
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KIZILCAHAMAM ATIKSU ARITMA TESİSİ JET GROUT KOLON TEMEL SİSTEMİNİN İMALATI VE PERFORMANSI

Oğuzhan ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2019

Oğuzhan ÇELİK tarafından hazırlanan "KIZILCAHAMAM ATIKSU ARITMA TESİSİ JET GROUT KOLON TEMEL SİSTEMİNİN İMALATI VE PERFORMANSI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Doç. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

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

.....

Üye: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

TezSavunmaTarihi: 28/05/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

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

……..
Oğuzhan ÇELİK
28/05/2019

KIZILCAHAMAM ATIKSU ARITMA TESİSİ JET GROUT KOLON TEMEL SİSTEMİNİN İMALATI VE PERFORMANSI

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuzhan ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Bu çalışmada Ankara ili Kızılcahamam ilçesinde yapımına başlanan Kızılcahamam Atıksu Arıtma Tesisi'nin inşa edileceği temel zemininde uygulanan jet grout kolonlarının imalat süreci, yükleme altındaki performansları ve kalite kontrol yöntemleri tanıtılmıştır. Toplam inşaat sahası yaklaşık 22000 m^2 alanı kaplamaktadır. Proje sahası alüvyon zemini çakıllı kumlu kil bileşiminin muhtelif tabakalarından oluşmaktadır. Yüzeysel temel tasarımında, radye temellerin oturmaları yaklaşık 6,5 cm hesaplanmış ve oturma probleminin önüne geçilmesi için jet grout imalatına karar verilmiştir. Proje kapsamında 909 adet jet grout kolonu imalatı gerçekleştirilmiş, bu kolonlardan 9'u üzerinde kazık yükleme deneyi, 52'si üzerinde kazık süreklilik deneyi ve 37 kolondan elde edilen karot örnekleri üzerinde tek eksenli basınç deneyleri yürütülmüştür. Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımıyla jet grout kolonları modellenmiş ve arazi koşullarındaki yükleme işlemi programda tekrar edilmiştir. Teorik ve ampirik yöntemlerle jet grout kolonlarının taşıma kapasiteleri ve oturmaları hesaplanmıştır. Yükleme deneyinden elde edilen sonuçlar ile teorik yöntemler ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, proje kapsaminda jetgrout kolon temel sistemi üzerinde inşa edilen 2 yapının oturması monitörize edilmiştir.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Jet grout, Jet grout yükleme deneyi, Jet grout süreklilik deneyi
Sayfa Adedi	:	93
Danışman	:	Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

CONSTRUCTION AND PERFORMANCE OF KIZILCAHAMAM WASTEWATER TREATMENT PLANT JET GROUT COLUMN FOUNDATION SYSTEM

(M. Sc. Thesis)

Oğuzhan ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

In this study, construction stages, performance and quality control measures of jet grout columns of Ankara Kızılcahamam Wastewater Treatment Plant were presented. The total construction field covers approximately 22000 m^2 area. The project site alluvium soil profile consists of various stratification of gravelly sandy clay composition. According to shallow foundation design approach, the settlement of the mat foundations were estimated around 6,5 cm thus it was decided to construct jet grout columns in order to minimize the settlement. In the project, 909 jet grout columns were produced and pile load test on 9 piles, pile integrity test on 52 piles were carried out. Uniaxial compression tests were conducted on the 37 core samples extracted from different jet grout columns. Jet grout columns were modeled with Plaxis 3D Foundation finite element software and in-situ loading conditions was simulated in the program. The ultimate bearing capacity and settlement of the jet grout columns were estimated by theoretical and empirical methods. The results obtained from pile loading test, teoretical methods and Plaxis 3D Foundation finite element software were compared. Moreover, within the extent of the project, settlement of jet grout column foundation system of 2 structures has been monitored.

Science Code	:	91105
Key Words	:	Jet grout, jet grout load test, jet grout integrity test
Page Number	:	93
Supervisor	:	Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda beni yönlendiren, bilgilerini paylaşan, yardımını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Yüksel YILMAZ'a tüm sorularıma bıkmadan cevap veren Arş. Gör. Kaan YÜNKÜL'e, tezime konu olan projeye beni dahil eden KENTSEL TASARIM REST. VE İNŞ. A.Ş.'ye ve maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….. iv

ABSTRACT ……..... v

TEŞEKKÜR ……..…..... vi

İÇİNDEKİLER……... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ……. x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ…….……..... xi

RESİMLERİN LİSTESİ …… xiii

HARİTALARIN LİSTESİ ……. xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR …… xv

1. GİRİŞ…… 1

2. JET GROUT İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR……. 3

2.1. Jet Grout Uygulama Alanları ……. 4

2.2. İmalatta Kullanılan Parametreler …… 4

2.2.1. Jet grout uygulama yöntemleri…….. 5

2.2.2. Enjeksiyon basıncı…… 6

2.2.3. Tijin dönme ve çekme hızı…… 7

2.2.4. Su-çimento oranı……... 9

2.2.5. Nozzle çapı…… 10

2.3. Jet Grout Uygunluk Kontrol Yöntemleri…… 10

2.3.1. Test jet kolon uygulaması ve çap kontrolü…… 11

2.3.2. Kazık yükleme deneyi……... 11

2.3.3. Kazık süreklilik deneyi …… 12

2.3.4. Karot numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyi……... 13

Sayfa

3. KAZIK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI……. 17

3.1. Teorik ve Ampirik Yöntemler ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması……. 17

3.1.1. Kazık uç direnci…… 17

3.1.2. Kazık sürtünme direnci……. 18

3.2. Kazık Yükleme Deneylerinden Elde Edilen Veriler ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması …..…… 21

3.2.1. Brinch – Hansen %80 yöntemi (1963)…….. 21

3.2.2. Mazurkiewicz (1972) yöntemi…….. 22

3.2.3. Chin Kondner (1970) yöntemi…….. 23

3.2.4. Decourt (1999) yöntemi…… 24

3.2.5. Hirany-Kulhawy (2002) yöntemi…….. 24

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması……... 25

4. KAZIK OTURMA HESAPLARI…….…….….. 27

4.1. Yay Model Yaklaşımı……. 27

4.2. Tomlinson (2008) Yöntemi……. 27

4.3. Vesic (1970) Yöntemi……. 28

4.4. Das (2004) Yöntemi…… 29

4.5. Poulos ve Davis Yöntemi (1980)…… 31

5. MATERYAL VE YÖNTEM…….…… 33

5.1. Zemin Oturma Hesabı……. 37

5.2. Jet Grout Kolon Taşıma Kapasitesi Hesabı……. 39

6. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI VE BULGULAR……..……... 41

6.1. Plaxis 3D Foundation ile Modelleme Yapılması…… 42

6.2. Test Jet Grout Kolonları…….. 45

Sayfa

6.3. Jet Grout Kolonlarının Yük-Oturma Davranışı……... 48

6.4. Kazık Süreklilik Deneyi…….. 52

6.5. Karot Alımı ve Tek Eksenli Basınç Deneyi…… 52

6.6. Tam Ölçekli Yapı Oturmalarının Gözlemlenmesi…….. 53

7. SONUÇLAR …….. 57

KAYNAKLAR ……...……...…… 59

ÖZGEÇMİŞ…… 93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Jet grout yöntemi geleneksel imalat parametreleri …… 4

Çizelge 2.2. Su-çimento oranına bağlı kolonun serbest basınç mukavemeti değerleri .. 9

Çizelge 3.1. Önerilen K_0 değerleri ……. 19

Çizelge 4.1. Yer değiştirme etki faktörü değerleri ……. 31

Çizelge 5.1. UD numunelerinden elde edilen zemin parametreleri…… 36

Çizelge 5.2. Zemin efektif gerilmesinin derinliğe göre değişimi……... 39

Çizelge 6.1. Modellemede kullanılan malzeme parametreleri……..... 42

Çizelge 6.2. Test kolonlarında kullanılan parametreler…….. 46

Çizelge 6.3. Test kolonlarının sonuçları……. 47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Jet groutun uygulanabildiği zeminler……. 3

Şekil 2.2. (a) JET1 yöntemi – (b) JET2 yöntemi – (c) JET3 yöntemi……... 6

Şekil 2.3. Enjeksiyon basıncı - kolon çapı grafiği…….. 7

Şekil 2.4. Enjeksiyon basıncı – bekleme süresi ve kolon çapı arasındaki ilişki …… 7

Şekil 2.5. Kademeli Çekme (a) - sürekli çekme (b) ……... 8

Şekil 2.6. Jet enjeksiyonu için optimum tekrarlama sıklığının deneysel sonuçları..…... 8

Şekil 2.7. Tahmini kolon çapı - tij çekme hızı arasındaki ilişki ……. 9

Şekil 2.8. Shizabaki ve Ohta'nın önerdiği ideal püskürtme ağızlığı …….. 10

Şekil 2.9. Kazık yükleme deney düzeneği ……. 12

Şekil 2.10. Süreklilik deneyi düzeneği……... 13

Şekil 2.11. Boston Mavi Killeri'nde su/çimento oranı ile karot basıncı ilişkisi……. 14

Şekil 2.12. Çimento oranının karot basınç dayanımına etkisi …… 14

Şekil 2.13. Değişik zeminlerdeki jet grout kolonlarında elde edilebilecek tek eksenli karot basınç dayanımları …….. 15

Şekil 3.1. Brinch Hansen %80 yöntemi örneği……... 22

Şekil 3.2. Mazurkiewicz (1972) yöntemi örneği…… 23

Şekil 3.3. Chin Kondner (1970) yöntemi örneği……. 23

Şekil 3.4. Decourt (1999) yöntemi örneği…….. 24

Şekil 3.5. Hirany-Kulhawy (2002) yöntemi örneği…… 25

Şekil 4.1. Kazık boyunca birim sürtünme direnci uniform (a), parabolik (b), üçgen (c) dağılımı……..……. 30

Şekil 5.1. Sondaj kuyuları ve araştırma çukurlarının konumları…… 34

Şekil 5.2. Sondaj logları…….. 35

Şekil 5. 3. Arazide elde edilmiş SPT N değerleri…… 36

Şekil 5.4. Konsolidasyon deneyleri sonuçları……. 38

Şekil 6.1. A ve B yapıları altındaki jet grout yerleşim planı……... 41

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.2. A ve B yapıları altındaki jet grout profili……... 41

Şekil 6.3. Uygulanan yükler altında deforme olmuş mesh görüntüleri a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3……..……. 43

Şekil 6.4. A,B,C yapıları altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi……. 44

Şekil 6.5. D,E,G yapıları altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi……. 44

Şekil 6.6. F yapısı altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi…… 45

Şekil 6.7. Çimento tipinin jet grout kolon çapı ve dayanımına etkisi……. 48

Şekil 6.8. Jet grout kolon yükleme deneyi düzeneği……... 48

Şekil 6.9. A-B-C yapılarında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonuçları……. 49

Şekil 6.10. D-E-G yapılarında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonuçları……... 49

Şekil 6.11. F yapısında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonucu…….. 50

Şekil 6.12. Nihai taşıma kapasitesi hesaplarının karşılaştırılması……... 51

Şekil 6.13. Teorik ve KYD oturma karşılaştırılması……... 51

Şekil 6.14. Jet grout kolonu süreklilik deneyinin (a)uygulanışı ve (b)süreklilik grafiği. 52

Şekil 6.15. Karot numunelerinin serbest basınç dayanım histogramı …… 53

Şekil 6.16. Üstyapı yükü - zaman ilişkisi……... 54

Şekil 6.17. Yapı oturması – zaman ilişkisi…….. 55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Jet grout kolonu örnek çap kontrolü…….. 11

Resim 6.1. Test kolonları…… 46

Resim 6.2. Arazide yapılan jet grout test kolonları çap kontrolü……... 47

Resim 6.3. Karot ile alınan numuneler…… 53

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 5.1. Kızılcahamam bölgesi haritası ve tesis yerleşim planı…….. 33

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
γ	Birim hacim ağırlık
μ	Zeminin poisson oranı
ξ	Birim çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımına bağlı bir katsayı
$A_ç$	Kazık çevre alanı
A_p	Kazık kesit alanı
d	Kazık çapı
E	Zeminin elastik modülü
E_b	Kazık ucu zeminin elastisite modülü
E_p	Kazık elastik modülü
E_s	Kazık çevresindeki zeminin elastisite modülü
I_p	L/*d* oranına bağlı etki katsayısı
I_{ws}	Çevre oturmasına ait etki katsayısı
I_{wp}	Uç oturmaya ait etki faktörü
k	Yay katsayısı
k_0	Kazık yatak modülü
L	Kazık boyu
N_{60}	Enerji düzeltmesi yapılmış SPT-N sayısı
R_A	Kazığın kesit alanının kazık dış çevresi içinde kalan alana oranı
Q	Kazığa uygulanan yük
$Q_ç$	Kazığın çevre sürtünmesi yükü
Q_u	Kazığın uç direnç yükü
Q_{ult}	Nihai taşıma kapasitesi
ψ	Dilatasyon açısı
$Ø$	İçsel sürtünme açısı

Simgeler	Açıklamalar
c	Kohezyon
X_L	Nozzledan örselenme mesafesi
α	Harcın özelliklerine bağlı zayıflatma katsayısı (Wang vd, 2012)
d_0	Nozzle çapı
V_0	Nozzle ucundan harcın çıkış hızı
V_L	Kritik hız
q_p	Kazık uç direnci
p	Kazık çevre uzunluğu
f_s	Birim sürtünme direnci
K_0	Efektif zemin basınç katsayısı
σ_0	Efektif gerilme
δ	Zemin – kazık arası sürtünme açısı
α	Ampirik adezyon faktörü (α yöntemi)
Δ	Oturma
C_1	Doğru eğimi
C_2	Doğrunun düşey ekseni kestiği nokta
G	Kayma modülü
S_e	Elastik oturma
S_c	Konsolidasyon oturması
M_v	Hacimsel sıkışma indisi
e_0	Boşluk oranı
C_c	Sıkışma indisi

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	American Society for Testing and Materials
KYD	Kazık yükleme deneyi
YM	Yamaç molozu
SPT	Standart Penetration Test
YASS	Yer altı su seviyesi

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, üstyapıdan gelen yükler uygun bir temel sistemi vasıtasıyla zemine aktarılır. Zemine aktarılacak yükler altında şayet zeminin taşıma kapasitesi aşılacaksa veya üstyapı tipine bağlı olarak hesaplanan oturmalar (toplam oturma ve/veya farklı oturma) izin verilen değerlerin dışına çıkacaksa, temel sisteminin revize edilmesi (temel tipi, temel derinliği, vs) ya da taban zeminin iyileştirilmesi gerekir. Taban zemininin iyileştirilmesine yönelik birçok alternatif yaklaşım/yöntem bulunmaktadır. Uygun zemin iyileştirme yöntemleri birçok parametreye bağlı olarak belirlenebilir.

Zemin iyileştirme yöntemleri sayesinde zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilmekte ve zemin özellikleri istenilen hale getirilmektedir. Zemin içerisindeki boşlukların azaltılması, bu boşlukların çeşitli karışımlarla doldurulması, zemin su içeriğinin azaltılması ya da yer altı su seviyesinin düşürülmesi gibi yöntemlerle zeminin mukavemeti artar, şişme ve büzülme problemleri kontrol altına alınır, permeabilitesi ve sıvılaşma potansiyeli azalır ve zeminin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri değişiklik gösterir [1][2].

Zeminlerin olumsuz özelliklerinin uygun yöntemlerle iyileştirilmesi mümkündür. Zemin iyileştirme yöntemleri yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri ve derin zemin iyileştirme yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Yüzeysel zemin iyileştirme için kompaksiyon, drenaj, çimento ile stabilizasyon, kireç ile stabilizasyon ve bitüm ile stabilizasyon yollarına başvurulabilir. Derin zemin iyileştirme için ise ön yükleme ve düşey drenler, taş kolonlar, dinamik kompaksiyon, vibrokompaksiyon, enjeksiyon, jet grout, derin karıştırma, fore kazık ve zemin çivileri kullanılabilir [3].

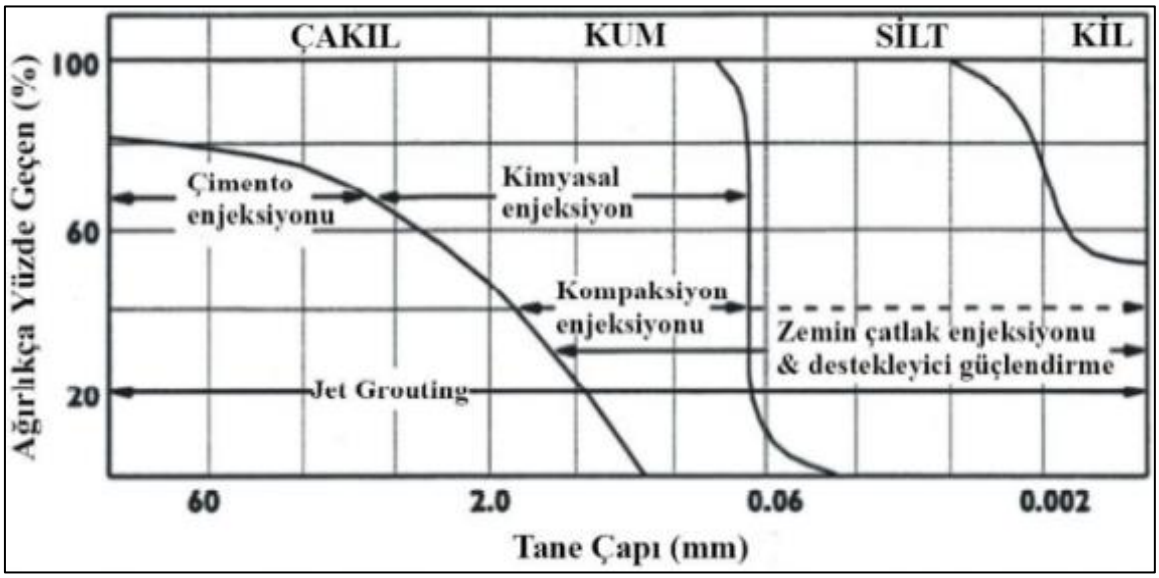
Bu tez kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden olan jet grout yöntemi üzerinde durulmuş ve Ankara Kızılcahamam'da yapılmış olan Kızılcahamam Atıksu Arıtma Tesisi projesi dahilinde imalatı yapılan jet grout kolonlarının performansları incelenmiştir. Jet grout kolonları üzerinde yükleme deneyi, süreklilik deneyi, ve karot numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyleri uygulanmış, ayrıca imalatı tamamlanan yapılarda uzun dönem oturmalar monitörize edilmiştir. Yükleme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak jet grout kolonlarının taşıma kapasiteleri teorik olarak hesaplanmıştır. Plaxis 3D Foundation programıyla modellenen jet grout kolonlarının taşıma kapasiteleri hesaplanmış ve teorik yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca yine yükleme deneylerinden elde edilen oturma değerleriyle teorik olarak hesaplanan oturma değerleri karşılaştırılmıştır.

2. JET GROUT İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zemin kütlelerini kesmek için yüksek hızlı akışkan jetleri kullanma tekniği, 1965 yılında Japonya'da geliştirilmiştir. 1970'lerin başında jet grout ekipmanı ve teknikleri geliştirilmiş, yöntem kısa sürede batı Avrupa'ya ve daha sonra 1980'lerin başlarında ABD'ye yayılmıştır [4]. Jet grout yönteminde, istenilen derinliğe kadar açılan sondaj kuyusu tabanına indirilen enjeksiyon borusu 360 derece döndürülerek ve belli bir hızda yukarı çekilirken, zemine yüksek basınç altında çimento, su ve hava enjekte edilerek istenilen çapta rijit kolon imal edilmektedir. Jet grout yöntemi neredeyse her türlü zemin sınıfında verimli olarak uygulanabilmektedir [5].

Jet grout yöntemi genel olarak zeminin delgi yapılarak delinmesi ve daha sonra yüksek basınçla zemine çimento-su karışımı enjekte edilip silindirik kolonlar oluşturulması olarak tarif edilebilir. Böylece mevcut zeminin mukavemeti ve deformasyon modülü arttırılmış ve permeabilitesi azaltılmış olur.

Jet grout yöntemi ile kil, silt ve kum-çakıl gibi farklı türlerdeki zeminlerin stabilizasyonu sağlanabilmektedir (Şekil 2.1) İmalat hızı yüksek ve maliyeti tahmin edilebilir olduğundan tercih edilebilirliği fazladır [6].



Şekil 2.1. Jet groutun uygulanabildiği zeminler [6]

2.1. Jet Grout Uygulama Alanları

Jet grout yönteminin bazı uygulama alanları aşağıda listelenmiştir [7]:

- Temel takviyesi
- Kazık yüzeylerinin desteklenmesi
- Tünel inşaatları
- Geçirimsizlik perdeleri
- Şişme – büzülmenin azaltılması
- Kazı çukurlarına gelen yeraltı sularının azaltılması

2.2. İmalatta Kullanılan Parametreler

Jet grout kolonlarının imalatına geçilmeden önce aşağıda sıralanan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

- Uygulama Yöntemi (JET1 – JET2 – JET3)
- Enjeksiyon Basıncı (bar)
- Nozzle Sayısı
- Nozzle Çapı (mm)
- Tij Dönüş Hızı (rpm)
- Tij Çekme Hızı (cm/dk)
- Su/Çimento Oranı

Bu parametreler jet kolonun çapını, sürekliliğini ve dayanımını etkilemektedir. En ekonomik yöntemin seçilmesi için imalata geçilmeden önce yukarıda sıralanan parametrelere dayandırılarak test kolonlarının imal edilmesi gereklidir. Bu parametrelerin tipik değerleri Çizelge 2.1'de görülmektedir [8].

Çizelge 2.1. Jet grout yöntemi geleneksel imalat parametreleri [8]

Sistem	Enjeksiyon Tipi	Basınç	Nozzle Çapı ve Adedi	Çekme Hızı	Dönme Hızı	Su/Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi
		(bar)	(adet, mm)	(cm/dak)	(rpm)	-	(lt/dak)
JET 1	Çimento	400 – 500	1-2 x 2-5	15 – 100	5 – 15	1,0 – 1,5	70 – 600
JET 2	Çimento	400 – 500	1-2 x 2-5	10 – 30	4 – 8	1,0 – 1,5	70 – 600
	Hava	10 – 12	-	10 – 30	-		4000- 10000
JET 3	Çimento	50 – 100	1-2 x 4-5	6 - 15	4 – 8	1,2 – 1,5	80 – 200
	Hava	10 – 12	-	6 – 15	-	-	4000- 10000
	Su			6– 15	-	-	40- 100

2.2.1. Jet grout uygulama yöntemleri

Jet grout ile iyileştirme 3 farklı yöntemle yapılabilmektedir. Kullanılacak olan yöntem zeminin cinsine, ıslah edilecek zeminin hacmine ve imal edilecek kolonun çapına göre değişkenlik göstermektedir.

JET1 Yöntemi (Tek Akışkanlı Sistem)

Bu yöntemde zemine su – çimento karışımı bir veya birden fazla nozzledan yüksek basınç altında enjekte edilmektedir (Şekil 2.2-a). Yüksek basınç altında enjekte edilen harç zemini aşındırıp ve boşlukları doldurarak kolonu oluşturur.

JET2 Yöntemi (İki Akışkanlı Sistem)

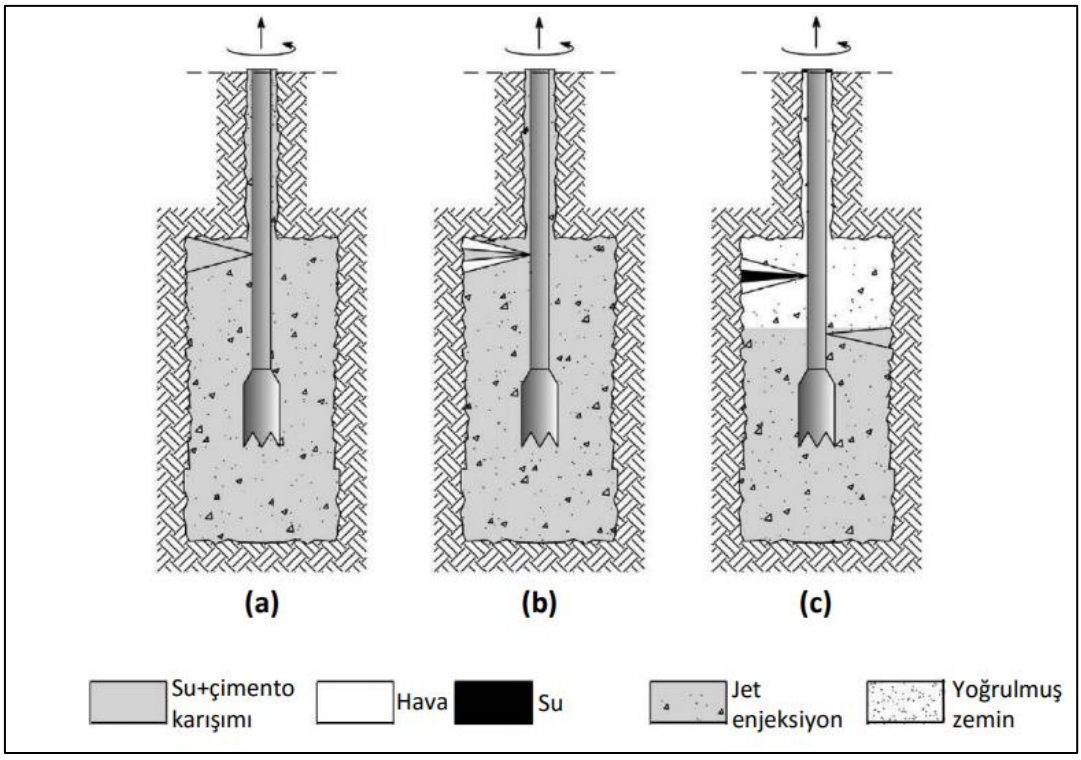
Bu yöntemde ise enjeksiyon sırasında tek akışkanlı sistemde kullanılan harcın etrafından hava da enjekte edilmektedir (Şekil 2.2-b). Enjekte edilen hava, harcın daha uzak mesafelere nüfuz etmesini sağlamaktadır.

JET 2 yöntemi ile oluşturulan kolon çapı JET 1 yöntemine göre daha büyüktür. Bunun sebebi; [3]

- Basınçlı hava, harç jeti ile yeraltı suyu arasında bir tampon bölge oluşturur. Böylece daha geniş bir zemin hacmini etkilemek mümkün olmaktadır.
- Kesilen zeminin doğurduğu çalkantıyı yenmek için harcanması gereken enerjiden tasarruf edilir.
- Kesilen zeminin uzaklaştırılması kolaylaşır. Hava jeti hızı kesildikten sonra, yüzeye doğru yükselmesi sırasında, zemin döküntüsünün de kolaylıkla zemin yüzüne ulaşması sağlanır.

JET 3 Yöntemi (Üç Akışkanlı Sistem)

Bu sistemde altlı üstlü iki farklı konumdaki nozzle enjeksiyon yapmaktadır (Şekil 2.2-c). Üstteki nozzle, harç enjekte edilen noktanın üstünde bulunup hava ve su enjekte edilerek zeminin örselenmesini sağlamaktadır. Alttaki nozzle ise tek akışkanlı sistemdeki gibi su-çimento karışımı harç enjekte etmektedir.

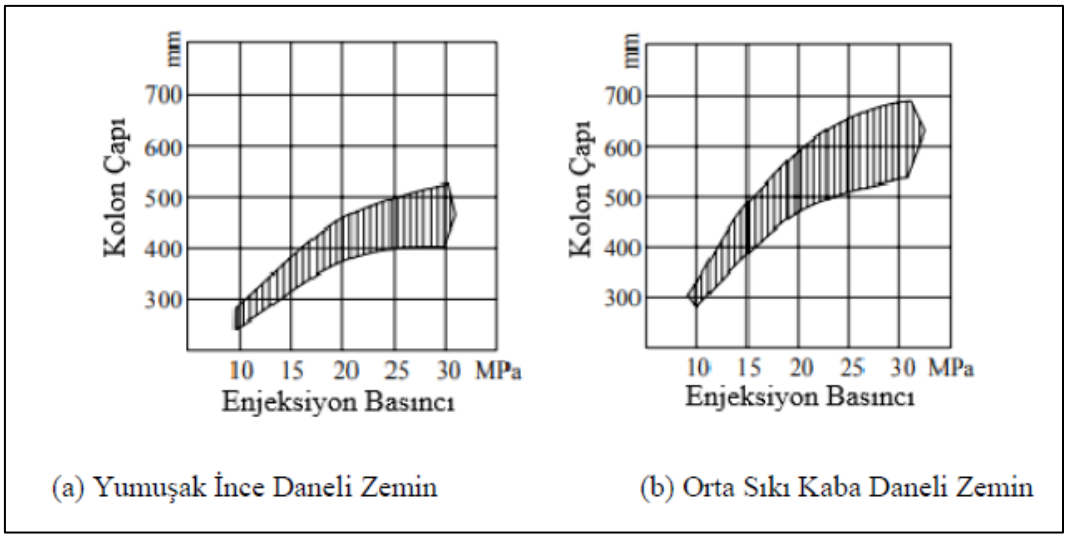


Şekil 2.2. (a) JET1 yöntemi – (b) JET2 yöntemi – (c) JET3 yöntemi [9]

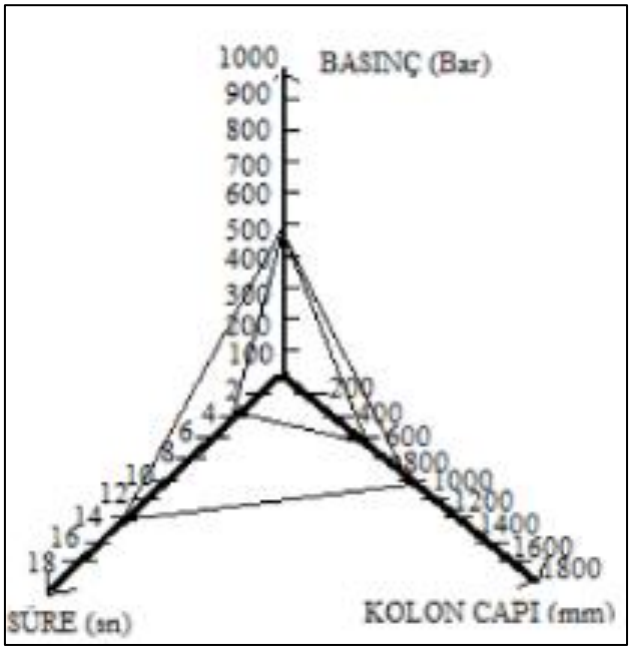
2.2.2. Enjeksiyon basıncı

Enjeksiyon basıncı jet grout kolon çapını belirlemedeki en önemli faktörlerden birisidir. Basınç arttıkça genellikle kolon çapı artmaktadır. Ancak kolon çapını arttırmak için enjeksiyon basıncı tek başına yeterli değildir. Homojen bir yapıda istenilen çapta kolon oluşabilmesi bekleme süresi ile de ilişkilidir.

Xanthakos (1994) Şekil 2.3'teki grafiklerle kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişkiyi göstermiştir [10]. Enjeksiyon basıncının artması kolon çapını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak Melegary ve Garassino (1997) homojen bir yapıda kolon oluşturulabilmesi için bekleme süresinin de önemli oluğunu savunmuştur ve enjeksiyon basıncı – bekleme süresi ve kolon çapı arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 2.4'teki grafiği ortaya koymuştur [11].



Şekil 2.3. Enjeksiyon basıncı - kolon çapı grafiği [10]

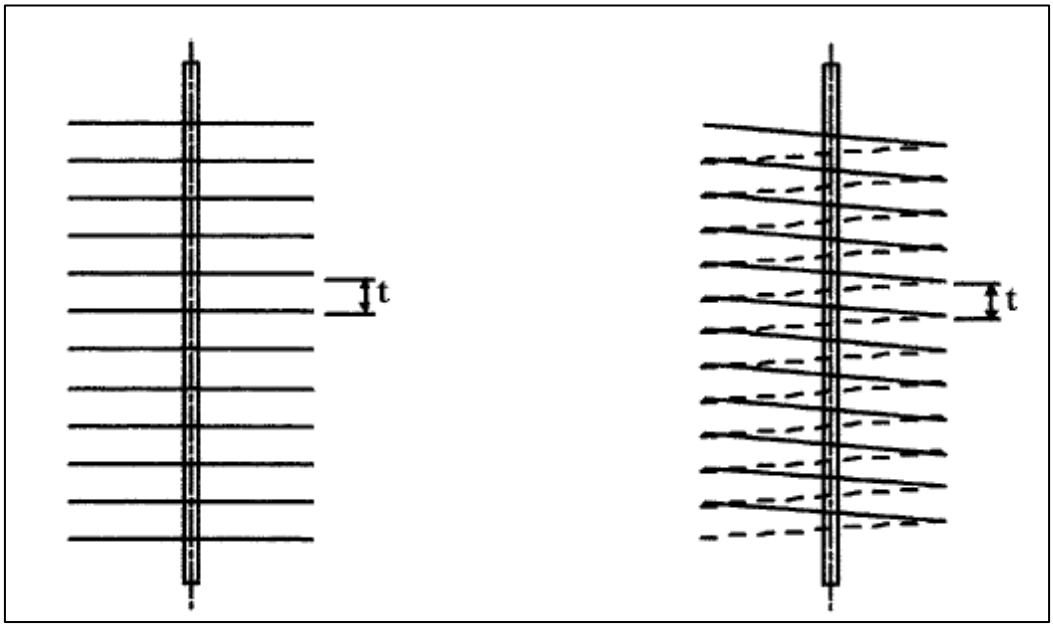


Şekil 2.4. Enjeksiyon basıncı – bekleme süresi ve kolon çapı arasındaki ilişki [11]

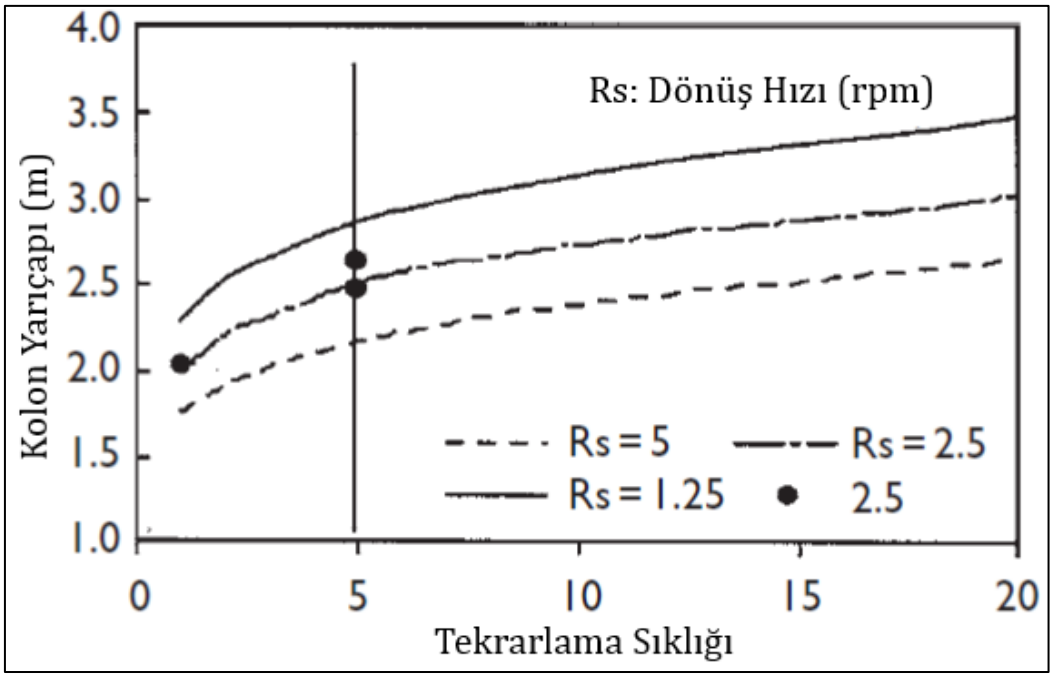
2.2.3. Tijin dönme ve çekme hızı

Zeminde homojen bir kolon elde edilebilmesi için tijin dönüş hızının belirli bir değerden fazla olmaması ve çekiş hızının da kolonun sürekliliğini bozmayacak şekilde olması gerekmektedir. Çekme işlemi kademeli ve sürekli çekme olarak iki farklı şekilde yapılabilir (Şekil 2.5). Kademeli çekme işleminde tij her kademede belirli bir süre bekletilir, sürekli çekmede ise ayarlanan sabit bir hızda tij sürekli olarak yukarı çekilir.

Essler ve Yoshida (2004) jet enjeksiyonu için optimum tij dönme hızının kolon çapına etkisi üzerinde çalışmışlar ve Şekil 2.6'daki grafiği sunmuşlardır. Ayrıca tij dönüş hızının 5 rpm'den büyük olmasının kolon çapını arttırdığını gözlemlemişlerdir. [12]

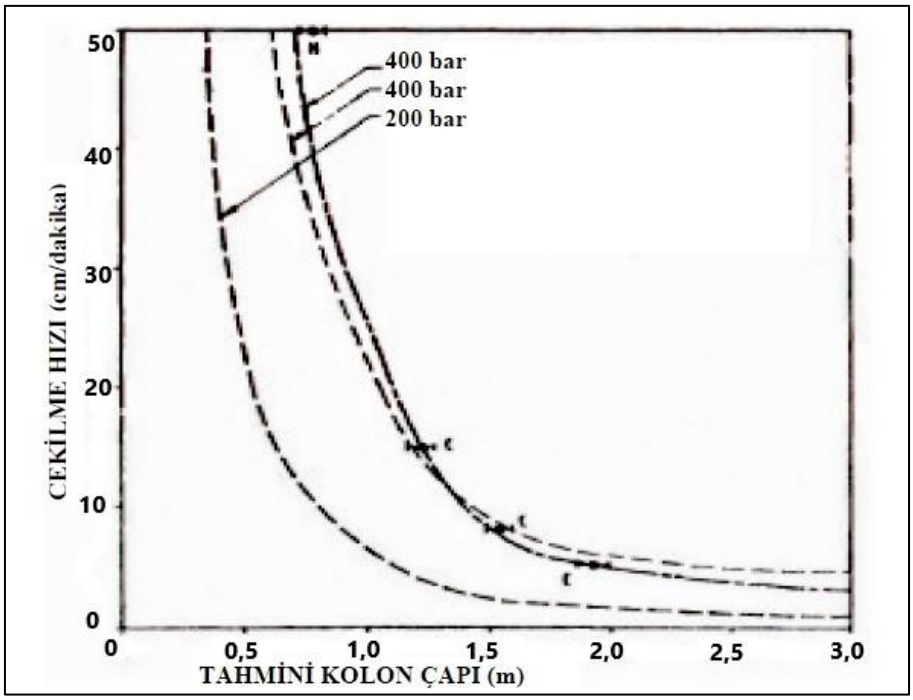


Şekil 2.5. Kademeli çekme (a) - sürekli çekme (b) [12]



Şekil 2.6. Jet enjeksiyonu için optimum tekrarlama sıklığının deneysel sonuçları [12]

Moseley (1993) yaptığı çalışmada elde ettiği tahmini kolon çapı – çekme hızı ilişkisi görülmektedir. Şekil 2.7'ye göre tijin çekilme hızı arttıkça kolon çapında azalma meydana gelmektedir [13].



Şekil 2.7. Tahmini kolon çapı - tij çekme hızı arasındaki ilişki [13]

2.2.4. Su-çimento oranı

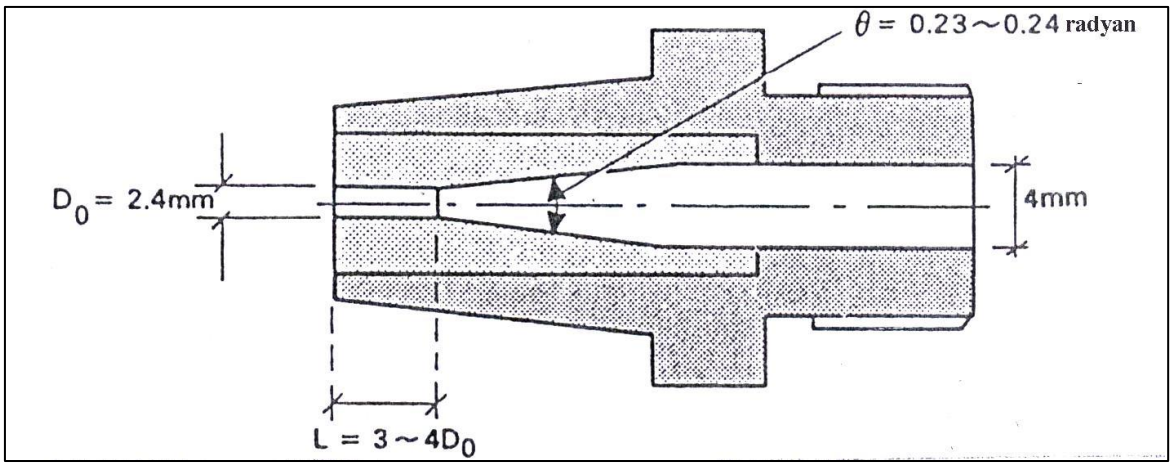
Farklı türdeki zeminlerde su/çimento oranının tek eksenli basınç dayanımına etkisi Baumann (1984) tarafından araştırılmıştır. Çalışmaya göre, Çizelge 2.2'de görüldüğü üzere, kumlu çakıllı zeminlerde elde edilen basınç dayanımı değerleri siltli, killi ve organik zeminlerde elde edilen değerlerden daha yüksektir. Ayrıca çimento miktarının artması çakıllı kumlu, kumlu-siltli ve siltli killi zeminlerde basınç dayanımını arttırdığı çalışmada belirtilmiştir [14].

Çizelge 2.2. Su-çimento oranına bağlı kolonun serbest basınç mukavemeti değerleri [14]

Kolon Basınç Dayanımları (MPa)							
Zemin Tipi	Çakıl	Kum	Silt, Kil	Organik Zemin	Çakıllı Kumlu	Kumlu Siltli	Siltli Killi
Kolon No	1	2	3	4	5	6	7
Su/Çimento=0,67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12 – 18	10 – 14	6 – 10
Su/Çimento=1,00	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6– 10	5– 7	3– 5

2.2.5. Nozzle çapı

Nozzle çapı enjeksiyon harcının yayılmasını ve dolayısıyla kolonların verimliliğini etkilemektedir. Bu yüzden nozzle çapının doğru seçilmesi jet kolonların kalitesi için önemlidir. Shizabaki ve Ohta (1982) yaptıkları çalışma ile ideal nozzle'ı Şekil 2.8'deki gibi önermişlerdir [15].



Şekil 2.8. Shizabaki ve Ohta'nın önerdiği ideal püskürtme ağızlığı [15]

Wang vd. (2012) ise yaptıkları çalışmada jet grout kolonlarının çapının nozzle çapı ile doğru orantılı olduğunu belirterek Eşitlik 2.1'i önermişlerdir [16].

$$X_L = \frac{\alpha d_0 V_0}{V_L} \tag{2.1}$$

V_L= kritik hız, radyal yönde minimum hız.

V_0= nozzle ucundaki harcın çıkış hızı

d_0= nozzle çapı

X_L= nozzledan örselenme mesafesi

α= harcın özelliklerine bağlı zayıflama katsayısı (boyutsuz)

2.3. Jet Grout Uygunluk Kontrol Yöntemleri

Jet grout imalatlarının tasarım kriterlerine uygun olarak imal edilmesi ve imal edilen kolonların kalitesinin kontrolü amacıyla bazı jet grout kolonları üzerinde kalite kontrol deneylerinin yapılması gerekir. Deneyler imalat öncesi veya sonrasında standartlara uygun olarak yapılmalıdır.

2.3.1. Test jet kolon uygulaması ve çap kontrolü

Wang ve Shen (2012) yaptıkları çalımada, türbülanslı kinematik akış ve zemin erozyonunun teorik çerçevesine dayanarak jet grout kolonlarının çapını tahmin etmek için genelleştirilmiş bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerilen hesaplama yöntemi, tüm geleneksel jet-grout sistemleri için geçerlidir ve enjeksiyon süresinin erozyon mesafesi üzerindeki etkisi de dahil olmak üzere tüm operasyonel parametreler, akışkan özellikleri, zemin mukavemeti ve partikül büyüklüğü dağılımını dikkate almaktadır [16].

Bu yöntem dikkate alınarak, imalat sahasına uygun parametreler seçilip imalat öncesinde istenilen çapın elde edilip edilmediğini görmek için test jet grout kolonları yapılmalıdır. Test kolonlarının priz alması beklendikten sonra kolonların çevresi açılarak çap kontrolü yapılmalıdır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Jet grout kolonu örnek çap kontrolü

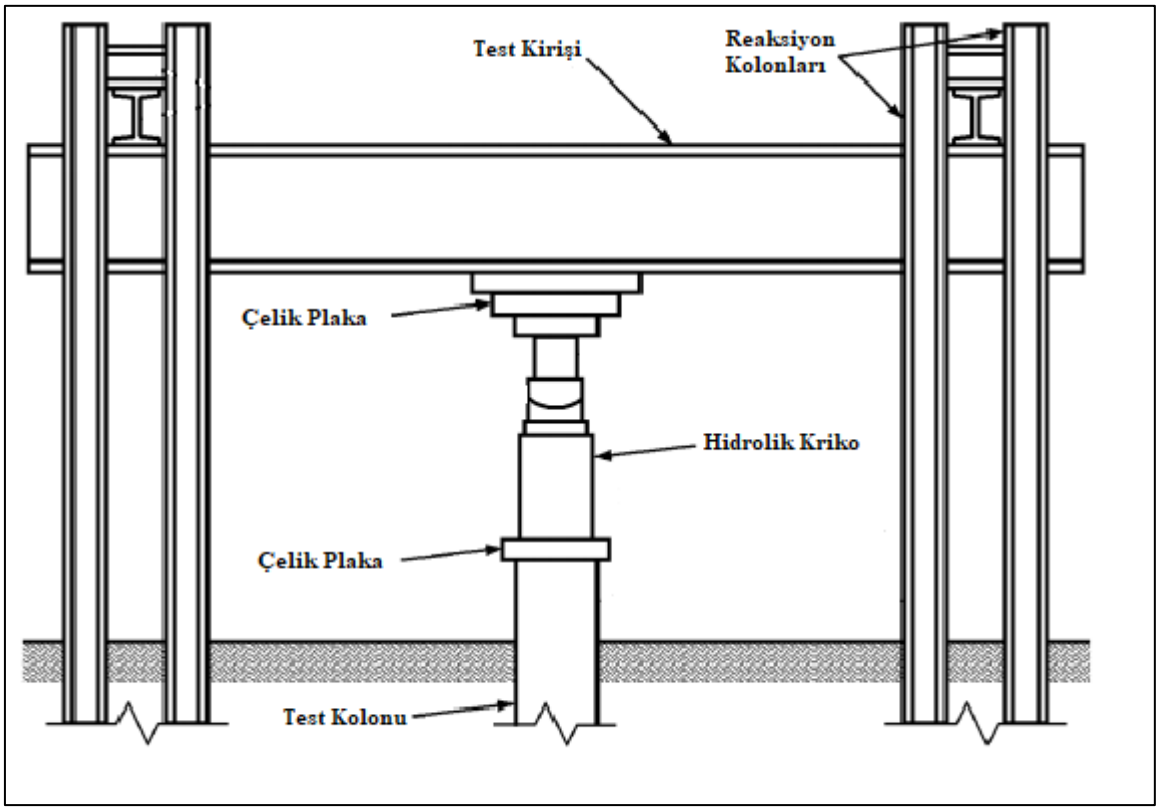
2.3.2. Kazık yükleme deneyi

Kazıklı temeller ile tasarlanan projelerde hesaplanan göçme yükünün sağlamasının yapılması ve kazıkların yük altındaki davranışlarının tasarım sırasında yapılan kabullere uygun olup olmadığının araştırılması için projenin bir parçası olarak kazık yükleme deneyi yapılmaktadır. Kazık yükleme deneyinin amacı, deney sonucunda elde edilecek verilerin yorumlanarak kazık taşıma kapasitesi hesaplamaktır. Kazık yükleme deneyinde [17]:

- Kazığın tasarım yükünde yapacağı oturma
- Kazığın göçme yükünü doğrudan belirlemek

- Ayrıca kazık yükleme deney sonucu, geri analiz kazık tasarımında kullanılan parametrelerin doğruluğunu kontrol edebilir.

Yükleme deneyleri (Şekil 2.9) ASTM D-1143 standartlarına göre yapılabilir. Bu standarda göre daha önce bir göçme olmaması halinde test kazığı tasarım yükünün %150'sine, tasarım yükünün %25'inden oluşacak kademelerle yüklenmelidir. Bazı durumlarda (genellikle test kolonu aşamasında) jet grout kolonları göçme meydana gelene kadar yüklenebilir. Göçme durumu, yükün daha fazla artmadığı halde oturmanın devam etmesi halindeki yük ve toplam oturmanın kolon çapının %10'unu geçmesi durumundaki yük olarak tanımlanır.



Şekil 2.9. Kazık yükleme deney düzeneği [18]

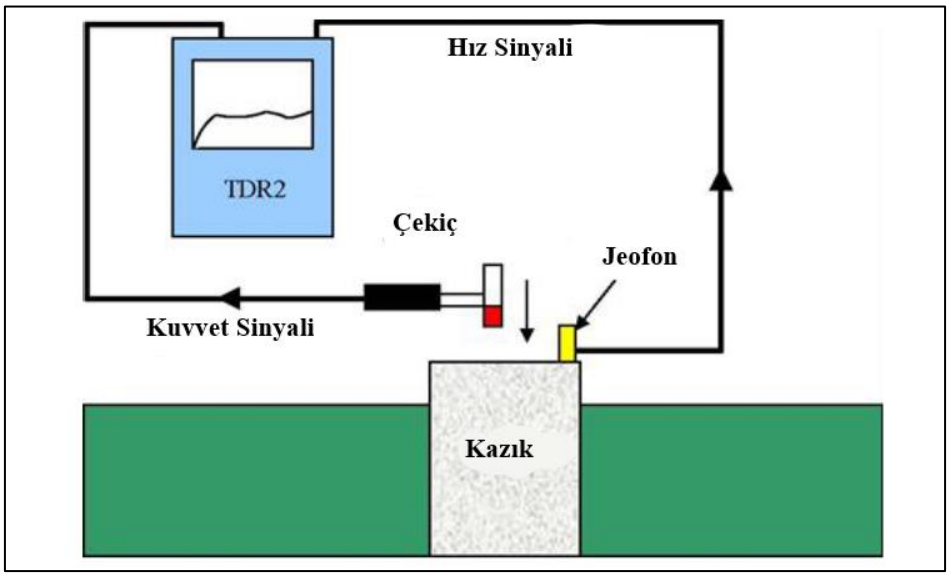
2.3.3. Kazık süreklilik deneyi

Kazık süreklilik deneyleri, kazıklardaki kusurları veya süreksizlikleri belirleyerek imalat kalitesinin kontrol edilmesinde yardımcı olmaktadır. Süreklilik deneyinde kazık başında oluşturulan darbenin oluşturduğu mekanik dalganın kazık boyunca hareketi yine kazık başında bulunan bir jeofonla kaydedilmesi ilkesine dayanır (Şekil 2.10).

Jeofonun kaydettiği mekanik dalgalar belirli büyütme değerleri kullanılarak dijitalleştirilir. Sahadan alınan kayıtlar uygun yazılımlarla analiz edilmekte ve sonuçlar grafik olarak elde

edilmektedir. Bu veriler yardımıyla kazık boyunca meydana gelen daralma – genişleme, kazık boyu ve kırılmalar yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Süreklilik deneyinde her kazıktan 4 farklı kayıt alınarak çevresel değişikliklerin etkisi en aza indirilir [19].

Bu deneylerin yorumlanmasında gerilme dalga teorisinden yararlanılmaktadır. Gerilme dalgası, çekiçle yapılan darbe sonrasında kazık başlığından başlayarak alta doğru hareket eder ve daha sonra alttan yansıyarak tekrar kazık başlığına gelir. Böylece elde edilen veriler sayesinde süreklilik deneyinden kazık kesiti boyunca meydana gelen daralma, genişleme, kırıklar ve kazık boyu yaklaşık olarak belirlenebilir.

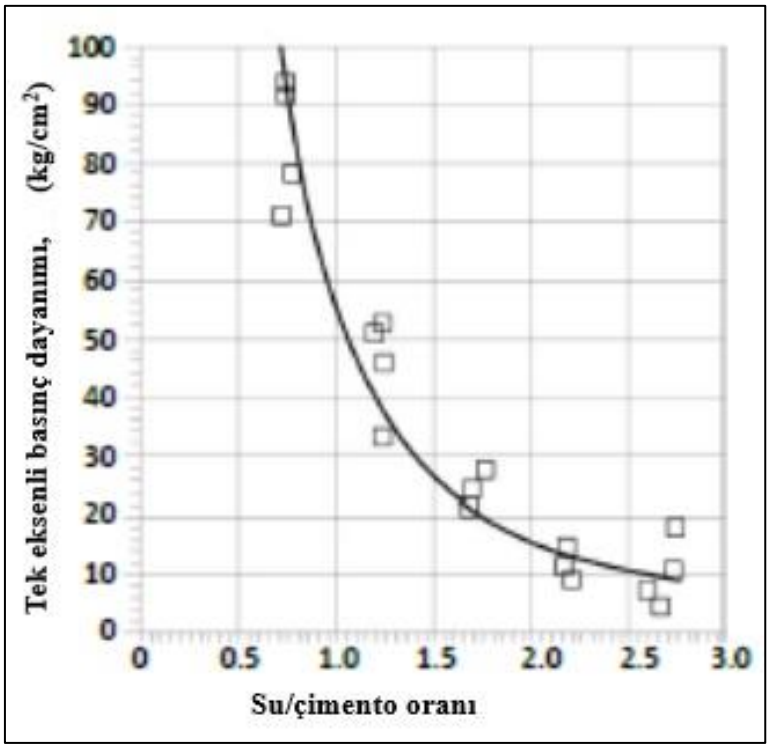


Şekil 2.10. Süreklilik deneyi düzeneği

2.3.4. Karot numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyi

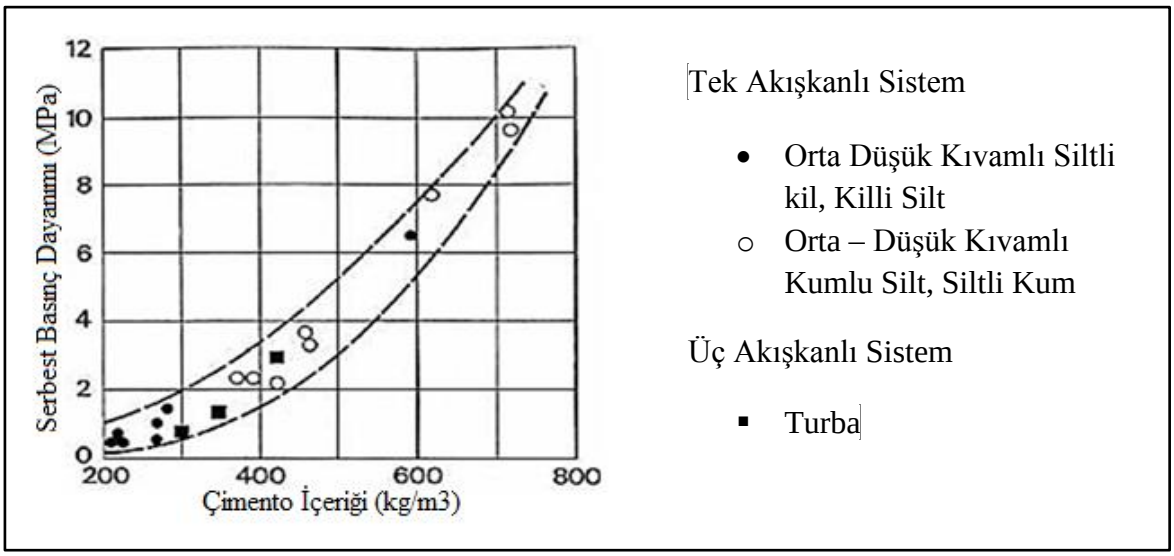
Jet grout imalatı tamamlandıktan sonra 28 günlük prizini alan kazıklardan karot ile numune alınarak üzerlerinde serbest basınç deneyi uygulanır. Böylelikle hedeflenen basınç mukavemetine ulaşılıp ulaşılmadığı belirlenir.

Kauschinger (1992) su/çimento oranının Boston Mavi Killerinde imal edilen jet grout kolonundan alınan karot numunesinin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisini Şekil 2.11'deki gibi sunmuşlardır. Şekil 2.11'e göre su/çimento oranının artması durumunda tek eksenli basınç dayanımı azalmaktadır [20].



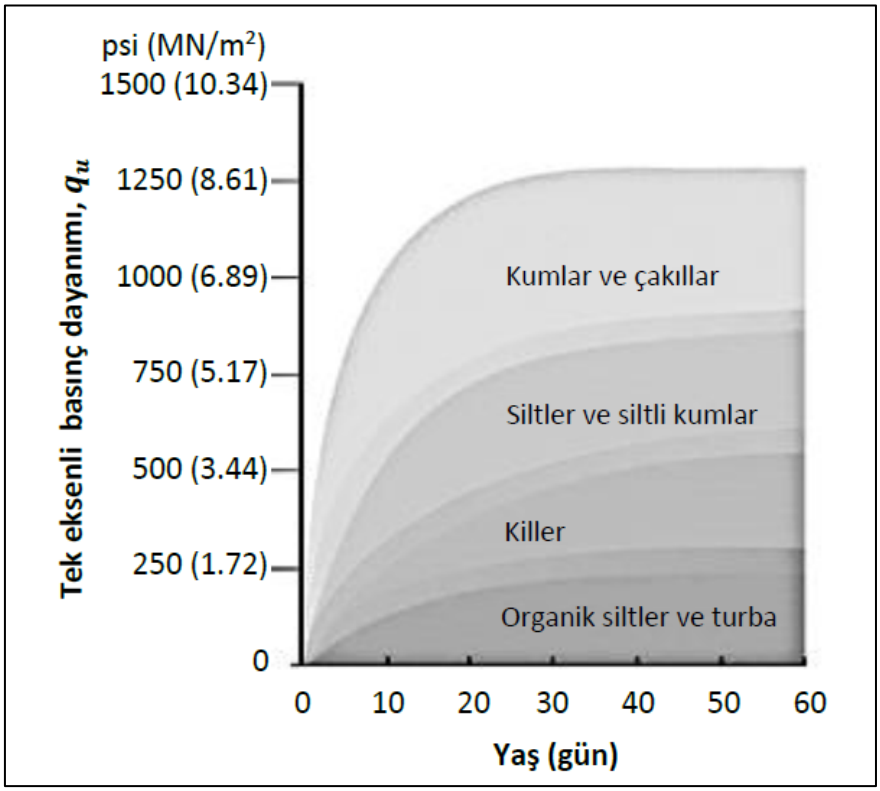
Şekil 2.11. Boston Mavi Killeri'nde su/çimento oranı ile karot basıncı ilişkisi [20]

Kauschinger (1992) gibi Melegary ve Garrasino (1997) da dozajın tek eksenli basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. Melegary ve Garrasino (1997) çalışmalarını tek akışkanlı ve üç akışkanlı sisteme göre kumlu – siltli, siltli-killi ve turba zeminde gerçekleştirmiş ve Şekil 2.12'deki grafiği elde etmiştir. Yapılan çalışma sonucu enjeksiyon harcındaki çimento oranının artmasının tek eksenli basınç dayanımını arttırdığı gözlenmiştir [11].



Şekil 2.12. Çimento oranının karot basınç dayanımına etkisi [11]

Değişik zeminlerde imal edilen jet grout kolonlarından alınan karotların basınç dayanımları Şekil 2.13'te verilmiştir [21]. Şekil 2.13'e göre granüler zeminlerden elde edilen basınç dayanımları killer ve siltlerde edilenlere göre çok daha yüksektir.



Şekil 2.13. Değişik zeminlerdeki jet grout kolonlarında elde edilebilecek tek eksenli karot basınç dayanımları [21]

3. KAZIK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESAPLANMASI

Bir kazığın taşıma kapasitesini kazık – zemin etkileşimi yönünden belirleyen başlıca iki etken, kazığı çevreleyen zeminin mekanik özellikleri ile kazığın yapıldığı malzemenin mekanik özelliklerdir. Hem kazık malzemesinin hem de zeminin uygulanan yük altında yenilmemesi amaçlanmaktadır. Zemin dayanımı yönünden kazıkların taşıma kapasitesi, teorik ve ampirik formüllerle bulunabilir. Ayrıca arazide kazıkların üzerinde gerçekleştirilen yükleme deneylerinden elde edilen verilerin yorumlanmasıyla ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan programlar kullanılarak da kazıkların taşıma kapasitesi hesaplanabilir.

3.1. Teorik ve Ampirik Yöntemler ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması

Yarı sonsuz bir zemin ortamı içindeki bir kazık yüklendiği zaman bir miktar oturur, bu arada kazık yüzeyi-zemin arasındaki sürtünmeden ötürü çevre zemini de oturur. Bu durumda kazık ile zeminin arasındaki yüzeyde zeminin aderans özelliği harekete geçer ve sonuçta kazık yüzeyinde oturmanın tersi yönde bir sürtünme direnci oluşur. Bu olay çevre sürtünmesi ($Q_ç$) olarak adlandırılır. Bu hareket sırasında kazığın tabanı da dayandığı zemine basarak bu zemini sıkıştırır ve kazık ucunda bir uç direnci (Q_u) oluşturur. Bu iki direncin toplamı nihai taşıma kapasitesini (Q_{ult}) ifade eder.

$$Q_{ult} = Q_u + Q_ç \tag{3.1}$$

3.1.1. Kazık uç direnci

Kazık uç direncini hesaplamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle kazık uçlarının bir yüzeysel temelin zeminle dokunma yüzeyi olarak kabul edilmesine dayanmaktadır. Yüzeysel temeller için taşıma kapasitesi hesabını Terzaghi vd. (1996) Eşitlik 3.2'deki gibi ifade etmiştir [22].

$$q_u = c\,N_c + q\,N_q + \gamma B\,N_\gamma \tag{3.2}$$

Burada N_c, N_q, $N_{\square}$ taşıma kapasitesi faktörleridir.

Kazıklı temeller derin temeller sınıflandırmasına dahildir. Ancak birim alana gelen nihai direnç (q_b) Eşitlik 3.3'teki gibi açıklanabilir.

$$q_u = q_p = cN_c + qN_q + \gamma DN_\gamma \tag{3.3}$$

Kazık çapı "D", temel genişliği "B" ile kıyaslandığında daha küçük kaldığından Eşitlik 3.2'deki "γDN_γ" ifadesi ihmal edilebilir ve Eşitlik 3.4 haline gelir [37].

$$q_p = cN_c + qN_q \tag{3.4}$$

$$Q_u = A_p q_p = A_p(cN_c + qN_q) \tag{3.5}$$

Burada;

A_p: Kazık kesit alanı

c: Kazık ucundaki zeminin kohezyonu

q_p: Uç direnci

q: Kazık ucundaki efektif gerilme

N_c, N_q taşıma kapasitesi faktörleri

3.1.2. Kazık sürtünme direnci

Granüler zeminlerde zemin ile kazık arasında fiziksel sürtünme, killi zeminlerde ise adezyon hareketlenmesi nedeniyle çevre sürtünmesi direnci oluşur. Çevre zemini ile kazık çeperi arasındaki çevre sürtünmesinden doğan bu taşıma kapasitesi bileşeni kazığın içinde bulunduğu her tabakanın çevre sürtünmesi ayrı ayrı hesaplanıp toplanması sonucu bulunur. Bir kazığın yüzey direnci, kazık yüzeyi ile zemin arasında oluşur. Sürtünme direnci Eşitlik 3.6'daki gibi yazılabilir [23].

$$Q_ç = \sum p\ L\ f_s \tag{3.6}$$

Burada;

p: kazık çevre uzunluğu

L: Kazık uzunluğu

f_s : z derinliğindeki birim sürtünme direnci

"f_s" direnci zemin türüne göre farklılık gösterir. Bu yüzden farklı zeminlerde farklı yöntemlerle ifade edilir.

Kumlarda sürtünme direnci

Coyle ve Castello (1981) kumlarda sürtünme direncini Eşitlik 3.7'deki gibi ifade etmişlerdir [24].

$$Q_ç = \sum p\, L\, f_s \tag{3.7}$$

$$f_s = K_0 \sigma_0 \tan \delta \tag{3.8}$$

Burada;

K_0: Efektif zemin basınç katsayısı

σ_0: Efektif gerilme

δ: Zemin-kazık arası sürtünme açısı

Önerilen K_0 katsayıları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Önerilen K_0 değerleri [23]

Kazık Tipi	K_0
Dökme kazık ve jet enjeksiyonları	K_0=1-sinØ
Düşük yer değiştirmeli çakma kazıklar	K_0 – 1,4 K_0
Yüksek yer değiştirmeli çakma kazıklar	K_0 – 1,8 K_0

δ değerinin kazık malzeme türüne bağlı olarak, araştırmalar sonucu 0,5Ø – 0,8Ø arası olduğu görülmüştür. Buna göre sürtünme direnci Eşitlik 3.9'daki gibi ifade edilebilir [23].

$$Q_ç = f\, p\, L = (K_0 \sigma_0 \tan \delta) pL \tag{3.9}$$

$$Q_ç = K_0 \sigma_0 \tan(0{,}8Ø)\, pL \tag{3.10}$$

Killerde sürtünme direnci

Killerde sürtünme direncini hesaplayan çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler ve yöntemleri birbirinden ayıran özellikler aşağıda açıklanmıştır [23].

λ Yöntemi: Sürtünme direnci derinlik, efektif gerilme ve drenajsız kayma mukavemeti etkenlerine bağlı olarak hesaplanır.

α Yöntemi: Sürtünme direnci adezyon ve drenajsız kohezyona bağlı olarak hesaplanır.

β Yöntemi: Sürtünme direnci yanal toprak basınçları ve drenajlı duruma bağlı olarak hesaplanır.

Bu çalışma kapsamında sadece α Yöntemi ele alınmıştır.

α Yöntemi

Bu yöntemde sürtünme direnci adezyon tarafından karşılanmaktadır. Nihai çevre sürtünmesi taşıma kapasitesi (Q_s) Eşitlik 3.11'deki gibi ifade edilir [23].

$$Q_s = \sum f\, p\, \Delta L \tag{3.11}$$

Burada;

p: kolon çevresi uzunluğu

L: kolon boyu

f: birim çevre direnci

Killi zeminlerdeki birim çevre direnci Eşitlik 3.11'deki gibi ifade edilebilir [23].

$$f = \alpha\, c_u \tag{3.12}$$

α: Ampirik adezyon faktörü

α, Sladen (1992) tarafından Eşitlik 3.13'teki gibi ifade edilmiştir [25].

$$\alpha = C\left(\frac{\sigma'_0}{c_u}\right)^{0,45} \tag{3.13}$$

Burada;

σ'_0: Efektif gerilme

$C \cong 0,4 - 0,5$

Yaklaşık α değerleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Yaklaşık α değerleri [38]

c_u/p_a	α
<0,1	1,00
0,2	0,92
0,3	0,82
0,4	0,74
0,6	0,62
0,8	0,54
1,0	0,48
1,2	0,42
1,4	0,40
1,6	0,38
1,8	0,36
2,0	0,35
2,4	0,34
2,8	0,34

P_a: Atmosferik basınç

Buna göre çevre sürtünmesi direnci Eşitlik 3.14'teki gibi ifade edilebilir.

$$Q_s = \sum f\, p\, \Delta L = \sum \alpha\, c_u p\, \Delta L \tag{3.14}$$

3.2. Kazık Yükleme Deneylerinden Elde Edilen Veriler ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması

Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile kazığın göçme mekanizmasını tahmin edilebilmesi ve varsa hatalı imal edilmiş kazıkların ayırt edilebilmesi sağlanır. Göçme yükünün tahmini için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında bu yöntemlerden bazıları açıklanmıştır.

3.2.1. Brinch – Hansen %80 yöntemi (1963)

Bu yöntem doğrultusunda Brinch-Hansen (1963)'nın çalışmasına göre, uygulanan yükün %80'ine denk gelen oturmanın 4 katı oturmaya sebep olan yük göçme yükü olarak kabul edilir [26].

Bu yöntemde ilk olarak her oturma değerinin karekökünün karşılık gelen yük değerine bölünmesinden elde edilen değer ile oturma ($\sqrt{\Delta}/Q - \Delta$) arasında bir grafik oluşturulur (Şekil 3.1). Bu grafikten elde edilen doğrunun denklemi Eşitlik 3.15'te ifade edilmektedir.

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{Q} = C_1 \text{ x } \Delta + C_2 \tag{3.15}$$

Burada;

Q : Yükleme deneyi sırasında uygulanan yük,

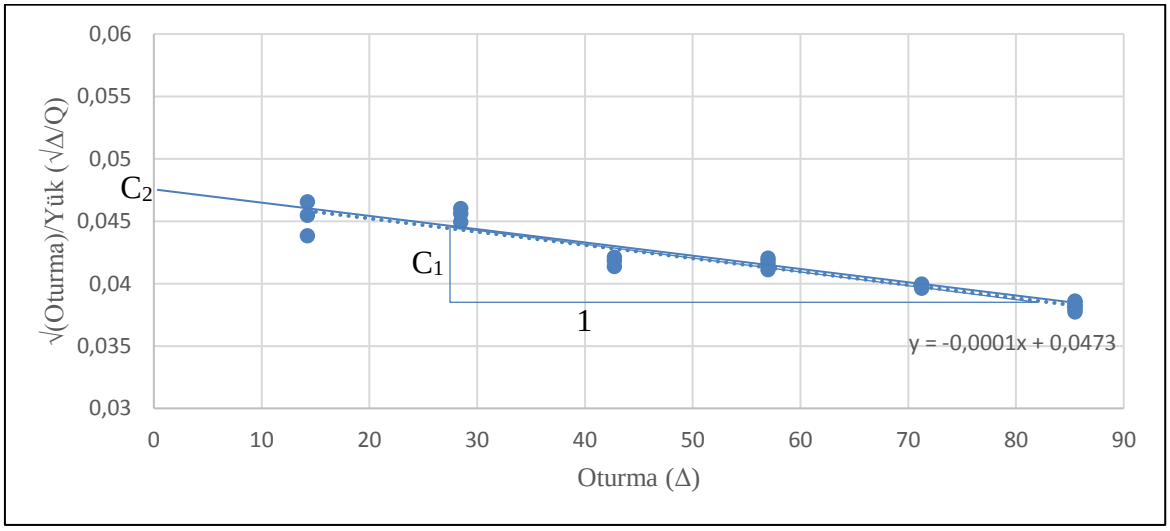
Δ : Yükleme deneyi sırasında okunan oturma değerini,

C_1: Doğrunun eğimini

C_2: Doğrunun $\sqrt{\Delta}/Q$ eksenini kestiği noktayı ifade etmektedir.

Brinch - Hansen %80 yönteminde kolonun taşıma kapasitesi Eşitlik 3.16'dan faydalanılarak hesaplanır.

$$Q_{ult} = \frac{1}{2 \text{ x } \sqrt{C_1 C_2}} \tag{3.16}$$

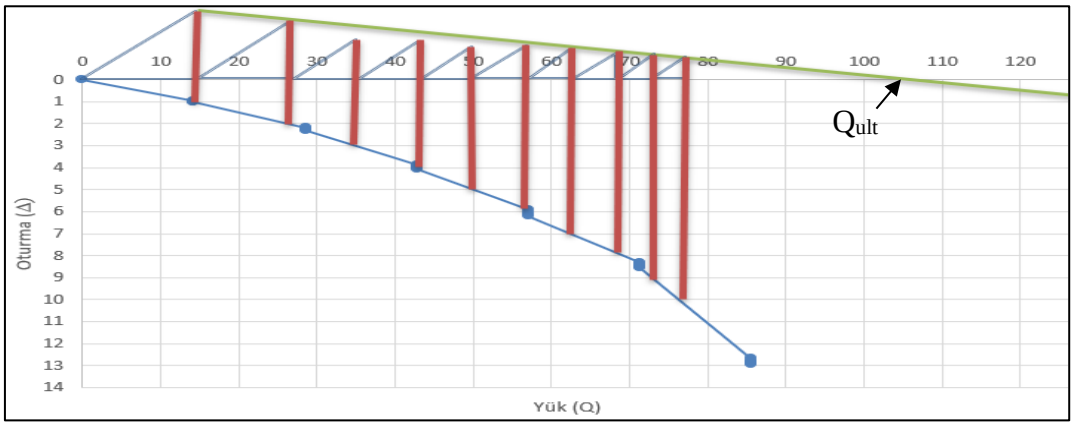


Şekil 3.1. Brinch Hansen %80 yöntemi örneği

3.2.2. Mazurkiewicz (1972) yöntemi

Mazurkiewicz (1972) tarafından geliştirilen bu yöntem doğrultusunda yük-oturma eğrisi parabolik kabul edilir. Bu yöntem ile kolon nihai taşıma kapasitesinin (Q_{ult}) belirlenebilmesi için öncelikle oturma ekseni eşit aralıklarla bölünür ve oturma eksenini eşit aralıklara bölen doğruların yük – oturma eğrisini kestiği noktalardan oturma eksenine paralel doğrular (kırmızı) çizilir. Bu paralel doğruların yük eksenini kestiği noktalardan yük ekseni ile 45° 'lik eğime sahip ve bir sonraki oturma eksenine paralel doğruyla kesiştirilmek suretiyle doğrular (mavi) çizilir. Bu 45° 'lik eğim yapan doğruların oluşturduğu üçgenlerin tepe noktalarını birleştiren bir doğru (yeşil) çizilir ve bu doğru yük eksenini kesene kadar uzatılır.

Bu doğrunun yük eksenini kestiği nokta kolonun nihai taşıma kapasitesini verir (Şekil 3.2) [27].



Şekil 3.2. Mazurkiewicz (1972) yöntemi örneği

3.2.3. Chin Kondner (1970) yöntemi

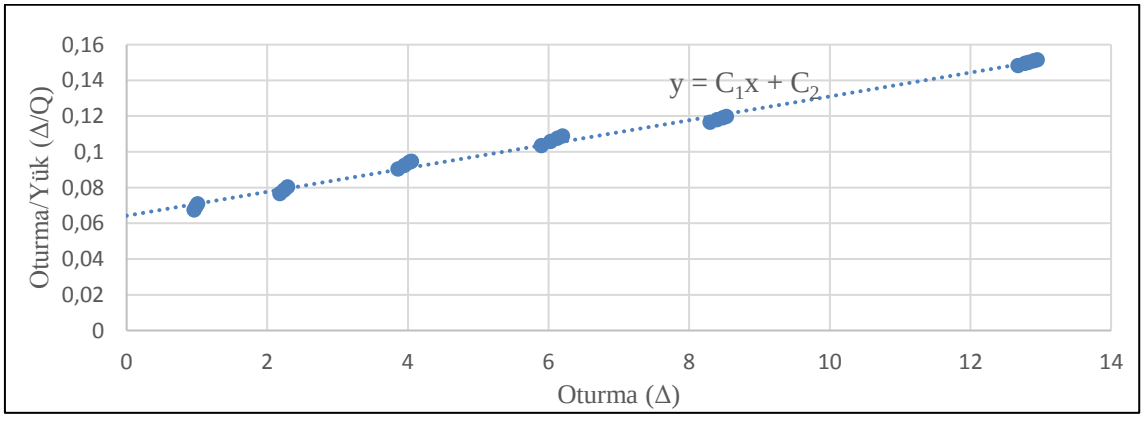
Bu yöntemde her yük değerine karşılık gelen oturma, yük değerine bölünerek oturma/yük – oturma grafiği çizilir (Şekil 3.3). Grafikteki noktalar belli bir değerden sonra doğrusal eğim gösterir. Bu noktaların oluşturduğu doğrunun eğiminin tersi ($1/C_1$) göçme yükünü verir. [28]

Göçme yükü;

$$Q_{ult} = 1/C_1 \quad (3.17)$$

C_1: Chin Kondner grafiğindeki doğrunun eğimi

Eğer deneyde bir olumsuzluk varsa Chin Kondner grafiğindeki doğrusal bölgedeki noktaların bir kısmı doğrunun dışına çıkar. Bu sebeple yöntem deney sırasında uygulanırsa deneyin gidişatı hakkında bilgi sahibi olunabilir.

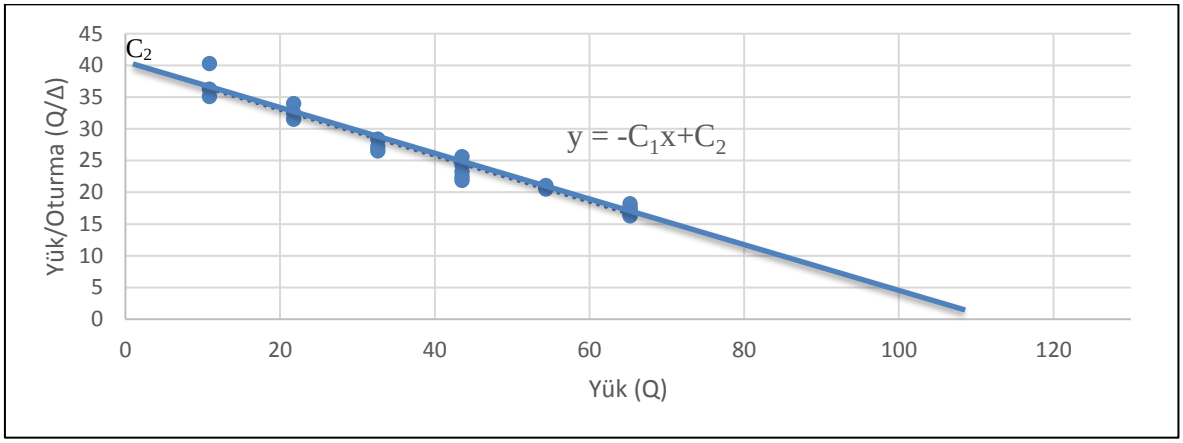


Şekil 3.3. Chin Kondner (1970) yöntemi örneği

Yöntemin mantıklı sonuç vermesi için ölçüm zaman sabit olması ve kazık oturmasının elastik sınırı aşıp plastik oturma bölgesine geçmiş olması gerekir [28].

3.2.4. Decourt (1999) Yöntemi

Her yük değerine karşılık gelen oturma değerine bölünerek elde edilen değerler ile oturma/yük – yük grafiği çizilir (Şekil 3.4). Ortaya çıkan grafikteki eğri absise yaklaştığında doğrusal olmaya başlar ve bu doğru uzatıldığında absis ile kesişir. Bu doğrunun absis ile kesiştiği noktadaki yük değeri Decourt limit değeridir [29].



Şekil 3.4. Decourt (1999) yöntemi örneği

Burada;

$$Q_{ult} = \frac{C_2}{C_1} \tag{3.18}$$

C_1: Doğrunun eğimi

C_2: Doğrunun düşey ekseni kestiği nokta

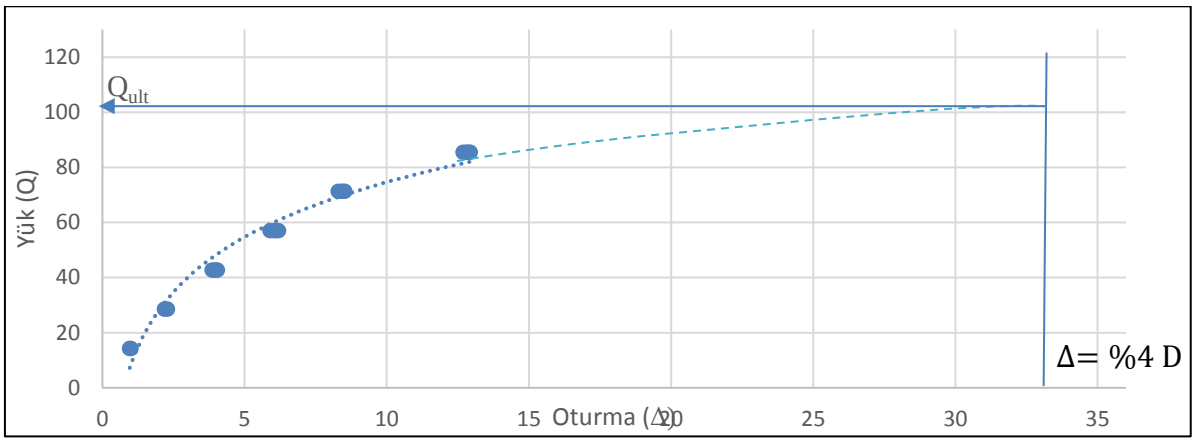
Q_{ult}: Göçme yükü

Decourt yöntemi ile Chin Kondner yönteminden elde edilen göçme yüklerinin birbirine yakın olması beklenir [30].

3.2.5. Hirany-Kulhawy (2002) yöntemi

Bu yöntemde yük – oturma eğrisinin, kolon çapının %4'ü kadar oturma değerini kestiği nokta o kolonun taşıma kapasitesini vermektedir (Şekil 3.5). Hirany ve Kulhawy geliştirdikleri yöntemin, yük – oturma eğrisinin ölçeğinden etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Ayrıca bu yöntem kolonların uç direnci ve çevre sürtünme direncinin de belirlenmesi için de kullanılabilmektedir [31].



Şekil 3.5. Hirany-Kulhawy (2002) yöntemi örneği

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Taşıma Kapasitesinin Hesaplanması

Günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi programlarından yaygın olarak yararlanılmaya başlanmıştır. Bu tez kapsamında jet grout kolonlarının taşıma kapasitesi ve oturma hesaplarının yapılması için sonlu elemanlar yöntemi kullanan programlardan da yararlanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanan çeşitli programlar bulunmaktadır (Plaxis, Midas GTS NX vb.). Bu çalışmada Plaxis 3D Foundation programı kullanılmıştır.

Plaxis 3D Foundation, özellikle kıyı temelleri de dahil olmak üzere temel yapılarının analizi için geliştirilen üç boyutlu bir sonlu eleman programıdır. Bir sayısal analiz yöntemi olan bu metotta, birçok karmaşık geometri, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumu dikkate alınabilir. Ancak bu tür çözümlerde çok fazla zamana ve yüksek bilgisayar kapasitelerine gereksinim duyulabilmektedir. Bazen daha basit analiz yöntemleri ile de çok uygun sonuçlar elde etmek mümkündür. Plaxis 3D Foundation yazılımı giriş, hesap, çıkış ve grafik bölümlerinden oluşmaktadır. Giriş bölümünde modelin geometrisi oluşturulur. Bu geometri çözülecek gerçek problemi temsil eder. Geometri oluşturulduktan sonra zemin tabakaları ve özellikleri, yapısal elemanlar ve yükler tanımlanır. Tanımlama işlemleri sonrasında program otomatik olarak sonlu elemanlar ağını oluşturur ve hesap aşamasına geçilir. Hesap aşamasında inşaat aşamaları tanımlanır. Ayrıca çıkış bölümünde hangi düğüm noktasındaki veriler istenilecekse o düğüm noktaları belirlenir. Bu işlemler sonrası hesaplama işlemine başlanılır ve çıkış bölümünden istenilen sonuçlar (gerilme, oturma, moment vb.) alınabilir.

Grafik bölümünde ise daha önceden belirlenen düğüm noktalarında eğriler çizdirilebilir. Modelleme sonuçlarının gerçek koşullara olan yakınlığı kullanıcının modelleme sürecinde zemin koşullarını ve sınırlamalarını belirlemesi, zemin parametrelerini seçimi ve sayısal hesaplama sonuçlarını inceleme yeteneğine fazlası ile bağlıdır. Plaxis yazılımında zemin modellemesi yapılırken farklı zemin modellerinin kullanımına olanak sağlar. Bu modeller [32];

Lineer Elastik Model

Bu yaklaşım lineer elastik malzemelerin Hooke Kanunu'na uygunluğu esasına dayanır. Zemin davranışını etkileyen başlıca iki parametre vardır. Bunlar elastisite modülü (E) ve Poisson Oranı (μ)'dır. Genellikle zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesi için kullanılır.

Mohr – Coulomb Modeli

En sık kullanılan modelleme çeşididir. Zemin davranışını etkileyen başlıca beş parametre vardır. Bunlar Elastisite modülü (E), Poisson Oranı (μ), kohezyon (c), dilatasyon açısı (ψ) ve içsel sürtünme açısı (Ø)'dır.

Hardening Soil Modeli

Bu model sürtünme sertleşmesi plastisitesi çerçevesinde oluşturulmuş, hiperbolik ve elastoplastik bir modeldir. Ayrıca bu modelde temel basınç altında kalıcı kompaksiyonun ifade edilmesi için basınç sertleşmesini de içerir.

4. KAZIK OTURMA HESAPLARI

Bir temelin güvenliği, göçme güvenliğinin sağlanması yanında izin verilebilir sınırları aşmayacak şekilde oturmasını da gerektirir. Kazık oturmasının hesaplanması için bazı yöntemler ortaya atılmıştır. Bu yöntemler hem geçmiş deneyimlere dayanarak geliştirilmiş ampirik yöntemler hem de zemin ortamının matematiksel modellemesine dayanmaktadır. Matematiksel modelleme yöntemlerinde "Doğrusal Elastik Davranış Gösteren Ortam", zemini temsil eden bir "Yaylar Sistemi" veya "Ortamın Birim Deformasyon Enerjisi" kabullerinden birisi yapılır [33].

4.1. Yay Model Yaklaşımı

Yay Modelinde kazık çevresindeki zeminin gerilme durumu yaylarla temsil edilir. Yükleme altında kazık boyunun kısalmadan, rijit davrandığı kabul edilir. Bu yaklaşım kazık uç direnci ihmal eder ve çevre sürtünmesi ilişkisi üzerinde yoğunlaşır. Kayma gerilmeleri kazık yüzeyinde harekete geçen sürtünme direncini ve çeper yakınındaki kayma gerilmesini de temsil etmektedir. Tek kazığın oturma miktarını Birand (2007) Eşitlik 4.1'deki gibi tanımlamaktadır [33].

$$\Delta = \frac{Q}{L \times 1{,}606 \times G} \tag{4.1}$$

Burada;

Q: Kazığa yüklenen yük (N)

L: Kazık boyu (mm)

G: Kayma Modülü (MPa)

Δ: Oturma (mm)

4.2. Tomlinson (2008) Yöntemi

Kazık oturmaları, kazığa uygulanan yüklerin, uç direnci ve çevre sürtünmesi direnci ile kazığın oturduğu zemine aktarılması durumunda hesaplanabilir. Kazık başının oturması, kazık şaftının elastik kısalması ve kazık ucu zeminin sıkışmasının toplamı olarak Eşitlik 4.2'de verilmektedir [34].

$$\Delta = \frac{(Q_ç + 2Q_u)L}{2A_ç E_p} + \frac{\pi}{4} \times \frac{Q_u}{A_p} \times \frac{d(1-\mu^2)I_p}{E_b} \quad (4.2)$$

Burada;

Δ : Oturma

μ : Zeminin poisson oranı,

$A_ç$: Kazık çevre alanı,

A_p : Kazık kesit alanı,

d : Kazık çapı,

E_b : Kazık ucu zeminin elastisite modülü,

E_p : Kazık elastik modülü,

I_p : L/*d* oranına bağlı etki katsayısı,

$Q_ç$: Kazığın çevre sürtünmesi yükü,

Q_u : Kazığın uç direnç yüküdür.

4.3. Vesic (1970) Yöntemi

Vesic 1970'teki çalışmasında kazığın toplam oturmasını işletme yükleri altında ampirik olarak Eşitlik 4.3 gibi ifade etmektedir. Burada uzunluk birimi inç, yük birimi pound cinsinden olmalıdır [33].

$$\Delta = \frac{d}{100} + \frac{Q\,L}{A_p E_p} \quad (4.3)$$

Burada;

Δ : Oturma

Q : Kazığa uygulanan yük (pound),

A_p : Kazık kesit alanı (inç^2),

d : Kazık çapı (inç),

E_p : Kazık elastik modülü (pound/inç),

L : Kazık boyu (inç)

4.4. Das (2004) Yöntemi

Das (2004) Yöntemi, Vesic (1977) Yöntemi üzerinde geliştirilmiştir. Vesic (1977) çalışma yükü altında bir kazığın toplam oturmasını Eşitlik 4.4'teki gibi ifade etmiştir [35].

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \tag{4.4}$$

Δ: Toplam oturma

Δ_1: Kazığın elastik kısalması

Δ_2: Kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle oluşan oturma

Δ_3: Kazık çevre sürtünmesi nedeniyle oluşan oturma

Das (2004) kazığın elastik kısalmasını (Δ_1) Vesic'in 1967'deki denklemiyle ifade ederken kazık ucuna aktarılan yük nedeniyle oluşan oturmayı (Δ_2) ve çevre sürtünmesi nedeniyle oluşan oturmayı (Δ_3) yarı ampirik olarak ifade eder.

$$\Delta_1 = \frac{(Q_u + \xi Q_ç)L}{A_p E_p} \tag{4.5}$$

$$\Delta_2 = \frac{Q_u\, d}{A_p E_b}\,(1-\mu^2) I_{wp} \tag{4.6}$$

$$\Delta_3 = \frac{Q_ç\, d}{A_ç E_b}\,(1-\mu^2) I_{ws} \tag{4.7}$$

Burada,

$Q_ç$: Kazık çevre sürtünme yükü

Q_u: Kazık uç direnç yükü

A_p: Kazık kesit alanı

$A_ç$: Kazık çevre alanı

E_p: Kazık elastisite modülü

E_b: Kazık ucu zeminin elastisite modülü

L: Kazık boyu

d: Kazık çapı

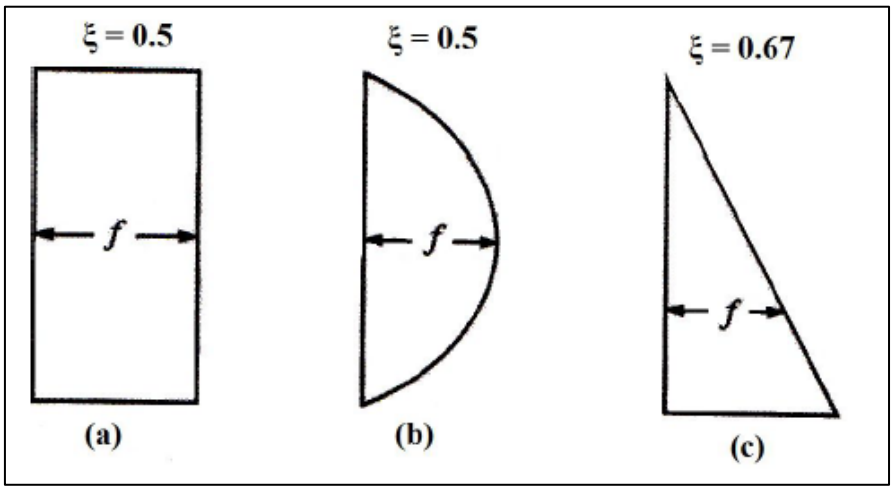
μ: Zemin Poisson oranı

I_{wp}: Uç oturmasına ait etki faktörü

I_{ws}: Çevre sürtünmesi oturmasına ait etki katsayısı

ξ: Birim çevre sürtünmesinin kazık boyunca dağılımına bağlı katsayı

ξ katsayısı zeminin birim sürtünme direncine bağlı olarak ifade edilirken Uzuner (2011) birim sürtünme direnci dağılımını kumlarda üçgen killerde uniform olarak ifade etmiştir. "ξ" katsayısı uniform ve parabolik dağılımlar için 0,5, üçgen dağılımlar için 0,67 değeri önerilmektedir [36].



Şekil 4.1. Kazık boyunca birim sürtünme direnci uniform (a), parabolik (b), üçgen (c) dağılımı [36]

I_{wp} uç oturmaya ait etki faktörü Das (2004) tarafından yaklaşık 0,85 olarak kullanılması önerilmektedir. I_{ws} etki katsayısı için Vesic (1977) basit bir ampirik denklem önermiştir (Eşitlik 4.8). Buna göre,

$$I_{ws} = 2 + 0{,}35\sqrt{\frac{L}{d}} \tag{4.8}$$

Burada;

L: Kazık boyu,

D: Kazık çapıdır

4.5. Poulos ve Davis Yöntemi (1980)

Poulos ve Davis (1980) yarı elastik sonsuz zemin kabulü yaparak tekil kazık oturmasını Eşitlik 4.9'daki gibi ifade etmiştir [37].

$$\Delta = \frac{Q\, I_p}{L\, E_s} \tag{4.9}$$

Burada;

Δ : Oturma

Q: Kazığa uygulanan yük

L: Kazık boyu

E_s: Kazık çevresi zeminin elastisite modülü

I_p: Yer değiştirme etki faktörü

Yer değiştirme etki faktörü (I_p), L/d ve kazık sürtünme faktörü (K) değerlerine bağlıdır. Yer değiştirme faktörü değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Yer değiştirme etki faktörü değerleri [37]

		Yer Değiştirme Etki Faktörü (I_p)	
L/d	K	Düşey Yer Değiştirme	Radyal ve Düşey Yer Değiştirme
10	100	1,79	1,78
	1000	1,38	1,45
25	100	3,56	3,54
	1000	3,18	3,16
100	100	10,67	10,49
	1000	5,22	5,14
	20000	1,26	2,71

Kazık sürtünme faktörü (K) Eşitlik 4.10'daki gibi ifade edilmiştir [37].

$$K = \frac{E_p R_A}{E_s} \tag{4.10}$$

Burada;

K: Kazık sürtünme faktörü

E_p: Kazık elastisite modülü

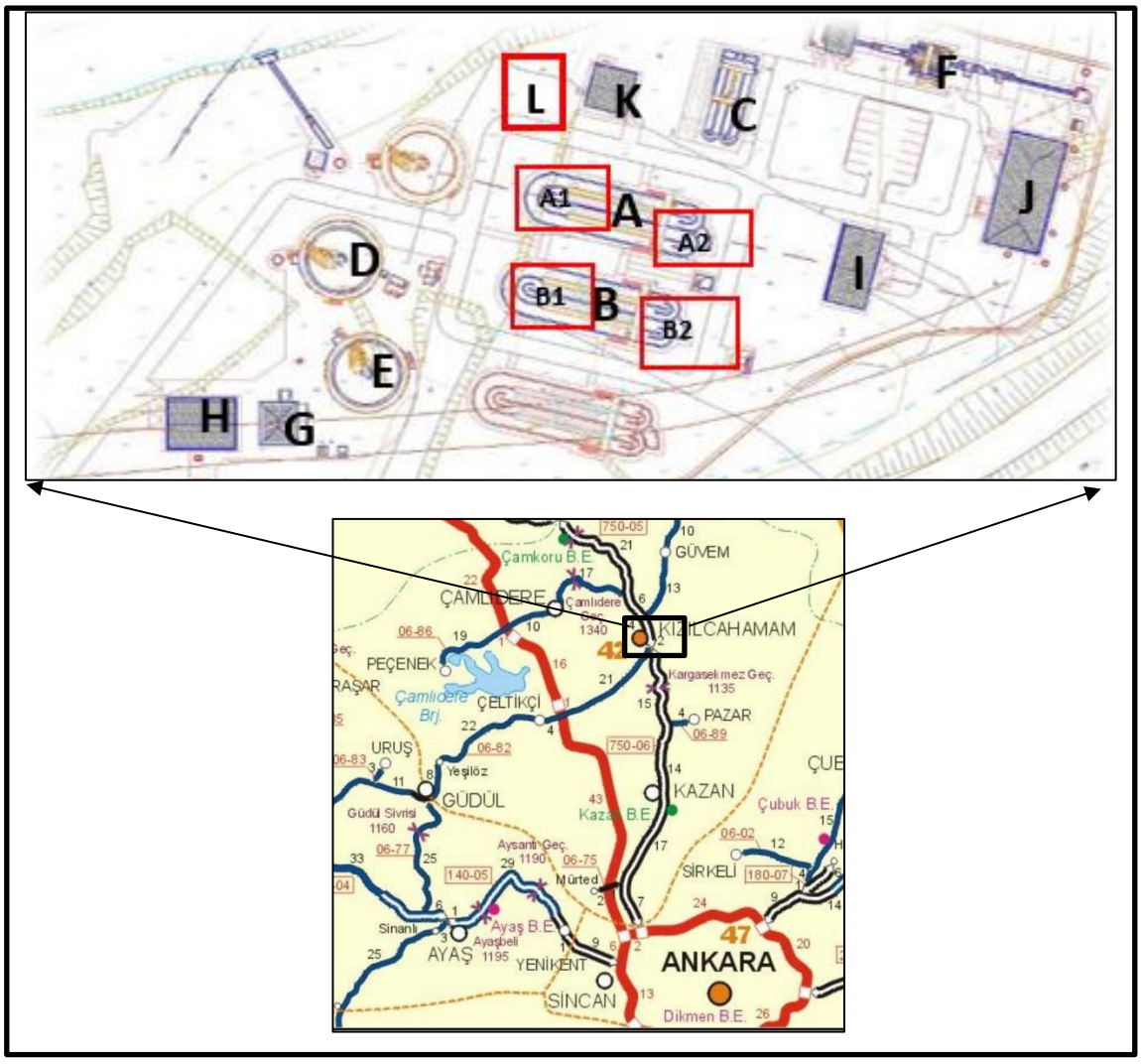
E_s: Kazık çevresindeki zeminin elastisite modülü

R_A: Alan oranı (Eşitlik 4.11)

$$R_A = \frac{A_p}{\pi D^2/4} \tag{4.11}$$

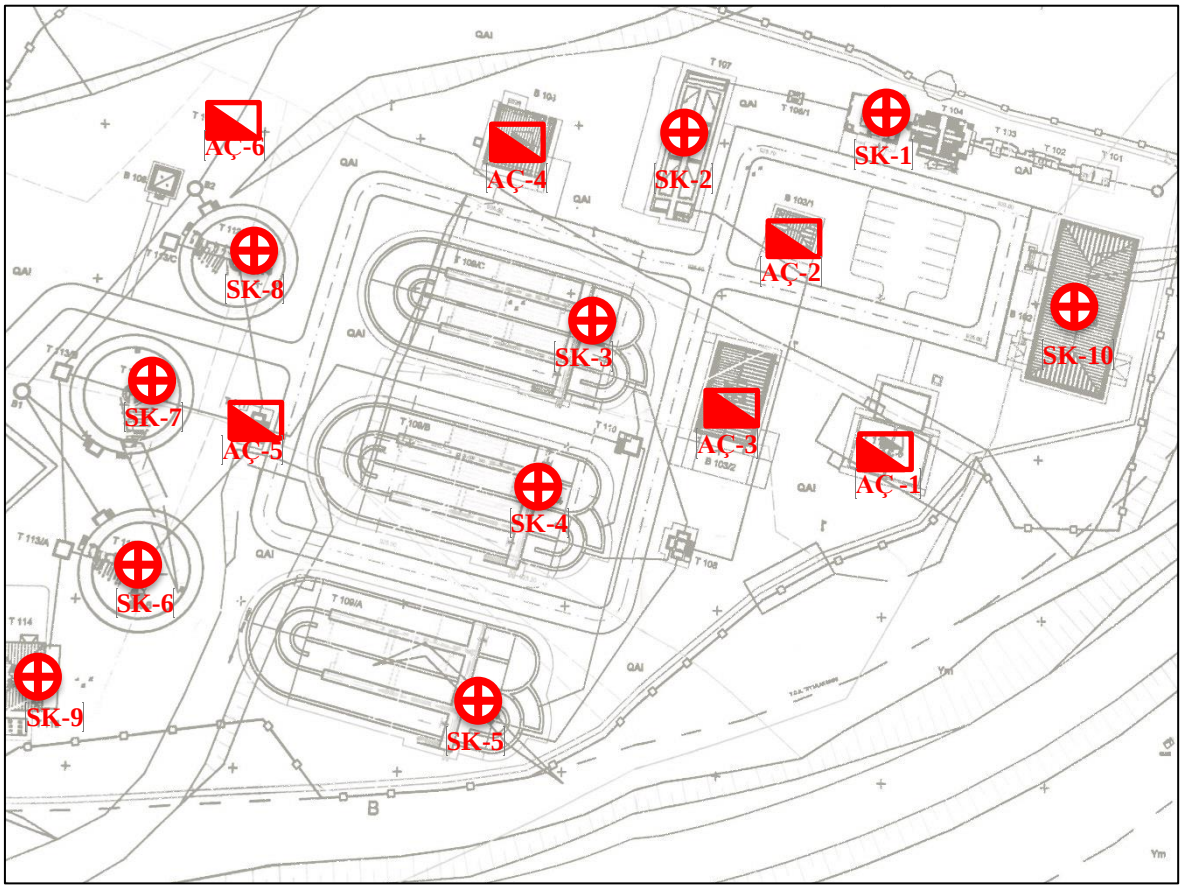
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Ankara ilinin Kızılcahamam ilçesinde bulunan Karacaviran Köyü yakınlarında yapılmış olan atıksu arıtma tesisi taban zeminin iyileştirilmesinde tercih edilen jet grout uygulamasının, planlama ve performans aşamalarının verileri paylaşılmıştır. Atıksu arıtma tesisi projesi iki adet havalandırma havuzu (Harita 5.1 –A ve B), iki adet çökeltme havuzu (Harita 5.1 – D ve E) bir anaerobik havuz (Harita 5.1 – C), idari bina (Harita 5.1 – J), dekantör binası (Harita 5.1 – H), blower binası (Harita 5.1 – I), trafo binası (Harita 5.1 – K), terfi merkezi (Harita 5.1 – F) vs., ünitelerini içermektedir (Harita 5.1). Atıksu arıtma tesisinin toplam inşaat sahası yaklaşık 22.000 m^2 olmakla beraber jet grout uygulaması 3.500 m^2'lik alanda uygulanmıştır (Harita 5.1 de A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K ile gösterilen yapıların altında).



Harita 5.1. Kızılcahamam bölgesi haritası ve tesis yerleşim planı

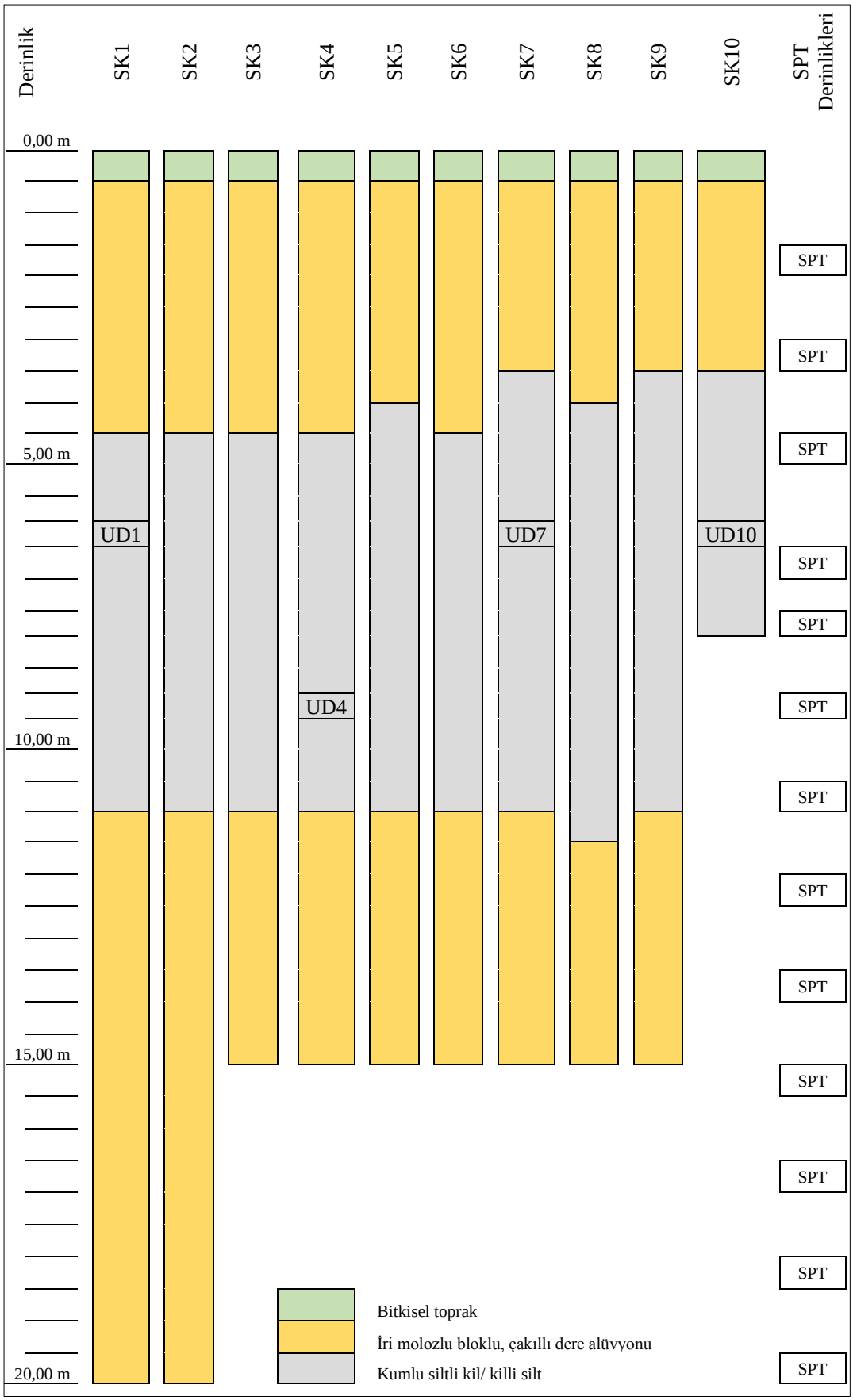
Tesis Ankara'ya 80 km uzaklıkta olup Kuvaterner yaşlı alüvyonlar üzerinde Kirmir akarsuyu kıyısında bulunmaktadır. Sahada zemin etütleri Ağustos 2009 da yapılmış olup 10 adet sondaj kuyusu ve 6 adet araştırma çukuru açılmıştır (Şekil 5.1). Sondaj kuyularının derinliği 6 metre ile 20 metre arasında değişmektedir.



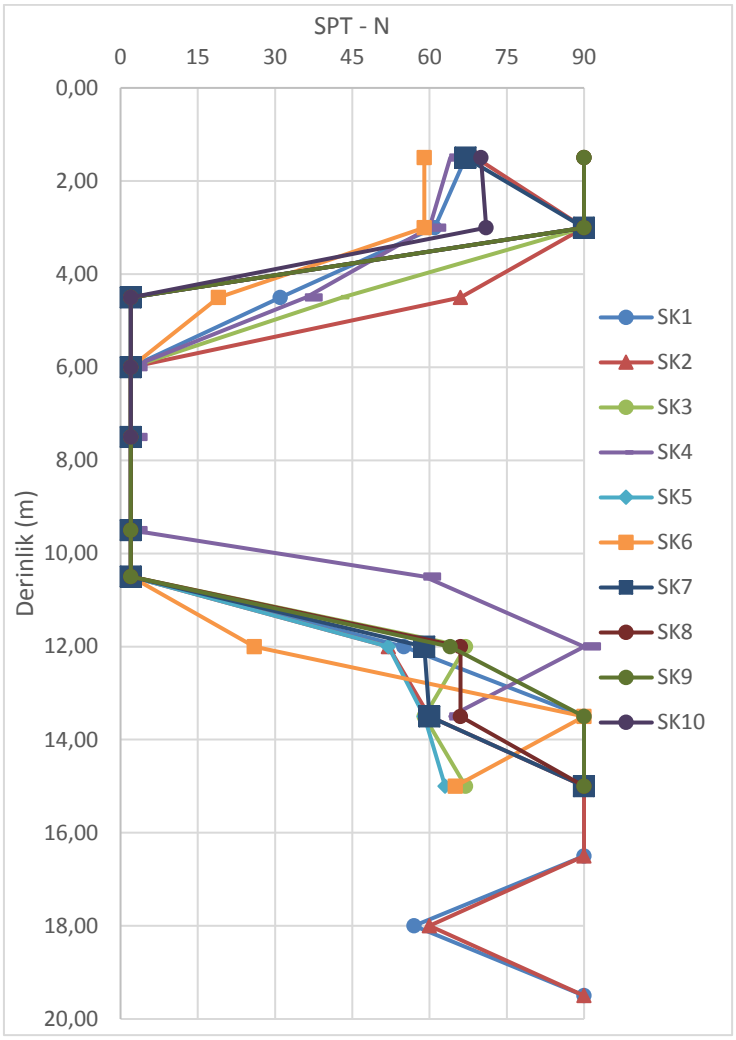
Şekil 5.1. Sondaj kuyuları ve araştırma çukurlarının konumları

Çalışma alanında Kuvaterner yaşlı alüvyon birimi ve kolektör hattı boyunca ve arıtma tesisinin bir kenarında yamaç molozu gözlenmektedir. Birimler, kahve renkli ve gri renklidir. Kuvaterner alüvyon birimi iki farklı karakterdedir. Üstte 0.00–4.50 m. arasında iri molozlu bloklu çakıllı dere alüvyonu, 4,50– 10,50 arasında koyu gri renkli durgun su çökeli olan kumlu siltli kil/killi silt birimi ve altta tekrar 10.50– 20.00 m. de çakıllı bloklu dere alüvyonu gözlenmektedir (Şekil 5.2).

Açılan sondajlarda, yeraltı suyuna zemin yüzeyinden 0,50 ile 1.50 m. arasındaki derinliklerde rastlanmıştır. Her 1,50 m'de bir yapılan SPT deneylerinden elde edilen SPT-N değerleri Şekil 5.2'de verilmiştir. Sondaj kuyularından 4 adet UD numunesi alınmış ve bu numuneler üzerinde mekanik zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Sondaj logları



Şekil 5.3. Arazide elde edilmiş SPT N değerleri

Çizelge 5.1. UD numunelerinden elde edilen zemin parametreleri

	UD1	UD4	UD7	UD10
Alındığı Derinlik	6,00	9,00	6,00	6,00
Kohezyon (c) (kPa)	18	20	19	16
İçsel Sürtünme Açısı (Ø)	2°	2°	3°	3°
USCS Sınıfı	CL	CL	CL	CL

Sondajlardan elde edilen zemin örnekleri üzerinde yapılan deney çalışmaları, zemin mekaniği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Örnekler üzerinde; elek analizi, hidrometrik analiz, Atterberg Limitleri, üç eksenli basınç, konsolidasyon ve su içeriği deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen zemin parametreleri EK-2'de gösterilmiştir.

5.1. Zemin Oturma Hesabı

Yapı yükü nedeniyle elastik oturma ve alttaki kumlu siltli kil biriminde konsolidasyon oturması meydana gelecektir. Buna göre toplam oturma;

$$\Delta S = S_c + S_e \tag{5.1}$$

ΔS : Toplam oturma miktarı

S_e : Elastik oturma miktarı

S_c : Konsolidasyon sebebiyle oluşan oturma

A ve B yapısının temel derinliği 3,20 m'dir Buna göre A ve B yapısının temele uygulayacağı net yük;

$$\sigma_{\text{yapı}} = 90{,}6\ \text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{net}} = \sigma_{\text{yapı}} - \sigma_{\text{kazı}} \tag{5.2}$$

$$\sigma_{\text{kazı}} = 3{,}2 \text{ x } 21 = 67{,}2\ \text{kN/m}^2$$

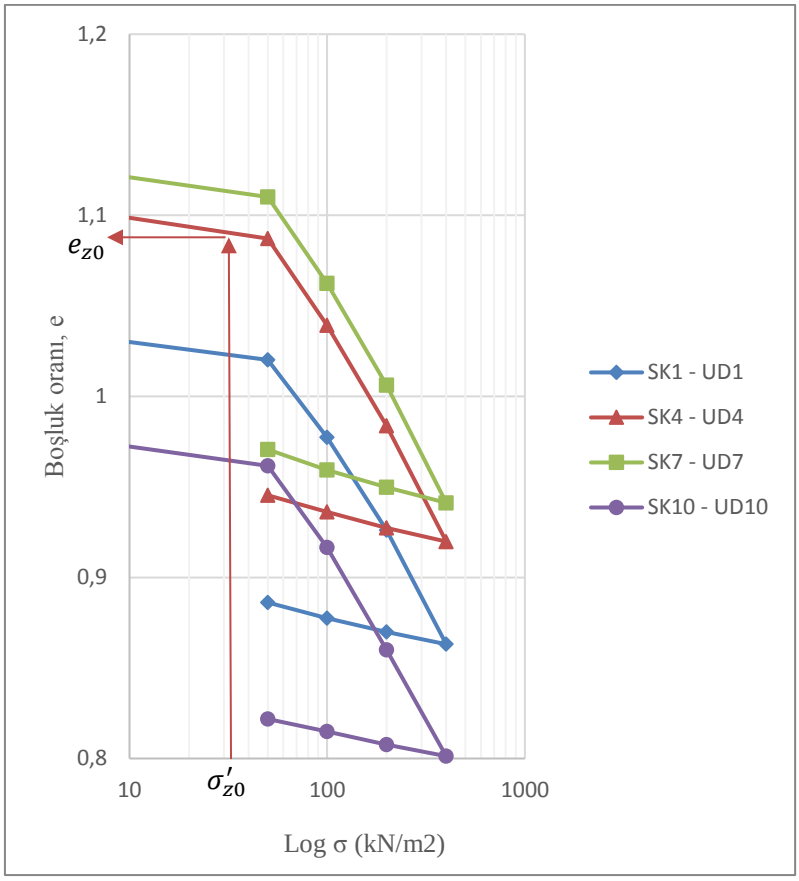
$$\sigma_{\text{net}} = 90{,}6 - 67{,}2 = 23{,}4\ \text{kN/m}^2$$

Temel altında oluşacak elastik oturma bu hesaplamada ihmal edilmiş ve sadece konsolidasyon oturması hesaplanmıştır. Ortaya çıkan gerilme artışıyla birlikte oluşacak konsolidasyon oturması tahmini Eşitlik 5.3 kullanılarak yapılabilir. Burada C_c sıkışma indisi, σ'_0 temel imalatı öncesi kil tabakasındaki ortalama efektif gerilme, $\Delta\sigma_{av}$ gerilme artışı, H_c sıkışabilir tabaka kalınlığı ve e_0 başlangıç boşluk oranı olmak üzere [23];

$$S_c = \frac{H_c}{1 + e_0} C_c \log \frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma_{av}}{\sigma'_{z0}} \tag{5.3}$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{(\sigma'_{z0} + \Delta\sigma)}{\sigma'_{z0}}\right)} \tag{5.4}$$

Araziden alınan UD numuneleri üzerine uygulanan konsolidasyon deneyi sonuçları Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Konsolidasyon deneyleri sonuçları

Şekil 5.4'teki SK4-UD4 eğrisinden C_c sıkışma indisi 0,18 hesaplanmıştır.

$C_c = 0{,}18$

$\sigma'_0 = 34{,}1\ \text{kN/m}^2$

$\Delta\sigma_{av} = 23{,}4\ \text{kN/m}^2$

H_c=6000 mm

$e_0 = 1{,}088$

olmak üzere;

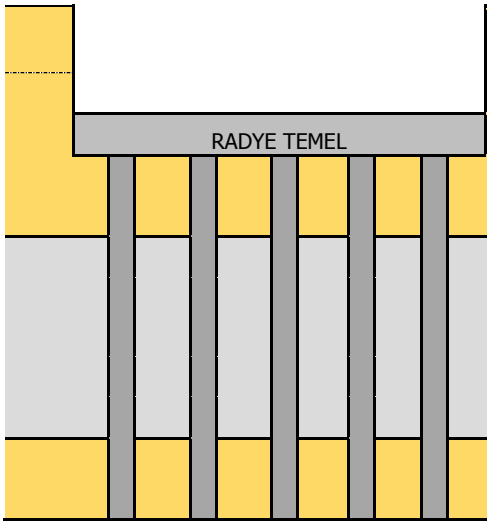
$$S_c = \frac{0{,}18 \times 6000}{1 + 1{,}088} \log\frac{34{,}10 + 23{,}4}{34{,}1} = 11{,}7\ \text{cm}$$

Ortaya çıkan bu değer radye temellerin oturma sınırı 5,0 cm'yi aşmasından dolayı zemin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulacağı kanaatine varılmıştır.

5.2. Jet Grout Kolon Taşıma Kapasitesi Hesabı

Jet grout düzeni 80 cm çapında 2,1m x 2,1m aralıkta üçgen dizilişli tekil kolon uygulaması ön tasarım olarak seçilmiştir. Yapı radye temel derinliği 3,20 m, jet grout kolon boyu 9,50 m ve yer altı su seviyesi 1,40 m'dir. Jet grout kolonuna gelen düşey yük 577 kN olarak hesap raporlarında verilmiştir.

Çizelge 5.2. Zemin efektif gerilmesinin derinliğe göre değişimi



Derinlik	Kolon Çevresi (m)	Tabaka Kalınlığı (m)	σ (kN/m2)	c (kPa)
0,00	0,00	0,00	0,0	0,0
1,50	0,00	1,50	0,0	0,0
3,20	0,00	1,70	0,0	0,0
4,50	2,51	1,30	14,3	0,0
6,00	2,51	1,50	24,2	18,4
7,50	2,51	1,50	34,1	18,4
9,00	2,51	1,50	44,0	18,4
10,50	2,51	1,50	53,9	18,4
12,70	2,51	2,20	78,1	0,0

Kazık uç taşıma yükü hesabı Eşitlik 5.5 kullanılarak hesaplanmış ve 3 güvenlik faktörüne bölünmüştür [33].

$$Q_u = (c \times Nc + Nq \times \sigma'_v) \times A_p \quad (5.5)$$

$$Q_u = 0{,}503 \times 64 \times 78{,}1 = 2510 \text{ kN}$$

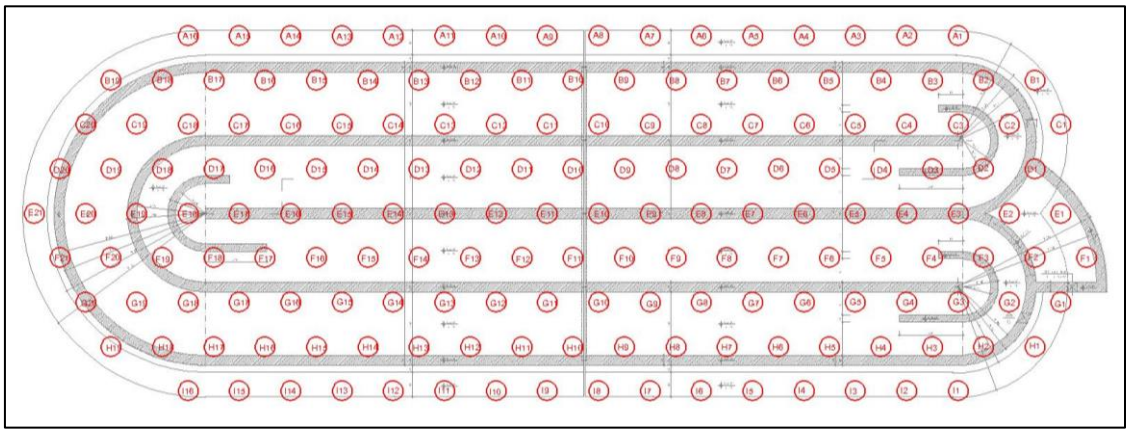
FS= 3

Q_u= 838,0 kN> P_{kolon} = 577 kN

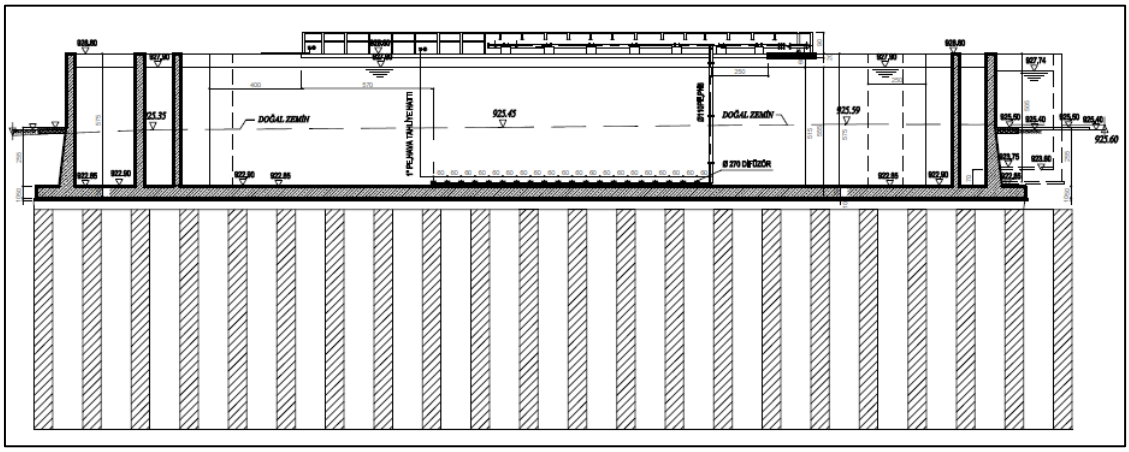
Elde edilen toplam taşıma kapasitesi 838 kN olarak hesaplanmış ve üst yapıdan jet grout kolonlarına aktarılacak yük olan 577 kN'u taşıyabileceği görülmüştür.

6. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI VE BULGULAR

Sahada elde edilen numuneler ile laboratuvar deneyleri yapılmış ve bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla oturma hesapları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu oturmaların 11 cm mertebesinde olduğu görülmüş ve bu durumun giderilmesi için jet grout ile zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Bölüm 3'te görülen jet grout hesaplamaları sonucunda 0,80 m çapında 2,10 m aralıklı jet grout imalatı projelendirilmiştir (Şekil 6.1 – 6.2).



Şekil 6.1. A ve B yapıları altındaki jet grout yerleşim planı



Şekil 6.2. A ve B yapıları altındaki jet grout profili

Projelerde kolon uzunlukları her ne kadar belirtilmiş olsa da imalat sırasında kolonlar zayıf kil tabakasının altında bulunan iri molozlu bloklu, çakıllı tabakaya 1,00 – 1,50 m girecek şekilde imal edilmiştir. İmalata başlanılmadan önce imalatta kullanılacak parametreleri belirlemek için test kolonlar imal edilmiştir. İmalatlar tamamlandıktan sonra süreklilik deneyleri, karot numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyleri, jet grout kolonu yükleme deneyleri ve Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı modellemesi yapılmıştır.

Yapılan yükleme deneylerinin sonuçları Plaxis 3D Foundation sonlu elemanlar programı ve teorik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Üst yapı imalatları tamamlandıktan sonra A ve B yapılarında (Harita 5.1) referans noktalar yardımıyla oturmalar 10 ay boyunca monitörize edilmiştir.

6.1. Plaxis 3D Foundation ile Modelleme Yapılması

Sayısal ortamda zemin koşullarının doğru olarak tasarlanması için zeminin tanımlayıcı parametrelerinin gerçekçi olarak girilmesi oldukça önemlidir. Sayısal analiz için üç farklı modelleme yapılmıştır. A, B, C yapıları için Şekil 6.3(a), D, E, G yapıları için Şekil 6.3(b) ve F yapısı için Şekil 6.3(c)'de tanımlanan modellemeler yapılmıştır.

İnceleme alanında yapılmış 10 adet sondajdan elde edilen verilere göre Çizelge 6.1'de gösterilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Elastisite modülleri hesaplanırken jet grout için Eşitlik 6.1 [38], yamaç molozu için Eşitlik 6.2 [39] kullanılmış ve kilin elastisite modülü için ise Obrzud ve Truty (2012)'nin önerdiği değer [40] alınmıştır.

$$E_{JG} = 4730\sqrt{f_{JG}} \quad (6.1)$$

E_{JG}= 4730$\sqrt{2}$ = 6689 MPa

$$E_{YM}=500(N_{55}+15) \quad (6.2)$$

$E_{YM} = 26000$ kPa

E_{Kil}= 2000 kPa

Çizelge 6.1. Modellemede kullanılan malzeme parametreleri

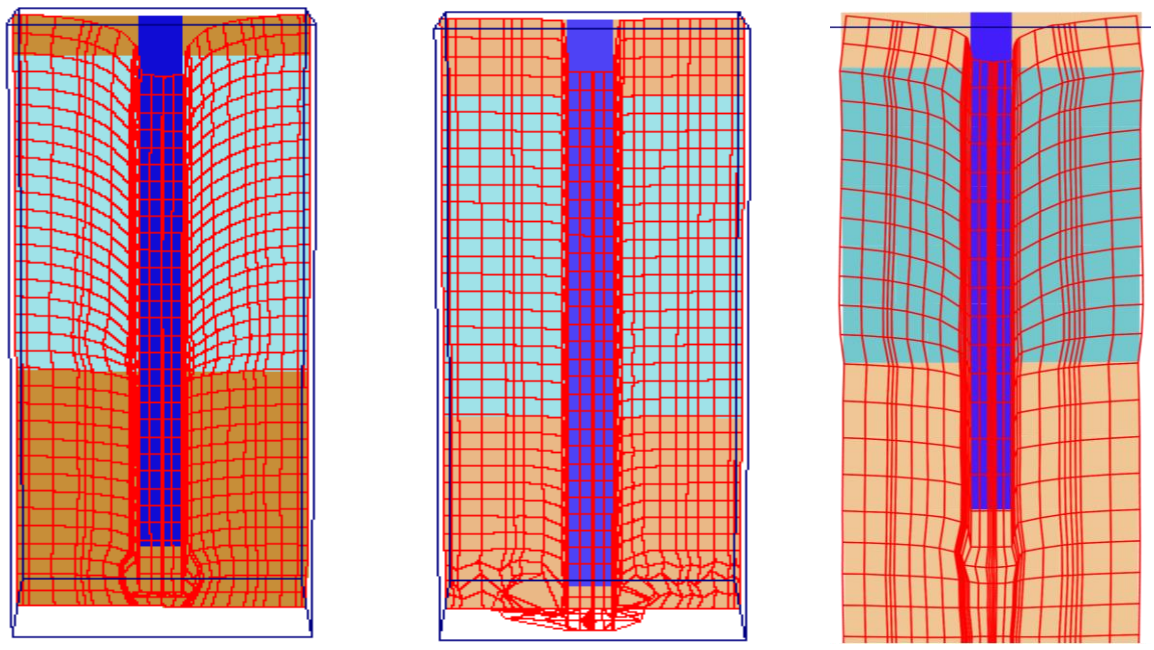
	Kil	Yamaç Molozu	Jet Grout
Modelleme Türü	Mohr – Coulomb	Mohr – Coulomb	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Non Porous
γ_{unsat} (kN/m^3)	16,6	21	24
γ_{sat} (kN/m^3)	16,6	21	24
Elastisite Modülü - E (kN/m^2)	2000	26000	6689000
Poisson Oranı - μ	0,35	0,3	0,3
Kohezyon - c (kPa)	18	1	-
İçsel Sürtünme Açısı - Ø (°)	0	41	-
Dilatasyon Açısı - Ψ (°)	0	11	-

Şekil 6.3(a)'da görülen modelleme (Model 1) sınır şartları 5,00x5,00x15,00 boyutlarında zemin, 0,00-0,80 m arası tabaka yamaç molozu, 0,8 – 7,30 m arası kil ve 7,30 – 15,00 arası yamaç molozu olarak tasarlanmıştır. Zeminin ortasına 0,80 m çapında, 11,00 m uzunlukta jet grout tasarlanmış ve göçme yükünü rahat görebilmek adına jet grout orta noktasına 5000 kN noktasal yükleme yapılmıştır.

Şekil 6.3(b)'de görülen modelleme (Model 2) sınır şartları 5,00x5,00x15,00 boyutlarında zemin, 0,00-1,50 m arası tabaka yamaç molozu, 1,5 – 8,00 m arası kil ve 8,00 – 15,00 m arası yamaç molozu olarak tasarlanmıştır. Zeminin ortasına 0,80 m çapında, 11,00 m uzunlukta jet grout tasarlanmış ve göçme yükünü rahat görebilmek adına jet grout orta noktasına 5000 kN noktasal yükleme yapılmıştır.

Şekil 6.3.(c)'de görülen modelleme (Model 3) 10,00x10,00x20,00 boyutlarındaki zemin, 0,00-1,20 m arası tabaka yamaç molozu, 1,20 – 7,20 m arası kil ve 7,20 – 15,00 m arası yamaç molozu olarak tasarlanmıştır. Zeminin ortasına 0,80 m çapında, 11,50 m uzunlukta jet grout tasarlanmış ve göçme yükünü rahat görebilmek adına jet grout orta noktasına 5000 kN noktasal yükleme yapılmıştır.

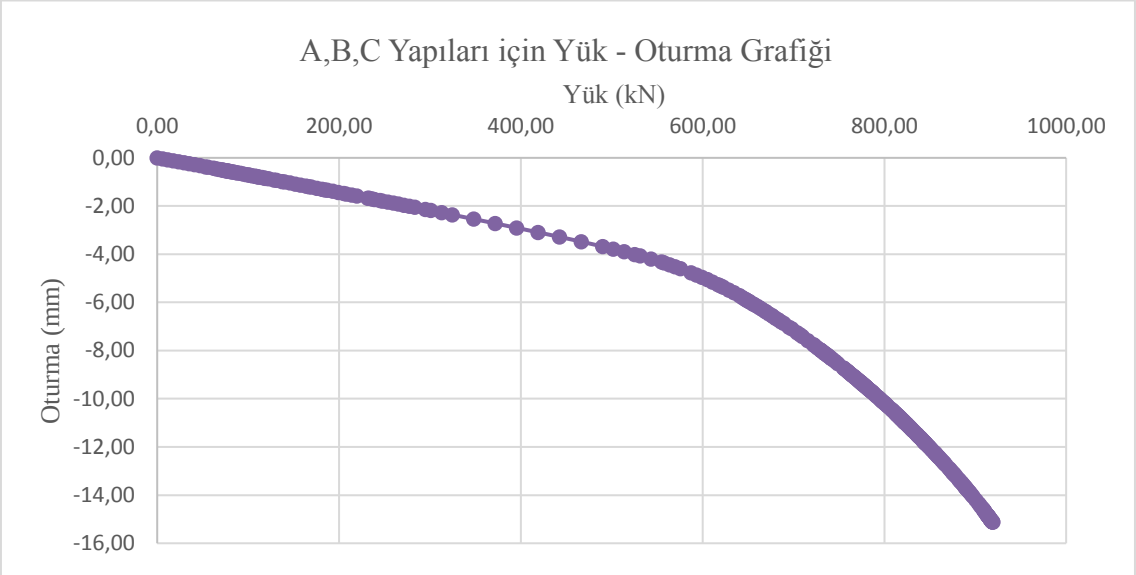
Plaxis 3D Foundation programına girilen parametrelerin ekran görüntüsü EK-11'de sunulmuştur.



(a) (b) (c)

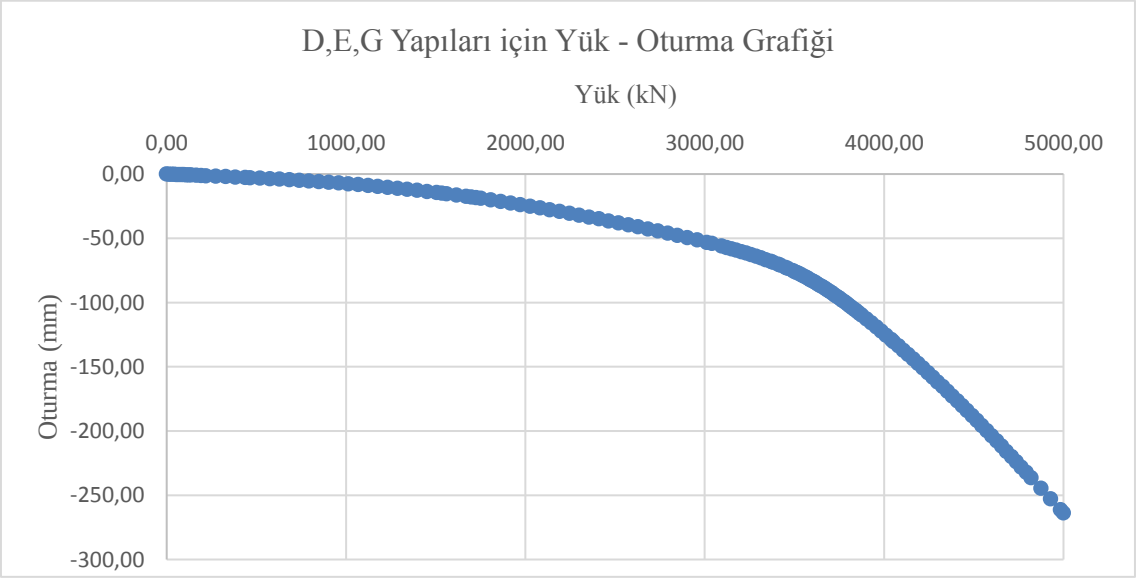
Şekil 6.3. Uygulanan yükler altında deforme olmuş mesh görüntüleri a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3

Modellemede yükleme aşamasının tamamlanması sonrasında her model için yük- oturma grafikleri oluşturulmuştur. Model 1, 918 kN yük altında yenilmeye uğramış ve Şekil 6.4'teki yük – oturma ilişkisi elde edilmiştir.



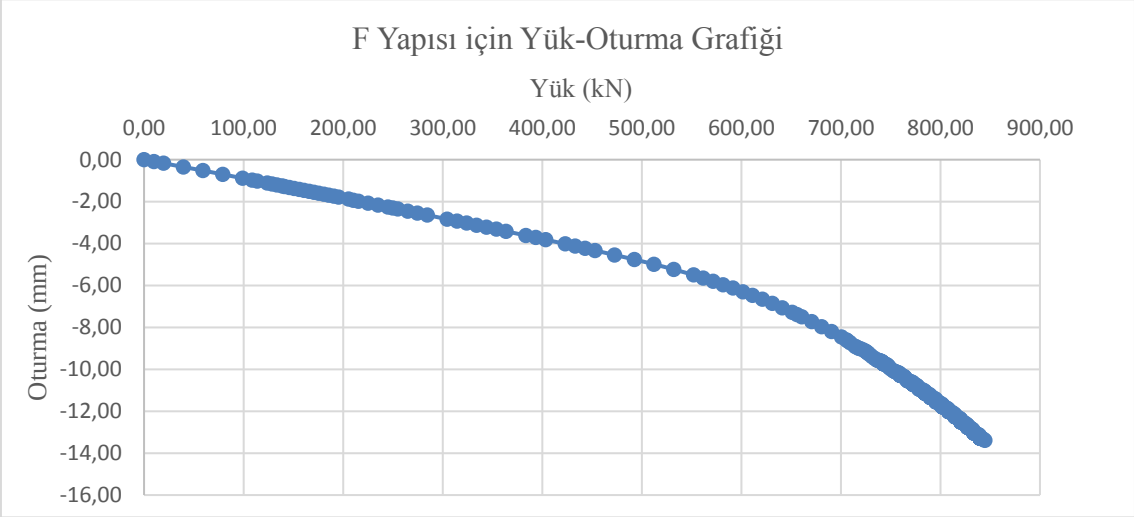
Şekil 6.4. A,B,C yapıları altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi

Model 2'de herhangi bir yenilme durumu oluşmamıştır. Şekil 6.5'te de görülebileceği gibi 5000 kN yük altında 263 mm oturma oluşmuştur. Böyle bir oturma kabul edilemeyeceği için Boston kriterine göre 12,7 mm oturma yaptığı andaki yük göçme yükü olarak kabul edilebilir [33]. Buna göre göçme yükü 1394 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.5. D,E,G yapıları altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi

Model 3, 844 kN yük altında yenilmeye uğramış ve Şekil 6.6'daki yük – oturma grafiği elde edilmiştir.



Şekil 6.6. F yapısı altındaki jet grout modeli için yük-oturma ilişkisi

6.2. Test Jet Grout Kolonları

Sahada proje dahilindeki yapıların kazı alanına dahil olmayacak bir bölgede test kolonu uygulaması yapılması uygun görülmüştür. 6 adet jet grout test kolonu için her birinde farklı parametreler kullanılmak kaydı ile imalat yapılmış ve daha sonra çap kontrolü ve tek eksenli basınç dayanımı için karot numunelerinin alınması işlemi gerçekleştirilmiştir. (Harita 5.1–L)

Uygulanacak olan jet grout kazıkları ile yapı temeli arasına yük dağıtımı için 50 cm granüler tabaka oluşturulmuştur. Jet grout kazıklarının 80 cm çapında, 2,10 m aralıklı ve minimum 2,00 MPa tek eksenli basınç mukavemetine sahip olması gerektiği hesap raporlarında belirtilmiştir. Ayrıca şartname ve projelerde jet grout kazıklarının imalatında jet-1 yönteminin kullanılması ve su/çimento oranı 1,0, çimento dozajının 450 kg/m^3 olması gerektiği belirtilmiştir. Jet grout imalatına başlanılmadan önce gerekli çap ve mukavemet değerlerinin kontrolü için sahada 6 (altı) adet test kolonu imal edilmesine karar verilmiştir [41].

İmal edilen test kolonlarının imalat parametreleri Çizelge 6.2'de gösterilmektedir. Parametreler zemin durumuna ve kolon çapının teorik hesabına (Wang vd, 2012) göre belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. Test kolonlarında kullanılan parametreler.

	Test Kolonu_1	Test Kolonu _2	Test Kolonu _3	Test Kolonu _4	Test Kolonu _5	Test Kolonu _6
Basınç (Bar)	400	425	400	450	450	425
Çekme Hızı	41	36	41	37	37	36
Nozzle Çapı (mm)	2,4	2,2	2,4	2,2	2,2	2,2
Tij Dönüş Hızı (rpm)	20	20	20	20	20	20
Çimento Tipi	PÇ42,5	PÇ42,5	PÇ32,5	PÇ42,5	PÇ32,5	PÇ32,5
Beklenen Teorik Çap (cm)	90	82	90	84	84	82

Test bölgesindeki imalattan 1 hafta sonra gözlemsel kontrol için test kolonlarının çevresi yaklaşık 4-5 m kazılmıştır (Resim 6.1). İri yamaç molozlarının bulunduğu üst tabakada karşılaşılan kolon çapının killi/siltli tabakada karşılaşılan kolon çapından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle çap kontrolü yapılırken killi zemindeki kısımlar üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan ölçümler Çizelge 6.3'te sunulmuştur. Farklı noktalardan yapılan çap ölçümleri sonrasında gözlemlenen çapların 63 – 86 cm arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Resim 6.2). Öngörülen dayanım kriterini test kolonu_1 ve test kolonu_2 kolonları sağlamıştır, ancak test kolonu_1 kolonu çap kriterini sağlayamadığı için tüm proje jet groutlarında test kolonu_2 de kullanılan parametrelerle imal edilmesine karar verilmiştir.



Resim 6.1. Test kolonları



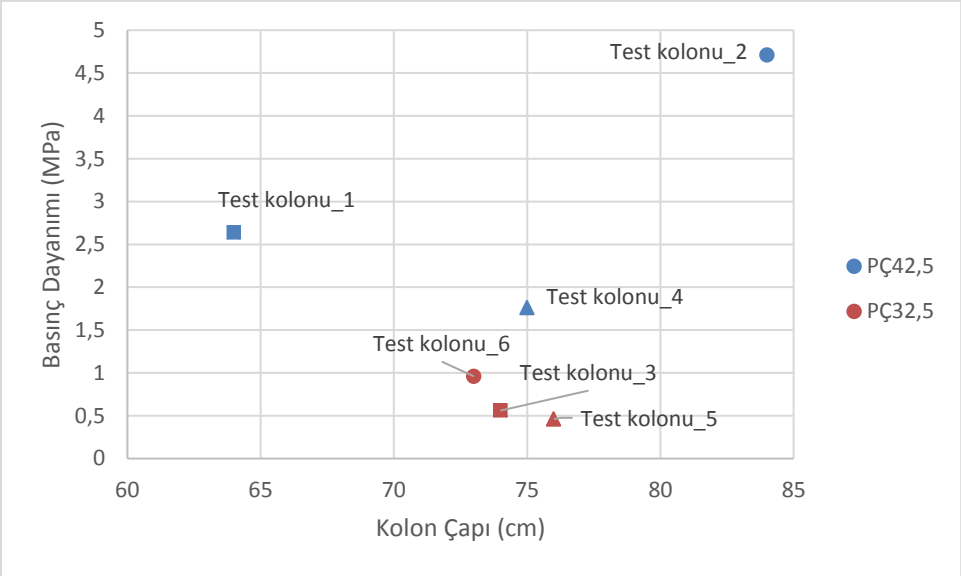
Resim 6.2. Arazide yapılan jet grout test kolonları çap kontrolü

Test kolonu_2 parametrelerinin olumlu sonuç vermesinde çekme hızının diğerlerine göre daha yavaş olması ve basıncın nispeten yüksek olması etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kullanılan çimento tipi PÇ 42,5 dayanımının PÇ 32,5'a göre daha yüksek olması istenilen basınç dayanımının sağlanmasında etkili rol oynamıştır. Çimento tipinin kolon çapı ve dayanımına etkisi Şekil 6.7'de görülmektedir.

Çizelge 6.3. Test kolonlarının sonuçları

	Kolon çapı (minör)	Kolon çapı (major) (cm)	Kolon çevresi (cm)	Ölçülen ortalama çap (cm)	Teorik çap* (cm)	Karot serbest basınç dayanımı (MPa)
Test kolonu_1	63	65	204	64	90	2,64
Test kolonu_2	82	86	267	84	82	4,71
Test kolonu_3	75	70	240	74	90	0,56
Test kolonu_4	75	75	240	75	84	1,76
Test kolonu_5	75	76	243	76	84	0,46
Test kolonu_6	75	71	232	73	82	0,96

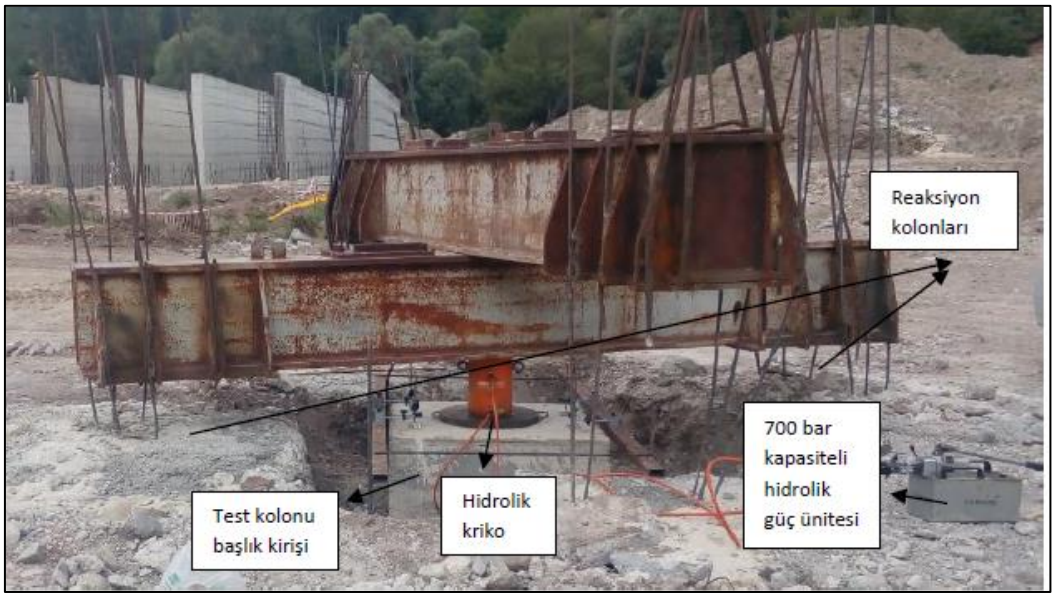
* Wang ve diğ. (2012)



Şekil 6.7. Çimento tipinin jet grout kolon çapı ve dayanımına etkisi

6.3. Jet Grout Kolonlarının Yük-Oturma Davranışı

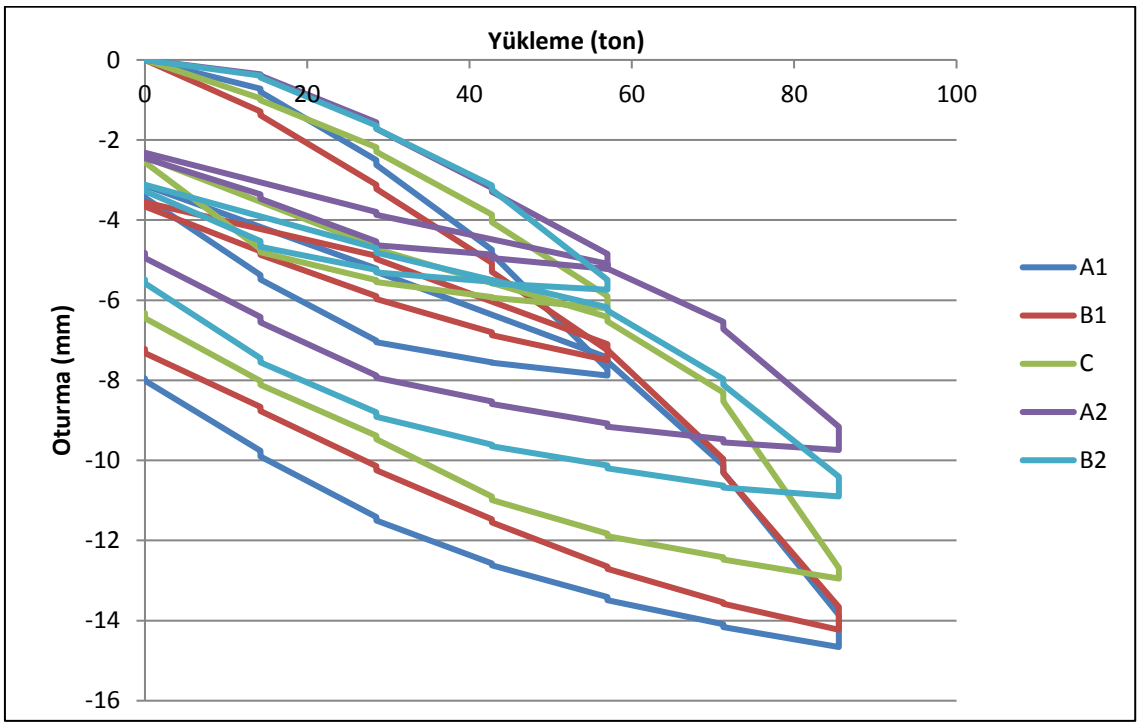
Jet grout kolonlarının tam ölçekli yükleme deneyleri üretilen 4 adet reaksiyon kolonu kullanılarak yürütülmüştür (Resim 6.8).



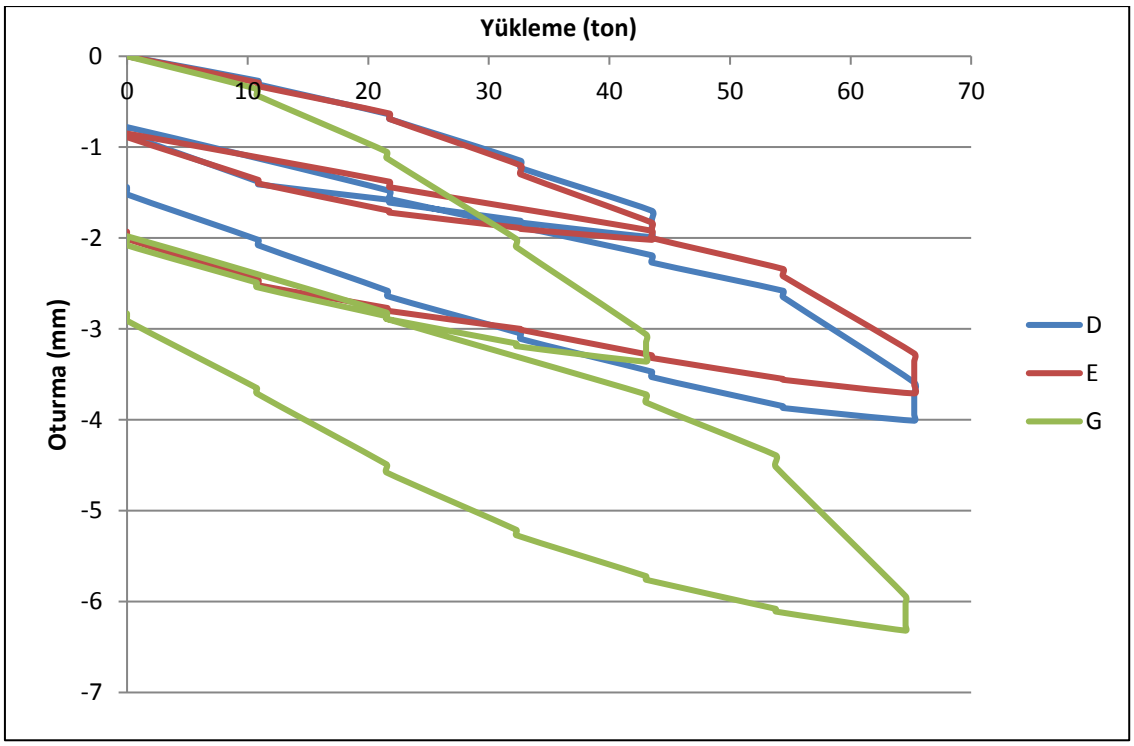
Şekil 6.8. Jet grout kolon yükleme deneyi düzeneği

Üst yapılardan jet grout kolonlarına aktarılan tasarım yükleri 18 ile 57 ton arasında değişmektedir. Projede raporlarında havalandırma havuzu ve anaerobik havuz (Harita 5.1 – A, B, C) altında yer alan kolonlara etkiyen tasarım yükü 57 ton, çökeltme havuzları ve geri devir terfi merkezi (Harita 5.1- D,E,G) altında yer alan kolonlara 43 ton ve kum tutucu

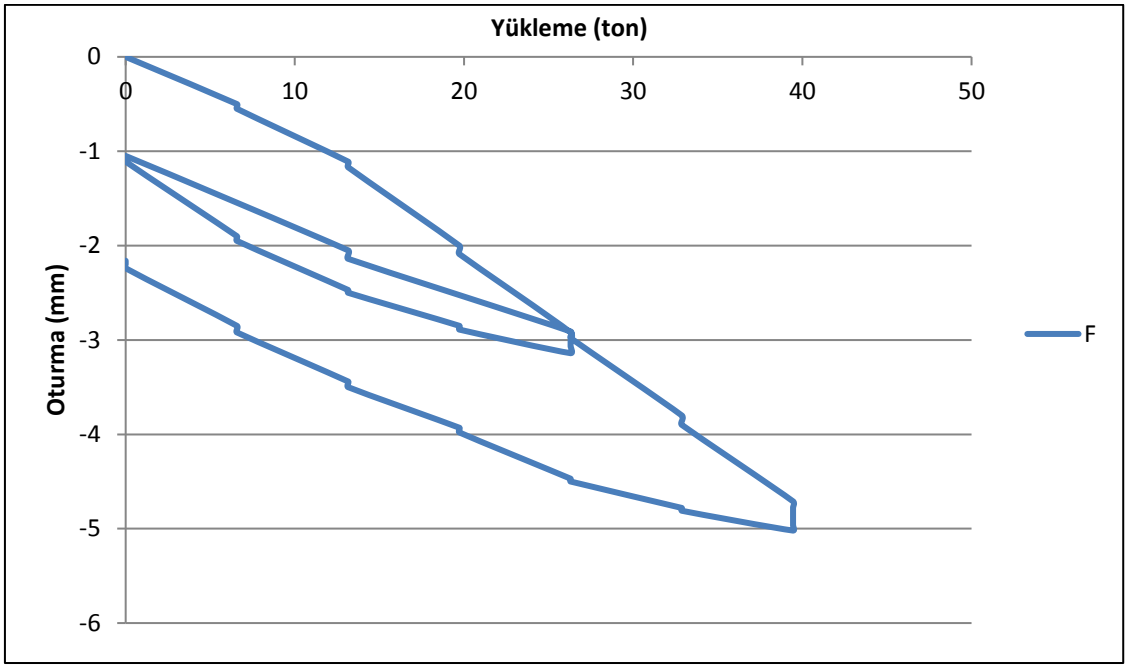
(Harita 5.1 – F) altında yer alan kolonlara ise 26 ton etki edeceği belirtilmiştir. Kolon yükleme deneyleri bu tasarım yükleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan kolon yükleme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen grafikler Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. A-B-C yapılarında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonuçları [41]



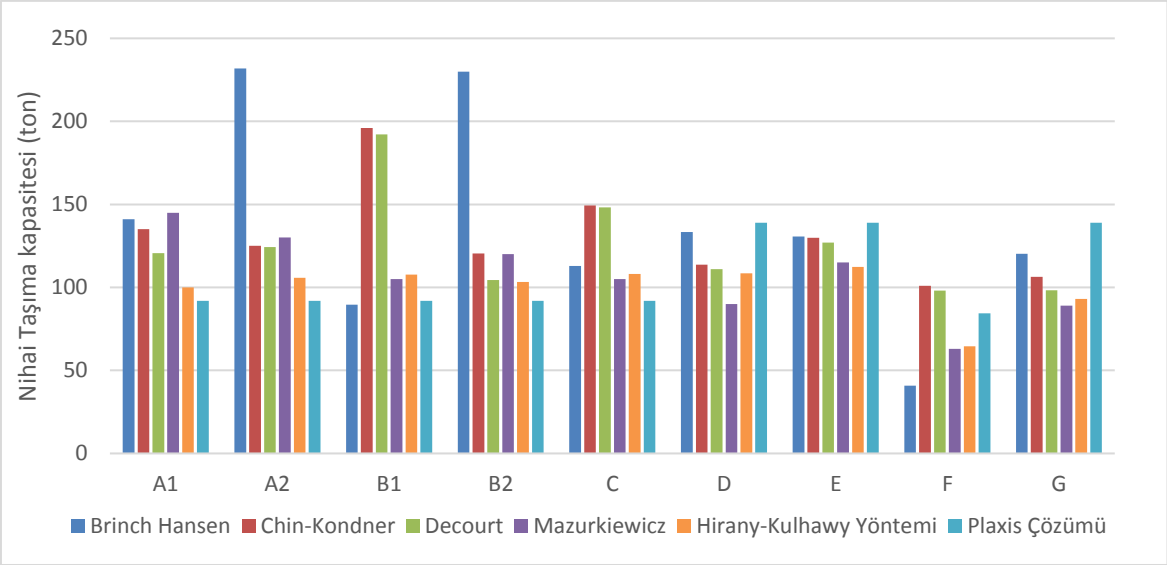
Şekil 6.10. D-E-G yapılarında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonuçları [41]



Şekil 6.11. F yapısında gerçekleştirilen kolon yükleme deneyi sonucu [41]

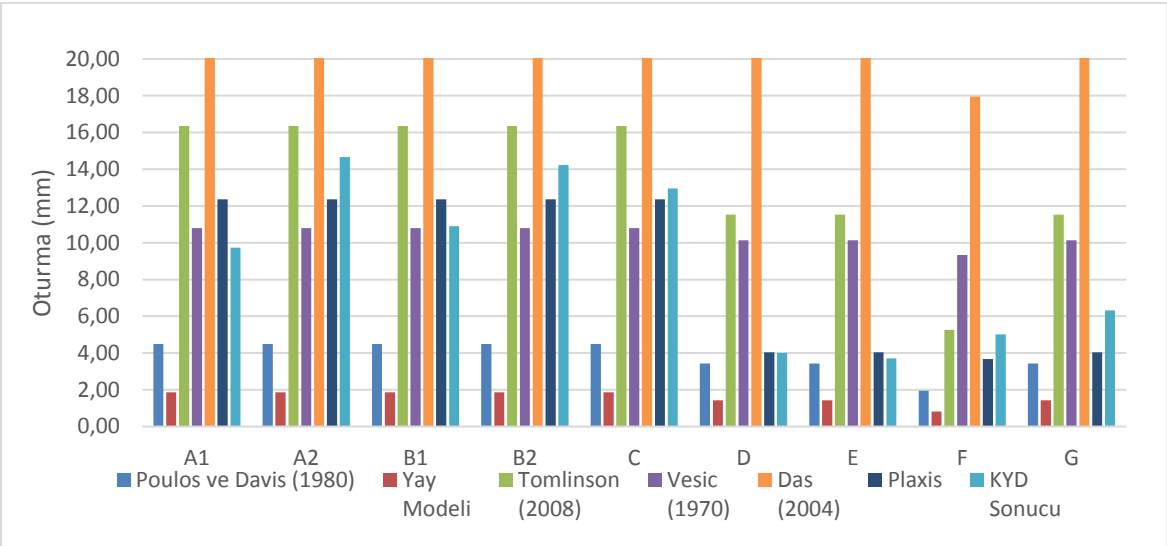
Şekil 6.9, 6.10 ve 6.11 incelendiğinde proje yükleri altında jet grout kolon oturmalarının 3 mm ile 8 mm aralığında değiştiği görülmektedir. Proje yüklerinin 1,5 katında ise jet grout kolon oturmaları 4 mm ile 14 mm arasında ölçülmüştür. Yükleme deneylerinden elde edilen grafikler ile Plaxis 3D Foundation programından elde edilen grafikler EK-10'da karşılaştırılmıştır.

Yükleme deneyleri sonrasında elde edilen verilerle jet grout kolonlarının nihai taşıma güçleri hesaplanabilir. Brinch Hansen %80, Chin-Kondner, Decourt, Mazurkiewicz ve Hirany – Kulhawy Yöntemleriyle her bir jet grout kolonunun nihai taşıma kapasitesi hesaplanmış (EK-3,4,5,6,7) ve Plaxis 3D Foundation çözümü ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.12). Şekil 6.12'den de görüleceği üzere tasarım taşıma kapasitesine en yakın sonuçları Hirany-Kulhawy Yöntemi vermektedir. Hirany-Kulhawy Yöntemi, tasarım taşıma kapasitesine ortalama %97 yakınlık göstermiştir. Standart sapması ise %19,64 olarak tespit edilmiştir (EK-8).



Şekil 6.12. Nihai taşıma kapasitesi hesaplarının karşılaştırılması

Tasarım yüklerinin 1,5 katı yük altında kazık yükleme deneylerinden (KYD) elde edilen oturma miktarları da teorik yöntemlerle ve Plaxis 3D Foundation sonucu ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. Teorik ve KYD oturma karşılaştırılması

Sonuçlar karşılaştırıldığında Plaxis 3D Foundation çözümünün kolon yükleme deneyi sonuçlarına en yakın değerleri sağladığı görülmüştür. Plaxis 3D Foundation, kolon yükleme deneyi sonuçlarının %94'ü kadar bir değer verirken, Yay Modeli %20'sini, Vesic (1970) %140'ını ve Poulos ve Davis Yöntemi ise %50'sini vermiştir.

6.4. Kazık Süreklilik Deneyi

Süreklilik deneyinde, jet grout kolonu boyunca meydana gelen daralma, genişleme, kırıklar ve kolon boyu yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. İmal edilen 909 kolonun 52'si üzerinde süreklilik deneyi gerçekleştirilmiştir. Bir adet jet grout kolonu üzerinde yürütülen deney ve deney sonucunda elde edilen süreklilik grafiği Şekil 6.14'te örnek olarak sunulmuştur. Yürütülen süreklilik deneylerinin tamamında herhangi bir süreksizlik rapor edilmemiştir.



(a) (b)

Şekil 6.14. Jet grout kolonu süreklilik deneyinin (a) uygulanışı ve (b) süreklilik grafiği

6.5. Karot Alımı ve Tek Eksenli Basınç Deneyi

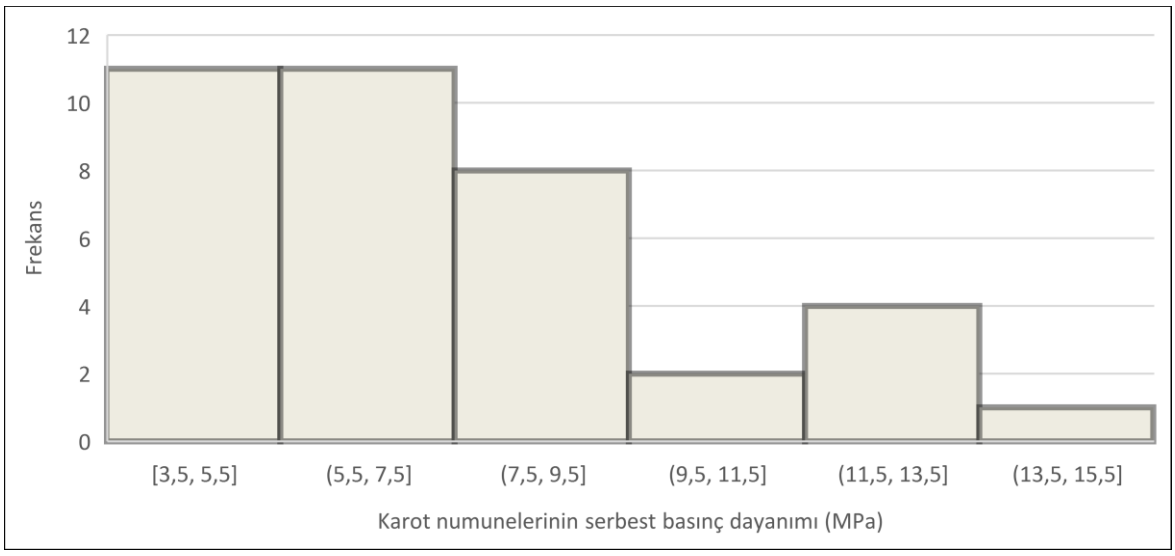
Jet grout kazıklarından alınan karot numuneleri üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deneyi ile kazığı oluşturan malzemenin mukavemeti belirlenmektedir. Bu amaçla imalatı tamamlanmış 37 kazıktan alınan karot numunesi (Resim 6.3) üzerinde tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Hesap raporunda jet grout malzemesinin basınç dayanımı olarak 2 MPa alınmış ve saha uygulamalarında da en az bu değerin yakalanması amaçlanmıştır. Tek eksenli basınç deneyleri sonucunda basınç dayanımları 3,52 – 14,39 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



Resim 6.3. Karot ile alınan numuneler

Karot numunelerinin basınç dayanımlarının histogramı Şekil 6.15'te sunulmuştur. Ortalama serbest basınç dayanımı 7,3 MPa ve örnek standart sapma değeri 2,9 MPa olarak elde edilmiştir [41].

Granüler tabakada imal edilen jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarının 6,2 MPa – 14,4 MPa aralığında, siltli killi tabakadan alınan karot numunelerin dayanımları ise 3,5 MPa – 6,5 MPa aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen dayanımlar Baumann'ın çalışmasıyla (Çizelge 2.2) benzer sonuçlar vermiştir.



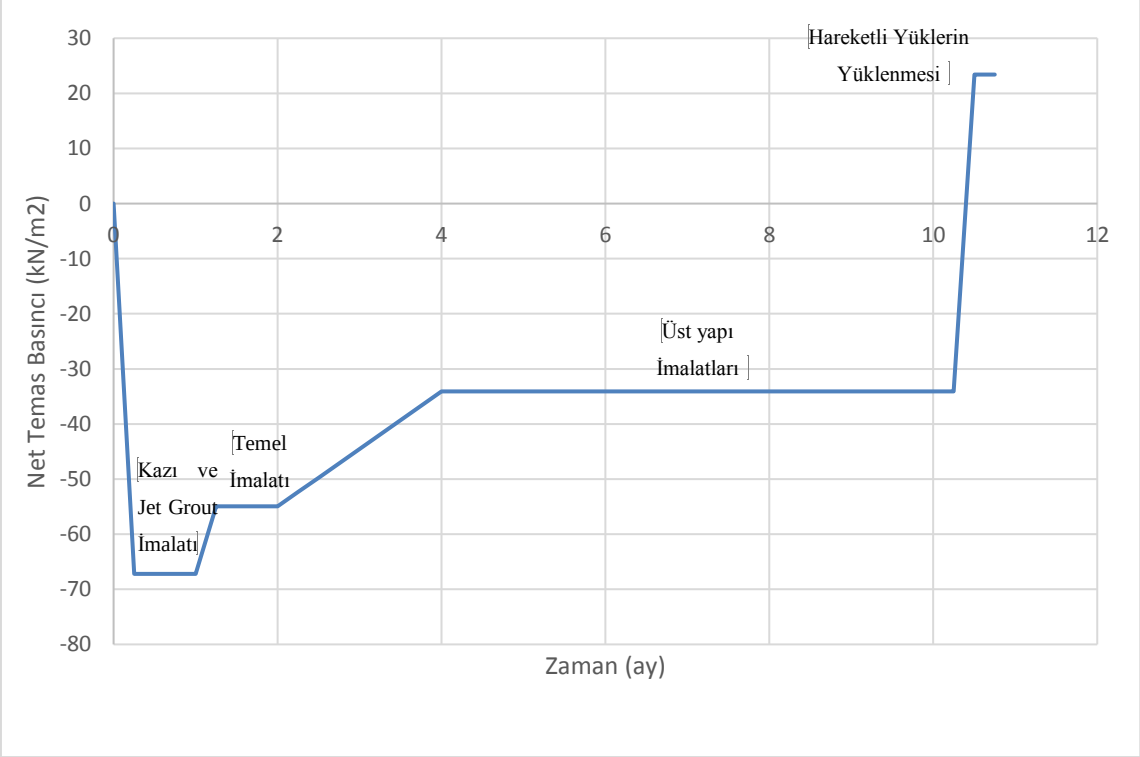
Şekil 6.15. Karot numunelerinin serbest basınç dayanım histogramı [41]

6.6. Tam Ölçekli Yapı Oturmalarının Gözlemlenmesi

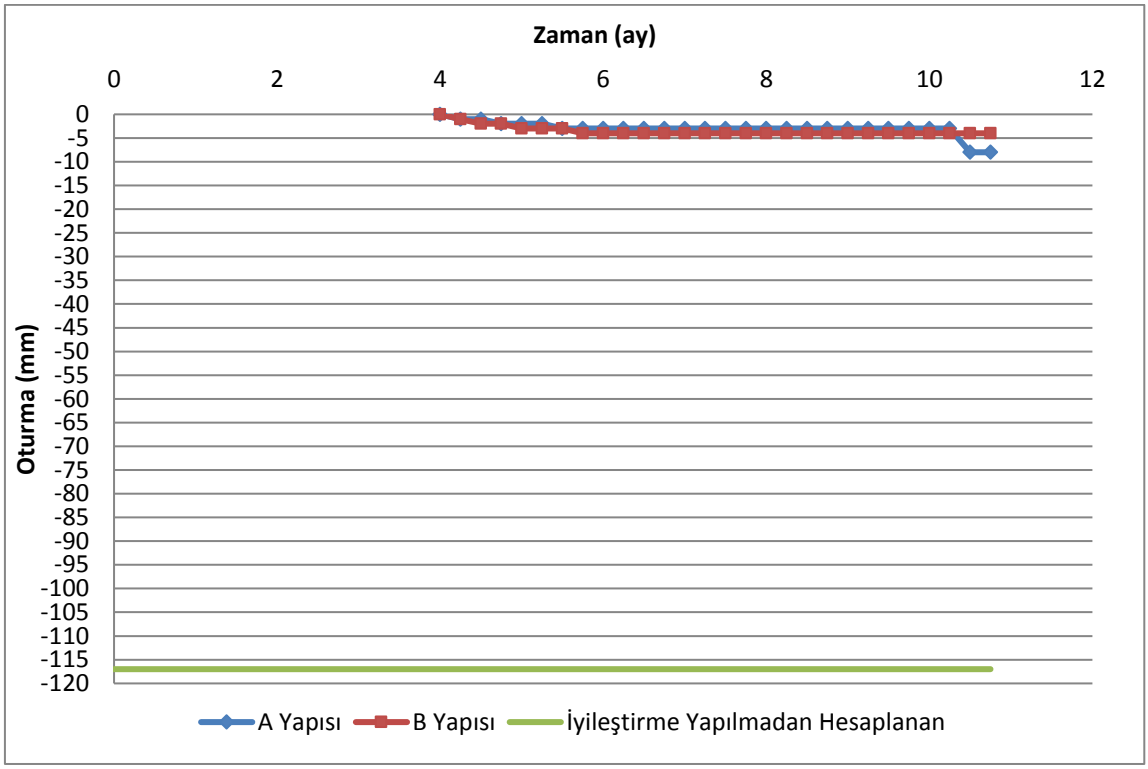
Havalandırma havuzlarının (Harita 5.1 – A ve B) her birinin temel alanı 613 m^2 olarak projeden temin edilmiştir. İmalatta her bir havalandırma havuzu için 812 m^3 beton

kullanılmıştır. Yapı betonarmenin birim hacim ağılığı 2,5 ton/m^3 kabul edilerek temas basıncının imalatla beraber artışı Şekil 6.16'te sunulmuştur.

Jet grout kolonlarının üst yapı altındaki performansının gözlemlenmesi için üst yapıların betonarme imalatlarının tamamlanmasından sonra farklı lokasyonlarda yer alan poligon noktaları baz alınarak total station ile haftalık 2 adet havalandırma havuzu yapısının oturmaları moniterize edilmiştir (Şekil 6.17). Ölçüm için hassasiyeti ±1,5 mm olan Leica Flexline TS 06 marka model total station kullanılarak haftalık oturma okumaları elde edilmiştir. Üst yapı imalatları tamamlandıktan sonra tesisin işletmeye alınması beklenmiş ve işletmeye başlandıktan sonra hareketli su yükü uygulanmaya başlamıştır. Ölü yükler altında A yapısının oturması 3 mm, B yapısının oturması ise 4 mm olarak gözlemlenmiştir. Aradan geçen yaklaşık 6 ayın sonunda hareketli yükler yapılara etkimiş ve A yapısının oturması 8 mm'ye yükselirken B yapısında herhangi bir değişme olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.16. Üstyapı yükü - zaman ilişkisi



Şekil 6.17. Yapı oturması – zaman ilişkisi

Yükleme deneylerinden elde edilen oturma değerleri (Şekil 6.9) ile topografik okumaların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumda yükleme deneyleri ile gerçek oturma değerlerinin yakalanabildiği gözlemlenmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında Kızılcahamam Atıksu Arıtma Tesisi'nde uygulanan jet grout kolonları ile temel zemini güçlendirme yönteminin aşamaları incelenmiştir. İlk olarak imal edilecek jet grout kolonlarının imalat parametrelerinin belirlenmesi için 6 adet test kolonu imal edilmiştir ve parametreleri etkileyen faktörler tartışılmıştır. Sonrasında imal edilen jet grout kolonlarının imalat süreci, performansları ve kalite kontrol mekanizmaları sunulmuştur. Kalite kontrol yöntemi olarak kazık süreklilik deneyi, kazık yükleme deneyi, jet grout kolonlarından karot ile alınan numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyi ve yapı üzerindeki referans noktalarının izlenmesi yöntemi kullanılmıştır. Tek eksenli basınç deneyleri 37 farklı kolondan alınan karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tasarım 2 MPa basınç dayanımına göre yapılmış olup elde edilen dayanımların 2 MPa üzerinde olduğu gözlenmiştir.

Kazık süreklilik deneyleri 52 kolon üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerde herhangi bir süreksizlik, çatlama ya da kolon çapında daralma gözlenmemiştir. Kolon yükleme deneyleri 9 adet kolon üzerinde gerçekleştirilmiş ve tasarım yükünün 1,5 katı yük altında max. oturma 14 mm olarak gözlenmiştir.

Plaxis 3D Foundation programı ile 3 farklı modelleme yapılmış ve göçme yüklerinin tespit edilebilmesi için yükleme yapılmıştır. Ayrıca kolon yükleme deneyinden elde edilen veriler ile Brinch Hansen, Chin Kondner, Decourt, Mazurkieicz ve Hirany Kulhawy Yöntemleri kullanılarak jet grout kolonunun nihai taşıma güçleri hesaplanmıştır. Plaxis 3D Foundation ile modelleme sonucu hesaplanan taşıma kapasitesine en yakın değeri Hirany Kulhawy Yöntemi vermiştir.

Yine kolon yükleme deneyinden elde edilen oturma değerleri Plaxis 3D Foundation, Yay Yöntemi, Tomlinson (2008) Yöntemi ve Vesic (1970) Yöntemi, Das (2004) Yöntemi ve Poulos ve Davis (1980) Yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Plaxis, kolon yükleme deneyi sonuçlarının %94'ü kadar bir değer verirken, Yay Modeli %20'sini, Vesic (1970) %140'ını ve Poulos ve Davis Yöntemi ise %50'sini vermiştir.

Tesiste bulunan 2 yapı üzerinde belirlenen referans noktaları haftalık olarak topografik olarak ölçülmüş ve yapılardan birinin 4 mm diğerinin ise 8 mm oturduğu gözlenmiştir.

İyileştirme yapılmaması durumunda 117 mm olarak hesaplanan oturmalar jet grout ile desteklenmiş radye üzerindeki A ve B yapılarında tam ölçekli olarak <10 mm monitörize edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Kaymakcı S. (2014). *Jet Grout Kolona Soketli Fore Kazığın Çalışma Performansının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-7.

2. Fırat, A. T. (2001). *Jet Grouting Yöntemi İle Temel Takviyesi,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-8.

3. Doğu O. (2005). *Jet Grouting Tekniği ile Zemin Islahı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4.

4. Karol R. H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization*, New York: Marcel Dekker, 584.

5. Okyay, S. (1987). Yüksek Basınçlı Enjeksiyon Dahili Rapor, *BAUER Spezialtiefbau GmbH*, İstanbul, 20-32.

6. Küsin C. C. (2009). *Jet Grout Yöntemi İle İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 12-21.

7. Altun S. (2010). *Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri*, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir, 22.

8. Lunardi P. (1977). *Ground Improvement by Means of Jet-Grouting*, Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, 1(2), 65-86.

9. Erol A.O., Bayram Z.Ç. (2018). *Jet Enjeksiyon Yöntemi*, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., 5-50.

10. Xanthakos, P. P., Abramson L. W. And Bruce D. A. (1994). *Ground Control and Improvement*, New York: John Wiley, 605.

11. Melegary C. and Garassino A.L. (1997). *Seminar on jet grouting*, Singapore: CI-Premier Pte. Ltd, 583.

12. Moseley M.P., Kirsch K. (2004). *Ground Improvement*. R.Essler and H. Yoshida, "*Jet Grouting",* Spoon Press 160-196.

13. Moseley, M. P. (1993). *Jet Grouting - Ground Improvement*, Boca Raton, FL, Blacie, 149- 174.

14. Bauman V. (1984). *Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis*. Vortrage der Baugrundtagung, Duesseldorf, 49–83.

15. Shibazaki, M., Ohta, S. (1982). *A Unique Underpining of Soil Solidification Utilising Super-High Pressure Liquid Jet*. Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, 680-693.

16. Wang, Z.-F., Shen, S.-L. and Yang, J. (2012). *Estimation of the Diameter of Jet-Grouted Column based on Turbulent Kinematic Flow Theory*. Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing, New Orleans, Louisiana, United States, 246-257.

17. Alku Y. (2006). *Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi İle İlgili Bir İnceleme*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

18. ASTM (American Society for Testing Material) Designation D 1143/D 1143M – 07 (1994). *Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load*, 15.

19. Chow, Y.K., Phoon, K.K., Chow, W.F. and Wong K.Y. (2003). *Low Strain Integrity Testing of Piles: Three-Dimensional Effects*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129, 1057-1062.

20. Kauschinger (1992). *Methods To Estimate Composition Of Jet Grout Bodies*. ASCE Gsp. 30, 194-205.

21. Hayward Baker Company (2010), *Katalog*.

22. Terzaghı, K., Peck, R. B. and Mesrı, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York: John Wiley, 592.

23. Braja M. Das (2007). *Principles of Foundation Engineering*. Seventh Edition, Global Engineering, 133-250.

24. Coyle, H. M., And Castello, R. R. (1981). New Design Correlations For Piles in Sand, *Journal Of The Geotechnical Engineering Division,* American Society Of Civil Engineers, 107, 965–986.

25. Sladen, J. A. (1992). The Adhesion Factor: Applications And Limitations. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 323–326.

26. Brinch Hansen, J., (1963). Discussion, Hyperbolic Stress-Strain Response Of Cohesive Soils. *Journal Of Soil Mechanics*, Foundation Division ASCE, 89, 241-242.

27. Mazurkiewicz, B.K. (1972). *Test Loading Of Piles According To Pollish Regulations*. Royal Sweedish Academy Of Engineering Sciences, Commission On Pile Research, Stocholm, 35, 20.

28. Chin, F.K. (1970). *Estimation Of Pile Not Carried To Failure, Proceedings*, Second Souteast Asian Conference On Soil Engineering, Singapore, 81-90.

29. Decourt, L. (1999). *Behaviour Of Foundations Under Working Load Conditions.* Proc. Of The 11th Pan-American Conf. On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Dolguassu, Brasil, 4, 453-488.

30. Alku Y., Özkan M.T. (2006). *Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi İle İlgili Bir İnceleme.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 46.

31. Hirany A. and Kulhawy F. H. (1989). *Interpretation Of Load Test On Drilled Shafts*. Foundation Engineering: Current Principles And Practices. Proceeding Of The Congress Geotechnical Engineering Division And The Construction Division Of ASCE, 2, 1132-1149.

32. Plaxis 3D Foundation (2019). *Reference Manual*, 1-2.

33. Birand A. (2007). *Kazıklı Temeller*, Teknik Yayınevi, 47-157

34. Tomlinson M., Woodward J. (2008), *Pile Design And Construction Practice.* Oxford/United Kingdom: Taylor & Francis, 139-249.

35. Das B. M. (2004). *Fundamentals Of Geotechnical Engineering*. (Second Edition), California/USA: Brooks/Cole, 130-240.

36. Uzuner, B. A. (2011). *Temel Mühendisliğine Giriş.* (Dördüncü Baskı). Trabzon/Türkiye: Derya Kitabevi, 409.

37. Prakash S., Shamsher H. D. (1990). *Pile Foundations İn Engineering Practice.* New York/USA: Wiley, 768.

38. Bowles, J.E. (1988). *Foundation Analysis and Design*. New York: McGraw Hill, 1004.

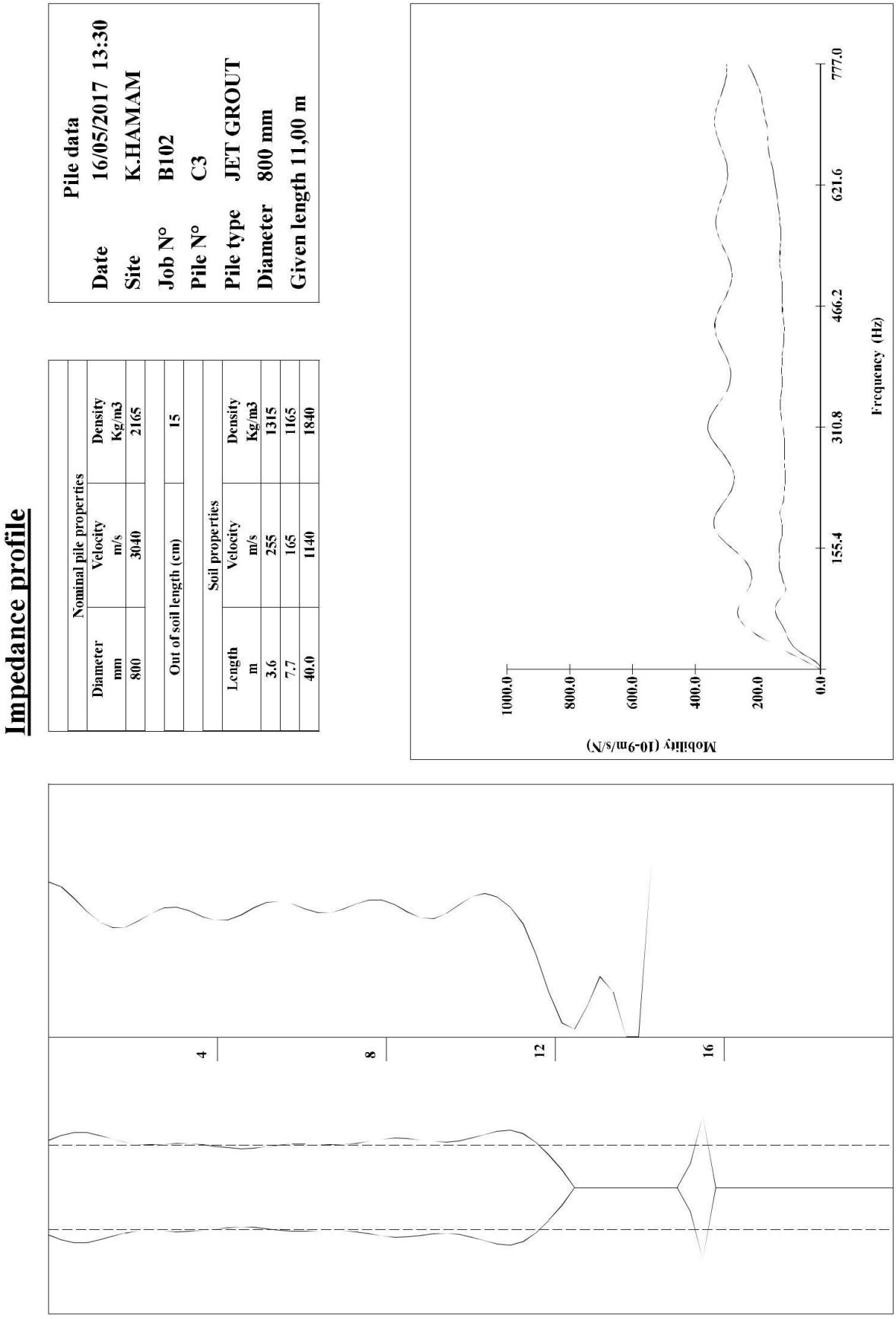
39. Özsoy B., Durgunoğlu H. T. (2003). *Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modullü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması*, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.

40. Obrzud R. and Truty (2012)., The Hardening Soil Model-Practical Guidebook Soil. *Pc 100701 Report*.

41. Çelik O., Yılmaz Y. (2018). *Kızılcahamam Atıksu Arıtma Tesisi Jet Grout Kolon Temel Sisteminin İmalatı ve Performansı*, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, İstanbul, 897-904.

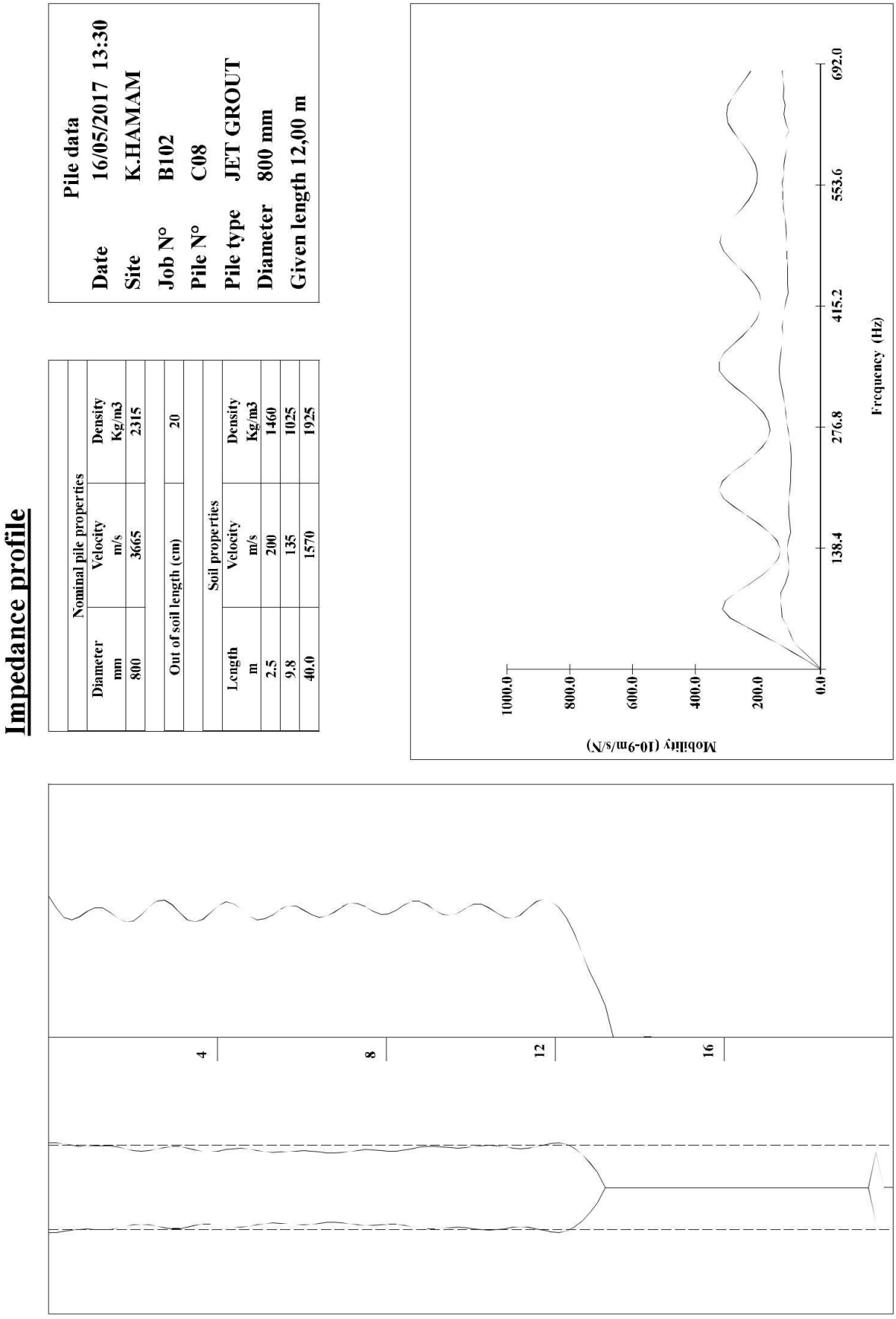
EKLER

EK – 1. Jet grout süreklilik deneyi sonuçları



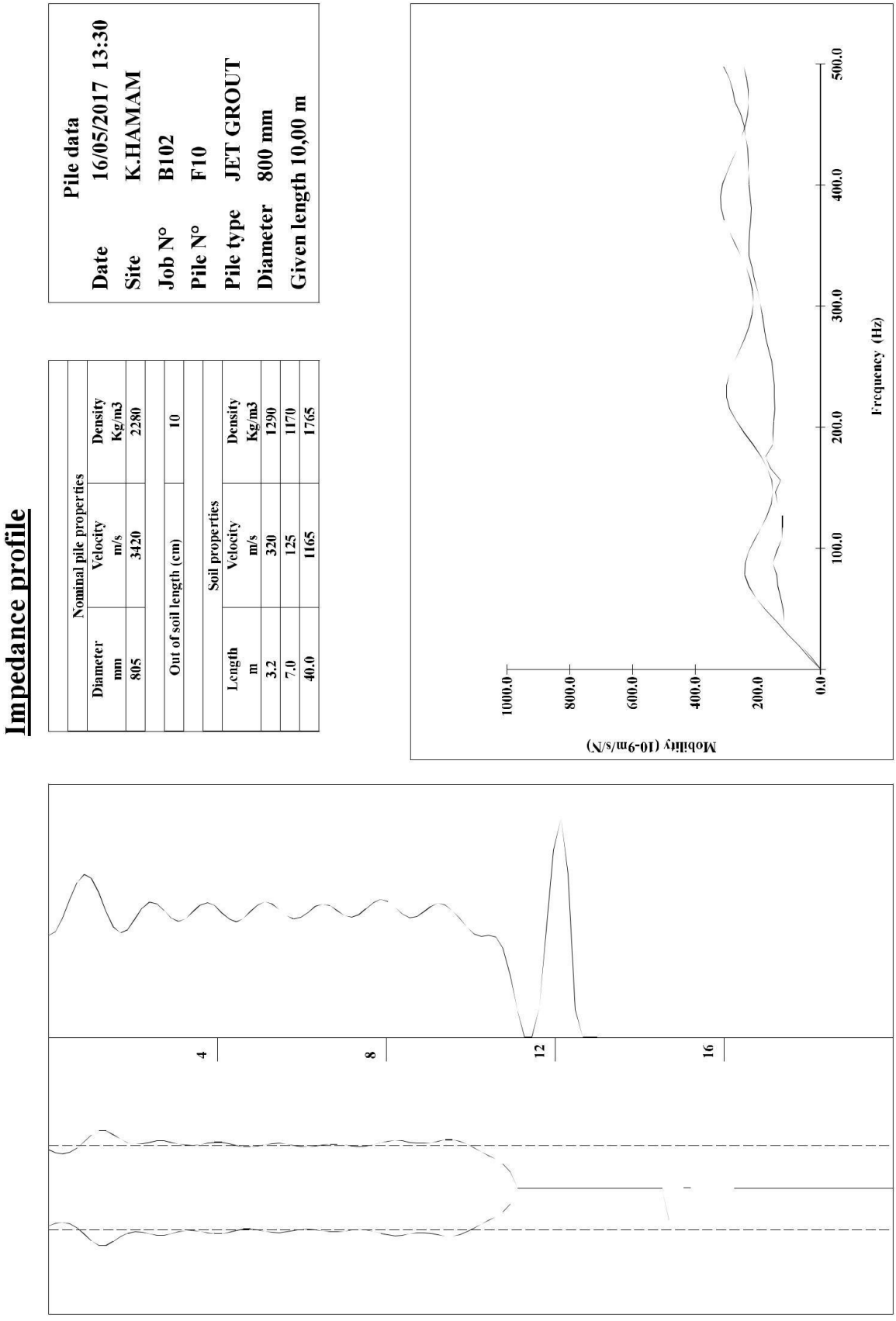
Şekil 1. Süreklilik deneyi sonucu örnek 1

EK – 1. (devam) Jet grout süreklilik deneyi sonuçları



Şekil 2. Süreklilik deneyi sonucu örnek 2

EK – 1. (devam) Jet grout süreklilik deneyi sonuçları



Şekil 3. Süreklilik deneyi sonucu örnek 3

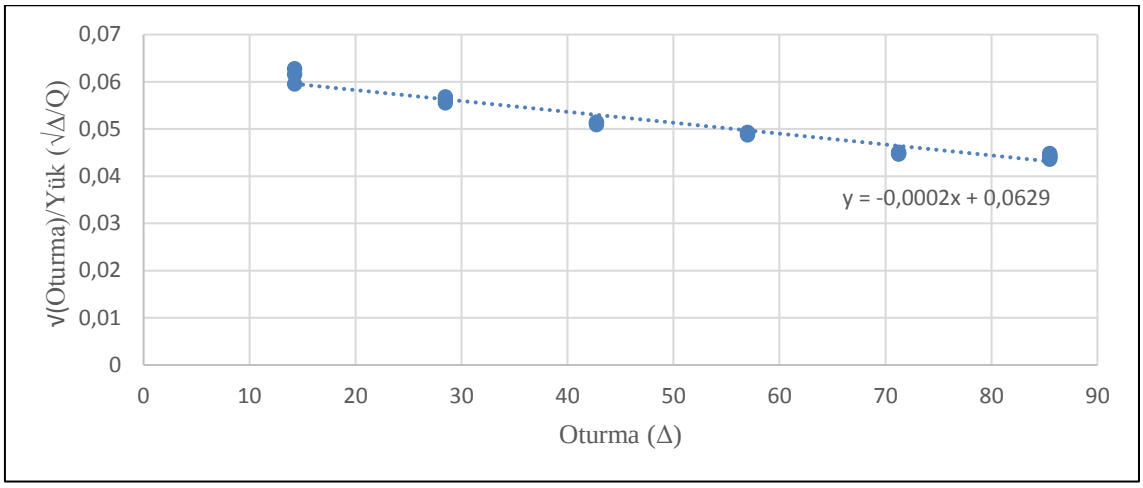
EK – 2. Sondaj kuyularından alınan numunelerin laboratuvar deneyleri sonuçları

Sondaj No	Örnek No	Örnek Derinliği (m)	Su İçeriği (%)	γn (g/cm3)	No:4 Kalan (%)	No:200 Geçen (%)	LL	PL	PI	c (Kgf/cm2)	⌀ (°)	Zemin Sınıfı
SK-1	SPT-2	3,00	4,9	-		56,8	-	NP	-	-	-	GW
SK-1	UD-1	6,00	30,4	16,5	0,0	82,7	37,4	19,9	17,6	0,18	2	CL
SK-1	SPT-6	9,00	11,5	-	23,6	19,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-1	SPT-8	12,00	1,9	-	58,7	2,0	-	NP	-	-	-	GW
SK-1	SPT-	18,00	7,7	-	54,4	2,6	-	NP	-	-	-	GW
SK-2	SPT-1	1,50	4,7	-	44,8	5,7	-	NP	-	-	-	SW-SM
SK-2	SPT-3	4,50	52,1	-	1,2	59,8	27,3	18,2	9,1	-	-	CL
SK-2	SPT-5	7,50	48,9	-	3,2	51,7	28,0	15,9	12,1	-	-	CL
SK-2	UD-2	9,00	60,2	-	0,0	73,2	47,7	26,2	21,5	-	-	CL
SK-2	SPT-9	13,50	4,5	-	49,8	3,3	-	NP	-	-	-	GW
SK-2	SPT-	18,00	4,9	-	56,9	0,8	-	NP	-	-	-	GW
SK-3	SPT-3	4,50	49,6	-	0,0	75,6	36,7	20,4	16,3	-	-	CL
SK-3	UD-3	6,00	58,9	-	0,0	89,8	53,3	26,9	26,4	-	-	CH
SK-3	SPT-6	9,00	13,3	-	18,3	20,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-3	SPT-8	12,00	1,9	-	42,6	6,6	-	NP	-	-	-	SP-SM
SK-4	SPT-1	1,50	11,5	-	28,5	21,6	26,4	14,0	12,4	-	-	SC
SK-4	SPT-2	3,00	31,3	-	4,1	23,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-4	SPT-4	6,00	50,6	-	0,0	81,7	35,6	18,9	16,7	-	-	CL
SK-4	UD-4	9,00	37,6	16,8	0,0	91,1	48,4	26,3	22,1	0,20	3	CL
SK-3	SPT-8	12,00	1,9	-	42,6	6,6	-	NP	-	-	-	SP-SM
SK-4	SPT-1	1,50	11,5	-	28,5	21,6	26,4	14,0	12,4	-	-	SC
SK-4	SPT-2	3,00	31,3	-	4,1	23,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-4	SPT-4	6,00	50,6	-	0,0	81,7	35,6	18,9	16,7	-	-	CL
SK-4	UD-4	9,00	37,6	16,8	0,0	91,1	48,4	26,3	22,1	0,20	3	CL
SK-4	SPT-8	12,00	1,5	-	45,7	3,3	-	NP	-	-	-	SW
SK-5	SPT-3	4,50	66,6	-	1,2	61,3	31,1	20,8	10,3	-	-	CL
SK-5	SPT-5	7,50	59,6	-	1,6	60,1	30,8	19,7	11,1	-	-	CL
SK-5	UD-5	9,00	58,0	-	0,9	71,7	41,1	23,9	17,2	-	-	CL
SK-5	SPT-9	13,50	8,8	-	5,1	19,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-6	SPT-2	3,00	1,8	-	47,2	3,8	-	NP	-	-	-	SW
SK-6	SPT-3	4,50	2,3	-	52,1	4,2	-	NP	-	-	-	GP
SK-6	UD-6	6,00	58,6	-	0,0	83,3	57,7	30,1	27,6	-	-	CH
SK-6	SPT-6	9,00	15,3	-	0,0	27,6	-	NP	-	-	-	SM
SK-6	SPT-8	12,00	2,2	-	61,1	1,2	-	NP	-	-	-	GP
SK-7	SPT-1	1,50	13,0	-	45,3	26,7	30,3	16,4	13,9	-	-	GC
SK-7	UD-7	6,00	37,9	16,6	0,0	78,3	45,2	25,0	20,2	0,19	3	CL
SK-7	SPT-5	7,50	9,3	-	5,6	25,8	-	NP	-	-	-	SM
SK-7	SPT-7	10,50	13,3	-	0,0	26,7	-	NP	-	-	-	SM
SK-7	SPT-9	13,50	25,7	-	8,2	22,1	-	NP	-	-	-	SM

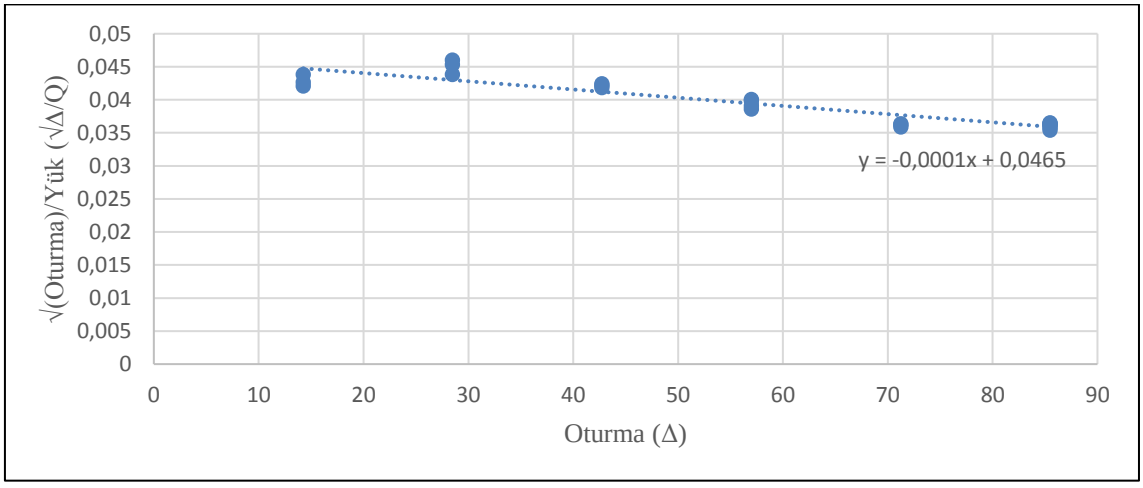
EK – 2. (devam) Sondaj kuyularından alınan numunelerin laboratuvar deneyleri sonuçları

Sondaj No	Örnek No	Örnek Derinliği (m)	Su İçeriği (%)	γn (g/cm3)	No:4 Kalan (%)	No:200 Geçen (%)	LL	PL	PI	c (Kgf/cm2)	∅ (º)	Zemin Sınıfı
SK-8	SPT-3	4,50	11,2	-	16,8	16,0	-	NP	-	-	-	SM
SK-8	SPT-4	6,00	14,0	-	25,2	9,4	-	NP	-	-	-	SP-SM
SK-8	UD-8	9,00	59,2	-	1,3	65,5	39,2	22,9	16,3	-	-	CL
SK-8	SPT-8	12,00	3,6	-	49,7	7,5	27,6	14,9	12,7	-	-	GW-
SK-9	SPT-3	4,50	51,8	-	1,8	61,4	33,3	19,7	13,6	-	-	CL
SK-9	UD-9	6,00	61,0	-	0,0	79,8	52,3	28,7	23,6	-	-	CH
SK-9	SPT-6	9,00	9,8	-	17,5	16,0	-	NP	-	-	-	SM
SK-9	SPT-8	12,00	3,5	-	50,7	14,6	28,3	14,1	14,2	-	-	GC
SK-10	SPT-2	3,00	3,7	-	41,8	14,1	35,4	18,8	16,6	-	-	SC
SK-10	SPT-3	4,50	50,0	-	0,0	78,3	26,3	17,5	8,9	-	-	CL
SK-10	UD-10	6,00	28,5	16,7	0,0	90,6	33,6	17,9	15,7	0,16	2	CL
SK-10	SPT-5	7,50	14,6	-	22,4	24,1	-	NP	-	-	-	SM
SK-11	SPT-2	3,00	11,7	-	4,6	51,9	27,4	16,3	11,1	-	-	CL
SK-11	SPT-4	6,00	12,7	-	23,3	9,8	31,1	15,0	16,1	-	-	SW-SC
SK-11	SPT-6	9,00	10,6	-	38,7	10,5	33,1	16,2	16,9	-	-	SC
SK-12	SPT-2	3,00	12,2	-	9,1	41,2	33,3	18,7	14,6	-	-	SC
SK-12	SPT-4	6,00	12,5	-	3,6	59,6	31,7	17,6	14,1	-	-	CL

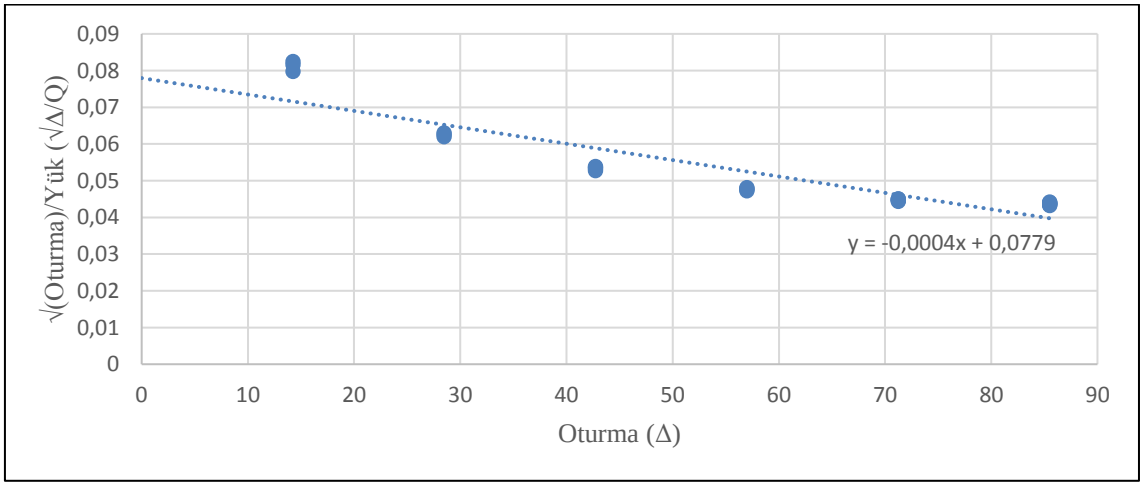
EK – 3. Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin Hesaplanması



Şekil 4. A1 kolonu Brinch Hansen grafiği

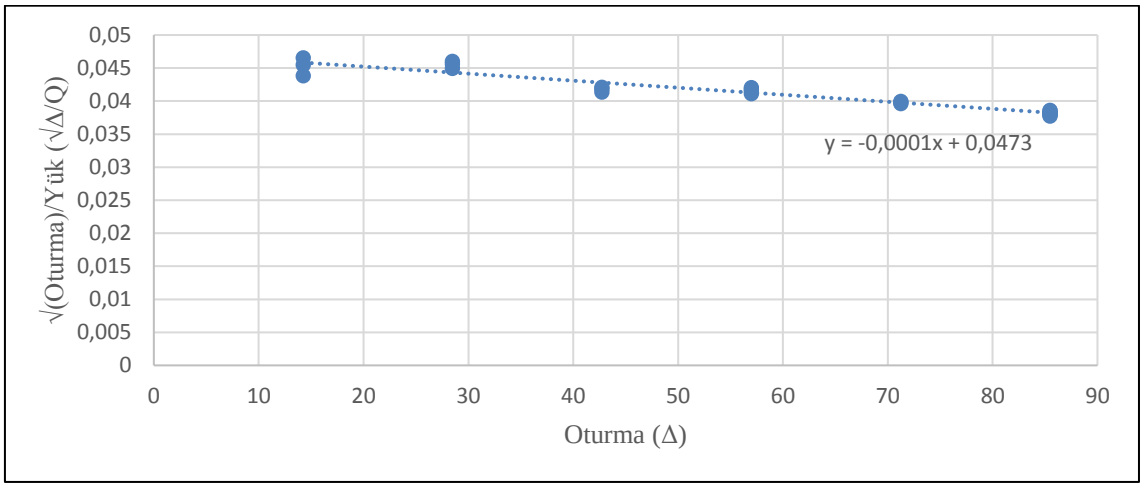


Şekil 5. A2 kolonu Brinch Hansen grafiği

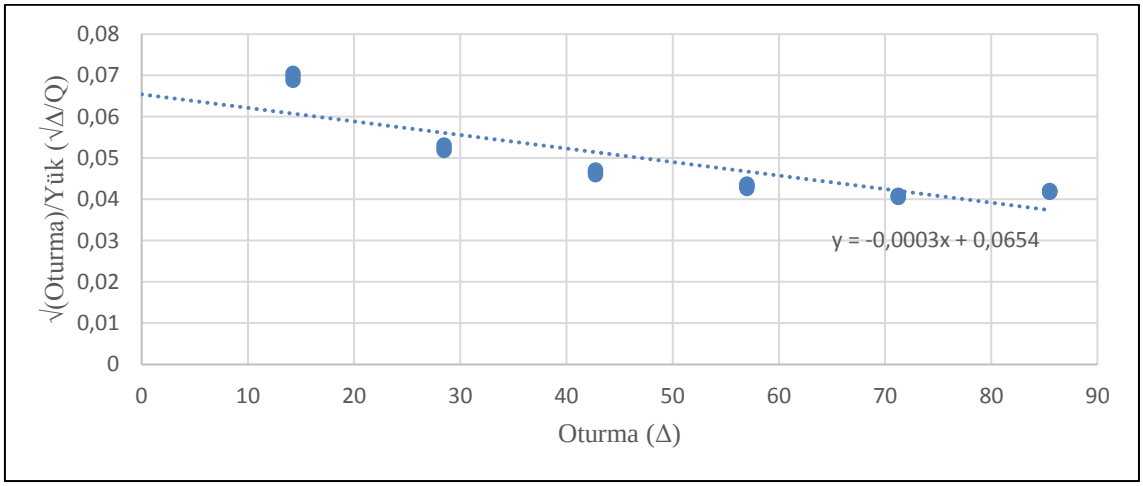


Şekil 6. B1 kolonu Brinch Hansen grafiği

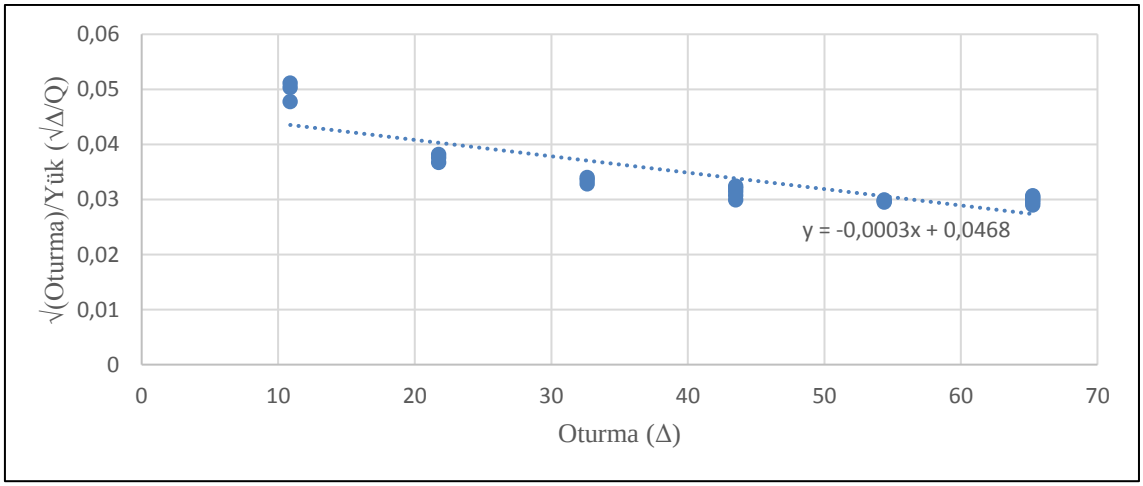
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 7. B2 kolonu Brinch Hansen grafiği

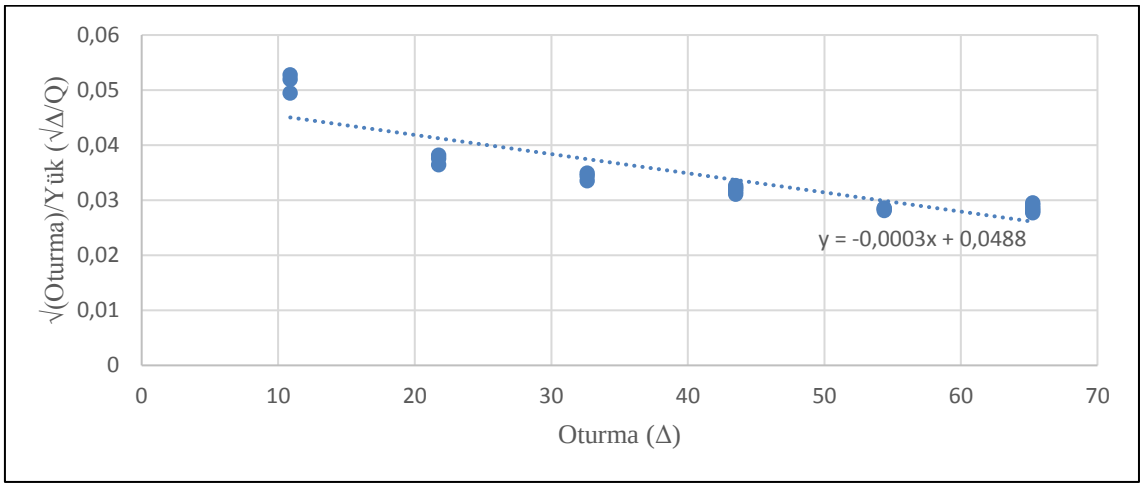


Şekil 8. C kolonu Brinch Hansen grafiği

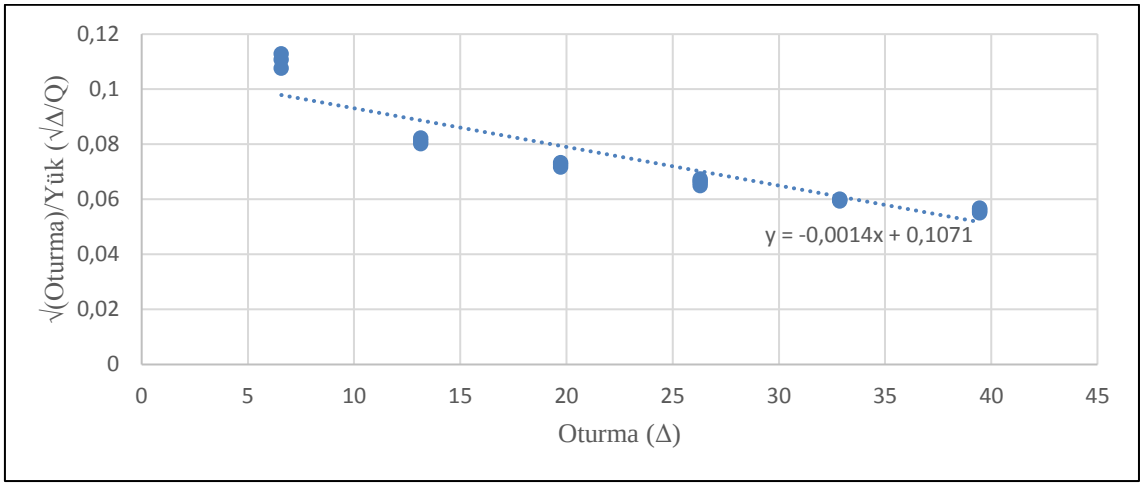


Şekil 9. D kolonu Brinch Hansen grafiği

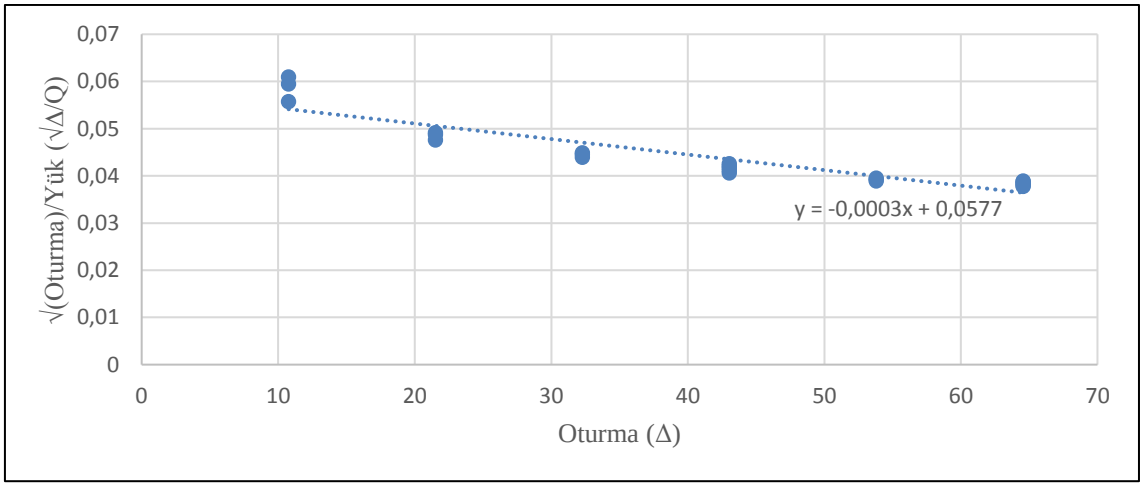
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 10. E kolonu Brinch Hansen grafiği

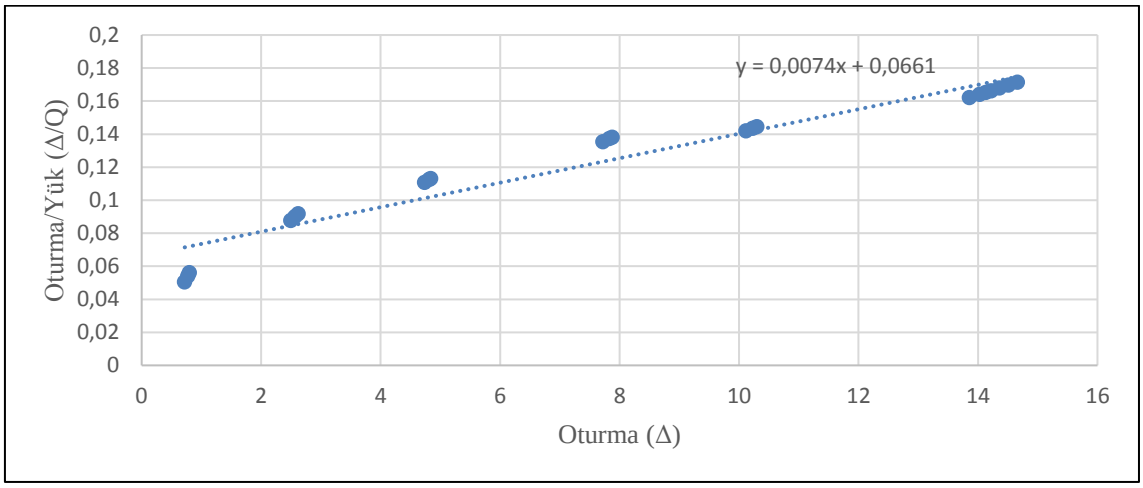


Şekil 11. F kolonu Brinch Hansen grafiği

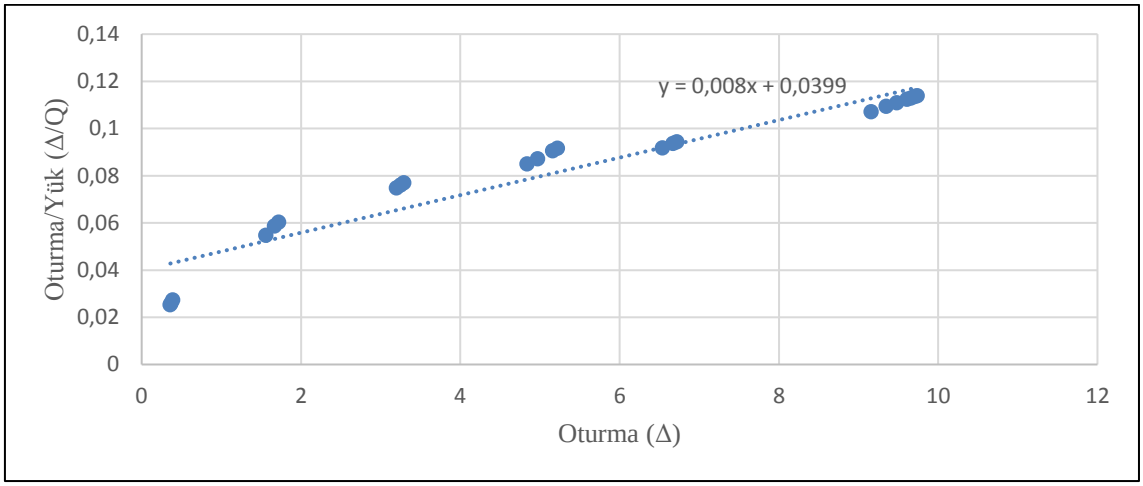


Şekil 12. G kolonu Brinch Hansen grafiği

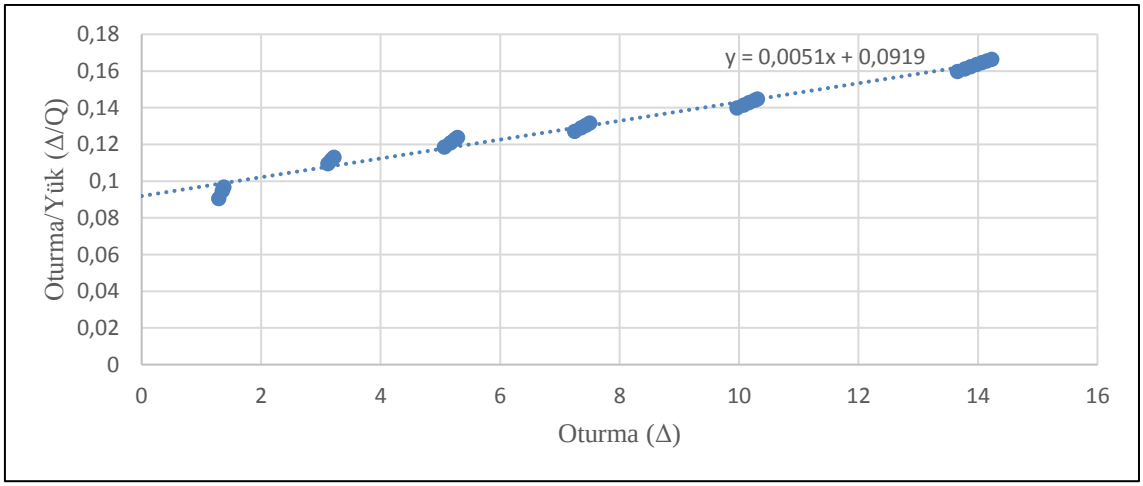
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 13. A1 kolonu Chin Kondner grafiği

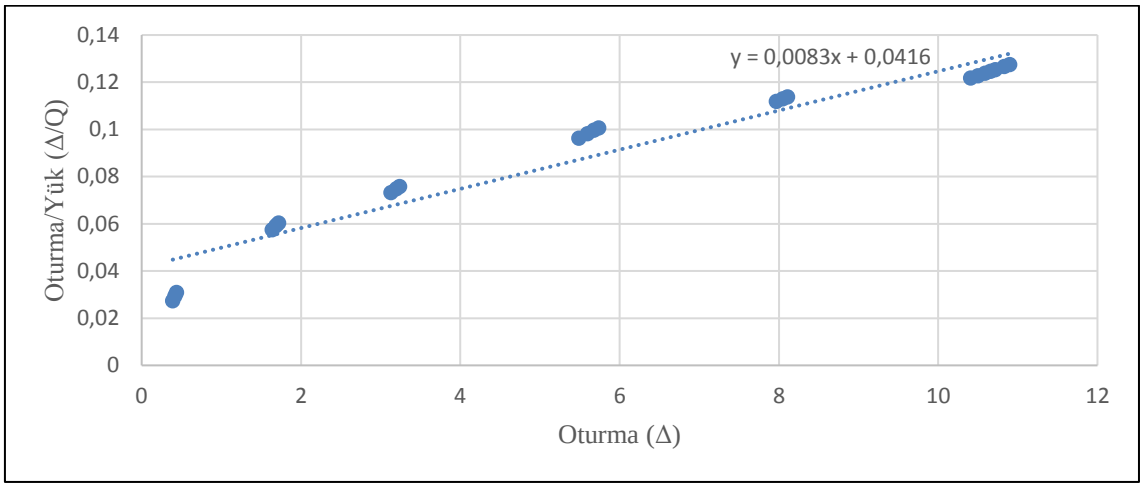


Şekil 14. A2 kolonu Chin Kondner grafiği

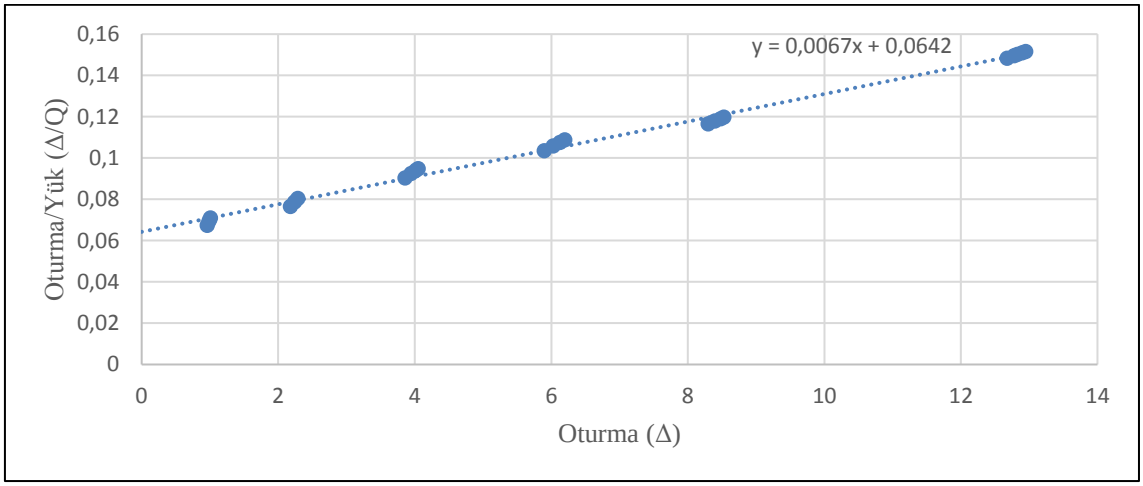


Şekil 15. B1 kolonu Chin Kondner grafiği

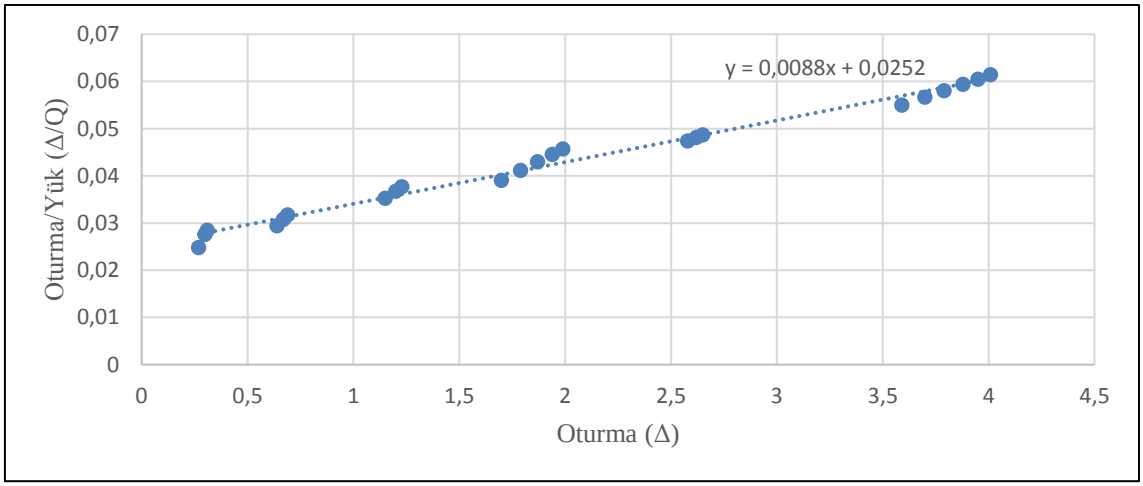
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 16. B2 kolonu Chin Kondner grafiği

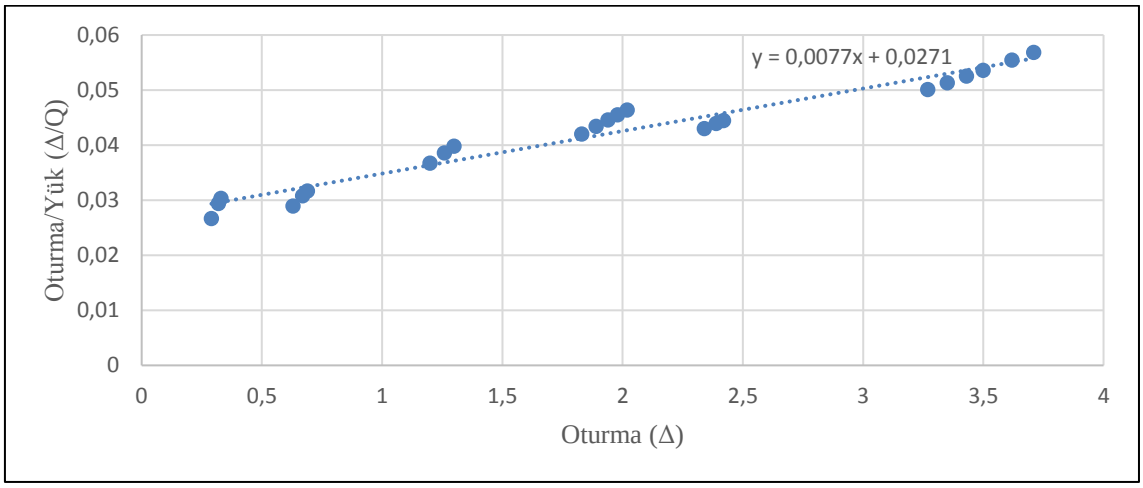


Şekil 17. C kolonu Chin Kondner grafiği

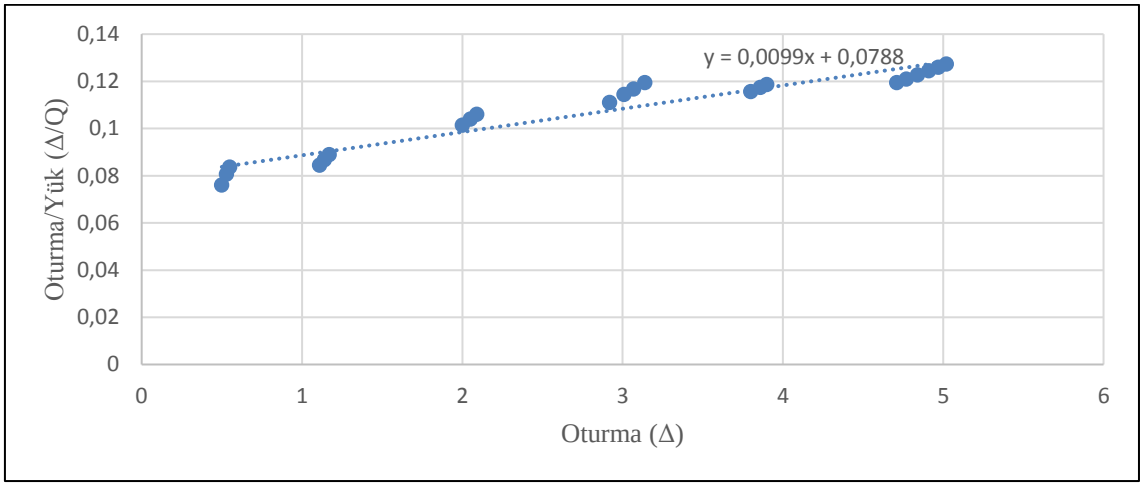


Şekil 18. D kolonu Chin Kondner grafiği

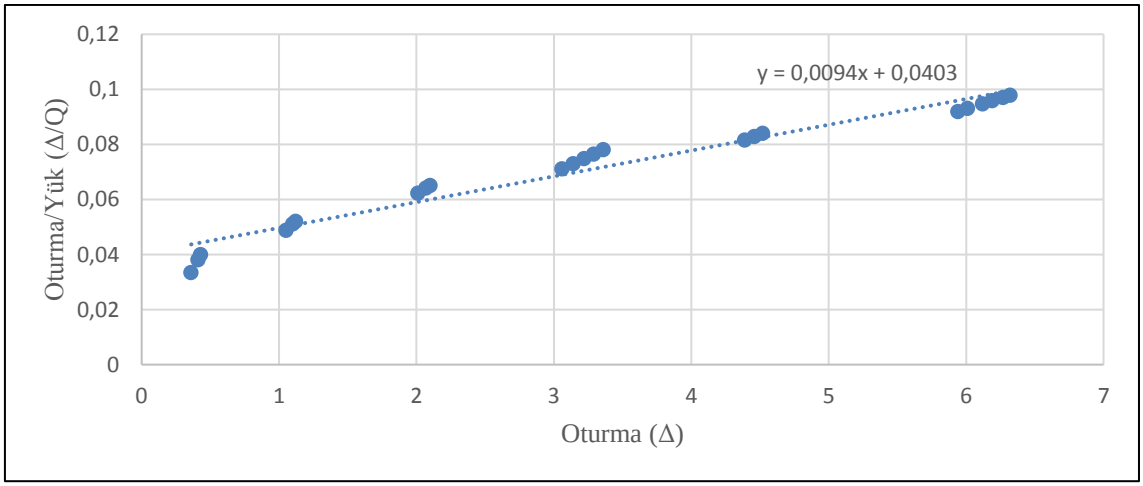
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 19. E kolonu Chin Kondner grafiği

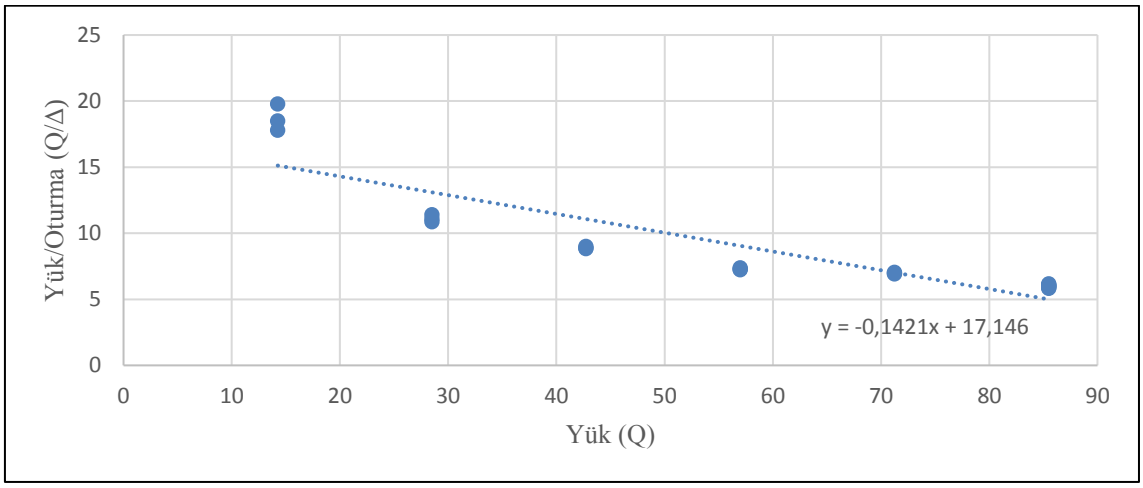


Şekil 20. F kolonu Chin Kondner grafiği

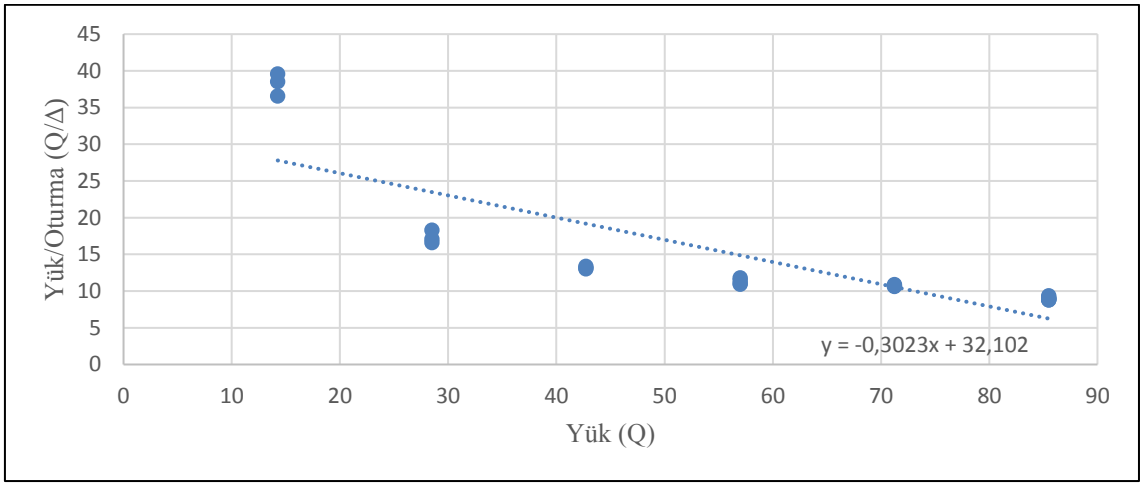


Şekil 21. G kolonu Chin Kondner grafiği

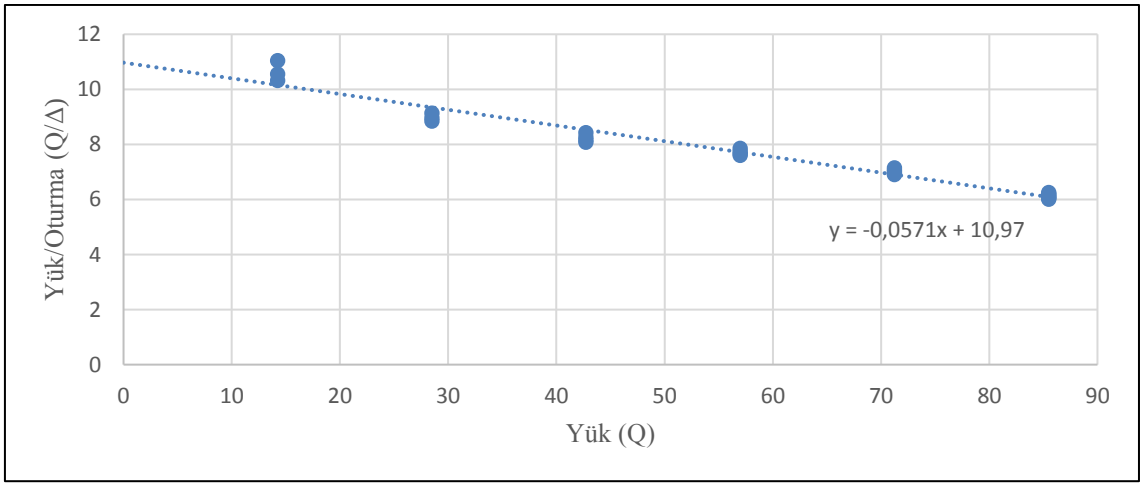
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 22. A1 kolonu Decourt grafiği

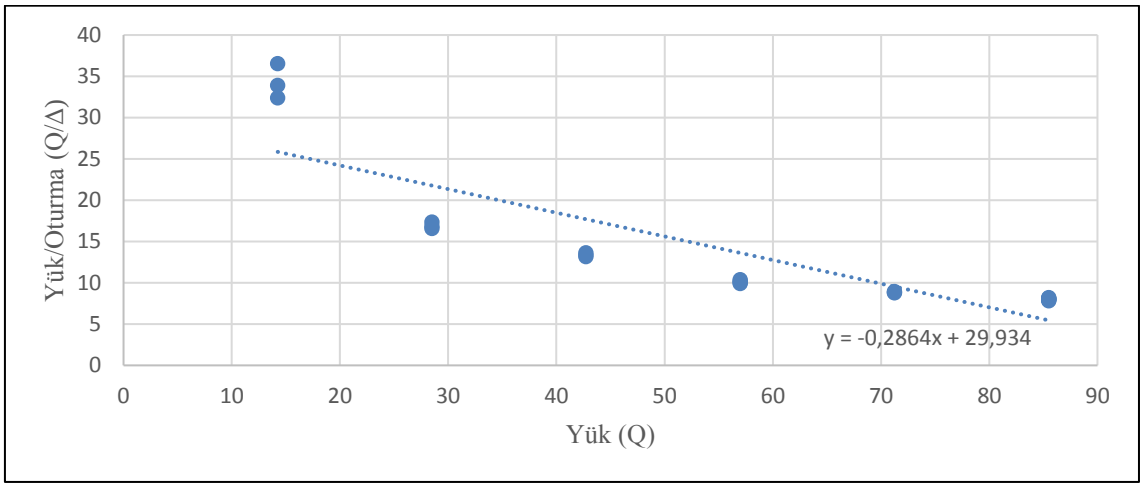


Şekil 23. A2 kolonu Decourt grafiği

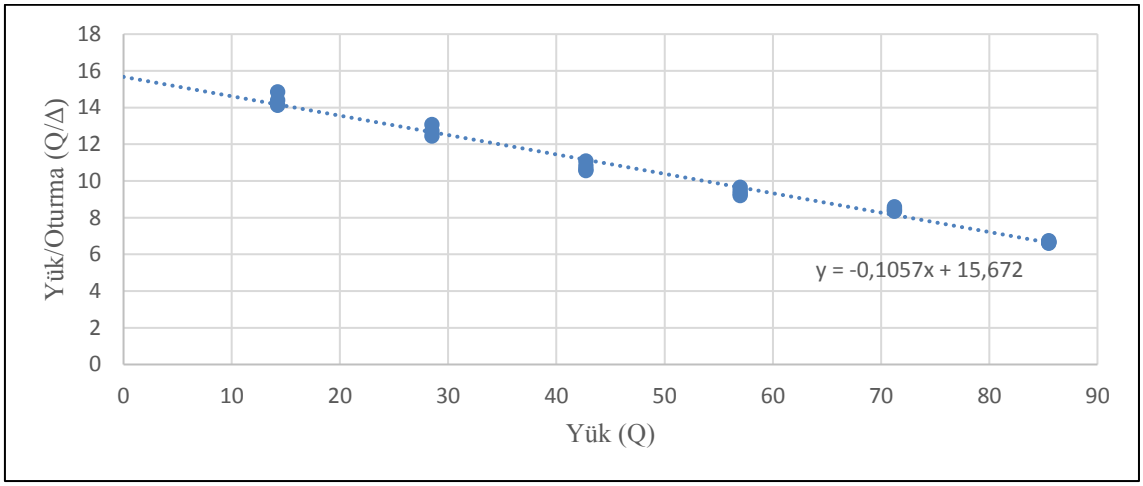


Şekil 24. B1 kolonu Decourt grafiği

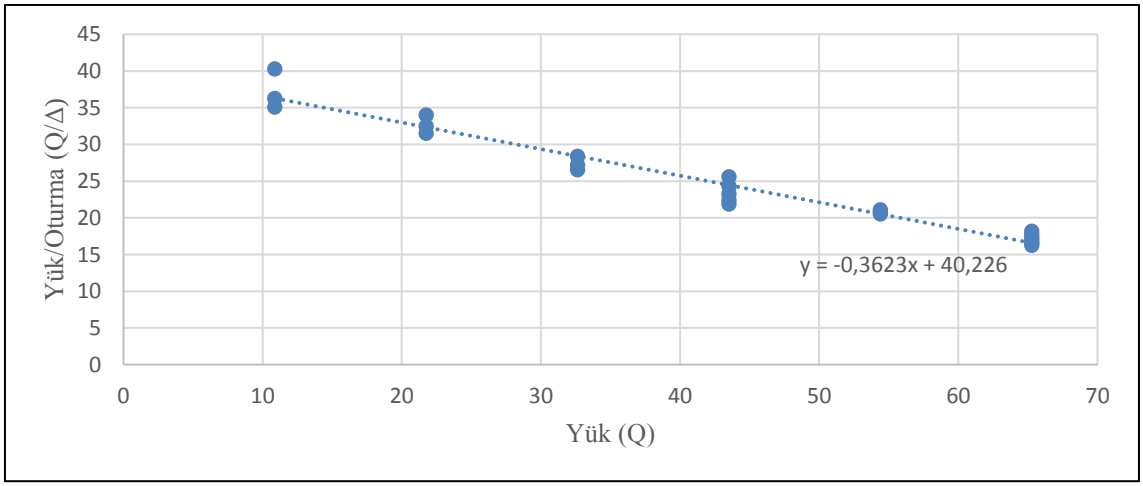
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 25. B2 kolonu Decourt grafiği

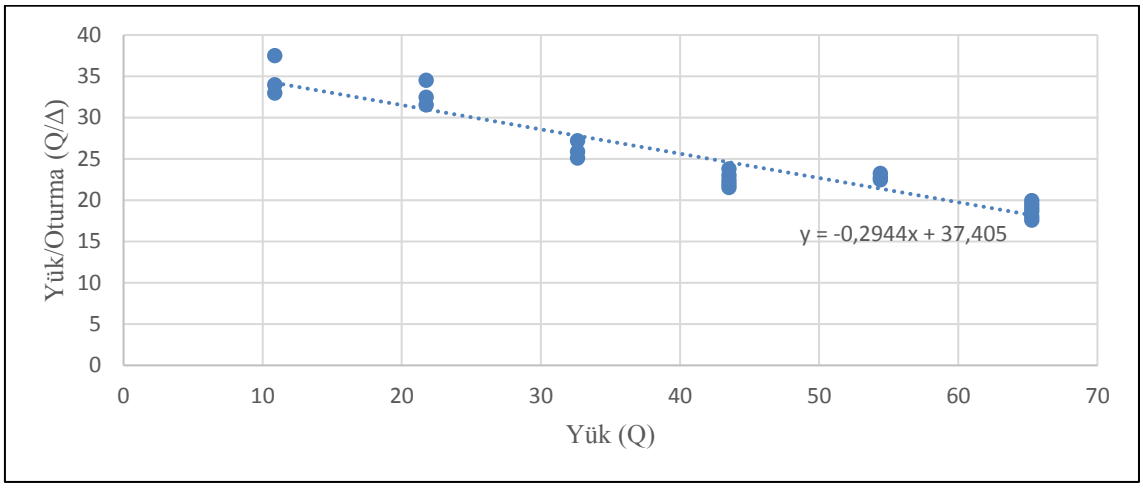


Şekil 26. C kolonu Decourt grafiği

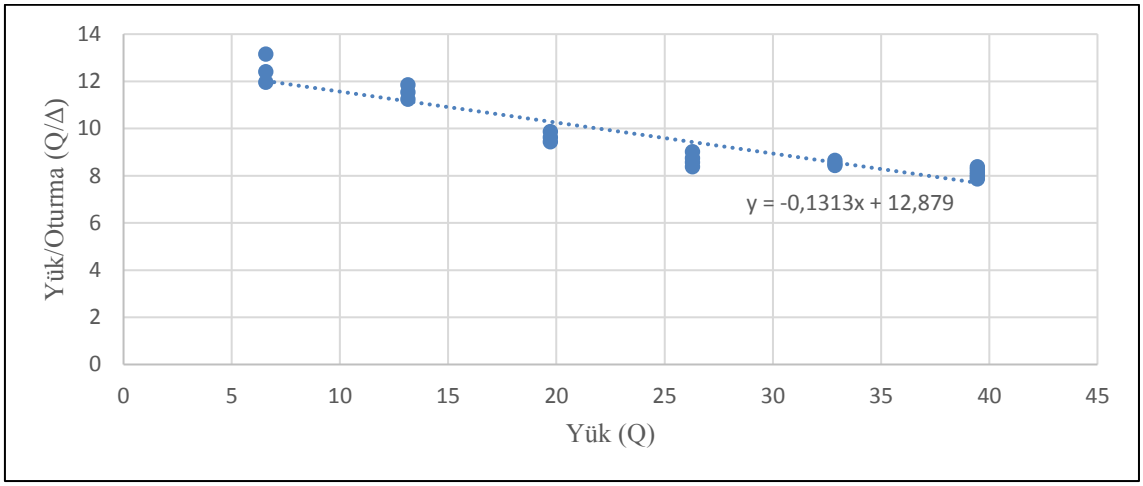


Şekil 27. D kolonu Decourt grafiği

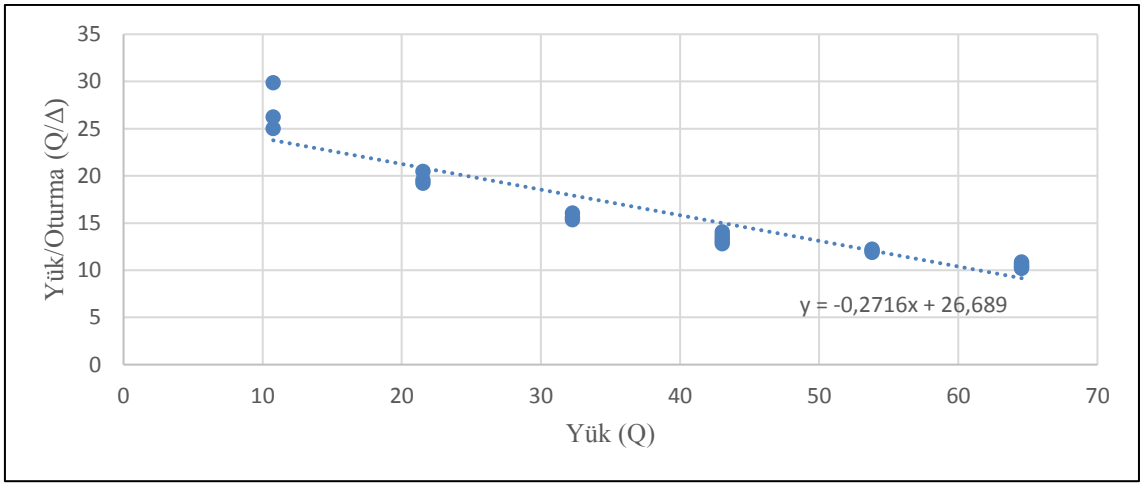
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 28. E kolonu Decourt grafiği

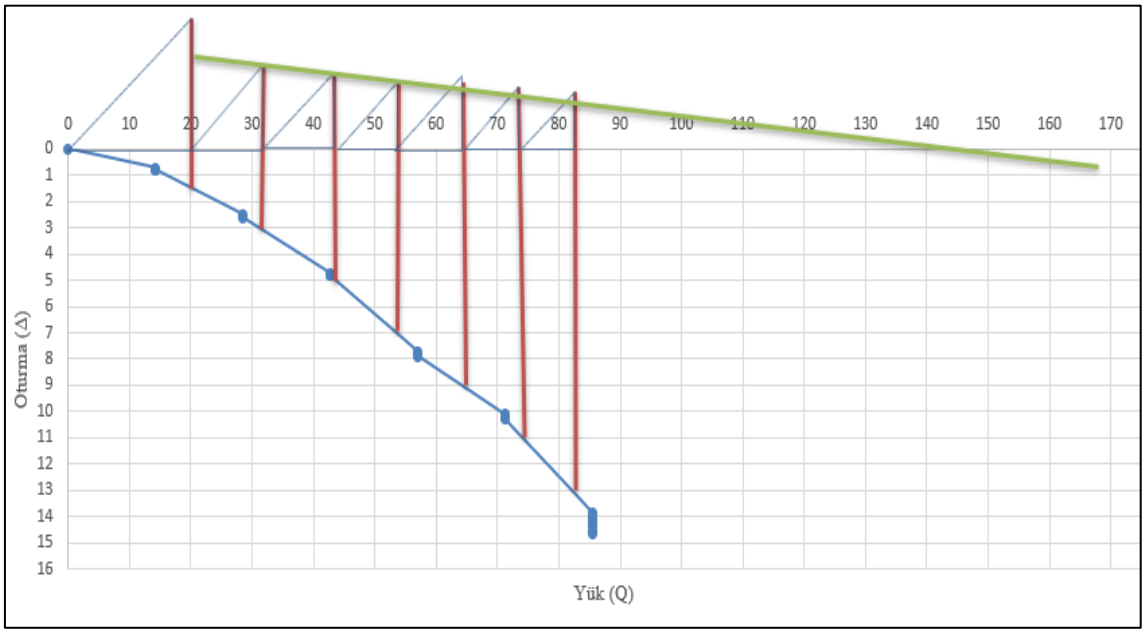


Şekil 29. F kolonu Decourt grafiği

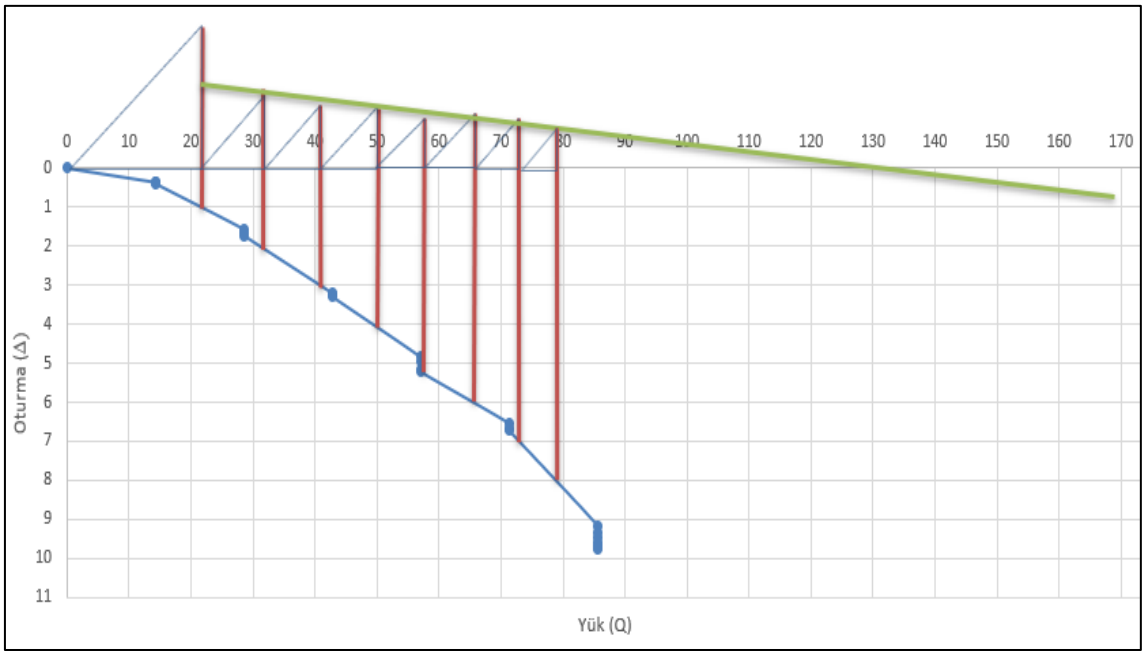


Şekil 30. G kolonu Decourt grafiği

EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması

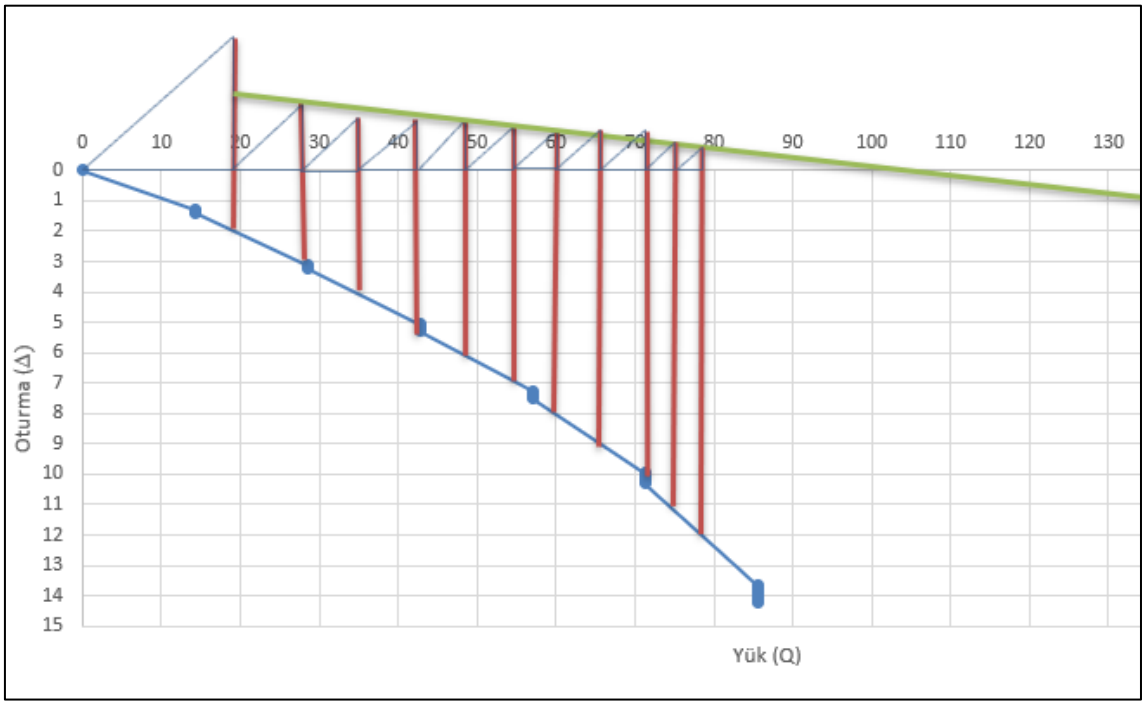


Şekil 31. A1 kolonu Mazurkiewicz grafiği

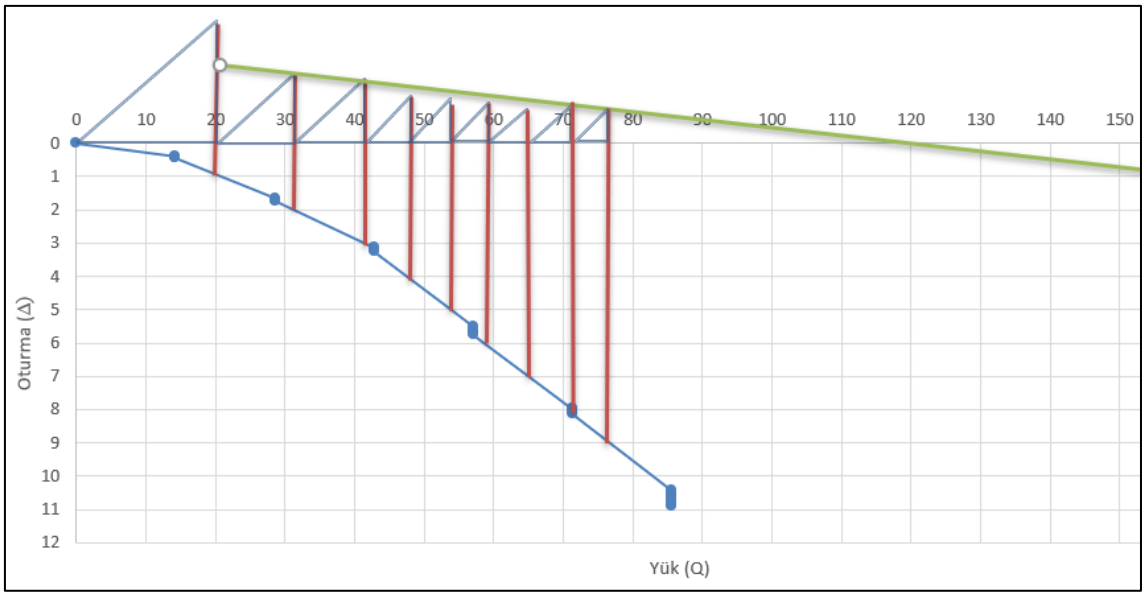


Şekil 32. A2 kolonu Mazurkiewicz grafiği

EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması

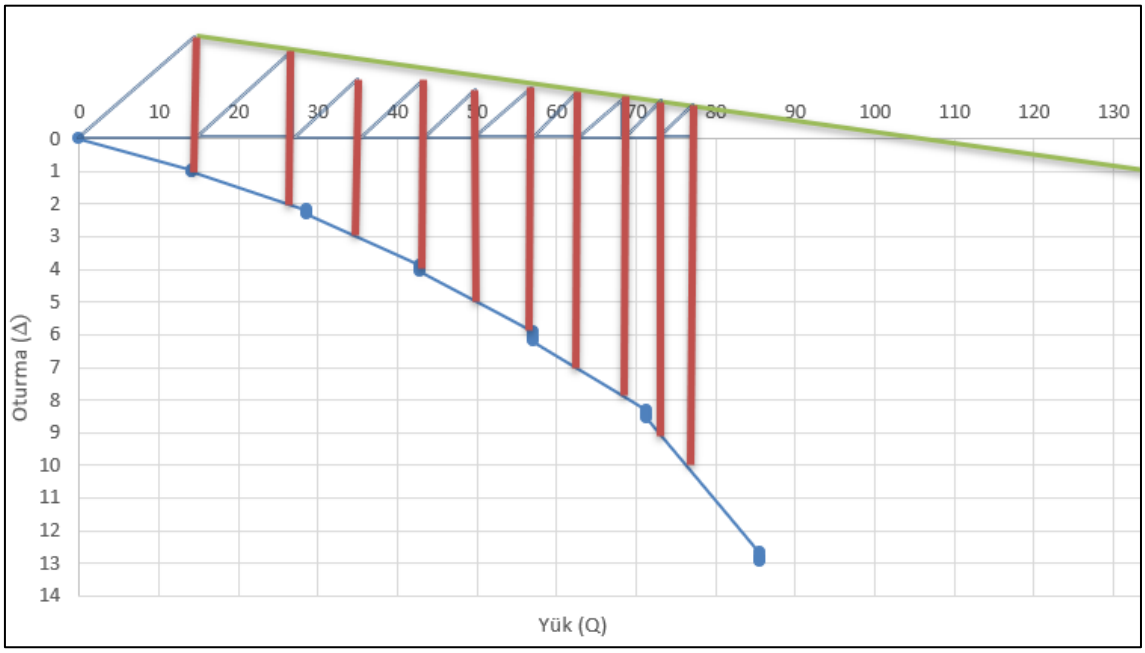


Şekil 33. B1 kolonu Mazurkiewicz grafiği

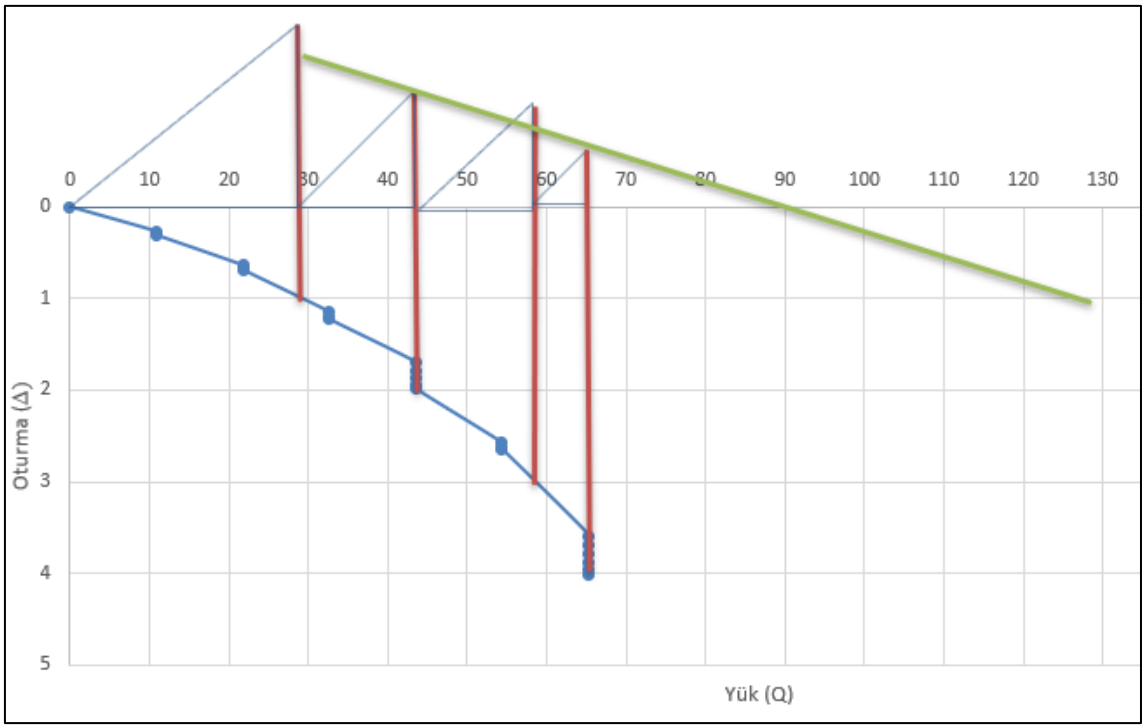


Şekil 34. B2 kolonu Mazurkiewicz grafiği

EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması

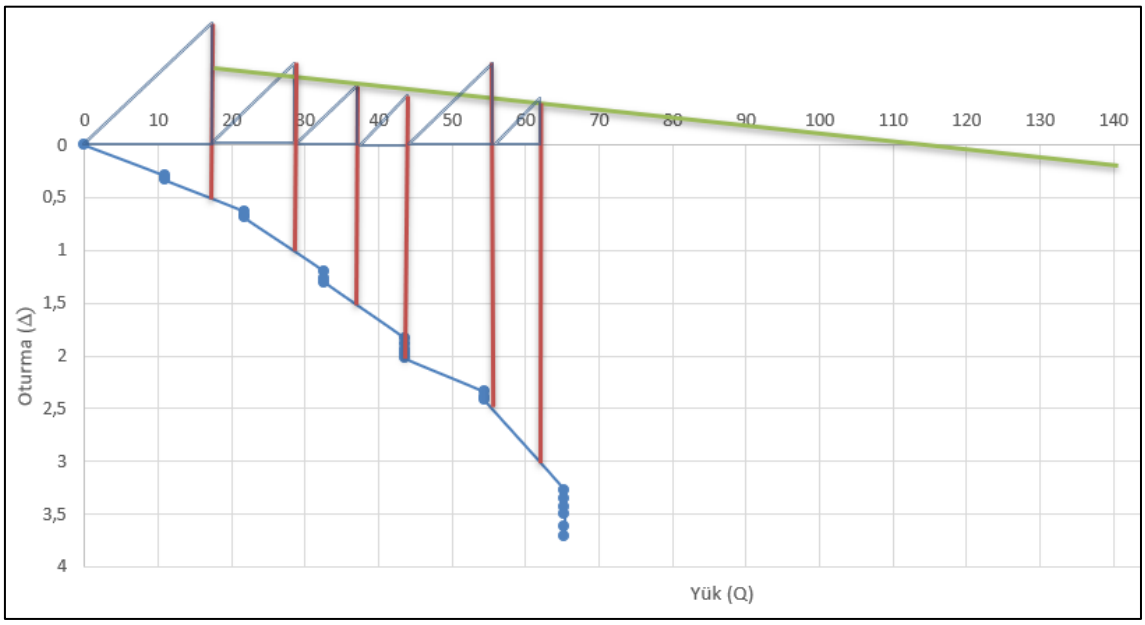


Şekil 35. C kolonu Mazurkiewicz grafiği

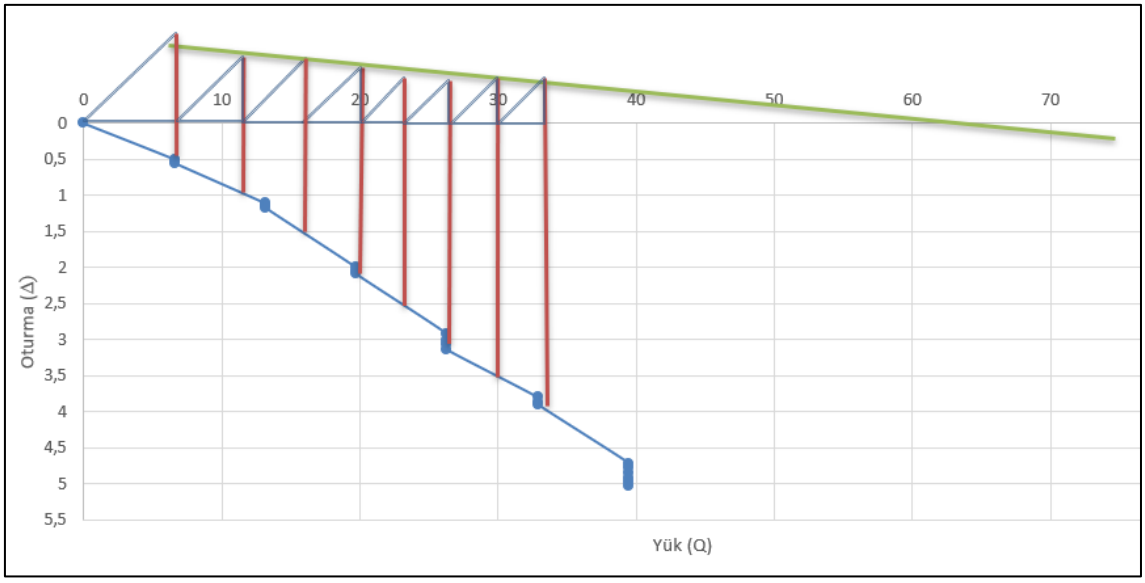


Şekil 36. D kolonu Mazurkiewicz grafiği

EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması

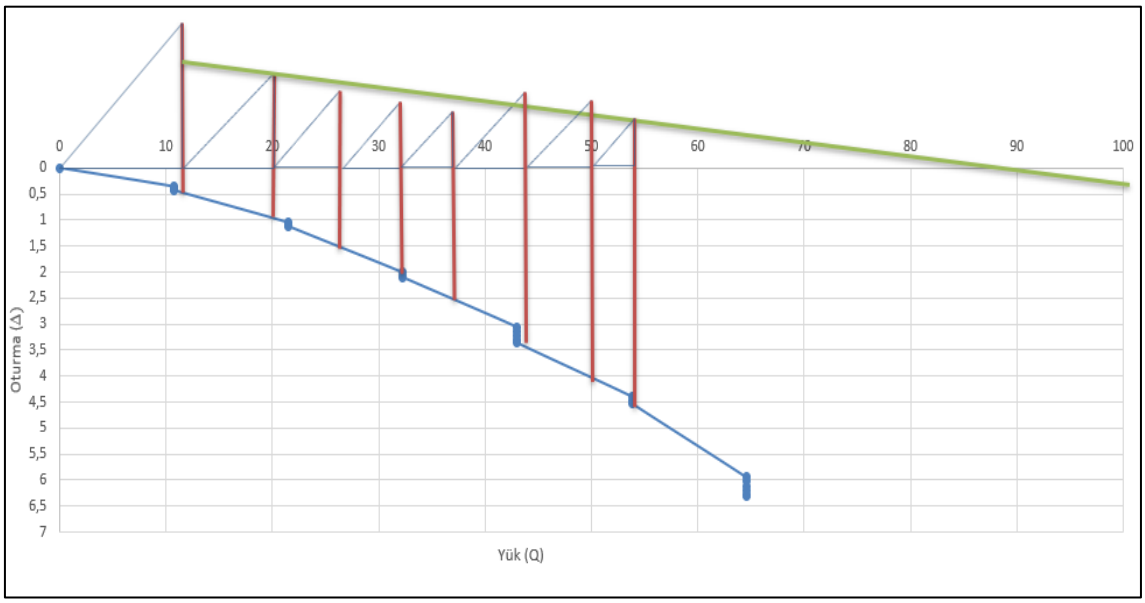


Şekil 37. E kolonu Mazurkiewicz grafiği



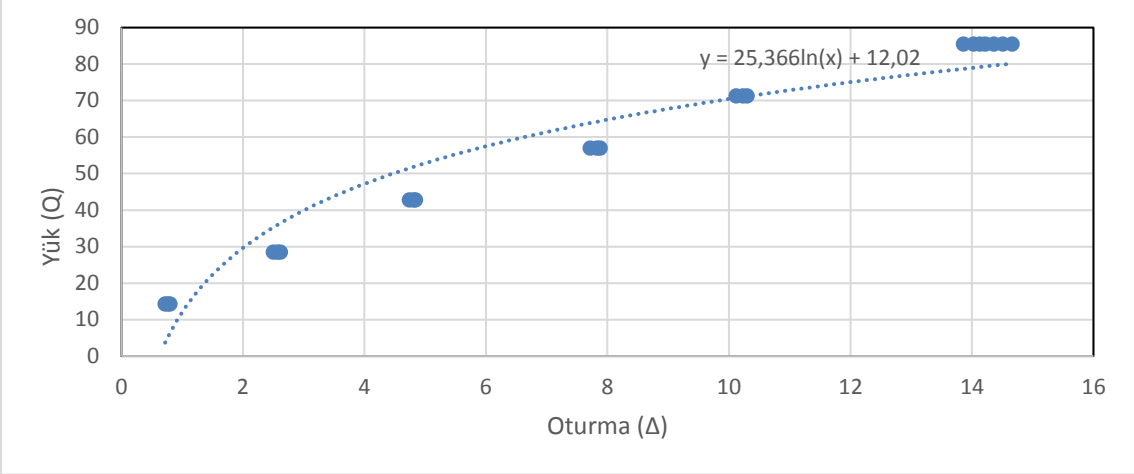
Şekil 38. F kolonu Mazurkiewicz grafiği

EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması

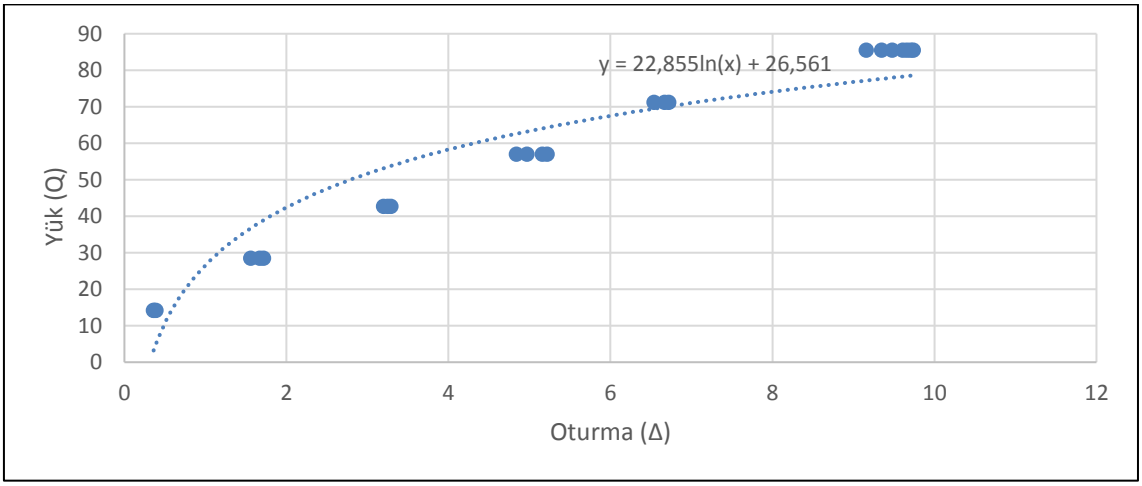


Şekil 39. G kolonu Mazurkiewicz grafiği

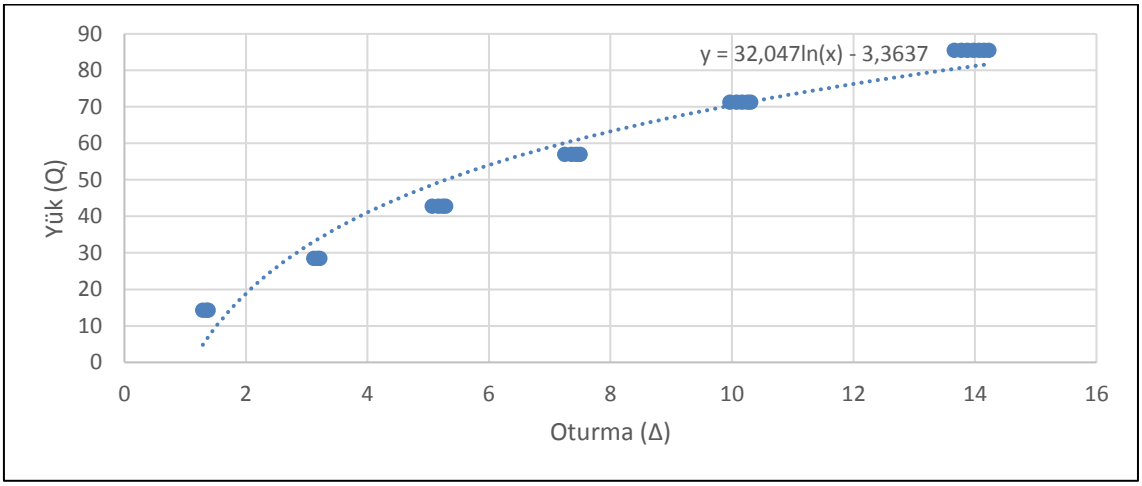
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 40. A1 kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

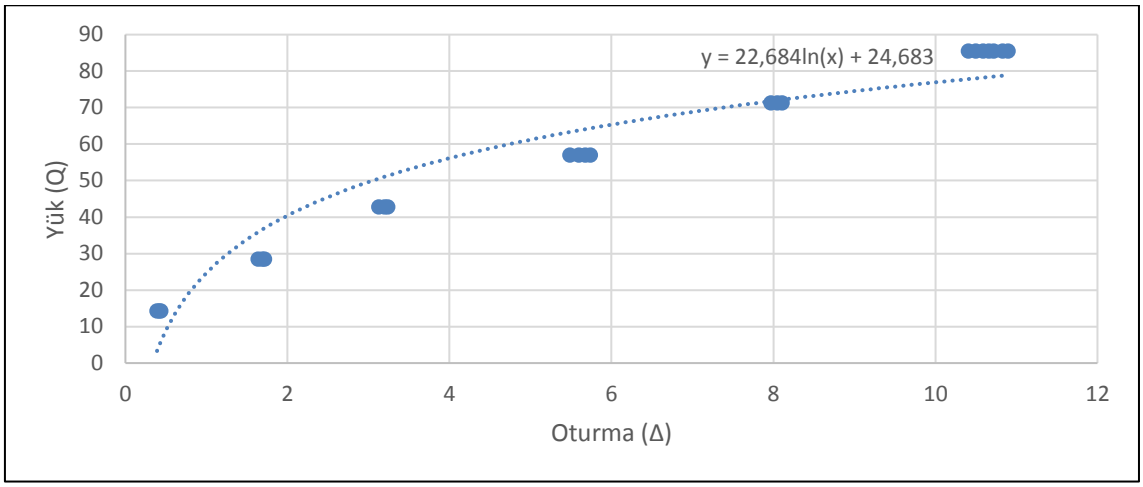


Şekil 41. A2 kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

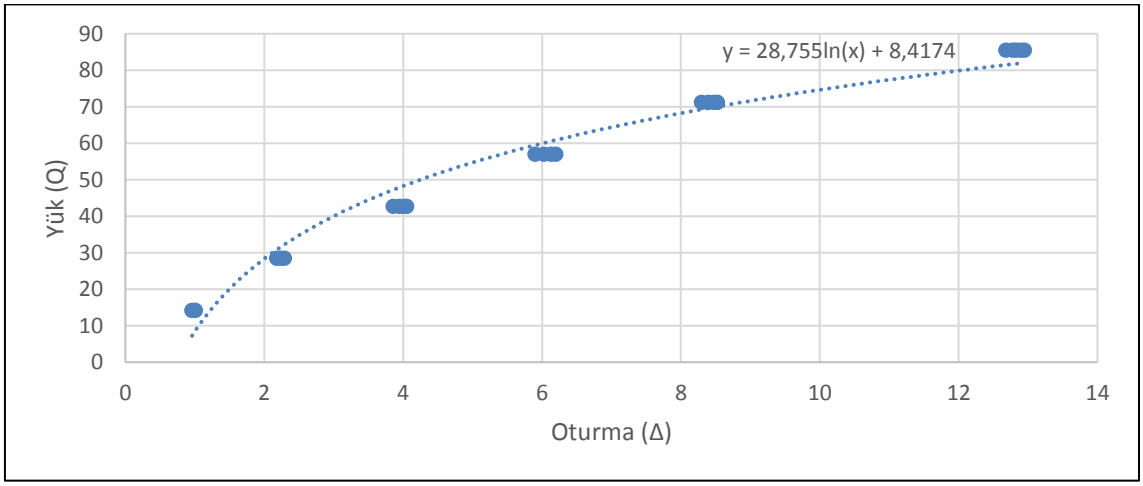


Şekil 42. B1 kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

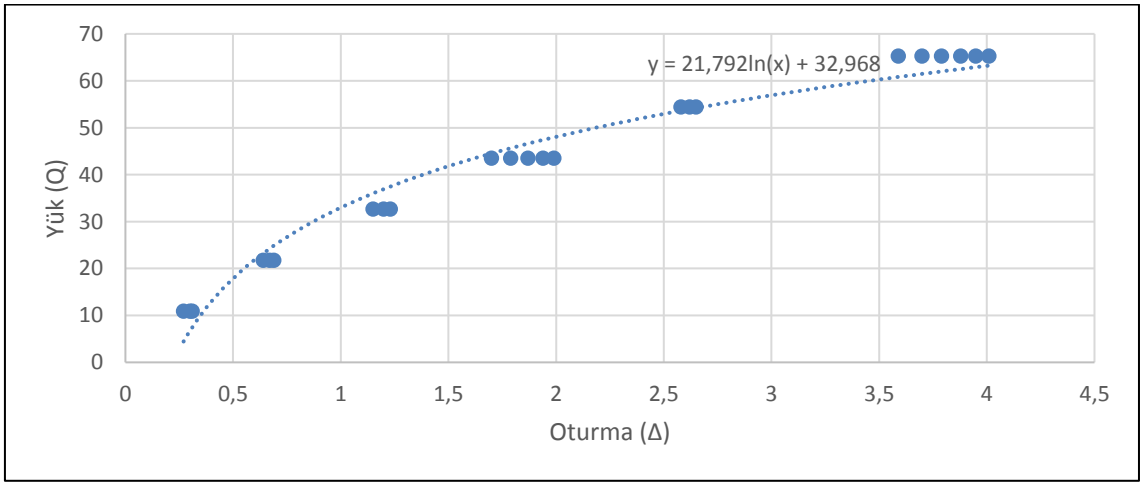
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 43. B2 kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

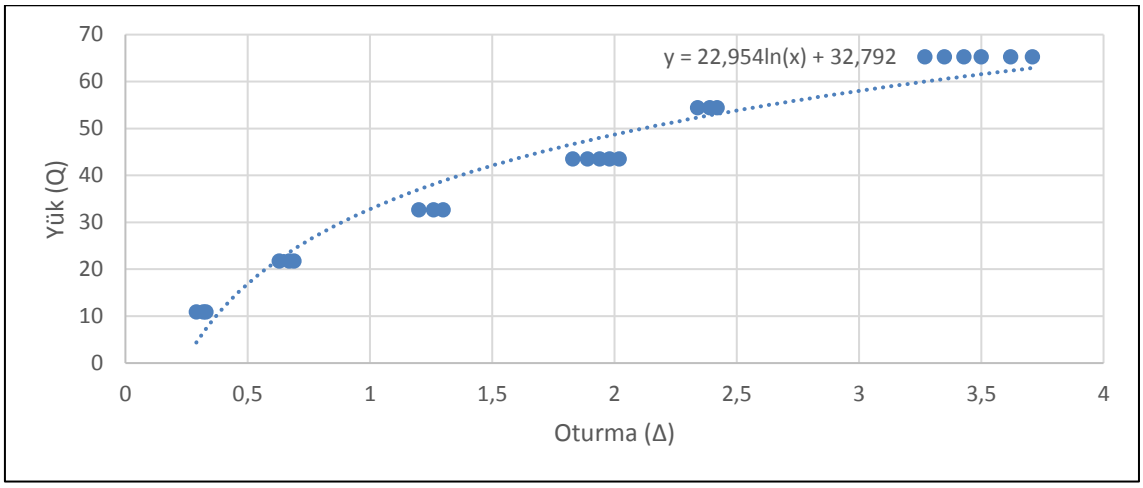


Şekil 44. C kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

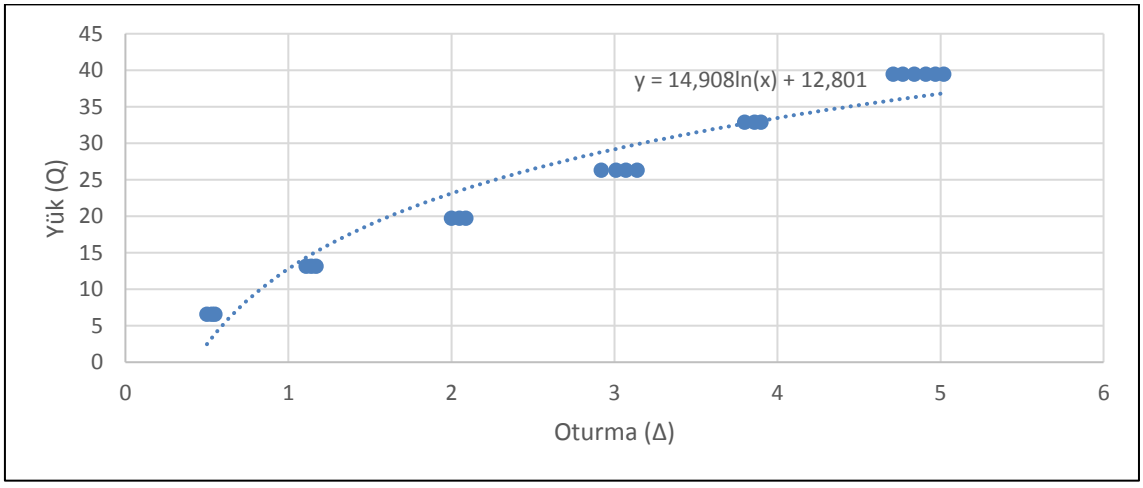


Şekil 45. D kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

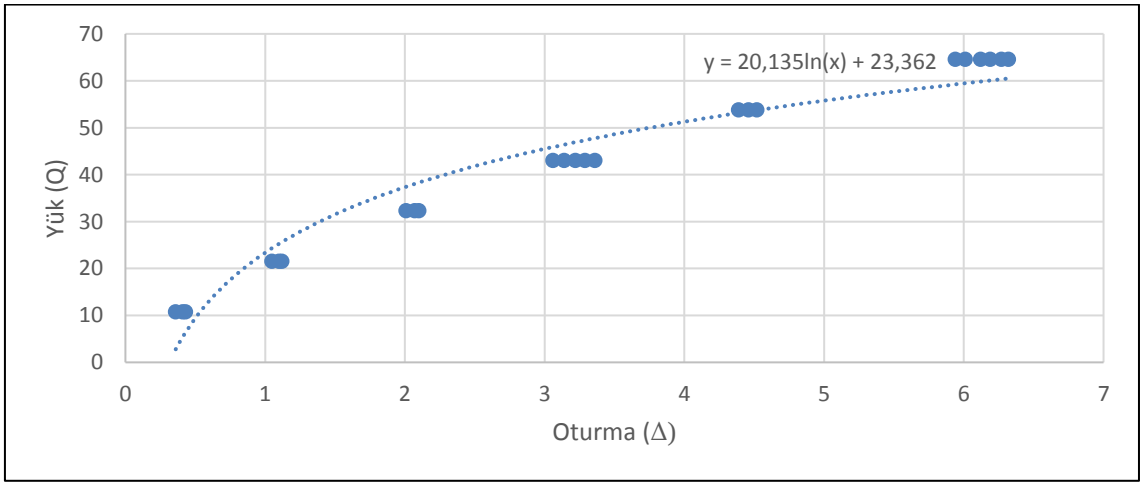
EK – 3. (devam) Kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler ile taşıma kapasitesinin hesaplanması



Şekil 46. E kolonu Hirany-Kulhawy grafiği



Şekil 47. F kolonu Hirany-Kulhawy grafiği



Şekil 48. G kolonu Hirany-Kulhawy grafiği

EK-4. Teorik yöntemler, Plaxis 3D Foundation ve KYD'den elde edilen oturma ve taşıma kapasiteleri

Çizelge 1. Taşıma kapasitesi ve oturma hesaplarında kullanılan parametreler

YAPI ADI	Q (kN)	d (m)	L (m)	G (kN/m^2)	Aç (m^2)	Ap (m^2)	Ep (kN/m^2)	Es (kN/m^2)	Eb (kN/m^2)	Ip	K (Ep/Es) (Poulos Davis,1980)	Ip (Poulos Davis, 1980)
A1	855	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
A2	855	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
B1	855	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
B2	855	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
C	855	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
D	652,5	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
E	652,5	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
F	390	0,8	11,50	25980	28,90	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5
G	652,5	0,8	11,00	25980	27,65	0,50	6689000	2000	26000	0,5	3,34E+03	1,5

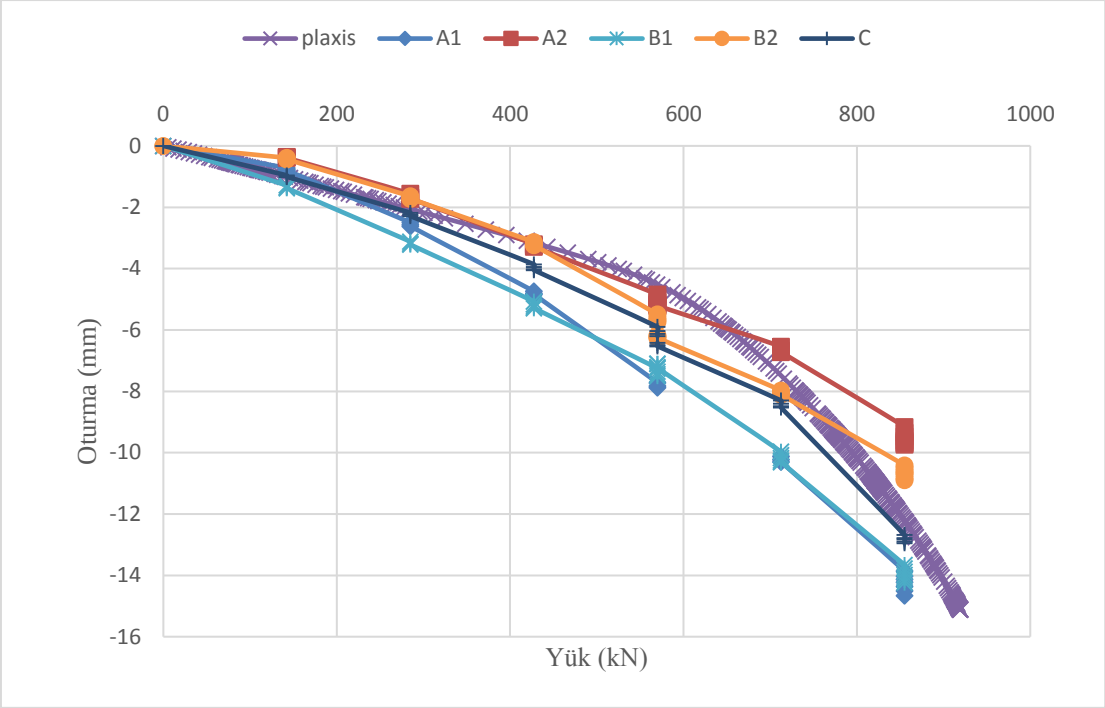
Çizelge 2. Elde edilen oturma değerleri

YAPI ADI	Poulos ve Davis (1980) (mm)	Yay Modeli (mm)	Tomlinson (2008) (mm)	Vesic (1970) (mm)	Das (2004) (mm)	Plaxis (mm)	KYD Sonucu (mm)
A1	4,48	1,86	16,36	10,80	40,93	12,37	9,74
A2	4,48	1,86	16,36	10,80	40,93	12,37	14,66
B1	4,48	1,86	16,36	10,80	40,93	12,37	10,9
B2	4,48	1,86	16,36	10,80	40,93	12,37	14,23
C	4,48	1,86	16,36	10,80	40,93	12,37	12,95
D	3,42	1,42	11,52	10,14	31,02	4,04	4,01
E	3,42	1,42	11,52	10,14	31,02	4,04	3,71
F	1,96	0,81	5,26	9,33	17,96	3,68	5,02
G	3,42	1,42	11,52	10,14	31,02	4,04	6,32

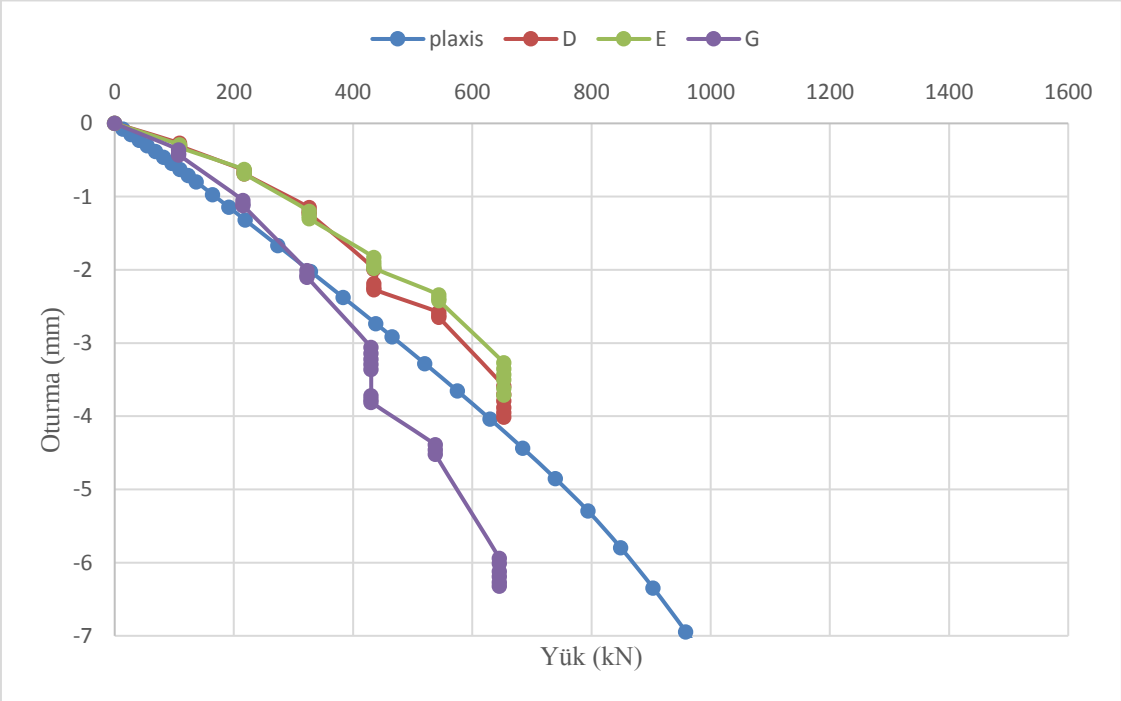
Çizelge 3. Elde edilen taşıma kapasiteleri

YAPI ADI	Brinch -Hansen %80 Yöntemi (ton)	Chin Kondner Yöntemi (ton)	Decourt Yöntemi (ton)	Mazurkiewicz Yöntemi (ton)	Hirany-Kulhawy Yöntemi (ton)	Plaxis Hesap (ton)
A1	140,97	135,13	120,66	145	99,93	91,93
A2	231,86	125	124,35	130	105,77	91,93
B1	89,57	196,07	192,12	105	107,70	91,93
B2	229,9	120,48	104,51	120	103,30	91,93
C	112,88	149,29	148,27	105	108,07	91,93
D	133,44	113,64	111,03	90	108,49	139
E	130,68	129,87	127,05	115	112,34	139
F	40,83	101,01	98,08	63	64,47	84,4
G	120,17	106,38	98,26	89	93,14	139

EK-5. Plaxis ve KYD grafiklerinin karşılaştırılması

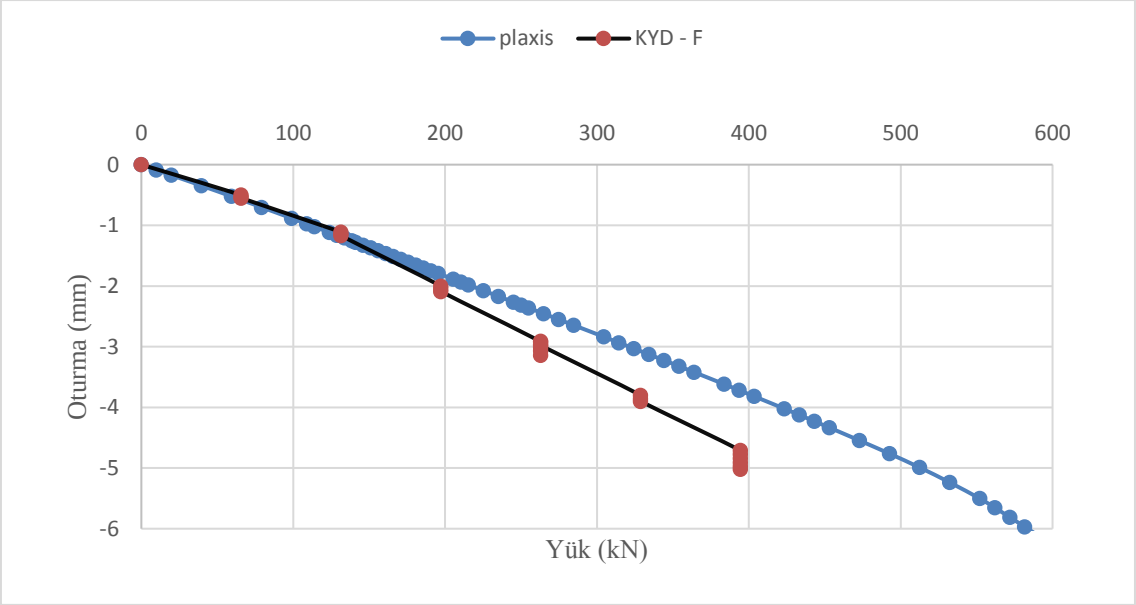


Şekil 49. A1, A2, B1, B2, C kazık yükleme deneyleri ve Plaxis 3D Foundation yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması



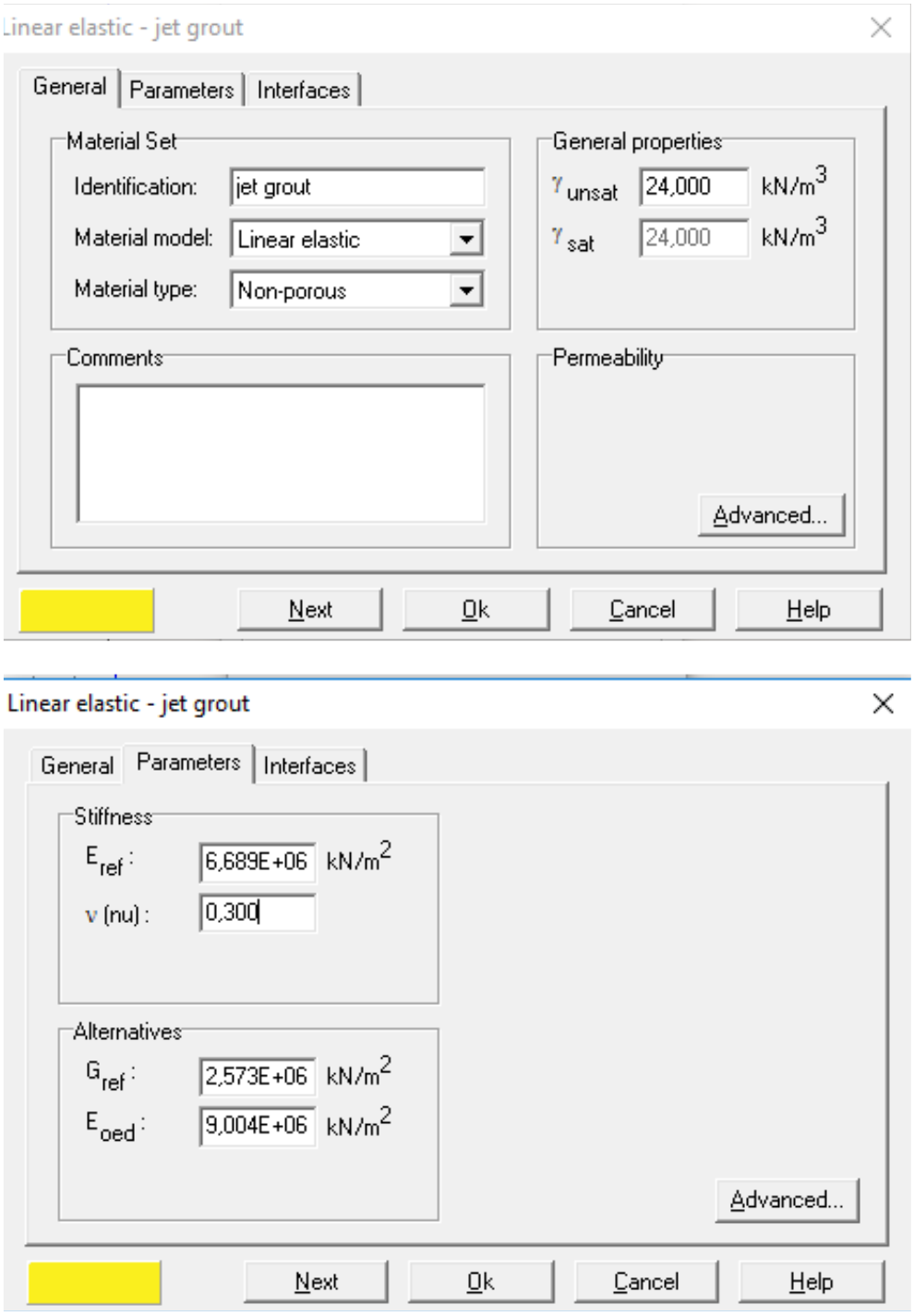
Şekil 50. D,E,G kazık yükleme deneyleri ve Plaxis 3D Foundation yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması

EK-5. (devam). Plaxis ve KYD grafiklerinin karşılaştırılması



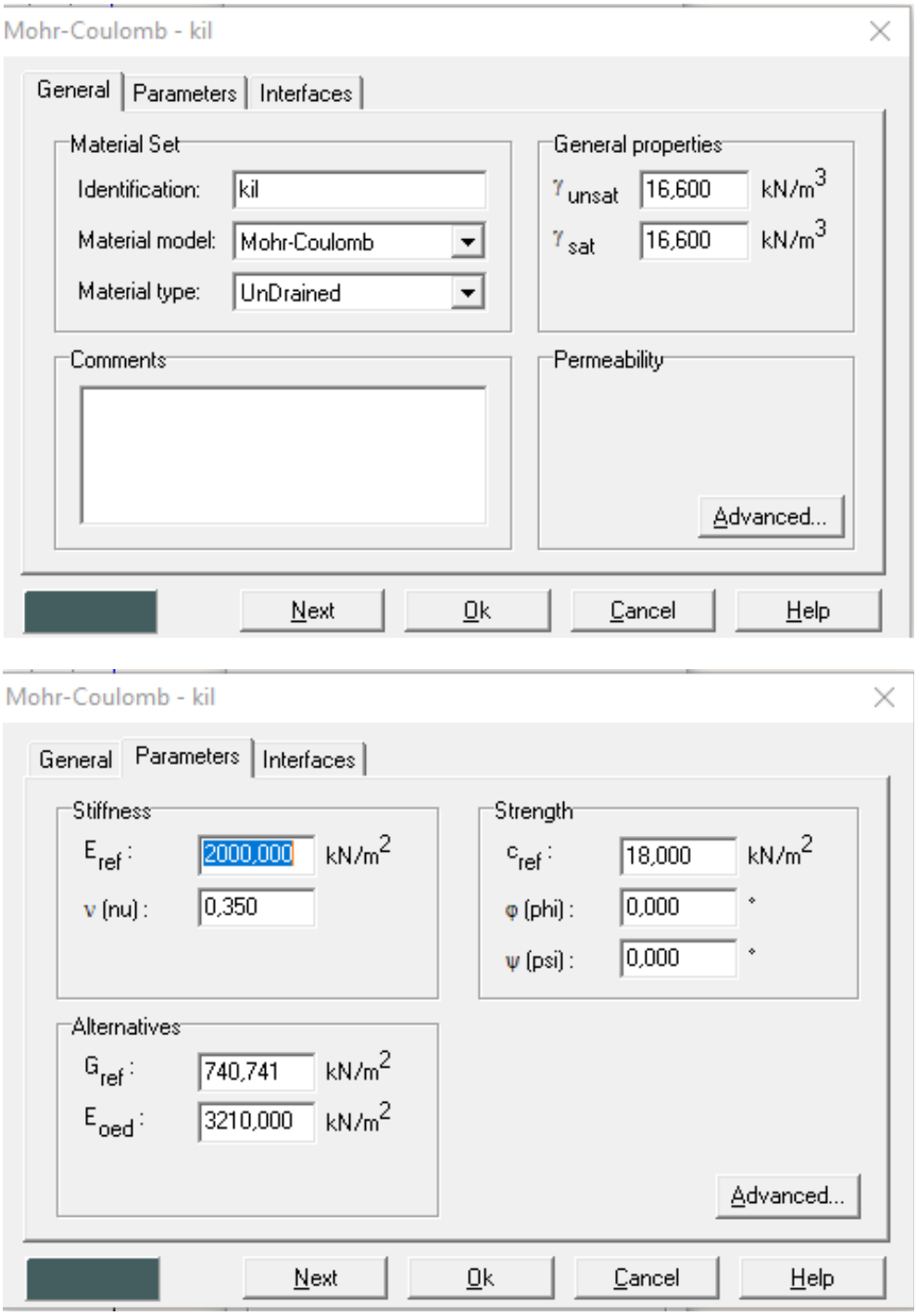
Şekil 51. F kazık yükleme deneyleri ve Plaxis 3D Foundation yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması

EK-6. Plaxis ekran görüntüleri



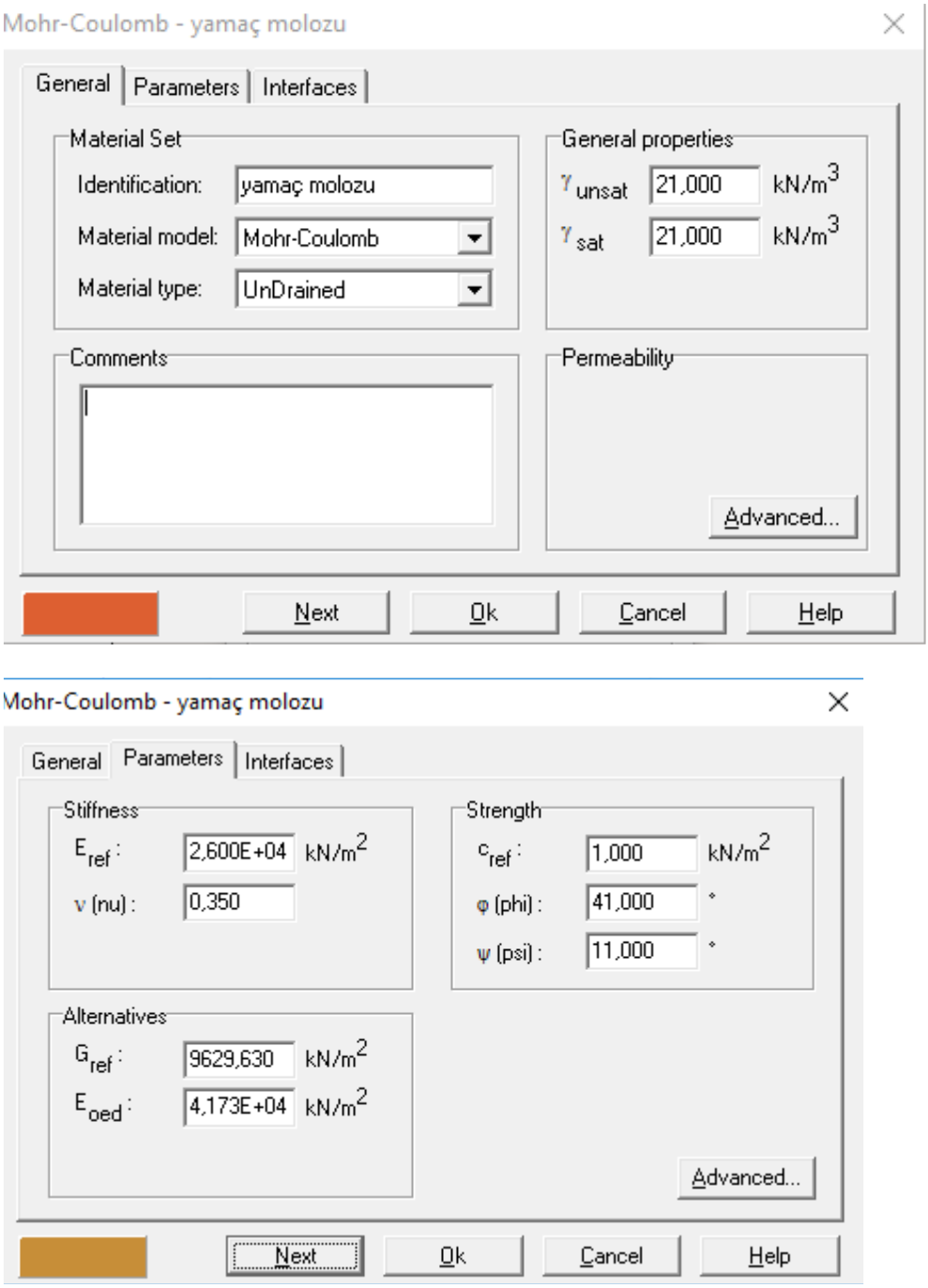
Şekil 52. Plaxis'e girilen jet grout parametreleri

EK-6. (devam) Plaxis ekran görüntüleri



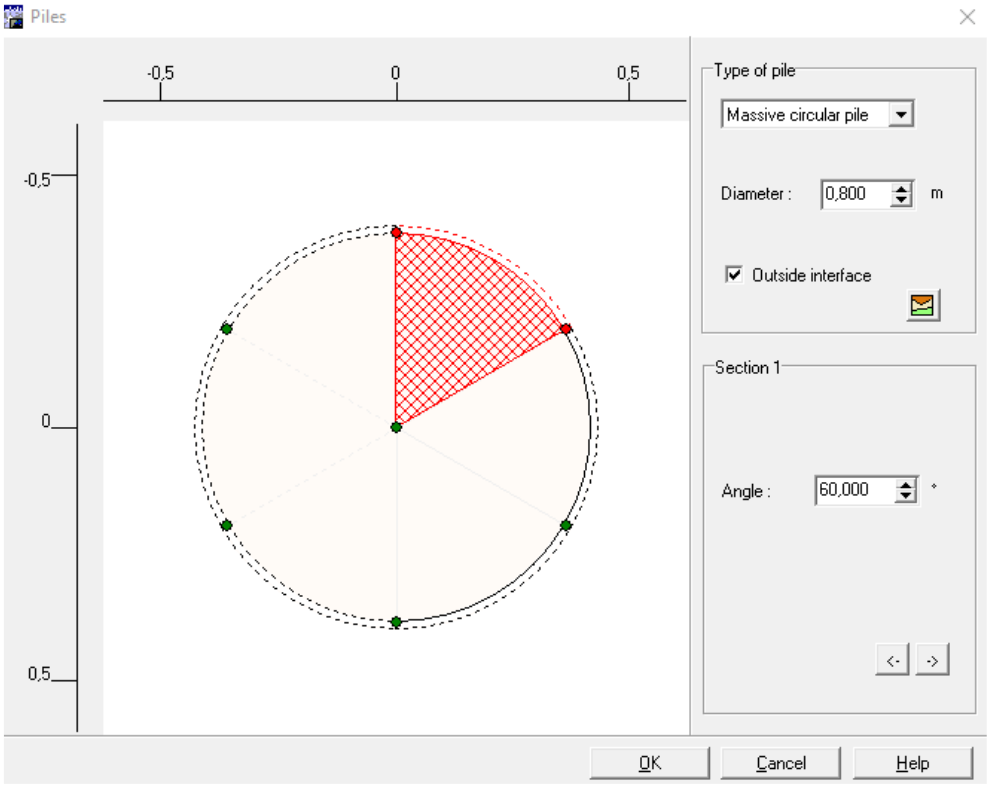
Şekil 53. Plaxis'e girilen kil zemin parametreleri

EK-6. (devam) Plaxis ekran görüntüleri



Şekil 54. Plaxis'e girilen yamaç molozu zemin parametreleri

EK-6. (devam) Plaxis ekran görüntüleri



Şekil 55. Plaxis'e girilen jet grout özellikleri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı	: ÇELİK Oğuzhan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 19.02.1992, Ankara
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (555) 274 75 04
e-mail	: oguzhancelik92@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2014
Lise	Yıldırım Beyazıt Anadolu lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017 – 2018	Kentsel Tasarım Rest. Ve İnş. A.Ş.	Şantiye Şefi
2016 - 2017	Sürekli İnşaat	Şantiye Şefi
2015 - 2016	Elya International Project Group	Kaba İşler Şefi
2014 – 2015	Berkay Mühendislik	Şantiye Şefi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Çelik O., Yılmaz Y. (2018), *Kızılcahamam Atıksu Arıtma Tesisi Jet Grout Kolon Temel Sisteminin İmalatı ve Performansı*, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, İstanbul, sf: 897-904

Hobiler

Halk Oyunları, Motorsporları, Bateri



GAZİ GELECEKTİR...