyon ve dinamik konsolidasyon, ikinci grupta sözü edilen ve herhangibir madde katmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri içerisinde yer almaktadır. Kireç, çimento, bitüm gibi katkı maddeleri ile zeminin ünifom bir şekilde karıştırılması, kireç kazıkları, zeminin değiştirilmesi, ön yükleme ile birlikte dikey drenlerin kullanılması, enjeksiyon ve geotekstillerle stabilizasyon ise çeşitli maddeler katarak zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri içerisinde yer almaktadır [8,9].

Çakıl	Kum	Silt	Kil
Vibro - Kompaksiyon			
Patlatmayla sıkıştırma			
Kompaksiyon kazıkları			
Bitümle stabilizasyon			
Daneli enjeksiyon			
Çimento stabilizasyonu			
Kimyasal enjeksiyon			
	Kompaksiyon enjeksiyonu		
		Kireçle stabilizasyon	
	Ön yükleme		
Dinamik konsolidasyon			
		Elektro - osmoz	
	Donatılı zemin		
		Isıl işlemler	
		Zemin yerdeğiřtirmesi	
			İslatma

Şekil 2.1. Çeşitli Zeminlerde Uygulanabilen Değişik Zemin Islah Yöntemleri [8]

3. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Enjeksiyon ile zemin iyileştirmesi genellikle zemin içerisinde teşkil edilecek inşaat mühendisliği yapıları ve maden projeleri için kullanılmaktadır [4].

Temel zeminin veya ana kayanın kayma mukavemetini arttırmak ve permeabilitesini azaltmak amacıyla kaya veya zemin içerisine basınç altında çeşitli bileşimdeki karışımların basılmasına “Enjeksiyon” adı verilmektedir [8,10].

Enjeksiyon karışımının cinsi, enjeksiyonun amacı ve ıslah edilecek zeminin dane çapı ile ilgilidir. Çimento, kireç ve bentonit gibi daneli karışımlar çakıl dane boyutundan orta kum boyutuna kadar olan zeminlerde kullanılabilir. İnce kum ve siltlerin enjeksiyonunda kimyasal eriyikler kullanılmaktadır. En çok kullanılan kimyasal maddeler silikatlar, krom-lignin, reçine, akrilamid ve poliüretandır. Kil zeminlerin ise klasik enjeksiyon teknikleri ile ıslahı mümkün değildir. Sadece, kil içerisindeki belli başlı fisürler ve kuruma çatlakları doldurulabilir [8]. Zemin cinsine göre enjeksiyon sınırları Şekil 3.1’de verilmektedir [1].

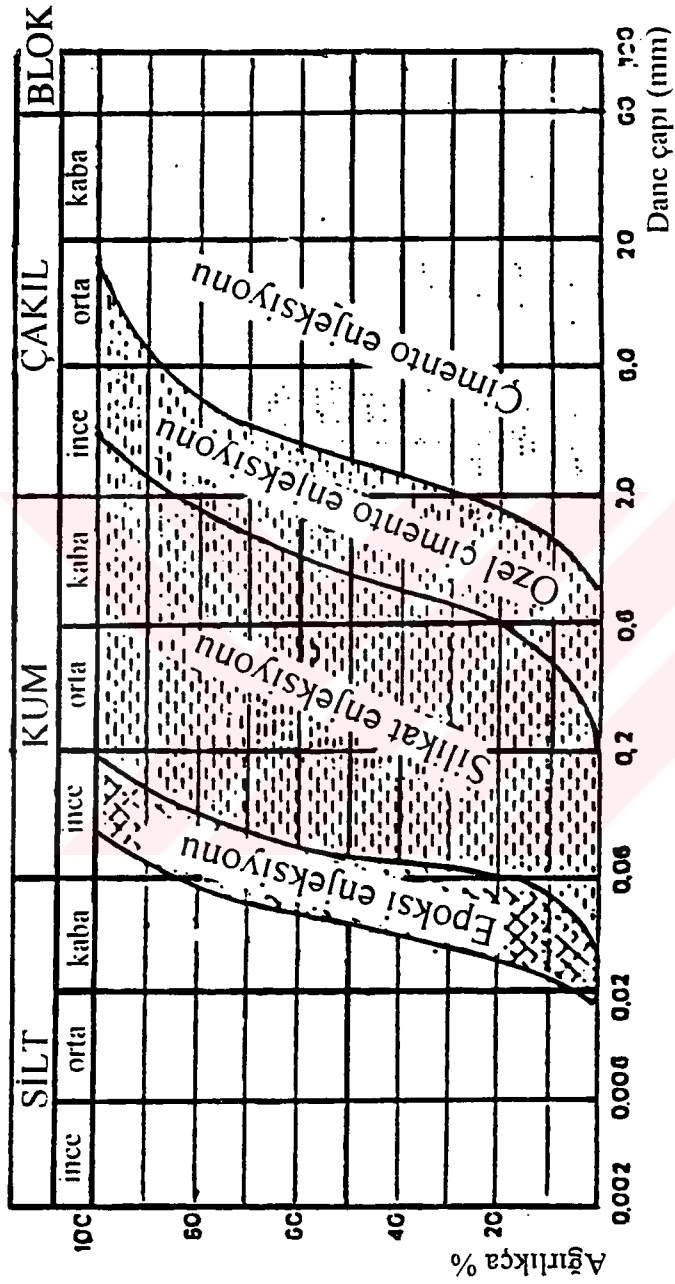
Kimyasal maddeler ile zemine enjeksiyon yapılabilmesi zeminin permeabilite katsayısına bağlı olarak aşağıda verilmiştir [11]:

$k < 10^{-6}$ cm/sn : enjeksiyon yapılamaz.

$10^{-5} < k < 10^{-6}$ cm/sn : az miktarda enjeksiyon yapılabilir.

$10^{-3} < k < 10^{-5}$ cm/sn : orta derecede enjeksiyon yapılabilir.

$10^{-1} < k < 10^{-3}$ cm/sn : kolaylıkla enjeksiyon yapılabilir.



Şekil 3.1. Zemin cinsine göre enjeksiyon sınırları [1]

Enjeksiyon malzemesinin zemin formasyonuna penetre olabilmesi için enjeksiyon karışımında kullanılan malzemenin dane çapının, enjeksiyon yapılacak zemin içerisindeki mevcut boşluklardan daha küçük olması gerekmektedir [11].

3.1. Enjeksiyon Yöntemlerinin Uygulama Alanları

Enjeksiyonun, inşaat mühendisliğinde geniş uygulama alanları mevcuttur [8,10]:

- Yapı temelleri altındaki zeminin permeabilitesini azaltmak,
- Geçirimsizlik perdeleri teşkil etmek (perde enjeksiyonu),
- Aşırı oturmaların ve su kaçaklarının önlenmesi,
- Yapı ile ana kaya arasında kalması muhtemel boşlukların doldurulması (kontak enjeksiyonu),
- Gevşek kumlarda sıvılaşmanın önlenmesi,
- Hacim değişimi gösteren zeminlerde şişme ve büzülme potansiyelinin azaltılması,
- Komşu temellerin takviyesi veya oturmuş temellerin zemininin ıslahı,
- Temel çukuru duvarlarının stabilitesinin sağlanması,
- Tünel inşaatlarında, tünel aynasının stabilitesinin sağlanması,
- Yapı temelleri altındaki zeminin mukavemetini arttırmak.

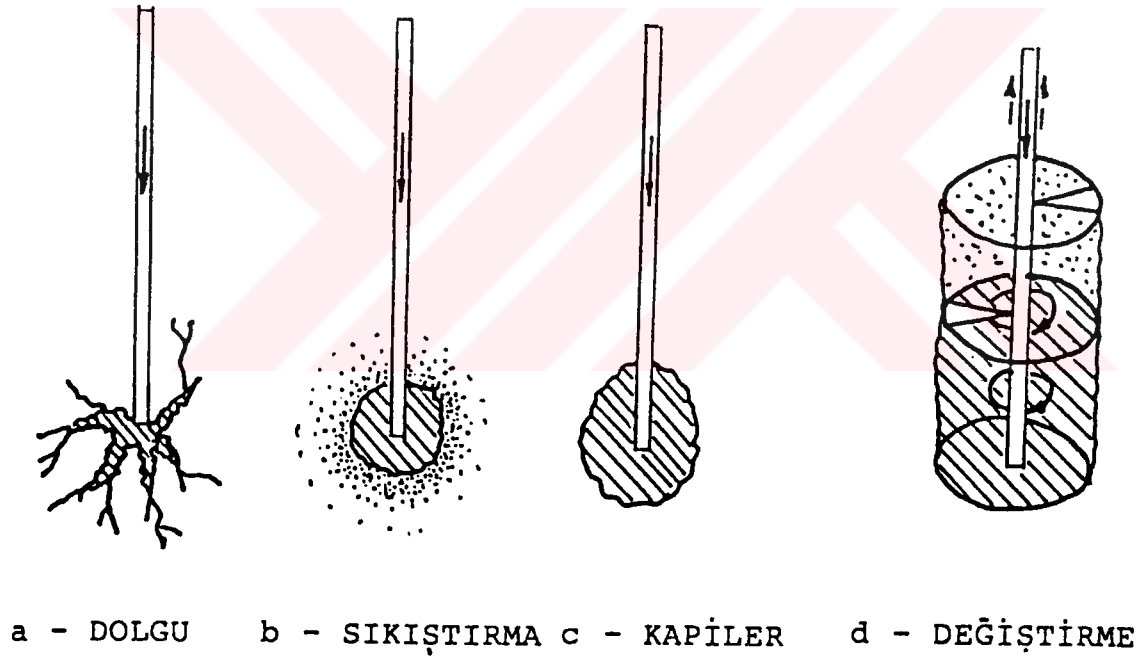
3.2. Enjeksiyon Yöntemleri

Enjeksiyon yöntemleri aşağıda verilmektedir [1,6,12] :

- Zemin tabakaları arasında veya masif kayalar içerisinde bulunan kırık, çatlak ve boşluklara doldurmak üzere yapılan enjeksiyon (dolgu enjeksiyonu),

- Gevşek zeminlere kum veya çimento harcı ile yapılan enjeksiyon (sıkıştırma enjeksiyonu),
- İnce daneli zeminlere yapılan kimyasal enjeksiyon,
- Yüksek basınçlı enjeksiyon (jetgrouting).

Yüksek basınçlı enjeksiyon yöntemi dışındaki diğer enjeksiyon yöntemleri zemin özelliğini büyük çapta değiştiremezler. Enjeksiyon yöntemleri Şekil 3.2’de verilmektedir [1].



Şekil 3.2. Klasik enjeksiyon yöntemleri ve Jetgrouting [1]

4. JETGROUTING YÖNTEMİ

Jetgrouting yöntemi zeminin iyileştirilmesi veya yapı yüklerinin daha derindeki tabakalara aktarılması amacı ile kullanılmaktadır [13,14]. Bu teknik çok farklı zemin koşullarında ve çok geniş uygulama alanlarında büyük bir tasarım serbestisi getirmektedir. Bunlara her türlü güvenliğin önemli olduğu hassas yapıların civarında yapılan çalışmalar da dahildir [15].

Bu yöntemle zemin, doğrudan doğruya çok yüksek basınçla (en az 300 barlık) zemine enjekte edilen bir stabilize malzeme ile (genellikle su-çimento karışımı) karıştırılır [16]. Yöntemin yüksek basınçla uygulanması, basit çimento enjeksiyonu ile her türlü zeminin ıslah edilebilmesini sağlamaktadır [1,14]. Jetgrouting yöntemi birçok inşaat ve çevre mühendisliği problemlerine uygun çözüm olmakla birlikte klasik enjeksiyon teknikleri ile diğer zemin iyileştirme yöntemlerine de alternatif olmaktadır [2,3,7].

Bu yöntemde, enjeksiyon memelerinden yüksek hızla gelen enjeksiyon karışımı zeminin doğal yapısını bozmakta ve zemin ile stabilize malzemenin karışımından doğan yeni bir oluşum yaratmaktadır. Böylece zeminin taşıma gücü ve elastisite modülü artarken permeabilitesi azalmaktadır [14]. Homojen ve sürekli yapıda olan bu yeni malzemenin karakteristik özellikleri önceden belirlenebilmektedir [16].

Jetgrouting yönteminin belirgin karakteri bu yöntemi diğer klasik yöntemlerle karşılaştırdığımızda ortaya çıkmaktadır. Klasik enjeksiyon yöntemleri zemin özelliğini büyük çapta değiştirememekte; bunlara karşılık, jetgrouting yöntemi zemini çimento şerbeti ile karıştırmak şeklinde uygulanmaktadır. Böylece zeminin bir kısmı çimento şerbeti ile yer değiştirmektedir (değiştirme enjeksiyonu - replacement) (Şekil 3.2) [1].

Diğer enjeksiyon sistemlerine nazaran Jetgrouting yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi çeşitli karakter ve farklı türlerdeki zeminlerin (sınırlı alanlarda dahi) ıslahı mümkün olabilmektedir (Şekil 4.1) [1,13].

Ayrıca, jetgrouting yöntemi ile diğer klasik enjeksiyon yöntemleri arasındaki en büyük ve önemli fark bu yöntemde kullanılacak stabilize malzemesi miktarı, elde edilecek mukavemet ve geçirgenlik gibi zemin parametreleri ile maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilmesidir [16].

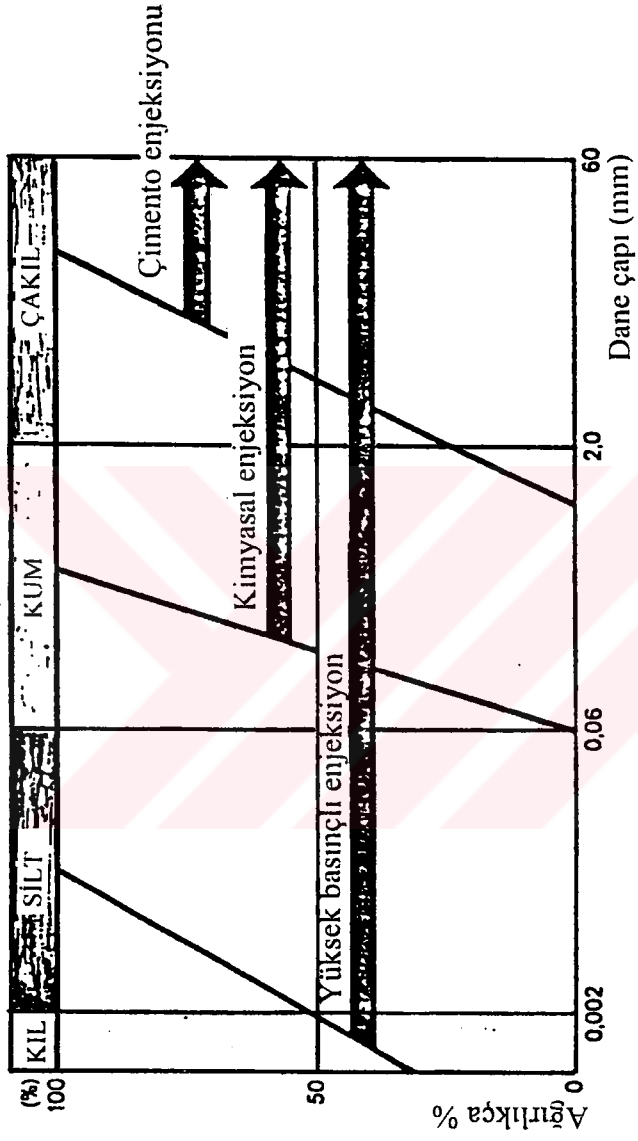
4.1. Jetgrouting Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Yüksek hızla zemine basılan karışımla zemini kesme, koparma ve sıkıştırma işlemleri ile iyileştirme düşüncesi ve bu konudaki çalışmalar ilk olarak 1965'te Yamakado kardeşler tarafından Japonya'da uygulanmaya başlanmış olup 1970'li yılların başlarında iki farklı jetgrouting tekniği geliştirilmiştir.

Nakanishi ve şirketi (N.I.T) tarafından geliştirilen jetgrouting tekniğinde, kimyasal ve çimento karışımları kullanılmakta olup bir delgi tijinin en altında bulunan 1.2-2.0 mm çaplı enjeksiyon memelerinden çok yüksek basınçla enjekte edilmektedirler. Karışımın enjeksiyonu sırasında, tijin kendi etrafında döndürülmesi ve yukarı çekilmesi ile kazık gibi zemin-çimento kolonları oluşturulmaktadır. Bu sebeple, bu tip jetgrouting tekniği “CCP jetgrouting” (chemical churning pile) olarak adlandırılmaktadır.

Bir başka jetgrouting tekniği ise 1970 yılında Japonya'da diyafram duvar teşkil etmek amacıyla Teuro Yahiro tarafından geliştirilmiş ve “jetgrouting” olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemin en belirgin özelliği zemini kesme, koparma ve sıkıştırma işlemleri için üç farklı akışkanın (su, hava, çimento şerbeti) kullanıldığı üçlü jet sisteminin uygulanmasıdır.

Jetgrouting yönteminin diğer uygulama teknikleri 1970'li yılların ortalarında Japonya'da kullanılmıştır. Nakanishi ve arkadaşları tarafından CCP jetgrouting sistemi, çimento karışımı ve havanın birlikte kullanılmasıyla geliştirilmiş ve “jumbo jet special grout (JSG)” olarak adlandırılmıştır. Sadece sıkıştırılmış hava kullanılarak



Şekil 4.1. Yüksek basınçlı enjeksiyon [1]

teşkil edilen JSG kolonları aynı çalışma parametreleri kullanılarak teşkil edilen CCP kolonlarından 1.5-2.0 kat daha büyüktür.

Bundan sonra, Yahiro ve arkadaşları jetgrout kolonlar teşkil etmişlerdir. Benzer prensip kullanılarak, hava jetiyle sarılmış bir su jeti sisteme eklenmiştir. Örselenmiş zemin, hava jetiyle kopar ve oluşan boşluk enjeksiyonla doldurulup karıştırılır.

1980 yılında, CCP gurubu tarafından süper zemin stabilizasyon yönetimi “super soil stabilization management (SSS-MAN)” geliştirilmiştir. Bu sistemde amaçlanan, çok geniş çaplı kolonların teşkil edilmesidir. Bu yöntemde, pilot bir delik açılır ve yüksek basınçlı dönen su jeti ile zemin örselenir. Açılan boşluk süpersonik dalga tekniği ile ölçülür ve enjeksiyonla doldurulur. SSS-MAN tekniği ile büyük hacimler ve 4.0 m çapa kadar katılaşmış yapılar özellikle kohezyonsuz zeminlerde oluşturulabilmektedir.

Jetgrouting yönteminin Japonya’da ortaya çıkmasından sonra bu teknoloji hızla batı Avrupa’ya, özellikle İtalya, Almanya ve Brezilya’ya yayılmıştır. Kuzey Amerika’da ise 1980’li yıllarda uygulanmaya başlanmıştır [17,18].

Son üç yılda jetgrouting teknolojisi önemli ölçüde geliştirilmiştir. Çok yüksek basınçlı pompalar üretilmiş ve bunun sonucu olarak yüksek enjeksiyon basıncına ve akış hızına ulaşılmıştır. Su-çimento karışım tesisleri modernleştirilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde uygun olmayan bölge ve hava koşulları sorununun üstesinden gelinmiş, makinaların güvenlik koşulları önemli ölçüde geliştirilmiş olup işlem için gereken iş gücü, hazırlık çalışmaları ve diğer işler için gereken süre azalmıştır [19].

4.2. Jetgrouting Yönteminin Uygulanışı

Prensip olarak dışarıda hazırlanmış çimento şerbetinin, yüksek basınç altında ince püskürtme memelerinden, zemin içine püskürtülerek çevrede bulunan zeminin bu şerbetle karıştırılması suretiyle zeminin ıslah edilmesidir [1,13].

- 1) Delme Aşaması : Genellikle 100-150mm çaplı enjeksiyon forajının öngörülen derinliğe kadar açılması için genelde rotari usulü ile çalışan delici bir makina ve delmede kolaylık için de sirkülasyon suyu kullanılmaktadır.

2) Püskürtme Aşaması : Delme tijinin ucundaki püskürtme memelerinden 700 bara kadar ulaşan basınçla enjeksiyon malzemesi püskürtülür. Yüksek basınç altında kontrollü olarak verilen bu enjeksiyon malzemesi ince püskürtme memelerinden büyük bir enerji ile çıkar, karşılaştığı zemini keser, koparır ve karıştırır.

Jetgrouting yönteminin uygulanışı Şekil 4.2.'de verilmektedir [2].

4.2.1.Delgi

Delgi klasik yöntemlerdeki gibi delinen zemin özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla klasik sistemlerdeki tüm rotari delgi yöntemleri kullanılır. Delgi sırasında kullanılan akışkanlar su, hava, bentonit suspansiyonu veya çimento-su karışımlarıdır.

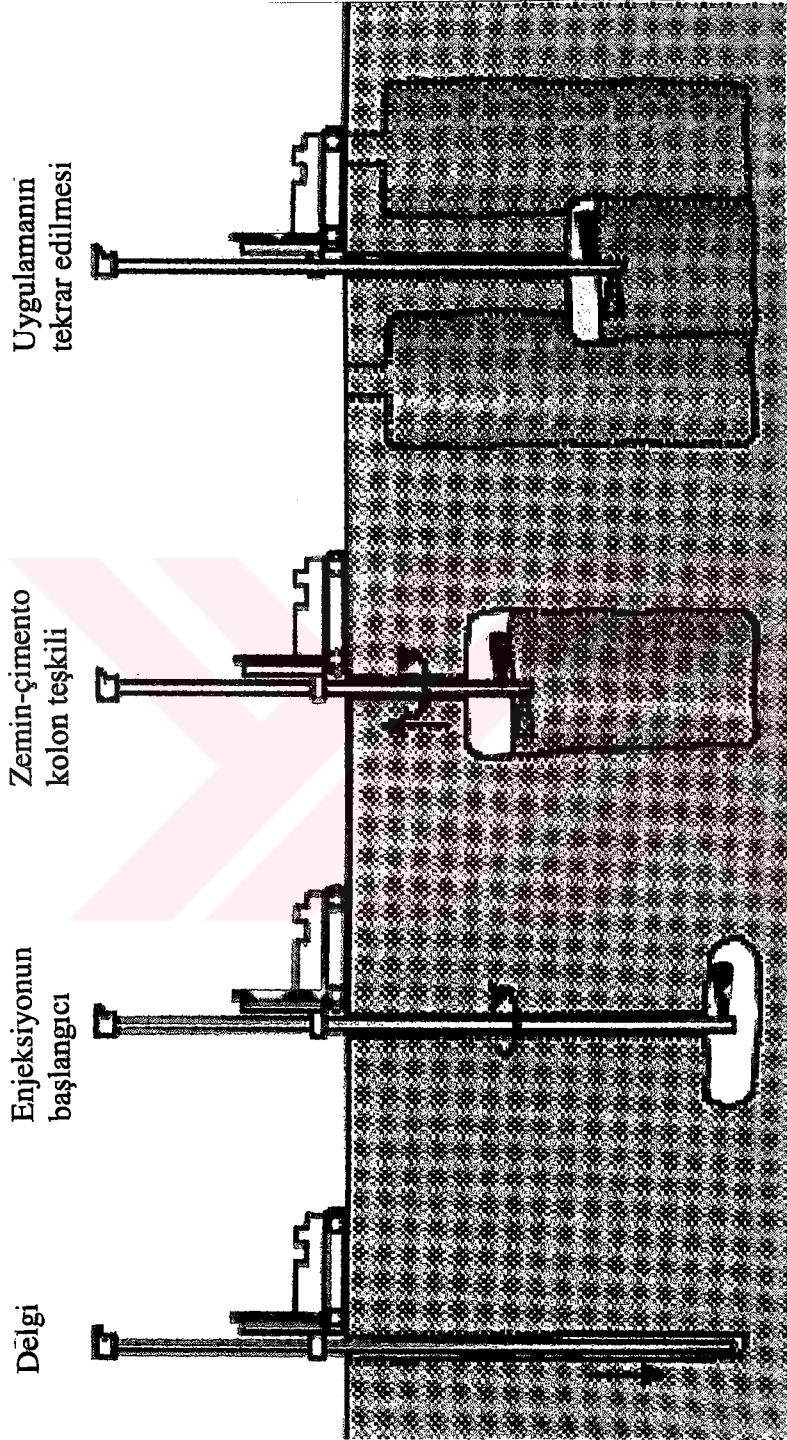
Yüksek basınçlı enjeksiyonun yapımında aynı delgi tijleri kullanılmaktadır; bu delgi tijleri yüksek basınçlı enjeksiyon için özellikle basınca dayanıklı olarak imal edilmiştir. Birleşim yerleri 500-600 bar basınca dayanabilmektedir [16].

4.2.2.Enjeksiyon

Önceden planlanan derinliğe erişildikten sonra delgi tiji ucundaki delik, çelik küre veya otomatik bir valf ile kapatılır. Böylece enjeksiyonun, Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi monitor denilen özel parçaya yatay olarak tesbit edilen enjeksiyon memesi veya enjeksiyon memelerinden çıkması sağlanır [20]. Elde edilen yüksek kinetik enerji etrafındaki zemini parçalar; parçalanmış zemin ve enjeksiyon karışarak zemin-çimento kolonlarını oluşturur. Böylece doğal zeminin mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur [16].

Elde edilen kolonların boyutları zeminin yapısı ile tijin dönme hızı, yukarı çekilme hızı, enjeksiyon basıncı ve akışkanlığı, enjeksiyon memelerinin çap ve sayısı gibi çalışma parametrelerinin seçimine bağlıdır [16].

Püskürtme aşaması sonucunda, enjeksiyon malzemesinin zemine aktarıldığı tijin belirli devir ile döndürülmesinden kalınlıkları zemin cinsine bağlı olarak 2 cm ile 7 cm arasında değişen daire biçimli tabakalar, tijin yavaşça yukarı doğru çekilmesi ile de Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi enjeksiyon kolonları oluşturulur.



Şekil 4.2. Jetgrouting yönteminin uygulaması [2]



Şekil 4.3. Enjeksiyonun püskürtme memelerinden çıkışı [20]

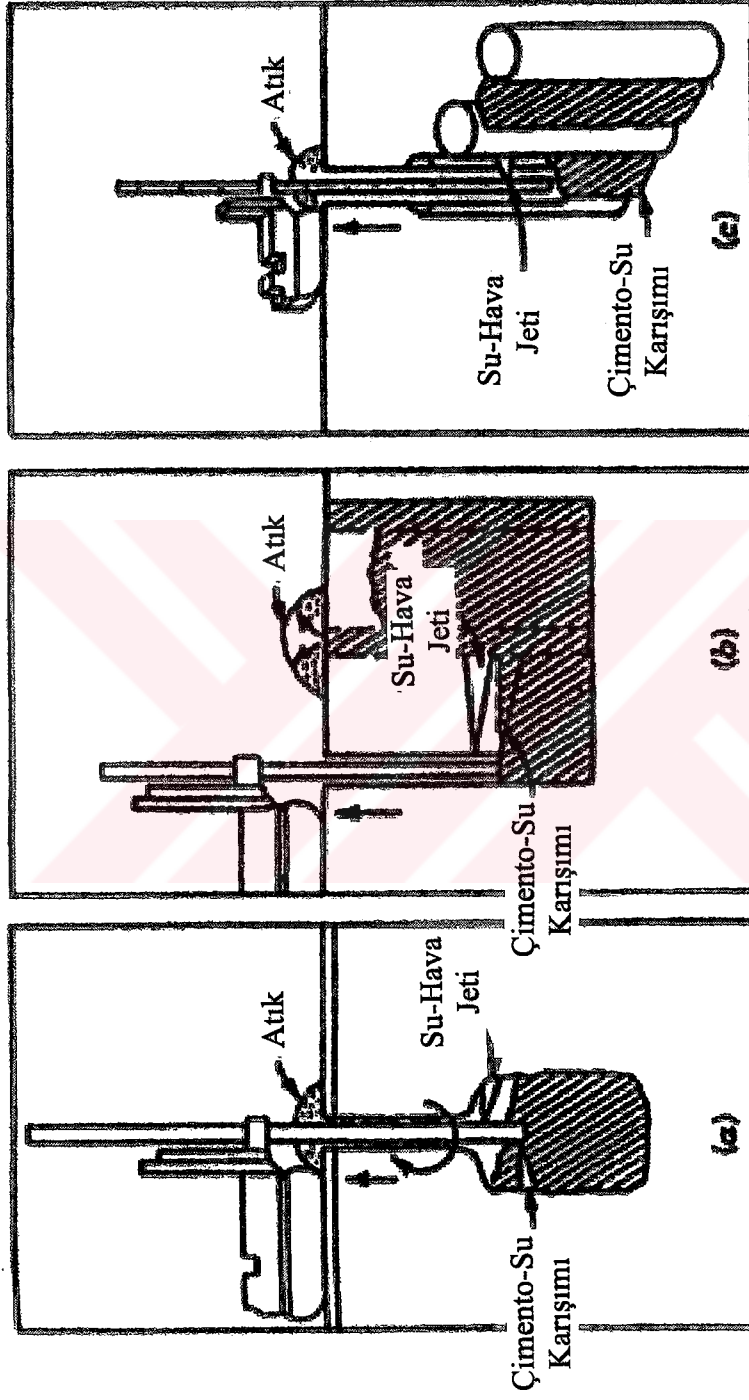
Enjeksiyon hızı, açısı, tijin dönme hızı ve tijin geri çekiliş süresi değiştirilerek çeşitli iyileştirilmiş zemin-çimento kolonları elde etmek mümkün olur. Kolon şekillerindeki silindirik form tijin sürekli 360° döndürülmesi ve geri çekiliş sırasında da aynı işlemin yapılması ile sağlanmaktadır. Tijin döndürülmeden geri çekilmesi veya kısmi rotasyonla çekilmesi ile ince perde duvarlar elde edilmektedir (Şekil 4.4) [16,21].

Enjeksiyon işlemi devam ederken kesilip karıştırılan zeminin bir kısmı oluşan basınç altında Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi enjeksiyon foraj deliğinden yüzeye transfer olur [1,21]. Bir kısım zeminin enjeksiyon deliğinden yüzeye çıkması enjeksiyonun zemine penetrasyonu için önemlidir [15]. Ağızdan geri gelen madde hacmi zemin porozitesi ve iyileştirilen zemin cinsine bağlı olarak killerde daha fazla, kum ve çakıllarda daha az olmak üzere ortalama olarak enjeksiyon hacminin %10'u mertebesinde [16]. Kalan zemin çimento şerbeti ile karışır, özellikleri tamamen değişik yeni bir malzeme ortaya çıkar. Bu yeni malzeme orjinal zemin ile hiç benzerliği olmayan kendine özgü bir malzemedir. Kısacası bu bölgede malzemenin karakteri değiştirilmiş olur [1].

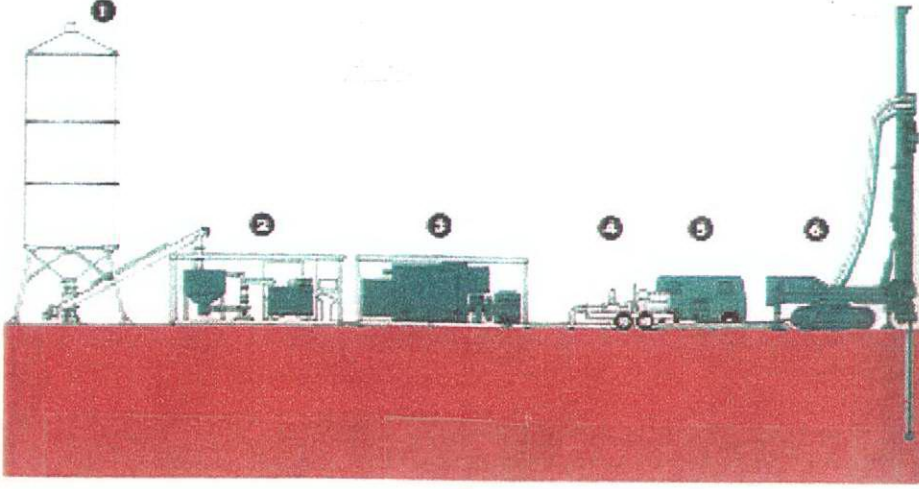
4.3. Jetgrouting Yapımında Kullanılan Ekipman Ve Araçlar

“Jetgrout” yapımında, jetgrout yapımı için uyarlanmış bir sondaj makinası, basınçlı püskürtme için gerekli çimento pompası ve çimento silosu, su deposu, mikser, çalkalayıcıdan oluşan karıştırma ünitesi kullanılmaktadır. Tipik jetgrouting tesisi Şekil 4.5’de verilmektedir [22]. Karıştırma ünitesinde enjeksiyon işlemi için istenilen özellikteki karışım otomatik olarak hazırlanmaktadır. Hazırlanan karışım daha sonra jetgrout pompasına aktarılır. Delgi ve enjeksiyon işleminde aynı tij kullanılmaktadır.

Monitor adı verilen parça ise tijin ucuna yerleştirilmekte olup gerekli sayıda ve çok küçük çaplı enjeksiyon memeleri ihtiva etmektedir (Şekil 4.6) [20]. Tijin devir hızı, yukarı çekilme hızı ve diğer gerekli süreler, istenilen kolon çapı ve çimento dozajını koruyabilmek için delgi makinasının kontrol panelinden ayarlanmaktadır. Delgi makinası çeşitli alanlara ulaşabilirliği sağlamak için genellikle 360 derece dönebilen yapıya sahiptir. Çimento silosu, karıştırma ünitesi yanına yerleştirilmektedir.



Şekil 4.4. Farklı geometrik yapıdaki Jetgrout kolonlarının oluşturulması [21]



- (1) Çimento Silosu,
- (2) Karıştırma Ünitesi,
- (3) Pompa Ünitesi,
- (4) Su Pompası (JET3 için),
- (5) Hava Kompresörü (JET2 için),
- (6) Delgi/Enjeksiyon Makinası.

Şekil 4.5. Tipik Jetgrouting tesisi [22]



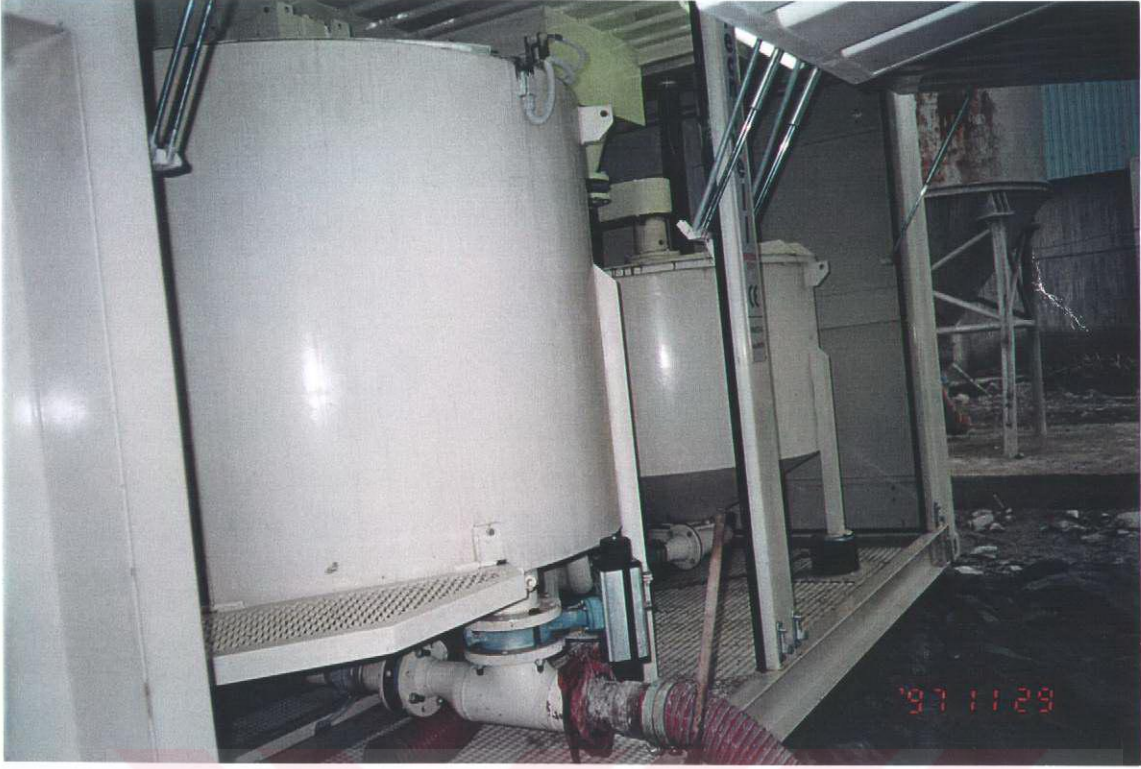
Şekil 4.6. Monitör, enjeksiyon memesi, kil matkabı [20]

Çimento silosunun kapasitesi iyileştirmenin amacına ve projeye bağlıdır. Enjeksiyon tekniğine bağlı olarak hava kompresörü kullanılmaktadır [13,22].

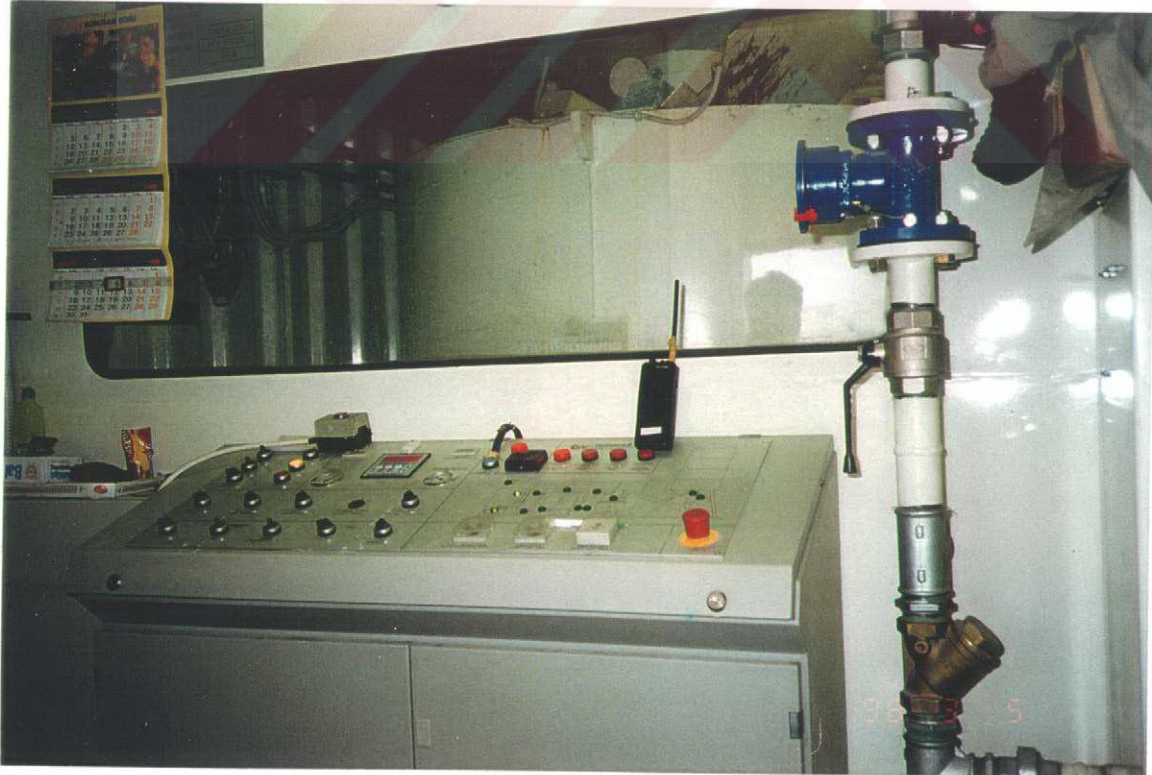
Günümüzde jetgrouting yöntemi çeşitli ülkelerde birçok alanda uygulanmaktadır. Bu sebeple, iyileştirmenin amacına ve istenilen dizayn parametrelerine bağlı olarak farklı teknolojiler uygulanmakta fakat bu teknolojiler yukarıda sözü edilen araç ve ekipmanları içermektedir. Jetgrouting yönteminde kullanılan ekipmanlar Şekil 4.7, Şekil 4.8., Şekil 4.9. ve Şekil 4.10'da verilmektedir [23].



Şekil 4.7. Jetgrouting uygulamasında delgi ve enjeksiyon için kullanılan makina [23]



Şekil 4.8. Jetgrouting tesisi karıştırma ünitesi [23]



Şekil 4.9. Jetgrouting tesisi otomatik kontrol ünitesi [23]



Şekil 4.10. Jetgrouting tesisi pompa ünitesi [23]

4.4. Jetgrouting Yapım Teknikleri

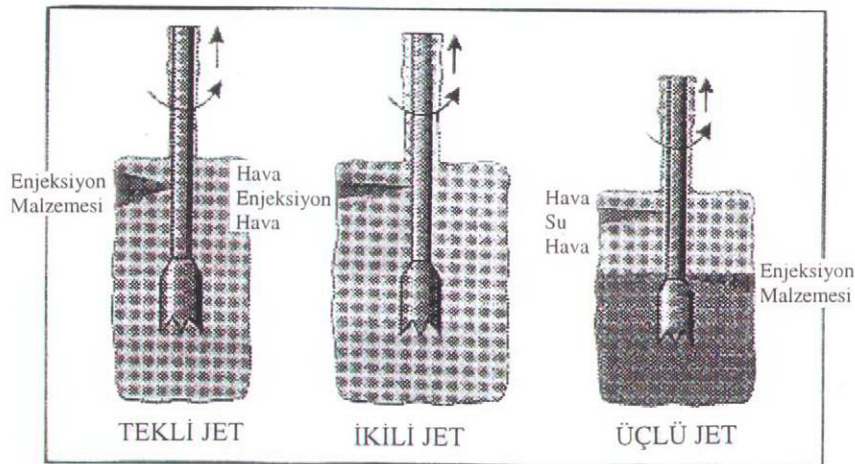
Enjeksiyon memelerinden büyük basınçla püskürtülen enjeksiyon malzemesi demeti “enjeksiyon jeti” olarak tarif edilir. Enjeksiyon pompa basıncı, püskürtme memesi çapı ve püskürtme hızı arasındaki bağıntıdan enjeksiyon jetinin taşıdığı enerjiyi hesaplamak mümkündür.

Zemini kesmede kullanılan bu enerji, püskürtme memesinin geometrik ölçülerine daha doğrusu formuna bağlı olmakla beraber, ayrıca püskürtüldüğü ortamının cinsine ve fiziksel yapısına da son derece bağlıdır.

Enjeksiyon jetinin demetsel özelliğini gittikçe kaybederek dağılması ve çevre ile enjeksiyon arasındaki sürtünme kuvvetleri büyük çapta enerji kaybına sebep olur, dolayısıyla jetin etki mesafesi azalır.

Yapılan deneyler sonucunda bir enjeksiyon jetinin tesir mesafesinin havada çok büyük olmasına karşın su içinde önemli derecede azaldığı ve nihayet muhtelif yoğunluklu sıvılar içinde ise sıvının özgül ağırlığına bağlı olarak azaldığı görülmüştür [1]. Şekil 4.11’de jetgrouting sistemleri görülmektedir [2].

Uygulanan jetgrouting sistemleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.



Şekil 4.11. Jetgrouting sistemleri [2]

4.4.1. Tekli Jet (JET1)

Delgi ve enjeksiyonun aynı tij jeti ile yapıldığı en basit ve yaygın yöntemdir. Enjeksiyon 300-600 barlık yüksek basınçla tij içinden yapılmaktadır. Tekli sistemde delgi borusu altındaki bir ağızlıktan basınçlı su verilerek istenilen derinliğe kadar bir delik açılır. Sonra su ağızlığı kapatılarak 1.6-3.0mm çaplı enjeksiyon memelerinden basınçlı harç püskürtülmeye başlanır. Tij kendi eksenini etrafında döndürülürken yukarı doğru çekilir. Püskürtülen harç ile zemin örselenirken zemin-çimento karışımı meydana getirilir. Bu sistemde atık (taşma) az olur. Hava kullanılmadığı için yatay yapılan uygulamalarda özellikle tünel içlerinde bu sistem kullanılır.

Bu metodla elde edilen zemin-çimento kolonlarının çapları, zemin cinsi ve çalışma parametrelerine bağlı olarak kohezyonlu zeminlerde yaklaşık 400 mm ile 800 mm arasında değişkendir. Granüler zeminlerde ise 500 mm ile 1200 mm civarında olmaktadır [16,17].

4.4.2. İkili Jet (JET 2)

Bu sistem aynı merkezli iç içe geçmiş iki borudan oluşmaktadır. Enjeksiyon Jet1 yöntemindeki gibi içteki borudan yapılır. Dıştaki borudan ise 8-12 bara kadar değişen basınçlı hava verilir. Basınçlı hava, enjeksiyon sırasında sürtünme dolayısıyla oluşan kinetik enerji kayıplarında önemli bir düşüş sağlar. Böylece elde edilen zemin-çimento kolon çapları Jet1 yöntemi ile elde edilen kolon çaplarından %60-80 oranında daha büyük olabilmektedir [16,17].

İkili sistemin dezavantajı, bu sistemde elde edilen mukavemetin tekli sistemde elde edilen mukavemetten daha az olmasıdır. İkili sistemin önemli mahzuru ise çimento basılan zeminin hava içeriğini arttırmasıdır [13]. Bu sistem genellikle sızdırmazlık için cut-off veya perde inşasında ve çöp alanları ile sıvılaşma potansiyeline sahip alanların ıslahında kullanılmaktadır [7,17].

4.4.3. Üçlü Jet (JET 3)

Sistem aynı merkezli iç içe geçmiş üç borudan oluşmaktadır. Delgi aşaması, diğer sistemlerde olduğu gibidir. 400-600 barlık basınçlı su en iç borudan basılır. 8-12 bar

basınçlı hava ortadaki borudan verilmektedir. Su ve hava enjeksiyon memelerinden Jet2 yöntemindeki gibi zemine nüfuz eder. Dıştaki borudan basılan çimento enjeksiyonunun basıncı 30-80 bar arasında değişmektedir. Hava ve su ile desteklenen bu yöntemle zemin-çimento kolon çapı 2.0 m'ye kadar ulaşabilmektedir [16]. Çok kohezyonlu zeminler içinde büyük çaplı kolonlar yapılabilmesi için bu sistem kullanılır [13].

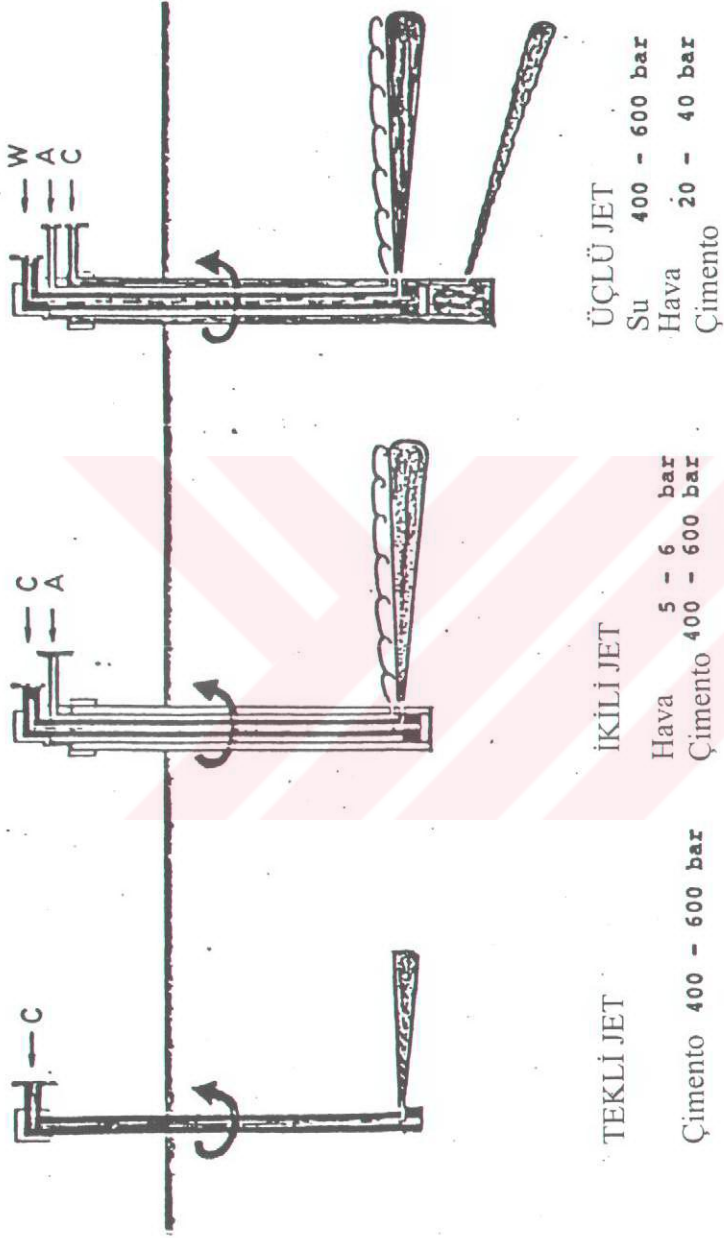
Şekil 4.12'de jetgrouting sistemlerinde kullanılan akışkanlar görülmektedir [1]. Çimento karışımli bir enjeksiyon jetinin kesici unsur olarak kullanılması halinde zemin içindeki bulamacın özgül ağırlığı 16 kN/m^3 - 20 kN/m^3 mertebelerine ulaşmaktadır. Buna karşın kesici unsur olarak sadece su jeti kullanıldığı halde zemin içindeki bulamacın özgül ağırlığı daha az yoğun olmak üzere 13 kN/m^3 civarında olmaktadır. Yapılan tecrübeler de kesim sırasında su jetini kullanmakla tesir çaplarının büyüdüğünü göstermiştir. Şekil 4.13'de muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki verilmektedir [1].

4.5. Çalışma Parametreleri

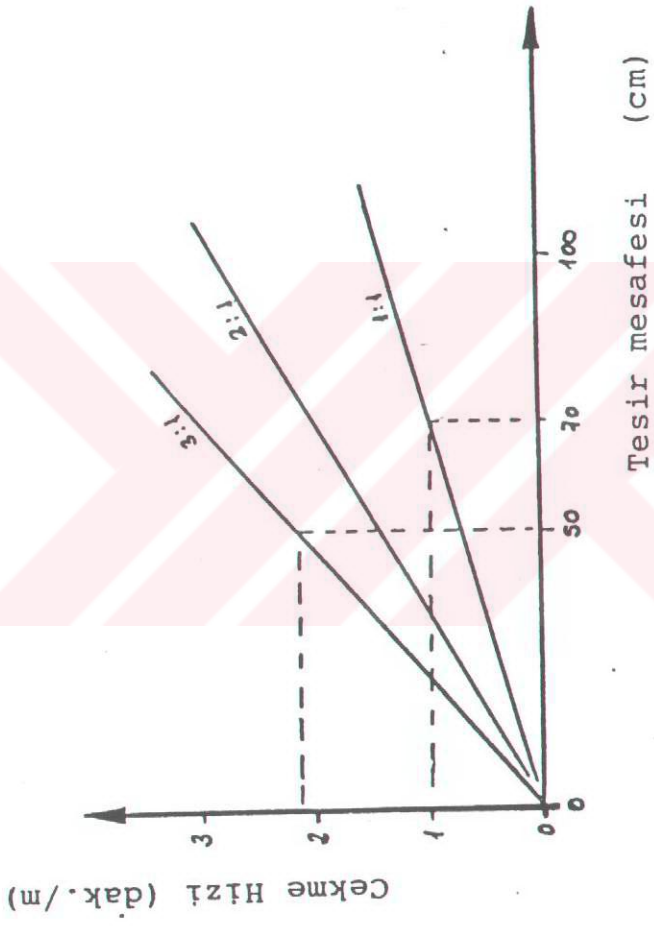
Jetgrouting tasarımı ve uygulanişında en önemli unsurlar enjeksiyonun özellikleri ve çalışma parametreleridir. Enjeksiyonun özellikleri, enjeksiyon maddeleri ve bileşimlerinden oluşur. Çalışma parametrelerinin seçimi zemin şartları, kolon çapı, istenilen taşıma gücü değeri ve uygulanacak yonteme göre belirlenir. Çeşitli çalışma parametreleri ve etkileri aşağıda verilmektedir:

4.5.1. Basınc

İstenilen çapta jetgrout kolonu oluşturabilmek için en önemli parametre enjeksiyon basıncıdır. Tesir yarıçapını enjeksiyon basıncı belirlemektedir. Kesme ve koparma etkisi uygulanan basınca bağlıdır. Enjeksiyon basıncı arttıkça tesir yarıçapı da artmaktadır. Ancak, kullanılan enerji, kolonların çapındaki uygun artışa her zaman karşılık gelmez. Bunun başlıca sebebi zemindeki kohezyondur. Zeminin kohezyonu azaldıkça ve zeminin kaba dane oranı artıkça tesir çapı da artmaktadır. Ayrıca, homojen ve istenilen çaplı kolon imali yapım süresine de bağlıdır [4,16].



Şekil 4.12. Jetgrouting sistemlerinde kullanılan akışkanlar [1]



Şekil 4.13. Muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki

Sistemin gerektirdiği basınç özel pompalar ile sağlanır. Pompa basınçları enjeksiyon yapımında kullanılacak sisteme, enjeksiyonun yapıldığı zemine bağlı olarak şu değerler arasında değişir:

Çimento karışımının enjeksiyon basınçları [16]:

düşük : 200-250 bar

orta : 300-400 bar

yüksek : 400-700 bar

Çimento jeti hem kesici unsur olarak hem de dolgu maddesi olarak kullanılıyorsa basınç, 400 - 450 bar arasında değişmektedir [1].

Ayrıca, farklı zemin türlerinde gerçekleştirilen arazi deneylerinde belirlenen kolon çapları Tablo 4.1’de verilmektedir (Bauman 1984 ve Bauer) [4].

Tablo 4.1. Farklı Zeminlerde Gerçekleştirilen Arazi Deneylerinde Belirlenen Kolon Çapları

Jetgrouting Tekniği	Basınç (bar)			Kolon Çapları (m)				
	Çimento	Hava	Su	Orta katı kil	Orta sıkı	Killi silt	Siltli kum	Kumlu çakıl
Tekli	250-400				0.85	0.4-0.5	0.8-0.9	0.9-1.0
Jet	400-600							
İkili	250-400	5-6			1.7	0.6-0.8	1.1-1.3	1.3-1.5
Jet	400-600	5-6						
Üçlü	15-40	5-6	300-400	1.4		0.8-1.0	1.4-1.6	2.0-2.4
Jet	15-40	5-6	400-600			1.5-1.7	2.0-2.3	2.5-2.8

Ön yıkama, 200-500 barlık su enjeksiyonunu olup çimento enjeksiyonundan önce uygulanmaktadır. Bu suretle daha büyük çaplı kolonlar elde edilebilmektedir.

4.5.2. Dönme ve Çekme Hızı

Zeminin etkili bir şekilde enjeksiyon malzemesi ile karışabilmesi için tijin dönme hızının tercihan yavaş olması ve çekim hızının ise iyileştirme alanında homojen bir karışım oluşmasını sağlayacak düzeyde olması gerekmektedir [16]. Enjeksiyon tijinin döndürülmesinden oluşan enjeksiyon kolonlarının çapları, aynı zamanda belirli bir yüksekliğe düşen ortalama devir sayısına da bağlıdır [1].

Jetgrout kolonunun istenilen mukavemeti sağlayabilmesi için önemli olan çimento dozajını etkileyen en önemli parametre, tijin yukarı çekiliş hızıdır. Tijin yukarı çekiliş hızı zemin cinsine ve enjekte edilecek karışım miktarına bağlıdır.

Dönme hızı genellikle 10-20, nadiren 30 devir/dakika mertebesindedir. Bu devir sayısı zemin cinslerine göre:

gevsek kum ve çakıl zeminlerde	8 - 12 dev/dak
orta sıkılıkta çakıl zeminlerde	12 - 20 dev/dak
killi siltlerde ise	10 - 50 dev/dak

civarında alınmaktadır [1].

Tijin çekim hızı 2-8 cm'lik adımlardan oluşmaktadır. Fakat deneyimler en iyi çözümün 4 cm'lik kademeler halinde olduğunu göstermektedir. Rotasyonda olan enjeksiyon tijinin yukarıya doğru çekiliş hızı enjeksiyon kolon kalitesini etkileyen faktörler arasındadır. Bu hız ise zemin karakterine bağlı olarak,

gevşek kum ve çakıl zeminlerde :	5 sn / 4 cm
orta sıkılıkta çakıl zeminlerde :	12 - 17 sn / 4 cm
siltli zeminlerde :	18 - 120 sn / 4 cm

olarak değişebilmektedir.

Çekme işlemi kullanılan delici makinanın özelliğine bağlı olarak ya sürekli veya kademeli olarak yapılabilir. Kil oranı yüksek olan zeminlerde sürekli bir çekme yerine ancak kademeli çekme yapılabiliriyorsa, kademe yükseklikleri 4 cm den fazla olmamalıdır. Aksi takdirde enjeksiyon kolonlarında orjinal zemin ile enjeksiyon maddesi yeteri kadar karıştırılmadığından arzu edilmeyen bir tabakalaşma oluşur [1].

Dönme ve çekme hızları uygulanan yöntem ve ıslah edilen zemin hacmine bağlıdır. Jet2 ve Jet3 yöntemlerinde yapım süresi Jet1 yöntemine göre daha uzundur. Çünkü daha büyük çap elde edebilmek için daha fazla hacimdeki zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir [16].

Jetgrouting yönteminin bir avantajı da kullanılacak sistem ve istenilen mukavemete bağlı olarak kullanılacak çimento miktarının işe başlamadan önce tahmin edilebilmesidir. Bunun sonuçtan hareketle, çimento dozajı belirlenerek jetgrout kolonun bir metresindeki çimento miktarı hesaplanabilmektedir. Enjeksiyon jetinin enjeksiyon memelerinden akış oranı değerlendirilerek bu iki değer birleştirilmesiyle tijin yukarı çekiliş hızı bulunabilmektedir. Bu yaklaşıma göre, enjeksiyonun su/çimento oranı ve birim hacim ağırlığı (γ) bilinmek koşuluyla uygulanan enjeksiyon basıncı (P_i) altında eşit yükseklik (h) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [16]:

$$h = P_i / \gamma \quad (4.1)$$

Enjeksiyonun çıkış hızı :

$$V = (2.g.h)^{1/2} \quad (4.2)$$

Enjeksiyon miktarı (Q) :

$$Q = V.A \quad (4.3)$$

A : Enjeksiyon memesi çapına bağlı olarak değişen enjeksiyonun çıkış alanıdır.

Basit bir örnek olarak, birim hacim ağırlığı 1.5 kg/dm^3 olan enjeksiyon malzemesi 500 barlık basınç altında ve 2.4 mm çaplı enjeksiyon memesinden zemine enjekte

edilmektedir. Bu durumda enjeksiyonun akış hızı ve enjeksiyon miktarı Tablo 4.2.'de verilmektedir [16].

Tablo 4.2. Enjeksiyonun Akış Hızı ve Miktarı

Çimento birim hacim ağı. (kg/dm ³)	2.56
Enjeksiyon karışımı birim hacim ağı. (kg/dm ³)	1.50
Basınç (bar)	500
h(m)	3333.3
V(m/s)	255.73
Enjeksiyon memesi çapı (mm)	2.4
Enjeksiyon miktarı (lt/dak)	69.38

Farklı basınç ve farklı enjeksiyon memesi çapları için belirlenmiş enjeksiyon miktarları Tablo 4.3'de verilmektedir [16].

4.5.3. Dozaj

Yüksek Basıncılı Enjeksiyon numuneleri üzerinde yapılan deneyler su/çimento oranı ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki bağıntıyı ortaya koymuştur. Aynı enjeksiyonda kullanılan şerbetin akma mukavemeti ve terleme yüzdesi de dikkate alınacak olursa en uygun sonuçların su/çimento oranının 0.7 ile 0.8 limitleri arasında iken alındığı görülmektedir. Genelde enjeksiyon şerbetine akışkanlık sağlamak için %2-3 oranında bentonit ilave edilmekte, su/çimento oranı ise 1.0 e yükselmektedir. Bentonit ilavesi enjeksiyon şerbetinin akışkanlığını ve işlenebilirliğini arttırmakta buna karşı enjeksiyon kolonu basınç mukavemetlerinde büyük bir değişiklik yapmamaktadır [1].

Standart su/çimento oranı 1 ve özgül ağırlık 1410-1570 kg/m³ düzeyindedir. Bu oran kullanılan yöntem, istenilen iyileştirme tipi, kolonların istenilen nihai dayanımları ve zemin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Bentonit karışımların kullanıldığı geçirimsiz perde duvarları dışında su/çimento oranının (w/c)=0.7 den daha az olduğu karışımlar genelde uygulanmaz. İyileştirilmiş zemin birim m³'ü başına çimento

TABLO 4.3 - ENJEKSİYON DEBİSİ / PÜSKÜRTME MEMESİ İLİŞKİSİ [16]

		PÜSKÜRTME MEMESİ ÇAPLARI (mm)										ENJEKSİYON ÖZGÜL AĞIRLIĞI =1.52	
		1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	
PÜSKÜRTME MEMELERİNDEN ENJEKSİYONUN ÇIKIŞI													
BASINÇ	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak	lit/dak
300	18	24	30	37	53	73	83	95	114	148	188		
350	20	26	32	40	58	79	90	103	123	160	203		
400	21	27	35	43	62	84	96	110	131	171	217		
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	182	230		
500	23	31	39	48	69	94	108	123	147	192	242		
550	25	32	41	50	72	98	113	129	154	201	254		
600	26	34	42	52	76	103	118	134	161	210	266		

miktarı 350-700 kg/m³ arasında değişmekle birlikte ortalama olarak 450 kg/m³ tür. Enjeksiyon karışımına bazı katkı maddeleri ilavesiyle iyileştirme etkilerinin artırılması mümkündür. Örnek olarak yüksek yeraltı suyu akışının sözkonusu olduğu yerlerde %1-3 sodyum silikat katılması tavsiye edilmektedir [16].

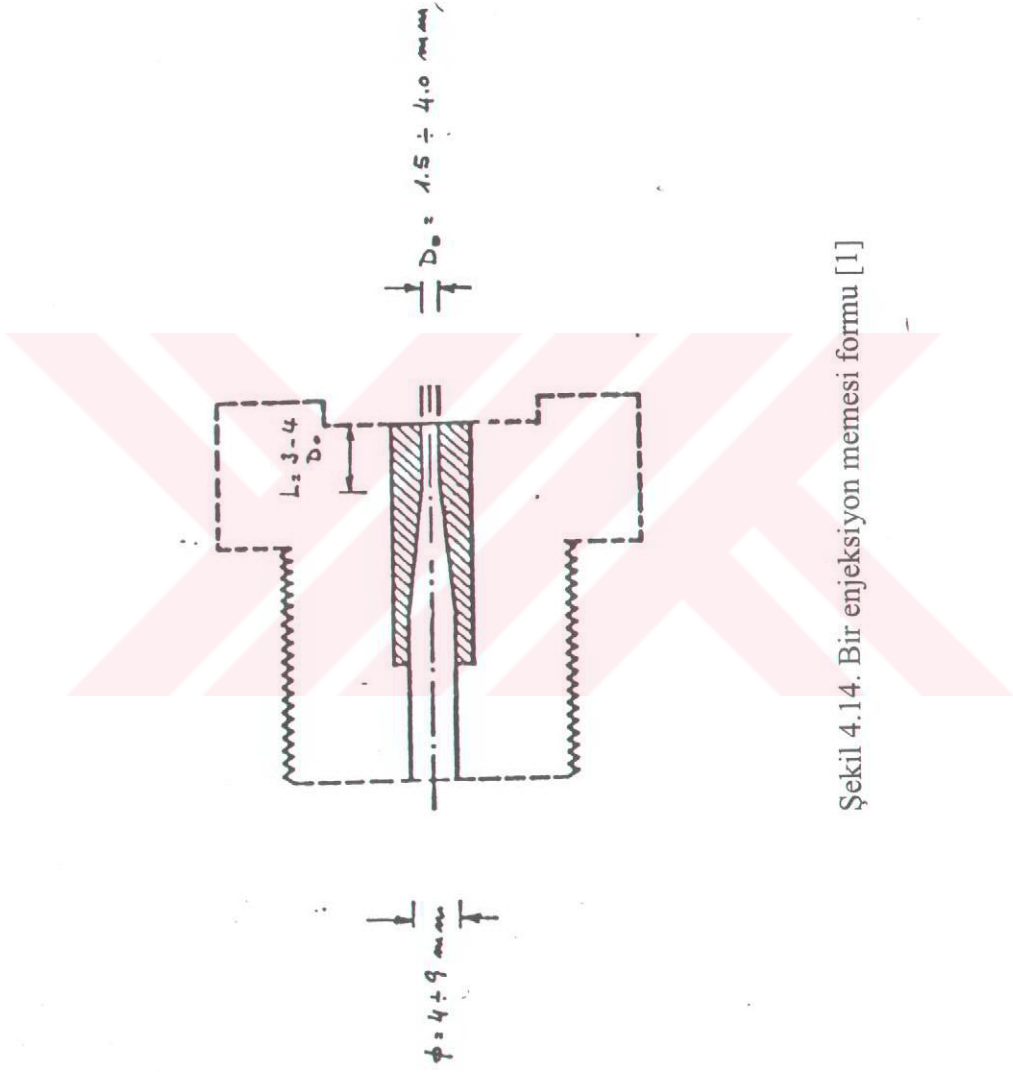
Jetgrout kolon mukavemeti su/çimento oranına bağlı olup iyileştirilmiş kum zeminin mukavemeti aynı dozaj ve hacimdeki enjeksiyon karışımı ile iyileştirilmiş kil zeminin mukavemetinden çok daha fazladır.

4.5.4. Püskürtme Memeleri

Püskürtme memesine verilecek geometrik form, enjeksiyon şerbetinin girdiği ve püskürtüldüğü delik çapları, transfer kanalı boyları bu memelerin kullanımına etkileyen faktörlerdir. Aşınma oranı fazla olan püskürtme memeleri bugün için sert çelikten yapılmakta olup, delik çapları 1.5 mm ile 8.0 mm arasında değişmektedir. Şekil 4.14’de bir enjeksiyon memesi formu verilmektedir [1,16].

Enjeksiyon tijinin ucuna yerleştirilen ve monitör adı verilen parça üzerinde yeralan püskürtme memeleri kullanılacak jet sayısına uygun (tekli, ikili, üçlü jet) 1 den 4’e kadar değişmektedir. Enjeksiyon memesi çapı küçüldükçe karışımın enjeksiyon memesinden dağılımı artmaktadır. Az sayıda enjeksiyon memesi kullanıldığında enerji kaybı da az olmaktadır. Tekli sistemde bir ya da iki enjeksiyon memesi kullanılırken ikili sistemde bu sayı genellikle birdir. Enjeksiyon memesi sayısı pompa ünitesinin kapasitesine de bağlıdır [1,4,16].

Enjeksiyon basınç değerleri ve diğer çalışma parametreleri değişik jetgrouting yöntemleri için Tablo 4.4’de verilmektedir [16].



Şekil 4.14. Bir enjeksiyon memesi formu [1]

TABLO 4.4 - JETGROUTING ÇALIŞMA PARAMETRELERİ

PARAMETRELER		JETGROUTING TEKNİKLERİ		
		JET 1	JET 2	JET 3
ENJEKSİYON BASINCI				
SU	(bar)	ÖY (200-300)	ÖY (200-300)	300-500
ENJEKSİYON	(bar)	300-600	300-600	40-60
HAVA	(bar)	-	8-12	8-13
AKIŞ ORANLARI				
SU	(lit/dak)	ÖY	ÖY	70-100
ENJEKSİYON	(lit/dak)	60-150	100-150	150-250
HAVA	(lit/dak)	-	10-30 000	10-30 001
PÜSKÜRTME MEMESİ ÇAPLARI				
SU	(mm)	ÖY (1.6-2.4)	ÖY (1.6-2.4)	1.8-2.5
ENJEKSİYON	(mm)	1.6-3.0	2.0-4.0	3.5-6.0
PÜSKÜRTME MEMESİ SAYILARI				
SU	n.	ÖY (1)	ÖY (1)	1-2
ENJEKSİYON	n.	2-6	1-2	1
TİJİN DÖNME HIZI				
	(devir/dak)	10-30	10-30	10-30
TİJİN ÇEKİLME SÜRESİ / ADIM (4 cm)				
	sn	8-15	10-20	15-25
KOLON ÇAPI				
ÇAKILLI / KUMLU ZEMİNLER	(m)	0.6-1.0	1.0-2.0	1.5-2.5
KİLLİ ZEMİNLER	(m)	0.5-1.0	1.0-1.5	1.0-2.0
SU/ÇİMENTO ORANI (w/c)				
		0.8/1' den 2/1'e kadar		
TÜKETİLEN ÇİMENTO MİKTARI				
SLAH EDİLEN ZEMİN BİRİM HACM	(kg/m3)	400-800	400-800	400-800
ZEMİN-ÇİMENTO MUKAVEMETİ				
ÇAKILLI / KUMLU ZEMİNLER	(kg/cm2)	100-300	75-250	75-200
KİLLİ ZEMİNLER	(kg/cm2)	15-100	15-85	15-75
NOT : ÖY= ÖN YIKAMA				

5. ÇEŞİTLİ ZEMİNLERDE JETGROUT KOLONLARININ YAPILIŞI

Jetgrouting yöntemi ile zemin iyileştirilmesinin başarısı uygulanacak parametrelerin dikkatli olarak seçimine bağlıdır. Uygulanan ıslah işlemi sırasında kullanılan basınç değeri ve enjeksiyon süresi, zeminin mukavemetine bağlıdır. Aşağıda farklı iki zemin cinsi için en sık karşılaşılan durumlar özetlenmektedir:

KİL : Düzgün ve sürekli bir yapı elde etmek için küçük çaplı enjeksiyon memeleri kullanılmalıdır. Çapları 1.6mm ila 2.0mm arasında değişen en fazla iki (2) enjeksiyon memesi kullanılmaktadır. Kil zeminlerde yüksek basınç sebebiyle sıklıkla meydana gelen kırılma ve kabarmaları önlemek amacıyla yüksek basınç (500-600 bar) ve enjeksiyon malzemesi miktarı azaltılmalıdır [16]. Kesilen zemin muhtelif sebeplerden dolayı enjeksiyon forajını tıkar ve fazla gelen zeminin dışarı atılmasına engel olabilir. Bu halde zeminde basınç altında bulunan bir ortam yaratılmış demektir. Enjeksiyona devam edilmesi halinde artan basınçla enjeksiyon kuyusu içinde bulunan enjeksiyon bulamacı çevrede bulunan zemini hidrolik pistonlar misali enjeksiyon borusu istikametinde iterek yüzeyde kabarmalar halinde kendini gösteren çatlama ve kırılmalara sebep olur. Bu arada radyal istikamette oluşan çatlaklar da enjeksiyon malzemesi ile doldurulmuş olur [1].

Sistemin bu zayıf zeminlerdeki çatlakları da bulup doldurabilme özelliğinden geçirimsizlik aranan enjeksiyonlarda geniş çapta kullanılmaktadır. Genelde arzu edilmeyen ve özellikle kaçılması gereken bu kabarmalar zamanında önlem alınmazsa desimetreler seviyesine çıkmaktadır. Ancak bu kabarmalar oturmuş temellerin düzeltilmesi gibi olumlu yönde de kullanılabilir.

İyileştirme işlemi zor ise (konsolide killer), sadece bir enjeksiyon memesi kullanılmalıdır. Böylece yüksek basınç (600 bar) altında meydana gelen enerji kayıpları kontrol edilebilmektedir. Bu durumda, enjeksiyon yapımı yavaş ve enjekte

edilen karışım miktarı çok az olmalıdır. Bu çeşit zeminlerde 250-300 barlık su enjeksiyonu ile ön yıkama kil zemini gevşettiği için önerilmektedir [16].

ÇAKIL : Genellikle granüler zeminlerde kullanılan çalışma parametreleri kil zeminlerde kullanılanlardan farklıdır. Enjeksiyon basıncı 400-500 bar arasında değişmektedir. Enjeksiyon memesi çapları 2.5-3.0 mm arasında değişmekte olup bu zeminlere daha fazla miktarda karışım enjekte edilebilmektedir. Çakıl zemin içerisinde gerçekleştirilen jetgrout kolonu Şekil 5.1’de verilmektedir [24].

Aşağıdaki hususların çeşitli enjeksiyon sistemlerine uyarlanması gerekmektedir [16]:

Jet1: Genelde bir veya iki enjeksiyon memesi kullanılmaktadır. Daha az sayıda enjeksiyon memesi kullanıldığında enerji kaybının daha az olması sebebiyle eşit ıslah alanları oluşmaktadır. Daha küçük çaplı enjeksiyon memeleri kullanıldığında enerjide meydana gelen kayıp, enjeksiyonun, enjeksiyon memelerinden çıkışını ve etrafa yayılımını etkilemektedir. Enjeksiyon memesi çapları büyüdüğünde enjeksiyonun etrafa yayılımında azalma meydana gelir.

Jet2: Çoğunlukla bir enjeksiyon memesi kullanılmaktadır. Çünkü iki enjeksiyon memesi kullanıldığında hava bu iki enjeksiyon memelerinin birinden çıkabilir ve operatör bu durumun farkında olmayabilir. Bu durumda zemin ıslahı gerektiği gibi yapılamayabilir. Bu yöntemde kullanılan enjeksiyon memesi çapları Jet1 yöntemine göre daha büyüktür. Çap boyutları 2.5mm ila 4.5mm arasında değişmektedir.

Jet3 : Jet2’deki hususlar bu yöntem için de geçerlidir.



Şekil 5.1. Çakıl zeminde gerçekleştirilen jetgrout kolonu [23]

6. İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Jetgrout kolonunun özellikleri enjeksiyon karışımına, kolon yapısındaki çimento miktarına ve uygulanan sisteme bağlıdır [4].

1- Kesici jet tesiri bulunduğu zemin cinsine, zeminin sıkılığına, kıvamına, enjeksiyon tijinin devir sayısına, çekme hızına, basınca v.s. bağlı olduğundan (Şekil 6.1) bu parametrelerin uygun kullanılması halinde kumlu zeminlerde 0.6 m ile 2.0 m arasında değişik çaplı enjeksiyonlu kolonlar elde edilebilir [1].

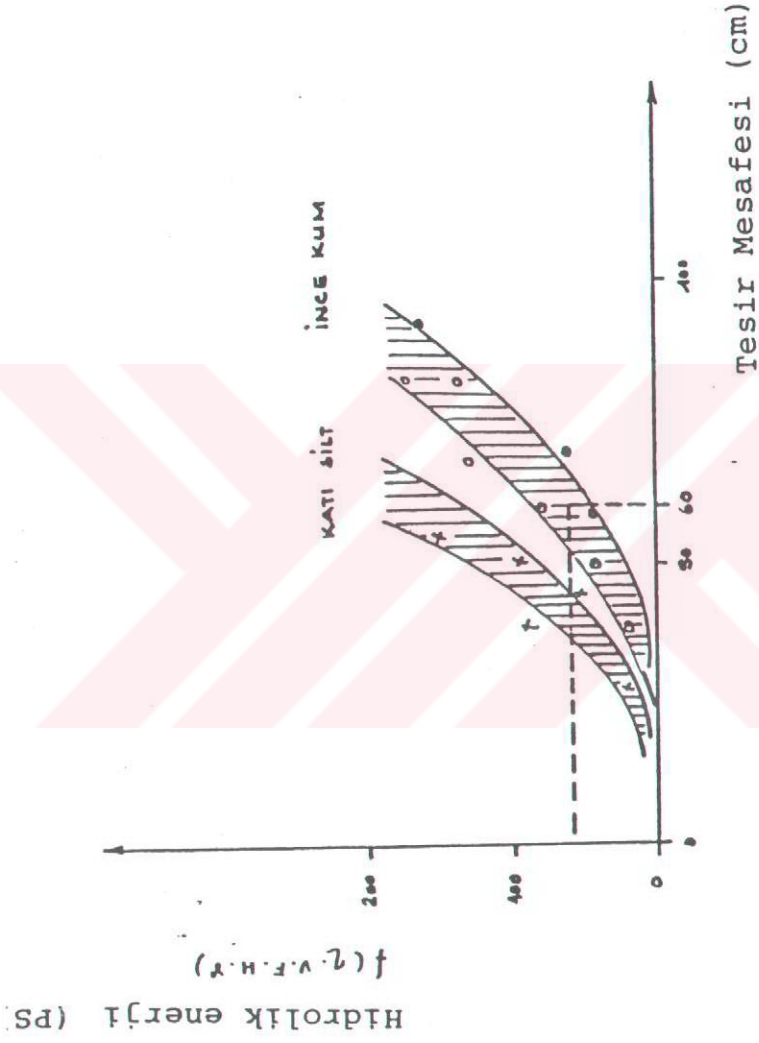
2- Enjeksiyon tijini döndürmeden düşey istikamette hareketi ile kalınlığı 12 cm ile 2 cm kadar değişen perde duvarları 4 ile 6 m'ye kadar uzanmaktadırlar.

3- Tatbik edilmiş enjeksiyon kolonlarından alınan numuneler üzerinde yapılan permeabilite deneyleri sonucu permeabilite katsayısı değişik zemin türleri için Tablo 6.1'de verilmektedir [7].

Tablo 6.1. Zemin Türleri ve Beklenen Permeabilite Katsayısı Değerleri

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

4- Yüksek Basıncılı Enjeksiyon metodunda mevcut zeminin bir kısmı enjekte edilen çimento bulamacı ile karıştığından sonuç olarak elde edilen malzemenin serbest basınç mukavemeti genel olarak bu zeminin cinsine de bağlıdır. Basınç mukavemeti, kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde laboratuvarında yapılan serbest basınç



Şekil 6.1. Zemin, püskürtme enerjisi ve tesis mesafesi arasındaki bağıntı [1]

mukavemeti deneyi ile doğrudan belirlenebilmektedir. İyileştirilmiş zeminin basınç mukavemetindeki artış miktarı Şekil 6.2’de verilmektedir [4].

Yüksek mukavemet değeri su/çimento oranı 0.6 ila 0.8 arasında iken daha düşük mukavemet değeri ise su/çimento oranı 1.0’in üzerinde iken elde edilmektedir [7].

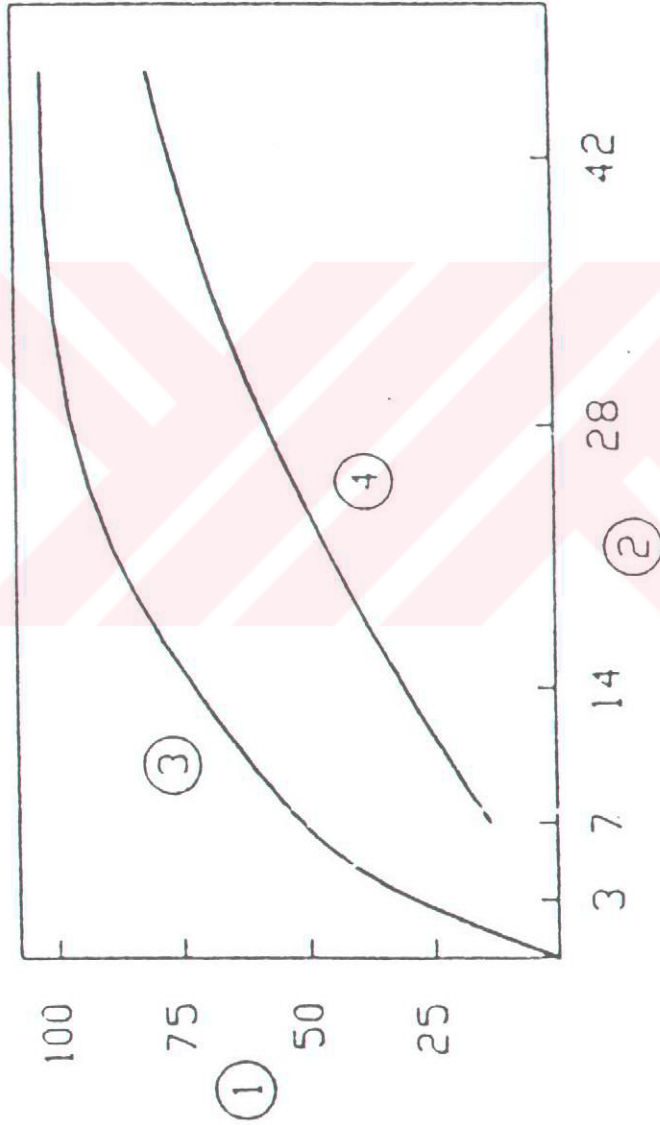
Jetgrouting metodu, ile su/çimento=1 ve 450 kg/m^3 dozajında çimento kullanılarak çeşitli uygulamalarda elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değerleri aşağıda Tablo 6.2’da verilmektedir [16]:

Tablo 6.2. Çeşitli Uygulamalarda Elde Edilen Zemin Taşıma Gücü Ortalama Değerleri

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

Organik zeminlerde m^3 başına kullanılan çimento miktarı 450 kg ’dan $600-700 \text{ kg}$ ’a yükseltilebilir. Bunun sebebi organik zeminler içerisinde bulunan ve çimentonun bağlayıcı etkilerini azaltan humik asidi nötralize etmektir [16].

Aynı çimento miktarı ve su/çimento oranı ile Jet2 yöntemi uygulanarak elde edilen kolonların taşıma gücü Jet1 yöntemi ile elde edilen kolonların taşıma gücünden %10-15 daha az olmaktadır(basınçlı havanın etkisi). Aynı dozajlar uygulandığında Jet3 yöntemiyle elde edilen kolonların taşıma gücü değerlerinin diğer yöntemlerden elde edilen kolonların taşıma gücü değerlerinden az olmasının sebebi ise Jet3 metodu uygulanırken fazla miktarda su kullanılmasıdır [16].

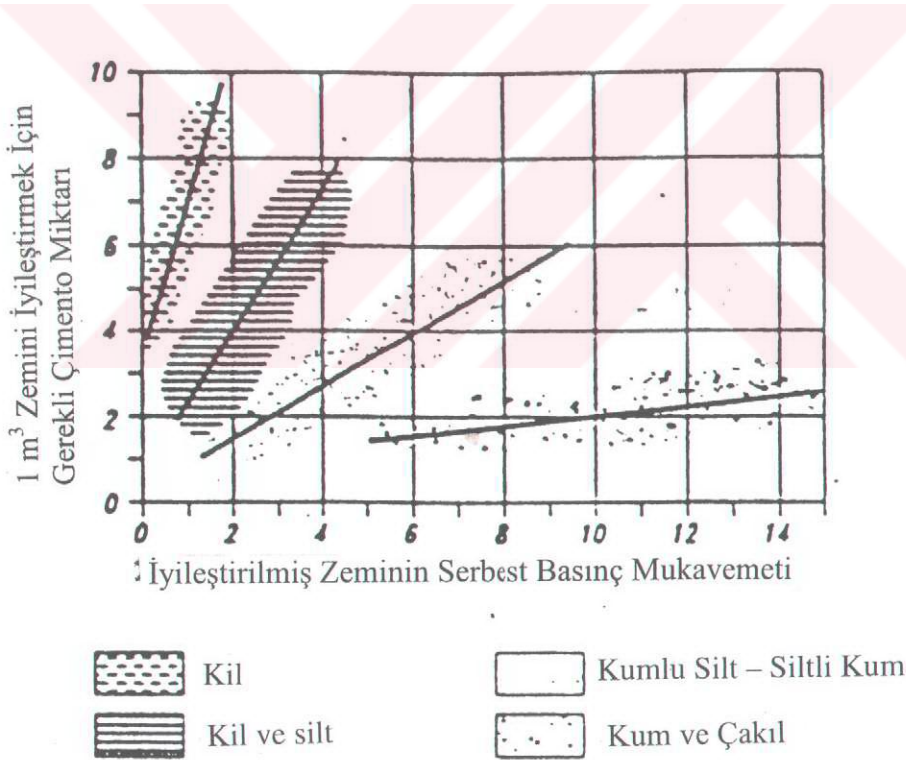


- 1) B. artış %'si
- 2) Sertleşme süresi
- 3) Kohezyonsuz zeminler
- 4) Kohezyonlu zeminler

Şekil 6.2. İyileştirilmiş zeminin basınç mukavemetindeki artış miktarı [4]

Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi Şekil 6.3’de verilmektedir. Şekil 6.3’de görüldüğü gibi kil zeminde çakıldan daha fazla miktarda çimento gereklidir. Ancak, elde edilen mukavemet kilde daha az olmaktadır [16].

5- Jetgrout yönteminin bir başka dolaylı etkisi de ıslah edilen zeminde elde edilen SPT/N değerlerinin doğal zemin şartlarında elde edilen SPT/N değerlerinden %20-25 oranında fazla olmasıdır. Bu yöntemde, diğer enjeksiyon yöntemlerinin tersine, yüksek basınçla enjeksiyon yapılmasına rağmen yalnızca ıslah edilen hacim içerisinde 0.5-1 bar mertebesinde bir basınç artışı meydana gelmektedir.



Şekil 6.3. Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi [16]

7. JETGROUTING YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI LİMİTLERİ ve UYGULAMADA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

7.1. Jetgrouting Yönteminin Avantajları

Jetgrouting yönteminin avantajları aşağıda maddeler halinde verilmektedir [1,17]:

- Yaklaşık olarak her tür zeminde uygulanabilen enjeksiyon metodudur.
- Diğer inşaat metodlarına kıyasla daha hafif ve küçük ekipmanla gerçekleştirilebilir.
- Küçük boyutlu makinaların mevcut binaların bodrum katından veya iki bitişik bina arasındaki dar sahadan enjeksiyon işini gerçekleştirebilmeleri mümkün olmaktadır.
- Çimento, bentonit ve su karışımı kullanıldığı için kimyevi enjeksiyonlar gibi çevre kirlenmesi yapmaz.
- Önceden belirlenebilecek geometrik ölçüler çerçevesinde uygulanacağından ötürü malzeme sarfıyatı büyük yaklaşımla önceden hesaplanabilir.
- Delinen küçük çaplı (10 cm) delgi deliğinden başlayarak geniş çaplı (50-300 cm) kolonlar elde etmek mümkündür.
- İstenilen derinlikten başlatılıp zemin yüzeyi altında istenilen derinlikte bitirilebilir.
- Diğer alternatif metodlara göre daha hızlı ve daha güvenlidir.
- İstenilen mukavemet ve permeabilite tasarlanabilir.
- Zararlı vibrasyon etkisi yaratmadığı için hassas ve tarihi yapılar yakınında uygulanabilir.

7.2. Jetgrouting Yönteminin Limitleri

Jetgrouting yönteminin limitleri aşağıda maddeler halinde verilmektedir [17]:

- Zemin cinsine göre aşırı çimento tüketimi gözlemlenebilir.
- Zemin cinsine göre kolon çapları istenildiğinden farklı olabilir. Bunun için ön kontrol çok önemlidir.
- Çok yüksek basınç zeminde çatlak ve kırıklara sebep olabilir. Bunun sonucunda da zeminin taşıma gücünde düşüş olabilmekte ve komşu yapılarda bazı oturmalar gözlemlenmektedir.
- İkili ve üçlü sistem için daha kompleks parçalar gerekli olup sıklıkla yenilenmesinin gerekli olması halinde beklenenden daha pahalı olabilir.

7.3. Uygulamada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Jetgrouting yönteminin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir [1].

- Bu konuda yetişmiş tecrübeli personel kullanılmalı, geniş emniyet tedbirleri alınmalıdır.
- Yüksek basınçla çalışırken püskürtme memelerinin tıkanmalarını önleyici tedbirler alınarak enjeksiyon hortumlarının patlamasının önüne geçilmelidir.
- Aşınmanın yüksek oluşundan dolayı tamir ve bakım süresi mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.
- Enjeksiyon sırasında uygulanan basıncın kontrollu olarak ortadan kaldırılabilmesi sağlanarak zeminde arzu edilmeyen kabarma, çatlama ve kırılmaların önüne geçilmelidir.
- Mutlak surette yapılması gereken periodik bakım bilhassa pompanın temizliği ile yedek parça sarfiyatının minimum tutulması gereklidir.

8. JETGROUTİNG YÖNTEMİNİN TASARIM ESASLARI

Jetgrouting yönteminde tek ve kesin bir hesap yöntemi oluşturmak zordur fakat gerçekleştirilen birçok uygulama ve bu uygulamalardan elde edilen tecrübeler sonucunda hesap yöntemi için bazı öneriler geliştirilmiştir.

Teorik ve ampirik uygulamalar içeren birçok hesap yöntemi jetgrouting tasarımına uyarlanmıştır. Sonuçta, tasarı yöntemi tasarımcının kişisel tecrübelerinden gelen bilgilerine bağlı olup diğer taraftan iyi, güvenli ve gerçekçi tasarım derin çalışma yöntemi bilgisi ve yöntemin uygulanabilirliği ile sağlanabilmektedir.

İlk aşamada, tasarımdan önce yapılması gerekenler [16] :

- Zemin hakkında elde edilebilecek tüm verilerin toplanması : detaylı zemin profili ve hidrojeolojik bilgiler, SPT ve CPT gibi zeminin kıvamı veya sıklığı hakkında bilgi veren arazi deneyleri, zeminden alınan temsili ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri [4],
- Zeminin mekanik olarak modellenmesi,
- Yükleme koşullarının seçimi,
- Yüklerin hesaplanması,
- Malzemelerin seçimi.

Bu aşamadan sonra tasarımcı jetgrouting yönteminin zemin iyileştirme veya yapısal eleman olarak kullanılmasına karar vermelidir. İkinci aşamada :

- Zemin cinsi ve parametreleri,
- Enjeksiyon özellikleri,
- Zemin-enjeksiyon karışımları,

- Çelik donatı, tip ve geometrisi,
- Katkı malzemeleri

düşünülmelidir. Son olarak, jetgrouting sistemi ihtiyaçlara cevap verecek şekilde teknolojiye uygun olarak seçilmelidir.

8.1. Jetgrout Kolon Hesabı

Jetgrouting yönteminde düşey tekil elemanlar kazık gibi düşünülerek hesaplamalar gerçekleştirilmelidir. Kolonlar, yapısal yükleri zeminin zayıf veya yumuşak tabakalarından geçirerek daha derinlerdeki taşıyıcı tabakalara aktarmak amacıyla kullanılmaktadır [16].

Jetgrout kolonunun taşıma kapasitesi kazıklarda olduğu gibi belirlenmektedir. Jetgrout kolonunun azami taşıma kapasitesi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [16]:

$$q_u = q_{uç} + q_s \quad (8.1)$$

Efektif gerilme(uzun süreli):

$$q_u = A_b \cdot Q_b + \pi \cdot D_a \int_{l_1}^{l_2} \gamma \cdot z \cdot K_s \cdot \tan \delta \cdot dz \quad (8.2)$$

Toplam gerilme (kohezyonlu zeminlerde kısa süreli):

$$q_u = A_b \cdot Q_b + \pi \cdot D_a \int_{l_1}^{l_2} \alpha \cdot c_u \cdot dz \quad (8.3)$$

Formülde:

A_b : Kolon kesit alanı

Q_b : $(1+2K_0)/3 \cdot \sigma_{vo} \cdot N_q^* \cdot \xi$ (kumlarda)

Q_b : $9 \cdot c_u$ (kohezyonlu zeminlerde)

D_a : Ortalama çap

N_q^* : Taşıma gücü faktörü, derin temeller için

σ_{vo} : Düşey basınç

γ : Zeminin yağ birim hacim ağırlığı

K_0 : Yatay toprak basıncı katsayısı, sükünette

K_s : Yatay yatak katsayısı

δ : Zemin-kolon sürtünme açısı

α : Adezyon için azaltma faktörü

c_u : drenajsız kayma mukavemeti

z : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik

ξ : Kolon uç mukavemeti azaltma faktörü

Jetgrouting yöntemi sonucunda stabilize kolon çevresindeki zemin az ya da çok sıkışmış olabilmekte, diğer taraftan Şekil 8.1’de görüldüğü gibi jetgrout kolon kesiti derinlik boyunca üniform olmamaktadır [16].

Jetgrout kolonu çevresinde oluşabilecek muhtemel kayma yüzeyi Şekil 8.2’de verilmektedir.

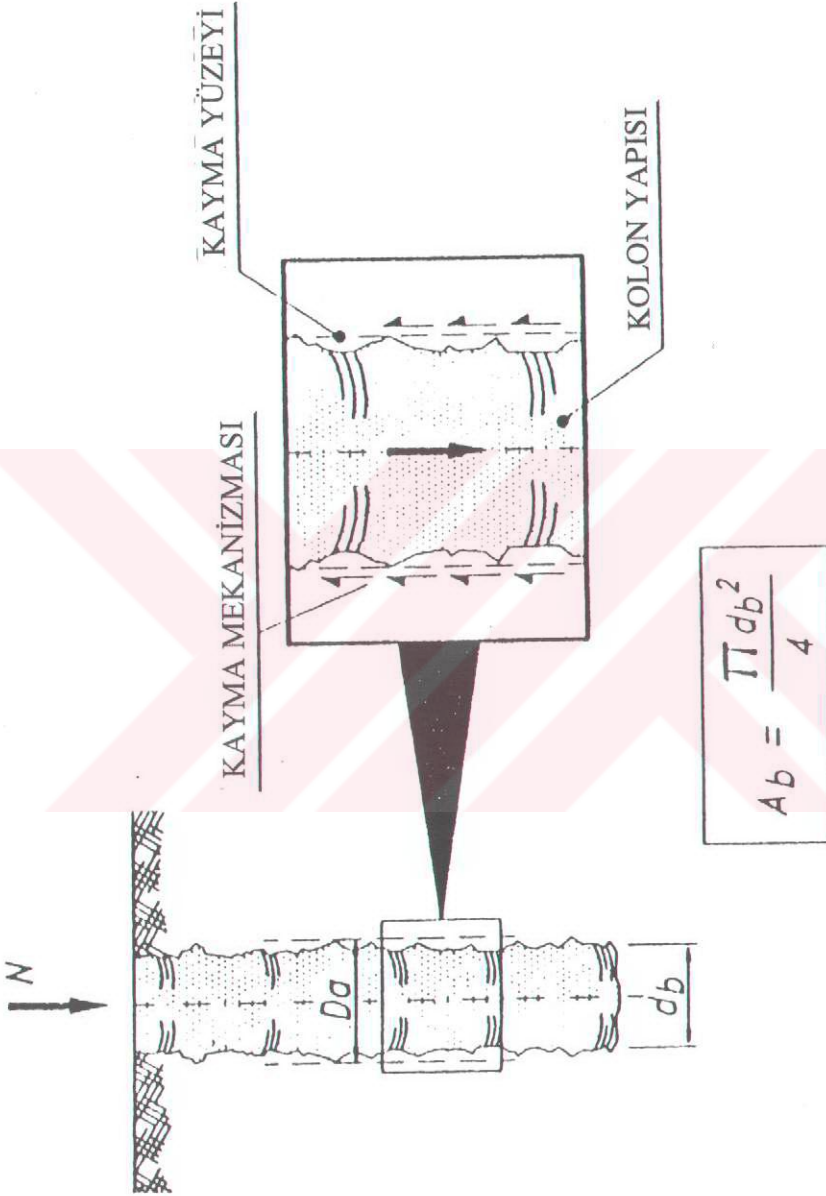
Bu mekanizmadan hareketle aşağıdaki kriterler oluşur [16]:

a) Kohezyonlu zeminlerde : $\alpha = 1$ normal konsolide zeminler,

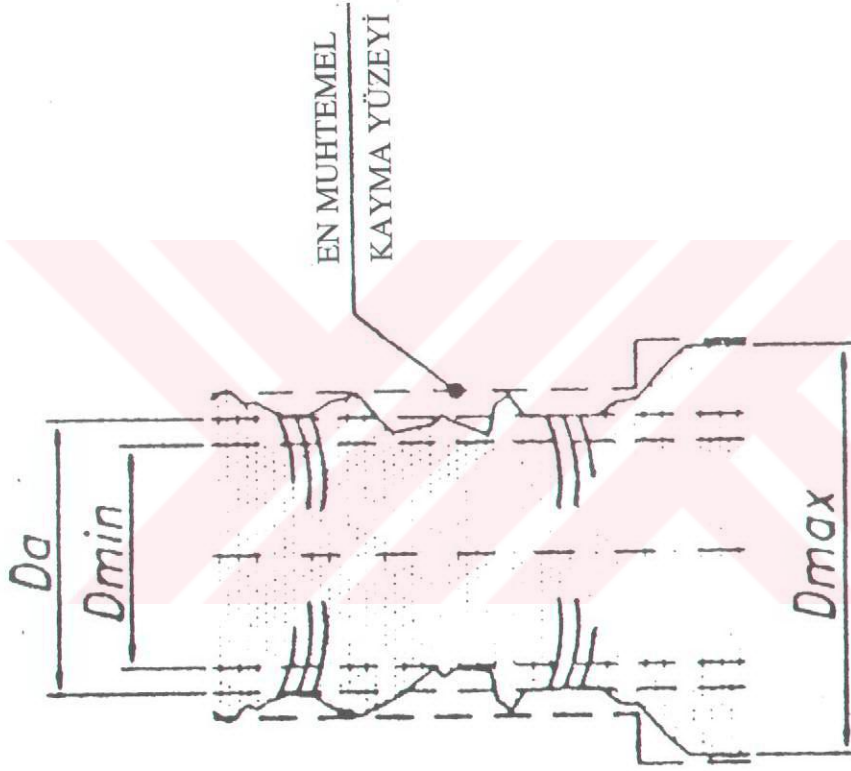
$\alpha = 0.45$ aşırı konsolide zeminler

b) Granüler zeminler : $K_s > 1$

Kolon ortalama çapının (D_a) güvenlik sınırları içerisinde kalması için dikkatli bir şekilde tayin edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, kayma silindirisinin gerçek çapı tahmin edilenden daha büyük olmaktadır.



Şekil 8.1. Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonunun davranışı [16]



Şekil 8.2. Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonu çevresinde oluşabilecek muhtemel kayma yüzeyi [16]

Kayma mukavemeti, killi zeminlerde 4 Mpa'dan, kumlu zeminlerde de 12 Mpa'dan daha büyük olarak elde edilebilmektedir. Ön yıkama tekniği ile özellikle killerde daha yüksek değerler elde edilebilmektedir.

Jetgrout kolon tasarımında granüler ve kohezyonlu zeminler için kullanılan limit değerler Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de verilmektedir.

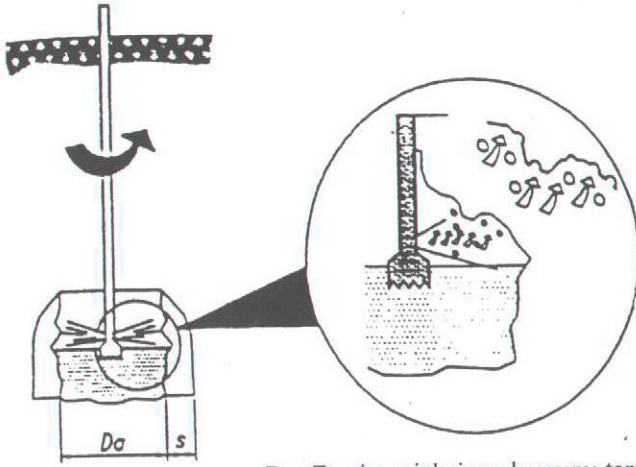
Tablo 8.1. Jetgrout Kolon Tasarımında Granüler Zeminlerde Kullanılan Limit Değerler [16]

Yapılış Tipi	Çeper sürtünmesi için azaltma faktörleri		Birim çeper sürtünmesi limit değeri	Uç mukavemeti azaltma faktörleri	Birim uç mukavemeti limit değeri
Fore kazık	0.6	0.50-0.65	100-200	0.33-0.50	4.5
Çakma kazık (açık uç)	2/3	0.65-0.95	120	0.7-0.8	12
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75	1.0-1.5	120-180	1.0	15
Jetgrouting	1.0	1.0-2.0	>180	1.0	Kolon direnci

Tablo 8.2. Jetgrout Kolon Tasarımında Kohezyonlu Zeminlerde Kullanılan Limit Değerler [16]

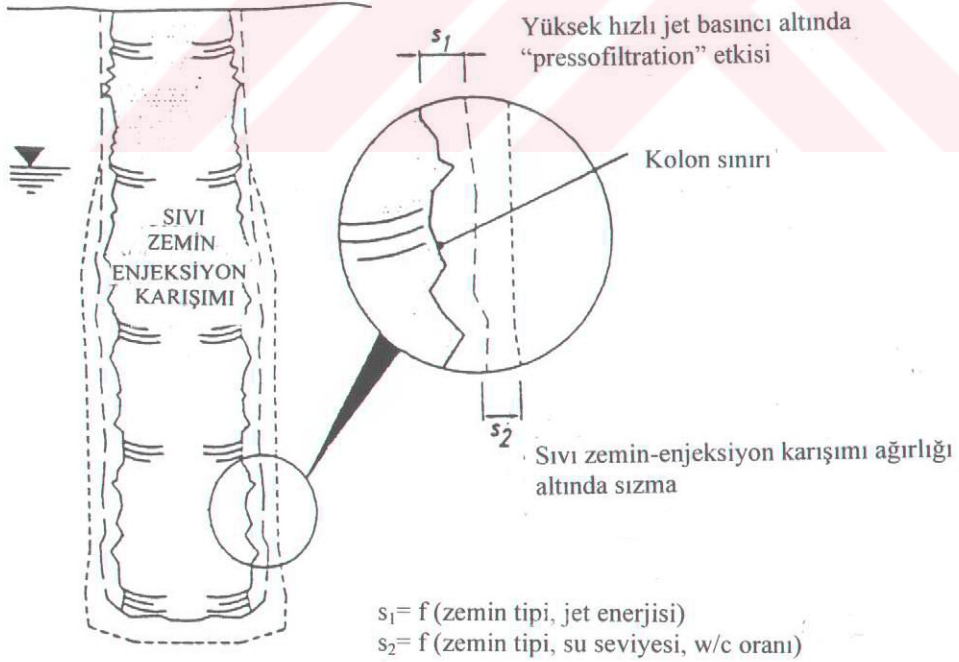
Yapılış Tipi	Çeper sürtünmesi için azaltma faktörleri		Birim çeper sürtünmesi limit değeri	Uç mukavemeti azaltma faktörleri	Birim uç mukavemeti limit değeri
	α	α	τ (kPa)	ξ	σ (Mpa)
Fore kazık	0.6	0.9	275	0.66	4.0
Çakma kazık (açık uç) (e: dış, i: iç)	0.95 e 0.80 i	0.40 e 0.35 i	200	0.70	1.5
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75	0.45	200	0.80	5.0
Jetgrouting	1.0	0.45	280	1.00	Kolon direnci

Jetgrouting uygulamasının mekanizması Şekil 8.3'de verilmektedir.



D_a =Zemin-enjeksiyon karışımı tarafından örselenen malzeme yapısı (tamamen ıslah edilmiş)

s = "Pressofiltration" işleminin etkidiği dairevi kısmın kalınlığı



Şekil 8.3. Jetgrouting uygulamasının mekanizması [16]

9. UYGULAMANIN BAŞARISINI BELİRLEYEN DEĞİŞKENLER

İmal edilen jetgrout kolonların ve iyileştirilen zeminin istenilen proje kriterlerini sağlaması için yapılan uygulamanın kontrolü çok önemlidir. Kalite kontrol işleri uygulamanın başarısını belirlemektedir [7].

Jetgrouting yönteminin değişik zeminlerdeki fizibilitesi ve yapı temellerinin stabilizasyonuna uygunluğunu belirlemek için deneme sahası önerilmektedir. Deneme sahaları, arazi deneylerinin jetgrouting uygulaması için gerekli verilerin elde edilmesinde yeterli olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Deneme sahasında teşkil edilen jetgrouting kolonlar üzerinde yapılan kontrol ve deney sonuçlarına göre sözkonusu sahada sistematik olarak jetgrouting uygulaması gerçekleştirilir. Deneme sahaları farklı testlerin uygulanması amacıyla bölümlere ayrılabilir. Bazı bölümlerde yapım prosedürünün teşkili ve kontrolüne yönelik deneyler gerçekleştirilirken bazı bölümlerde de çekme ve yükleme deneyleri gerçekleştirilebilir. Şekil 9.1’de tipik bir deneme sahası görülmektedir [25]. Deneme sahasının amacı, projenin büyüklüğü ve/veya karmaşıklığı ve çalışma parametrelerinin önceden belirlenmesindeki zorluklara bağlı olarak gözlemler ve deneyler yapılmasıdır.

İmal edilen jetgrout kolonlarının yeterli olup olmadıklarına belirli değişkenlerin değerlerinin ölçülmesi ile karar verilmektedir. Bu değişkenler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir [13].

9.1. Zemin Çimento Karışımının Kalitesi

İmal edilmiş jetgrout kolonundan Şekil 9.2’deki gibi alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerle birim hacim ağırlığı belirlenir [26]. Pratikte, zemin-çimento karışımının birim hacim ağırlığı, 16-22 kN/m³ arasında değişmektedir.



Şekil 9.1. Deneme sahası [25]



Şekil 9.2. Jetgrout kolonundan karot alınması [25]

Jetgrout kolonlarının yapımında kullanılacak çimento yeteri kadar ince daneli olmalı, “blain” değeri $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ dan daha büyük olmalıdır. Çimento/su oranının ağırlıkça 1/1 civarında olması yeterlidir.

Bazı zeminlerde harcın kuma özelliklerinin uygun duruma getirilmesi gerekir. Zeminin gereğinden fazla harca gereksinim gösterdiği bu gibi durumlarda harcın içine bentonit veya taş tozu katılır [13].

9.2. Yapılmış Kolonların Bütünlüğü ve Boyu

Kolonun malzeme kalitesini belirlemek amacıyla kolondan sürekli karot alınması, jetgrout kolonunun boyunun ve bütünlüğünün belirlenmesinde yararlı olur. Bu amaçla, yapımından 28 gün geçtikten sonra denetlenecek kolonun alt ucundan 0.5 m kalana kadar sürekli karot alınır.

Integrity test, kolon tepesinden başlayarak kesitteki düzensizliği ortaya çıkarabilir, eğer kolonda böyle bir düzensizlik bulunmuyor ise kolon boyu da bu yöntemle belirlenebilir.

Integrity test bir şok dalgasının kolon içerisine yayılması esasına dayanmaktadır. Bu deneyin sonuçlarını yorumlarken zemin-çimento malzemesinin özelliği, kolonun geometrisi, zemin ile kolon arasındaki yüzey ve zemin koşulları hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Karot alınarak denetlenen kolonların uzun eksenini boyunca açılan delikler daha sonra betonlanarak kapatılmalıdır(Şekil 9.2).

9.3. Kolon Çapı

Püskürtme enerjisi

$$(E) : (p.Q) / V \quad (9.1)$$

formülde;

p (MPa): püskürtülen harcın basıncı

$Q \text{ (m}^3/\text{sn)}$: harç debisi

$V \text{ (m/sn)}$: ağızlığın yukarı çekilme hızı

Herhangibir arazide yapılan uygulamada, uygulanacak maksimum basınç en az 3 deney yapılarak belirlenmelidir. Basınç gereğinden daha büyük olursa atık miktarı fazla olur ve zemin kabarması kontrol edilemez. Ayrıca aynı deneylerde uygun harç debisi, tijin yukarı çekiliş hızı ve kendi etrafında dönme hızının uygun değerleri belirlenmelidir.

Meydana gelen kolonların çap ve mekanik özellikleri 4 ana faktöre bağlıdır:

- zemin cinsi ve özellikleri,
- harcın birleşimi,
- püskürtme basıncı,
- delgi borusunun dönme ve yukarı çekilme hızı.

Zeminin kolon yapımı bakımından önemli özellikleri, dane çapı dağılımı, serbest basınç direnci, su muhtevası ve kıvam limitleridir.

Kolon çapının denetimi, Şekil 9.3 ve Şekil 9.4'de görüldüğü gibi deneme kolonları kazılarak kolonun ortaya çıkarılması ile yapılır [20].

Jetgrout kolonları yapılırken kolonlar çevresinde s^2 gibi bir alanda zemin, artan basınç nedeni ile sıkışır. Yanal basınç artımı bir süre sonra krip veya diğer nedenlerle bir miktar azalsa da zeminin birim hacim ağırlığındaki ve yanal gerilmesindeki kalıcı artış, kolon/zemin sürtünmesini başlangıç değerinin üstüne çıkarır. Kolon çevresinde kolon yarıçapı kadar uzaklıktaki zeminde bu sıkışmanın etkisi özellikle görülür. Sıkışmanın etkisi, kolon yapımından önce ve sonra yapılacak presiyometre ve CPT deneyleri ile belirlenebilir.



Şekil 9.3. Deneme kolonunun kazılarak ortaya çıkarılması [20]



Şekil 9.4. Jetgrout kolon çapı tahkiki [20]

9.4. Kolon Geçirimsizliği

Jetgrout kolonları geçirimsizlik sağlanması amacıyla yapılmışsa, zemin-çimento kalitesini denetlemek için açılan karot deliklerinde sabit seviyeli permeametre deneyi yapılabilir.

9.5. Zemin-Çimento Karışımının Mukavemeti

Jetgrout kolonlarından, yapımından en az 28 gün sonra alınan ve yükseklik/çap oranı en az iki olan karot numuneleri üzerinde serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü belirlenir. Zemin-çimento karışımının mukavemeti içerdiiğı çimento miktarına ve zemin cinsine bağlıdır.

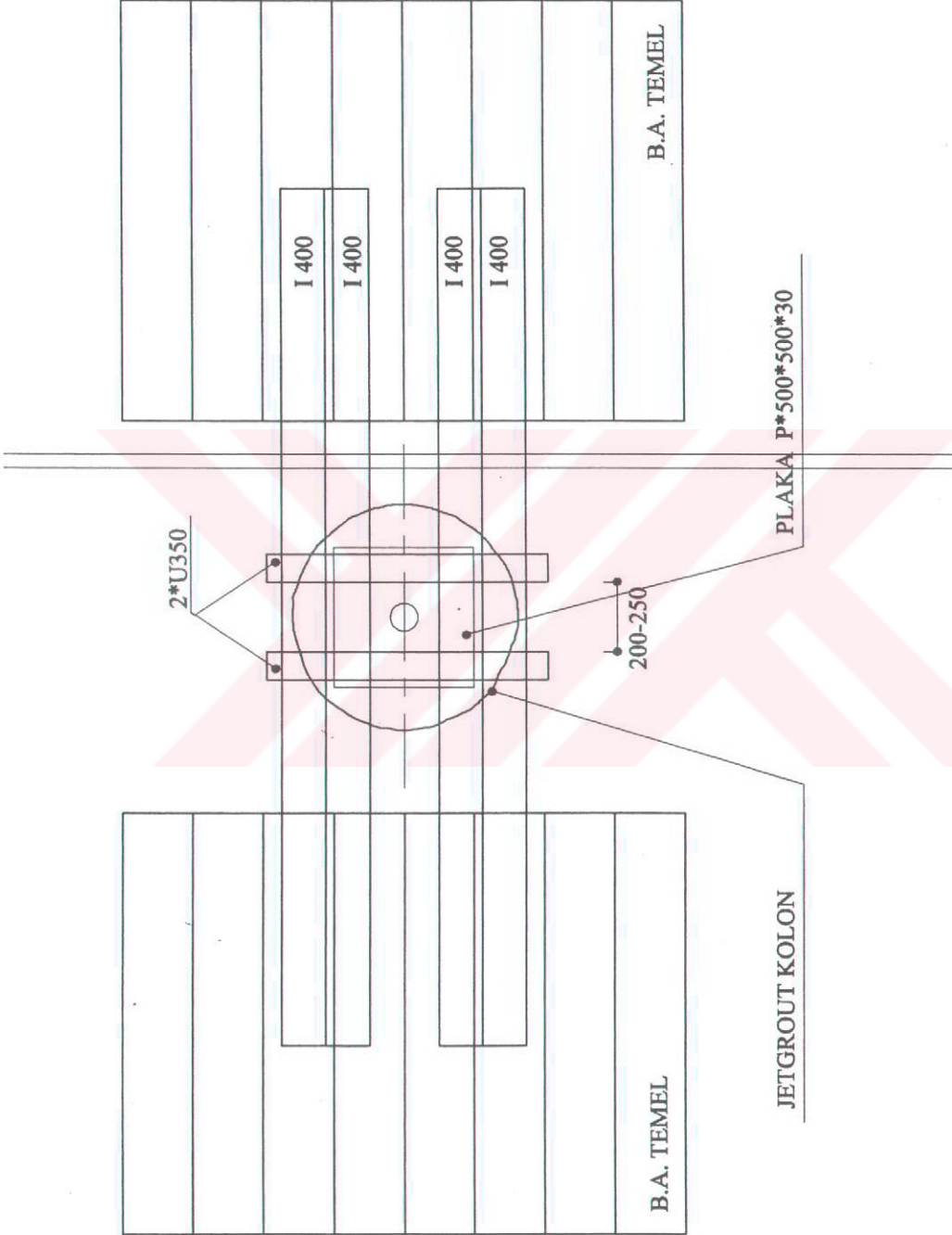
Tekli jet tekniği kullanılması halinde, daha fazla çimento harcandığı için, karışımın mukavemeti diğer tekniklere nazaran yüksek olur.

9.6. Kolonun Taşıma Gücü

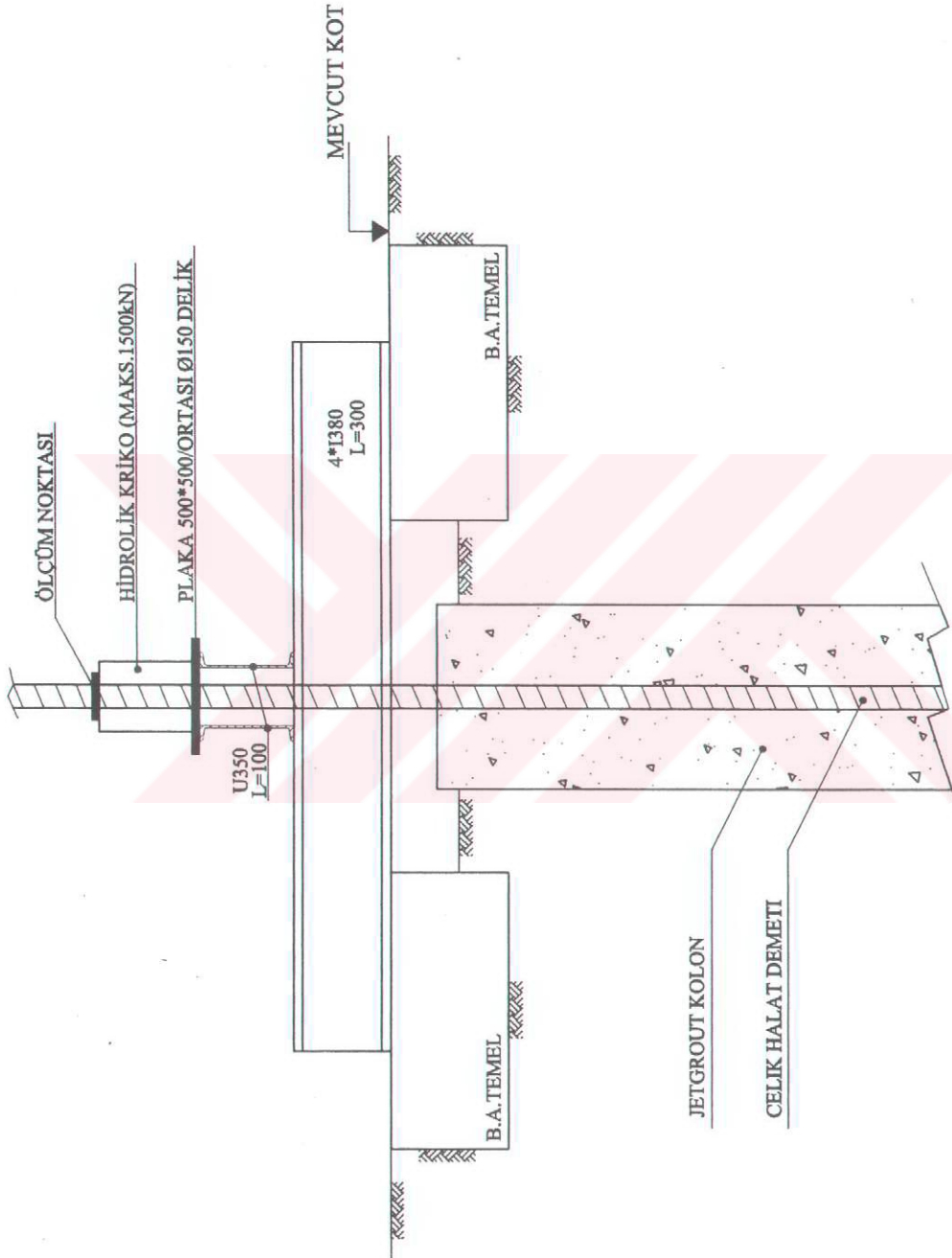
Jetgrout kolonlarından taşıyıcı elemanlar olarak yararlanılması söz konusu ise, bunlar üzerinde yükleme ve çekme deneyleri yapılır. Jetgrout kolonu üzerinde yapılan çekme deneyi, deney düzeneği planı Şekil 9.5, deney düzeneği kesiti Şekil 9.6, çekme deneyinin yapıldığı saha uygulaması Şekil 9.7’de gösterilmiştir.

Yükleme deneyleri, bilinen zemin koşulları veya yükleme şekillerine uymayan sistemlerde ve kolon imali sırasında, zemin incelemeleri veya sahaya ilişkin bilgi ve tecrübelerin yeterli olmadığı durumlarda kesinlikle yapılmalıdır.

Yükleme deneyleri, deneme kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyleri ve daha sonra kullanılacak kolonlar üzerinde yapılan kontrol deneyleri olarak iki gruba ayrılabilir. Birinci gruptaki deneyler, kolon imalinde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için imal edilen deneme kolonları üzerinde yapılır. Deneme kolonları, göçene kadar veya maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar yüklenir.



Şekil 9.5 Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzenneği planı



Şekil 9.6 Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzeneği kesiti



Şekil 9.7. Çekme deneyinin yapıldığı saha uygulaması [26]

Göçme yükü aşağıdaki tanımlara göre belirlenir:

- 1) yükün daha fazla artmadığı halde oturmanın devam etmesi halindeki yük ,
- 2) kolon çapının %10'u kadar bir toplam oturmaya yol açan yük,
- 3) kalıcı oturma eğrisinin eğiminin her 10 kN'luk deney yükü için 0.25 mm oturmaya eşit olduğu yük

Kontrol deneyleri, imal edilen kolonların yeterli olup olmadıklarının araştırılması amacıyla yapılır. Tatbik edilecek deney yükü, en az kolonun proje yükü kadar olmalı, tercihan bu yükün 1.5 katı olmalıdır.

Jetgrout kolonu üzerinde yapılan basınç deneyi, deney düzeneği planı Şekil 9.8, deney düzeneği kesiti Şekil 9.9, basınç deneyinin yapıldığı saha uygulaması Şekil 9.10'da gösterilmiştir.

9.7. Çeşitli

Enjeksiyon Malzemeleri:

Su : Ph, klorür, sertlik ve organik madde içeriği

Çimento: Dane boyu dağılımı, birim hacim ağırlığı

Karışım : Birim hacim ağırlığı, viskozite, basınç mukavemeti

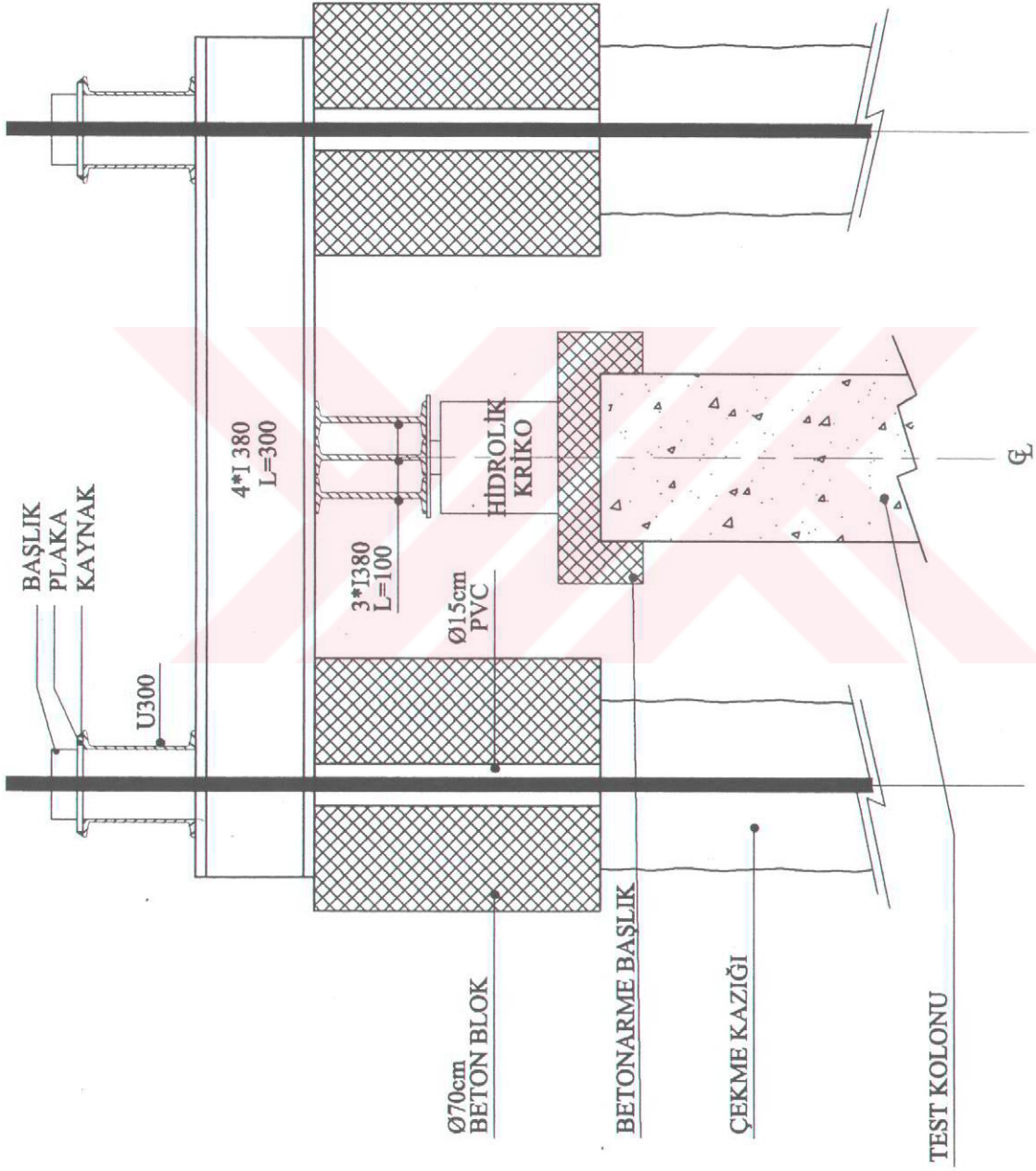
Süreklilik Gözlemleri:

Kolon imali sırasında basılan harcın kusması, çalışma koşullarında meydana gelen değişiklikler v.s. devamlı izlenmeli, kayda alınmalı ve nedenleri araştırılmalıdır.

Malzeme Kontrolü:

Her harç karışımı püskürtülmeden önce kontrol edilmeli ve çimento miktarı kaydedilmelidir.





Şekil 9.9 Jetgrout kolon üzerinde yapılan basınç deneyi düzenneği kesiti



Şekil 9.10. Basınç deneyinin yapıldığı saha uygulaması [26]

İmalat Bilgileri:

Kolonların imali ile ilgili bilgileri içeren bir form hazırlanmalıdır. Bu forma çalışma parametreleri (kolon boyu, çapı, dozaj, enjeksiyon hızı, v.s.) kaydedilmelidir.

Kullanılmayacak Kısımlar:

Zemin yüzüne kadar yükseltilen jetgrout kolonlarında, yüzeye yakın yaklaşık 50 cm'lik kısmı istenilen nitelikleri sağlamadığından kırılarak alınır. Gerekirse kolonun üst kısmı beton dökülerek düzeltilir.

Yapım Sırası:

Bir jetgrout kolonu yapımı tamamlandıktan sonra 2-3 gün geçmeden hemen yanındaki kolonun yapımına başlanılmamalıdır. Yüksek basınçlı püskürtme, pirizi tamamlanmamış kolonu tahrip edebilir. Bu bakımdan kolonların yapım sırası dikkatle programlanmalıdır.

10. JETGROUT YÖNTEMİ UYGULAMA ALANLARI

Jetgrouting yöntemi, çimento enjeksiyonu ile her türlü zeminde uygulanabilmekte olup inşaat ve çevre mühendisliğinde projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

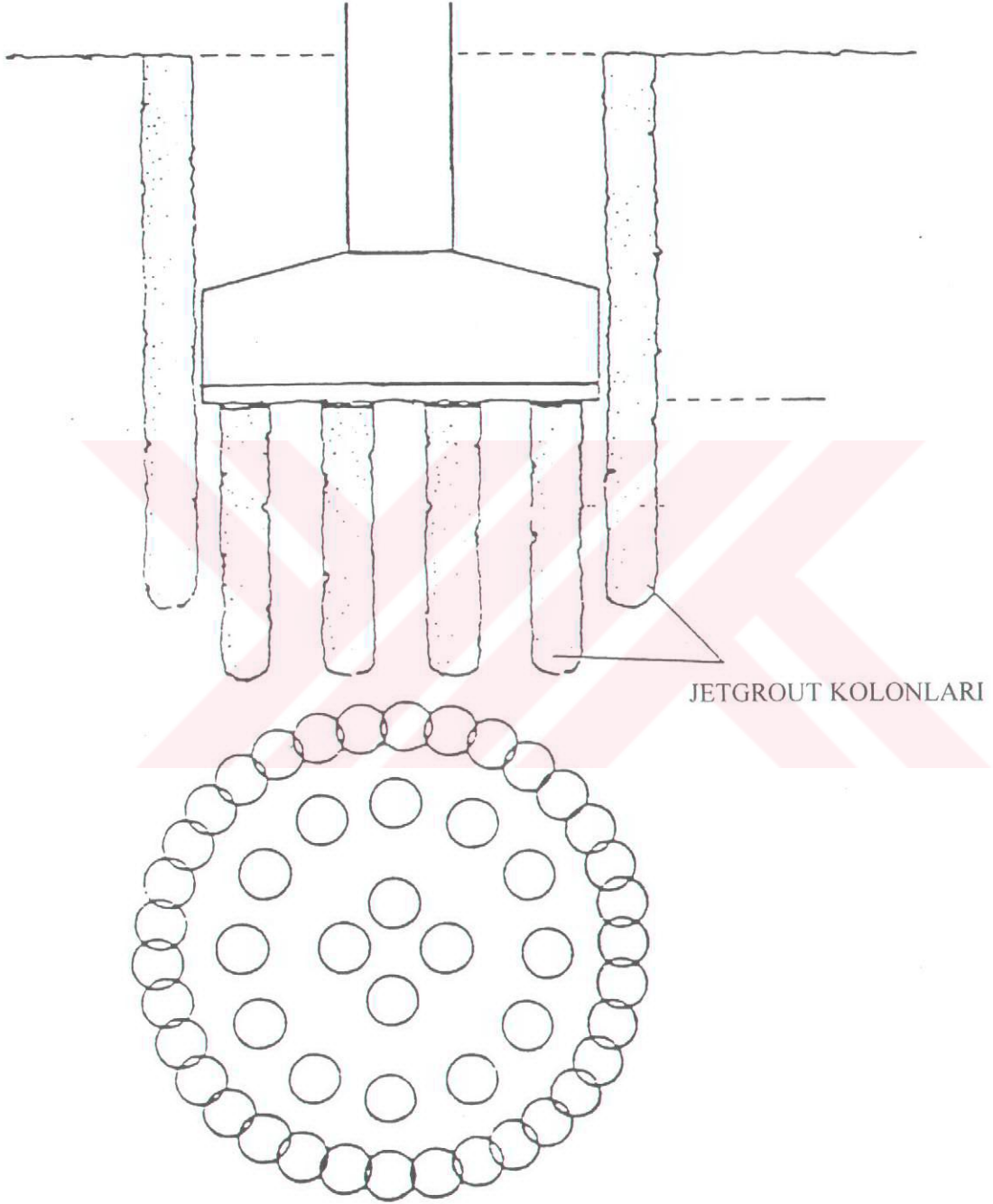
Jetgrouting yöntemi genellikle zemin iyileştirme amacıyla kullanılmakta olup teşkil edilen kolonlar taşıyıcı elemanlar olarak yük kapasitesine sahiptir. Gerçekleştirilen uygulamalar iyileştirme işleminin hedefine bağlı olarak geçici ya da kalıcı olabilmektedir. Tünellerde genellikle geçici olarak kullanılmakta olup oturma problemleri ve geçirimsizlik amaçlanan projelerde kalıcı olarak kullanılmaktadır.

Enjeksiyon tijinin sürekli döndürülmesi sonucu enjeksiyon kolonları, bu kolonların birbirine geçmeli/ bindirmeli olarak dizilmesi ile de masif enjeksiyon duvarları, enjeksiyon tijinin rotasyonsuz tutulması veya çok küçük bir açı ile döndürülmesi ile de enjeksiyon perdeleri imal etmek mümkündür.

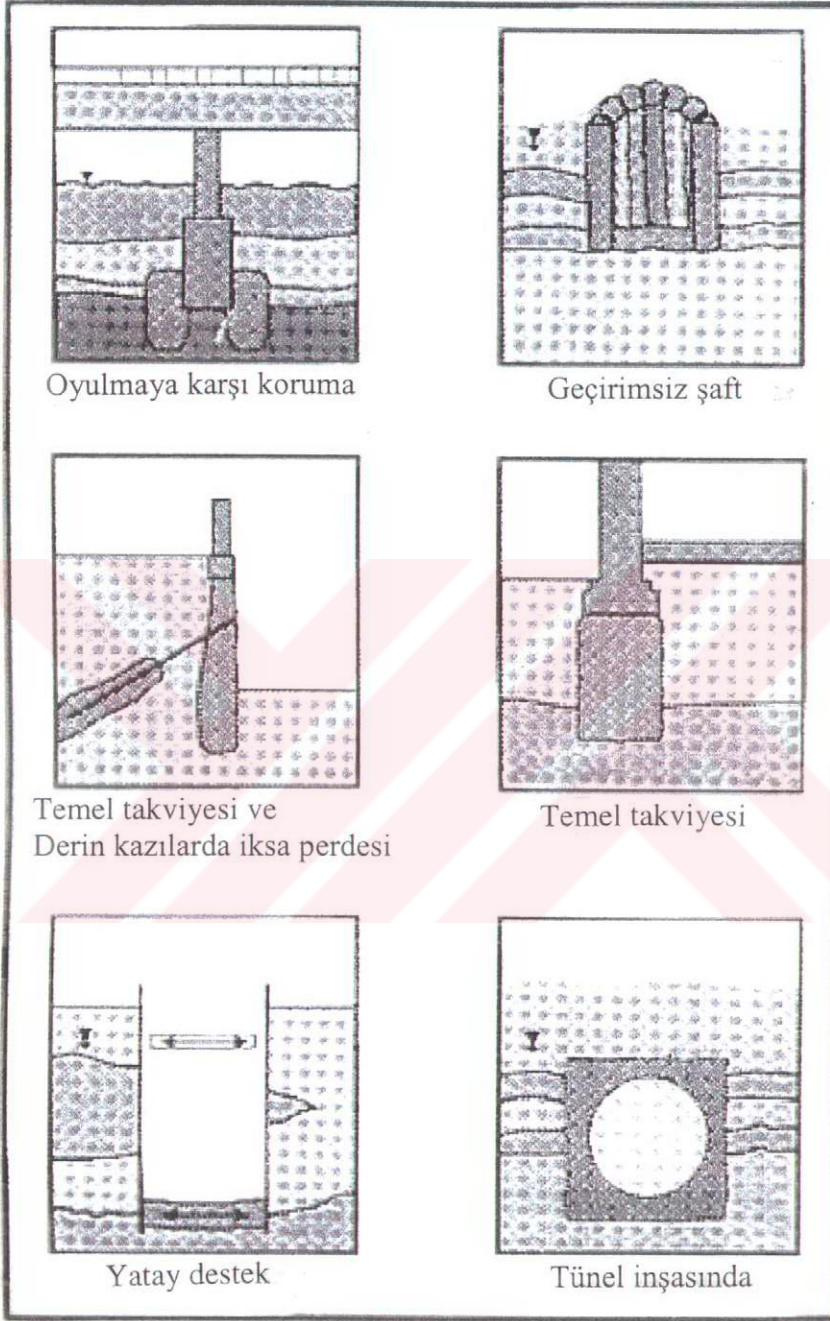
Bu tarzda imal edilmiş elemanların kullanılma alanları aşağıda sıralanmıştır:

- yeni inşaatlarda normal temel kazıkları yerine enjeksiyon kolonları olarak,
- mevcut inşaatlarda temel yüklerini olduğundan daha derin taşıyıcı zemine aktarmak amacı ile,
- geniş temel alanlarında zemin iyileştirmesi,
- mevcut yapılar altında zemin iyileştirilmesi,
- temellerin takviyesi,
- otoyollarda köprü ve viyadük temelleri altında (Şekil 10.1) [27],
- köprü, viyadük, liman temellerinde oyulma etkisine karşı korumak (Şekil 10.2),
- geçirimsiz perdeler teşkili (Şekil 10.2) [28],

- * YOLLAR
- * KÖPRÜLER
- * VİYADÜKLER



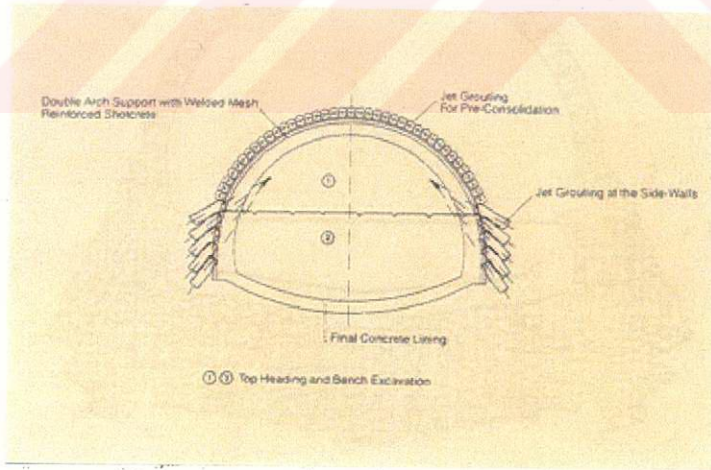
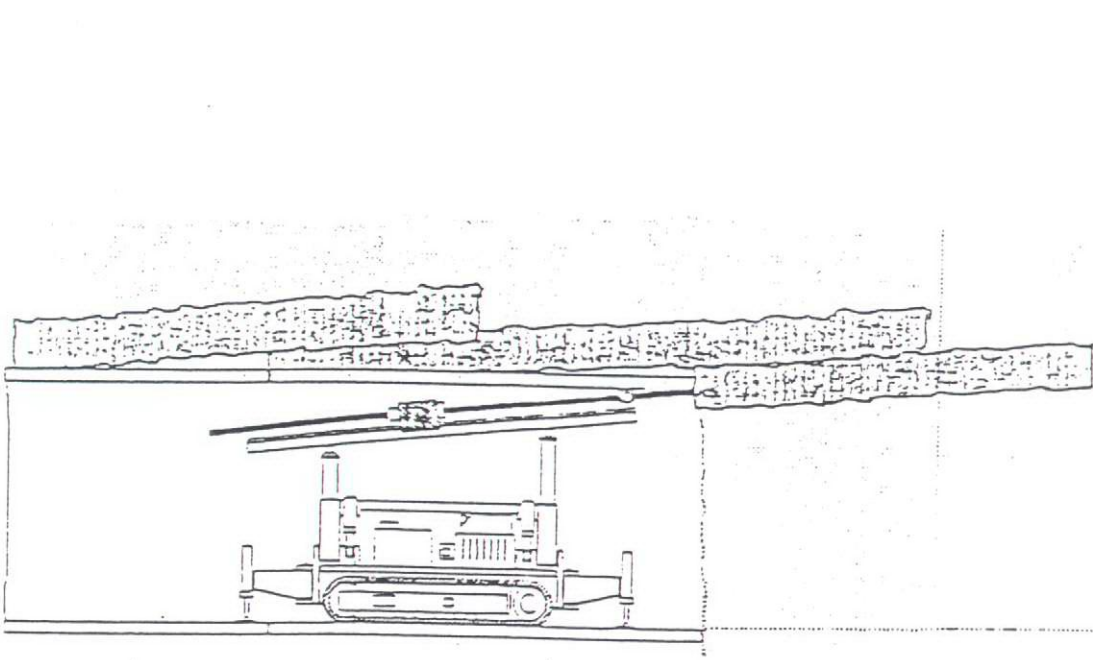
Şekil 10.1. Yol, köprü ve viyadüklerde temel uygulamaları [27]



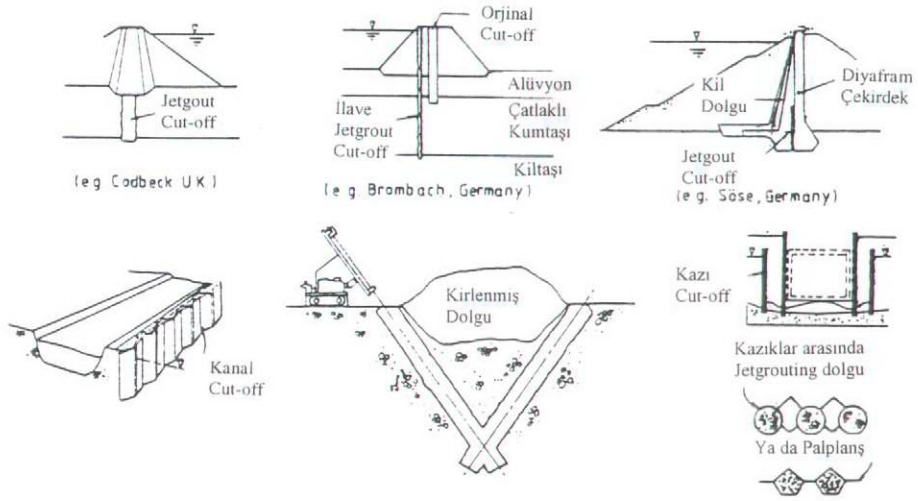
Şekil 10.2. Çeşitli uygulamalar [28]

- derin hafriyat çukurlarında yanal toprak basıncını alabilecek iksa perdesi olarak (Şekil 10.2) [28],
- tünel inşaatlarında zemin stabilitesini arttırmak için yatay ve düşey olarak (Şekil 10.2, Şekil 10.3) [28,29],
- derin hafriyat çukurunda taban izolasyonu sağlamak için dip sızdırmazlık perdeleri (Şekil 10.2) [28],
- baraj gövdesi altında pozitif cut off olarak (Şekil 10.4) [7],
- sıvılaşmaya karşı enjeksiyon perdesi olarak,
- deforme olan alanların rehabilitasyonu (havaalanı, vs.) (Şekil 10.5) [30],
- dolgularında temel takviyesi ve düşey cut-off olarak (Şekil 10.6, Şekil 10.7) [30,27],
- tarihi yapı temel zemininin takviyesi,
- aşırı mertebede oturmuş temellerin yukarı doğru itilerek düzeltilmesinde,
- su kaçakları tamirat işleri,
- çöp depolama alanlarında ve kirlenmiş zeminlerde (Şekil 10.4, Şekil 10.8) [7,31],
- şev stabilizesinin iyileştirilmesi işlerinde (Şekil 10.9) [27]

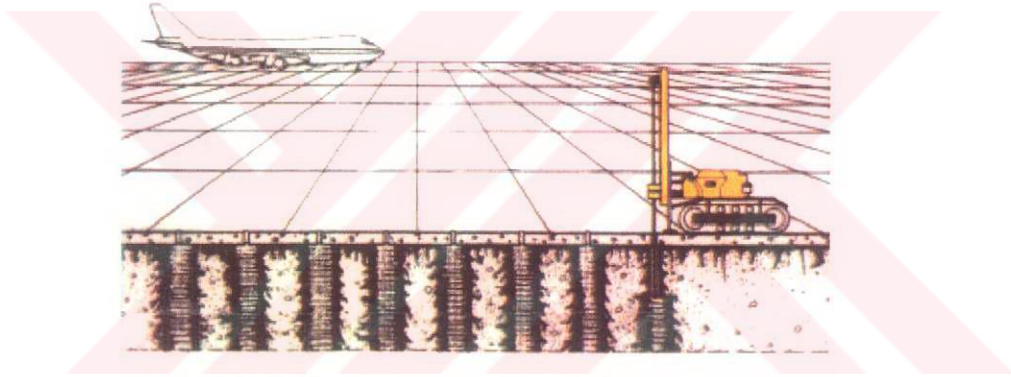
yüksek basınçlı enjeksiyon yöntemi başarı ile uygulanmıştır.



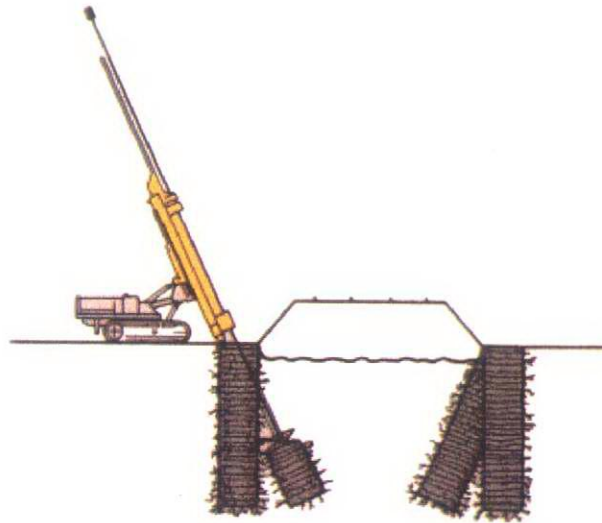
Şekil 10.3. Tünel uygulamaları [27, 29]



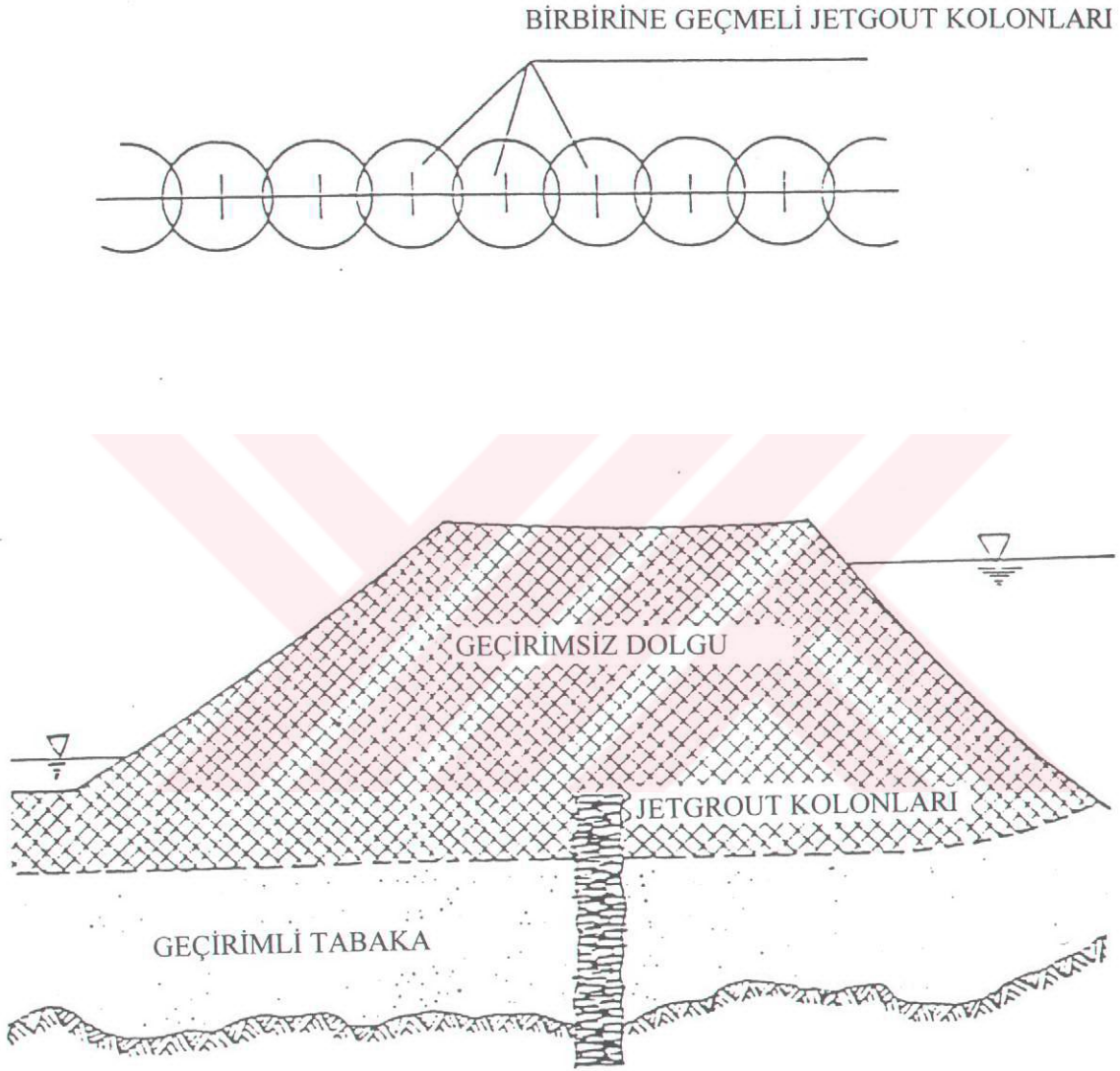
Şekil 10.4. Jetgrout kolonlarının sızdırmazlık için kullanıldığı uygulamalar [7]



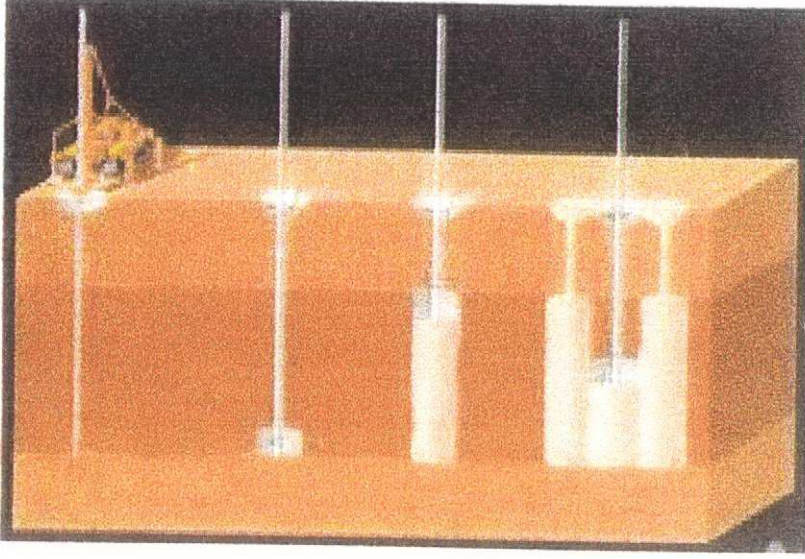
Şekil 10.5. Deforme olan alanların rehabilitasyonu [30]



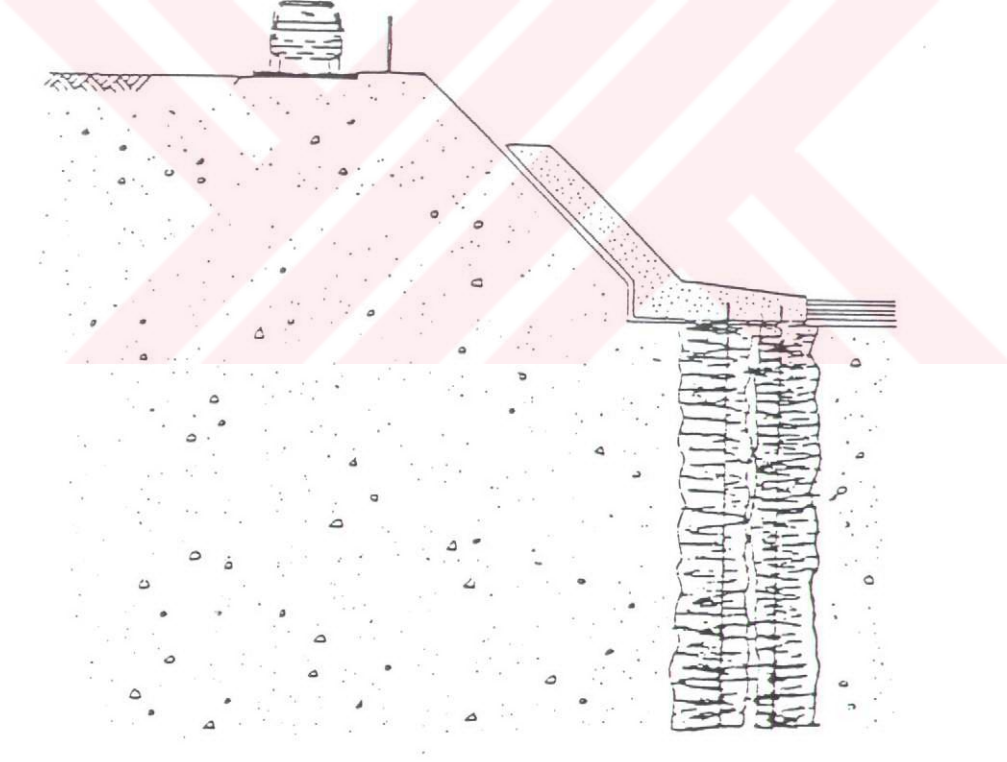
Şekil 10.6. Otoyol dolgularında uygulama [30]



Şekil 10.7. Dolgu içerisinde cut-off duvar teşkili [27]



Şekil 10.8. Kirlenmiş alanların düzenlenmesi [31]



Şekil 10.9. Şev stabilitesi uygulamaları [27]

11. JETGROUTİNG YÖNTEMİNİN KULLANILDIĞI VAKA ÇALIŞMASI

11.1. Giriş

Bu çalışmada, İpekkağıt San. ve Tic. A.Ş.'nin Yalova Tokmakköyü Altınova mevkiinde yer alan fabrika tesisleri içerisinde inşa edilmesi planlanan ilave PM3 yapısının temel sistemi ve temel zemininde gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmaları detaylı olarak anlatılmaktadır.

İnşa edilmesi planlanan PM3 yapısı temel zemininde başlıca iki ana problemle karşılaşmıştır. Bu problemler:

- deprem sırasında sözkonusu zeminin sıvılaşma riski,
- üstyapı yüklerine bağlı olarak zeminde meydana gelebilecek büyük oturmalar.

Deprem sırasında zeminde meydana gelen hareketler, mukavemet kaybına yada yumuşamaya sebep olmakta ve bunun sonucunda da yapılar altında oturma, şevlerde kayma, toprak barajlarda göçme veya zararlara neden olabilmektedir. Deprem sırasında zeminde meydana gelen mukavemet kaybı veya yumuşamaya “zeminin sıvılaşması” adı verilmektedir [32]

Mühendislik projelerini sözkonusu muhtemel sıvılaşmadan korumak genellikle dört şekilde olabilmektedir [32]:

- yapısal olmayan çözümler: Projenin çalışma yöntemlerini değiştirmek,
- yapısal çözümler: proje yapısını değiştirmek,
- drenaj çözümleri: boşluk suyu basıncını kontrol altına almak,
- saha çözümleri: mevcut zemini iyileştirmek.

Sonuç olarak, PM3 yapısı temel zemininde oturma ve sıvılaşma potansiyeline karşı jetgrouting yöntemi ile zemin iyileştirmesi gerçekleştirilmiş ve teşkil edilen jetgrout kolonlarla mevcut yapı yüklerinin daha derin tabakalara aktarılması sağlanmıştır. Bu amaçla tekli jet (JET1) sistemi kullanılarak $\phi=60\text{cm}$ çaplı jetgrout kolonlar teşkil edilmiştir.

Bu vaka çalışması proje bilgileri ve planlanan yapılar, zemin koşulları, geoteknik modelleme, temel sistemi, jetgrouting çalışmaları ve çalışma sonuçlarının değerlendirilmesini içermektedir.

11.2. Proje Bilgileri ve Planlanan Yapılar

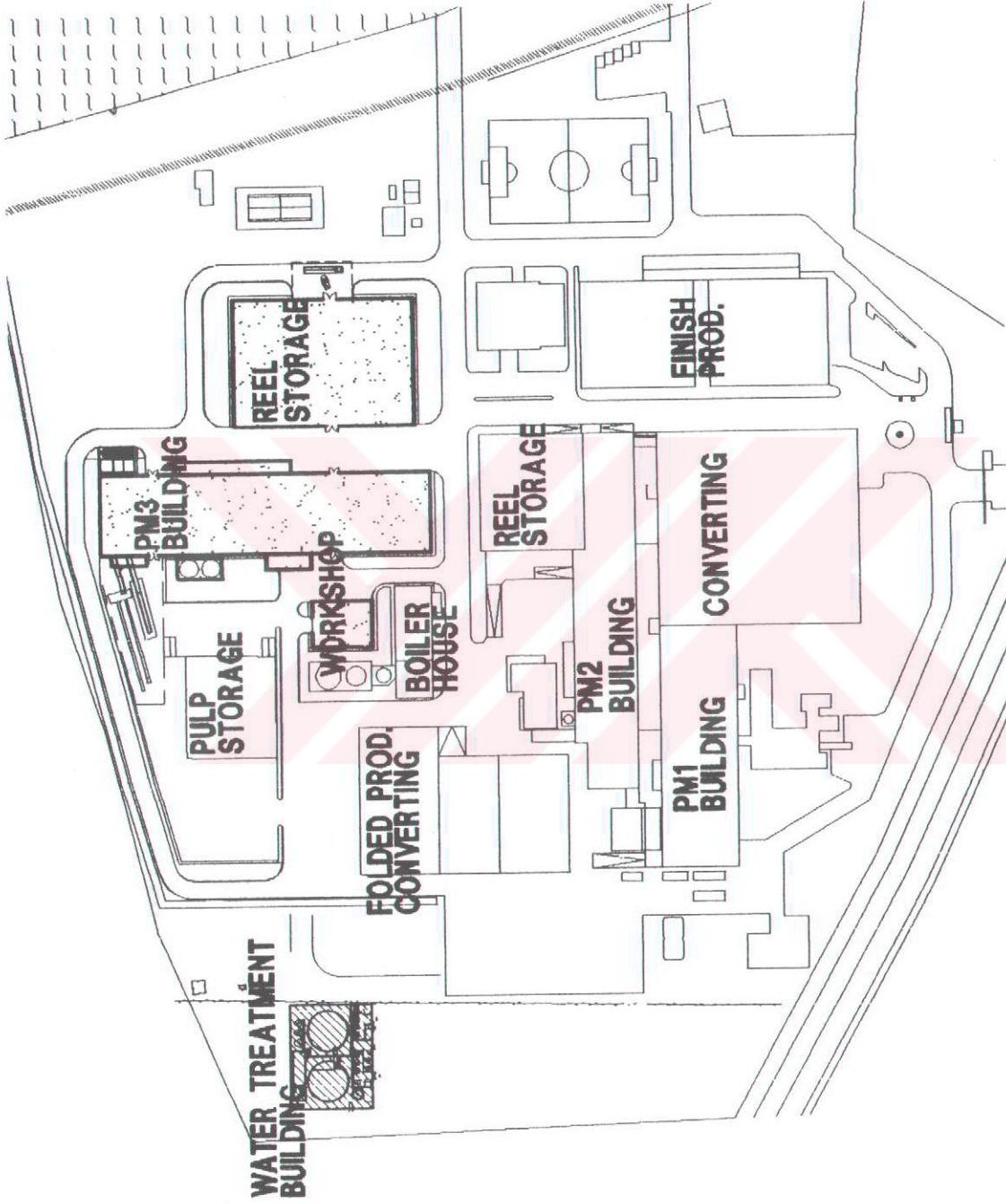
İpekkağıt San. ve Tic. A.Ş.'nin fabrika tesisleri İzmit-Yalova karayolu üzerinde Karamürsele yaklaşık 5.0 km mesafede bulunan Yalova Tokmakköyü Altınova mevkiinde yer almaktadır [33].

İpekkağıt PM3 binası G1, G2 ve G3 bloklarından oluşmaktadır. PM3 binası 32.25m x 132.0m ebatındadır. Fabrika tesisleri vaziyet planı Şekil 11.1'de verilmektedir.

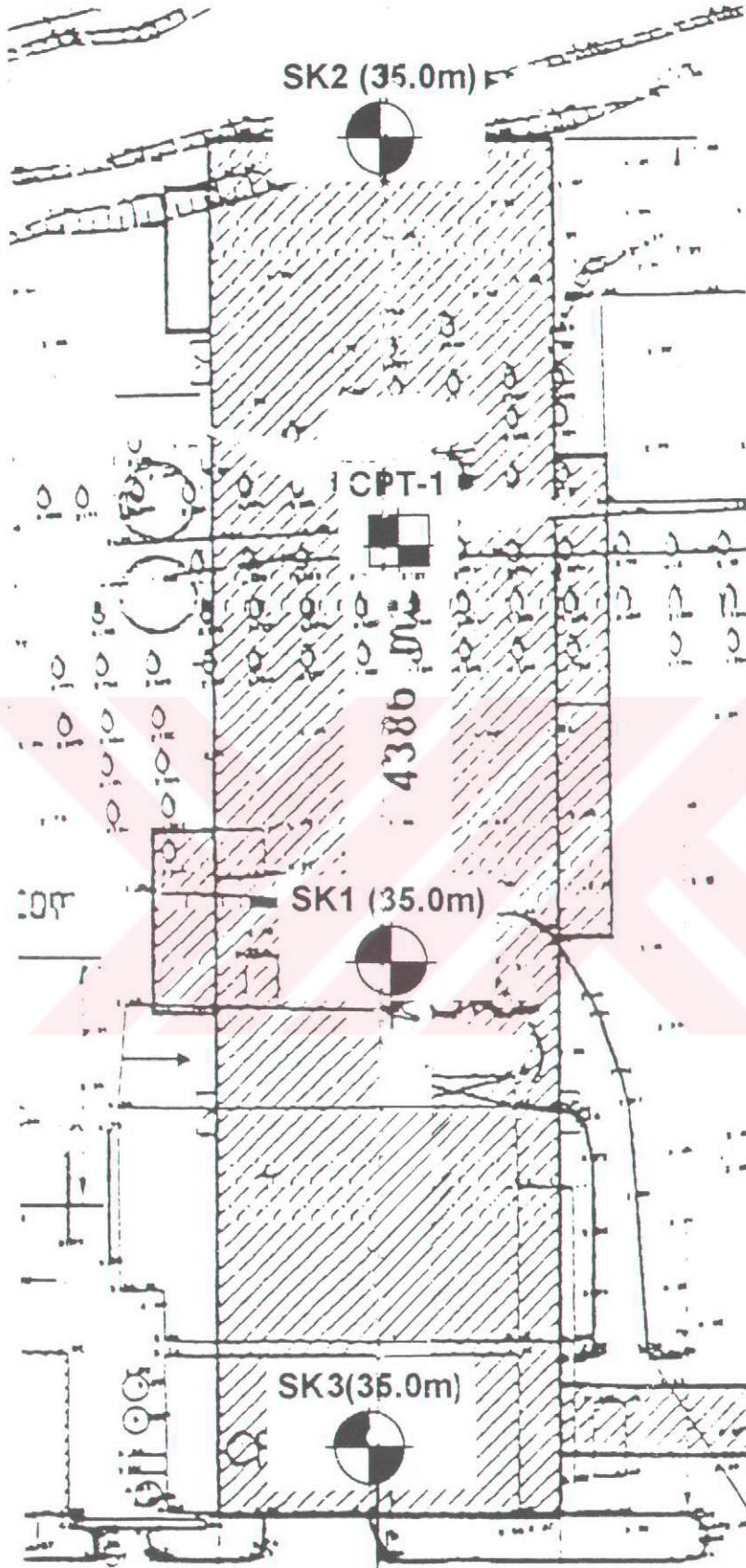
11.3. Zemin Etüdleri

Söz konusu yapının zemin ve temel mühendisliği değerlendirmelerinin gerçekleştirilebilmesi için rotary sondaj ve statik sondalama (CPT-Cone Penetration Testing) deneyinden oluşan arazi etüdleri gerçekleştirilmiştir. Etüdler kapsamında toplam 105.0 m uzunluğunda üç (3) adet sondaj ve bir (1) adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen zemin etüdleri konumları Şekil 11.2'de verilmektedir [34].

Sondajlarda sistematik olarak 1.5m ara ile standart penetrasyon deneyleri gerçekleştirilerek SPT/N darbe sayıları belirlenmiş olup karşılaşılan zemin koşullarına bağlı olarak temsili ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. Alınan zemin numuneleri üzerinde zemin ve temel mühendisliği değerlendirmesine yönelik



Şekil 11.1. Fabrika tesisleri vaziyet planı



Şekil 11.2. Zemin etüdü konumları

geoteknik parametrelerin belirlenmesi amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde doğal su muhtevası, elek analizi, kıvam limitleri ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş olup laboratuvar deney sonuçları Tablo 11.1’de özetlenmektedir.

CPT deneyi 36mm çaplı elektronik cihazın hidrolik baskı yoluyla 2 cm/sn sabit hızla zemine penetre edilmesi ile yapılmaktadır. Bu penetrasyon sırasında 2 cm ara ile ölçülen uç ve çevre mukavemeti verileri bilgisayara kaydedilmektedir. Bu veriler zemin tabakalarının hassas bir şekilde tanımlanması, taşıma ve oturma özelliklerinin tayini, temel mühendisliği tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik verileri oluşturmaktadır.

11.4. Zemin Koşulları ve Geoteknik Modelleme

Sahada gerçekleştirilen CPT deneyi ve sondajlarda zeminde kil, siltli kil ve killi kum araldanmasından oluşan bir tabakalanma belirlenmiştir. Saha genelinde yaklaşık 2.0m’lik bir kot farkı mevcuttur.

Sondajlarda bitkisel toprak altında yaklaşık 3.0m derinliğe kadar yeşilimsi-kahve renkli yumuşak-orta katı kil, 3.0m ila 6.0m’ler arasında yeşilimsi-gri renkli orta sıkı kum, 6.0m ila 9.0m’ler arasında yeşilimsi-gri orta sıkı siltli kum ve bu seviyenin altında ise gri-kahve renkli çok katı-sert kil zemin yer almaktadır. Sondajların herbiri 35.0m olup sıkı-çok sıkı kum içerisinde bitirilmişlerdir. CPT deneyi ise 18.04m derinlikte bitirilmiş olup bu deneyde karşılaşılan zemin tabakalanması Şekil 11.3’de verilmektedir.

Yeraltısuyu ölçümleri günlük olarak yapılmış olup yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden itibaren 2.0m derinlikte olarak belirlenmiştir.

Tablo 11.1’de özetlenen laboratuvar deney sonuçlarından görüldüğü üzere sözkonusu sahada karşılaşılan zemin tabakalarından alınan temsili numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen değerler aşağıdaki gibidir:

TABLO 11.1. LABORATUVAR DENEY SONUÇLARI ÖZETİ

Sondaj No Borehole	Numune No Sample No	Derinlik/Depth (m)	W _n %	Atterberg limitleri / Atterberg limits			Elek analizi / Sieve Analysis		Sınıflandırma Classification USCS
				LL (%)	PL (%)	PI (%)	+No. 4 (%)	-No.200 (%)	
SK-1	UD1	2.00-2.50	25.6	51	27	24	0.00	85.38	CH
	SPT3	4.50-4.95	15.5	NP	NP	NP	18.18	12.15	SM
	SPT5	7.50-7.95	24.4	NP	NP	NP	0.00	9.50	SM-SP
	SPT7	10.50-10.95	30.7	46	23	23	0.00	95.13	CL
	UD2	12.50-13.00	27.2	NP	NP	NP	1.00	38.71	SM
	SPT14	21.00-21.45	23.5	55	23	32	5.13	59.30	CH
	UD3	22.00-22.50	36.3	45	25	20	6.86	49.87	SC
	SPT18	27.00-27.45	29.6	-	-	-	9.85	70.48	CL-CH
SK-2	SPT1	1.50-1.95	28.2	51	26	25	0.85	58.91	CH
	SPT4	6.00-6.45	24.5	NP	NP	NP	3.44	19.22	SM
	UD1	9.50-10.00	23.7	43	23	20	0.00	91.99	CL
	SPT7	12.00-12.45	42.0	56	26	30	0.00	97.95	CH
	UD2	12.50-13.00	37.2	NP	NP	NP	1.17	36.34	SM
	SPT12	19.50-19.95	35.2	-	-	-	5.46	83.29	CL-CH
	SPT18	28.50-28.95	30.0	53	31	22	0.59	75.53	MH
	SPT20	31.50-31.95	46.9	55	26	29	0.00	90.85	CH
SK-3	SPT3	4.50-4.95	24.5	NP	NP	NP	0.00	13.99	SM
	SPT6	9.00-9.45	26.3	NP	NP	NP	0.00	11.56	SM
	UD1	11.50-12.00	24.2	34	21	13	0.00	82.90	CL
	SPT8	12.00-12.45	33.9	49	24	25	0.00	92.69	CL
	SPT11	16.50-16.95	22.2	46	23	23	0.90	66.80	CL
	SPT16	24.00-24.45	27.8	NP	NP	NP	0.37	21.78	SM
	SPT20	30.00-30.45	23.6	NP	NP	NP	0.61	41.62	SM
	SPT22	33.50-33.95	26.9	NP	NP	NP	7.40	36.49	SM

Not/Note: +No 4(%) : 4 no.lu eleğin üzerinde kalan malzemenin ağırlıkça yüzdesi /

: Percent of the material in weight retaining on #4 sieve

-No.200(%) : 200 no.lu elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesi /

: Percent of the material in weight passing #200 sieve

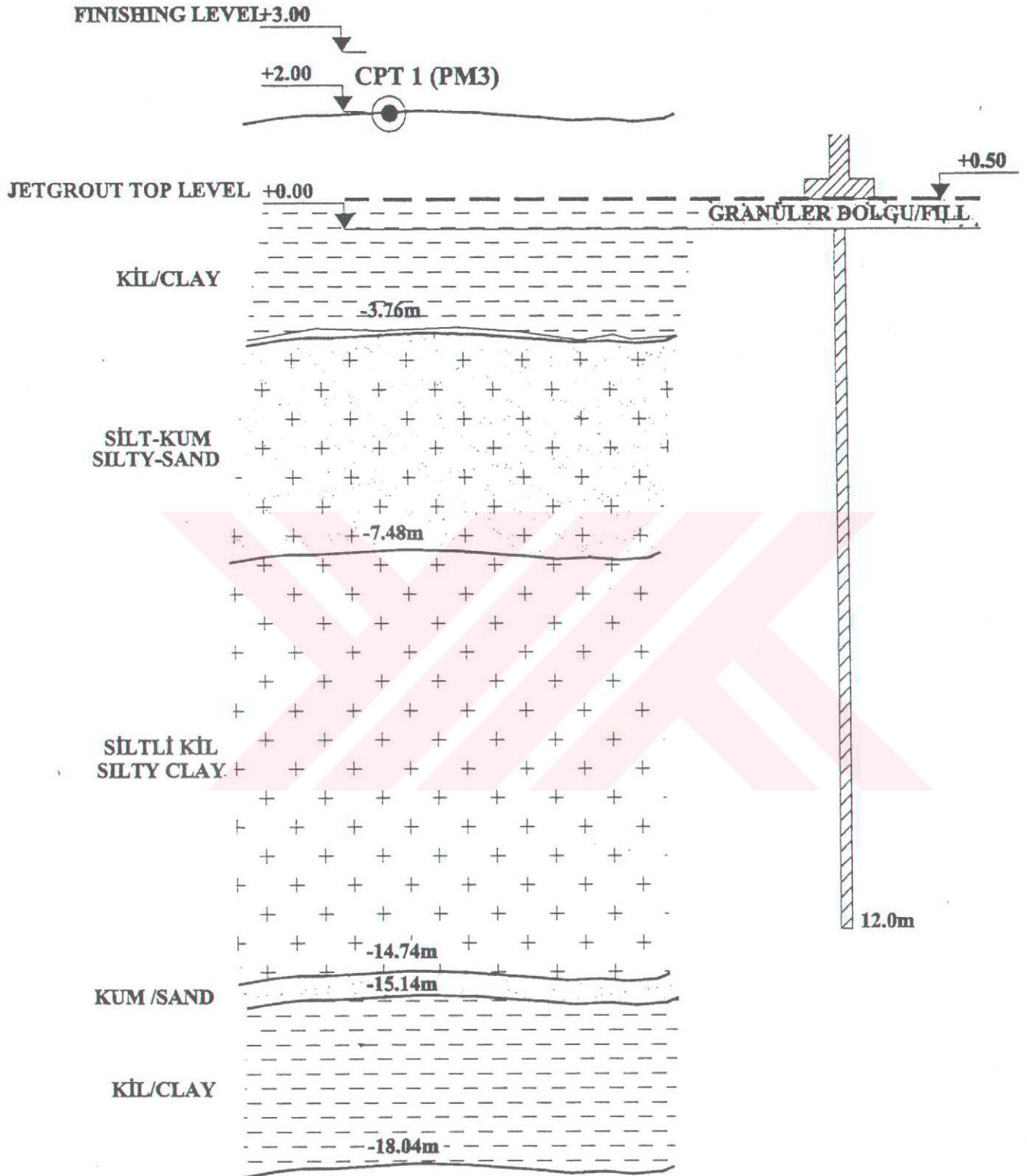
LL(%) : Likid limit, yüzde olarak / Liquid limit, %

PL(%) : Plastik limit, yüzde olarak / Plastic limit, %

PI(%) : Plastisite indisi, yüzde olarak / Plasticity index

USCS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sistemi / Unified Soil Classification System

W_n(%) : Doğal su muhtevası, yüzde olarak / Natural Water Content



Şekil 11.3. CPT deneyinde karşılaşılan zemin tabakalanması

İndeks Özellikler:

Doğal su muhtevası, $W_n (\%) = 15.5-46.9$

Likit limit, $W_L (\%) = 34-56$

Plastik limit, $W_P (\%) = 21-31$

Plastisite indisi, $I_P (\%) = 13-32$

Birleştirilmiş zemin sınıflandırması, CH-CL-SM

Konsolidasyon deneyleri üç adet örselenmemiş numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Konsolidasyon parametreleri:

$C_c = 0.12-0.18$

$C_r = 0.01-0.03$

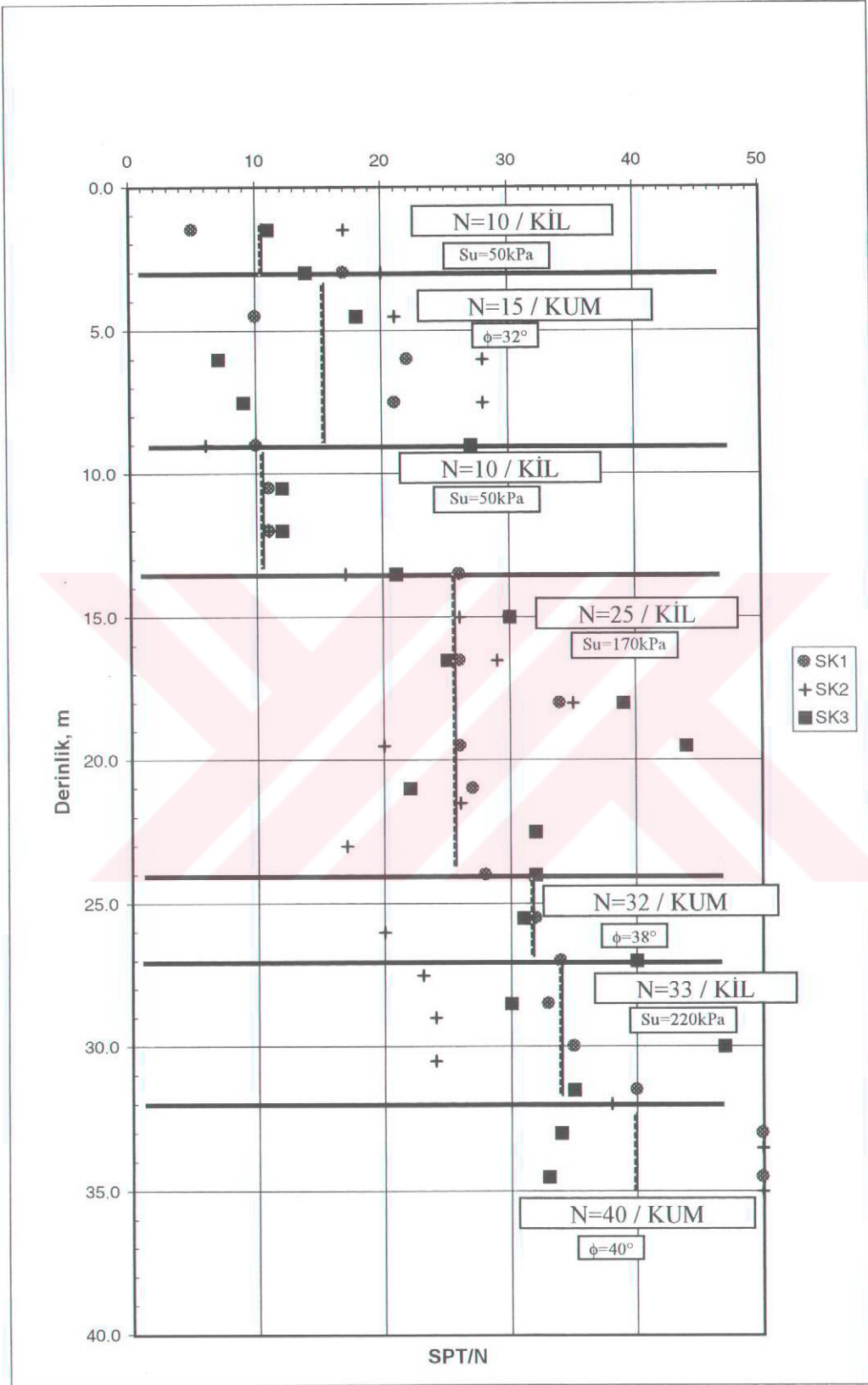
$e_0 = 1.1-1.4$

$AKO = 1.4$

Sondajlar esnasında yapılan SPT deneylerinden elde edilen SPT/N darbe sayılarının derinlikle değişimi Şekil 11.4'de verilmektedir. CPT deneyinden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti ve içsel sürtünme açısının derinlikle değişimi ise Şekil 11.5'de verilmektedir [34].

11.5. Temel Mühendisliği Değerlendirmeleri

Zemin etüdlerinden elde edilen verilere göre temel mühendisliği değerlendirmeleri yapılmış olup aşağıdaki başlıklar altında özetlenmiştir.

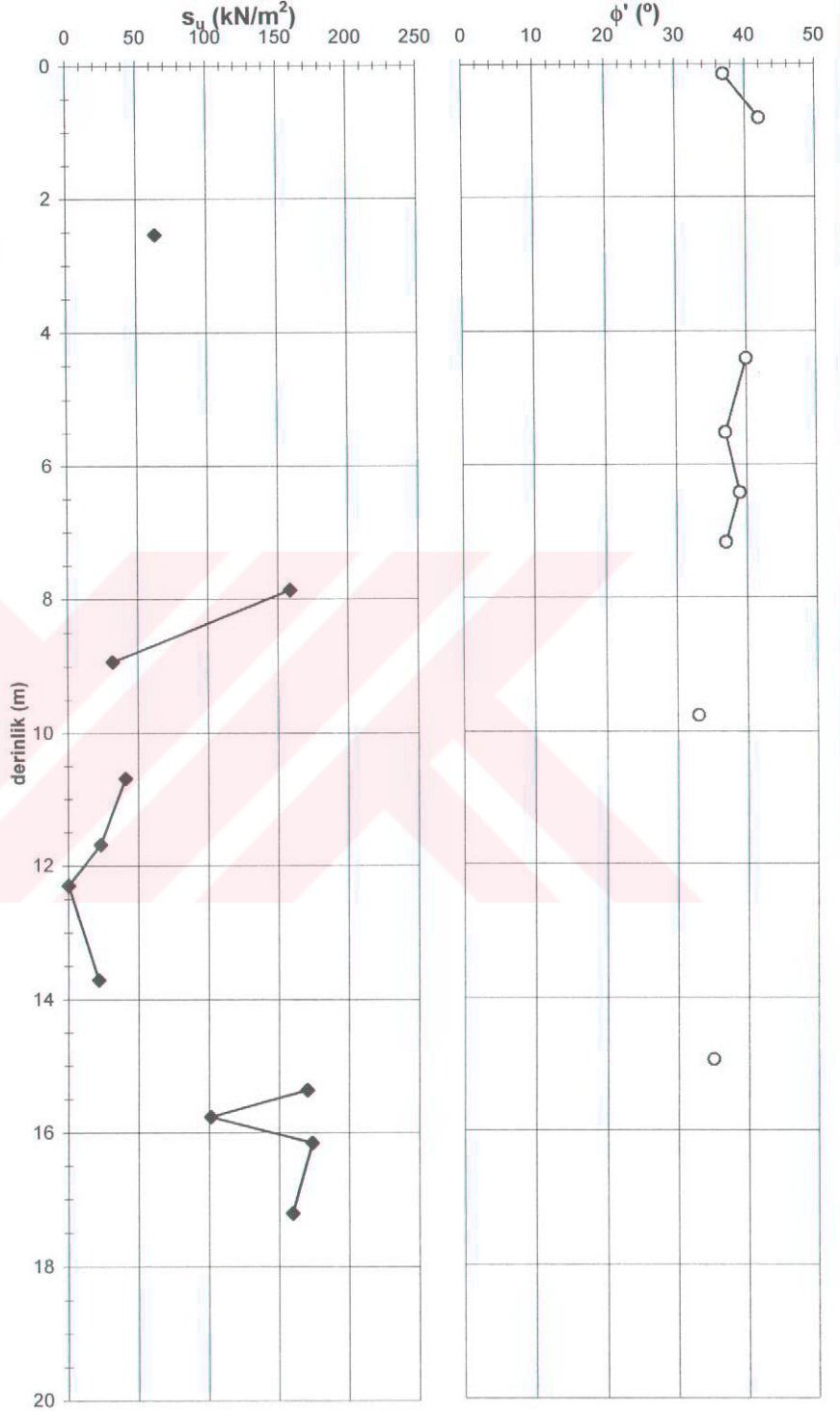


Şekil 11.4. SPT/N Değerlerinin Derinlikle Değişimi

İPEK KAĞIT - PM3
CPT'YE GÖRE ZEMİN PARAMETRELERİ
GEOTECHNICAL PARAMETERS FROM CPT

CPT no: 01

derinlik (m)	s_u (kN/m ²)	ϕ' (°)	D_r (%)
0.15		37	-6
0.81		42	70
2.54	63.62		
4.41		40	76
5.52		37	53
6.43		39	65
7.18		37	55
7.87	158.72		
8.93	32.24		
9.76		33	27
10.69	41.1		
11.69	23.17		
12.3	0.31		
13.71	21.63		
14.94		35	48
15.37	170.24		
15.77	101.34		
16.16	173.65		
17.21	159.56		



s_u : drenajsız kayma mukavemeti / undrained shear strength
 ϕ' : içsel sürtünme açısı (drenajlı) / internal friction angle (drained)
 D_r : izafi sıkılık / relative density

Şekil 11.5. CPT'YE GÖRE ZEMİN PARAMETRELERİ

11.5.1. Taşıma gücü

Şekil 11.4 ve Şekil 11.5’de verilen zemin modellemesine göre yüzeysel temeller için taşıma kapasitesiaşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$q_{net} \sim 5.S_u \quad (11.1)$$

$$q_{net} = 5 \times 50 \text{ kPa} = 250 \text{ kPa} \quad (11.2)$$

güvenlik faktörü 2.5 için zemin emniyet gerilmesi:

$$q_{emn} = 100 \text{ kPa} \quad (11.3)$$

olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, geoteknik parametreler dikkate alındığında yapının taşıma gücü yönünden kritik olması beklenmemektedir.

11.5.2. Oturmalar

Sahada karşılaşılan zemin koşulları dikkate alınarak, planlanan yapıların inşası sonucunda oluşacak oturma miktarının mertebesini belirleyebilmek amacıyla oturma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üstyapıdan temellere etkiyecek net gerilme değerinin $\sigma_f = 50 \text{ kPa}$ ve $\sigma_f = 100 \text{ kPa}$ olması durumları için, zemin tabakalanmasının ayrıntılı olarak dikkate alınmasıyla hassas bir şekilde Janbu’nun “Tangent Modulus” metodu kullanılarak gerçekleştirilen oturma hesaplarında sırasıyla 22.7 cm ile 39.4 cm toplam oturma hesaplanmıştır. Oturma analizlerinde temeller, mevcut zemin yüzeyinden itibaren 2.0 m derinlikte ve yüzeysel radye temel olarak hesaplara dahil edilmiştir.

Oturma analizlerinde hesaplanan oturma miktarları, yüzeysel radye temeller için literatürde verilen değerler dikkate alındığında kabul edilebilir limitlerin üzerindedir. Dolayısıyla, inşa edilecek yapı temellerinin beklenen oturmalar dikkate alınarak kazıklı temeller olarak teşkil edilmesi gerekmektedir.

11.5.3. Temel Sistemi

Yapı temellerinin kazıklı radye temel olarak teşkil edilmesi gerekmektedir. Temel sistemi başlangıçta kirişli radye olarak düşünülmüştür. 40 cm radye plağı (100x150cm) temel kirişine göre hesaplanmış olup binanın toplam ağırlığı 74307 ton olarak hesaplanmıştır. Daha sonra kirişli ve kirişsiz radye temel arasında maliyet analizi yapılarak 100 cm yüksekliğinde kirişsiz radye temelin maliyet ve uygulama açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Kirişsiz radye temele göre yapının toplam ağırlığı 70619 ton olarak hesaplanmıştır [35].

Kazık kapasitesi hesapları $L=18.0\text{m}$ boyunda ve $\phi 60\text{cm}$, $\phi 80\text{cm}$ ve $\phi 120\text{cm}$ çaplı fore kazıklar için yapılmıştır. Hesaplar sonucunda emniyetli kazık kapasiteleri güvenlik faktörü 2.0 için sırasıyla 61 ton, 92 ton ve 150 ton olarak bulunmuştur [33].

Ayrıca, fore kazıklı temellere alternatif olarak jetgrout kolonlu temel sistemi düşünülmüştür. Bu amaçla $L=12.0\text{m}$ ve $L=14.0\text{m}$ boylarında ve $\phi 60\text{cm}$ ve $\phi 70\text{cm}$ çaplarında jetgrout kolon kapasiteleri belirlenmiştir. Hesaplar sonucunda emniyetli jetgrout kolon kapasiteleri $L=12.0\text{m}$ boyunda ve $\phi 60\text{cm}$ çaplı kolon için 60 ton, $L=12.0\text{m}$ boyunda ve $\phi 70\text{cm}$ çaplı kolon için 72 ton, $L=14.0\text{m}$ boyunda ve $\phi 60\text{cm}$ çaplı kolon için 82 ton ve $L=14.0\text{m}$ boyunda ve $\phi 70\text{cm}$ çaplı kolon için 100 ton olarak hesaplanmıştır. Hesaplarda güvenlik faktörü 2.0 olarak alınmıştır.

PM3 yapısının temellerinin fore kazıklı ya da jetgrout kolonlu olarak teşkil edilmesi öncesinde maliyet ve zaman analizleri yapılmıştır. Fore kazık teşkili için birim fiyat yaklaşık 50-60\$/m iken jetgrout kolon teşkili için birim fiyat ortalama 30\$/m olarak belirlenmiştir. Yapının toplam ağırlığının 70619 ton olduğu dikkate alınarak temeller altında teşkil edilecek kazık adetleri ve maliyetleri Tablo 11.2’de verilmektedir.

Tablo 11.2. Maliyet Analizi

Kazık Çapı (cm)	Kazık Boyu(m)	Fore Kazık (adet)	Jetgrout Kolon (adet)	Birim fiyat \$/m	Tutar \$
60	12	1158	1177	30	423,720
	14		861	30	361,620
	18			50	1,042,200
70	12		981	30	353,160
	14		706	30	296,520
80	18	768		55	760,320
120	18	471		60	508,680

Tablo 11.2’de görüldüğü gibi maliyet açısından jetgrout kolon teşkilinin daha hesaplı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çeşitli çalışmalardan ve arazide yapılan tecrübelerden çıkarılan sonuçlara göre jetgrouting yöntemi ile zemin-çimento kolonu teşkili aynı zemin koşullarında, aynı çap ve uzunlukta fore kazık teşkilinden üç kat daha hızlı olmaktadır.

Yukarıda belirtilen sebep ve sonuçlara dayanılarak sözkonusu sahada inşa edilecek PM3 yapısının temellerinin jetgrout kolonlu olarak teşkiline karar verilmiştir. Bu amaçla teşkil edilecek kolonların boyu $L=12.0m$ ve çapı $\phi=60cm$ olarak belirlenmiştir.

11.5.4. Sıvılaşma Potansiyeli

Türkiye Alpin Orejenezi kuşağında ve yüksek deprem aktivitesi gösteren bir bölgede bulunmaktadır. 20. Yüzyılda, Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu’nun (Ege Bölgesi) graben sistemleri ile Doğu Anadolu Fay Sistemlerinin oldukça aktif olduğu gözlemlenmektedir. Sözkonusu saha Türkiye deprem haritasına göre 1. Derece deprem bölgesinde yer almaktadır [33].

Sözkonusu saha Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer almaktadır. Bu bölgede 1900 ve 1980 yılları arasında Richter Ölçeğine göre kaydedilen depremler ve şiddetleri Tablo 11.3’de verilmektedir:

Tablo 11.3. 1900-1980 Yılları Arasında Kaydedilen Depremler

Şiddeti	$4 \geq M$	$5 > M \geq 4$	$6 > M \geq 5$	$7 > M \geq 6$	$M > 7$
Deprem sayısı	306	37	15	3	1

Sözkonusu sahanın yer aldığı Marmara Bölgesi’ndeki risk analizlerine göre, 50 yıllık yapı ömrü için maksimum deprem şiddeti Richter ölçeğine göre $M=7.7$ olup yıllık riski %10’dur.

Deprem kaynaklarında Kuzey Anadolu Fay Hattında 50 yıllık yapı ömrü ve yıllık %10 deprem riski için Newmark-Rosenblueth tarafından zemin ivmeleri ile episentral uzaklığın değişimi Tablo 11.4’de verilmiştir [36]:

Tablo 11.4. Episentral Uzaklık- Zemin İvmeleri

Episentral Uzaklık, R (km)	A (cm/sn^2)
20	535
30	315
40	207
50	147

Sözkonusu sahada zayıf alüvyonel tabakalanma dikkate alındığında deprem sırasında zemin büyümesi beklenmektedir. Bu amaçla yapılan sıvılaşma analizleri sonuçlarında, $a > 0.2g$ ’den büyük ivme değerleri için 4.5m ila 8.0m derinlikler arasında yer alan kum tabakasında sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

Bu sebeple, sözkonusu sahadaki sıvılaşma potansiyelini azaltmak için taş kolon, jetgrout kolon, kompaksiyon kazıkları, vibro-kompaksiyon gibi yöntemlerle mevcut zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla, zeminin sıvılaşmasını önlemek için bina çevresinin iki sıra olacak şekilde şaşırtmalı olarak $\phi 60\text{cm}$ çaplı ve $L=8.0\text{m}$ boyunda jetgrout kolonlarla kuşatılmasına karar verilmiştir.

Temel tipik kesiti Şekil 11.6’da verilmektedir.

11.6. Jetgrout Kolonların Teşkili

Uygulanan jetgrouting sistemi tekli jet (JET1) olup jetgrouting uygulaması öncesinde yapılan çalışmalar, jetgrouting uygulaması, kalite kontrol çalışmaları ve elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenmiştir.

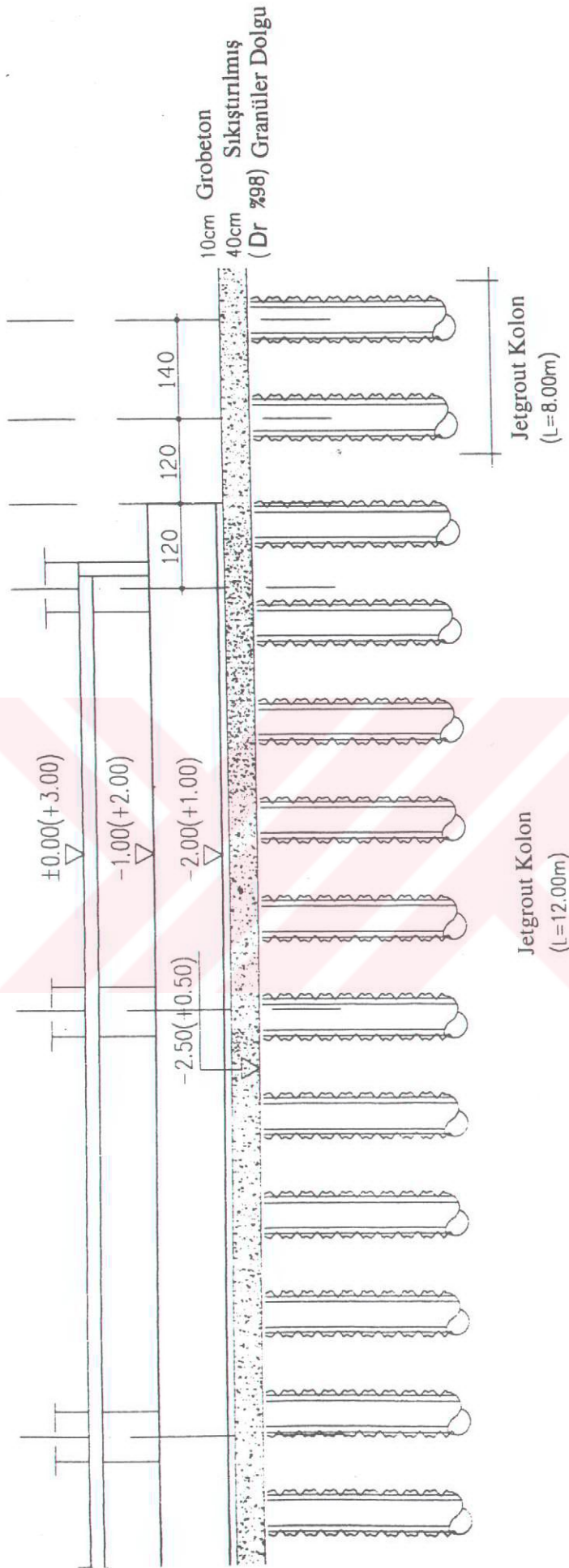
11.6.1. Uygulama öncesinde yapılan çalışmalar

Jetgrouting uygulaması öncesinde çalışma platformu oluşturmak ve sahada mevcut olan yaklaşık 2.0m’lik kot farkını ortadan kaldırmak amacıyla bitkisel toprak sıyrılmış olup bazı yerlerde 1.5m’ye ulaşan kontrollü sıkıştırılmış dolgu teşkil edilmiştir.

Sözkonusu sahada altı (6) adet $\phi 60\text{cm}$ çaplı, $L=12.0\text{m}$ uzunluğunda test kolonu imal edilerek bu kolonlar üzerinde yapılan kontroller ile çalışma parametreleri belirlenmiştir. Test kolonlarının teşkilinden 10 gün sonra çap kontrolü yapılmış olup teşkil edilen kolon çaplarının 60cm-90cm olduğu görülmüştür.

11.6.2. Jetgrouting Uygulaması

Çalışma parametreleri belirlendikten sonra Jetgrouting uygulaması yapılmıştır. Uygulamada kullanılan çalışma parametreleri Tablo 11.5’de verilmektedir.



Şekil 11.6. Temel tipik kesiti

Tablo 11.5. Uygulamada Kullanılan Çalışma Parametreleri

Kolon Boyu	m	8.0 – 12.0
Enjeksiyon Basıncı	bar	500 – 550
Tijin geri çekilme hızı	cm/dak.	55
Tijin dönme hızı	devir/dak.	21
Enjeksiyon memesi sayısı	n	2
Enjeksiyon memesi çapı	mm	2.0
Çimento miktarı	kg/m ³	450
Su/Çimento		1

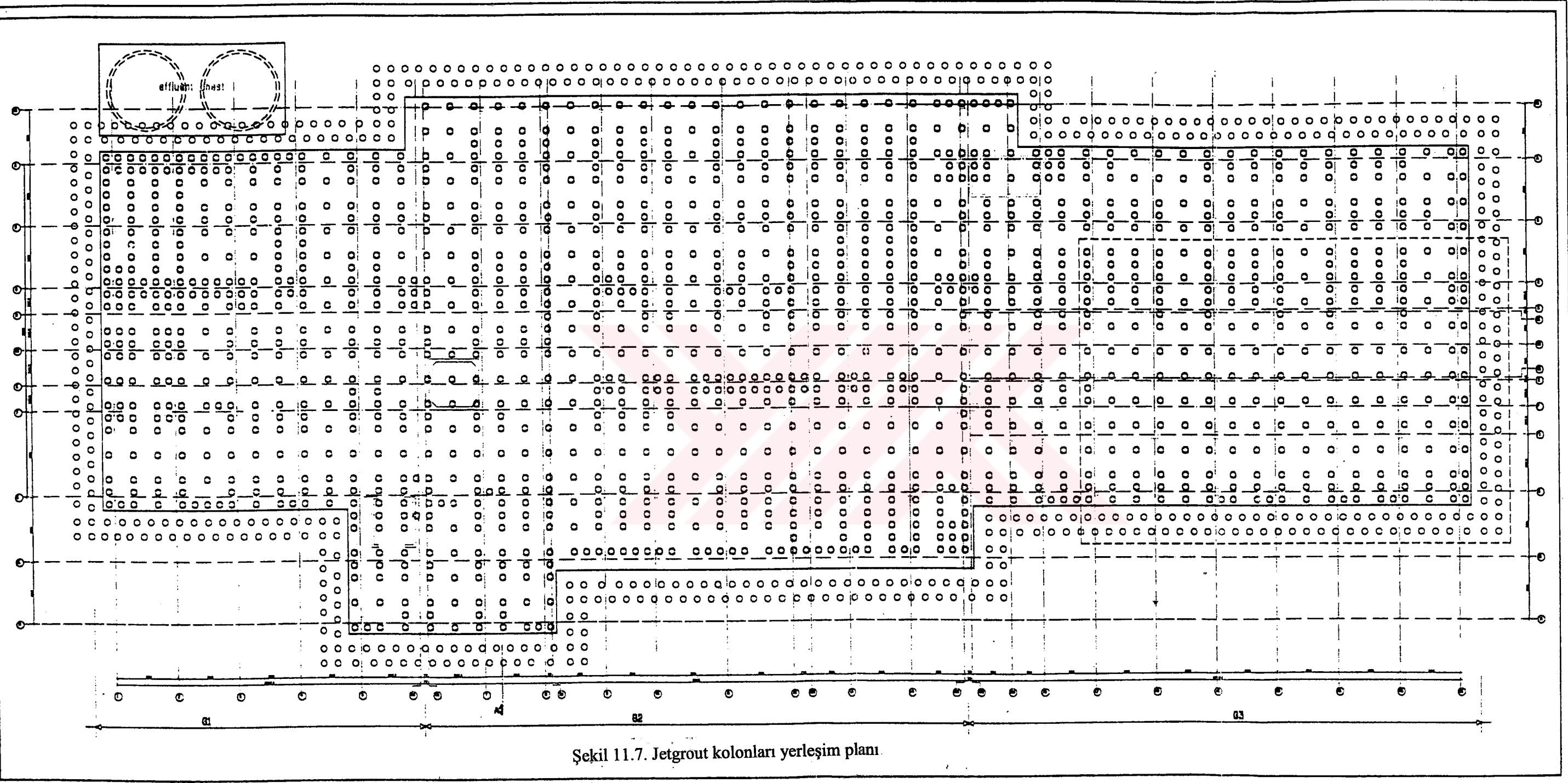
Yukarıda verilen çalışma parametreleri ile teşkil edilen jetgrout kolon sayıları ile toplam uzunlukları ise Tablo 11.6.'da verilmektedir.

Tablo 11.6. Uygulamada Teşkil Edilen Jetgrout Kolon Sayıları ve Toplam Uzunlukları

	Adet	Boy (m)	Toplam boy (m)
Kuşaklama (sıvılaşma potansiyeline karşı)	622	8.0	4,976
Test	6	12.0	72
Radye altı	1546*	12.0	18,552
Toplam	2174		23,600

* Projede bazı değişiklikler olduğu için kolon sayısı arttırılmıştır.

Sıvılaşma potansiyeline karşı yapı çevresinde iki sıra olacak şekilde şaşırtmalı olarak teşkil edilen jetgrout kolonları ara mesafeleri 140cm olup radye altında teşkil edilen jetgrout kolonları ara mesafeleri farklılık arz etmektedir. Jetgrout kolonları yerleşim planı Şekil 11.7'de verilmektedir.



11.6.3. Kullanılan Ekipmanlar

Jetgrouting uygulamasında delgi/enjeksiyon işlemi için SM-400, karıştırıcı ünitesi olarak Tecniwell TWM-20 ve pompa ünitesi olarak TW-20 kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan jetgrouting tesisi tek olup çimento silosu kapasitesi 60 tondur. Uygulama, 24 saat boyunca ve çift vardiyalı olarak sürdürülmüştür. Uygulama boyunca dört (4) operatör ve oniki (12) işçi çalışmış olup günde ortalama 40 adet kolon tamamlanmıştır. Bir jetgrout kolonun tamamlanma süresi yaklaşık 40-45 dakika olarak belirlenmiştir. PM3 yapısının inşa edileceği sahada teşkil edilen jetgrout kolonlarının tamamı sıvılaşma potansiyeline karşı yapılanlar da dahil olarak 65 günde bitirilmiştir.

11.6.4. Yükleme Testleri

Radye temel altında taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen jetgrout kolonlar ile aynı çalışma parametreleri kullanılarak L=12.0m boyunda ve $\phi=60$ cm çapında teşkil edilen test kolonlar üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneylerinde azami yük kapasiteleri ve oturma değerleri belirlenmiş olup Tablo 11.7’de özetlenmiştir.

Tablo 11.7. Yükleme Deneyi Sonuçları Özeti

Kolon No	Oturma (mm)	Maksimum deformasyonun meydana geldiği yük (kN)	Jetgrout Kolonun Azami Kapasitesi (kN)	İzin verilebilir kapasitesi (ton) (FS = 2.0)
PM3/T1	21.8	1321	1200	60
PM3/T2	27.5	1464	1200-1300	60-65
PM3/T3	27.5	1321	1200-1300	60-65
PM3/T4	8.5	1000*	>1000	> 50
PM3/T5	47.0	1357	1200	60

* Bu test kolonu 1000kN yüklendiğinde zıt kolonlardaki çelik ankrajlardan biri beklenmedik bir şekilde kaydığı için kolon azami kapasiteye kadar yüklenememiştir.

Yükleme deneylerinden elde edilen değerler, oturma-yük ve oturma-zaman grafikleri olarak Ek-A'da verilmektedir. Sahada gerçekleştirilen yüklemeye deneyleri ise Şekil 11.8, Şekil 11.9, Şekil 11.10'da verilmektedir.

Test kolonlarının yük kapasitelerini güvenli bir şekilde tesbit edebilmek için yüklemeye dizayn yükünün %12.5 ile basamaklar halinde yapılmıştır. Yüklemeye esnasındaki nihai yük dizayn yükünün %200'ü olana kadar yüklenmiştir.

11.6.5. Laboratuvar Deney Sonuçları

Teşkil edilen jetgrout kolonlardan alınan karot numuneler üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karot numuneler önce paralel yüzeyler elde edilecek şekilde her iki ucundan kesilmiştir. Sonra tam düzlüğü sağlamak üzere iki yüzeye kükürt başlık yapılmıştır. Yapılan boyut ölçümleri ile ölçülen basınç dayanımı değerleri aşağıda Tablo 11.8'de verilmiştir.

Tablo 11.8. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Basınç Deneyi Sonuçları

No	Kolon No	Yaşı (gün)	Karot çapı (mm)	Karot boyu (mm)	Basınç dayanımı (kg/cm ²)
1	*	>28	92	170	47.0
2	803	>28	92	175	103.0
3	781	>28	92	180	69.0
4	R70	>28	92	155	22.0
5	682	>28	92	180	21.0
6	778	>28	92	140	113.0
7	837	>28	92	130	75.0
8	509	>28	92	115	**
9	348 (çevre)	23	95	100	66.5
10	66 (çevre)	26	95	115	63.6
11	204	17	95	150	44.9
12	66 (radye)	15	95	155	61.5

**Karot numunesi kesme işlemi sırasında hasar görmüştür.



Şekil 11.8. Deneme kolonu üzerinde yapılan yükleme deneyi



Şekil 11.9. Yükleme deneyinde kullanılan hidrolik kriko



Şekil 11.10 Deneyde kullanılan germe makinesi

11.6.6. CPT Deneyleri

Jetgrouting uygulamasından önce ve sonra sözkonusu sahada CPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla uygulamadan önce 16 ve uygulamadan sonra 16 adet olmak üzere toplam 32 adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen CPT deneylerinin konumları Şekil 11.11’de verilmektedir. Uygulamadan sonra yapılan CPT deneyleri, uygulamadan önce yapılan CPT deneyleri ile aynı konumlarda yapılmıştır [37].

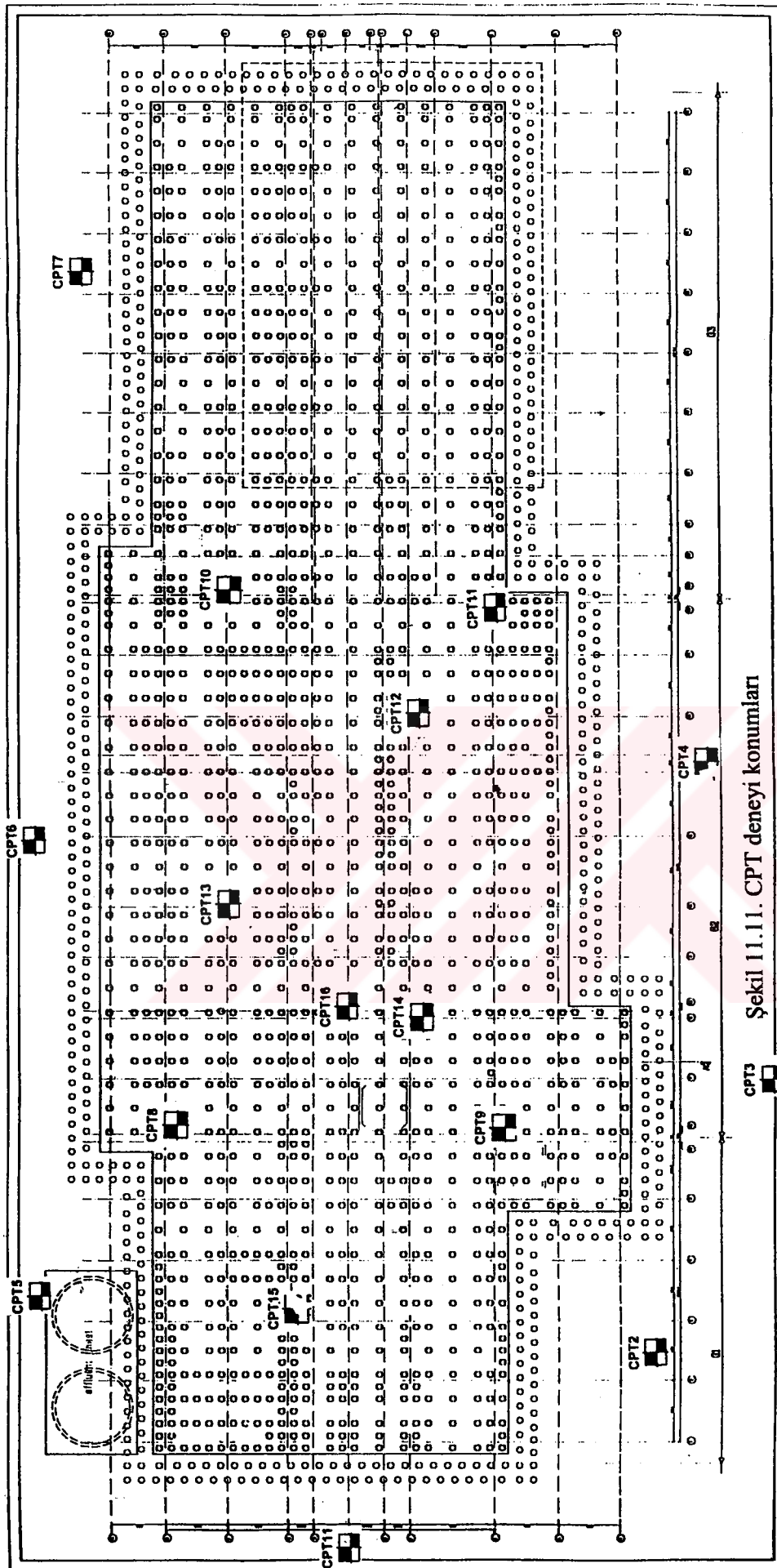
CPT1, CPT2 ve CPT3 no’lu CPT deneyleri jetgrout uygulama sahası dışında gerçekleştirilmiştir. Ek B’de verilen grafiklerden de görüldüğü üzere jetgrout uygulaması bu deneylerin yapıldığı konumlarda yeralan zeminde bir değişiklik yapmamıştır.

CPT4, CPT5, CPT6 ve CPT7 no’lu CPT deneyleri de jetgrout uygulama sahası dışında gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde kum tabakasında sıkışma meydana geldiği görülmektedir (Ek B). Kum tabakasında meydana gelen bu sıkışma jetgrout uygulamasının etkisi sonucu olabileceği gibi bu deneylerin yapıldığı konumlarda blok ile karşılaşılması şeklinde de açıklanabilir.

CPT8 no’lu CPT deneyi jetgrout uygulama sahası içinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde yaklaşık dolgu derinliğinde çok büyük uç mukavemeti ölçülmüştür. Bu CPT deneyinin jetgrout kolonu üzerinde yapılmış olması mümkündür (Ek B).

CPT9,...,CPT16 no’lu CPT deneyleri de jetgrout uygulama sahası içinde gerçekleştirilmiştir. Ek B’de verilen grafiklerden de görüldüğü üzere siltli kum tabakasında jetgrout uygulaması sonucu sıkışma meydana gelmiş ve ve daha yüksek uç mukavemeti değerleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, uygulamadan önce ve sonra yapılan CPT deneylerinden, jetgrouting uygulamasının, PM3 yapısının teşkil edileceği alanda mevcut olan kumlu-siltli zemin tabakasını sıkılaştırdığı görülmektedir. Bu sebeple gevşek kum ve siltlerde görülen sıvılaşma problemi önlenmektedir. Zemin yüzeyine yakın kil tabakada jetgrouting uygulamasından sonra yapılan CPT deneylerinde uç mukavemetinin %20-50 oranında arttığı belirlenmiştir. Jetgrouting uygulamasından önce ve sonra yapılan



CPT deneylerinden belirlenen zeminin drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi Şekil 11.12’de verilmektedir.

11.7. Sonuçların Değerlendirilmesi

PM3 tesisinin inşa edileceği sahada zemin sıvılaşmasını önlemek ve bunun yanında taşıyıcı yapısal elemanlar olarak kullanılmak üzere jetgrouting uygulaması gerçekleştirilmiştir.

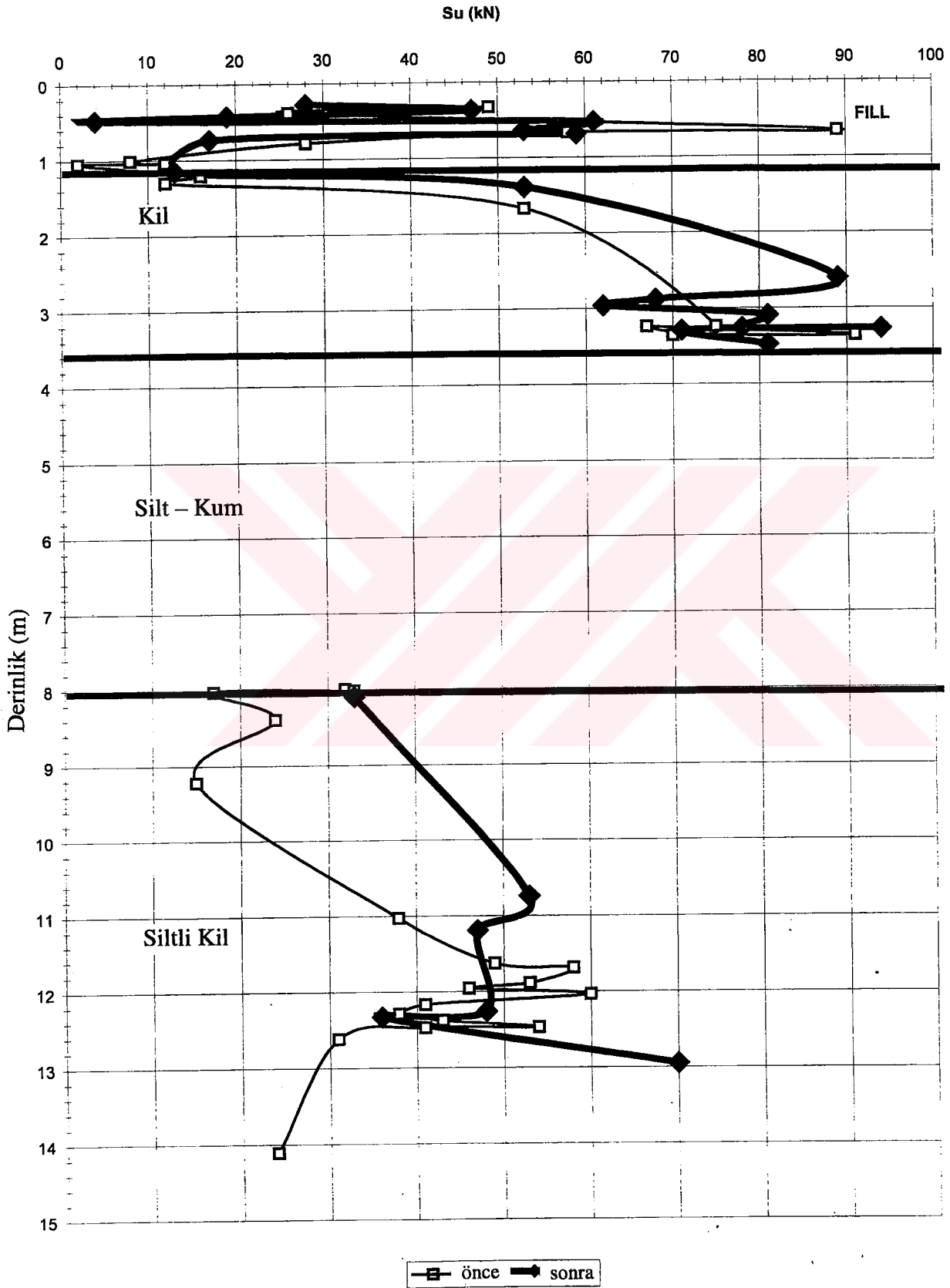
Yapılan kontrol ve deneylerle uygun çalışma parametreleri seçilmiş ve çalışmalar bu doğrultuda yürütülmüştür. Söz konusu PM3 yapısı için toplam 2174 adet $\phi 60\text{cm}$ çaplı jetgrout kolonu teşkil edilmiştir.

Projede istenilen çap ve mukavemet özelliklerinin korunması amacıyla kolon çapları uygulama sonrası deneme kazısı yapılarak yerinde ölçülmüş ve kolonlardan karot örnekleri alınarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Yapılan deneme kazılarında kolon çaplarının 60cm-90cm mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Kolonlardan alınan karot numuneler üzerinde yapılan basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımları 21.0 kg/cm^2 ile 113.0 kg/cm^2 olarak bulunmuştur.

Kolonların yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için ise test kolonları üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneylerinde izin verilebilir kolon kapasitesi 60-65 ton olarak bulunmuştur.

Söz konusu sahada uygulamadan önce onaltı (16) ve uygulamadan sonra onaltı (16) adet olmak üzere toplam otuziki (32) adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. CPT deneylerinden elde edilen veriler değerlendirilerek, jetgrouting uygulamasının, PM3 yapısının teşkil edileceği alanda mevcut olan kumlu-siltli zemin tabakasını sıkılaştırdığı görülmüştür. Zemin yüzeyine yakın kil tabakasında da jetgrouting uygulamasından sonra yapılan CPT deneylerinde uç mukavemetinin %20-50 oranında arttığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen uygulama sonunda yapılan kontrol ve deney sonuçlarına göre istenilen mukavemet özellikleri ile zemin parametrelerine ulaşıldığı belirlenmiştir.



Şekil 11.12. Drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi

Jetgrouting uygulamasının gevşek siltli kum tabakası içerisindeki sıkıştırma etkisi doğrulanmış ve böylece, gevşek kum ve silt zeminlerde görülen sıvılaşma potansiyeli ortadan kaldırılmıştır.

Uygulamanın tamamı 65 günde bitirilmiş olup jetgrouting yönteminin kullanılması gerek maliyet ve gerekse uygulama hızı açısından istenilen sonucu vermiştir.



12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında jetgrouting yönteminin uygulanışı, uygulamada kullanılan ekipman ve araçlar, uygulama teknikleri, uygulamanın başarısını belirleyen çalışma parametreleri, iyileştirilmiş zeminin fiziksel özellikleri, yöntemin avantajları, limitleri ve uygulamada dikkat edilmesi gereken hususlar, yöntemin tasarım esasları, uygulamanın kalite kontrolü, yöntemin uygulama alanları ile yöntemin uygulandığı bir vaka çalışması detaylı olarak incelenmiştir.

Vaka çalışması olarak, İpekkağıt San.ve Tic. A.Ş.'nin Yalova'nın Tokmakköyü Altınova Mevkii'nde yeralan fabrika tesisleri içerisinde inşa edilmesi planlanan ilave PM3 yapısının temel zeminini iyileştirmeye yönelik gerçekleştirilen jetgrouting uygulaması, projenin her aşamasında bizzat izlenerek detaylarıyla tez çalışmasına dahil edilmiştir.

Proje kapsamında PM3 yapısının zemin ve temel mühendisliği değerlendirmelerine yönelik zemin etüdüleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen veriler ışığında yapılan analizler neticesinde sözkonusu zeminde oturma problemi ve sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

Bu durum neticesinde kazıklı temel ve jetgrout kolon uygulaması olarak iki alternatif temel sistemi önerilmiştir. Yapılan maliyet ve zaman analizleri sonucunda jetgrout kolon uygulaması İdare tarafından tercih edilmiştir.

Uygulanacak sistem ve çalışma parametreleri belirlenerek $\phi 60$ cm çaplı, toplam 23,600 m boyunda radye altı, kuşaklama (sıvılaşma potansiyeline karşı) ve test kolonu olmak üzere toplam 2174 adet jetgrout kolon teşkil edilmiştir. Projede tekli jet sistemi uygulanmış olup enjeksiyon basıncı 500-550 bar, tijin geri çekilme hızı 55 cm/dak., tijin dönme hızı 21 devir/dak., enjeksiyon memesi sayısı 2, enjeksiyon memesi çapı 2.0mm, çimento miktarı 450 kg/m^3 ve su/çimento=1 olarak kullanılmıştır.

Uygulamanın kalite kontrolü dört ayrı yöntem ile yapılmıştır. Çap ve düşeylik kontrolü için deneme kazısı yapılmış ve kolonlar belli bir seviyeye kadar açılarak projede öngörülen çapın sağlanıp sağlanmadığı görülmüştür. Yapılan deneme kazılarında kolon çaplarının 60cm-90cm mertebesinde olduğu belirlenmiştir.

Kolonlardan karot numuneleri alınmış ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları 21.0 kg/cm^2 ila 113.0 kg/cm^2 olarak bulunmuştur.

Kolonların yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için ise beş (5) adet test kolonu üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneylerinde izin verilebilir kolon kapasitesi 60-65 ton olarak bulunmuştur.

Son olarak da sözkonusu sahada uygulamadan önce onaltı (16) ve uygulamadan sonra onaltı (16) adet olmak üzere toplam otuziki (32) adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. CPT deneylerinden elde edilen veriler ışığında, jetgrouting uygulamasının, PM3 yapısının teşkil edileceği alanda mevcut olan kumlu-siltli zemin tabakasını sıkılaştırdığı görülmüştür. Zemin yüzeyine yakın kil tabakasında da jetgrouting uygulamasından sonra yapılan CPT deneylerinde uç mukavemetinin %20-50 oranında arttığı belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen uygulama sonunda yapılan kontrol ve deney sonuçlarına göre istenilen mukavemet özellikleri ile zemin parametrelerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Uygulama 65 gün gibi kısa bir sürede başarılı bir şekilde tamamlanarak gerek maliyet ve gerekse zaman açısından istenilen sonucu sağlamıştır.

Jetgrouting yöntemi çok farklı zemin koşullarında ve çok geniş uygulama alanlarında uygulanabilmekte ve gerek maliyet, gerekse zaman açısından diğer zemin iyileştirme yöntemlerine geçerli bir alternatif olmaktadır.

Bunun yanında jetgrouting yöntemi ile diğer zemin iyileştirme yöntemleri arasındaki en büyük fark elde edilecek zemin parametreleri ve maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilmesidir.

Yöntemde kullanılacak çalışma parametrelerinin seçimi, arazide karşılaşılan zemin koşullarına ve teşkil edilecek kolonların istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Yüksek Basıncılı enjeksiyon yönteminin teknik ve ekonomik açıdan başarılı

olması, bu yöntemin bağlı olduğu parametrelerin uygun biçimde seçimine bağlıdır. Uygulanacak sistem, teşkil edilmesi istenen kolon çapına göre seçilmelidir.

Jetgrouting yönteminde tek ve kesin bir hesap yöntemi oluşturmak mümkün değildir. Dolayısıyla, şantiyelerdeki deneyim sonuçlarının teori ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi bu inşaat metodunun geliştirilmesinde çok önemlidir.



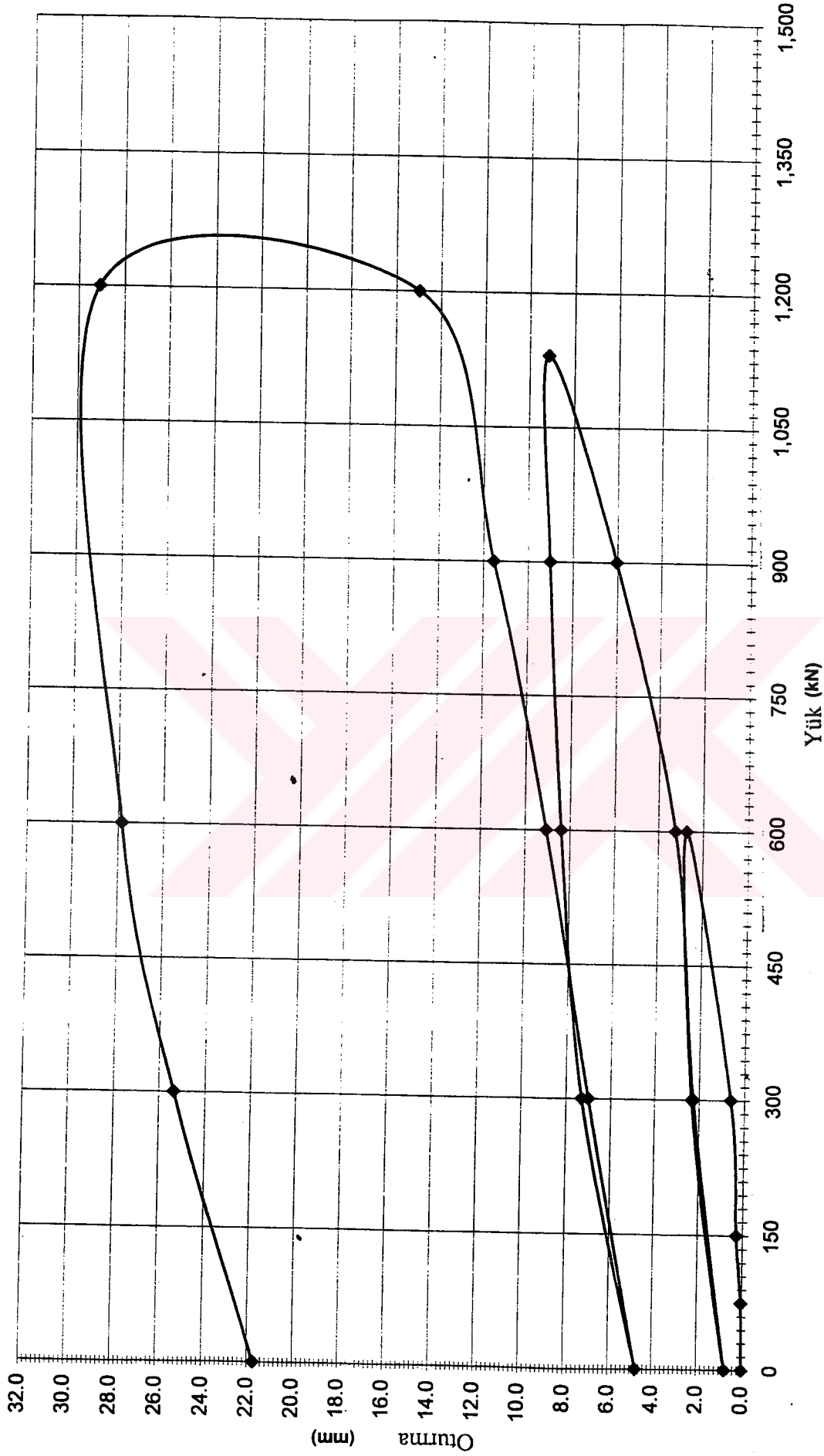
KAYNAKLAR

- [1] **Okyay, S.**, 1987. Yüksek Basıncılı Enjeksiyon, Dahili Rapor, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul.
- [2] **ISSMFE-TC-17**, 1998. Jet Grouting, <http://wolf.poly.edu/jet-grouting.htm>
- [3] **Gallavresi, F.**, 1992. Grouting Improvement of Foundation Soils, Proceedings of the Conference of Grouting, Soil Improvement and Geosyntetics, New Orleans, Louisiana, 25-28 February 1992, Vol. 1, pp. 1-38, ASCE, New York.
- [4] **Kutzner, C.**, 1996. Grouting of Rock and Soil, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [5] **Bell, F. G.**, 1993. Enginnering Treatment of Soils, E & FN Spon, London.
- [6] **Hausmann, M. R.**, 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, Singapore.
- [7] **Moseley, M. P.**, 1993. Ground Improvement, Chapman & Hall, Boca Raton.
- [8] **Sağlam, A.**, 1996. Temel İnşaatı II Ders Notları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [9] **Van Impe, W. F.**, 1989. Soil Improvement Techniques and their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [10] **Nonveiller, E.**, 1989. Grouting Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam.
- [11] **Henn, R. W.**, 1996. Practical Guide to Grouting of Underground Structures, Thomas Telford, London.
- [12] **Welsh, J. P. and Burke, G. K.**, 1991. Jet Grouting – Uses for Soil Improvement, Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress 1991, Boulder-California, 10-12 June 1991, Vol. 1, pp. 335-345, ASCE, New York.
- [13] **Toğrol, E.**, 1998. Jetgrout Kolonlarının Yapımında Kalite Denetimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi Notları, İstanbul, 22-23 Ekim 1998, Cilt 2, s. 393-402, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [14] **Juran, I.; Ider, H. M. and Acar, Y. B.**, 1988. Soil Improvement Methods for Reinforcing Foundation Soils-Jet Grouting and Compaction Grouting, Vol. 7, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- [15] **Schaefer, V. R.**, 1997. Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment Developments 1987-1997, Proceedings of Sessions sponsored by the Committee of Soil Improvement and Geosynthetics of the Geoinstitute of the ASCE, Geotechnical Special Publication No:69.
- [16] **Melegari, C. and Garassino, A. L.**, 1997. Seminar on Jet Grouting, CI-Premier Pte. Ltd., Singapore.
- [17] **Kauschinger, J. L.; Perry, E. B. and Hankour, R.**, 1992. Jet Grouting: State of the Practice, Proceedings of the Conference of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, New Orleans, Louisiana, 25-28 February 1992, Vol. 1, pp. 169-181, ASCE, New York.
- [18] **Gökmen, C.**, 1992. Compaction Grouting and Jet Grouting, CE 7335, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- [19] **Welsh, P.**(editor), 1987. Soil Improvement – A Ten Year Update, Geotechnical Special Publication, No: 12, ASCE, New York.
- [20] **Durgunoğlu, H. T.; Kulaç, F. H.; Oruç, K.; Öge, C. E. and Eker, F. Ş.**; 1998. Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirmesi Üzerine Bir Uygulama, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi Notları, İstanbul, 22-23 Ekim 1998, Cilt 2, s. 438-449, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] **Bruce, D. A. and Pellegrino, G.**, 1998. Jet Grouting for Solving Tunneling Problems in Soft Clays, <http://www.nicholson-rodio.com/papers/bruce/clay.htm>
- [22] **ICE Far East Pte Ltd.**, 1998. Casagrande Jet Grouting Equipment, <http://www.iceusa.com/casajet.htm>
- [23] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, Fotoğraf arşivi.
- [24] **Pagani Geotechnical Equipment**, 1997. Jet Grouting Recording Data JGR-2, <http://www.pagani-geotechnical.com/immagini/jumbo.jpg>
- [25] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1997. Migros/Ankara (GİMAT) Hipermarket ve Alışveriş Merkezi Temel Mühendisliği Etüd ve Değerlendirme Raporu, İstanbul.

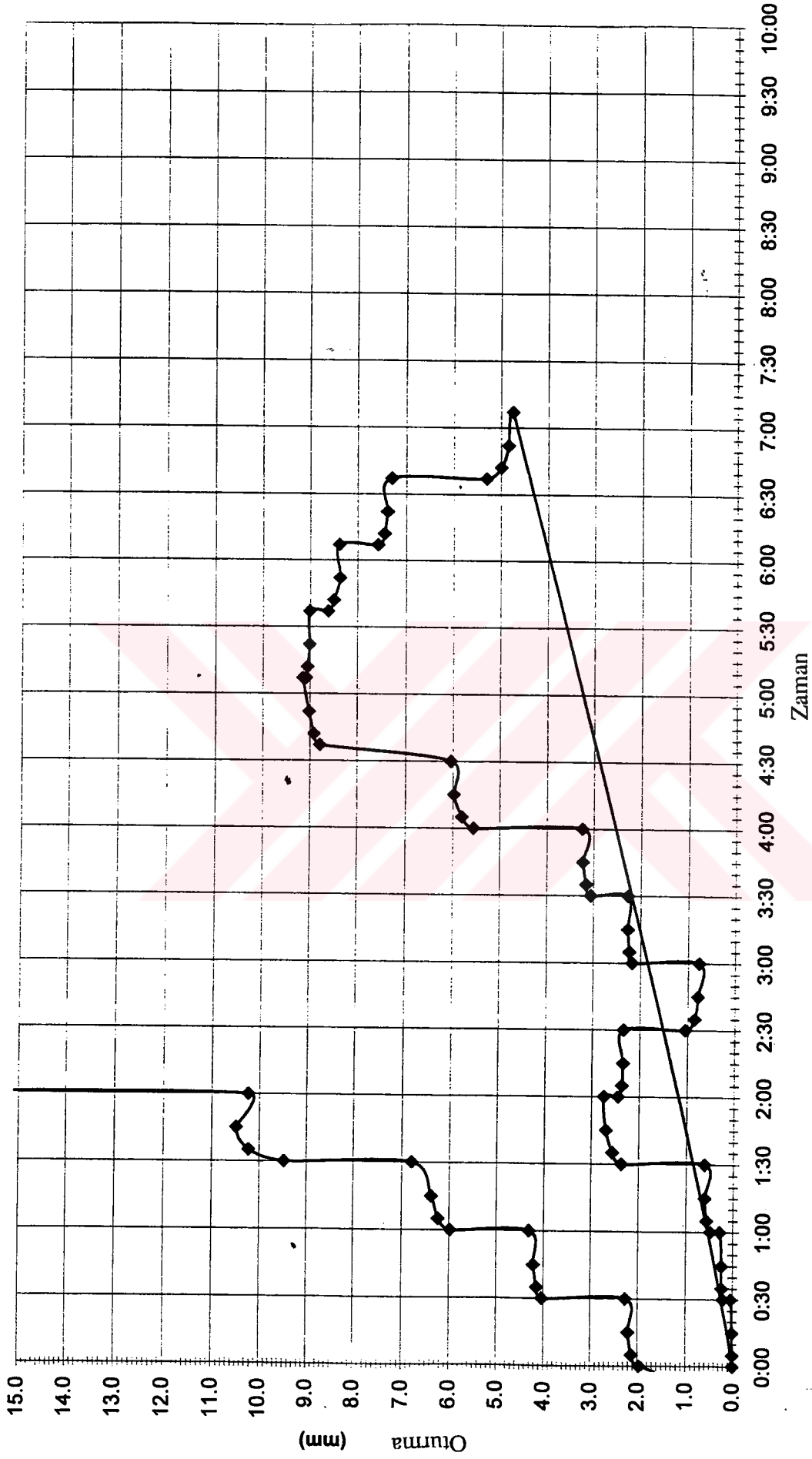
- [26] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1998. İzmir Atıksu Arıtma Tesisi Alanı / Çıgli Jet Grout Kolonların Yükleme Deneyleri Değerlendirme Raporu, İstanbul.
- [27] **STFA Temel Araştırma A.Ş.**, 1998. Jetgrouting Uygulamaları, İstanbul.
- [28] **ISSMFE-TC-17**, 1998. Jet Grouting, <http://wolf.poly.edu/jet-grouting.htm/jet3>
- [29] **Golder Associates**, 1998. Shallow Tunnel Excavation Using Jet Grouting, Italy. <http://www.golder.com/ww/ts/92125/92125pl.gif>
- [30] **Jetting s.r.l.**, 1998. Jet Grouting Applications, <http://www.jetting.it/schemi.htm>
- [31] **Grisham and Sondermann**, 1998. Extraction of Contaminated Soils Using High Pressure Jet Grouting, <http://ce.ecn.purdue.edu/CEM/Ciiproj/Other/jetgext.htm>
- [32] **Committee on Earthquake Engineering**, 1985. Liquefaction of Soils During Earthquakes, National Academy Press, Washington D.C.
- [33] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1997. İpekkağıt San. ve Tic. A.Ş. Karamürsel Fabrikası İlave Tesisleri Zemin ve Temel Mühendisliği Etüd ve Değerlendirme Raporu, İstanbul.
- [34] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1998. İpekkağıt / Karamürsel Factory Annex Building Soil and Foundation Engineering Evaluations, İstanbul.
- [35] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1998. İpekkağıt / Karamürsel PM3 Project Jet Grout Hesap Raporu, İstanbul.
- [36] **Tezcan, S. S.**, 1988. Marmara Bölgesi Maksimum Zemin İvmeleri Tahminleri, Deprem Araştırma Bülteni, Vol. 62, s. 46-60.
- [37] **ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş.**, 1999. İpekkağıt / Karamürsel Factory CPT Tests before and After Jetgrout Application in PM3 Area Evaluation Report, İstanbul.

PM3/T-1 (JG-278)



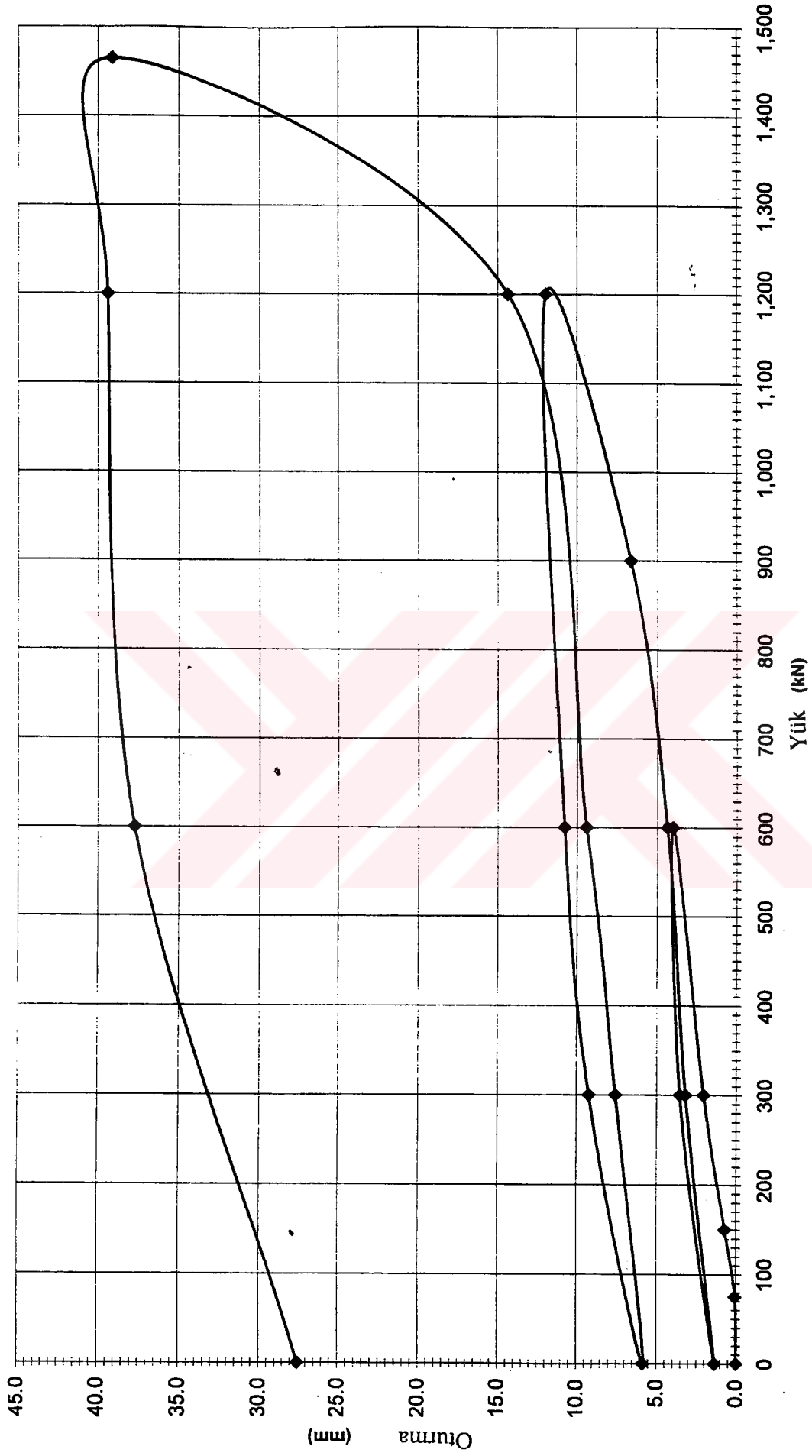
Şekil A.1. PM3/T-1 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Yük Grafiği

PM3/T-1 (JG-278)



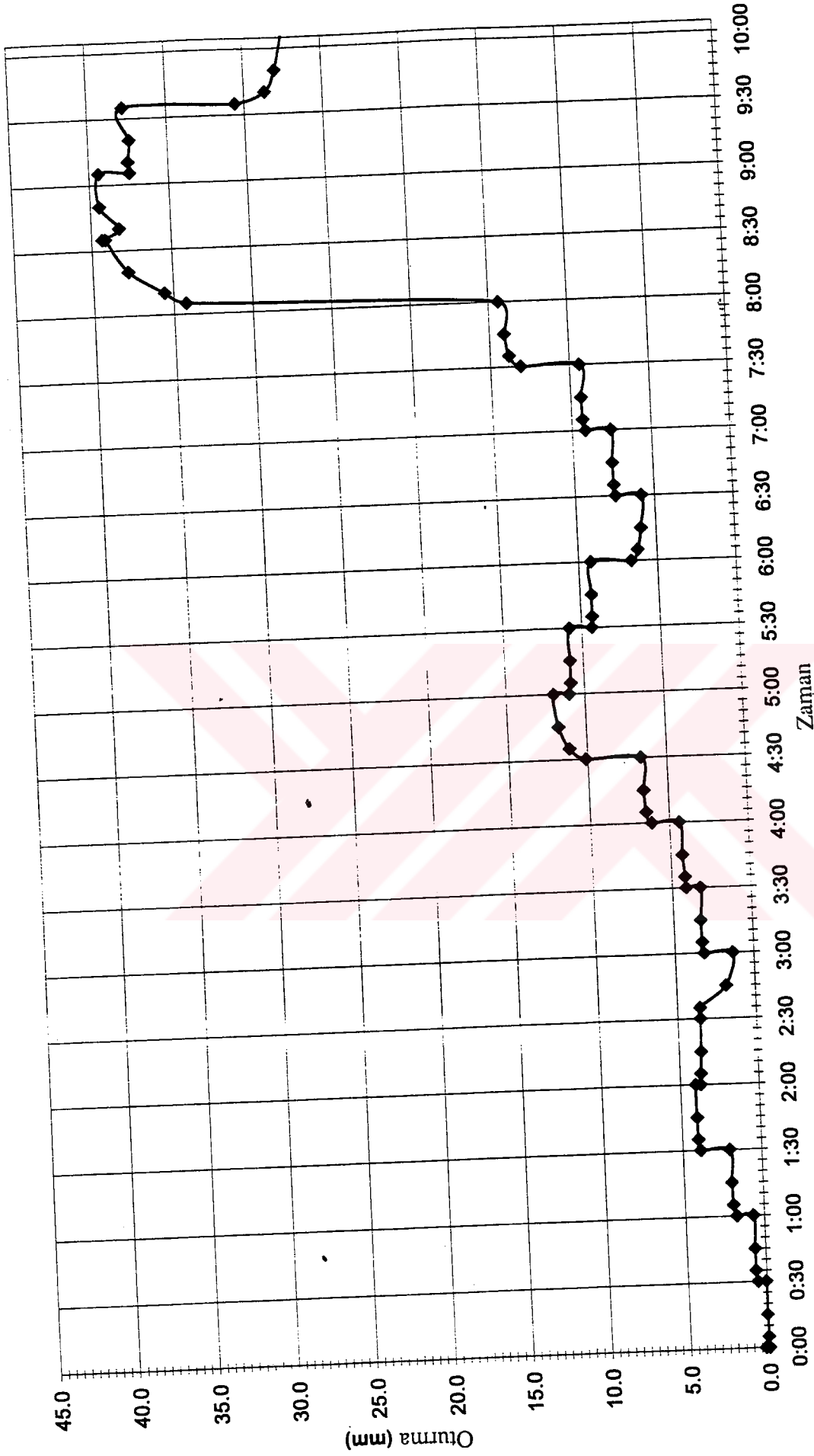
Şekil A.2. PM3/T-1 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Zaman Grafiği

PM3/T-2 (JG-304)



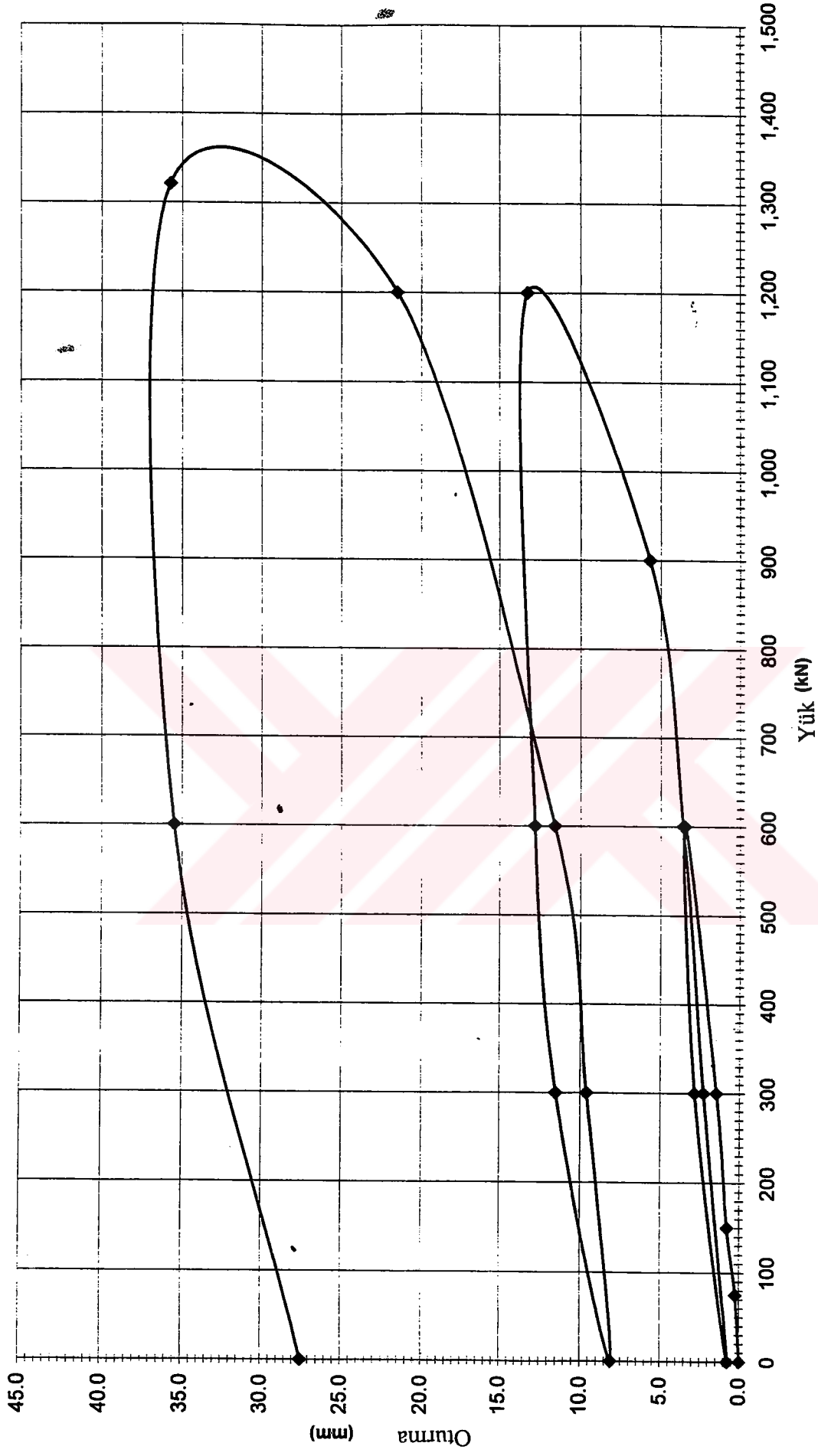
Şekil A.3. PM3/T-2 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Yük Grafiği

PM3/T-2 (JG-304)



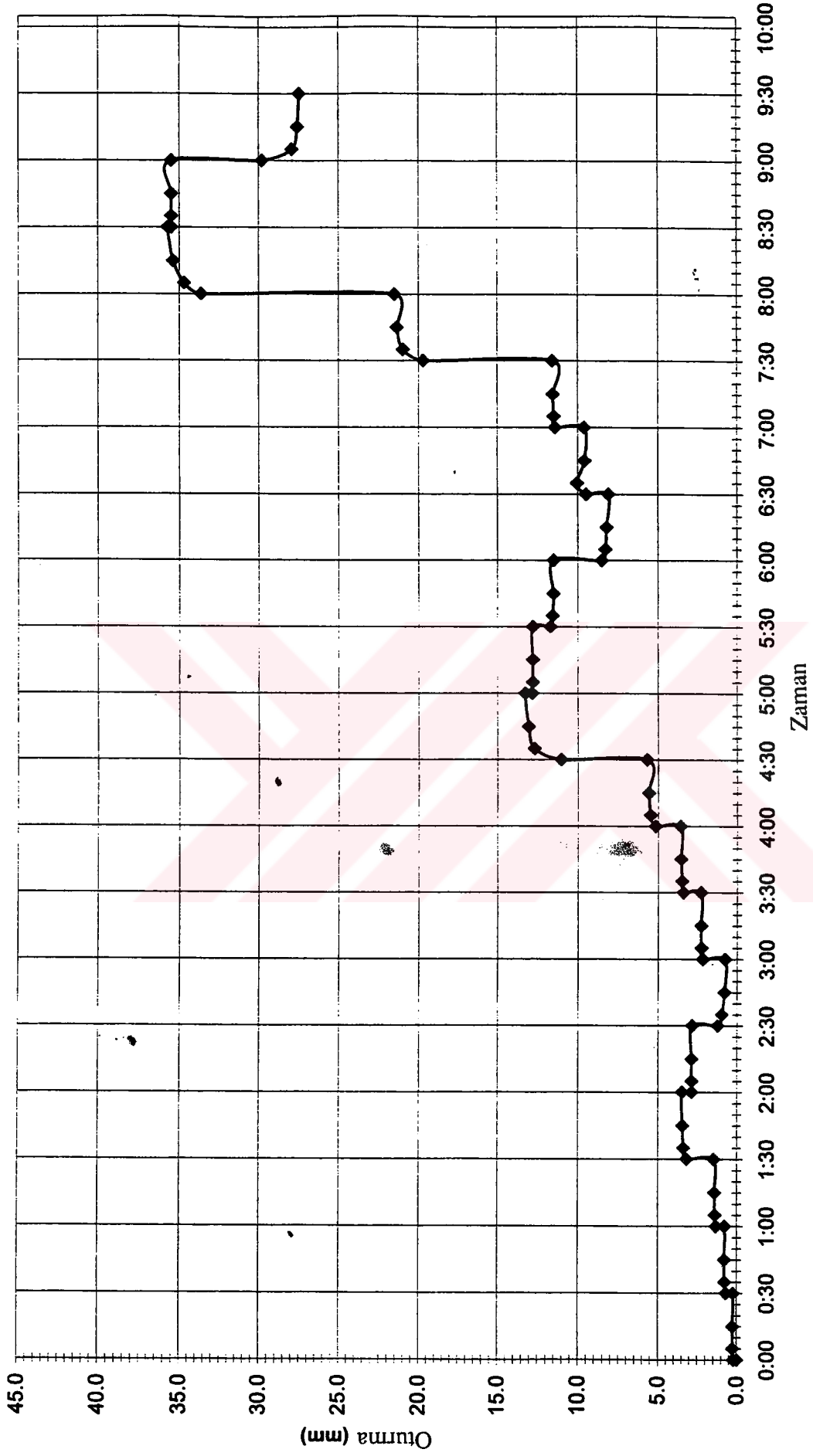
Şekil A.4. PM3/T-2 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Zaman Grafiği

PM3/T-3 (JG-105)



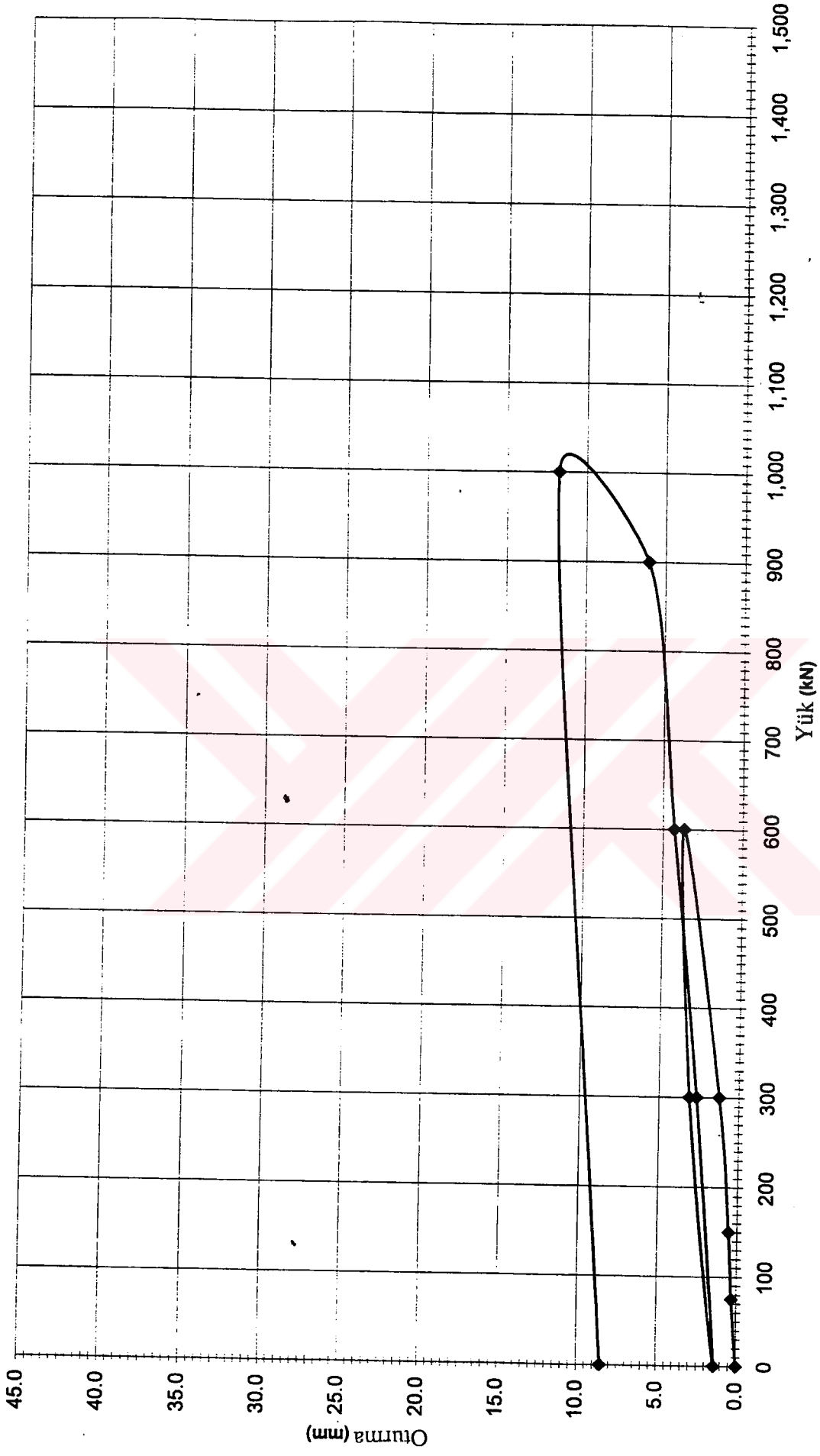
Şekil A.5. PM3/T-3 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Yük Grafiği

PM3/T-3 (JG-105)



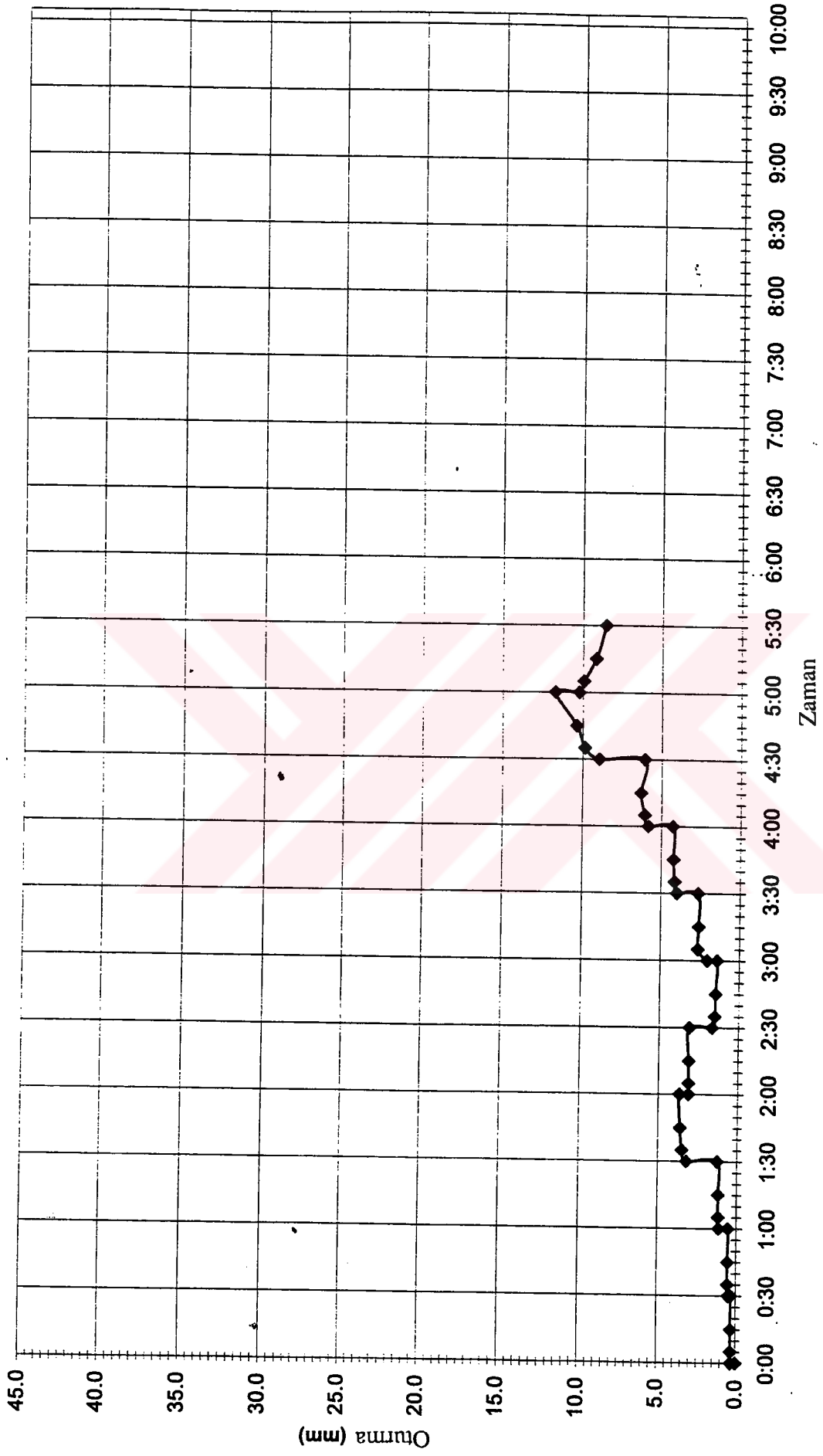
Şekil A.6. PM3/T-3 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Zaman Grafiği

PM3/T-4 (JG-198)



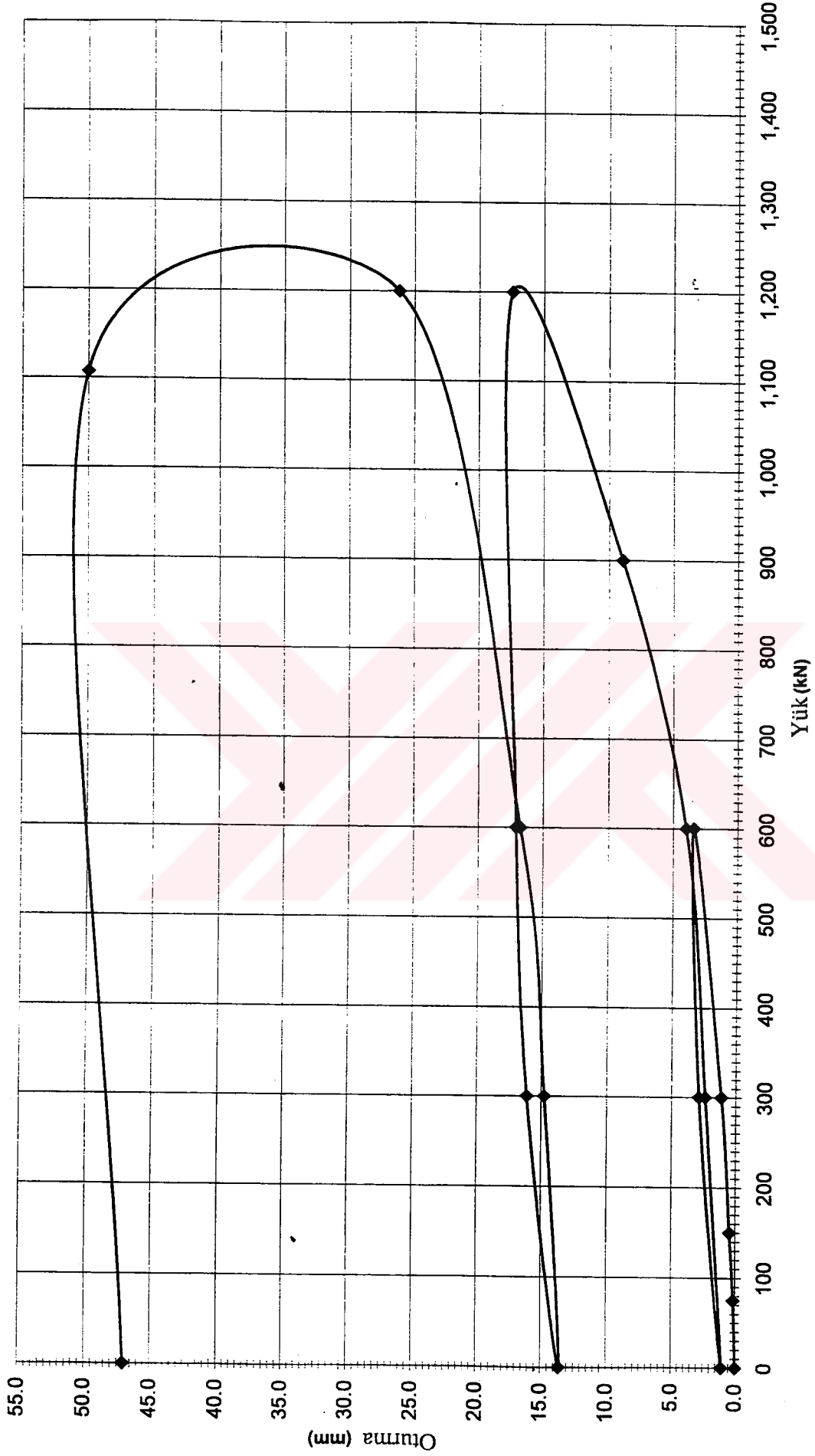
Şekil A.7. PM3/T-4 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Yük Grafiği

PM3/T-4 (JG-198)



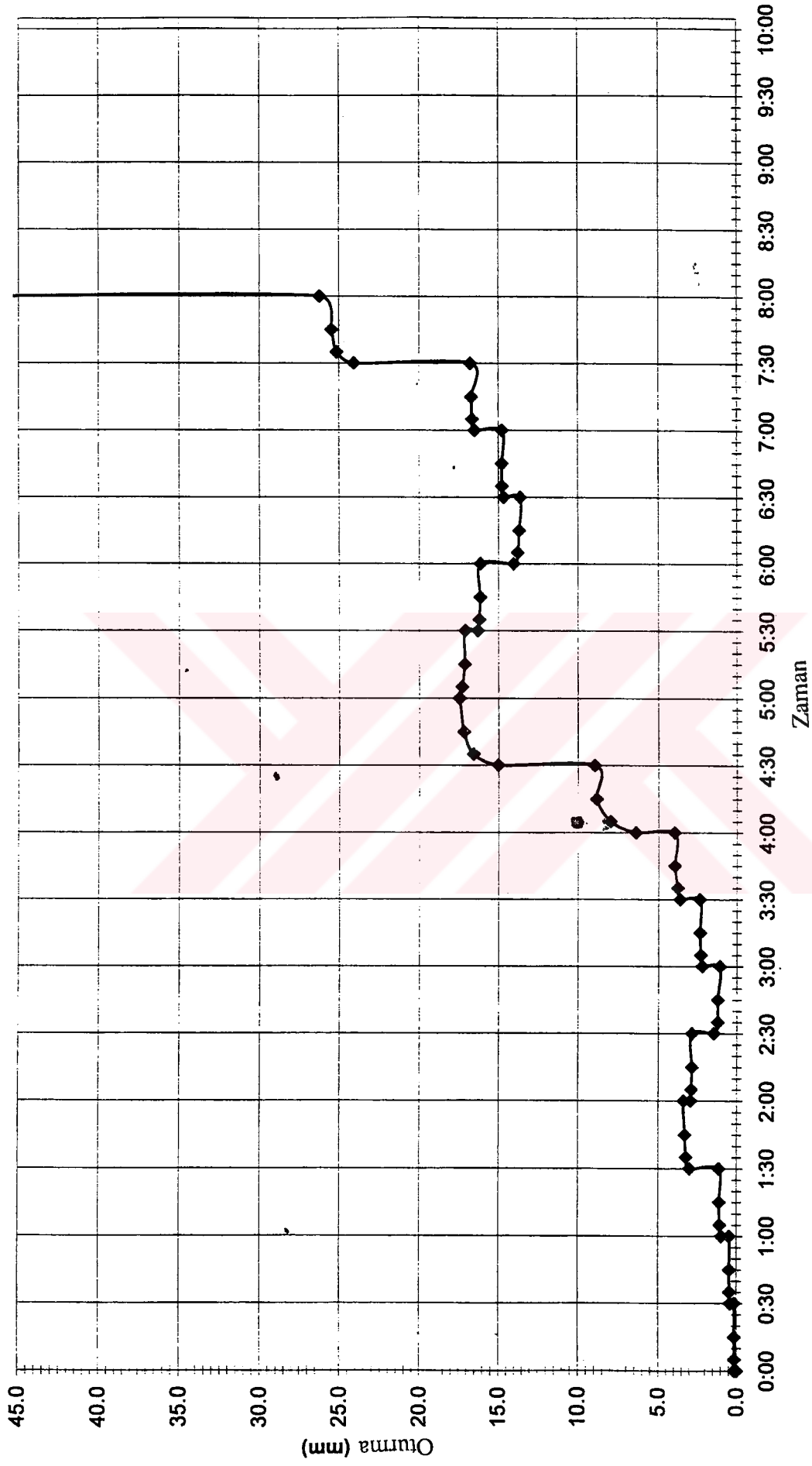
Şekil A.8. PM3/T-4 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Zaman Grafiği

PM3/T-5 (JG-409)



Şekil A.9. PM3/T-5 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Yük Grafiği

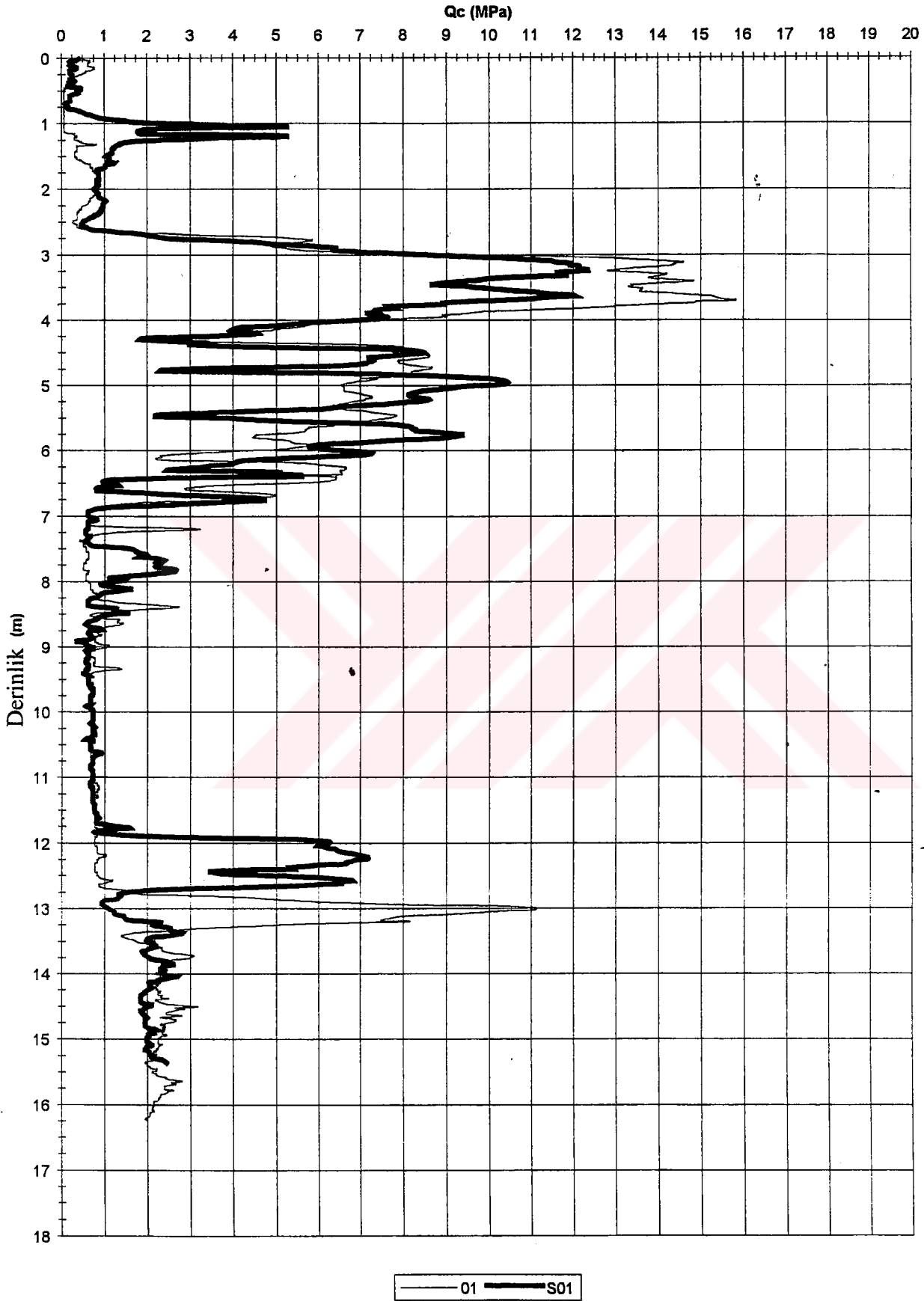
PM3/T-5 (JG-409)



Şekil A.10. PM3/T-5 Kolonu Yükleme Deneyi Oturma-Zaman Grafiği

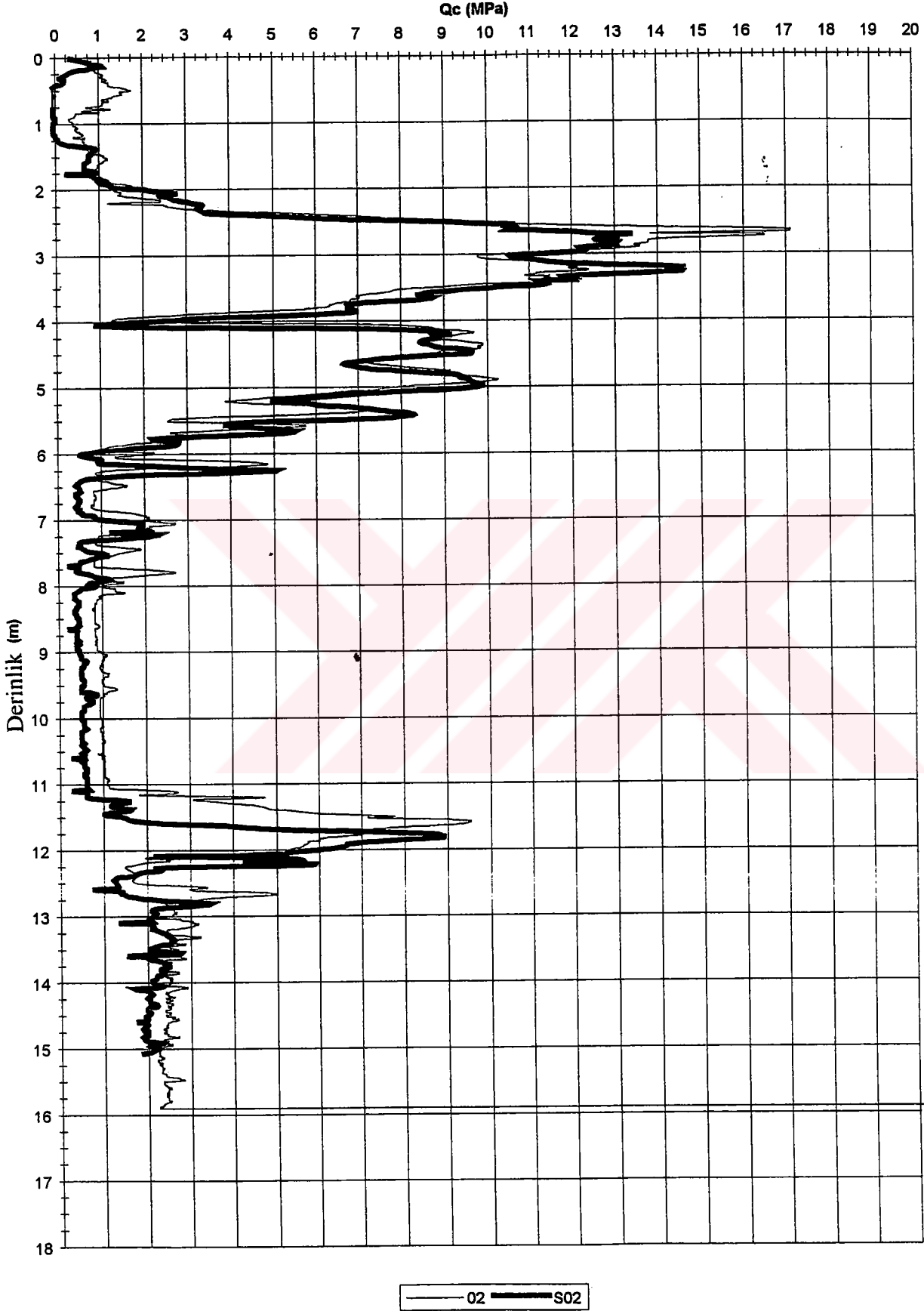
EK-B

CPT 01 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



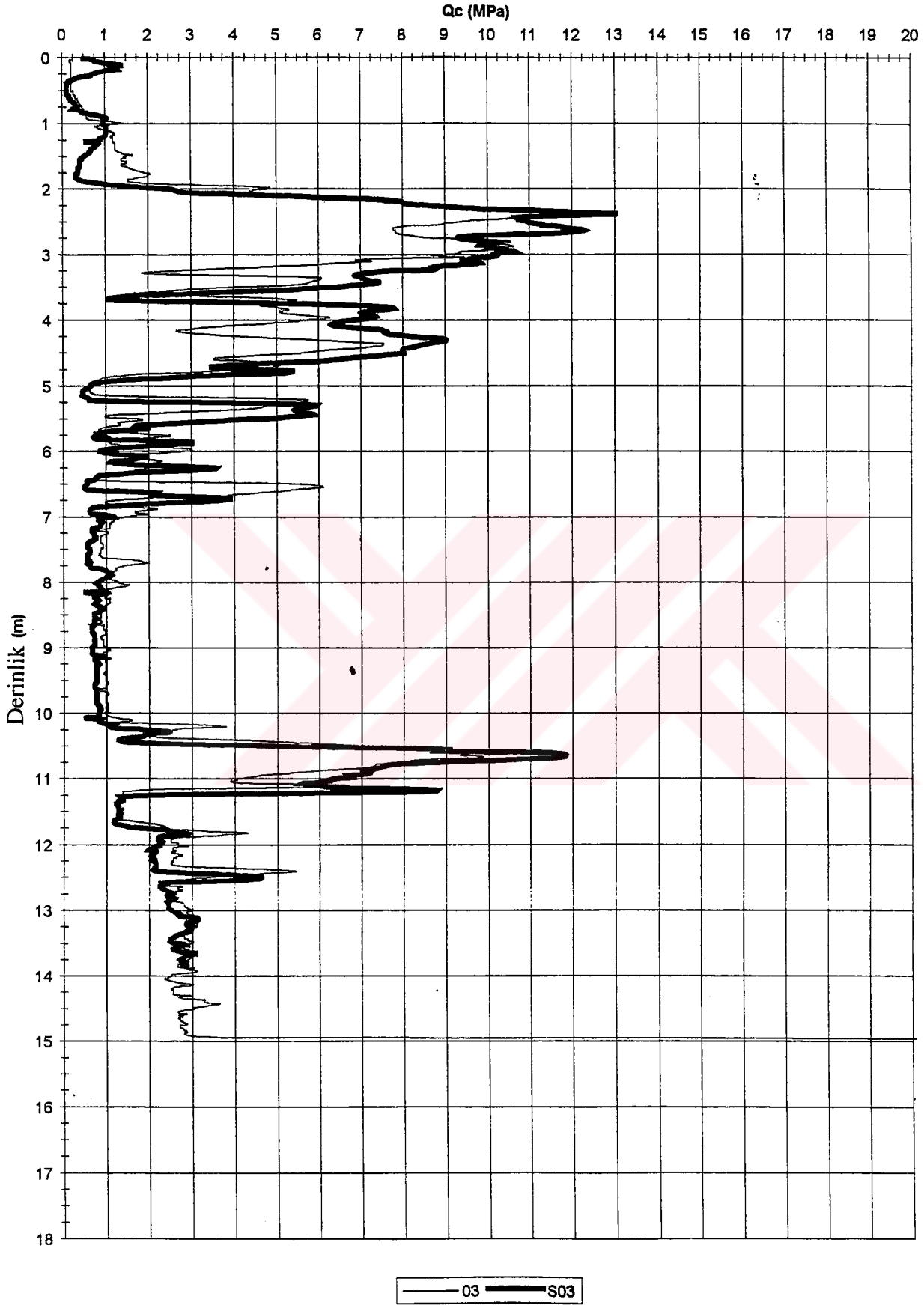
Şekil B.1. CPT 01 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 02 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



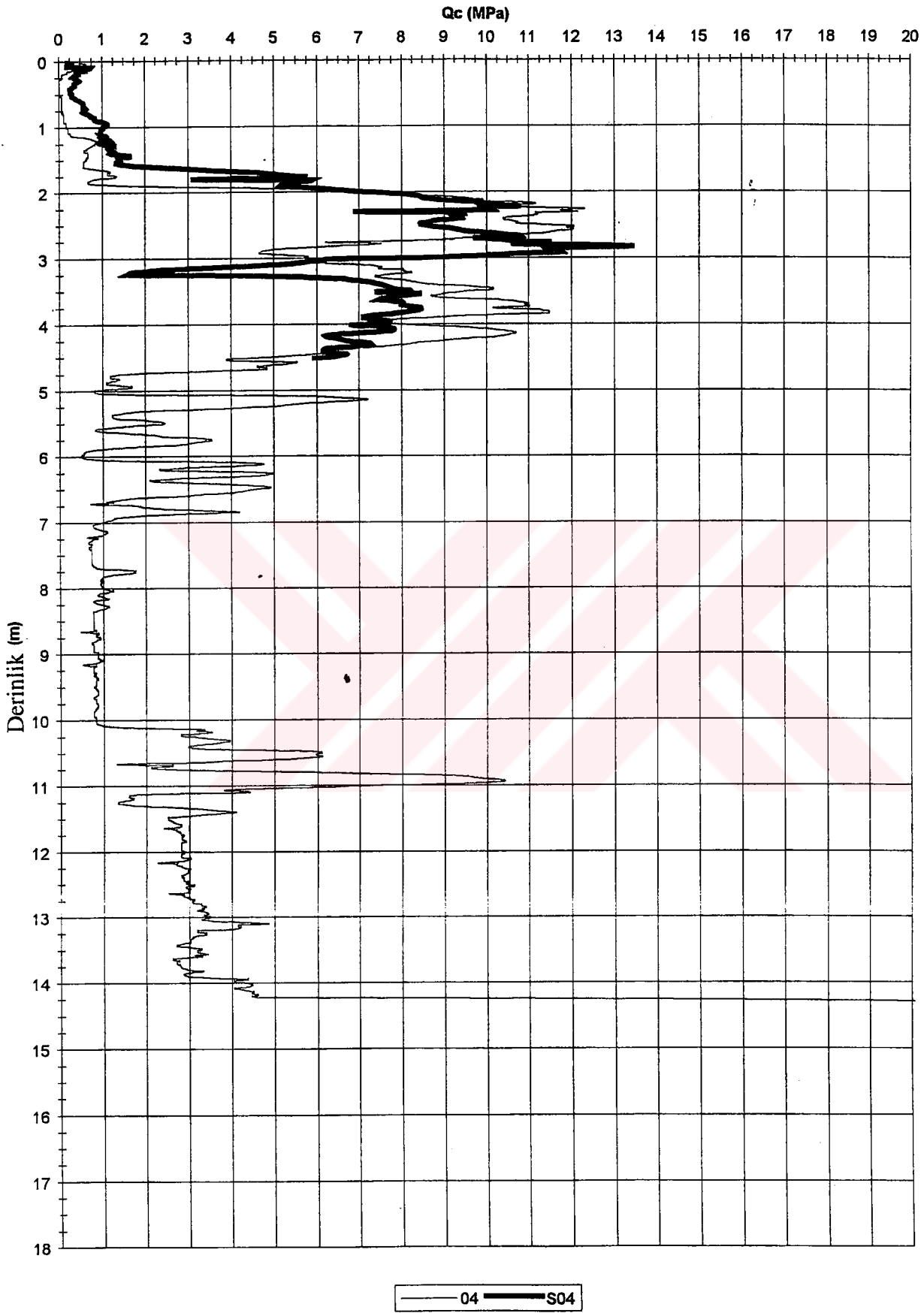
Şekil B.2. CPT 02 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 03 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



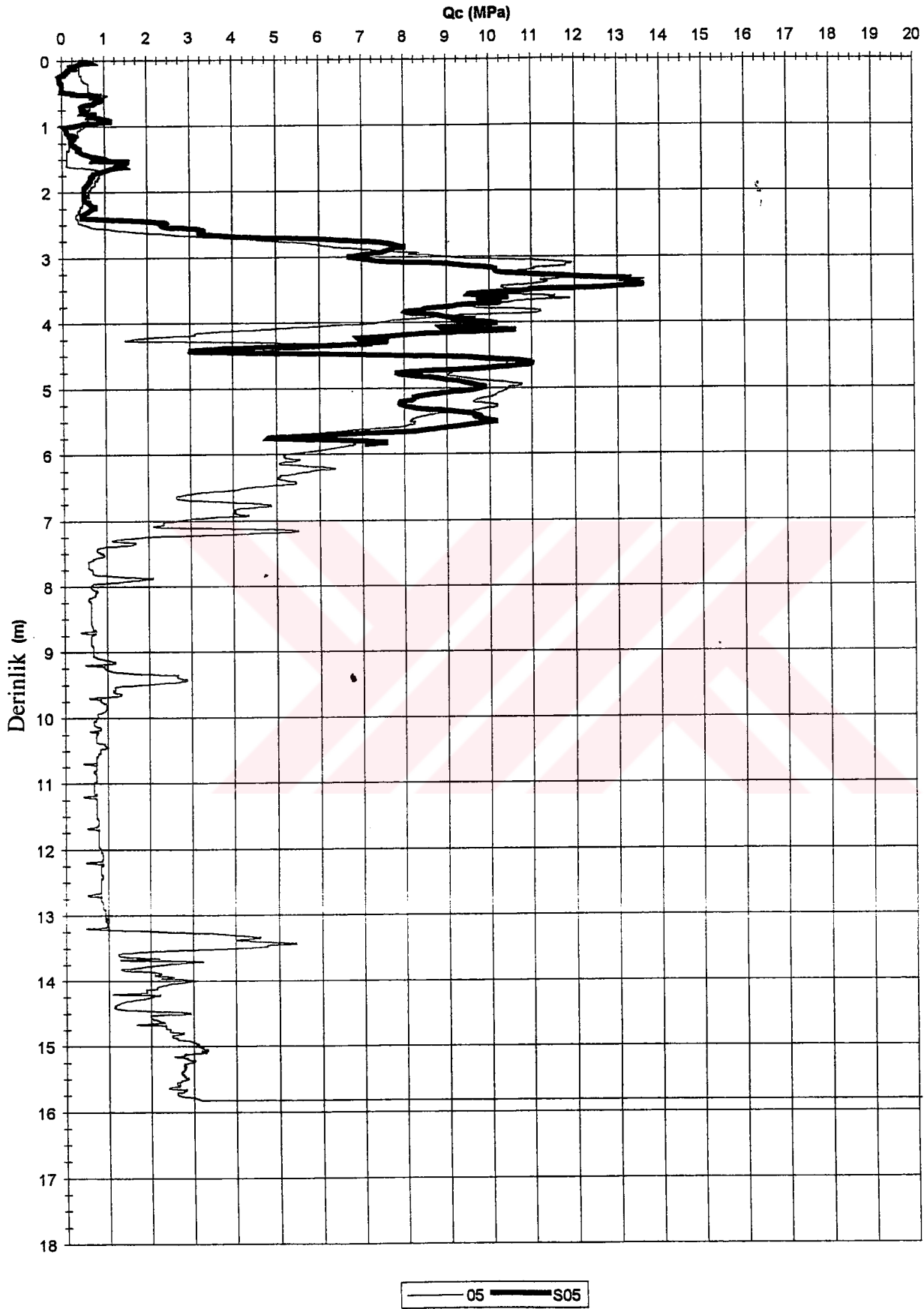
Şekil B.3. CPT 03 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 04 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



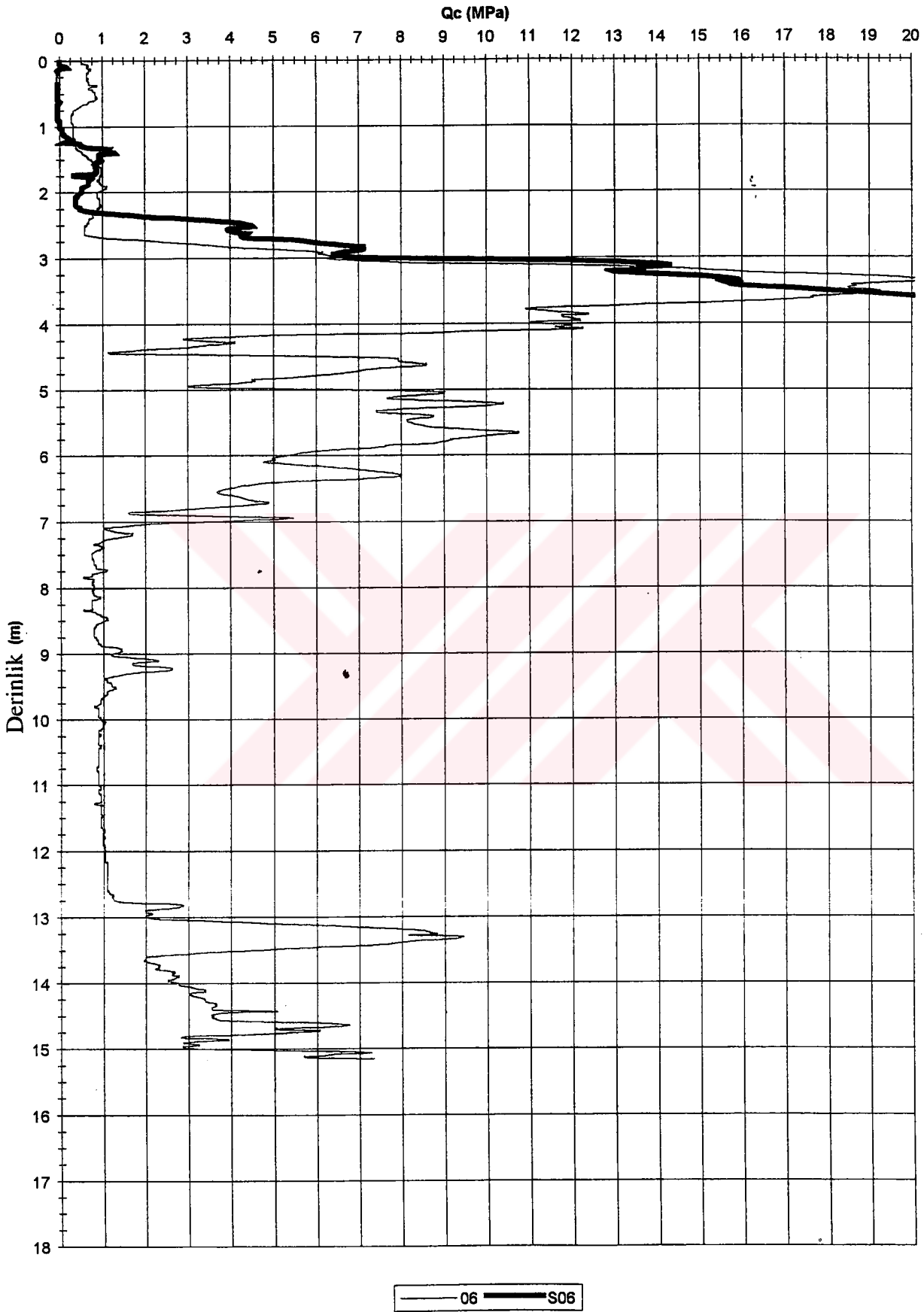
Şekil B.4. CPT 04 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 05 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



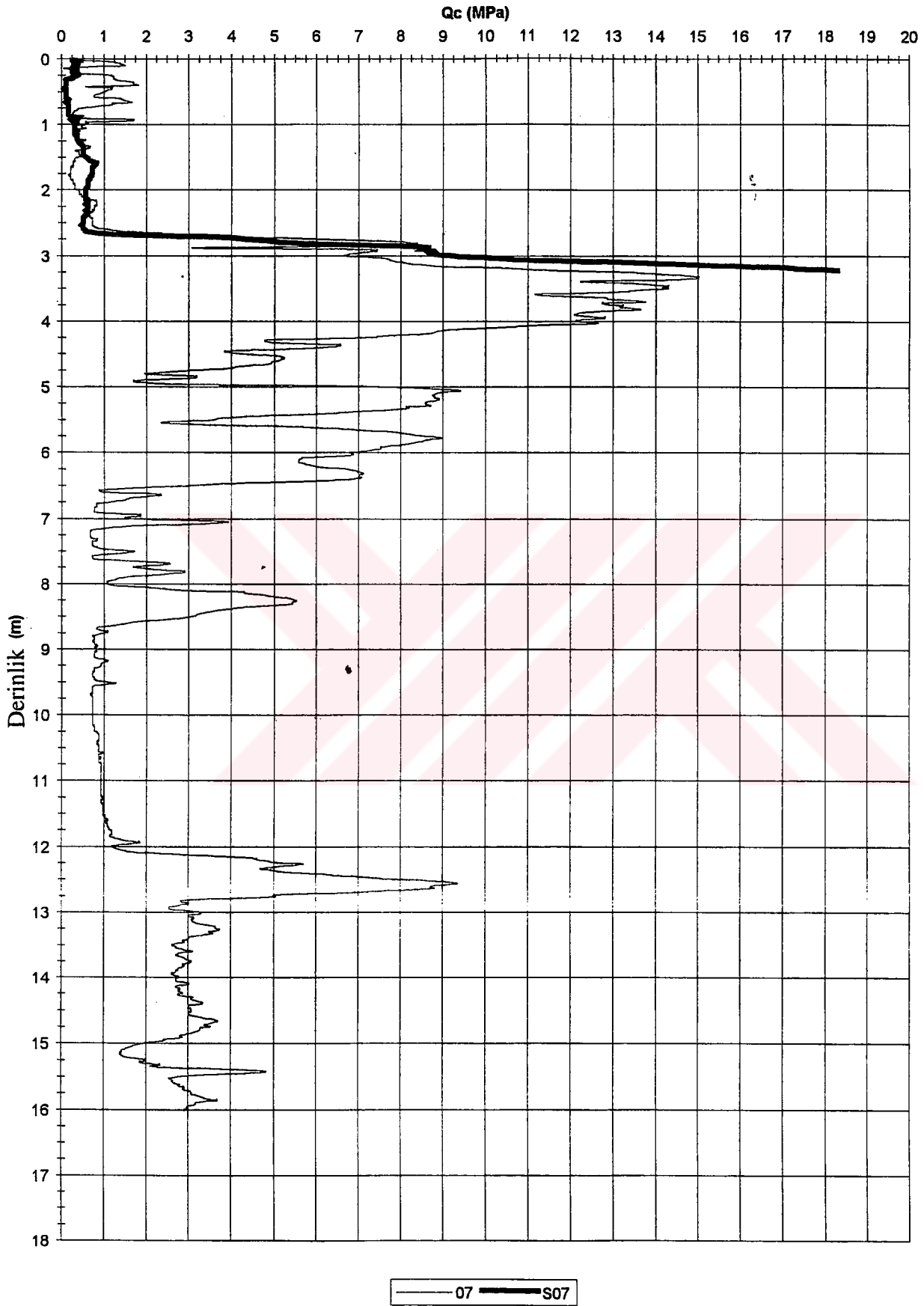
Şekil B.5. CPT 05 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 06 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



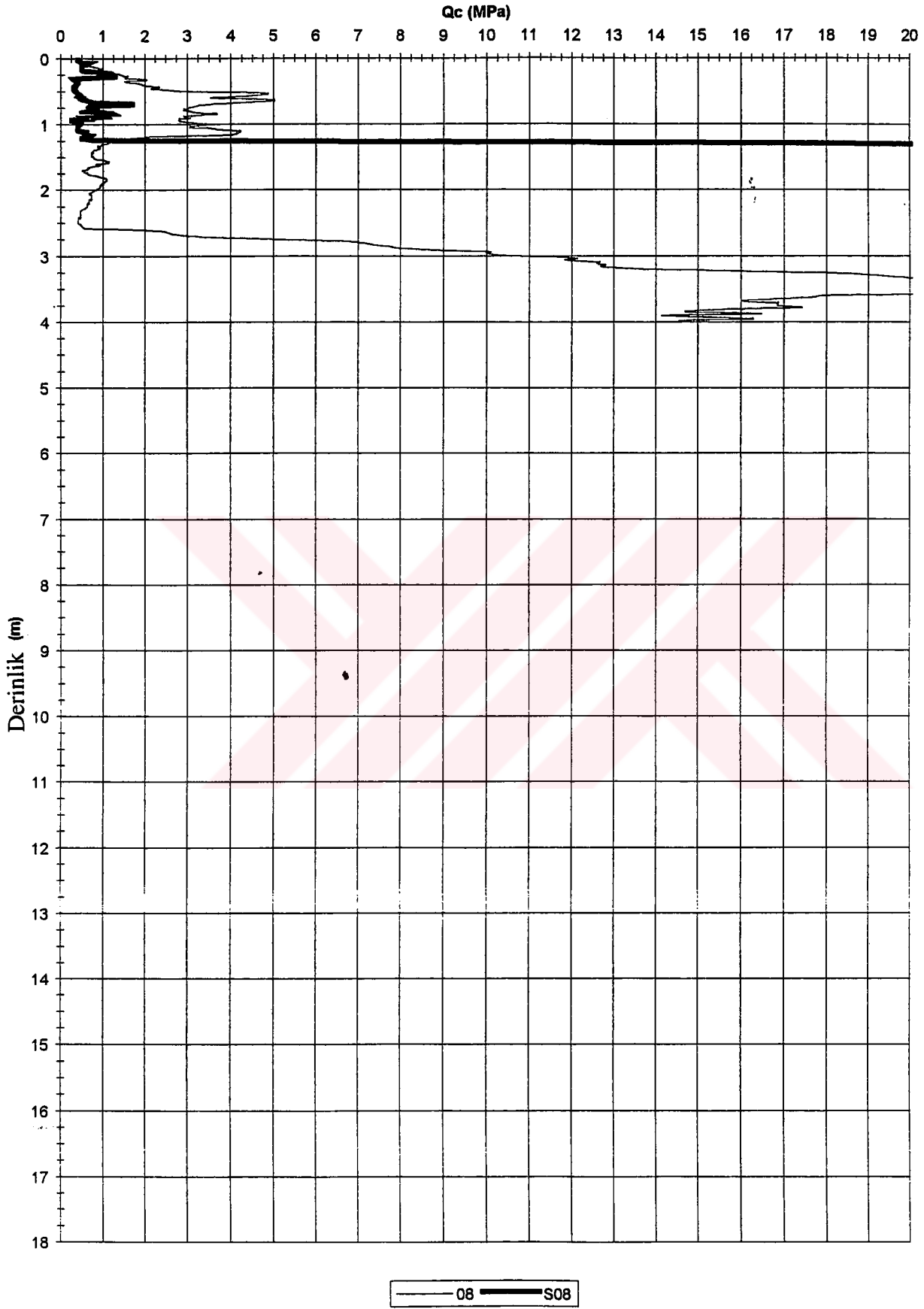
Şekil B.6. CPT 06 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 07 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



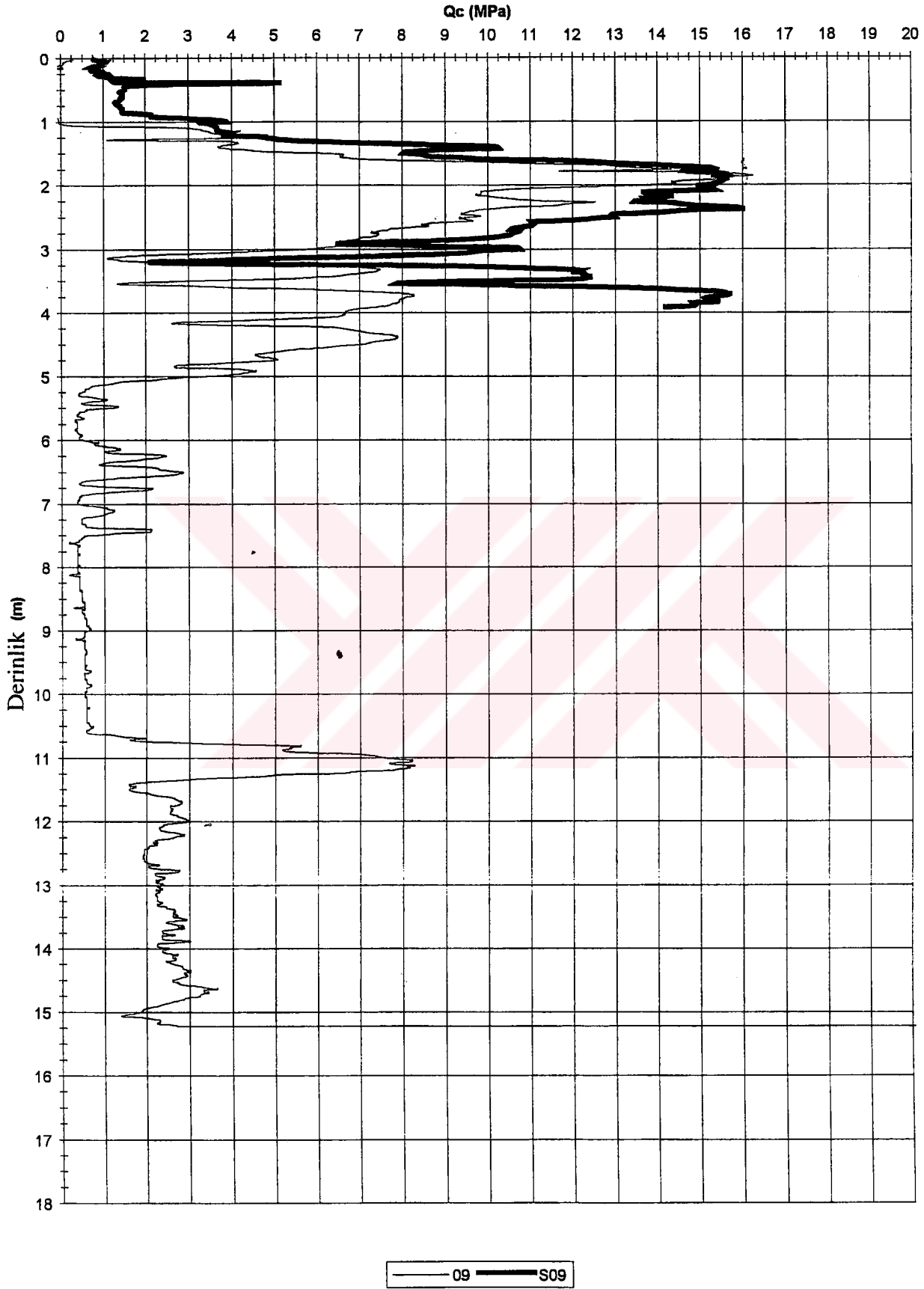
Şekil B.7. CPT 07 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 08 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



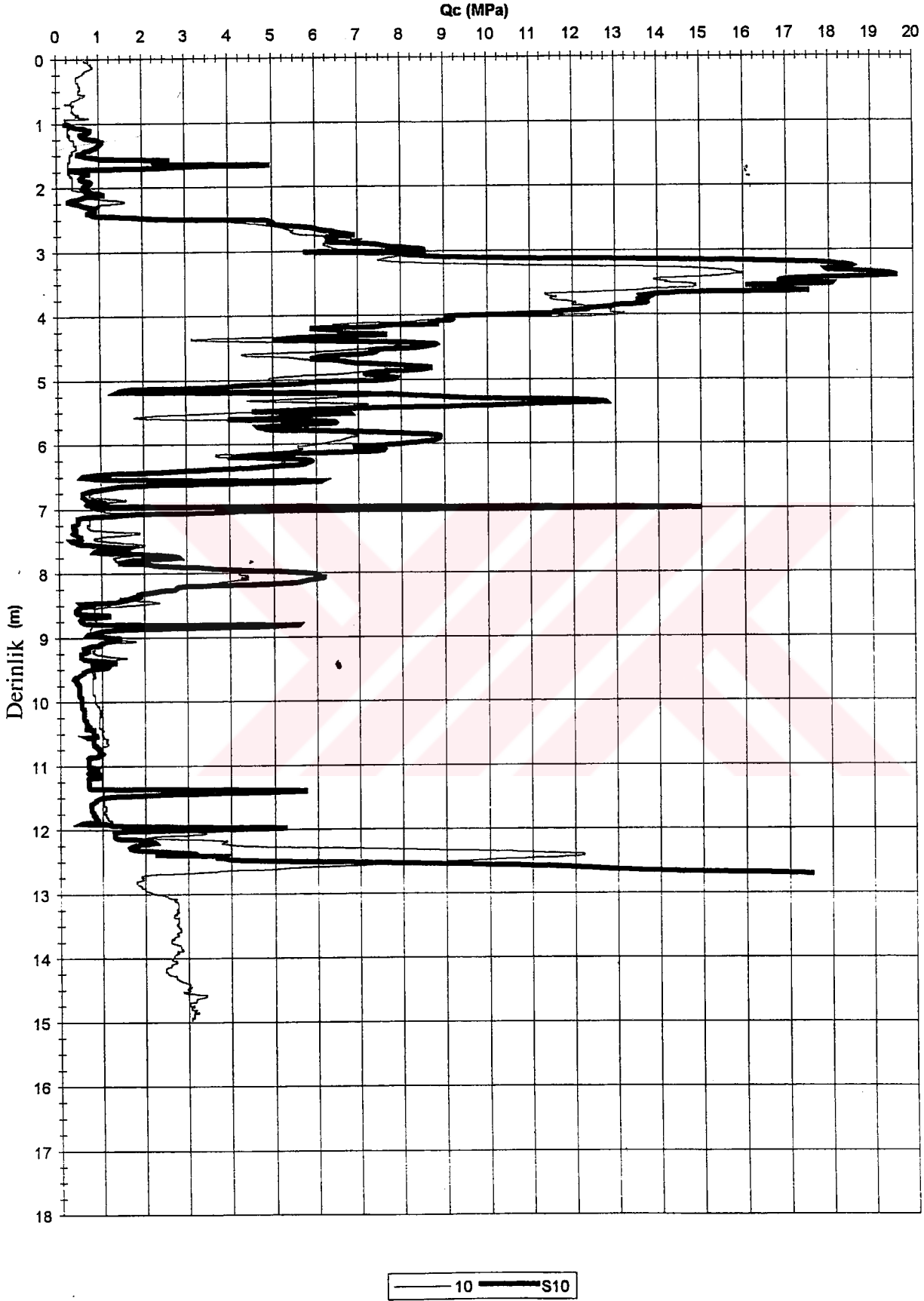
Şekil B.8. CPT 08 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 09 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



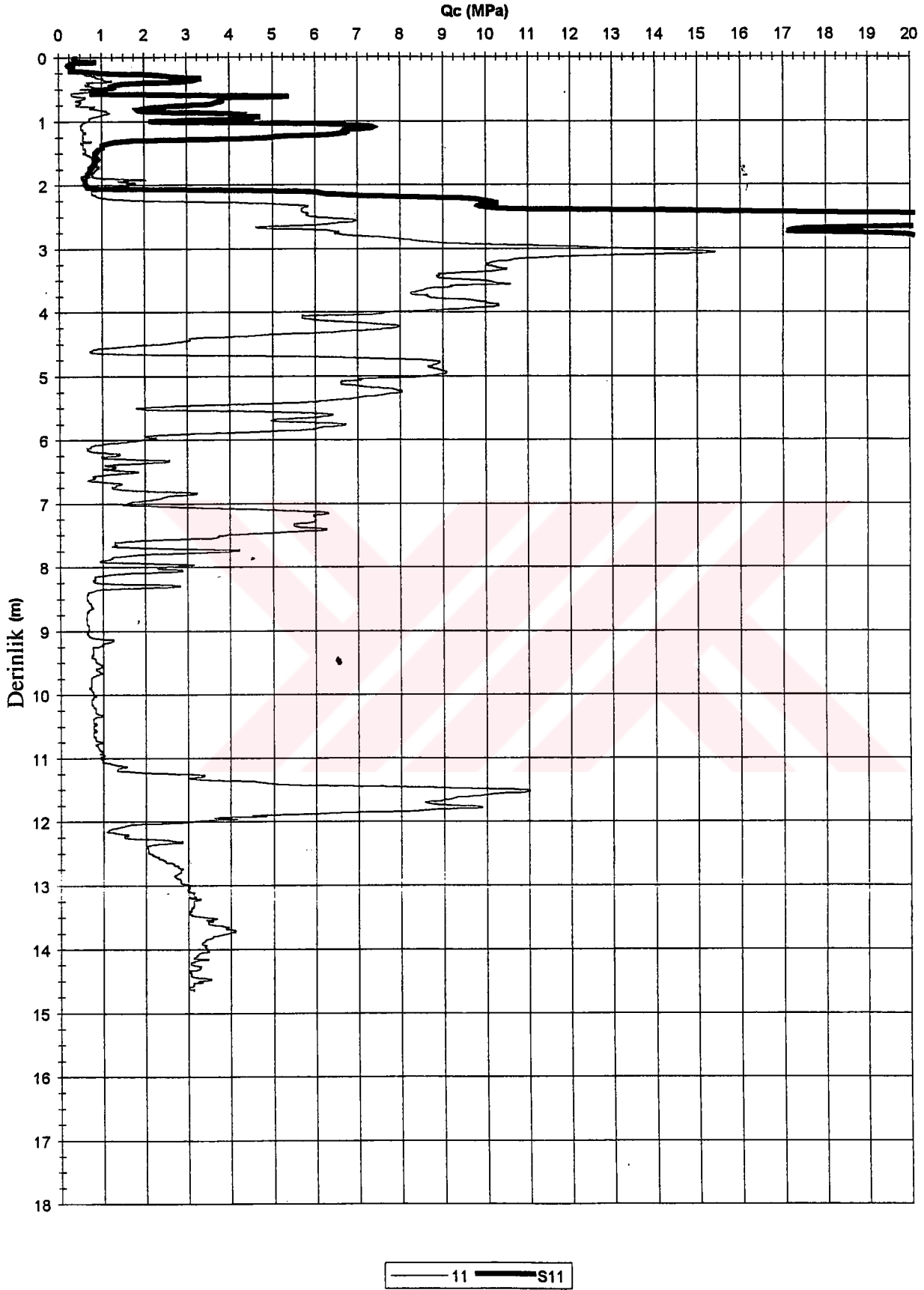
Şekil B.9. CPT 09 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 10 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



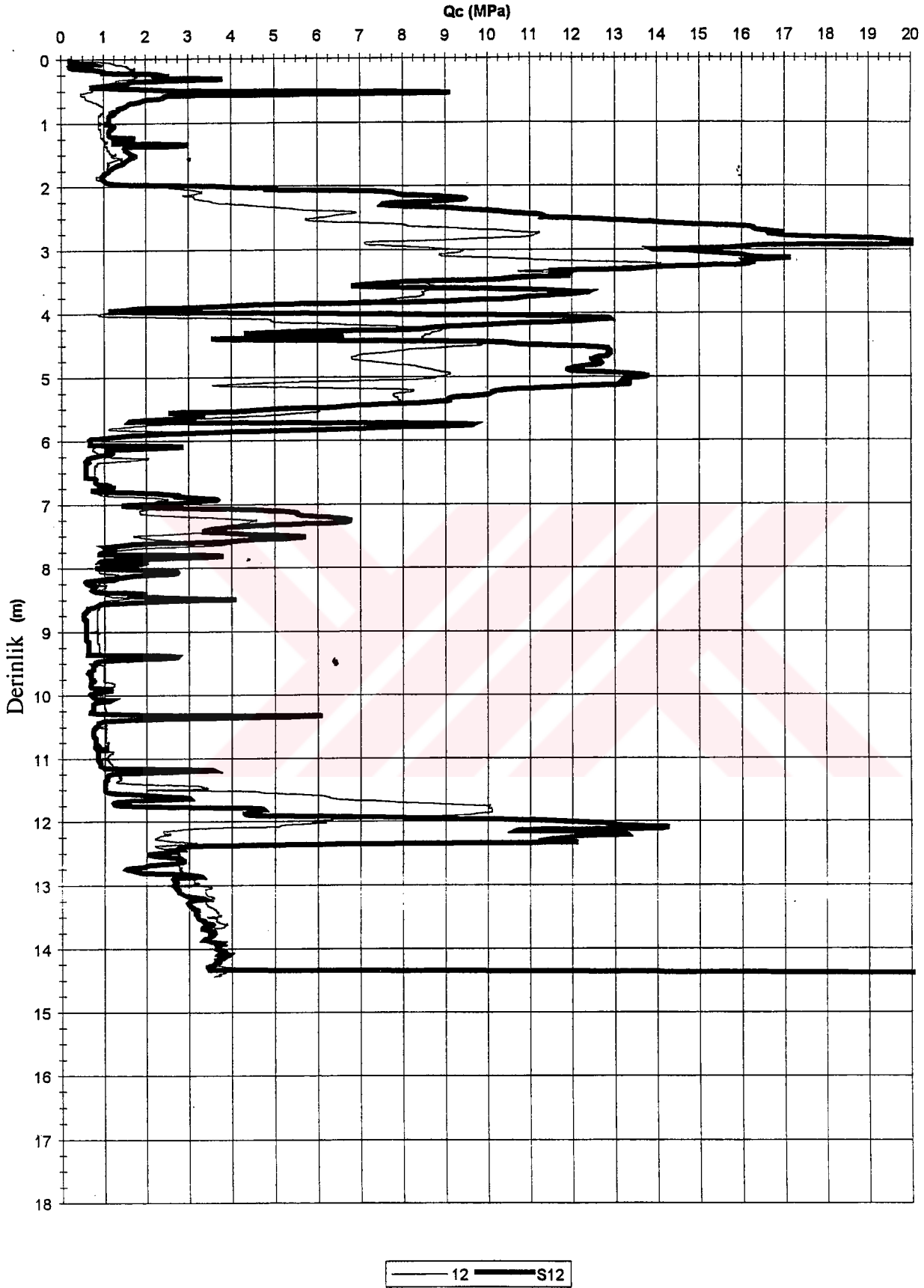
Şekil B.10. CPT 10 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 11 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



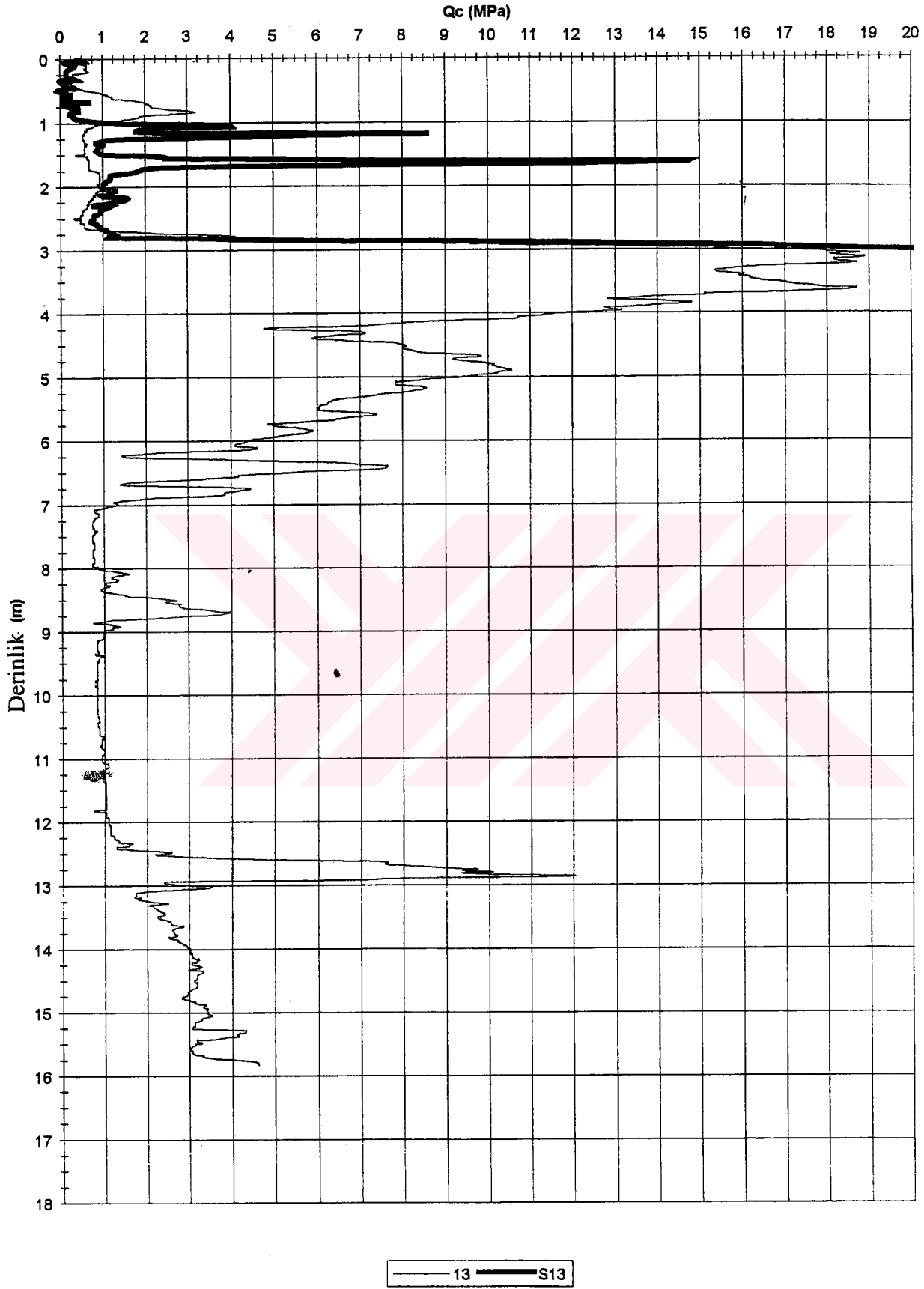
Şekil B.11. CPT 11 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 12 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



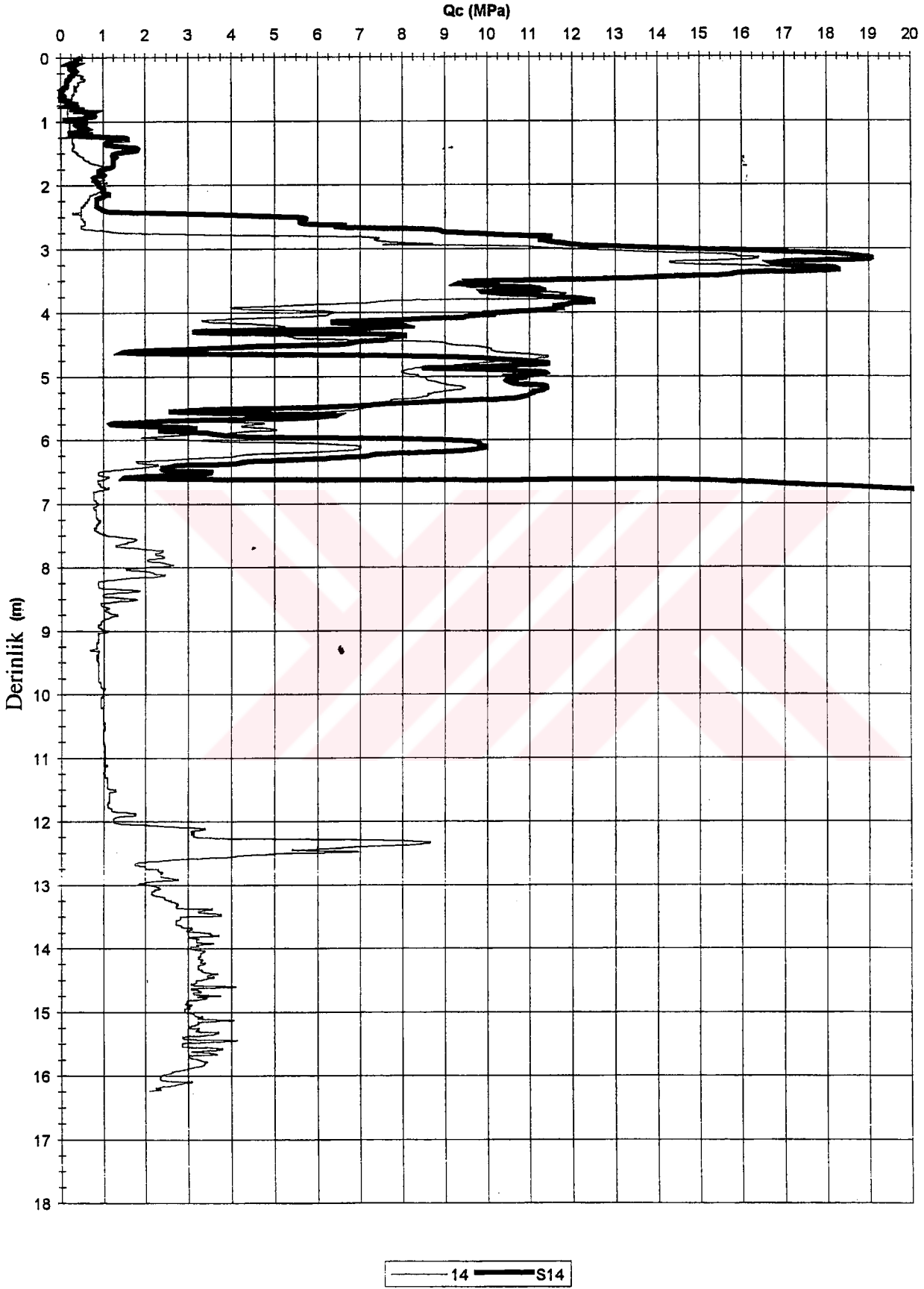
Şekil B.12. CPT 12 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 13 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



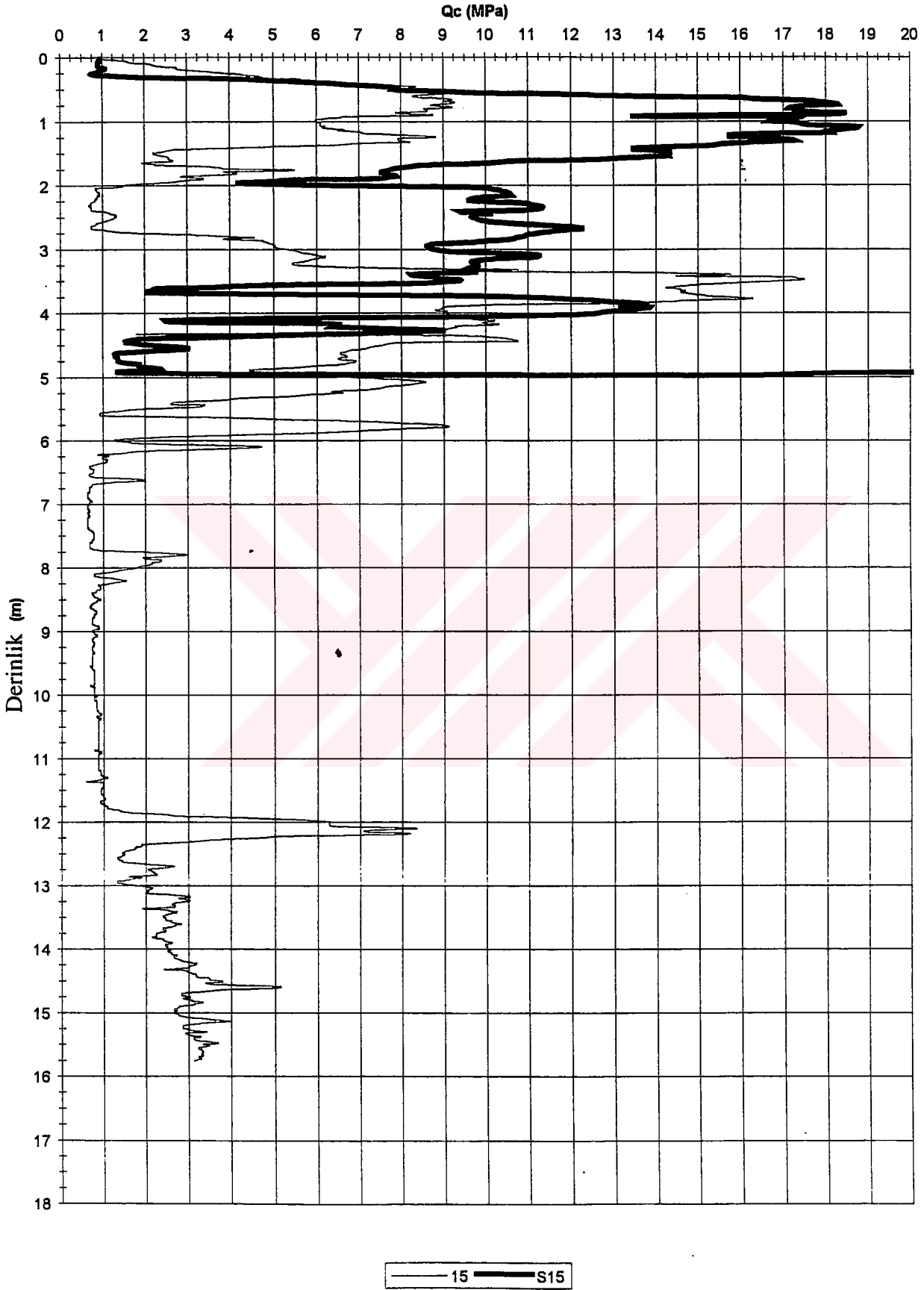
Şekil B.13. CPT 13 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 14 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



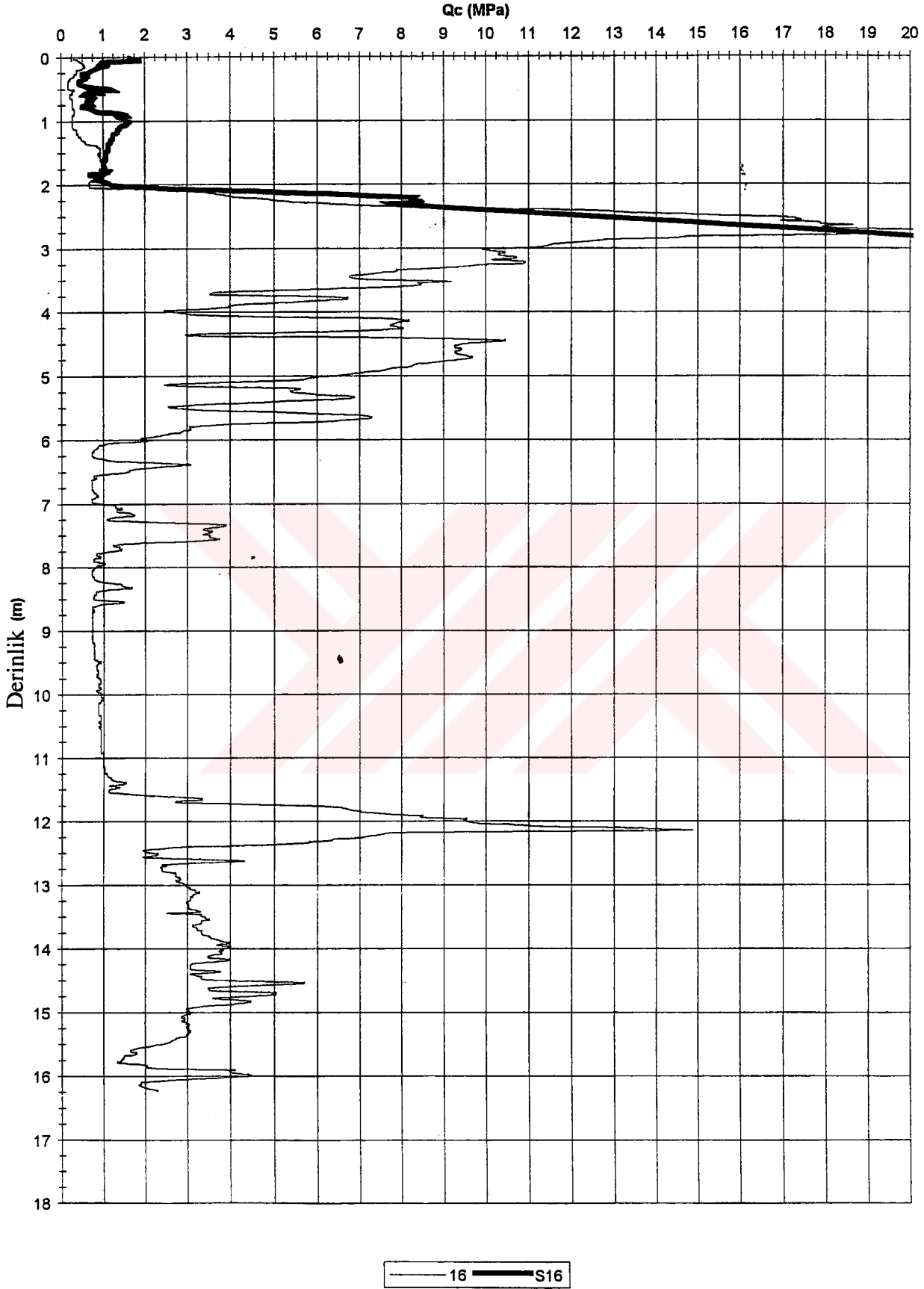
Şekil B.14. CPT 14 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 15 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



Şekil B.15. CPT 15 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

CPT 16 Konumunda Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması



Şekil B.16. CPT 16 Deneyi Konumunda Uç Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Emel Hacıalıoğlu 1976 yılında Akçaabat/Trabzon’da doğdu. 1992 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. Lisans eğitimini tamamlayarak 1996 yılında üniversiteden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği programına kabul edilmiş olup 1999 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır.

