

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT YÖNTEMİNİN ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNE KATKISININ
VE BU YÖNTEMDE KULLANILAN PARAMETRELERİN
ETKİLERİNİN İRDELENMESİ**

Recep AKAN

**Danışman
Prof. Dr. S. Nilay KESKİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2013**

©2013 [Recep AKAN]

TEZ ONAYI

Recep AKAN tarafından hazırlanan " **Jet Grout Yönteminin Zemin İyileştirmesine Katkısının ve Bu Yöntemde Kullanılan Parametrelerin Etkilerinin İrdelenmesi** "adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Prof. Dr. S. Nilay KESKİN Süleyman Demirel Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. T. Selçuk GÖKSAN Süleyman Demirel Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. Soner UZUNDURUKAN Süleyman Demirel Üniversitesi	

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Ahmet ŞAHİNER	
-----------------------	-------------------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Recep AKAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Jet Grouting Yöntemi ve Bu Yönteme Ait Tanımlar	3
2.2. Jet Grouting Ekipmanı	9
2.2.1. Delgi makinesi	9
2.2.2. Pompa ünitesi	10
2.2.3. Mikser ünitesi	11
2.2.4. Çimento silosu	11
2.2.5. Su tankı	11
2.2.6. Diğer ekipmanlar	12
2.3. Jet Grouting Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	12
2. 4. Jet Grouting Teknikleri	15
2.4.1. Jet 1	15
2.4.2. Jet 2	16
2.4.3. Jet 3	17
2.4.4. Süper jet	18
2.5. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Parametreler ve Jet Grout Kolonların Mukavemet Özellikleri	19
2.5.1. Jet grouting yönteminin çalışma parametreleri	19
2.5.1.1. Enjeksiyon basıncı	21
2.5.1.2. Dönme ve çekme hızı	22
2.5.1.3. Dozaj	23
2.5.2. Jet grout yönteminde kullanılan parametreler ve jet grout kolonların mukavemet özellikleri üzerine yapılan çalışmalar	24
2.6. Jet Grout Kolonu Kalite Kontrol Deneyleri	31

2.6.1 Deneme kolonları yapılması ve çap kontrolü	31
2.6.2 Karot numune alınması ve serbest basınç deneyi	33
2.6.3 Jet grout kolonu yükleme deneyi	35
2.6.4. Süreklilik deneyi.....	38
2.7. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Kapasitesi.....	40
2.7.1. Jet grout kolonların taşıma güçlerinin hesaplanması.....	40
2.7.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde kolon taşıma gücü	41
2.7.1.2. Kohezyonlu zeminlerde kolon taşıma gücü.....	43
2.7.2. Jet grout kolonlar kullanılarak taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması üzerine yapılan çalışmalar	44
2.8. Jet Grout Kolonlar Kullanılarak Yanal Deformasyonların Azaltılması ve Stabilitenin Artırılması Üzerine Yapılan Çalışmalar	52
2.9. Jet Grout Kolonlar Kullanılarak Permeabilitenin Azaltılması Üzerine Yapılan Çalışmalar	57
2.10. Jet Grout Kolonların Zeminlerin Sıvılaşma Direnci Üzerine Etkisi	59
2.10.1 Sıvılaşmanın tanımı ve sıvılaşma kriterleri.....	59
2.10.2 Jet grout kolonların dinamik etki ve sıvılaşmaya karşı kullanılması üzerine yapılan çalışmalar	62
2.11. Jet Grout Kolonların Bilgisayar Programlarıyla Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar...	66
3. MATERYAL ve YÖNTEM	68
3.1. Materyal.....	68
3.2. Yöntem.....	68
3.2.1. Bulanık mantık yöntemi.....	68
3.2.1.1. Bulanık kümeler ve üyelik dereceleri	69
3.2.1.2. Üyelik fonksiyonları	72
3.2.1.3. Bulanıklaştırma	74
3.2.1.4. Durulaştırma	74
3.2.1.5. Bulanık kurallar ve sistemler	77
3.2.1.6. Grafik çıkarım teknikleri	78
3.2.2. İstatistiksel yöntem.....	80
3.2.2.1. Çoklu regresyon analizi.....	80
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	84
4.1. Bulanık Mantık ile Model Kurulması ve Analiz Sonuçları	84
4.1.1. Bulanık mantık modelinin kurulması ve sonuçları.....	84
4.1.2. Çoklu regrasyon analizi ve sonuçları	89

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JET GROUT YÖNTEMİNİN ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNE KATKISININ VE BU YÖNTEMDE KULLANILAN PARAMETRELERİN ETKİLERİNİN İRDELENMESİ

Recep AKAN

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. S. Nilay KESKİN

Bu tez çalışmasında, bir zemin iyileştirme yöntemi olan jet grouting ile oluşturulan kolonların serbest basınç dayanımlarının, bu yöntemde kullanılan parametreler ve iyileştirme öncesi zemin durumuyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi yöntemleri kullanılarak jet grout kolonların serbest basıncının tespitinde bu analizlerin başarısı incelenmiş ve her iki yöntemde de belirlilik (determinasyon) katsayısı yaklaşık 0,91 hesaplanmıştır. Sonuçlar, tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

Analizlerde girdi parametresi olarak; enjeksiyon basıncı, zemin standart penetrasyon sayısı, çekme hızı, nozul çapı ve ince dane oranı kullanılmıştır. Çıktı olarak ise jet grout kolonun serbest basınç dayanımları elde edilmiş ve gerçekte ölçülen basınç dayanım değerleri ile kıyaslanmıştır.

Yapılan çoklu regresyon analizinde kullanılan parametreler arasında, çekme hızının en etkili ve standart penetrasyon sayısının en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir.

Jet grout kolonun serbest basınç dayanımının; standart penetrasyon sayısı ve nozul çapının artması ile arttığı, çekme hızı ve ince dane oranının artmasıyla azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Jet grout, bulanık mantık, çoklu regresyon analizi, zemin iyileştirmesi.

2013, 101 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE CONTRIBUTION OF JET GROUTING TO SOIL IMPROVEMENT AND THE EFFECTS OF THE PARAMETERS USED IN THIS METHOD

Recep AKAN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. S. Nilay KESKİN

In this thesis study, the relation between unconfined compressive strengths of jet grout columns which is generated with jet grouting method, parameters which are used in this method and soil properties before improvement were examined.

Success of analyses were examined in determining unconfined compressive strengths of jet grout columns using fuzzy logic and multiple regression analysis methods and determination coefficient was calculated about 0.91 in both methods. Results are presented by tables and graphs.

As entry parameter in analyses; injection pressure, standard penetration number, lifting speed, nozzle diameter and fine grain ratio were used. Jet grout column's unconfined compressive strengths was obtained as output and they were compared with actual measured values.

Among parameters which are used in multiple regression analysis, the most efficient parametre is lifting speed, the least efficient parameter is standard penetration number were determined.

Jet grout column's unconfined compressive strengths increase by increasing standard penetration number and nozzle diameter, and decrease by increasing fine grain ratio and lifting speed were examined.

Keywords: Jet grouting, fuzzy logic, multiple regression analysis, soil improvement.

2013, 101 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. S. Nilay KESKİN' e teşekkürlerimi sunarım. Literatür araştırmalarım ve tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. M. Erol KESKİN' e, Yrd. Doç. Dr. Soner UZUNDURUKAN' a, veri analizleri konusunda yardım ve emeklerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Emine Dilek TAYLAN' a ve Yrd. Doç. Dr. Kemal SAPLIOĞLU' na teşekkür ederim.

Tezimin veri temini aşamasında desteklerini esirgemeyen Prof. Turan DURGUNOĞLU'na ve ZETAŞ A.Ş' de proje mühendisi olarak görev yapan Önder AKÇAKAL' a şükranlarımı sunarım.

ÖYP05278-YL-12 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü' ne teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan; özellikle çok sevdiğim eşim Emel AKAN'a olmak üzere anneme, babama, enişteme, ablama ve biricik yeğenlerim Taha Enver ANGÜN ve Sare Nesibe ANGÜN' e sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Recep AKAN
ISPARTA, 2013

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Delme başlığı (monitör) ve jet enjeksiyon çıkış delikleri (nozul).....	5
Şekil 2. 2. Jet grout metodunun imalat aşamaları: (A) delme, (B) püskürtme, (C) kolon şeklinin oluşması ve (D) tamamlanma	6
Şekil 2. 3. Monitör ve nozuldaki basınçlı su çıkışı.....	6
Şekil 2. 4. Jet grout sistemi şematik gösterimi.....	8
Şekil 2. 5. Jet grout çimento silosu, pompa ve santral üniteleri.....	8
Şekil 2.6. Jet grouting imalatında kullanılan delici makine.....	10
Şekil 2. 7. Jet grout enjeksiyon pompası	10
Şekil 2. 8. Su ve çimento şerbetinin hazırlandığı mikser.....	11
Şekil 2. 9. Jet 1 tekniği.....	16
Şekil 2. 10. Jet 2 tekniği.....	17
Şekil 2. 11. Jet 3 tekniği.....	17
Şekil 2. 12. Süper jet tekniği	18
Şekil 2. 13. Zemin cinslerine göre enjeksiyon uygulama aralığı.....	19
Şekil 2. 14. Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi	22
Şekil 2. 15. Süper jet kolon numunelerine ait 3, 7, 14, 28 günlük basınç dayanımları	25
Şekil 2. 16. Jet kolonların mukavemet aralıkları	27
Şekil 2. 17. Fethiye’de kumlu silt bir formasyonda yapılmış jet grout deneme kolonları	32
Şekil 2. 18. Samsun’da siltli kum bir formasyonda yapılmış deneme kolonları.....	32
Şekil 2. 19. Jet grout kolonundan alınan karot numune	34
Şekil 2. 20. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlara ait serbest basınç mukavemeti değerleri.....	34
Şekil 2. 21. Deney kazığına yükün ankraj kazıklarından reaksiyon olarak uygulanması.....	36
Şekil 2. 22. Tekil kazık yükleme deneyi.....	36
Şekil 2. 23. Deney kazığına yükün ağırlık kutusu veya platformdan reaksiyon olarak uygulanması	37
Şekil 2. 24. Statik (sabit) ağırlık kullanılarak yapılan tekil kazık yükleme deneyi	37
Şekil 2. 25. Süreklilik deneyi bilgisayar yazılımı grafik verisi	39
Şekil 2. 26. Jet grout kolonuna yapılan süreklilik testi anı	39
Şekil 2. 27. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi.....	45
Şekil 2. 28. İslah öncesi ve ıslah sonrası inklinometre ölçümleri	52
Şekil 2. 29. Önerilen hesap algoritması	65
Şekil 3. 1. Klasik sistem.....	70
Şekil 3. 2. Bulanık mantığın temel elemanları	71
Şekil 3. 3. Bitişik dikdörtgen gösterim.....	73
Şekil 3. 4. Örtüşmeli üçgen gösterimi.....	73
Şekil 3. 5. İki bulanık kümenin (a) birleşimi, (b) kesişimi.....	74
Şekil 3. 6. En büyük üyelik derecesi durulaştırması.....	75
Şekil 3. 7. Sentroid yöntemi durulaştırması.....	75
Şekil 3. 8. Örnek bulanık küme	76
Şekil 3. 9. Ortalama en büyük üyelik durulaştırması	76
Şekil 3. 10. En büyük alan merkezi ile durulaştırma	77
Şekil 3. 11. “Ve” bağlaçlı kuralın kullanıldığı model uygulaması	79

Şekil 3. 12. “Veya” bağlaçlı kuralın kullanıldığı model uygulaması	79
Şekil 3. 13. En küçük kareler yüzeyi	81
Şekil 4. 1. Jet grout kolonun serbest basınç dayanımının tahmin modelinin genel yapısı	84
Şekil 4. 2. Birinci etki değerini veren model 1’ in genel yapısı.....	85
Şekil 4. 3. Model 1’ de standart penetrasyon sayısının bulanık mantık üyelik fonksiyonu	85
Şekil 4. 4. Model 1’ de nozul çapının bulanık mantık üyelik fonksiyonu	85
Şekil 4. 5. Model 1’ de birinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu.....	85
Şekil 4. 6. İkinci etki değerini veren model 2’nin genel yapısı	86
Şekil 4. 7. Model 2’ de enjeksiyon basıncının bulanık mantık üyelik fonksiyonu	86
Şekil 4. 8. Model 2’ de çekme hızının bulanık mantık üyelik fonksiyonu	86
Şekil 4. 9. Model 2’ de ince dane oranının bulanık mantık üyelik fonksiyonu.....	86
Şekil 4. 10. Model 2’ de ikinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu	87
Şekil 4. 11. Serbest basınç mukavemetinin veren sonuç modelinin genel yapısı	87
Şekil 4. 12. Sonuç modelinde birinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu.	87
Şekil 4. 13. Sonuç modelinde ikinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu...	87
Şekil 4. 14. Sonuç modelinde serbest basınç dayanımının bulanık mantık üyelik fonksiyonu.....	88
Şekil 4. 15. Bulanık mantık ile elde edilen sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	89
Şekil 4. 16. Çoklu regresyon analizi ile elde edilen sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1. Jet grouting yöntemi imalat parametreleri.....	21
Çizelge 2. 2. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlarında kullanılan çimento miktarları	35
Çizelge 2. 3. İyileştirme durum kriteri.....	50
Çizelge 4. 1. Ölçülen ve bulanık mantık ile hesaplanan serbest basınç dayanımları.....	88
Çizelge 4. 2. Ölçülen ve çoklu regresyon analizi ile hesaplanan serbest basınç dayanımları.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_{uç}$	Kolon uç alanı
A_{yanal}	Kolonu zemin içerisinde kalan yüzey alanı
c_u	D_f boyunca ortalama adhezyon
c_1	Kazık ucundaki drenajsız kayma mukavemeti
c_2	Kazık çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti
CPT	Konik penetrasyon deneyi
D_{50}	Ortalama dane çapı
D_f	Temel derinliği
E_{jet}	Jet grout kolonlarının elastisite modülü
E	Püskürtme enerjisi
f	Frekans
f_s	Kolonun birim alanına etkiyen ortalama sürtünme gerilmesi
FS	Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü
K	Yatay toprak basıncı katsayısı
K_0	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
LL	Likit limit
N_q	Taşıma gücü faktörü
$(N_1)_{60}$	Düzeltilmiş SPT penetrasyon değeri
P	Kazığın birim çevre alanı
p_h	D_f boyunca ortalama yatay basınç
p_v	D_f boyunca ortalama düşey basınç
SPT – N	Standart penetrasyon sayısı
q_d	Kolon ucundaki birim taşıma gücü
Q_d	Kolon taşıma gücü
$Q_{uç}$	Kolon ucunun maksimum taşıyabileceği yük
$Q_{çevre}$	Kolon çevresinin sürtünme ve adhezyon ile taşıyabileceği yük
V_s	Kayma dalgası hızı
w	Su muhtevası
w_n	Doğal su muhtevası
W_k	Kolon ağırlığı
z	Derinlik
σ_{v0}	Düşey toprak basıncı
σ'_{v0}	Düşey efektif toprak basıncı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
δ	Kolon - zemin arasındaki sürtünme açısı
ϕ	İçsel sürtünme açısı

1. GİRİŞ

Yeni bir yapının inşası veya mevcut bir yapının güçlendirilmesinde problemlili bir zeminle karşı karşıya kalındığında için öncelikle yapının üstünde yer aldığı temel zemininin kuvvetlendirilmesi ve ıslahı gerekir. Proje öncesi yapılan zemin etütleri, yapının kendine ait ve diğer ekstra yüklerin taşınmasını mümkün kılmıyorsa, yapının taşınması ya derin temellerle ya da fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş bir zeminle, bazı durumlarda ise her ikisi ile birlikte sağlanabilmektedir.

Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için, teknoloji ilerledikçe yeni yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan en güncel olanı ve günden güne de yaygınlaşmaya devam eden, jet grouting yöntemidir. Bu yöntem diğer zemin iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik olması ve inşaat süresinin daha kısa olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Jet grouting yöntemi ilk olarak 70'li yılların başında Japonya'da denenmiş ve başarılı olmuştur. Yine 70'li yılların sonunda İtalya'da ve diğer Avrupa ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizdeki ilk uygulaması 1986 yılında Haliç Kollektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında yapılmıştır.

Bu yöntemde amaç, zeminin mekanik mukavemet değerlerini arttırmaktır. Dolayısıyla zeminin taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artar, geçirgenliği azalır. Jet grouting yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi değişik karakterdeki çok geniş ve farklı türdeki zeminlerin ıslahı mümkün olmaktadır.

İstenilen çap ve boyda ve istenilen mukavemette kolonlar imal edilebilir. Böylece bu yöntemle diğer klasik enjeksiyon sistemlerine göre farklı olarak uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi, geçirgenlik gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla işin başında maliyetin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak jet grouting yöntemi detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bölüm 3' te yöntemin kullanıldığı yerler, yapım aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve gerekli parametreler incelenmiştir.

Bölüm 4' te, bu yöntem ile elde edilen jet grout kolonların serbest basınç dayanımlarının bazı jet grouting parametreleri ve zemin parametreleri ile olan ilişkisi incelenmiştir. Bunun için bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi yöntemleriyle, bilinen girdi parametreleri ile oluşacak kolonun serbest basınç dayanımı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Analizler sonucunda parametreler ve serbest basınç dayanımı arasında anlamlı ilişkiler olduğu, bu analizler ile tahminin mümkün olabileceği görülmüştür.

Ayrıca yöntemde kullanılan parametreler ve zemin özelliklerinin, oluşacak kolonun serbest basınç mukavemetine etkileri araştırılmıştır. Analiz sonuçları ile gerçekte ölçülen serbest basınç dayanımı değerleri arasında çeşitli hata hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Jet Grouting Yöntemi ve Bu Yönteme Ait Tanımlar

İnşaat projeleri gerekli durumlarda zayıf zeminlerin bulunduğu alanlara yapılmak zorunda kalabilmektedir ve rağbet gören, değeri yüksek arsalarda yapılacak yapılarda ya da zemin durumunun zamanla değişmesi sonucu problemlerin meydana geldiği yapılarda çeşitli problemler meydana gelebilmektedir. Bazı inşaat projelerinin uygulanacakları alan zemin özellikleri açısından uygun olmasa dahi bazı durumlarda projelerin bu alanlara uygulanması gerekebilmektedir. Bu gibi durumlarda çözüm olarak zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Zemin iyileştirmesi, esas olarak zeminin mekanik mukavemet değerlerinin arttırılmasını dolayısıyla taşıma kapasitesi ve elastisite modülünün artırılmasını, geçirgenliğin azaltılmasını hedefler. Jet grouting yöntemi bu amaca ulaşılmasında en iyi enjeksiyon metotlarından biridir. Bu yöntem, zeminlerin iyileştirilmesi veya yapı yüklerinin daha derinlerde bulunan sağlam zemin tabakalarına aktarılması amacı ile kullanılmaktadır. En çok tercih edilme sebeplerinden biri, neredeyse her tür zeminde uygulanabilir bir yöntem olmasıdır. Yöntem aynı zamanda hassas yapıların bulunduğu çevrelerde de güvenle uygulanabilmektedir (Schaefer, 1997).

İyileştirilmiş zeminde oluşan yapının bir diğer ifadesi de “soilcrete” olup, daha iyi mühendislik karakteristiğine sahip zemin yapıları elde etmek için özellikle de zeminlerin takviyesinin ve stabilizasyonlarının sağlanması, zeminlerin geçirgenliğinin azaltılması ve kazıların desteklenmesi için jet grouting yöntemine sıkça başvurulmaktadır. Bu teknik, yüksek enerjili grout jetinin zemini parçalaması ile gerçekleştirilir. Bu sayede jet grout kolonu olarak tabir edilen zemin-çimento karışımı kolonun gerilme, dayanıklılık ve geçirgenlik bakımından zeminin iyileştirmeden önceki durumuna kıyasla daha iyi duruma gelmesi sağlanmaktadır. Jet grouting sürecinde zemin yapısında çeşitli değişimler meydana gelebileceğinden bu sürecin yerel zemin durumlarına ve

yakın çevredeki yapılara etkisi hususunda farklı yer değiştirmeler, toplam gerilmeler ve boşluk suyu basıncı göz önünde bulundurulmalıdır.

Welsh, Rubright ve Coomber çalışmalarında yaptıkları genel tanımlamada jet grouting yöntemini “yüksek basınçlı su jetleri ile kesilmiş zeminin yerine, kontrollü ve eşzamanlı olarak çimento enjeksiyonu verilmesidir” şeklinde ifade etmişlerdir (Welsh vd., 1986).

Jet grouting yönteminde yapılan jet enjeksiyonu sonucu zeminden ayrılan parçacıkların bentonit bulamacı ile birlikte gövde ile delik çeperi arasından yukarı çıkabilmesinin sağlanması için kesici ucun, gövdeden daha kalın olması gerektiği dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bu sayede, oluşan artık malzeme gövde ile delik çeperi arasında oluşan boşluktan yüzeye taşınabilmektedir ve bu artık maddenin dışarı atılması enjeksiyonun zemine penetrasyonunun verimli şekilde sürdürülebilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca kopan zemin parçacıklarının çukurdan uzaklaştırılarak yukarı taşınması, zeminin basınçlı akışkanla aşındırılması esnasında basınçların kontrol altında tutulabilmesine ve dolayısıyla hidrolik enerjinin boşa harcanmasının önlenmesine kolaylık sağlamaktır.

Jet grouting yönteminde kullanılan bazı terimler aşağıda tanımlanmıştır:

- Enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan string
- Enjeksiyon ve delme takımının taşınmasına ve takımın hareketini sağlamaya yarayan rig
- Enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan aparattaki basıncı yüksek olan akımı, çok yüksek hızlı jet haline getirebilmek için tasarlanmış bir çıkış olan nozul (Şekil 2.1)

- Jet grouting enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan aparatın sonuna yerleştirilmiş, delgi ucunu ve nozulu içinde barındıran bir başlık olan monitör (Şekil 2.1) olarak sıralayabiliriz.



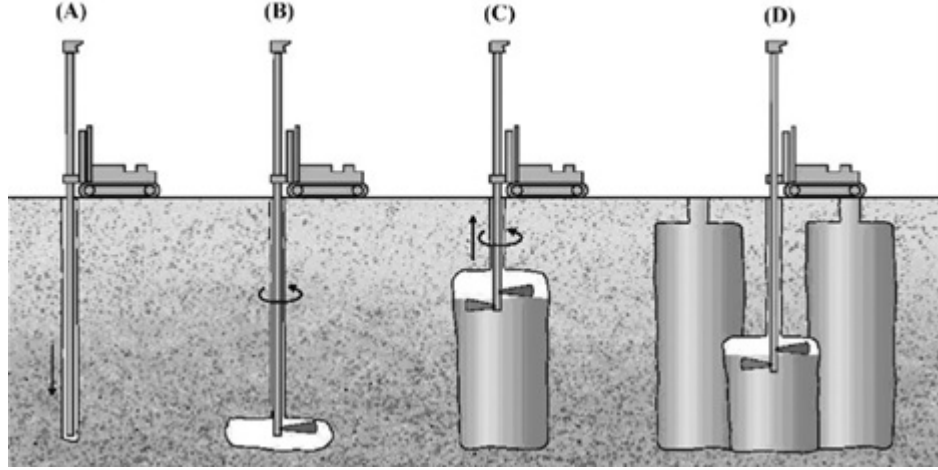
Şekil 2. 1. Delme başlığı (monitör) ve jet enjeksiyon çıkış delikleri (nozül) (Sarı, 2008)

İstenen çapın hassaslığının sağlanabilmesi ve jetin etkinliğinin azalmaması için jet akışkanın dağılmadan mümkün olduğunca uzun mesafeye ilerleyebilmesi gerekmektedir ve jet enjeksiyon çıkışları olan nozullar bunun sağlanabilmesi için tasarlanmışlardır.

Jet grout ile iyileştirme yöntemi Türkiye’de “TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon” esas alınarak delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Uygulamada öncelikle enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan ve monitör, taşıyıcı takım vasıtası ile istenen derinliğe kadar indirilir ve daha sonra su-çimento enjeksiyonu yüksek basınç ile püskürtüldüğü esnada kendi etraflarında döndürülerek yukarı çekilir. Yüksek basınçlı akışkan ile parçalanan zemin çimento hamuru ile kısmen karışır ve “spoil” olarak isimlendirilen artık enjeksiyon da enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan aparat boyunca yüzeye iletilir. Böylece zeminde kalan karışım zamanla sertleşerek jet grout kolonunu meydana getirmiş olur. Jet enjeksiyonla

iyileştirilmiş bir yapı meydana getirilmesi açısından bu yöntemle yan yana çoklu kolonlar oluşturulması önerilmiştir (Stoel, 2001).

Bu imalat aşamaları Şekil 2.2 'de ve Şekil 2.3' te gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Jet grout metodunun imalat aşamaları: (A) delme, (B) püskürtme, (C) kolon şeklinin oluşması ve (D) tamamlanma (Nikhbaktan ve Osanloo, 2009)



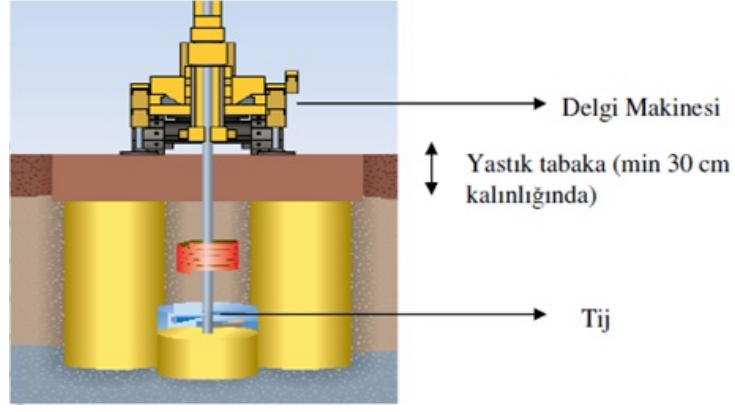
Şekil 2. 3. Monitör ve nozuldan basınçlı su çıkışı (Sarı, 2008)

Tüm jet grout kolonlar, uygulanmaları gereken konumlarından en fazla 75 mm mesafe içinde imal edilmeleri gerekmektedir. Bu yüzden jet grout kolonların imal edileceği noktalar uzman ölçüm ekibi tarafından zemine özenle ve tek tek işaretlenirler. Ayrıca jet grout kolon deliğinin oluşturulması esnasında, delgi ucunun mümkün olduğunca düşey bir konumda olması ve düşeyden 1/50'den daha fazla sapma meydana gelmemesi sağlanmalıdır.

Jet grout yönteminde “ön jet grouting” olarak adlandırılan ek bir metot da mevcuttur ve bu metot su ve benzeri akışkan jetinden ibaret bir ön parçalanma safhasıdır. Ön jet grouting işlemi yaygın olarak ön yıkama ve ön kesme olarak da bilinir. Bir elemanın jet enjeksiyonundan önce bu metot da ek olarak kullanılarak uygulamanın verimliliği artırılabilir.

Yöntemin en çok kullanıldığı alanlar; tünel kazısı öncesi zemin ıslahı ve tünel duvar takviyeleri, derin temeller, yeni temellerin takviyesi, eski temellerin güçlendirilmesi, iksa duvarları, zemin suyuna geçirimsiz perdelerin oluşturulması, şev stabilizasyonu, dip tapaları, zemin ankrajları, sığ şev kazılarının desteklenmesi, kazı tabanından su gelmesinin önlenmesi, zemin iyileştirilmesi, yapı yüklerinin daha derinde bulunan sağlam tabakalara aktarılması olarak sıralanabilir (Lunardi, 1977).

Şekil 2.4' te kolon ile temel alt kotu arasında minimum 30 cm, maksimum 60 cm kalınlığında yastık tabakası görevi görecektir stabilize dolgu malzemesinin serilerek zeminde oluşturulan jet grout kolonlarında başlıkların temel altında kırılmasını önlemesine ait jet grout sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Jet grout sistemi şematik gösterimi (Bakım, 2007)

Jet grout imalatında, bu yöntem için uyarlanmış bir delgi makinesi, basınçlı püskürtme sağlayan enjeksiyon pompası, su deposu, çimento silosu, enjeksiyon işlemi için dinlendirici kazan ve mikserlerin bulunduğu bir sistem tertiplenir. Bu sistem Şekil 2.5' te gösterilmiştir.



Şekil 2. 5. Jet grout çimento silosu, pompa ve santral üniteleri (Bakım, 2007)

Jet grouting kolonları, mevcut zeminlerin genellikle çimento şerbeti olmakla birlikte çeşitli katkı maddeleriyle yerinde karıştırılarak oluşturulan kolonlardır ancak İskandinav ülkelerindeki hassas ve çok yumuşak olan killerde özellikle İsveç' te kireç veya çeşitli oranlarda kireç-çimento karışımı kullanılmaktadır (Durgunoglu, 2004).

Deepmix yönteminde çimento ve zeminin mekanik karıştırıcılar ile karıştırılması, jet grouting yönteminde ise bu işlemin zeminin özel delgi makinası ile delindikten sonra çimento şerbetinin 400-500 bar basınçta enjeksiyonu ile gerçekleştirilerek kolonlar oluşturulması jet grouting yöntemi ile deepmix yöntemi arasındaki farktır (Durgunoglu, 2004).

Jet grouting geleneksel enjeksiyon sistemlerine, mini kazıklara, sıkıştırılmış hava kullanım yöntemlerine ve temel takviye sistemleri gibi yöntemlere alternatif olarak sunulabilecek bir iyileştirme yöntemidir. Jet grouting yöntemleri, hem en güvenli yöntemlerden biri olup hem de zamandan tasarruf sağlayan, diğer iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik çözümler sunabilen ve genellikle mevcut tesislerin çalışmalarını engellemeden yürütülebilen yöntemlerdir.

Jet grouting yöntemi, ülkemizde kullanılmaya başlanması 1980' li yılların son dönemlerini bulmuştur ve özellikle 2000' li yıllar ile temel mühendisliği uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir.

2.2. Jet Grouting Ekipmanı

Tüm jet grout ekipmanının, enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan aparatı tasarlanan hızda rotasyonel yer değiştirmesini sağlaması, karışım ünitesinden gelen enjeksiyon malzemesini de bu aparata istenen basınçta ve akış oranında ulaştırması gerekir (Stoel, 2001). Bu yöntemin ekipmanları bu amaçlarla tasarlanmışlardır.

2.2.1. Delgi makinesi

Delgi makinesi, bir kılavuz içerisinde düşey olarak hareket edebilen, 100 mm çapında delik açabilen ve yanlarında tijlere bağlı 2,2 mm çapında 2 adet nozul bulunan matkap ile delme işlemini gerçekleştirebilmektedir. Jet grout imalatında kullanılan bir delgi makinesine ait resim aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Jet grouting imalatında kullanılan delici makine (Püsküllüoğlu, 2010)

2.2.2. Pompa ünitesi

Jet grout enjeksiyon karışımına istenen çapta jet grout kolonu teşkil edebilmek için gerekli basıncı verebilecek pompadan oluşacak ünedir. Şekil 2.7’ de görülen pompa yardımıyla zemine grout enjeksiyonu işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. 7. Jet grout enjeksiyon pompası (Bakım, 2007)

2.2.3. Mikser ünitesi

Jet grout enjeksiyon karışımının elektronik olarak tartılarak istenen oranda karıştırılmasını sağlayacak mikser ve dinlendiriciden oluşan ve jet grout pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede olması gereken ünedir. Karıştırıcılardan biri 400 lt kapasiteli çimento su karışımını gerçekleştirirken diğeri yaklaşık 1000 lt kapasiteli olup, hazırlanan çimento-su karışımına katkı gereci alarak karıştırmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2. 8. Su ve çimento şerbetinin hazırlandığı mikser (Püsküllüoğlu, 2010)

2.2.4. Çimento silosu

Çimento silosu ve konveyörü, jet grout mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyebilecek dökme çimento depolayabilen bir ünedir.

2.2.5. Su tankı

Jet grout ünitesinde 15-25 ton kapasiteli sağlam su tankı-havuzu ve su pompası olmalıdır.

2.2.6. Diğer ekipmanlar

Kaynak makinesi, 8-12 bar basınçlı kompresör ve elektrik kesintilerinin olması halinde kullanılacak 50KVA'lık bir jeneratör bulundurulmalıdır.

2.3. Jet Grouting Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Jet grouting yönteminin avantajları aşağıda belirtilmiştir (Juran vd., 1988; Kauschinger vd., 1992; Okay, 1987):

- Bazı istisnalar hariç tüm zemin tiplerinde uygulanabilir.
- Diğer inşaat yöntemlerine kıyasla daha küçük ve hafif ekipmana sahiptir.
- Kullanılan jet akımın aşındırması sayesinde, klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha ekonomik ve verimli çözümler üretebilmektedir.
- Küçük boyutlu makineler kullanmak suretiyle bina bodrum katı ve dar alanlarda da enjeksiyon gerçekleştirilebilmektedir.
- Yöntemin uygulanması esnasında titreşim, gürültü ve kirlilik meydana gelmez. Kimyasal kullanılmadığından çevreye zarar vermez, titreşim meydana getirmediğinden mevcut yapıların yakınlarında uygulanabilir.
- Mevcut temel takviyesi esnasında, yapıda deformasyon çok az olur veya hiç olmaz.
- Uygulanacak yöntemin geometrisi ve boyutları daha önceden belli olduğundan malzeme miktarları ve maliyet önceden yaklaşık olarak belirlenebilir.

- Bu yöntem ile, yalnızca 13 cm' lik bir enjeksiyon deliğinden başlayarak genişleyen, 3 m²' lik (uygun parametre ve zemin koşulları ile 7-8 m²'ye kadar) temel zemininin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.
- İstenilen derinlikten başlanıp, zemin yüzeyi altında istenilen derinlikte bitirilebilir. Dolayısıyla, taban kabarmasının önlenmesinde veya tünel yapımında geçirimsizliğin zemin yüzünden sağlanmasında ekonomik çözüm sunmaktadır.
- İstenilen mukavemette ve permeabilitede tasarım yapma konusunda klasik enjeksiyon yöntemlerine göre kontrolü daha kolaydır.
- Yöntemde enjeksiyon malzemesi olarak çok basit çimento karışımları kullanılmaktadır.
- Monitör ve püskürtme ağızlarının serbest tasarlanmış olması, yapılan uygulamanın amacına uygun olarak farklı geometride elemanlar imal edilebilmesini sağlamaktadır. Yöntem ile düşey duvarlar yapılabildiği gibi yatay, eğimli ve dik duvarlar da yapılabilmesi mümkündür.
- Arazi şartlarına bağlı olmakla birlikte inşaat süresi %30 ile %60 civarında kısalmaktadır.
- Jet grouting yöntemi ile ıslah edilen hacim, bitişindeki işlem görmemiş zeminin özelliklerini de iyileştirmektedir. Jet grouting yönteminin bu etkisi sayesinde, ıslah edilmemiş zeminin SPT değerleri doğal zemininkine göre %20 - 25 civarında yükselmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

Bu avantajlarının yanında yöntemin bazı zayıf noktaları ve dezavantajları da mevcuttur. Bunlar aşağıda belirtilmiştir (Juran vd., 1988; Kauschinger vd., 1992; Okyay, 1987):

- Geçilen zemin özelliklerine bağlı olarak oluşan kolon için elde edilen çap ve mukavemet değişmektedir ve zemin içinde enjeksiyonun oluşturduğu geometriyi ve dağılışı bilmek zordur. Kolon boyunca geometri ve mukavemetin aynı olmaması sıkıntı doğurabileceğinden iyileştirmeye yatkınlığı az olan zeminler geçilirken dikkatli olunmalı ve bu değişim mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.
- Yöntem henüz gelişme aşamasında olduğundan ekipmanlarla ilgili sorunların çözümü zaman kaybına neden olabilir.
- Çift ve üç akışkanlı sistem için daha kompleks parçalar gerekli olacağından bunların sıklıkla yenilenmesinin gerekli olması durumunda maliyet olumsuz etkilenebilir.
- Tasarımda kullanılacak kurallar kesin olmamakla birlikte , eski tecrübe ve literatürden yararlanılarak tasarım aşamasında anlık müdahalelerle üretim gerçekleştirilmektedir.
- Çok yüksek basınç zeminin çatlamasına veya kırılmasına neden olması halinde taşıma gücünde azalma veya çevre yapılarda oturmalar meydana gelebilir.

Bu tarz olumsuzluklardan kaçınmak veya aza indirmek için jet grouting yönteminin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Okyay, 1987):

- Tasarım aşamasında ve imalat sırasında özenli ve dikkatli gözlem ve testler yapılmalı, işin kontrol ve idaresinin bu konuda tecrübe ve bilgi sahibi mühendislerce yapılması gerekmektedir.

- Yüksek basınçta enjeksiyon sırasında enjeksiyon borularının patlamasına neden olabilecek püskürtme ağzı tıkanmalarını önlemek için gerekli tedbirler alınmalıdır.
- Zeminde istenmeyen kabarma, çatlama ve kırılmaların önüne geçmek için enjeksiyon sırasında uygulanan basıncın kontrollü olarak ortadan kaldırılabilmesi sağlanmalıdır.
- Periyodik bakımların mutlak surette yapılması, temizliklerinin sağlanması ve yedek parça sarfiyatının önüne geçilmesi gerekmektedir.

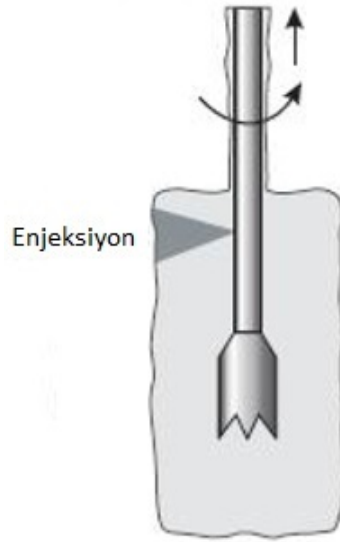
2. 4. Jet Grouting Teknikleri

Jet grouting teknikleri iyileştirilecek zeminin koşullarına ve elde edilmesi istenen jet grout kolon özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Kullanım şekli ve amaçlarına göre Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve Süper Jet yöntemleri olmak üzere dört çeşit jet grouting tekniği mevcuttur.

2.4.1. Jet 1

İlk olarak 70'li yılların başında Japonya'da, 70'lerin ortalarında ise İtalya'da denenmiş, en basit ve yaygın kullanılan tekniktir. Zemini parçalama ve çimentolama işleminin genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın yüksek enerji jetine dönüştürülerek uygulandığı jet enjeksiyon işlemidir. Bu metotta delme - enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan ibaret olup, grout bu borudan yaklaşık 200m/sn hızla, 300 - 600kg/cm² (bar) basınçla püskürtülür.

Bu metotla oluşturulan kolonlar, zemin türlerine ve parametre aralıklarına göre değişmekle birlikte çakıllı zeminlerde 0,6m' den 1,2m çapa kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntemin kohezyonlu zeminlerdeki etkinliği çakıllı zeminlerdeki kadar değildir. Şekil 2.9' da Jet 1 yöntemi şeması gösterilmiştir.



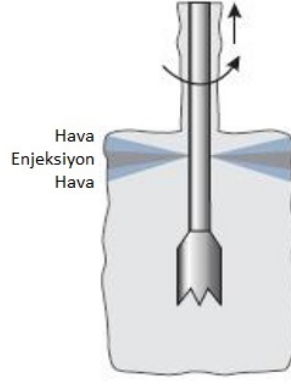
Şekil 2. 9. Jet 1 tekniği (Stark ve diğ., 2009)

2.4.2. Jet 2

Zeminin parçalanması ve çimentolanması için yüksek enerjili bir sıvıyla (genellikle bir çimento şerbeti) birlikte ikinci bir akışkan olarak hava jetinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen jet enjeksiyon sistemidir. Grout orta borudan geçerken basınçlı hava 8 - 12bar basınç ile dış borudan geçer. Basınçlı havanın meydana gelen kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azaltmasıyla birlikte bu metotta oluşan kolon çapları jet1 'e oranla %60 - 80 daha büyük olmaktadır.

Bu yöntem kullanılarak elde edilen kolon çapları orta sıkı zeminlerde 1,0m' den, gevşek zeminlerde ise 1,8m' den büyük değerlere ulaşabilmektedir. Jet2 yönteminin kohezyonlu zeminlerde Jet1 yöntemine göre daha etkili sonuçlar verdiği söylenebilir. Jet2 yöntemine ait şematik gösterim Şekil 2.10' da sunulmuştur.

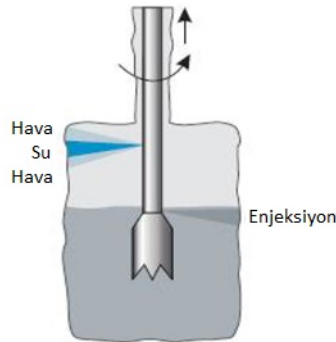
Kum zeminde gerçekleştirilen ikili akışkan sistemle jet grout kolonu imalatında zeminin örselenmesi için uygulanan basınç 45MPa, delgi borusunun dönme hızı 8 - 10devir/dk, harcanan çimento 930kg/m, harç debisi 130lt/dk, harcın birim hacim ağırlığı 16 - 17kN/m³ olduğu durumda elde edilen kolon çapı 1,4m' ye ulaşmıştır (Ichihashi vd., 1992).



Şekil 2. 10. Jet 2 tekniği (Stark ve diğ., 2009).

2.4.3. Jet 3

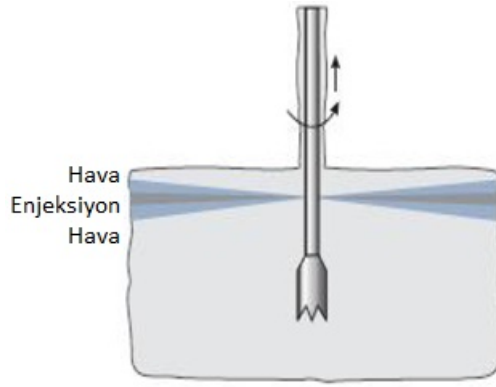
Zeminin parçalanmasının yüksek enerjili su jeti ile sağlandığı, aynı esnada çimentolanmasının da ayrı bir enjeksiyon karışımı jeti ile sağlandığı jet enjeksiyon işlemidir. Bu metotta iç içe üç borulu takım kullanılmakla birlikte 400 – 600 bar basınçlı su ortadaki borudan, 8 – 12 bar basınçlı hava ara borudan tıpkı jet 2' de olduğu gibi nozullardan püskürtülmektedir. 30 - 80 bar basınçlı grout ise su - hava karışımı içine en dış borudan ayrı bir nozzle ile enjekte edilmektedir. Bu metotla elde edilen jet grout kolonları 2m' den büyük çaplara ulaşabilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde en etkili yöntem Jet 3 yöntemidir. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.11' de verilmiştir.



Şekil 2. 11. Jet 3 tekniği (Stark ve diğ., 2009)

2.4.4. Süper jet

Süper jet yöntemi son dönemlerde büyük kolon çaplarını daha kısa sürede ve daha düşük maliyetlerle elde edebilmek için geliştirilen yöntemlerden biridir. Kolon yapım aşaması 15cm çapa sahip tijin istenilen noktaya indirilmesi ile başlamakta ve tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozullardan çimentolu harç ile hava karışımının yüksek basınçta püskürtülmesiyle devam eder. Özel durumlarda, su yerine diğer uygun sıvılar veya süspansiyonlar kullanılabilir. Zeminin parçalanmasıyla zemin - çimento karışımı kolonlar oluşur. Bu metot ile elde edilen kolon çapları 3 – 5 m' ye kadar ulaşabilir. Sisteme ait şematik gösterim aşağıda verilmiştir (Şekil 2.12).



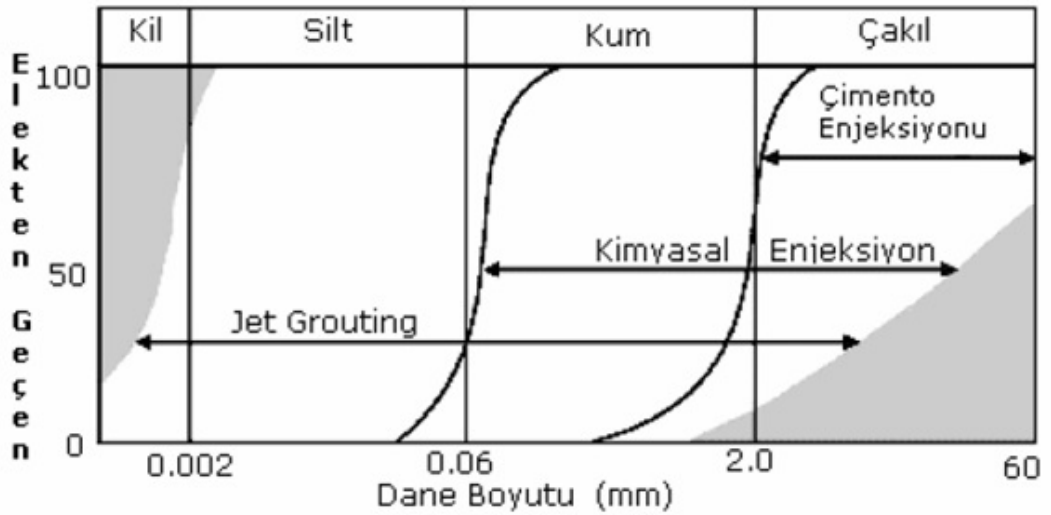
Şekil 2. 12. Süper jet tekniği (Küsin, 2009)

Bu yöntemde kullanılan tij dönme ve çekme hızları diğer jet grouting yöntemlerine kıyasla çok daha düşüktür. Bell vd. (2003) yaptıkları çalışmada süper jet kolonları imalatında işletim parametreleri olarak 3 – 4 devir / dakika dönüş hızı, 7mm/dakika çekme hızı, 40MPa enjeksiyon basıncı kullanılarak 4m çapa ulaşılabilildiğini göstermişlerdir. Süper jet yöntemiyle oluşturulan kolonlarda kolon kesitlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu yöntemle oluşturulan kolonların kesitlerinin büyüdüğü görülmekte ve bu yöntem yatay zemin suyu kontrolünde, sıvılaşabilir tabaka stabilizasyonunda, geçirimsiz perde duvar imalatında, kazı yan yüzlerinin desteklenmesinde kullanılmaktadır.

2.5. Jet Grout Yönteminde Kullanılan Parametreler ve Jet Grout Kolonların Mukavemet Özellikleri

2.5.1. Jet grouting yönteminin çalışma parametreleri

Jet grouting yöntemi diğer iyileştirme yöntemine kıyasla daha geniş bir zemin tipi aralığında kullanılabilmektedir (Şekil 2.13). Aşındırma esasına dayalı bir iyileştirme yöntemi olduğundan zeminin aşınabilirliğinin oluşacak kolon geometrisi ve kalitesinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 2. 13. Zemin cinslerine göre enjeksiyon uygulama aralığı (Püsküllüoğlu, 2010)

Değişik zemin tipleri farklı parçalanma karakteristiklerine sahiptirler. Kohezyonsuz zeminler, taneleri arasında nemden başka bir bağlayıcı bulundurmadıkları için göreceli olarak daha kolay parçalanırlar ve hatta türbülanslı bir ortama maruz kaldıklarında kendi kendilerine parçalanabilirler. Buna karşın yüksek derecede plastik killer sahip oldukları kohezyondan dolayı küçük parçalara zorla bölünürler ve delgi sırasında topaklanarak parçalar halinde koparlar. Bu durum sonucunda çoğunlukla delik ağzı tıkanarak geri dönmesi gereken artık gereçte kayıplar meydana gelir ve oluşturulacak jet grout kolonunun kalitesinin ve geometrisinin iyi kontrol edilememesine yol açabilir. Delicinin kaplanması, püskürtme ağızlarının farklı doğrultulara yönlendirilmesi,

birden çok püskürtme ağzı kullanılması ve hava kılıfı oluşturulması gibi uygulamalar ile kesilen zeminin dışarı alınması kolaylaştırılabilir (Fırat, 2001).

Yapılacak çalışmada kullanılacak parametreler mevcut zemin özelliklerine, istenen kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve kullanılacak jet grouting metoduna göre seçilir. Jet grout kolonunun imalatına başlanmadan önce her birinde farklı işletim parametreleri kullanılan test kolonları imal edilerek zemin yapısına en uygun, istenen kolon çapının elde edildiği, kolonda sürekliliğin sağlandığı ve ekonomik olan parametreler optimum parametreler olarak belirlenir. Yöntemde elde edilecek sonuca etki eden jet grout yönteminde kullanılan imalat parametreleri aşağıda verilmiştir.

- Enjeksiyon sistemi (Jet 1, Jet 2, Jet 3, Süper jet)
- Enjeksiyon basıncı (Bar)
- Nozzle sayısı ve çapı
- Tij dönme hızı (rpm)
- Tij çekme hızı (cm / dak)
- Su / çimento oranı
- Pompa kapasitesi (lt / dak)

Bu parametrelerin kullanılan jet sistemine göre tipik değerleri Çizelge 2.1' de verilmiştir. Meydana gelecek kolon çapı kullanılan sisteme, seçilen parametrelere ve zemin cinsine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çapı artırmak için enjeksiyon esnasında çimentonun yanı sıra hava ve su kullanılarak sistem daha etkin hale getirilebilir. Ülkemizde yaygın olarak Jet 1 ve Jet 2 sistemleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2. 1. Jet grouting yöntemi imalat parametreleri (Lunardi, 1977)

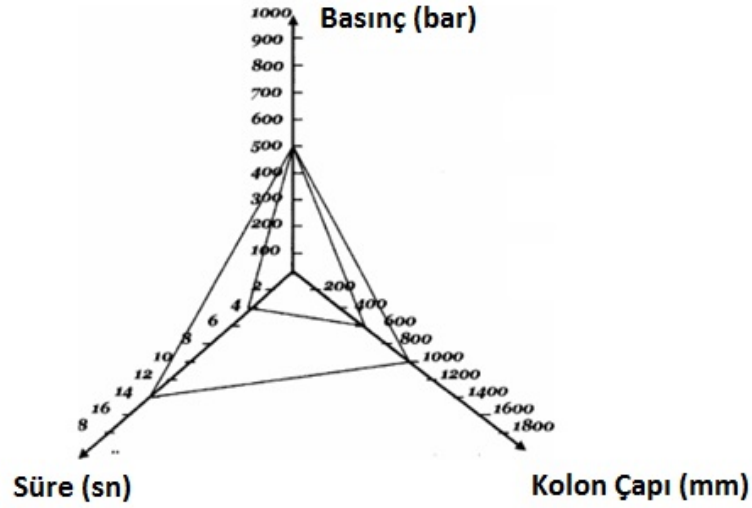
Sistem	Enjeksiyon Tipi	Basınç	Nozul Adeti ve Çapı	Çekme Hızı	Dönme Hızı	Su/Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi
		(bar)	(adet, mm)	(cm/dk)	(rpm)	-	(lt/dk)
Jet 1	Çimento	400-500	1-2 x 2-5	15-100	5-15	1,0 – 1,5	70-600
Jet 2	Çimento	400-550	1-2 x 2-5	10-30	4-8	1,0 – 1,5	70-600
	Hava	10-12	-	10-30	-	-	4000-10000
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

2.5.1.1. Enjeksiyon basıncı

Jet grout işlemi, kullanılan basınç değeri aralığına göre aşağıdaki gibi isimlendirilebilir.

- 200 - 250bar aralığında çalışma DÜŞÜK BASINÇLI
- 300 - 400bar aralığında çalışma ORTA BASINÇLI
- 400 - 700bar aralığında çalışma YÜKSEK BASINÇLI

Elde edilecek kolon çapı için en önemli parametre enjeksiyon basıncıdır. Kullanılan basınç değerinin artması ile kolon çapının da arttığına dair bağıntı Şekil 2.14' te gösterilmiştir.



Şekil 2. 14. Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi (Melegary ve Garassino, 1997)

Fakat ulaşılmak istenen çapta homojen bir kolon elde etmek sadece basınç değeri ile alakalı değildir. Aynı çapta ve homojenlikte bir kolonun oluşması zaman faktörü ile de ilişkili olduğundan bazı zemin şartlarında basıncı arttırmak çapın artmasını sağlayamayabilir.

2.5.1.2. Dönme ve çekme hızı

Dönme ve çekme, jet grout işlemi esnasında delgi ve enjeksiyonda kullanılan tijlerin kendi eksenini etrafında dönmelerini ve belli bir hızla dönme ile eş zamanlı olarak yukarı çekilmelerini ifade etmektedir. Bu hızların zemin ile bağlayıcı madde olan groutun homojen bir karışım oluşturması için belli hızdan yüksek hızla dönmemesi ve kolonun sürekliliğinin sağlanabilmesi için belli hız aralığının dışında yukarı çekilmemesi gerekmektedir.

Dönüş hızı ekseriyetle 10 – 20 devir / dak değerleri arasında değişmekte, bazı özel durumlarda ise 30devir/dak' ya kadar çıkabilmektedir. Takımın yukarı çekilmesi işlemi ise genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlı olarak seçilen kademeli çekme ve sürekli çekme yöntemlerinden biriyle gerçekleştirilir.

Bazı makinelerde her iki yöntemle çalışma özelliği mevcut olsa da bir kısım makinelerde sadece kademeli çekme özelliği mevcuttur. Kademeli çekmede, her kademedede 4cm ilerleme ve akabinde 6 – 10 sn. bekleme en iyi neticeyi sağlamıştır (Melegary ve Garassino, 1997).

Çekme hızı belirlenirken, zeminin özellikleri ve birim hacime enjekte edilen grout miktarı göz önünde bulundurulur. Örneğin bağ yapısı kuvvetli olan kohezyonlu zeminlerin jet akışkan tarafından yapısının bozulabilmesi ve bu zeminlerde homojen karışımın oluşabilmesi için genellikle daha uzun zaman gerektiğinden çekme hızı düşük olmalıdır.

Dönme ve çekme hızı optimizasyonu ıslah edilecek zeminin özellikleri ve iyileştirmede kullanılan jet grouting metodundan oldukça etkilenmektedir. Nitekim Jet2 ve Jet3 metotlarında daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla daha büyük hacmin ıslahı gerektiği için daha uzun süreye ihtiyaç duyulmaktadır.

2.5.1.3. Dozaj

Jet grout karışımının su - çimento oranı standart olarak $s/\ç = 1$, özgül ağırlığı ise $1410 - 1570\text{kg/m}^3$ tür. Bu değerler seçilen ıslah yöntemi ve kolonlar içim istenen nihai dayanımlara göre değişebilirler. Örneğin; su geçirmez plastik grout perde oluşturmak için karışımdaki su/çimento oranının, bentonit kullanımı hali hariç, 0,7' nin altına inmesi uygun görülmez. Ayrıca jet grout karışımın içerisine bazı katkıları ilave etmek de mümkündür.

Çimento dozajı, karışımın içindeki çimentonun bir kısmının organik ortamda yer alan ve çimentonun bağlayıcılığını ortadan kaldıran asitlerin nötrleştirilmesinde kullanılmasından dolayı organik içerikli zeminlerde 450kg/m^3 ten 700kg/m^3 e çıkartılabilmektedir.

2.5.2. Jet grout yönteminde kullanılan parametreler ve jet grout kolonların mukavemet özellikleri üzerine yapılan çalışmalar

Tunçdemir (2004), zemin enjeksiyon tekniklerini enjeksiyon parametreleri, enjeksiyon malzemeleri ve zemin parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Farklı enjeksiyon tekniklerinde enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine işleyiş mekanizmalarının farklı olduğunu vurgulamış ve uygulanması gereken enjeksiyon tekniği ile tasarım parametrelerinin mevcut zemin koşullarına ve uygulama amacına göre seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu doğrultuda jet grout kolonların parametrelere ve zeminlere göre değişen davranışlarını belirleyebilmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır.

Bu konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalardan olan Baumann (1984), yedi farklı zemin tipinde uygulanan jet grout kolonlarından alınan numunelerde, farklı su - çimento oranına göre elde edilen serbest basınç değerlerine dayanarak kumlu ve çakıllı zeminlerde elde edilen basınç dayanımlarının killi, siltli ve organik zeminlere göre daha yüksek olduğunu ayrıca çimento miktarının artması ile çakıllı kumlu, kumlu siltli, siltli killi zeminlerde basınç dayanımının da arttığını gözlemlemiştir.

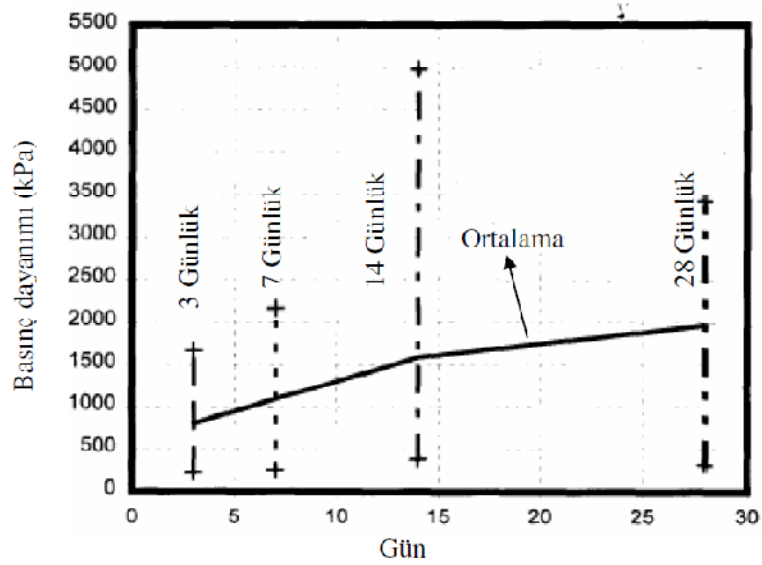
Sonraki yıllarda Van Der Stoel ve Van Ree (2000), farklı jet grout metodları ve farklı parametreler kullanılarak yumuşak tabakalı zeminde oluşturulan kolonların ölçülen çap değerleri ve kolonları daha iyi temsil etmesi açısından kolonların merkezlerinden 20-40 cm uzaktan alınan karotların basınç mukavemeti (f_c), çekme mukavemeti ($f_{ct,sp}$) ve sekant modüllerinin (E_{cm}) ortalama değerlerinden faydalanarak bunlar arasındaki ilişkileri kum ve kil zeminler için sırasıyla Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2' deki gibi elde etmişlerdir.

$$f_{ct,sp} = 0,3 (f_c)^{3/5} \quad , \quad E_{cm} = 800 (f_c)^{1/2} \quad (2.1)$$

$$f_{ct,sp} = 0,4 (f_c)^{3/10} \quad , \quad E_{cm} = 500 (f_c)^{2/3} \quad (2.2)$$

Ayrıca yazarlar, dayanım değerlerinin tabakalar arasında çok değişkenlik gösterdiği, standart sapmasının büyük olduğu ve bu yüzden güvenlik sayısının 2 ile 3 arasında alınması gerektiğini, su - çimento oranının dayanımı belirgin şekilde etkilediğini, dayanım değerlerinde kum ve kil arasında belirgin fark olmasına karşın elastisite modülü değerlerinde fark olmadığını, ikili jet sistemi (Jet2) kullanıldığında kolon çapının arttığını fakat dayanım değerinin azaldığını ve ön kesme uygulamasının killerin dayanımı için avantajlı bir uygulama olduğunu belirtmişlerdir.

Jet grout kolonların dayanım kazanma süreçlerini incelemek amacıyla Bell vd. (2003), çalışmalarında süper jet kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde laboratuarda tek eksenli basınç deneyleri yapmış, 76 x 150 mm' lik silindirik numunelere ait 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirleyerek (Şekil 2.15) süper jet kolon dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığını ve gerçek dayanıma 28. günde ulaşıldığını belirlemişlerdir.



Şekil 2. 15. Süper jet kolon numunelerine ait 3, 7, 14, 28 günlük basınç dayanımları (Bell vd., 2003)

Benzer bir çalışmayı da Coulter ve Martin (2006) yapmış, sahadaki kolonları temsil edecek şekilde üretilmiş ve sahadaki kolonlarla aynı düzeyde sıcaklık değişimine sahip olacak kalınlıkta yalıtılmış numunelerin zamana bağlı sıcaklık değişimlerini, 24 saatlik ve 28 günlük elastisite modüllerini, 3 eksenli basınç

dayanımlarını ölçmüş ve numunelerin 6 saate herhangi bir dayanım sağlayabilecek sertliğe gelmediğini ancak kaptan hasarsız çıkarılabilecek duruma geldiklerini, mukavemet artışlarının 12 saate kadar artarak daha sonra yavaşlayarak devam ettiğini, enjeksiyonun yapısında başkalaşımların ancak 11 saat sonra görülebildiğini gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar çerçevesinde, bitişik kolonların inşasında ve kazıda kolonların bu işlemler için yeterli sertleşmeye ulaşabilmesi için gerekli zamanın tanınması, dizilim ve sıralamalarının da enjeksiyonun dayanım ve deformasyon özelliklerine göre düzenlenmesi ve her şeye rağmen laboratuvar çalışmalarının ne kadar kaliteli şekilde gerçekleştirilmişse de sahada farklı davranışların görülebileceğinin unutulmaması gerektiğine dikkat çekmişlerdir.

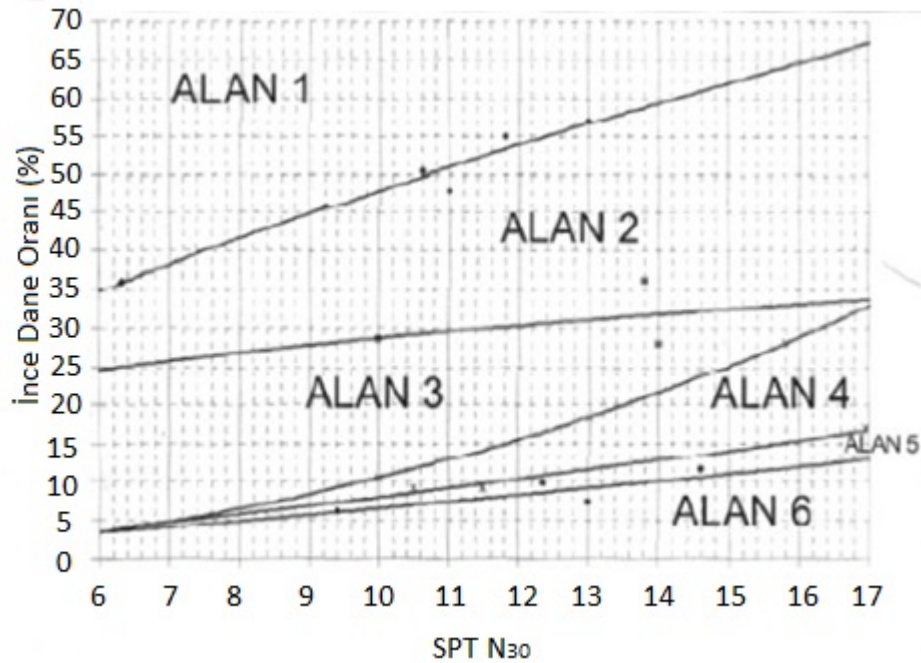
Yapılan enjeksiyonun sahip olduğu parametrelerin jet grout kolonun mukavemetine etkisinin belirlenmesi için Kavak ve Mutman (2005), Japonya İnşaat Mühendisleri Birliğinin sunduğu sivilaşma riski bulunan bölgede kalan $\%25 \pm 5$ relatif sıklığa sahip gradasyonlu ve kötü derecelendirilmiş çakıl zemin numunelerini farklı su/çimento oranlarında farklı enjeksiyon basınçlarıyla hazırlayarak üzerlerinde 7 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç deneyleri uygulamış ve çimento karışımının su oranı arttıkça yetersiz enjeksiyon uygulanmış numune sayısının arttığını ve bunun artan su ile birlikte çökme miktarının da artmasından kaynaklandığını düşündüklerini, sabit su/çimento oranında enjeksiyon basıncının artması ile mukavemet değerlerinde büyük farklar oluşmadığını, sabit enjeksiyon basıncında su/çimento oranının artması ile numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde düşüş olduğunu, 7 ve 28 günlük mukavemet değerleri arasında belli bir oran olmamakla birlikte doğru orantılı bir artış olduğunu, enjeksiyon uygulanan numunelerde tam bir homojenlik bulunmadığını ve bundan dolayı da aynı numunelerde farklı serbest basınç mukavemetlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir.

Doğu vd. (2006), çalışmalarında Taris - Aydın, Limak Lara Otel Antalya, Concorde Otel Antalya sahalarında yapılan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinin mukavemet özelliklerinin, zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısından ne derece etkilendiği araştırmışlar ve bu amaçla arazi ve

laboratuvar deneylerinden elde edilen zeminin ince dane oranı, ortalama SPT darbe sayısı ve karotiyer ile alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarını incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarını, araştırma verileri ile karşılaştırarak, ince dane yüzdesine ve SPT vuruş sayısına bağlı olarak kolonların serbest basınç dayanımlarının belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Ayrıca araştırmacılar, zeminde oluşturulan kolonların mukavemetinin yüksek olmasının nedeninin malzemeleri oluşturan danelerin iyi derecelendirilmiş olmasına bağlı olduğu ve ince dane miktarının artması sonucu kolon mukavemetinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Şekil 2.16' da zeminde teşkil edilen jet grout kolonların serbest basınç dayanım aralıkları gösterilmiştir. Bu grafikte, altı adet alan, SPT vuruş sayısına ve ince dane yüzdesine bağlı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. 16. Jet kolonların mukavemet aralıkları (Doğu vd., 2006)

Şekil 2.16' ya göre;

- Alan 1 : 2,6 N/mm²' den düşük dayanımlı kolonlar
- Alan 2 : 3,5 N/ mm²' den düşük, 2,6N/ mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 3 : 5,5 N/ mm²' den düşük, 3,5N/ mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 4 : 7,0 N/ mm²' den düşük, 5,5N/ mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 5 : 14,0 N/ mm²' den düşük, 7,0N/ mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 6 : 14,0 N/ mm²' den yüksek dayanımlı kolonlar olarak belirtilmiştir.

Kullanılan parametrelerin jet grout kolonlara etkilerinin kompleks bir mekanizmaya sahip olmasından dolayı tam belirlenememiş olması ile birlikte son yıllarda da bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.

Nikbakhtan ve Ahangari (2010), jet grout kolonlarının yüksek dayanımına, düşük şekil değiştirme özelliğine, çok düşük permeabiliteye sahip olduğunu ve bu özelliklerde enjeksiyon basıncı, çekme hızı, püskürtücü başlığın çapı ve sayısı, su-çimento oranı ve zemin özellikleri gibi parametrelerin etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında jet grout parametrelerinin ve çimento-su oranının optimize edilebilmesi için deneme kolonları imal etmiş, bu kolonların çap kontrolleri ve kolonlardan alınan karotlarda yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçlarını kullanarak yükseltme - döndürme hızı, çimento-su oranı ve enjeksiyon basıncının jet grout kolonunun çapı ve eksenel basınç dayanımı ile ilişkisini belirlemeye çalışmışlardır.

Bu amaçla diğer parametreleri sabit tutarak farklı enjeksiyon basınç değerleri, çimento-su oranı ve yükseltme döndürme hızları ile imal edilen kolonların çapları ve basınç dayanımları belirlenmiş ve literatür ile deney sonuçları grafikte kıyaslanarak kolon serbest basınç dayanımı (UCS) ve çapları (D) ile

enjeksiyon basıncı (P), yükseltme hızı(L), döndürme hızı (R) ve çimento-su oranı (c/w) arasındaki bağıntılar aşağıda sunulmuştur.

$$UCS = 0.7131. e^{0.0523P} \quad R^2= 0.9428 \quad (2.3)$$

$$UCS = 1.6141. e^{-0.0784L} \quad R^2= 0.9089 \quad (2.4)$$

$$UCS = 1.6141. e^{-0.0784R} \quad R^2= 0.9089 \quad (2.5)$$

$$UCS = 2.4507. e^{0.2296c/w} \quad R^2= 0.9712 \quad (2.6)$$

$$D = 0.8813. e^{0.0429P} \quad R^2= 0.9198 \quad (2.7)$$

$$D = 1.9521. e^{-0.0777L} \quad R^2= 0.8652 \quad (2.8)$$

$$D = 1.9521. e^{-0.0777R} \quad R^2= 0.8652 \quad (2.9)$$

$$D = 0.6589. e^{0.4421c/w} \quad R^2= 0.9463 \quad (2.10)$$

Bu çalışma sonucunda, enjeksiyon basıncının artması ile serbest basınç dayanımının, çimento – su oranının artması ile de kolon çapı ve basınç dayanımının logaritmik olarak arttığı, yükseltme - döndürme hızının artması ile kolon çapı ve basınç dayanımının logaritmik olarak azaldığı görülmüştür.

Kolon çapı ve serbest basınç dayanımı değerlerinin çimento – su oranına karşı hassas davranış gösterdikleri ve dolayısıyla en etkin parametrenin çimento- su oranı olduğu, ayrıca deney sonuçları ile literatürdeki sonuçlar karşılaştırıldığında kolon çapının aşırı artması ile basınç dayanımının alt limit değerlere indiği görülmüştür.

Nikbakhtan ve Osanloo (2009), jet grout yönteminde kullanılan betonun yüksek dayanım, düşük şekil değiştirme ve düşük geçirimsliğe sahip bir karakteristiği bulunduğu, çimento bulamacı yüksek basınçla verilirken hızdan dolayı

zeminin yapısının bozulduğuna işaret ederek, enjeksiyon sonuçlarının işlem sırasında kullanılan birçok parametreden etkilendiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada enjeksiyonlu zemine tek eksenli basınç, 3 eksenli basınç, direk kesme ve Schmidt çekici gibi deneyler uygulanarak enjeksiyon basıncı ve akışının tek eksenli basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı ve akışının artması ile tek eksenli basıncın logaritmik olarak arttığı, buna ilaveten enjeksiyonun zeminin kohezyon ve sürtünme açısını belirgin ölçüde artırdığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Laefar vd. (2009), kilin jet grout kolonun dayanım ve rijitliğine etkisini belirlemek için, hazırlanan numunelere %0' dan %10' a kadar Kaolinit ve Bentoniti iri ve toz halde katarak bunların rijitlik ve dayanımlarını ölçmüştür. Sonuç olarak %1 oranında kil olması durumunda bu değerlerin azalma eğilimine başladığını %4 'lerde azalma eğiliminin belirginleştiğini ve % 10 seviyesinde önemli ölçüde bir azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca kilin çok az miktarının dahi jet grout kolon dayanımını ve rijitliğini azalttığını, katılan kilin çeşidine ve katılma şekline göre jet grout kolonun dayanımı, rijitliği ve göçme davranışının belirgin farklılık gösterdiğini kaya ve mineral analizleri ile tespit etmişlerdir.

Düşey iyileştirme kolonlarının analizleri için farklı teknikler tüm dünyada geniş çapta kullanılmaktadır. Yapının temeli, iyileştirmede kullanılan kolon sıklığına bağlı olarak, kazık ya da iyileştirilmiş zemin rolü oynamaktadır. Analiz ve dizayn için metotlar basit ampirik yaklaşımlardan daha sofistike analitik yaklaşımlara geçmektedir. Deformasyon davranışının sayısal simülasyonu zeminin mekanik davranışını anlamakta önemli rol oynamaktadır (Van Der Stoel ve Van Ree, 2000).

2.6. Jet Grout Kolonu Kalite Kontrol Deneyleri

Uygulama sahasında bir kısmı imalatlar öncesi, bir kısmı ise imalat süresi içerisinde belirli dönemlerde gerçekleştirilebilen bir dizi deneyler ile tasarımı gerçekleştirilmiş jet grout kolonlarının kalitesi denetlenmiş ve kolonların tasarım kriterlerine uygun olarak imal edilmesi sağlanmış olur (TS EN-12716, 2002).

2.6.1 Deneme kolonları yapılması ve çap kontrolü

Uygulama sahasında proje imalatlarının başlamasından önce sahada farklı imalat parametreleri kullanılarak oluşturulan deneme kolonları ile projede hedeflenen çaplar sağlanmaya çalışılmaktadır. Aynı jet grout uygulama yönteminde enjeksiyon basıncı, tij çekme ve dönme hızı ile püskürtme ağzı çapı değiştirilerek oluşturulan deneme kolonları kolon çap bütünlüğünün sağlanacağı yeterli bir priz süresi beklendikten sonra etrafı kazılarak, farklı imalat parametreleri ile imal edilmiş olan bu kolonların çaplarının ve sürekliliğinin kazılan derinlik boyunca gözlemlenmesi sağlanmış olur (Gökalp ve Düzceer , 2002).

Muğla'nın Fethiye ilçesinde bir proje kapsamında kumlu silt formasyonda yapılmış deneme kolonlarına ait resim Şekil 2.17' de, Samsun ilinde bir proje kapsamında siltli kum formasyonda yapılmış deneme kolonlarına ait resim ise Şekil 2.18' de sunulmuştur.



Şekil 2. 17. Fethiye’de kumlu silt bir formasyonda yapılmış jet grout deneme kolonları (Doğanışık, 2010)



Şekil 2. 18. Samsun’da siltli kum bir formasyonda yapılmış deneme kolonları (Doğanışık, 2010).

Sahada imalat esnasında çapın sağlanıp sağlanmadığının anlık kontrolüne imkan vererek, parametrelere anında müdahale ile uygulamada kolaylık sağlamak amacıyla Langhorst vd. (2007), Amsterdam Merkez İstasyonu’nda gerçekleştirilen destekleyici sandviç duvar sistemindeki kolon çaplarının belirlenmesi için farklı sistemler denemişlerdir. Bunun için ilk yöntem olarak, hidrolik basıncın değişimi-hacim değişimi-kumpas kollarının ölçtüğü mesafe arasındaki bağıntıyı temsil eden eğriler ile çap ölçümü sağlayan hidrolik

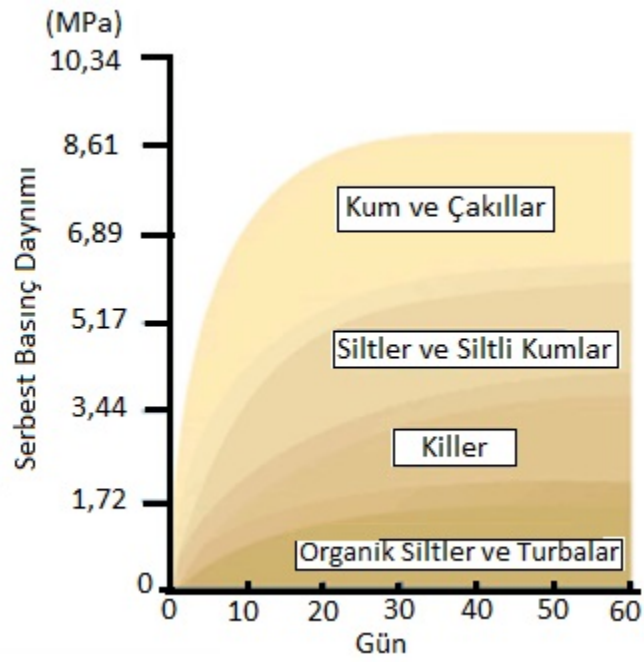
hareketli kumpas metodunu kullanmışlardır. İkinci yöntem olarak jet grout kolonun çevresine değişik mesafelere konan boş TubeX kazıkların içerisinde nozul seviyesine indirilen mikrofonlar ile jet grout basıncından dolayı zeminde meydana gelen gürültünün genliğinin ölçüldüğü ve bir yazılım ile bu genliklerden çap belirlenmesini sağlayan hidrofon metodunu kullanmışlardır. Üçüncü yöntem olarak her 1 m jet grout işleminde, giren kütle çıkan kütle dengesi prensibiyle çap kontrolü sağlayan taşan yoğunluk ölçüm metodunu kullanmışlar ve bu üç farklı yöntemin başarılarını irdelenmişlerdir. Sonuç olarak bu yöntemlerin tatmin edici güveni veren sistemler olduklarını ve daha da geliştirilerek kolon çaplarının daha doğru ve güvenilir ölçülebilmesiyle daha yüksek dizayn dayanımına sahip jet grout kolonların inşa edilebilmesinin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

2.6.2 Karot numune alınması ve serbest basınç deneyi

Yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu ile örselenen zeminde oluşan jet grout kolonların tasarım aşamasında öngörülen mukavemet değerlerinin saha da sağlanıp sağlanamadığının belirlenmesi için bu kolonlardan karot numuneler alınarak serbest basınç değerleri ölçülebilir (Durgunoğlu vd., 2002). Karot numuneler proje başlangıç aşamasında imal edilen deneme kolonlarından alındığı gibi uygulama esnasında imal edilen kolonlardan da rastgele seçilerek alınmaya devam edilebilir ve kontrolün sürekliliği sağlanabilir. Karot numuneler alınmadan önce jet grout kolonlarının yerinde prizlenmesinin beklenmesi gerekmektedir. Şekil 2.19' da jet grout kolonlarından rastgele seçilerek karot numune alınması anına bir görüntü sunulmuştur.



Şekil 2. 19. Jet grout kolonundan alınan karot numune (Doğanışık, 2010)



Şekil 2. 20. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlara ait serbest basınç mukavemeti değerleri (Burke, 2004)

Şekil 2.20' de jet grout kolonların serbest basınç mukavemeti değişimlerinin imal edildikleri zemin profiline göre değişimini gösteren grafik bulunmaktadır. Kum ve çakıl zeminlerde kolon serbest basınç mukavemeti değerlerinin ilk başlarda ve nihai durumda killi ve siltli zeminlerdeki değerlere göre daha yüksek olduğu bu grafikten anlaşılabilmektedir.

Nozul çapı da nihai mukavemeti etkileyen önemli parametrelerden biridir. Nozul çapı hariç diğer parametreleri sabit tutarak oluşturulan jet grout kolonlarına bakıldığında nozul çapındaki artışın kolon oluşturulurken kullanılan çimento dozajını ve dolayısıyla kolon nihai mukavemetini artıracığı bilinmektedir. Çimento dozajının ne olması gerektiği proje kriterlerinde istenen nihai mukavemetle ilişkili olmakla beraber değişik zemin profilleri için kullanılan çimento dozaj aralıkları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlarında kullanılan çimento miktarları (Burke, 2004)

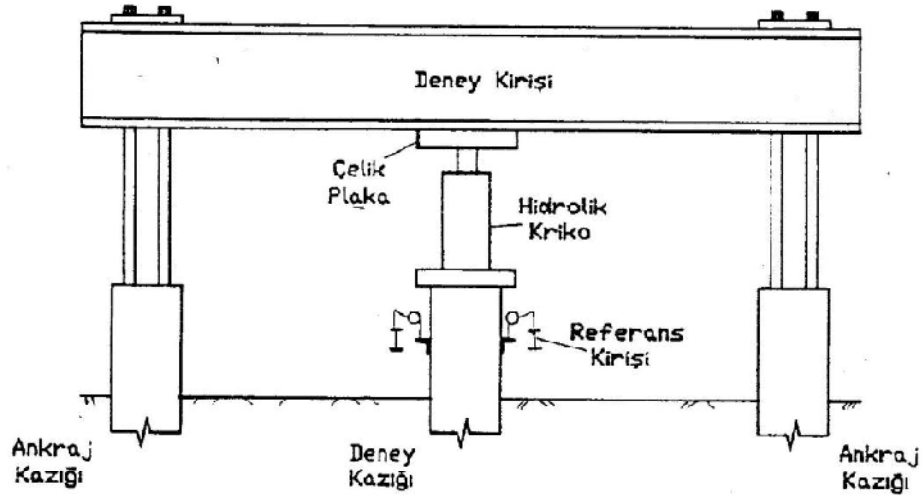
Zemin Türü	Kolondaki Çimento Miktarı (kg/m³)
Kumlar	150-250
Siltier ve Siltli Kumlar	200-275
Killer	250-350
Organik Siltler ve Turbalar	300-400

2.6.3 Jet grout kolonu yükleme deneyi

İmal edilen jet grout kolonlarının gerçek düşey yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve bu değerlerin proje aşamasında öngörülen değerleri emniyetli bir şekilde sağladığının doğrulanması amacıyla alınan karot numunelerinde yapılan laboratuvar deneylerinin yanında yerinde jet grout kolon yükleme deneyleri yapılmaktadır (Durgunoğlu vd., 2002).

Kazık veya kazık gruplarına yükün uygulanması birkaç yöntemle gerçekleştirilir. Bu yöntemlerden ilki bir hidrolik kriko vasıtasıyla ankraj kazıklarından reaksiyon alarak test kolonuna yük uygulanmasıdır. Bu yöntemle

ait temsili kroki Şekil 2.21' de ve bu yönteme ait bir uygulamaya ait resim Şekil 2.22' de gösterilmiştir. Ankraj kazıklarının adeti, sistemi birbirine bağlayan deney kirişlerinin boyutları uygulanacak yüke reaksiyon oluşturabilecek şekilde ve yeterli şekilde belirlenmelidir. Ayrıca ankraj kazıkları denej kazığına kazık çapının 5 katı veya 2m olmalıdır.



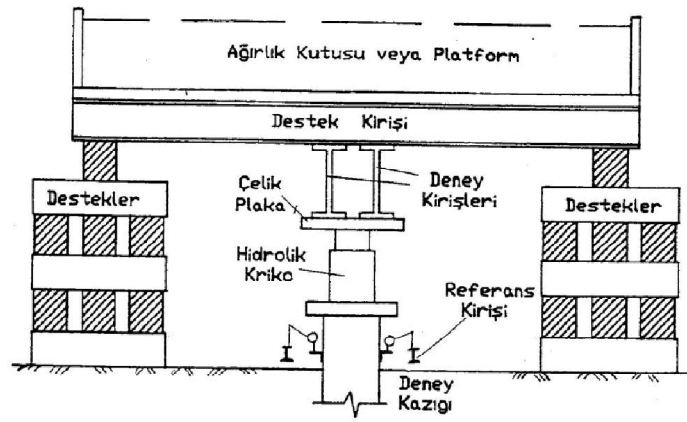
Şekil 2. 21. Deney kazığına yükün ankraj kazıklarından reaksiyon olarak uygulanması (Düzceer, 2002)



Şekil 2. 22. Tekil kazık yükleme deneyi (Handley vd., 2006)

Kazık yük yükleme deneylerinden ikincisi hidrolik kriko sistemiyle, ağırlık kutusu veya platformdan reaksiyon olarak yükün uygulanmasına yönelik bir

yöntemdir. Bu yöntemde destek deney kirişine paralel yerleştirilen ağırlık kutusu veya platform kenarlarından sağlanmaktadır. Bu destekler ağırlığın oturmasını önlemeli ve deney kirişinden en az 1.50m mesafede olmalıdır. Bu ağırlık kutusuna veya platforma maksimum deney yükünün %10'u kadar kaya, beton, çelik ve su dolu bidon gibi malzemeler yerleştirilir. Ağırlık kutusuna veya platforma yerleştirilen ve maksimum deney yükünün %10' u kadar olan yüklerden faydalanılarak reaksiyon alan bir hidrolik krikolu kazık yükleme deneyi düzeneğine ait kroki ve resim sırasıyla Şekil 2.23' te ve Şekil 2.24' de gösterilmiştir.



Şekil 2. 23. Deney kazığına yükün ağırlık kutusu veya platformdan reaksiyon olarak uygulanması (Düzceer, 2002)



Şekil 2. 24. Statik (sabit) ağırlık kullanılarak yapılan tekil kazık yükleme deneyi (Handley vd., 2006)

Kazığın aksel hareketlerini ölçmek üzere ölçüm aletleri, kazığın merkezinden eşit mesafedeki kazık veya kazık başlığıyla bağlantılı kulplar halinde referans kırımlarının üzerine, aletin minimum boyutu kazığın uzun aksine paralel olacak şekilde oturtulur (Düzceer, 2002).

Yükleme deneyi düzeneği kurulduktan sonra standart yükleme, tekrarlı yükleme, sabit zaman aralıklarıyla yükleme, sabit penetrasyon oranı ile yükleme, sabit oturma artımlarında yükleme ve hızlı yükleme gibi farklı yükleme yöntemleri kullanılarak deney gerçekleştirilebilir (ASTM D1143, 1994).

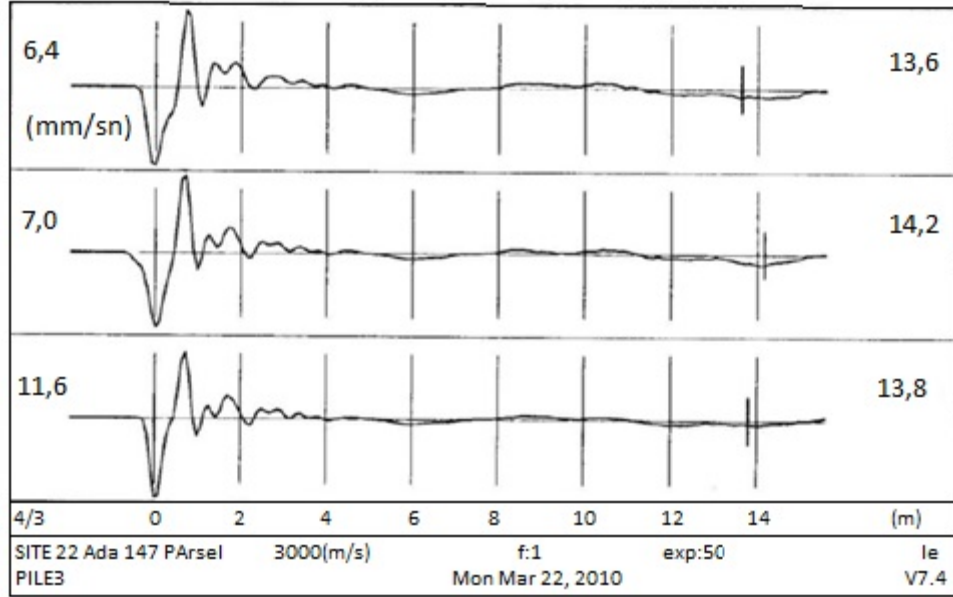
2.6.4. Süreklilik deneyi

Süreklilik deneyi sahadaki kontrol çalışmalarında kolon kesitlerinde derinliğe bağlı meydana gelebilecek değişimleri ve kolonun boyunu belirlemek ve kolon cidarı boyunca meydana gelebilecek süreksizlikleri tespit etmek üzere kullanılan bir deney yöntemidir (Gökalp ve Düzceer, 2002). Bu deney jet grout kolonu başlığında özel bir çekiç ile oluşturulan darbenin yine jet grout başlığına yerleştirilen bir ivme ölçer ile kaydedilmesi ve kaydedilen bu değerlerin bu amaçla geliştirilmiş bir bilgisayar programı ile grafik haline dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Bu veriler sahada bulunan portatif bilgisayar ile analiz edilmekte ve sonuçlar hız-zaman grafiği şeklinde kayıt altına alınmaktadır. (Gültekin, 2010).

Bu deneylerin yorumlanmasında, gerilme dalgasının darbe sonrasında kazık başlığından başlayarak alta doğru ilerlemesi ve alttan yansıyarak tekrar kolon başlığına gelmesi kabulünü içeren gerilme dalga teorisinden yararlanılmaktadır (Şenol ve Deneç, 2007).

Deney süresince ortamda meydana gelecek çevresel değişikliklerin etkisini en aza indirmek için süreklilik deneyinde bir jet grout kolonu için üç ayrı kayıt alınmakta ve sonuçlar yorumlanırken zemin yapısı, jet grout tasarım özellikleri ve jet grout imalat yöntemi göz önünde bulundurularak olası yanlış

yorumlardan kaçınılmaktadır. Süreklilik deneyi sonucunda elde edilen tipik bir grafik Şekil 2.25' te süreklilik deneyi yapım anını gösteren bir fotoğraf da Şekil 2.26' da yer almaktadır.



Şekil 2. 25. Süreklilik deneyi bilgisayar yazılımı grafik verisi (Gültekin, 2010)



Şekil 2. 26. Jet grout kolonuna yapılan süreklilik testi anı (Doğanışık, 2010)

2.7. Jet Grout Kolonlarının Taşıma Kapasitesi

2.7.1. Jet grout kolonların taşıma güçlerinin hesaplanması

Zeminde düşey olarak oluşturulan jet grout kolonları, kazık elemanlarına benzer bir şekilde hesaplanmaktadır. Jet grout kolonunun çevre zemini açısından toplam taşıma gücü iki bileşenden oluşur. Bunlar uç direnci ve çevre sürtünmesi bileşenleridir. Bir jet grout kolonunun göçmeden önce taşıyabileceği maksimum yük (kolon taşıma gücü) Q_d , kolon ağırlığı W_k ile gösterilirse, bir jet grout kolonunun kırılma olmadan taşıyabileceği yük $Q_d + W_k$ ' dir. Bu yükün kolon ucunun maksimum taşıyabileceği yük ($Q_{uç}$) ile kolon çevresinin sürtünme ve adhezyon ile taşıyabileceği yükün ($Q_{çevre}$) toplamı olduğu kabul edilir. Bu durumda Eşitlik 2.11 elde edilir.

$$Q_d = Q_{uç} + Q_{çevre} + W_k \quad (2.11)$$

Jet grout kolon uç taşıma gücü eşitliği aşağıda gösterilmektedir.

$$Q_{uç} = A_{uç} \cdot q_d \quad (2.12)$$

$A_{uç}$: Kolon uç alanı

q_d : Kolon ucundaki zeminin taşıma gücü

Jet grout kolonun sürtünme ile taşıyabileceği yükün formülasyonu Eşitlik 2.13' te gösterilmektedir.

$$Q_{çevre} = A_{yanal} \cdot f_s \quad (2.13)$$

A_{yanal} : Kolonu zemin içerisinde kalan yüzey alanı

f_s : Kolonun birim alanına etkiyen ortalama sürtünme gerilmesi

Kolon birim yüzey alanı P ile ifade edilecek olursa $A_{çevre} = P \cdot D_f$ olacaktır.

Birim alana etkiyen sürtünme kuvveti Eşitlik 2.14 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_s = c_u + p_h \cdot \tan \delta \quad (2.14)$$

c_u : D_f boyunca ortalama adhezyon

p_h : D_f boyunca ortalama yatay basınç

Bu durumda kolon taşıma gücü, Eşitlik 2.15' teki gibi yazılabilir.

$$Q_d = A_{uç} \cdot q_d + A_{çevre} \cdot f_s - W_k \quad (2.15)$$

2.7.1.1. Kohezyonsuz zeminlerde kolon taşıma gücü

Kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun uç taşıma gücü Eşitlik 2.16 ve 2.17 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_{uç} = A_{uç} \cdot q_d \quad (2.16)$$

$$q_d = p_o \cdot N_q + K_2 \cdot \gamma_2 \cdot N_\gamma \cdot B \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.17' deki p_o parametresi kolon uç efektif basınç gerilmesi olup Eşitlik 2.18 ile ifade edilmektedir.

$$p_o = \gamma_1 \cdot D_f \quad (2.18)$$

K_2 parametresi şekil katsayısı dairesel kesitli kazıklarda ise 0,3 alınmaktadır. Eşitlik 2.17' de, kolon çapı (B), kolon çapının uzunluğuna kıyasla küçük olduğu düşünülecek olursa ihmal edilebilmektedir.

Jet grout kolon boyu (L) ile kolonun zemin içinde kalan uzunluğu (D_f) birbirine eşittir. Kolon en kesiti ile uç alanı aynıdır.

$$W_k = A_{uç} \cdot L \cdot \gamma_{kazık} = A_{uç} \cdot D_f \cdot \gamma \quad (2.19)$$

$$Q_{uç} - W_k = A_{uç} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot N_q - W_k = A \cdot \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) \quad (2.20)$$

Kohezyonsuz zeminlerde $c_u = 0$ olduğundan birim çevre sürtünmesi Eşitlik 2.21 ve 2.22 ile hesaplanabilmektedir.

$$f_s = p_h \cdot \tan \delta \quad (2.21)$$

$$p_h = K \cdot p_v \quad (2.22)$$

p_h : Çevre sürtünmesinin hesaplanacağı seviyede kazık çevresine etkiyen yatay basınç

K : Yatay toprak basıncı katsayısı

p_v : Düşey basınç

Beton kazık için K değeri düşük relatif sıklık için 1 ve yüksek relatif sıklık için 2 alınırken δ değeri $\frac{3}{4}$ alınacaktır.

Jet grout kolonları beton kazık sınıfına girdiğinden dolayı eşitliklerde, beton kazıklar için kullanılan K ve δ değerleri kullanılacaktır. Bu durumda birim çevre sürtünmesi değerini elde etmek için Eşitlik 2.23 kullanılmaktadır.

$$f_s = K \cdot p_v \cdot \tan \delta \quad (2.23)$$

Düşey basınç gerilmesi $p_v = \gamma \cdot D_f$ olup birim çevre sürtünmesi derinlik arttıkça lineer olarak artacaktır. D_f boyunca lineer dağılım halinde çevre sürtünmesi Eşitlik 2.24, dairesel kolonlarda ise (jet grout kolonu) Eşitlik 2.25 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_{\text{çevre}} = P \cdot D_f \cdot f_s \quad (2.24)$$

P : Kazığın birim çevre alanı

$$Q_{\text{çevre}} = \frac{\pi}{2} \cdot K \cdot \gamma \cdot D_f^2 \cdot D \cdot \tan \delta \quad (2.25)$$

Jet grout kolonunun tek tabaka içinden geçmesi durumunda Eşitlik 2.26 kullanılacaktır.

$$Q_d = Q_{u\check{c}} + Q_{\text{çevre}} - W_k = A_{u\check{c}} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) + \frac{\pi}{2} \cdot K \cdot \gamma \cdot D_f^2 \cdot D \cdot \tan \delta \quad (2.26)$$

Kolonun farklı tabakalardan geçmesi halinde çevre sürtünmesi her tabaka için kolon yüzey alanı, ortalama düşey basınç, toprak basıncı katsayısı ve sürtünme açısı ayrı değerlerin toplamı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 2.27).

$$Q_{\text{çevre}} = \sum A_{si} \cdot K_i \cdot p_{vi} \cdot \tan \delta \quad (2.27)$$

Bu durumda kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun taşıma gücü Eşitlik 2.28 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$Q_d = Q_{u\check{c}} + Q_f - W_k = A_{u\check{c}} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) + \sum A_{si} \cdot K_i \cdot p_{vi} \cdot \tan \delta \quad (2.28)$$

2.7.1.2. Kohezyonlu zeminlerde kolon taşıma gücü

Killi zeminlerde Skempton formülüne göre $D_f / B > 2,5$ ve kolon en kesitleri daire, kare veya bunlara yakın şekillere sahip olduğundan Eşitlik 2.29 kullanılacaktır.

$$N_c \cdot c = 9 \cdot c \quad (2.29)$$

Katsayı olarak 9 değerinin alınabilmesi için kolonun taşıyıcı zemine 5B kadar girmesi gerekmektedir.

$$q_d = 9 \cdot c_1 + \gamma \cdot D_f \quad (2.30)$$

$f_s = c_u$ olduğundan dolayı ;

$$Q_{uç} = (9 \cdot c_1 + \gamma \cdot D_f) \cdot A_{uç} \quad (2.31)$$

$$Q_{çevre} = A_{yanal} \cdot c_u \quad (2.32)$$

$$Q_d = A_{uç} \cdot (9 \cdot c_1 + \gamma \cdot D_f) + A_{yanal} \cdot c_u - W_k \quad (2.33)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan kabule göre $W_k = A_{uç} \cdot \gamma \cdot D_f$ olarak alınabileceğinden killi zeminlerdeki kolon taşıma kapasitesi Eşitlik 2.34' te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$Q_d = 9 \cdot c_1 \cdot A_{uç} + A_{yanal} \cdot \alpha \cdot c_2 \quad (2.34)$$

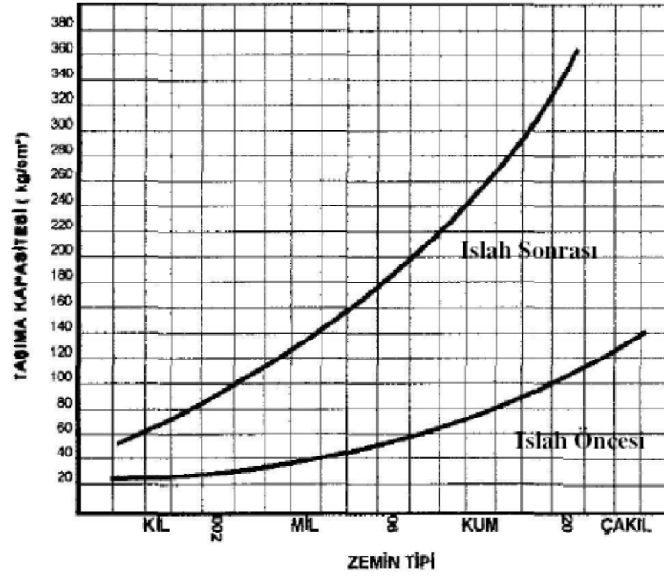
c_1 : Kazık ucundaki drenajsız kayma mukavemeti

c_2 : Kazık çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti

2.7.2. Jet grout kolonlar kullanılarak taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması üzerine yapılan çalışmalar

Çeşitli sahalarda yapılan jet grout uygulamalarının, taşıma gücü ve oturma problemlerine karşı kullanılabilecek bir iyileştirme yöntemi olup olmadığını belirlemek ve yöntemin başarısını tespit etmek üzere çok sayıda çalışmalar ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Şekil 2.27' de ıslah edilmiş zemin sınıfına göre kolon taşıma kapasitesinin değişimi gösterilmektedir. Buna göre granüler zeminlerde ıslah sonrası taşıma kapasitesindeki artışın daha fazla olduğu gözlenmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).



Şekil 2. 27. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi (Melegary ve Garassino, 1997)

Aynı su / çimento oranı ve çimento dozajı ile gerçekleştirilmiş Jet2 kolonun mukavemeti Jet1 kolonun mukavemetine göre %10 - 15 civarında daha düşük, Jet3 kolonun mukavemeti ise Jet1 ve Jet2 kolonun mukavemetlerinden daha düşüktür. Bunun sebebi Jet2 yönteminin içerdiği hava ve Jet3 yönteminin içerdiği çok miktardaki sudur.

Jet grout iyileştirme yönteminin başarısını irdeleyen bir çalışmada Durgunoğlu vd. (1998), üstte gri-yeşil renkli orta katı-katı kıvamlı ve ince çakıl içerikli kil ile alt seviyelerde killi kumlu çakıl dizilimli alüvyon zemine sahip Migros/Ankara GİMAT hipermarket ve alışveriş binası sahasında yapılan jet grout ile zemin ıslahını sunmuştur.

Yapılan zemin ıslahı temel oturmalarına karşı yapılmış olup, kazıklı temel veya jet grout ile iyileştirme yöntemlerinden; daha düşük maliyetle ve daha kısa inşaat süresinde gerçekleştirilebilen jet grout ile zemin ıslahı tercih edilmiştir.

Kalite kontrol amacıyla uygulama sonrası kazılarla kolon çapları, kolonlardan alınan karot örnekleri üzerinde laboratuvarında yapılan deneyler ile serbest basınç dayanımları ve sahada kolonlar üzerinde uygulanan çekme deneyleri ile

kolonların yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler kolonların basınç dayanımlarının, oturmalarının ve taşıma kapasitelerinin proje dizayn değerlerini güvenle sağlamakta olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın sonucunda, jet grout yönteminin her zeminde uygulanabildiği, yöntemin uygulanmasının ve kontrolünün gereği gibi yapıldığında zaman ve ekonomi yönünden önemli ölçüde tasarruf sağladığı belirtilmiştir.

Keskin ve Çimen (2002), Afyon ili Dinar ilçesinde yapımı planlanan altı katlı özel idare işhanı temel zemininin jet grout yöntemiyle iyileştirmesini içeren bir çalışma yapmış ve bu çalışma ile jet grout yönteminin taşıma gücü ve oturma açısından problemlili alanlarda uygun bir çözüm olduğunu göstermişlerdir.

Bu uygulama sahasında öncelikle sondajlar, arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmış, gerekli hesaplamalar yapılarak sığ temellerin taşıma ve oturma şartlarını sağlamadığı belirlenmiştir. Ortamda yer altı su seviyesi yüzeyden itibaren 1,6 m derinliğe kadar yükselmiş durumda bulunduğu için temel uygulaması için şartların uygun olmadığı ayrıca zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiş ve yapılan incelemeler sonunda bu inşaat sahasında en uygun çözümün jet grout kolonlar ile zemin iyileştirmesi olduğuna karar verilmiştir. Ayrıca, temel alanının dışına taşan jet grout kolonlar yapılarak yer altı suyu da kontrol altına alınmıştır.

Gokalp ve Duzceer (2002), zeminin taşıma gücü açısından kısmen, oturma ve farklı oturma açısından tüm yapı altında problem teşkil eden, en büyük jet grout uygulamalarından biri olan Aliğa' daki enerji santrali sahasının yüklerin jet grout kolonlarla sağlam tabakalara aktararak oturmaların düşük seviyelere indirilmesine yönelik zemin iyileştirme çalışmasını sunmuş ve yöntemin başarısını değerlendirmiştir.

Güçlendirme işlemine başlanmadan, deneme ve test kolonları imal edilerek bunlar üzerinde kolon çapı ölçülmesi, karot alınması, basma - çekme deneyi, süreklilik deneyi gibi kontroller yapılarak üretimde kullanılacak optimum

parametreler belirlenmeye ve yöntemin başarısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Üretim esnasında da belli periyotlarda bu kontroller devam etmiş ve gerekli durumlarda parametrelere müdahale edilerek uygulamanın başarılı şekilde uygulanması sağlanmıştır.

Ayrıca, sağlam zemin ile iyileştirilmiş zeminin elastisite modülleri yakın olmasından dolayı yansımaların net alınamadığı ve boy ölçümünün net yapılamadığını, jet grout yönteminin hızlı bir yöntem olduğunu ancak üretim öncesi testlerin optimum parametre bulmak için gerekli ve faydalı olduğunu, üretim esnasında düzgün yapılan periyodik kontrollerin bazı problemlerin erken tespit edilmesine ve gerekli müdahalelerin yapılmasına imkan tanıdığını, literatürde benzer zeminlere ait serbest basınç değerlerine yakın değerler iyileştirilen bu zeminde de elde edildiğinden yöntemin başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Durgunoğlu vd. (2002), İstanbul Levent'te yapılacak ve temelde ve son iki-üç kat seviyelerinde birbirlerine rijit bağlanacak olan iki kulenin farklı üstyapı deplasmanlarına sahip olmaması ve farklı zemin tiplerine oturmalarına rağmen kulelere aynı temel tipi seçilmesi gerektiğinden tabanı grovak anakaya olan kontrolsüz dolgu yapılmış sismik olarak aktif bölgede bulunan sahada jet grout yöntemiyle gerçekleştirilen zemin ıslahına ait vaka analizi sunmuşlardır.

Bu iyileştirmeye, kulelerin altındaki taban zemini deformasyon modüllerinin birbirine yakın olmasının sağlanması amaçlanmıştır. Kaya kotları farklı olduğundan soket kazık uygulamasında kazık boylarının değişmesiyle rijitlikler de farklı olacağından ve farklı oturmalar gözleneceğinden jet grout yöntemi tercih edilmiştir. Gelen yüklere göre, kolonlar ana kayaya oturduğundan dolayı uç mukavemeti de hesaplara dahil edilerek 60, 70 ve 80 cm çapında kolonlar oluşturulmasına ve bu çaplara en uygun yöntem olan tekli jet sistem (Jet 1) kullanılmasına karar verilmiştir.

Jet grout kolonların taşıma gücü ve deformasyonların belirlenmesi için yerinde yükleme deneyleri, gerçek kolon boyunun belirlenmesi için süreklilik deneyleri,

zemin yatak katsayısının belirlenmesi için plaka yükleme deneyleri, jet grout malzemesinin mukavemetini belirlemek için alınan karot numuneler üzerinde laboratuarda tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş, projelendirme esnasında kabul edilen değerlerin gerçekte sağlandığı ve ıslah edilen zeminin yatak katsayısının grovak anakayanın literatürde kabul edilen yatak katsayısıyla aynı çıktığı belirlenmiştir.

Bu sonuçlara dayanarak araştırmacılar, yapılan iyileştirme ile zemin taşıma gücünün artmasıyla proje maliyetinde ciddi azalma olduğu, jet grout yönteminde tekli jet sistemin (Jet 1) kullanılmasıyla inşaat süresinin ve maliyetin daha da azaldığını, zeminin iyileştirildikten sonraki deformasyon modülünün grovak anakaya ile yakın olmasının süreklilik testi ile ölçülen kolon boyunun gerçekten daha büyük çıkması ile hataya neden olabileceğini, yatak katsayılarının yakın olması ile farklı oturma ve dönme problemlerinin büyük ölçüde sınırlandırıldığını ve iyileştirmenin başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Bakım (2007), iki farklı inşaat sahasında gerçekleştirilen jet grout kolon uygulamasını inceleyerek sahada yapılan yükleme deneyleri ve laboratuarda yapılan serbest basınç deneylerine göre kolonların proje yükünü 2,5 – 3 kat emniyetle taşıyabildiklerini ve oturma kriterlerini sağladıklarını, dolayısıyla jet grout yönteminin temel altı stabilizasyonu için uygun ve ekonomik bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Ayrıca SPT değeri yüksek olan sert kil tabakasının kazıdaki oturmaya artırıcı bir faktör olduğunu, serbest basınç dayanımlarının ince dane yüzdesinin artması ile azalırken SPT sayısının (N_{30}) artması ile arttığını ifade etmiştir.

Tüm bu çalışmalar bize jet grout kolonların taşıma gücü ve oturma problemlerine karşı kullanılabilecek başarılı bir yöntem olduğunu göstermiştir. Yöntemin mevcut binalarda uygulanması ile alakalı Sarı (2008), Küçükso Kasrı ve Fethi Ahmet Paşa Yalısı için taşıma gücü ve oturma problemlerinden dolayı yapılması kararlaştırılan ve uygulanan jet grout kolonu ile zemin iyileştirme ve temel takviye projelerini detaylı olarak sunmuş ve iyileştirme sonrasında yapılan takipler ve incelemelerde uygulamaların olumlu sonuçlar verdiği ve

mevcut yapılardaki problemleri çözdüğünü belirtmiştir. Ayrıca Migros/Gimat Hipermarket ve Alışveriş Merkezi için oturmaya karşı jet grout kolonu uygulamasını değerlendirerek yöntemin başarılı olduğunu ifade eden bir çalışma da mevcuttur (Ayan, 2009).

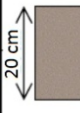
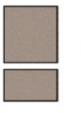
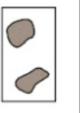
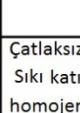
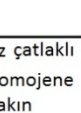
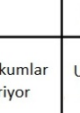
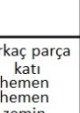
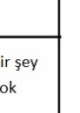
Ayrıca yazar, yapılardaki kat ilaveleri ve restorasyon çalışmalarının yapının yük sistemini değiştirebileceği ve bu değişimlerin yapının ağırlaşmasına veya temele aktarılan yüklerin değişmesine neden olabileceğini, yapının altındaki zeminin yeterince sıkıştırılmamış ya da zayıf olması, yer altı su seviyesinin değişmesi, zeminlerin davranış farklılıkları gibi nedenlerle yapıyı tehlikeye sokabileceğini, bu gibi durumlarda ve eski yapıların depreme karşı güvenliğinin sağlanarak ömürlerinin uzatılmasında temel takviyesine ihtiyaç duyulabileceğini belirtmiştir.

Alkaya vd. (2011), jet grout yöntemi ile bir başka iyileştirme yöntemi olan taş kolon yöntemini kıyaslamak için yaptıkları çalışmalarında Gürcistan Poti' de alüvyon zemin üzerinde turbalı kil-silt ve ince kum içeren bölgede yapılacak demiryolu hattı için, bir bölgesi jet grout kolon bir başka bölgesi taş kolon yöntemleri ile gerçekleştirilmiş iyileştirme çalışması sonrası bölgede zeminin karakteristiklerindeki değişimlerini sismik kırılma yöntemi ile ölçerek yöntemleri kıyaslamış ve değerlendirme sonucunda jet grout kolon ile güçlendirilmiş zemin karakteristiklerinin taş kolon yöntemi ile güçlendirilmiş zemine göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Yoshitake vd. (2004), geleneksel jet grout değerlendirme metodunda alınan karot numunelerinin tamamının dikkate alınmadığını ve çok kötü durumdaki karot numunelerinin hesaba dahil edilmediğini, karotlardan elde edilen serbest basınç değerlerinin jet grout kolonun gerçek serbest basınç değerini vermediğini temsil etmediğini ve bu yüzden jet grout kolonunun taşıma gücünün hesaplanmasında geleneksel değerlendirme metodunun yeterli olmadığını belirtmiş ve RQD kaya değerlendirme metodunu referans alarak iyileştirilmiş zeminin uzunluğa göre 6 farklı kategoriye ayrılmasına dayalı değerlendirme kriteri önermişlerdir. Bu yöntem kolon boyunca sondaj ile

numune alınarak zeminin homojenlik durumu ve kırık boyutları gibi kriterlerle 6 farklı kategoriye ayrılması (Çizelge 2.3) ve bu kategorilere ait uzunluğun toplam sondaj uzunluğuna oranı belirlendikten sonra, taşıma gücünün grup 1 ve 2 için deneylerde belirlenen serbest basınç değerinin kendisini, grup 3 için deneylerde belirlenen serbest basınç dayanımının 0.5 ile azaltılmış değerini ve grup 4, 5, 6 için taşıma gücü yok kabul edilerek sıfır alarak toplam taşıma gücü hesaplamayı öneren bir yöntemdir.

Çizelge 2. 3. İyileştirme durum kriteri (Yoshitake vd., 2004)

Seviye		1		2		3		4		5		6	
Değerlendirme		İyi Derecede İyileştirme						Düşük Seviyede İyileştirme					
Karot Görünümü	Kum												
	Kil												
Karot Durumu		Çatlaksız Sıkı katı homojen	Az çatlaklı homojene yakın	Ufak kumlar içeriyor	Ufak killer içeriyor	Dökülmüş kütle	Süreksiz ufak molozlar	Süreksiz kil kütleleri içeriyor	Birkaç parça katı hemen hemen zemin	Hiçbir şey yok			

Kendi yöntemlerinin geleneksel değerlendirme metodundan daha doğru olduğunu kanıtlamak için geleneksel hesaplara tasarlanmış dört sahayı kendi önerdikleri metot ile hesaplamışlar ve gerçekte de problemlili olan sahanın taşıma gücünün kendi metotları ile hesaplandığında dizayn dayanımını sağlamadığını ve kendi yöntemlerinin geleneksel yöntemle göre daha doğru bir yöntem olduğunu ifade etmişlerdir.

Son yıllarda jet grout yönteminde kullanılan klasik yöntemlerin duruma tam yansıtamadığı ve bu yöntemlerle güvenlik sayılarının yüksek alınarak ekonomikliğin olumsuz etkilendiğini belirten çalışmalar, jet grout yönteminde kullanılmak üzere çeşitli sayısal analizlere ve sayısal yöntemlere dayalı analizler öneren çalışmalar yapmışlardır.

Bu çalışmalardan biri Tinoco vd. (2009)' nin yapmış oldukları çalışmadır. Yazarlar Minho Üniversitesi' nde yapılan bir çalışmaya ait verileri kullanılarak 4 farklı yöntemle veri analizleri yapmış ve bu veri analiz yöntemlerinin jet grout kolonun serbest basınç dayanımı ile parametreler arasındaki ilişkiyi

öğrenebildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca jet grout yönteminde dizayn kuralları ve kalite kontrol açısından eksiklikler bulunduğunu ve bu yüzden ampirik formüllerle yapılan tasarımların ekonomikliğı azalttığını, bu kullanılan veri analiz yöntemleriyle daha doğru modellemelerin sağlanması ve bunların kullanılması sonucu saha testlerinin azalacağını, yöntemin daha ekonomik ve teknik açıdan daha faydalı hale gelebileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışma gerekli su – çimento oranı, m³ başına gerekli çimento miktarı ve çimento çeşidi belirlemede bazı tanımlamalar sunmuş ve diğer parametreler ile ilişkileri değerlendirilerek en etkili parametrelerin çimento miktarı ve zemin özellikleri olduğunu, kullanılan veri analiz yöntemlerinin içinde en anlaşılır ve en iyi seçeneğin Fonksiyonel Ağlar (FN) modeli olduğunu, jet grout kolonun elastisite modülü ve çapının belirlenmesi ile ilgili benzer çalışma yapılabileceğini göstermiştir.

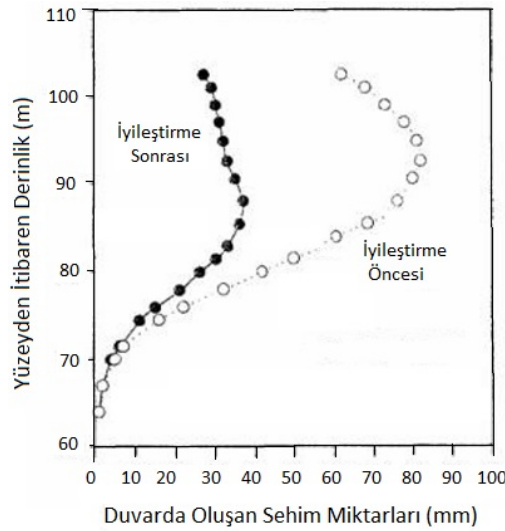
Buna ilave olarak Tinoco vd. (2011), jet groutun eksenel basınç mukavemeti belirlemek için, ANN ve benzeri birkaç veri çıkarma yöntemini kullanarak bunları laboratuvarda kullanılan formülasyonlarla kıyaslamış ve büyük ölçüde uyum sağlandığını belirtmişlerdir. Laboratuvar formülleri daha basit ve daha doğru sonuç vermesine rağmen 28 günlük mukavemet değerlerinin bilinmesinin gerekmesi zaman açısından büyük dezavantaj olduğundan bu çalışmada 28 günlük mukavemeti belirlemek için veri çıkarma yöntemlerini denenmiş ve yeterli yakınlık sağlanabildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca 11 girdi arasından etki göstermeyen diğer girdiler çıkarılıp, etkili olan 6 veriyle aynı analizleri yaptıklarında doğruluk oranı düştüğünden jet groutun eksenel basınç mukavemetinin hesaplanmasının kompleks bir yapı gerektirdiğini, etkisi az görünen parametrelerin dahi hesaba dahil edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

2.8. Jet Grout Kolonlar Kullanılarak Yanal Deformasyonların Azaltılması ve Stabilitenin Artırılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Wong vd. (1999), Singapur'da bir sanat merkezi inşaatında bir temel kazısında palplanş duvarı ve diyafram duvarı ile desteklenmiş kazı yan yüzeylerinin jet grout kolonlar ile güçlendirilmesi çalışmasını sunmuş ve kazı yönünde deformasyonların jet grout kolonlar ile azaltıldığını göstermişlerdir.

Sahada zemin yüzeyinden itibaren 2,5 – 3,0 m aşağıda yer altı suyu bulunduğu ve uygulamada ikili jet sistem (Jet 2) kullanıldığı belirtilmiştir.

Çalışmada zemine ait ıslah öncesi drenajsız kayma dayanımının 300 kPa ve elastisite modülünün 150 MPa ve diyafram duvardaki yanal deformasyonların maksimum 87 mm iken jet grout ile zemin ıslahı sonrası drenajsız kayma dayanımının 1150 kPa, elastisite modülünün ise 350kPa değerlerine ulaştığı ve maksimum yanal deformasyonun 37 mm'ye düştüğü gösterilmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2. 28. İslah öncesi ve ıslah sonrası inklinometre ölçümleri (Wong vd., 1999)

Wong ve Poh (2000), jet grout kolonların, bitişik nizamlı yapılarda bodrum kat kazısı sırasında kazı yan yüzeylerindeki diyafram duvarlardaki hareketi önlemek için kullanılmasını irdelemiş, iksa duvarları arkasında oluşturulan jet

grout kolonların duvar arkasındaki zemin tabakasının aksi yönde hareketine sebep olduğunu ve diyafram duvarlarında da kazıya ters yönde deformasyon oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca jet grout kolonlar ile diyafram duvarlarındaki eğilme momentlerinin azaldığını ve bitişik yapıların kazıdan daha az etkilendiğini göstermişlerdir.

Falcao vd. (2000), jet grout iyileştirme yöntemiyle yapılmış bazı çalışmaların ana dizayn ve imalat kriterlerini sunmayı ve bu iyileştirme yönteminin beton kazık, palplanş ve mini kazık yöntemlerine alternatif olarak sunulabileceğini göstermeyi hedeflemiş yapılan kalite kontrol testleri sonucu güvenli bulunan yapılara ve testleri yapılamadıysa da halen güvenle ayakta durmaya devam eden 4 adet jet grout iyileştirme yöntemine ait vaka analizi sunmuştur.

Uygulanan testler yükleme - boşaltma silindirleriyle yapılarak yük-deformasyon durumuna bakılmış ve kolonların performanslarının yeterli oldukları belirlenmiştir.

Jet grout yöntemi her ne kadar genellikle zemin suyu kontrolü ve tünel çalışmalarında kullanılıyorsa da, heterojen zeminlerde delme kapasitesini artırması, iş süresini azaltması, temelin rijitlik ve ataletini artırması, derin temel uzunluklarını azaltması, küçük ve dar alanlarda çalışmaya imkan tanınması gibi avantajlarıyla bu yöntemin derin temelden istinat duvarına kadar bir çok durumda ekonomik ve rekabet edebilir bir yöntem olduğu belirtilmiştir.

Jian-Guo vd. (2009), bir otoban tüneline çevreleyen kayanın karakteristiği göz önünde bulundurularak tünel girişinde yapılan tünel temelinin taşıma kapasitesini artırmaya yönelik düşey jet grout uygulamasını tartışmışlardır. Hesaplamalarda çap, uzunluk ve kolon aralıkları daha önceki çalışmalardan alınmış, su-çimento oranı, jet grout basıncı ve yukarı çekme hızı gibi parametreler yapılan çap kontrolleri ve alınan karotlara ait 3 ve 28 günlük serbest basınç değerlerine göre optimize edilmiştir. Yazarlar sonuç olarak jet grout yönteminin uyumluluk ve manevra kabiliyetinin yeterli olduğunu, tünel temelinin taşıma kapasitesini ve stabilitesini arttırdığını göstererek yaptıkları

çalışmanın sonraki yapılacak çalışmalar için referans olabileceğini ifade etmişlerdir.

Semiz (2009), İzmir’de gerçekleştirilen metro inşaatındaki jet grout kolon uygulamasını değerlendirmiş, istenilen çapta kolon elde edebilmek için en önemli parametrenin enjeksiyon basıncı olduğunu ve imalat aşamasında proje enjeksiyon basıncına riayet edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Bu uygulamada ilk önce 80 cm’ lik jet grout kolonlar planlanmış fakat deneme kolonlarında maksimum çap kazılıp ölçüldüğünde 70 cm elde edildiği görülmüş ve proje 70 cm’ ye göre tekrar düzenlenmiştir. Seçilen parametrelerin kalite kontrolü için çimento şerbetlerinden imalat esnasında küp numuneler alınarak 28 günlük serbest basınç mukavemetleri, kolonlardan karot numuneleri alınarak 48, 72 ve 96 saat priz süreleri sonundaki serbest basınç dayanımları ayrıca süreklilik testleri yapılarak kolon sürekliliği, uzunluk ve çapları belirlenmiştir. Bu değerlerin hesaplarda öngörülen değer aralığında kaldığı tespit edilerek, jet grout yönteminin yeterliliği saptanmıştır.

Birçok çalışmanın jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme yönteminin yanıl deformasyon ve stabilite problemlerinde yeterli olduğunu göstermesinin yanı sıra bazı çalışmalar geleneksel değerlendirme yöntemleriyle yapılan hesaplamaların çeşitli sayısal analizler ve bilgisayar programları kullanılarak yapılması halinde, daha ekonomik çözümler sunulabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca yöntemin bu çözümlerle daha başarılı hale gelebileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmalardan biri Küsin (2009)’ in yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmasında yazar, ilk olarak jet grout kolonlarının dayanım duvarlarında kullanımına yönelik uygulamayı daha sonra ise birim hücre ve homojenleştirme metodu kullanılarak jet grout kolonlarının temel altında kullanımına yönelik uygulamaları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemlerini ve gerekli parametreleri incelemiş ve jet grout kolon hesaplarının genellikle klasik kazık taşıma gücü formülasyonları ile tek bir kolon için yapıldığından dolayı zemin-yapı davranışının detaylı olarak incelenemediğini belirtmiştir. Bu durumdan dolayı güvenlik faktörlerinin

yüksek tutularak çözümün ekonomikliği açısından elverişsiz bir durum oluşturulduğunu da sözlerine eklemiştir.

Sayısal analiz sonuçlarının klasik yöntemle göre daha ekonomik sonuçlar verdiği, analiz sonuçlarının model deneyin göçme değerleri ile benzer ancak deformasyon değerleri ile farklı çıktığı belirtilmiştir. Saplama duvar kullanıldığında dayanım duvarındaki yatay ve düşey deformasyonların azalarak güvenlik sayısının arttığı ancak çift sıra dayanım duvarı imalatında sıralar arasındaki açıklığın artması ile güvenlik sayısının azaldığı da tespit etmiştir.

Buna benzer bir sayısal analiz çalışması da Borges ve Marques (2011) tarafından gerçekleştirmiştir. Yazarlar bu çalışmalarında dolgu yüksekliği, kolon elastisite modülü ve kolon aralığının geosentetik güçlendirmeli ve jet grout ile desteklenmiş dolgunun davranışına etkisini, biot konsolidasyon teorisi ve p-q kritik durum modeli ile çalışan sayısal analiz programı ile incelemişlerdir.

Analizlerde özellikle; oturma, artan boşluk suyu basıncı, efektif gerilme, gerilme seviyesi, geosentetikte gerilme miktarı, zemin kemerlenme etkisi ve toplam verim(etkinlik) katsayısı önemsenmiştir. Çalışma sonunda sunulan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Dolgudan kolona yük aktarımı; dolgudaki kemerlenme, geosentetiğin uyguladığı gerilme ve kolon-yumuşak zemin arayüzündeki kayma gerilmesi olmak üzere 3 mekanizma ile gerçekleşmekte ve kolon ve geosentetikle güçlendirme yöntemi, dolgu tabanı ve dolgu üstünde oturmaları ciddi şekilde azaltmaktadır.
- Geosentetikteki gerilme uzaklık çapı ile üniform şekilde dağılırken kolonlardaki efektif gerilme dış sınırdan en yüksek olmak üzere üniform olmayan şekilde artmakta ve kolon yüzündeki teğetsel gerilme kolonun başlık kısmında en büyük değerini almaktadır.

- Dolgu yüksekliği 3 m veya daha fazla olduğunda kemerlenme etkisinin artmasıyla toplam verim katsayısı 0.85' lere ulaşmakta ve bu dolgu yükünün %85' lik kısmının jet grout kolonlarla karşılandığı manasına gelmektedir fakat bu kemerlenme oranı inşaat esnasında neredeyse sabit iken inşaat sonrası aşamada azalarak kolon başlıklarına aktarılan yük miktarını artırmakta, oturma esnasında meydana gelen kemerlenme kayma gerilmesini harekete geçirerek zemin gerilmesini artırmaktadır.
- Kolonun mukavemeti arttıkça kolon ve yumuşak zeminde oturma miktarı azalmakta ancak bu azalma 100 – 1000 MPa aralığında görülmekte, diğer aralıklarda ise sabit kalmaktadır.
- Kolon ara mesafeleri arttıkça, kemerlenme oranında azalma ve geosentetiğin kolona aktardığı yükteki artışla birlikte toplam verim(etkinlik) katsayısında azalma görülmektedir.

Jet grout yöntemi; yapılan dayanım duvarları, diyafram duvarlar ve kazıklı duvarlar için alternatif bir çözüm oluşturmaktadır. Silindirik elemanlardan oluşan sürekli duvarlar birçok amaç için tipik bir model oluşturmaktadır. Projede öngörülen duvar kalınlığı, imal edilen duvar kalınlığından büyük ise duvar kalınlığını artırmak amacıyla ikinci sıra jet grout elemanları inşa edilebilmektedir.

Racansky vd. (2008), destekli ve desteksiz duvarların deformasyon ve güvenlik sayılarını farklı destek aralıklarında iki ve üç boyutlu analizler ile inceleyerek dayanım duvarı kalınlıklarının etkilerini belirlemeye çalışmış ayrıca ara yüzey elemanlarının ve farklı ağ boyutlarının sonuçlara etkisini de irdelemişlerdir. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda ikinci sıra jet grout elemanlarının hepsinin inşa edilmemesinin yapının stabilitesine önemli derece etkisi olmadığı, destekler arasındaki mesafenin etkisinin olduğu görülmüş ve bu bilgiler göz önünde bulundurularak yapılacak tasarımların dayanım yapılarının inşaat maliyetlerinin azaltılabileceğini belirtilmiştir.

2.9. Jet Grout Kolonlar Kullanılarak Permeabilitenin Azaltılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Jaritngam (2003), çalışmasında Tayland’ da bir yumuşak kil zemin olan yol alt temelinin taşıma kapasitesini artırmaya yönelik gerçekleştirilen jet grout zemin iyileştirmesini ve bu tasarıma ait sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdiği analiz sonuçlarını vermiştir. Tayland’da bulunan Pak Phanang barajının kayma güvenliğinin artırılması için yapılan iyileştirme çalışmasına ait jet grout kolonlarının çaplarını, kolonlardan alınan karotların 28 günlük serbest basınç dayanımlarını ve Bishop yöntemiyle sonlu elemanlar analizinden elde ettiği kayma güvenliği sonuçlarını sunarak jet grout kolonun geleneksel kazıklara göre avantajlarını göstermiştir. Zeminin iyileştirme öncesi ve sonrası durumunu karşılaştırarak jet grouting ile iyileştirme yönteminin bu uygulamalardaki uyumluluğunu ve etkinliğini incelemiştir.

Bu çalışmasında jet grout yöntemi ile iyileştirmenin toplam oturmaları, sıkışabilirliği ve permeabilityi azalttığını, yöntemin her çeşit zeminde su seviyesi üzerinde ve altında basit olarak uygulanabilirliğinin bu yöntemin en büyük avantajlarından olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca kolon alanının iyileştirilen alana, kolon uzunluğunun iyileştirilen tabaka derinliğine oranının ve kayma mukavemetinin artmasının, toplam oturmayı azalttığını ifade etmiştir. Zemin ile çimentonun karışmasının dayanım ve sıkışabilirliğe etkisi fazla olduğundan, sahada bu karışma işleminin yeterliliğinin iyi takip ve kontrol edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Gazzarrini (2005), Columbia’da bir tünelin yanına yapılmak istenen yeraltı otoparkı için yapılacak kazıdan tünelin zarar görmemesi için jet grout yöntemi ile zemin stabilizasyonunu sağlamak ve zemin suyunun sızmasını engellemek için sızdırmazlık duvarı oluşturulmasına ait çalışmayı sunmuştur.

Konulan sensörlerle yöntemin uygulanması esnasında tünelde hareket gözlemlenmediğini, sızdırmazlık duvarı ve tünel arasında herhangi bir sızma meydana gelmediğini dolayısıyla Columbia’ da yeni kullanılmaya başlayan bu

yöntemin başarılı olduğunu ve gelecekte bölgede çok büyük projelerin yapılmasına imkan sağlayacak yeni teknolojilerden biri olduğunu ifade etmiştir.

Ayrıca imalata başlanmadan önce birkaç deneme kolonu imal edilmiş ve bunlardan elde edilen gözlemlerle optimum parametrelere karar verilmiş, daha düşük basınç kullanmak ve daha büyük çap elde etmek için ikili jet sistem (Jet 2) kullanılması düşünülmüş, 1 – 1,1 m civarında kolon çapları elde edilmiştir.

Chuaqui vd. (2012), Durham bölgesinde yapılan kanalizasyon sistemine ait 2 girişte zeminin su, az çakıl ve zayıf kil izleri görülen kumlu silt olması nedeniyle kazı esnasındaki olası tehlikenin önlenmesi için zeminin permeabilitesini azaltmak ve zemin stabilizasyonunu sağlamak üzere yapılan çift akımlı jet grout uygulamasını sunmuş ve çalışmadan bazı sonuçlar elde etmeye çalışmışlardır.

Uygulamada, ilki oluşan kolonların çaplarının yeterliliğinin ve ikincisi iyileştirilen zeminin serbest basınç mukavemeti ve permeabilitesi gibi özelliklerinin kontrolünü amaçlayan iki aşamalı test sistemi izlenmiştir. Ve üretim esnasında da periyodik şekilde süreklilik, permeabilite ve dayanım testleri yapılmaya devam edilmiştir.

Karot alırken kolonun hırpalanacağı ve mukavemetinin düşeceği düşünülerek, dışarı taşan karışım ile silindir numuneler elde edilmiş bunlar üzerinde de serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ancak karışım iyi gerçekleşmemiş ise oluşturulan numunelerin iyileştirilen zemini tam temsil etmeyebileceği bu yüzden sonuçlarının doğruluğunun irdelenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Permeabilite testleri de karot numunesinde değil bizzat sahada yapılarak daha doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Uygulanan enerji ile oluşan kolon çapları arasında genellikle lineer davranış olduğu, nozul çapı 5,5 mm iken 5mm olması durumuna göre daha büyük çaplar elde edildiği görülmüştür. Yöntemin yer altı suyu önlemede ve stabilite problemlerinde etkili bir çözüm olduğu, kolon hiza ve konumlarının önem arz ettiği; etkili bir proje için kalite kontrolünün, uygun parametre ve aparatları

belirlemek için sahada deneme uygulaması yapılmasının çok önemli ve gerekli olduğu sonuç olarak sunulmuştur .

Jet grout kolonlarla iyileştirme yönteminin permeabilite problemlerinde başarılı olduğunu ifade eden diğer çalışmalara karşın Püsküllüoğlu (2010), Oşkan HES sahasındaki Fliş birimini üzerleyen alüvyon tabakanın 10^{-2} - 10^{-3} m/sn ve Berkman HES sahasındaki alüvyon tabakanın ise 10^{-3} - 10^{-5} cm/sn değerlerinde olan geçirimsizliklerinin azaltılması için yapılan jet grouting çalışmasını sunmuştur. Kazı aşamasında inşaat alanının çevresinde jet grout yöntemiyle yapılan kolonlardan oluşan bir perde uygulaması ile yeterli düzeye indirilememesi üzerine gövde ekseni ve dolu savak üzerinde projelendirilen hat üzerinde slurry trench yöntemiyle plastik beton duvar oluşturularak yeterli geçirimsizlik sağlanabilmiştir. Alüvyon olan baraj temellerinde geçirimsizliğin jet grout kolonu uygulamasıyla tek başına sağlanamayacağını, slurry trench yönteminin ise özellikle geçirimli ve çok geçirimli alüvyon zeminlerde başarılı olduğunu belirtmiştir.

2.10. Jet Grout Kolonların Zeminlerin Sıvılaşma Direnci Üzerine Etkisi

2.10.1 Sıvılaşmanın tanımı ve sıvılaşma kriterleri

Suya doymuş granüler zeminlerde deprem ile birlikte tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalınmakta ve bu durum boşluk suyu basıncı çok fazla artarak zeminin kayma mukavemetinin ve efektif gerilmelerin azalması dolayısıyla da zeminin taşıma kapasitesinin düşmesine veya tamamen kaybolmasına neden olabilmektedir. Zeminde maruz kalınan bu duruma “sıvılaşma” olarak tanımlanmakta ve bu durum depremler sırasında üstyapıda meydana gelen hasarların başlıca sebeplerinden biri olarak gösterilmektedir. Depremlerle birlikte harekete geçebilen sıvılaşma mekanizmasının zeminin mukavemetinde azalmalara neden olduğu, yapıların temellerini destekleyen zeminlerde olduğu takdirde ise yapının dönmesine veya zemin içine batmasına sebep olabileceği bilinmektedir. Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler üzerinde inşa edilen yapılarda depremle birlikte meydana gelen devirsel

yüklerle birlikte oturma ve taşıma gücü problemleri görülebilmektedir. Bu yüzden deprem potansiyelinin bulunduğu bölgelerde yapılan hesaplamalarda sıvılaşma durumu göz önünde bulundurulmalıdır.

Son 20-30 yıl içerisinde yapılan araştırmalarda, az ince daneli granüler yapıdaki ve temiz kumlu zeminlerin deprem kaynaklı sıvılaşmaya karşı hassas oldukları görülmektedir. Bununla birlikte kohezyonlu siltli zeminlerin de potansiyel sıvılaşma durumu son dönemlerde yapılan çalışmalara konu olmaktadır (Bakım, 2007).

a) Dane boyu 0.005 mm den küçük olma yüzdesi $\leq \%15$

b) Zeminin Likit Limiti (LL) $\leq \% 35$

c) Su muhtevası (w) $\geq 0.9 * LL$

Yukarıdaki kriterleri sağlayan zeminler sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler olarak tariflenmektedir (Youd ve Idriss, 1997) .

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine dair başka bir çalışmada da zeminin aşağıdaki özellikleri gösterdiği takdirde sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir (Ishihara ve Yoshimine, 1998).

1 - Dane içeriği (200 nolu eleği geçme miktarı) $\leq \% 35$

2 - Ortalama parça çapı (D_{50}) ; $0.02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 2 \text{ mm}$

3 - Doygun tabakanın derinliği ≤ 15 ile 20 metre

4 - SPT - N değeri ≤ 20 ile 30

Türkiye’de 1998 tarihli deprem yönetmeliğine bakıldığında ise yer altı su seviyesi zemin üst seviyesine 10.0 metreden yakınsa ve ;

- Söz konusu sahada kalın ve gevsek/yumuşak alüvyon katmanı bulunuyorsa
- Söz konusu sahada gevsek kum-silt tabakası bulunuyorsa bu zemin sıvılaşma potansiyeline sahip bir zemin olarak nitelendirilmektedir.

Yukarıda tarif edilen, ulusal ve uluslararası platformda çeşitli araştırmalarda öngörülen kriterlere göre suya doymuş temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabildikleri görülmüştür. Yapılan yeni çalışmalarla birlikte, daha önceleri sıvılaşmayacakları düşünülen siltli kum veya kumlu siltten oluşan suya doymuş tabii zemin tabakalarının da depremler sırasında sıvılaşabilecekleri yapılan araştırmalarda ortaya çıkmıştır (Erken vd., 1995).

Bazı uluslararası bilimsel araştırmalarda iri daneli ve çakıllı zeminlerin de potansiyel olarak sıvılaşabildikleri rapor edilmiş ancak çakıllı zeminlerin geçirimli olması ve sismik yüklemeler altında oluşan tekrarlı boşluk suyu basınçlarını göreceli olarak çabuk dağıtmaları nedeniyle ince daneli kumlu zeminlere göre farklı davranış gösterdikleri görülmüştür. Bu farklılıktan dolayı çakıllı zeminlerin:

- Çakıllı zeminlerin daha az geçirimli tabakalar arasında sıkışması
- İnce daneli zeminlerin, çakıllı zeminlerin boşluklarını doldurması
- Çakıllı tabakaların oldukça kalın olduğu ve tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basınçlarının dağılması için gerekli drenaj boylarının uzaması durumlarında sıvılaşma potansiyeline sahip olacakları belirtilmiştir (Evans, 1987).

Saha deneylerinin yapılması, sıvılaşma potansiyelinin nicel değerlendirmesinde en yaygın mühendislik yaklaşımıdır. Yapılan araştırmalar neticesinde standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT), arazi kayma dalga hızı (V_s), Becker penetrasyon deneyi (BPT) yararlı bilgiler sağlayabilecek olgunluğa ulaşmıştır (Bakım, 2007).

2.10.2 Jet grout kolonların dinamik etki ve sıvılaşmaya karşı kullanılması üzerine yapılan çalışmalar

Durgunoğlu vd. (2004), 1999 Kocaeli depreminde en fazla 0,3g ölçülen ivme ile yer sarsıntısına maruz kalan Karamürsel’de daha önce jet grout yöntemi ile iyileştirilmiş olan İpek kağıt fabrikası arazisi ile etraftaki iyileştirilmemiş arazilerin ve bu arazilerde bulunan yapıların deprem sonrası durumlarını gözlemlemişlerdir. Gözlemlerinin sonucunda, jet grout yönteminin deprem hasarlarını ve sıvılaşma potansiyelini azaltmada başarılı bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Durgunoğlu vd. (2002), 1.derece deprem bölgesi olan İzmir-Tire’ de anakaya üzerine alüvyon formasyon ve dolgu zemin bulunan sigara fabrikası sahasında taşıma gücü ve oturma problemlerine karşı fazla yüklü kısımlara soket kazık, sıvılaşma problemine karşı da jet grout zemin ıslah yönteminin uygulandığı bir vaka analizi sunmuşlardır.

Jet grout yöntemi uygulanmadan önce, tekli jet sistemi (Jet 1) ve ikili jet sistemi (Jet 2) için en uygun imalat parametrelerini belirlemek üzere test kolonları oluşturulmuştur. Bu kolonlara yükleme deneyi uygulanmış, çap kontrolleri yapılmış ve mukavemetlerinin belirlenmesi için karotlar alınarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen değerler incelenerek belirlenen optimum parametrelerle deneme kolonları imal edilerek tekrar revize edilmiş ve nihai optimum parametreler belirlenmiştir.

Ayrıca kalite kontrolün sürekliliği için iyileştirme uygulaması esnasında ilk 60 dakika içinde ıslak numune alınarak belirli kür süreci sonrası enjeksiyon

karışımına ait özgül ağırlık ve viskozite ölçümleri yapılmış, kolonlar 4 tarafından fotoğraflanmış, her yarım metrede çap ölçümü yapılmış ve bazı kolonlarda yükleme testleri yapılarak taşıma gücü ve deformasyonlarının projede öngörülen kriterleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda araştırmacılar, basınç mukavemetinin hızlı bir şekilde arttığını ve zamanla bu değerin fazla değişim göstermediğini, büyük çapta imal edilen kolonlarda basınç mukavemetinde bir miktar azalma olduğunu, tekli jet sistem (Jet 1) ile imal edilen kolonlarda zemin ve çimentonun ikili jet sistem (Jet 2) ile imal edilen kolonlara göre daha homojen karıştığını, daha küçük çaplara ve daha düşük deformasyonlara sahip olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca basınç mukavemetlerinin birbirlerine yakın olmakla birlikte daha yüksek olduğunu, buna karşın bu projede zemin ıslahının asıl amacının sıvılaşma olması nedeniyle geniş çaplı kolonların meydana geldiği ikili jet sistemi(Jet 2) yönteminin tercih edildiğini ifade etmişlerdir.

Dinamik etki ve sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesinde başarılı yöntem olduğu belirlenen jet grout yönteminin, mevcut binalarda nasıl bir sonuç vereceğine dair Doğu (2005), bir çalışma yapmış ve çalışmasında İstanbul’ da bulunan Mabeynci Arif Bey Yalısı’nın zemininde ölçülen sıvılaşma potansiyelinin; zeminde teşkil edilen jet grout kolonları ile azaltılmasını araştırmıştır. Çalışmasında öncelikle Mabeynci Arif Bey Yalısı’nın zemininde sıvılaşma potansiyelini incelemiş, jet grout imalatları öncesi ve sonrası kuyu içi yönteminden elde edilen arazi kayma dalgası hızlarına göre sıvılaşma ile ilgili değerlendirmeler yapmıştır.

Arazide yapılan sondaj çalışmalarına göre yüzeyden itibaren ilk 6-8 m derinliğinde ortalama SPT değerleri 14 olan yapay dolgu tabakası bulunduğu, bu tabakanın altında ise 18 m yüksekliğinde SPT değerleri 3 ile 20 arasında değişen gevşek ve boşluklu siltli kumlu kabuk tabakası ile SPT değerleri 31-69 arası değişen çakıllı kabuk tabakaları olduğu belirtilmiştir. Bu tabakanın afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmeliğe göre Z4 sınıfında zemine tekabül ettiği ve yüzeyden 2.4m aşağıda yer altı suyu seviyesine rastlanıldığı

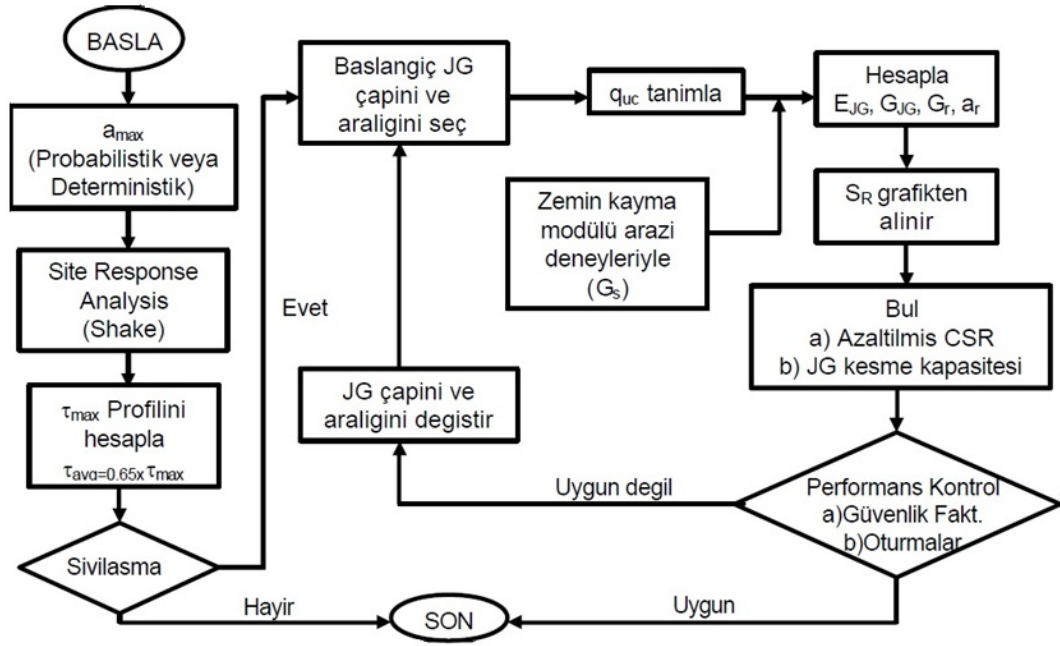
belirtilmiştir. Siltli kumlu tabakada SPT değerlerinin 20' den küçük, gevşek ve boşluklu olmasından dolayı bu tabakanın sıvılaşma için risk teşkil ettiği gösterilmiştir.

Mabeynci Arif Bey Yalısı Marmara Denizi ile bağlantılı olup bodrum kat kazısı sırasında tabandan su gelmesinin önlenmesi ve kazı yan yüzeylerinin desteklenmesi amacı ile öncelikle 80 cm çapında jet grout kolonları ile ağırlık duvarları oluşturulmuştur. İslah öncesi ve ıslah sonrası sondaj kuyularında kuyu içi yöntemiyle elde edilmiş olan arazi kayma dalgası hızlarından, ıslah sonrası kayma dalgası hızlarının yaklaşık 2 katına kadar çıktığı belirtilmiştir.

Çalışmada, ıslah sonrası arazi kayma dalgası hızlarını değerlendirerek sıvılaşma riskinin bulunduğu siltli kum tabakasında ıslah sonrası sıvılaşma etkisinin giderildiği sonucuna varılmıştır.

Aynı yapı ile ilgili bir başka çalışma da Ayan (2009), tarafından gerçekleştirilmiştir. Mabeynci Arif Paşa Yalısı için sıvılaşmaya karşı jet grout kolonu ile zemin iyileştirme projesi incelenerek yöntemin başarıyla uygulanabildiği belirtilmiş ve zeminlerin iyileştirilme yöntemlerindeki yeni gelişmeler ele alınmıştır.

Jet grout yönteminin başarısının sıvılaşma açısından değerlendirilmesi ile alakalı olarak Özsoy ve Durgunoğlu (2003)' nun yayınlamış olduğu makale kapsamında jet grouting ve deep mixing zemin ıslahı teknikleriyle sıvılaşmanın etkilerinin azaltılmasına yönelik yeni bir hesap metodu önerilmiştir (Şekil 2.29). Deprem sebebiyle oluşan kayma gerilmelerinin tanımlanan birim alanlar üzerine dağılımı, zemin - çimento karışımı kolonlar ve çevrelerindeki zemin arasındaki kayma modülü farkı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen metodun etkinliği Ford – Otosan Gölcük Tesisleri sahasında yapılan zemin ıslah çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. 29. Önerilen hesap algoritması (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003)

Bu çalışmada önerilen hesap yöntemi kısaca, deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak, yüksek kayma modüllü kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında kayma modülleri oranında dağılacağı kabulüne dayanmaktadır. Bu bakımdan çalışmada, önerilen metodun uygulamada ekonomik ve güvenli sonuçların elde edilmesinde yararlı olacağının beklendiği belirtilmiştir. Çalışmada yapılan kabullerin iki veya üç boyutlu sonlu elemanlar metodu veya sonlu farklar metodu modelleri ile kontrolünün yapılması önerilmiştir.

Bir benzer çalışmada Durgunoğlu (2004), İzmit Carrefoursa' nın jet grout ile iyileştirilmesinin kısmen tamamlandığı bölgelerindeki deprem davranışını gözlemlemiştir. Deprem sonrası ince daneli zeminler üzerinde yapılan deneyler sonucunda sıvılaşmaya karşı zemin güvenliğini hesaplamada kullanılan Chinese kriterinin bazı zeminlerde geçerli olmadığını belirlemiş ve bu tür zeminler için yeni bir kriter önermiştir (Bray vd., 2004).

Bu kritere göre ;

$I_p < 12$ ve $w_n/LL > 0.9$	sıvılaşabilir,
$12 < I_p < 20$ ve $0.8 < w_n/LL < 0.9$	ara durum , deney yapılmalı,
$I_p > 20$ ve $w_n/LL < 0.8$	sıvılaşmaz, olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca yazar, temel mühendisliği tasarımlarında sıvılaşmanın mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini, bu çalışma ile jet grout yönteminin geçerliliğinin kanıtlandığını, zeminin yatay yayılımını ve düşey deplasmanlarını sınırlayabilen bu yöntemin mevcut binalara da uygulanabilir olmasının büyük bir avantaj olduğunu da ifade etmiştir.

Statik yükler altında jet grout hesaplarının tablolama programı ile yapılarak kolaylaştırılmasını, hataların azaltılmasını ve önlenmesini amaçlayan Alkaya ve Yeşil (2011), bu amaçla geliştirdikleri ve gerekli kolon sayısı seçilerek bu kolon sayısının statik yükler altında sıvılaşmaya karşı yeterli olup olmadığının kontrol edilebildiği programı sunmuşlardır.

2.11. Jet Grout Kolonların Bilgisayar Programlarıyla Analizi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Gelişen teknolojiyle birlikte jet grout kolonlarıyla iyileştirme yönteminin hesaplanmasında analiz programları yaygınca kullanılmaya başlanmış ve yapılan çalışmalarla bu analizlerde tasarım ve parametrelerle alakalı çeşitli kabul ve önerilerin ne kadar gerçekçi olup olmadıkları belirlenmeye çalışılmıştır.

Ou vd. (2007), öncelikle yumuşak kil zeminlerdeki derin kazılarda aşırı duvar sehimleri ve zemin oturmasının çok yaygın görülen bir problem olduğunu ve özellikle bitişik nizam yapılarda önemli hasarlara yol açtığını vurgulamış, duvar sehimlerini veya zemin oturmalarını azaltmak için zeminin genellikle jet grout

veya derin kompaksiyon yöntemiyle iyileştirildiğini ancak iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde bir takım sorunlar olduğunu ve gerçek durumun tam olarak yansıtlamadığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Ölçülen duvar deformasyonları ile analizlerden elde edilen deformasyonları karşılaştırmışlar ve aralarında çok iyi bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir.

Tschuchnigg ve Schweiger (2008), jet grout kolonlarının klasik kazık veya kazıklı radye temellere ekonomik alternatif olarak kullanılabileceğini, problemi çözmek için çok sayıda jet grout kolonları inşaat edilmesi gereken durumlarda analiz zor olacağından hesaplamalarda numerik metotların kullanımının giderek arttığını belirtmişlerdir. İki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak yapılan modellemelerin tüm elemanların arazi şartlarındaki gibi tanımlandığından üç boyutlu modellemeler kadar hassas sonuçlar vermeyeceğine ancak problemi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellemenin de oldukça karmaşık olduğuna dikkat çekmişlerdir. Modellemelerin karmaşıklığını azaltmak için en uygun metodun, kazıkların sürekli ortamda sonlu elemanlar yöntemiyle net olarak modellenmediği ancak kazık çakma davranışını ele alan özel bir formülasyonla sonlu elemanlar yöntemine uyumlandıran gömülü kazık konsepti olduğunu ifade etmişlerdir. Bu amaçla çalışmada yayılı yük altındaki jet grout kolonu analizlerinde iki boyutlu düzlem deformasyon, üç boyutlu ve gömülü kazık modelleri kullanılarak yaptıkları sayısal analizler sonucunda bu modelleri karşılaştırmışlardır.

Doğanışık (2010), çalışmasında kohezyonsuz zeminlerde oluşturulan jet grout kolonlara yükleme deneyleri uygulamak ve kolonların içerisine birim deformasyon ölçerler yerleştirmek suretiyle kolonların düşey yüklerin etkisi altındaki performansları ve kolon bünyesinde oluşan gerilme dağılımlarını incelemiştir. İmal edilen kolonların kalite kontrolü için alınan karotlara uygulanan serbest basınç deneyi, süreklilik deneyi ve yükleme deneylerinin sonuçları ile bu kolonların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarını ilişkilendirerek en yakın modelin nasıl kurulabileceğini belirlenmeye çalışmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışmada, materyal olarak beş girdi ve bir çıktı olmak üzere toplam altı parametre kullanılmıştır. Girdi parametreleri; enjeksiyon basıncı, çekme hızı, nozul çapı, zeminin standart penetrasyon sayısı ve zeminin ince dane oranıdır. Çıktı ise oluşan jet grout kolonunun serbest basınç dayanımıdır. (Bakım, 2007)' den ve ZETAŞ A.Ş.' nin sahada gerçekleştirmiş olduğu çalışmalara ait verilerden istifade edilerek elde edilen veriler bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi kullanılarak incelenmiş ve girdi parametrelerinin çıktıya olan etkileri incelenmiştir.

3.2. Yöntem

Jet grout kolonu imal edilirken kullanılan jet grout parametreleri ve iyileştirme öncesi zemin durumuna ait parametreler kullanılarak, bu kolonun serbest basınç dayanımının tahmini için ilk olarak "Bulanık Mantık Metodu" ile model kurulmuştur. Bu yöntemi karşılaştırmak için ikinci bir yöntem olarak, tahmin modellerinde sıklıkla kullanılan istatistiksel yöntemlerden "Çoklu Regresyon Analizi" kullanılmıştır.

3.2.1. Bulanık mantık yöntemi

Günlük hayatta kesin olarak bilinmeyen veya önceden sanki kesinmiş gibi düşünülen ama sonuçta kesinlik arz etmeyen durumlarla karşılaşılabilir. Bu durumların sistematik bir şekilde önceden planlanarak sayısal öngörülerinin yapılması ancak bir takım kabul ve varsayımlardan sonra mümkün olabilmektedir (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).

Gerçek dünya karmaşıktır. Bu karmaşıklık genel olarak belirsizlik, kesin düşünceden yoksunluk ve karar verilemeyiştten kaynaklanır. Bilgisayarlar bu tür belirsizlikleri işleyemezler, çünkü bilgisayarların çalışması için sayısal bilgiler

gereklidir. Bilgisayarlardan farklı olarak insanın yaklaşık düşünme, oldukça yetersiz, eksik ve belirsizlik içeren veri ve bilgi ile işlem yapabilme yeteneği vardır. Genel olarak, değişik biçimlerde ortaya çıkan karmaşıklık ve belirsizlik gibi tam ve kesin olmayan bilgi kaynaklarına bulanık (fuzzy) kaynaklar adı verilir. Zadeh (1968), gerçek dünya sorunları ne kadar yakından incelemeye alınırsa, çözümün daha da bulanık hale geleceğini ifade etmiştir (Saplıoğlu, 2010).

1965'de L. A. Zadeh (Lütfi Askerzade), yeni bir matematiksel yöntemi açıklayan "Fuzzy Sets (Bulanık Kümeler)" adlı ünlü makalesinde; "kısa adam", " güzel kadın" veya "1'den daha büyük gerçek sayılar" gibi belirsiz kümeleri veya şüpheli fikirleri elde etmeye ve tanımlamaya olanak sağlayan yöntemden bahsetmiştir. O zamandan günümüze, bulanık kümeler kuramı hem Zadeh' in kendisi, hem de sayısız araştırmacı tarafından hızlı bir biçimde geliştirilmiştir. Aynı zamanda bu kuramın gerçek uygulamaları da başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Bulanık kümeler kuramının ana fikri, tamamen sezgisel ve doğal olmasıdır (Sakawa, 1993; Saplıoğlu, 2010).

Bulanık mantığın en geçerli olduğu iki durumdan ilki, incelenen olayın çok karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda kişilerin görüş ve değer yargılarına yer vermesi, ikincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine gereksinim gösteren hallerdir (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010).

3.2.1.1. Bulanık kümeler ve üyelik dereceleri

Aristo mantığına göre çalışan ve şimdiye kadar alışlagelen klasik küme kavramında, bir kümeye giren öğelerin oraya ait oluşları durumunda üyelik dereceleri 1'e, ait olmamaları durumunda ise 0'a eşit var sayılmıştır. İkisi arasında hiçbir üyelik derecesi düşünülemez. Bulanık kümeler kavramında ise 0 ile 1 arasında değişen, değişik üyelik derecelerinden söz etmek mümkündür. Bu şekilde tanımlanan üyelik derecelerinin her bir bulanık söz için üç temel özelliği sağlaması gerekir (Saplıoğlu, 2010):

1 . Bulanık küme normaldir, yani kümede bulunan elemanlardan en az bir tanesinin en büyük üyelik derecesi olan 1'e sahip bulunması gerekir.

2. Bulanık küme monotondur, yani üyelik derecesi 1'e eşit olan öğeye yakın sağda ve soldaki öğelerin üyelik dereceleri de 1'e yakın olmalıdır.

3. Üyelik derecesi 1'e eşit olan öğeden sağa ve sola eşit mesafede hareket edildiği zaman bulunan öğelerin üyelik derecelerinin birbirine eşit olmasıdır ki, buna da bulanık kümenin simetrik özelliği adı verilir.

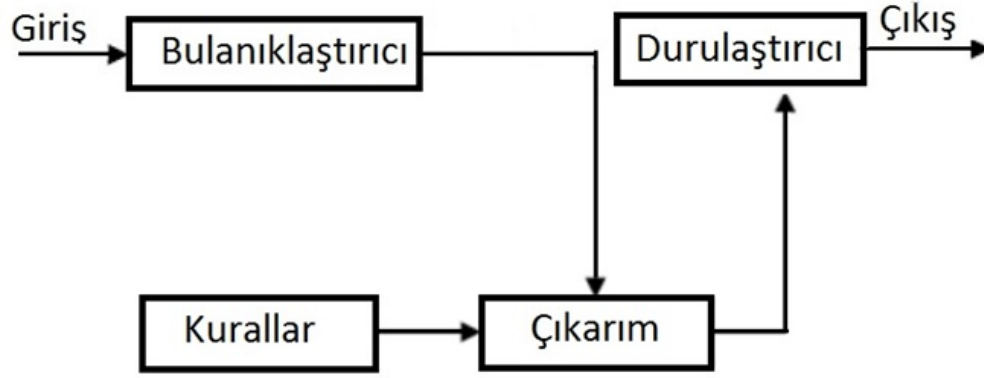
Klasik kümelerle bulanık kümelerin arasındaki önemli farklardan bir tanesi, klasik kümelerin sadece bir tane dikdörtgen üyelik derecesi fonksiyonu bulunmasına karşılık, bulanık kümenin yukarıdaki üç şarttan ilk ikisini mutlaka sağlayacak biçimde değişik üyelik derecesi fonksiyonlarına sahip olmasıdır. Yani bulanık küme üyelik derecesi fonksiyonlarının mutlaka simetrik olması özelliğini sağlamasına gerek yoktur.

Genellikle bilinen matematik, stokastik veya kavramsal sistemlerin hemen hepsi Şekil 3.1' de görülen üç ayrı birimden ibarettir. Bunlar giriş, bu girişi çıkışa dönüştüren ve sistem davranışı olarak isimlendirilen bir kutu ve buradan çıkış kısımlarıdır. Bu birimlerin hepsinde sayısal veri çıkış veya işlemler yapılmaktadır (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).



Şekil 3. 1. Klasik sistem (Şen, 2001)

Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı sistem davranışı kısmının dörde ayrılarak Şekil 3.2' de gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin olmasıdır.



Şekil 3. 2. Bulanık mantığın temel elemanları (Şen, 2001)

Girdi değerleri çoğunlukla kesin değerlerdir. Bulanıklaştırıcının görevi, bulanık kümeler içine kesin sayıları haritalamaktır. Kurallar “Eğer-İse” kurallarının oluşturduğu bulanık mantığı esas alır. Bir tipik “Eğer-İse” kuralı: “Eğer çekme hızı çok ise jet grout kolonun serbest basınç mukavemeti azdır” dır.

Klasik uzman sistemlerde, kurallar insan deneyimlerinden çıkarılır. Bulanık kural tabanlı sistemlerde, kural tabanı insan deneyimlerinin yardımıyla şekillendirilir. Bulanık kural tabanında kullanılan insan deneyimlerinden elde edilen sözel bilgi ve ölçümlerden elde edilen sayısal bilgi birleştirildiğinde ilginç bir durum ortaya çıkar. Bu durumda, kurallar ilk adımda sayısal verilerden çıkarılır. Sonraki adımda ise, bulanık kural tabanı insan deneyimlerinden elde edilen kurallar ile birleştirilebilir. Bulanık mantığın çıkarım makinesi, bulanık kümeler içine haritalanır. Durulaştırma esnasında, çıktı değişkeni için bir değer seçilir. Kaynaklarda birçok farklı durulaştırma yöntemi mevcuttur. Seçilen sonuç değeri çoğunlukla ya en yüksek üyelik derecesine sahip değer ya da ağırlık merkezi değeridir (Teodorovic ve Vukadinovic, 1998).

Burada bulunan birimlerin her birinin farklı, fakat birbiri ile ilişkili olabilen aşağıdaki görevleri vardır (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010):

1. Genel bilgi tabanı birimi: İncelenecek olayın maruz kaldığı girdi değişkenleri ve bunlar hakkındaki tüm bilgileri içerir. Buna veri tabanı veya

kısaca “giriş” adı da verilir. Genel veri tabanı denmesinin sebebi buradaki bilgilerin sayısal ve/veya sözel olabilmesidir.

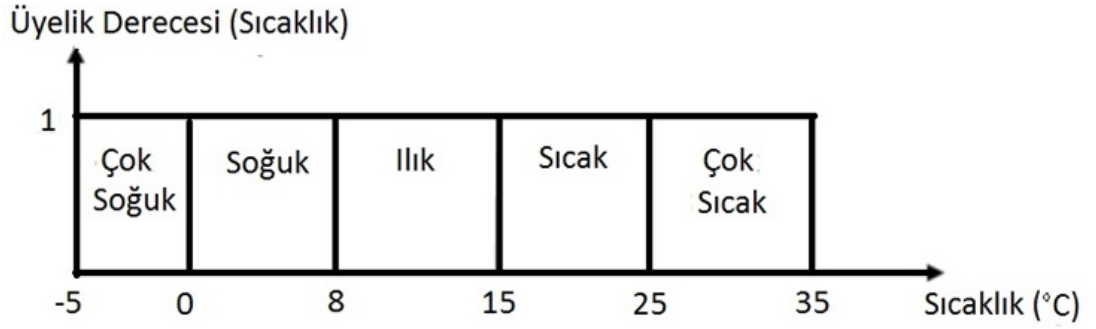
2. Bulanık kural tabanı birimi: Veri tabanındaki girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal “Eğer-İse” türünde yazılabilen kuralların tümünü içerir. Bu kuralların yazılmasında sadece girdi verileri ve çıktılar arasında olabilecek tüm aralık bağlantıları düşünülür. Böylece, her bir kural girdi uzayının bir parçasını, çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlamların tümü kural tabanını oluşturur.

3. Bulanık çıkarım motoru birimi: Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin nasıl çıktı vereceğini belirleyen işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır. Bu motor, her bir kuralın çıkarımlarını bir araya toplayarak tüm sistemin girdiler altında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yarar.

4. Çıktı birimi: Bilgi ve bulanık kural tabanlarının, bulanık çıkarım motoru vasıtası ile etkileşimi sonunda elde edilen çıktı değeri topluluğunu belirtir (Saplıoğlu, 2010).

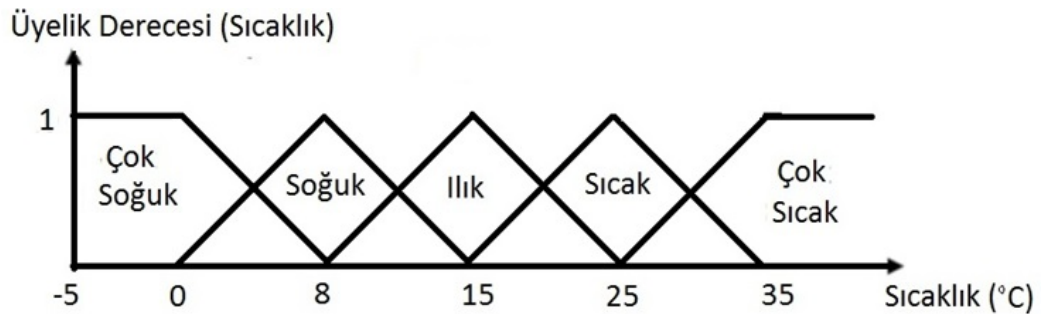
3.2.1.2. Üyelik fonksiyonları

Göz önünde tutulan bir bulanık kelime veya ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi olan kişiler tarafından belirlenebilir. Mesela, İstanbul’da sıcaklık derecesinin değişim aralığının yaklaşık olarak - 5 °C’ den + 35 °C’ ye kadar olduğu söylenebilir. İşte bu aralık sıcaklık kümesinin İstanbul için öğelerinin bulunabileceği aralığı belirtir. Böylece tüm sıcaklık uzayı belirlenmiştir. Ancak günlük konuşmalarda bu sıcaklık uzayının da bir takım alt aralıklardan oluştuğu düşünülür. Mesela, “çok soğuk”, “soğuk”, “ılık”, “sıcak”, “aşırı sıcak” gibi. Şekil 3.3’ te görüldüğü gibi bu aralıklar için tahminlerde bulunulmuş ve her bir alt aralıktan biri bitince diğeri başlamıştır (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010).



Şekil 3. 3. Bitişik dikdörtgen gösterim (Şen, 2001)

Bu aralıkların sınırlarında yine Aristo mantığına göre katı kararlar alınmalıdır. Örneğin 7,9 °C' nin soğuk, 8,1 °C' nin ise ılık olduğuna karar verilir. Bu şekilde gösterim bakımından önemli bir nokta, her alt aralığa düşen sıcaklık değerinin üyelik derecesinin, sadece o aralıkta 1'e, diğer aralıklarda ise 0'a eşit olduğudur. Bu nedenle, her sıcaklık alt kelimesinin üyelik fonksiyonu yüksekliği 1'e eşit olan bir dikdörtgen şeklindedir. Aslında, bu aralıkların arasındaki geçiş kısımlarının böyle birbirinin devamı olmayacağını ve bir örtüşmenin söz konusu olabileceği söylenirse, daha mantıklı olur. Çünkü ılık sınırının +5 ile +15 °C' de sıfır üyelik derecelerine sahip olacağı düşünülemez. Böylece, sıcaklık alt aralıklarının birbiri ile örtüşmeli geçişlere sahip olmasının gerekliliği Şekil 3.4' te gösterilmiştir. Bu fonksiyonların simetrik olması zorunlu değildir. Problemin özelliklerine göre simetrik olmayan üçgen, yamuk veya çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanılabilir.



Şekil 3. 4. Örtüşmeli üçgen gösterimi (Şen, 2001)

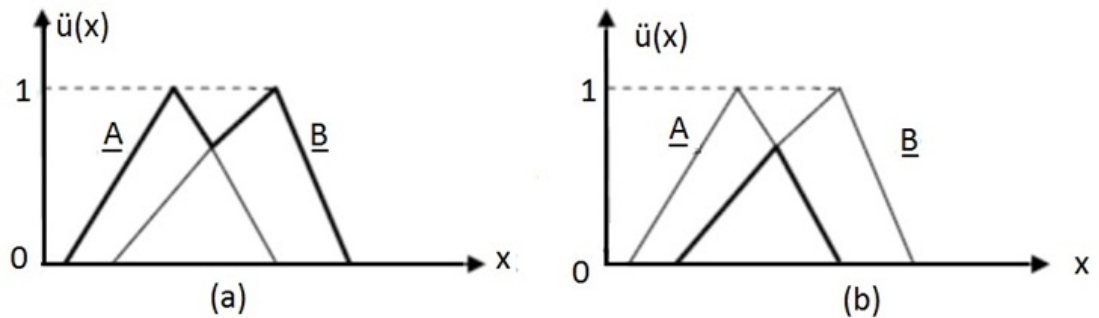
3.2.1.3. Bulanıklaştırma

Pratikte genel olarak, klasik küme şeklinde beliren değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık küme, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin, 1' e eşit üyelik derecesine sahip olacak yerde, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin başlıcaları ; a) sezgi, b) çıkarım, c) mertebe, d) açılı bulanık kümeler, e) yapay sinir ağları, f) genetik algoritmalar, g) çıkarımcı muhakemedir (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010).

3.2.1.4. Durulaştırma

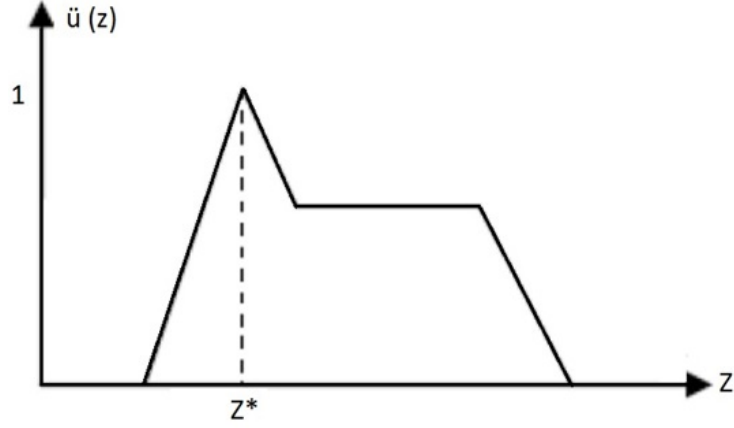
Pratik uygulamalarda, özellikle cihaz ve mühendislik plan, proje ve tasarımlarında boyutlandırmalar için kesin sayısal değerlere gereksinim duyulmaktadır. İşte bu durumlara bulanık olarak elde edilmiş veya verilmiş bilgilerden yararlanarak gerekli cevapların verilmesi için bulanık bilgilerin durulaştırılması gerekmektedir. Şekil 3.5' te iki farklı bulanık çıkarım görülmektedir. Gerçek bir uygulamada bunlara benzer veya daha farklı şekiller ortaya çıkabilir (Saplıoğlu, 2010).

Durulaştırma işlemlerinde kullanılan yedi farklı yöntem vardır. Bunların hangisinin kullanılacağına, elindeki sorunun türüne göre araştırma ve tasarım yapanın karar vermesi gerekir. Burada " Z* " durulaştırılmış değeri gösterir (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010).



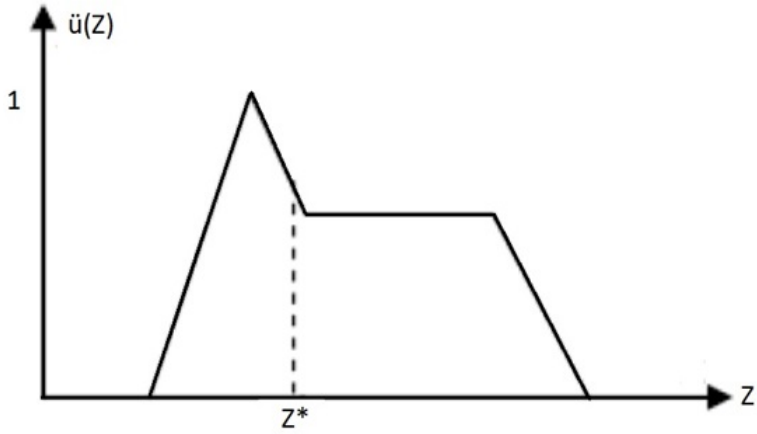
Şekil 3. 5. İki bulanık kümenin (a) birleşimi, (b) kesişimi (Şen, 2001)

1. En büyük üyelik ilkesi: Bunun diğer bir adı da yükseklik yöntemidir. Kullanılabilmesi için tepeleri olan çıkarım bulanık kümelerine gerek vardır. Şekil 3.6, bu durulaştırma işlemini göstermektedir.



Şekil 3. 6. En büyük üyelik derecesi durulaştırması (Şen, 2001)

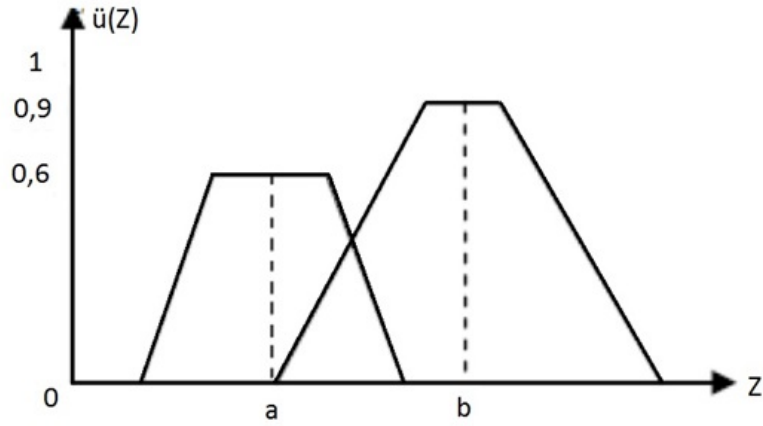
2. Sentroid yöntemi: Diğer bir adı da ağırlık merkezi yöntemidir. Durulaştırma işlemlerinde, en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Şekil 3.7, bu yöntem kullanılarak yapılan durulaştırma işlemini gösterir.



Şekil 3. 7. Sentroid yöntemi durulaştırması (Şen, 2001)

3. Ağırlıklı ortalama yöntemi: Bu yöntemin kullanılabilmesi için simetrik üyelik fonksiyonunun bulunması gerekir. Örnek olarak Şekil 3.8' de görülen bulanık kümenin ağırlıklı ortalaması (durulaştırılmış değeri) Eşitlik 3.1 ile hesaplanabilir.

$$Z^*=(a(0.6)+b(0.9))/(0.6+0.9) \quad (3.1)$$

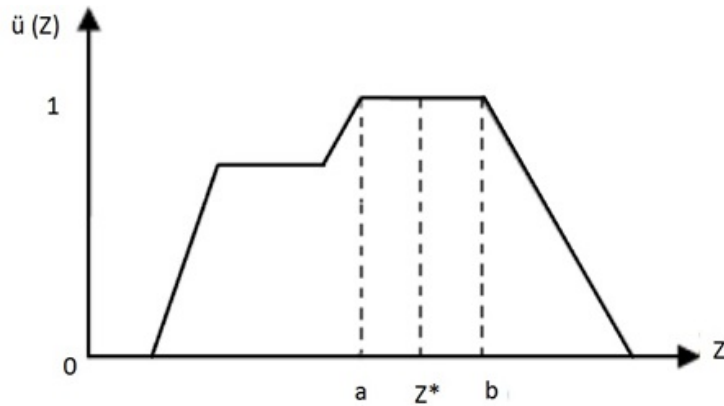


Şekil 3. 8. Örnek bulanık küme (Şen, 2001)

4. Ortalama en büyük üyelik: Bu yöntem aynı zamanda en büyüklerin ortalaması yöntemi olarak da bilinir. Bu bakımdan en büyük üyelik derecesi yöntemine çok yakındır. Ancak, en büyük üyeliğin konumu tekil olmayabilir. Şekil 3.9’ da gösterilen durulaştırma işlemine ait bu yönteme göre durulaştırılmış değer Eşitlik 3.2 ile bulunur (Saphioğlu, 2010).

$$Z^*=(a+b)/2 \quad (3.2)$$

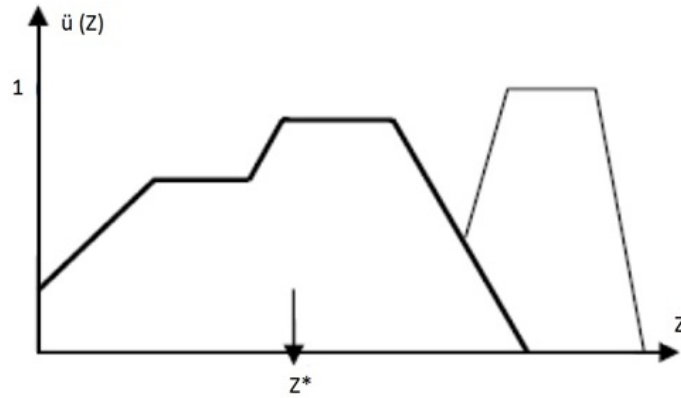
Buradaki a ve b değerleri Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 3. 9. Ortalama en büyük üyelik durulaştırması (Şen, 2001)

5. Toplamların merkezi: Durulaştırma işlemleri arasında en hızlı olan yöntemdir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine onların cebirsel toplamı kullanılır. Bunun bir sakıncası, örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Bir bakıma bu hesaplama tarzı ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzer. Ancak bu yöntemde ağırlıklar ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ağırlıklı ortalama yönteminde ise bu, üyelik derecesidir.

6. En büyük alanın merkezi: Eğer çıkış bulanık kümesi en azından iki tane dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyorsa, bu bulanık kümelerin en büyük alanlısının ağırlık merkezi durulaştırma işleminde kullanılır. Şekil 3.10, örnek bir durulaştırma işlemini gösterir (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).



Şekil 3. 10. En büyük alan merkezi ile durulaştırma (Şen, 2001)

7. En büyük ilk veya son üyelik derecesi: Bu yöntem de, tüm çıktıların birleşimi olarak ortaya çıkan bulanık kümede en büyük üyelik derecesine sahip olan en küçük veya en büyük bulanık küme değerini seçmek esasına dayanır (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).

3.2.1.5. Bulanık kurallar ve sistemler

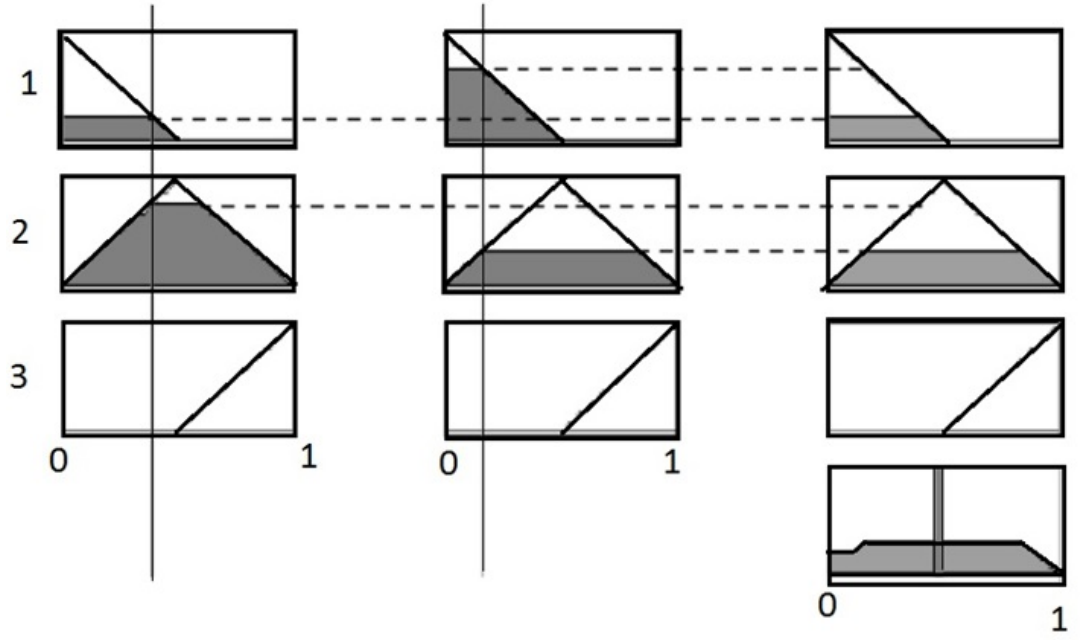
Makineler tarafından bilgi işlemlerinin algılanma yolu olan yapay zeka alanında, bilgi işlemi için değişik yollardan bir tanesi de, bilgiyi sanki insan diline benzer bir ifade ile temsil etmektir. Bu, en yaygın olarak kullanılan insan bilgisini işleme yoludur. Böyle bir ifadede “Eğer-İse” olarak kullanılan insan bilgisini

işleme yoludur. Böyle bir ifadede “Eğer-İse” kelimeleri ile ayrılmış olan iki kısım bulunur. Bunlardan “Eğer” ile “İse” kelimeleri arasında bulunan kısma öncül veya ön şartlar, “İse” kelimesinden sonra kısma ise soncul veya çıkarım adı verilir. Genel kural olarak, “Eğer” öncül “İse” çıkarım şeklinde yazılır. İşte, bu türlü yapısı olan ifadeler “Eğer-İse kural tabanlı biçim” adı verilir. Bu ifade, bilinen bazı bilgilerin kullanılması ile bunların ışığı altında, faydalı olan diğer bazı bilgilerin çıkarılması anlamına gelir. Bu tür bilgilere sıgı bilgileri adı verilir. Çünkü bunlar insanın kendisinin kişisel deneyim ve tecrübelerinden hareketle çıkardıkları bilgilerdir ve yerine göre çok da nesnel (objektif) değildir. Halbuki derin bilgiler ise, daha ziyade sezgi, yapı, fonksiyon ve eşyalar arasındaki davranış biçimlerine göre elde edilir. Derin bilgilerin, sözel olarak kolayca çıkarılması mümkün değildir. Bu bilgilerin oluşmasında yılların gözlem, deney ve birikimleri vardır. Kural tabanlı olan bilgilerin uzmanlar tarafından verilen bilgilerden farklı tarafı, kural tabanlı olanların insan uzmanlardan başka kaynaklardan da yararlanarak yazılabilesidir. Kural tabanlı olan bilgilerin gerek öncül, gerekse çıkarım olan son kısımları ayrı ayrı bulanıklaştırılarak işlemler yapılır (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).

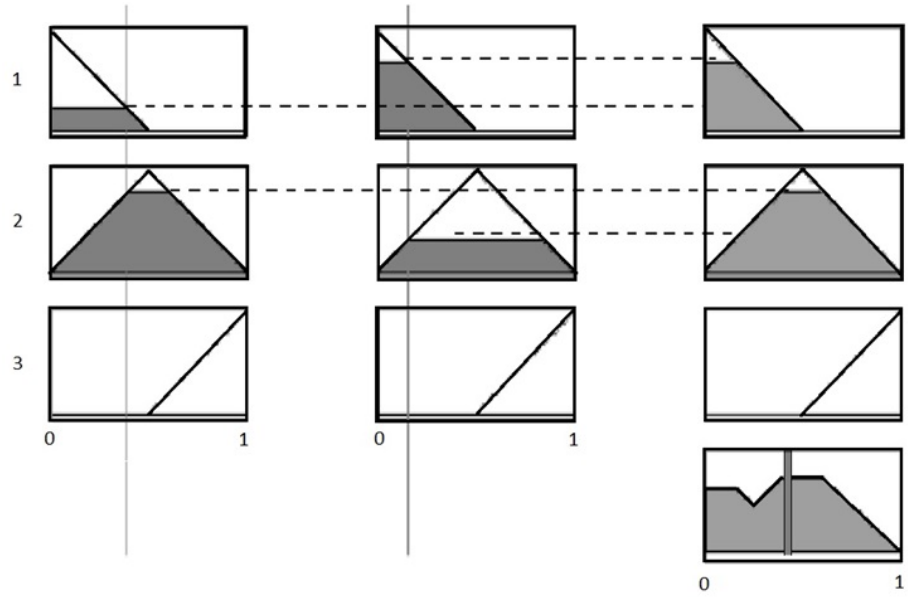
3.2.1.6. Grafik çıkarım teknikleri

Çıkarım yöntemlerini anlatabilmek için, iki tane öncül bir tane de çıkarımı olan “Eğer-İse” kural tabanlı bir sistem düşünelim. Genel olarak bu sistemin iki tane girdisi bir tane çıktısı vardır. Şekil 3.11’ de kural “Ve” bağlacı ile bağlanmıştır (Saphioğlu, 2010). Bu durumda “En büyük-En küçük” (EB-EK) kuralı gereğince her iki girdinin üyelik derecelerinden küçük olanın üyelik derecesi çıktının üyelik derecesi olacaktır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da mevcut üç kuraldan sadece ikisinin çalışmasıdır. Üçüncü kuraldaki şartlar sağlanmadığı için hesaplama yapılmamıştır (Şen, 2001; Saphioğlu, 2010).

Şekil 3.12’ de kural “Veya” bağlacı ile bağlanmıştır (Saphioğlu, 2010). Bu durumda EB-EB kuralı gereğince her iki girdinin üyelik derecelerinden büyük olanın üyelik derecesi çıktının üyelik derecesi olacaktır.



Şekil 3. 11. “Ve” bağlaçlı kuralın kullanıldığı model uygulaması (Saplıoğlu, 2010)



Şekil 3. 12. “Veya” bağlaçlı kuralın kullanıldığı model uygulaması (Saplıoğlu, 2010)

3.2.2. İstatistiksel yöntem

Yapılan tez çalışmasında kurulacak serbest basınç dayanımı tahmin modelinde, bağımsız değişken sayısının fazla oluşu istatistiksel yöntem seçiminde “Çoklu Regresyon” yönteminin tercih edilmesinin ilk sebebidir. Veriler incelendiğinde, seçilen bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken ile aralarında bir ilişki olduğu ve normal dağılıma uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir. Tahmin değişkenlerinin kendi arasında mükemmel doğrusal ilişkiler bulunmamaktadır. Bu da çoklu regresyonda istenen bir durumdur. Çünkü tahmin değişkenlerinin kendi arasında mükemmel doğrusal ilişki bulunduğu durumda, değişkenler için regresyon katsayıları aynı olur; hangi değişkenin önemli olduğu belirlenemez (Şen, 2001; Saplıoğlu, 2010).

3.2.2.1. Çoklu regresyon analizi

Çoklu Regresyon analizi, bir bağımlı değişkene (y) birden fazla bağımsız değişkenin (x) etkisini değerlendirmek için uygulanmaktadır. Regresyon fonksiyonunda her bağımsız değişkenin bağımlı değişkenle doğrusal bir ilişkisi olduğu kabul edilmektedir (Saplıoğlu, 2010).

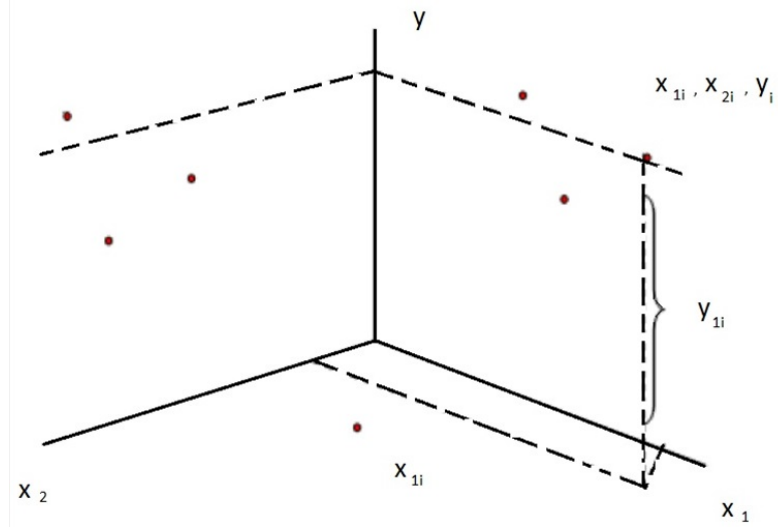
$$y = a + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_n * x_n \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3’ teki fonksiyondan yararlanarak değişkenler arasında bulunan çoklu ilişkinin bir tahmini Eşitlik 3.4’ teki fonksiyon yardımıyla hesaplanabilir.

$$y = a + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \dots + \beta_n * x_n \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4’ teki katsayıların hesabı için en küçük kareler yönteminden yararlanarak gerçek y değerleri ile teorik y değerleri arasındaki farklar minimize edilir (Eşitlik 3.5).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - (a + \beta_1 * x_{1i} + \beta_2 * x_{2i}))^2 \quad (3.5)$$



Şekil 3. 13. En küçük kareler yüzeyi (Garson, 2008)

Örnek olarak Şekil 3.13' teki gibi üç değişkenli bir modelde her nokta üç koordinata sahiptir. Bu durumda denklem bir doğru denklemi olmayıp en küçük kareler yüzeyidir. Burada gerçek y değerleri (y_i) ile teorik y değerleri arasındaki uzaklıkların farklarının kareleri toplamı minimum olmalıdır. En küçük kareler yöntemi bu üç katsayı Eşitlik 3.6, Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8' deki gibi hesaplanır (Garson, 2008).

$$\sum y = n * a + b_1 * \sum x_1 + b_2 * \sum x_2 \quad (3.6)$$

$$\sum x_1 * y = a * \sum x_1 + b_1 * \sum x_1^2 + b_2 * \sum x_1 * x_2 \quad (3.7)$$

$$\sum x_2 * y = a * \sum x_2 + b_1 * \sum x_1 * x_2 + b_2 * \sum x_2^2 \quad (3.8)$$

Bağımsız değişkenlerin farklı birimlerde olduğu durumlarda karşılaştırma yapabilmek için standart kısmi regresyon katsayılarını hesaplamak gerekir. Gerçek değerlerle, en küçük kareler yöntemi ile bulunan y değerleri arasında farkların olması doğaldır. Tahminin standart hata ile gerçek y değerlerinin regresyon yüzeyi etrafında ne kadar uzağa dağıldıkları ölçülmektedir. İki

bağımsız değişkenin yer aldığı çoklu analizde Eşitlik 3.9 elde edilir (Saplıoğlu, 2010).

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a \cdot \sum y - b_1 \cdot \sum x_1 \cdot y - b_2 \cdot \sum x_2 \cdot y}{n - k}} \quad (3.9)$$

S_y standart hatayı ; k regresyon denklemindeki katsayıların sayısını göstermektedir. Gerçek değerlerin bir doğrudan değil, bir yüzeyden uzaklıkları ölçülmektedir. Çoklu korelasyon katsayısı için determinasyon katsayısı Eşitlik 3.10 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R^2 = \frac{n \cdot (a \cdot (\sum y) + b_1 \cdot \sum x_1 \cdot y + b_2 \cdot \sum x_2 \cdot y) - (\sum y)^2}{n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemde “ R^2 ” belirlilik katsayısıdır ve “ R^2 ” için, her bağımsız değişken bir arada değerlendirildiğinde, ilişki ile açıklanabilen değişkenlik (%) değeri elde edilir (Garson, 2008; Saplıoğlu, 2010).

Fakat çoklu regresyon modelinde dikkat edilmesi gereken nokta; belirlilik katsayısının, modele dahil edilen değişken sayısı arttıkça artmasıdır. Böyle durumlarda, düzeltilmiş belirlilik katsayısına bakılmalıdır. Bir başka deyişle, hangi bağımsız değişkenin ilişkinin kuvvetine katkısı olduğunu anlamak için, düzeltilmiş belirlilik katsayısına bakılmalıdır (StatSoft, 2008; Saplıoğlu, 2010).

Çoklu regresyon analizindeki tahmin değişkenlerinin seçimi ve bunların modele nasıl girdiği önemli bir konudur. Rastgele çok sayıda tahmin değişkeni seçmek doğru değildir. Tahmin değişkenlerinin regresyon modeline ekleme yolları mevcuttur. Bunlar:

Enter metodu: Modeli oluşturan bağımsız değişkenler belirtilir. Tüm tahmin değişkenleri eş zamanlı olarak modele girilir (StatSoft, 2008). Daha sonra bu modelin bağımlı değişkeni tahmin etme başarısı değerlendirilir. Eğer bir bağımsız değişkenin diğerinden daha önemli olduğu düşünülüyorsa, bu model kullanılır. Her bir değişken modele eklendiği gibi, her birinin modele katkısı da

değerlendirilir. Eğer eklenen değişken modelin tahmin etme gücünü arttırmıyorsa değişkenin modelden çıkarılmasının bir sakıncası yoktur.

Değişken ekleme metodu: Değişkenlerin bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sırayla alınır. Modele giren değişkenin etkisi ölçülür ve modeli önemli derecede etkilemeyen değişkenler modelden çıkarılır.

Değişken eleme metodu: Tüm değişkenler modele dahil edilir. En güçsüz bağımsız değişken modelden çıkarılır ve regresyon tekrar hesaplanır.

Adım adım regresyon metodu: Her değişken modele sırayla eklenir ve model değerlendirilir. Eğer eklenen değişken modele katkı sağlıyorsa, modelde bu değişken kalır. Ancak modeldeki diğer değişkenlerin tümünün, modele katkı yapıp yapmadıklarını değerlendirmek için yeniden test edilir. Eğer önemli derecede katkı sağlamıyorsa modelden çıkarılır. Böylece en az sayıda değişken yardımıyla model açıklanmış olur (Albayrak, 2008; Saplıoğlu, 2010).

Bu çalışmada, analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için belirlilik (determinasyon) katsayısı, ortalama rölatif mutlak hata ve ortalama karesel hata indisleri kullanılmıştır. Bunlarla ilgili formüller Eşitlik 3.10, Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12' de verilmiştir.

Ortalama Rölatif Mutlak Hata (MARE) :

$$= \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{n} * \frac{|x_{i,\text{ölçülen}} - x_{i,\text{tahmin edilen}}|}{x_{i,\text{ölçülen}}} \right) \quad (3.11)$$

Ortalama Karesel Hata (MSE) :

$$= \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{n} * (x_{i,\text{ölçülen}} - x_{i,\text{tahmin edilen}})^2 \right) \quad (3.12)$$

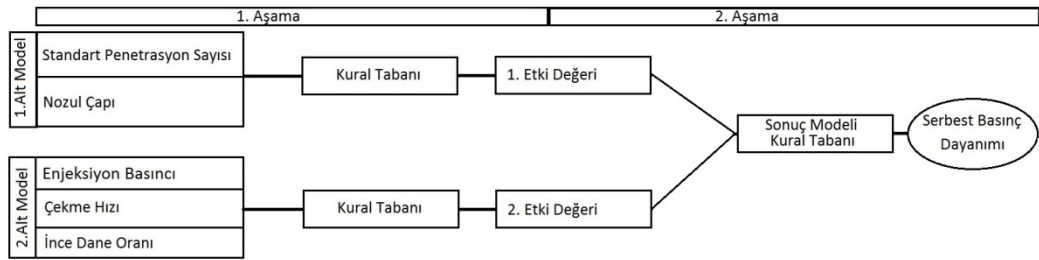
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Bulanık Mantık ile Model Kurulması ve Analiz Sonuçları

4.1.1. Bulanık mantık modelinin kurulması ve sonuçları

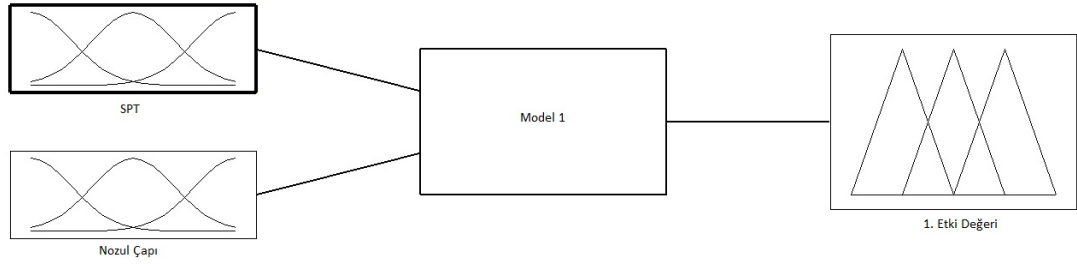
Çalışmada, parametreler iki ayrı parçaya bölünerek iki ayrı model kurulmuş ve bu iki modelden sonuç olarak 0 ve 1 arasında etki değerleri elde edilmiştir. İlk modelde, SPT sayısı ve nozul çapı girdi olarak kullanılmıştır. İkinci modelde ise enjeksiyon basıncı, çekme hızı ve ince dane oranı girdi olarak kullanılmıştır.

İkinci aşamada, ilk aşamaki iki alt modelden elde edilen etki değerleri sonuç modelimizde girdi olarak kullanılmış ve çıktı olarak jet grout kolonunun serbest basınç dayanımı elde edilmiştir. Kullanılan modele ait şema Şekil 4.1’ de sunulmuştur.

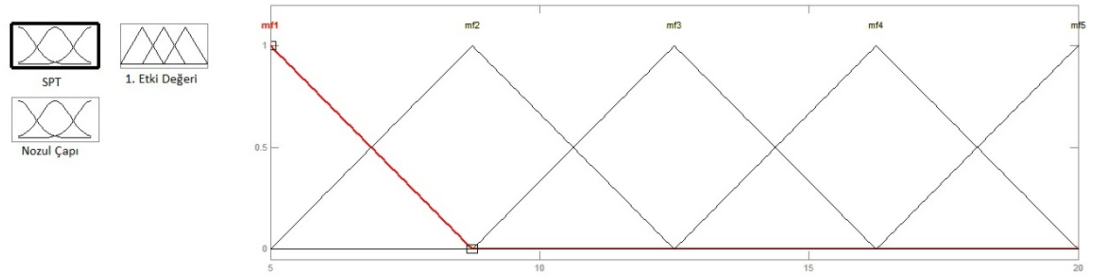


Şekil 4. 1. Jet grout kolonunun serbest basınç dayanımının tahmin modelinin genel yapısı

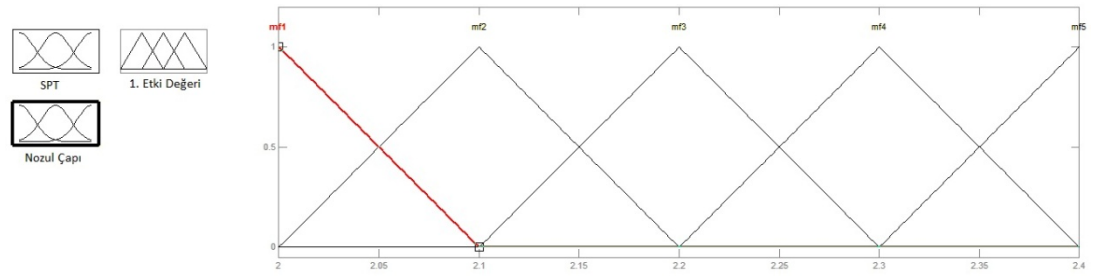
Kurulan bulanık mantık modellerine ait üyelik fonksiyonları ve modellerin genel yapıları aşağıda sunulmuştur (Şekil 4.2 ;4.3; 4.4; 4.5; 4.6; 4.7; 4.8; 4.9; 4.10; 4.11; 4.12; 4.13; 4.14).



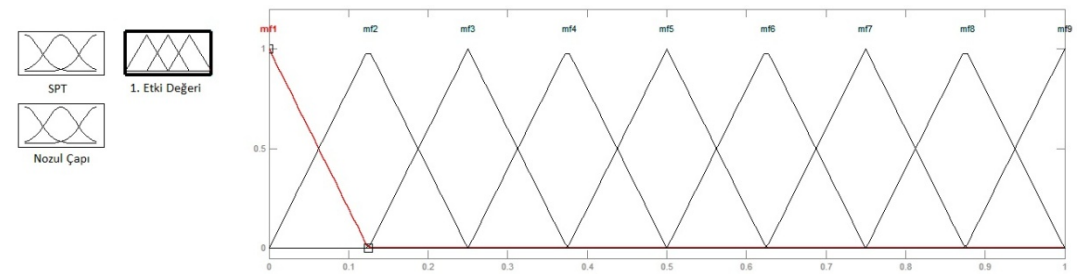
Şekil 4. 2. Birinci etki değerini veren model 1' in genel yapısı



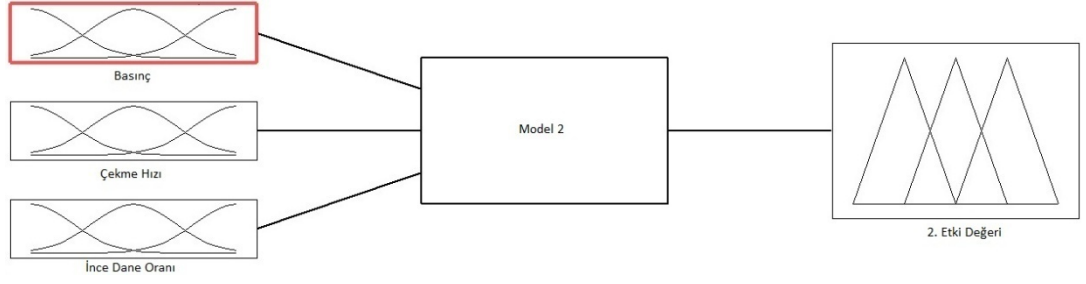
Şekil 4. 3. Model 1' de standart penetrasyon sayısının bulanık mantık üyelik fonksiyonu



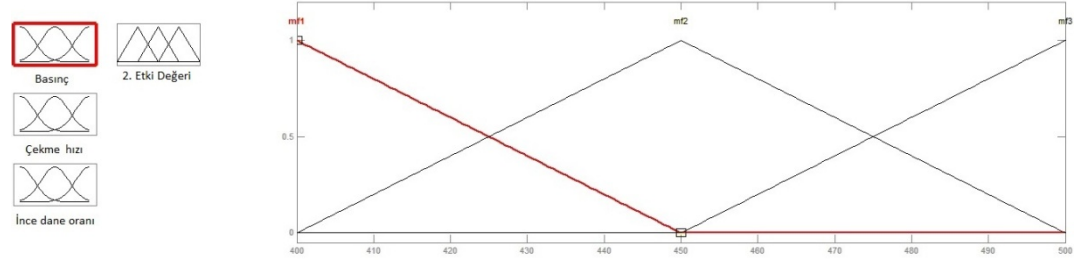
Şekil 4. 4. Model 1' de nozul çapının bulanık mantık üyelik fonksiyonu



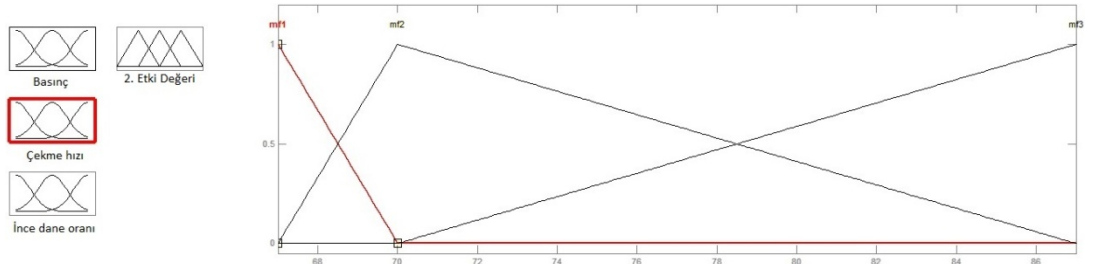
Şekil 4. 5. Model 1' de birinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu



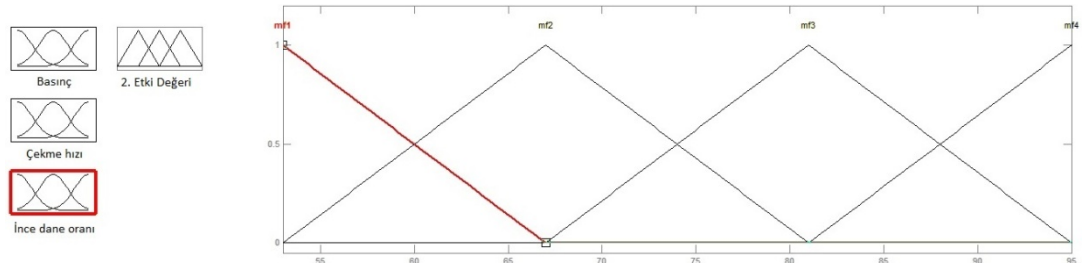
Şekil 4. 6. İkinci etki değerini veren model 2'nin genel yapısı



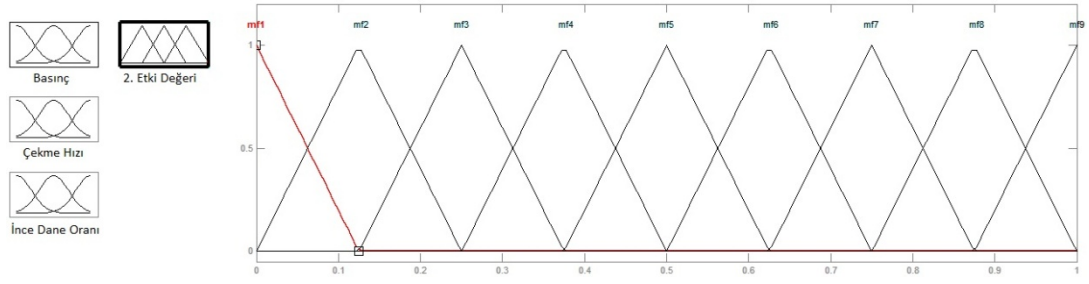
Şekil 4. 7. Model 2' de enjeksiyon basıncının bulanık mantık üyelik fonksiyonu



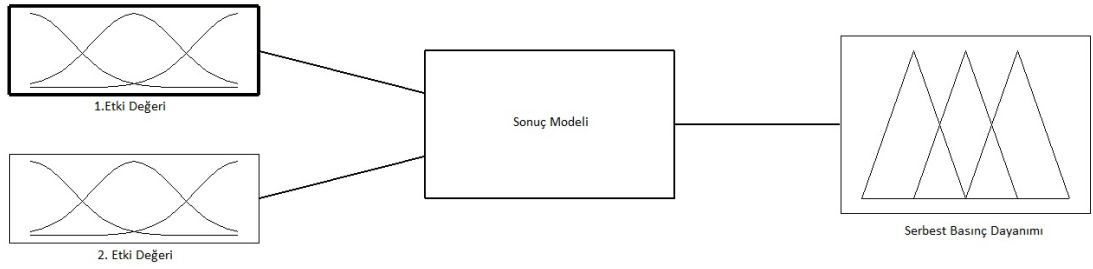
Şekil 4. 8. Model 2' de çekme hızının bulanık mantık üyelik fonksiyonu



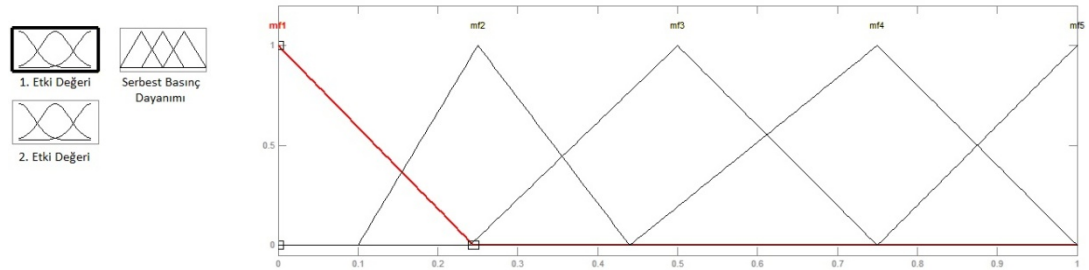
Şekil 4. 9. Model 2' de ince dane oranının bulanık mantık üyelik fonksiyonu



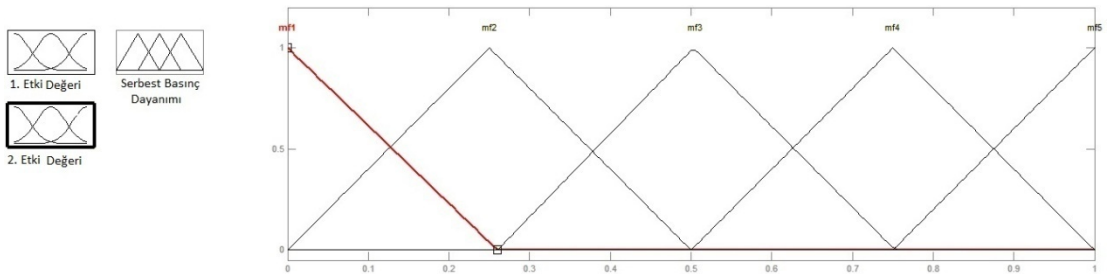
Şekil 4. 10. Model 2' de ikinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu



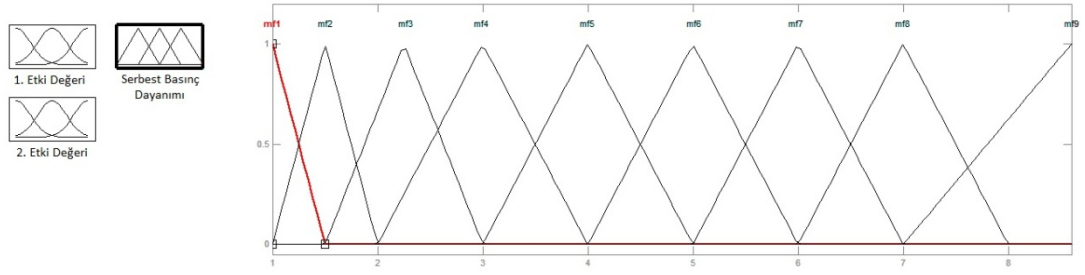
Şekil 4. 11. Serbest basınç mukavemetinin veren sonuç modelinin genel yapısı



Şekil 4. 12. Sonuç modelinde birinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu



Şekil 4. 13. Sonuç modelinde ikinci etki değerinin bulanık mantık üyelik fonksiyonu

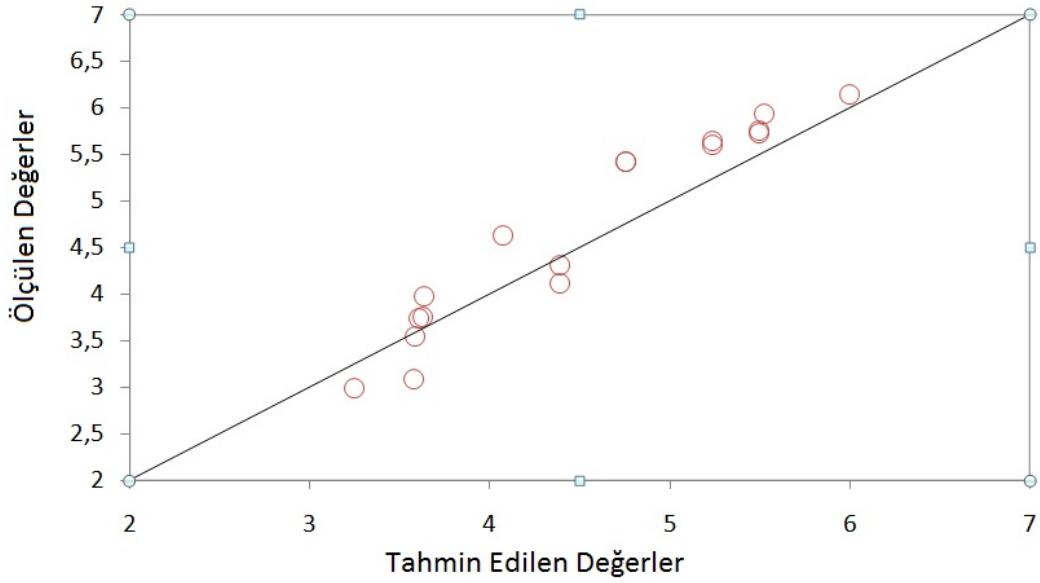


Şekil 4. 14. Sonuç modelinde serbest basınç dayanımının bulanık mantık üyelik fonksiyonu

Yapılan bulanık mantık analizleri sonucunda elde edilen jet grout kolonunun serbest basınç dayanımları ile gerçekte ölçülen serbest basınç dayanımları Çizelge 4.1' de sunulmuş, Şekil 4.15' te grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafikte elde edilen değerler için belirlilik katsayısı (R^2), 0,91 bulunmuştur.

Çizelge 4. 1. Ölçülen ve bulanık mantık ile hesaplanan serbest basınç dayanımları

Ölçülen Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Bulanık Mantık ile Hesaplanan Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Rölatif Mutlak Hata (%)	Karesel Hata (%)
3,75	3,63	3	1
5,93	5,53	7	16
5,42	4,76	12	44
5,73	5,50	4	5
3,73	3,61	3	1
5,42	4,76	12	44
6,14	6,00	2	2
5,6	5,24	6	13
5,64	5,24	7	16
3,54	3,59	1	0
4,11	4,39	7	8
3,97	3,64	8	11
2,98	3,25	9	7
5,75	5,50	4	6
4,3	4,39	2	1
3,08	3,58	16	25
4,62	4,08	12	29
		Ortalama Rölatif Hata (MARE) = %7	Ortalama Karesel Hata (MSE) = %14



Şekil 4. 15. Bulanık mantık ile elde edilen sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırılması

4.1.2. Çoklu regresyon analizi ve sonuçları

Çoklu regresyon analizi için enjeksiyon basıncı, SPT sayısı, nozul çapı, su-çimento oranı, çekme hızı, ince dane oranı parametreleri girdi olarak, serbest basınç dayanımı da çıktı olarak kullanılmış ve jet grout kolonunun serbest basıncına etkileyen parametreler belirlenmiştir.

Çoklu regresyon analizleri; kullanılan girdi parametrelerinin sonuca etki edip etmediği, anlamlı bağlantısı olup olmadığı, etkisinin ne kadar olduğu tespit edilebildiği için adım adım regresyon metodu kullanılarak ve hesaplamada kolaylık sağlaması açısından SPSS 17.0 programı ile gerçekleştirilmiştir.

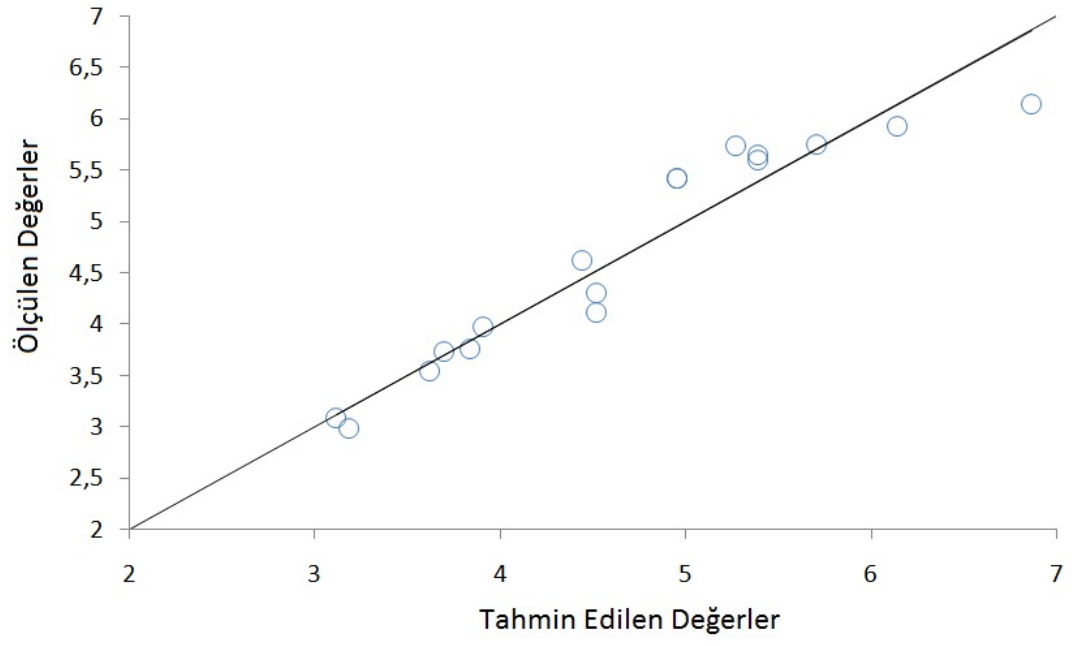
Analizde, düzeltilmiş belirlilik katsayılarına (adjusted R^2) bakılarak bu değeri azaltan su-çimento oranı parametresi parametrelerden çıkarılmıştır. Bu parametrenin etkisiz görülmesinin nedeni elimizdeki verilerde tek bir değere sahip olması olarak tahmin edilmektedir. Bu parametrenin değeri sabit olmasından dolayı analizde sonuca etkisi anlaşılamamıştır.

Yapılan çoklu regresyon analizi sonucunda; girdi parametreleri olan SPT sayısı, enjeksiyon basıncı, çekme hızı, nozul çapı ve ince dane oranının sonuca olan etki yüzdeleri sırasıyla 4.2, 18.6, 50.6, 10.8 ve 15.8 olarak belirlenmiştir.

Çoklu regresyon analizi sonucunda elde edilen jet grout kolonu serbest basınç dayanımı değerleri ile gerçekte ölçülen değerler Çizelge 4.2' de sunulmuş ve ayrıca Şekil 4.16' da grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Hesaplanan değerler için belirlilik katsayısı (R^2), yaklaşık 0,91 bulunmuştur.

Çizelge 4. 2. Ölçülen ve çoklu regresyon analizi ile hesaplanan serbest basınç dayanımları

Ölçülen Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Çoklu Regresyon (SPSS) ile Hesaplanan Serbest Basınç Dayanımları (MPa)	Rölatif Mutlak Hata (%)	Karesel Hata (%)
3,75	3,67	2	1
5,93	5,87	1	0
5,42	4,73	13	47
5,73	5,04	12	48
3,73	3,53	5	4
5,42	4,73	13	47
6,14	6,56	7	17
5,6	5,15	8	20
5,64	5,15	9	24
3,54	3,46	2	1
4,11	4,32	5	4
3,97	3,74	6	5
2,98	3,05	2	0
5,75	5,45	5	9
4,3	4,32	0	0
3,08	2,98	3	1
4,62	4,24	8	14
		Ortalama Rölatif Hata = % 6	Ortalama Karesel Hata = % 14



Şekil 4. 16. Çoklu regresyon analizi ile elde edilen sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojinin ve sanayinin gelişmesiyle birlikte şehirlerde yapılaşma için ihtiyaç duyulan alan sıkıntısı yaşanmaya başlanmıştır. Bu sebeple, zeminin yapılaşmaya elverişli olmadığı alanlarda dahi yapılaşma zorunluluğu doğmaktadır. Yapılaşmaya elverişsiz alanlarda inşaat yapılabilmesi veya temel ve zemin problemleri nedeniyle riskli durmda bulunan mevcut yapıların sağlıklı duruma getirilebilmesi için, zemin iyileştirme metodları bir çözüm olarak uygulanabilmektedir.

Zemin ve temel güçlendirmesi için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Son yıllarda ülkemizde yaygın olarak kullanılmaya başlayan jet grouting yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha ekonomik olması ve daha kısa inşaat süresine sahip olması, neredeyse her tür zeminde ve mevcut yapılarda da uygulanabiliyor olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir.

Jet grouting yönteminde, imal edilecek kolonların çap, boy ve basınç mukavemetleri, proje tasarım aşamasında belirlenmekte ve belirlenen bu değerler sahada aynen uygulanmaktadır. Böylelikle imalat için gerekli malzeme miktarı, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi ve geçirgenlik gibi parametreleri uygulamadan önce belirlenebilmektedir.

Bu yöntemde esas amaç, zeminin mukavemet parametrelerini artırmak suretiyle zeminin taşıma gücünü, stabilitesini ve elastisite modülünü artırmak, geçirgenliğini ise azaltmaktır.

Yöntemin başarılı ve etkili olabilmesi için en önemli detay, uygun jet grouting aparatlarının ve parametrelerin belirlenmesi ve imalatın sonuna kadar bunlara bağlı kalınarak projenin tamamlanmasıdır. Bu yüzden, imalattan önce sahada deneme kolonlarının oluşturulması ve imalat süresince kalite kontrol testlerine devam edilmesi önemli ve gereklidir.

Son yıllarda jet grout yönteminde kullanılan klasik yöntemlerin, durumu tam yansıtamadığı ve bu yöntemlerle güvenlik sayılarının yüksek alınarak ekonomikliğin olumsuz etkilendiği görülmektedir. Bu yüzden jet grout yönteminde kullanılmak üzere çeşitli sayısal analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında; bazı zemin ve jet grouting parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen bulanık mantık ve çoklu regresyon analizleri ile jet grout kolonların serbest basınç dayanımları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kullanılan her iki yöntemin de belirlilik katsayıları (R^2), 0,91 hesaplanmıştır. Bu değer, analizlerle tahmin edilen sonuçlar ve gerçekte gözlenen sonuçlar arasında, her iki yöntem için de % 91 oranında uyum olduğunu ifade etmektedir.

Analiz sonuçları ile gerçekte ölçülen serbest basınç dayanımı değerleri arasında ayrıca çeşitli hata indisleri tespit edilmiştir. Ortalama relatif mutlak hata (MARE), bulanık mantık ile yapılan tahminler için % 7 iken çoklu regresyon analizi ile yapılan tahminler için % 6 hesaplanmıştır. Ortalama karesel hatalar (MSE) ise hem bulanık mantık ile yapılan tahminler ve hem de çoklu regresyon analizi ile yapılan tahminler için % 14 hesaplanmıştır.

Jet grouting yönteminin, göz önünde bulundurulamayan başka parametrelerden de etkilendiği ve çalışmada kullanılan veri sayısının az olduğu göz önüne alındığında, bu kadar hatanın kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

Sinir ağları modelleri ve veri analiz yöntemlerinin, jet grout kolonun serbest basınç dayanımını hesaplamak için yeterli algı becerisine sahip olduğunu ifade etmek de mümkündür.

Tez kapsamında, bazı jet grouting ve zemin parametreleri ile jet grout kolonların serbest basınç dayanımları arasındaki ilişki de incelenmiştir. Yapılan bulanık mantık ve çoklu regresyon analizleri sonucunda parametreler ve serbest basınç dayanımı arasından anlamlı ilişkiler olduğu görülmüştür.

Serbest basınç dayanımının, standart penetrasyon sayısı ve nozul çapının artması ile arttığı, çekme hızı ve ince dane oranının artması ile azaldığı belirlenmiştir.

SPT sayısı, enjeksiyon basıncı, çekme hızı, nozul çapı ve ince dane oranının serbest basınç dayanımına etkileri sırasıyla %4.2, %18.6, % 50.6, %10.8 ve %15.8 olarak tespit edilmiştir.

Kullanılan bulanık mantık ve çoklu regresyon analizlerinden her ikisi de yeterli nitelikte doğru sonuçlar vermektedir. Ancak kullanımın daha kolay olması ve daha çabuk bir yöntem olması nedeniyle çoklu regresyon yöntemi öncelikli olarak tercih edilebilir.

Veri sayısının az oluşu ve çok fazla çeşitli olmayışı dezavantajına rağmen, tatmin edici sonuçlar alınmıştır.

İleriye yönelik çalışmalarda, jet grout model aleti geliştirilerek labratuvar ve saha şartlarında daha fazla veri elde edilerek bu konunun daha detaylı şekilde irdelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Albayrak, A., S., 2008. Uygulamalı Çok değişkenli İstatistik Teknikleri, Ankara, Asil Yayınevi, 499s.
- Alkaya D., Yeşil B., 2011. Yüksek Modüllü Kolonların (Jetgrouting) Tablolama Programı Kullanılarak Tasarımı. Akademik Bilişim'11 – XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 749-756.
- Alkaya D., Cobanoğlu İ., Yeşil B., Yıldız M.Ş., 2011. The Evaluation of Stone Column and Jet Grouting Soil Improvement with Seismic Refraction Method : Example of Poti (Georgia) Railway. International Journal of the Physical Sciences, 6(28), 6565-6571.
- ASTM D 1143-81, 1994. Standart Test Methods for Deep Foundation Under Static Axial Compressive Load, American Society of Testing and Materials.
- Ayan E., 2009. Derin Zemin İyileştirme ve Uygulamadan Örnekler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 110s, İstanbul.
- Bakım M. A., 2007. EnjeksiyonYöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 157s, Isparta.
- Baumann V., 1984. Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis. Vortrage der Baugrundtagung, Duesseldorf, 49 – 83, DGEG.
- Bell, Kenneth R., Clemente, Jose L.M., Gularte, Francis B., Lopez, Roberto A., 2003. Superjet Grouting Reduces Foundation Settlement for La Rosita Power Plant in Mexicali Mexico. New Orleans, 354 - 364, USA.
- Borges J. L., Marques D. O., 2011. Geosynthetic-Reinforced and Jet Grout Column-Supported Embankments. Computers and Geotechnics, 38, 883-896.
- Bray J.D., Sancio R.B., Riemer M., Durgunoğlu H.T., 2004. Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils. Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, 7-9 January, UC Berkeley, California, U.S.A.
- Burke, G., K., 2004. Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages. ASCE,GEOSUPPORT 2004, 875-885.
- Chuaqui M., HU F., Gursaud N., Lees D., 2012. A Case Study: Two-fluid Jet Grouting for Tunneling Application –Soil Stabilization and Permeability Reduction. Geotechnical Special Publication, 228 (1), 868-879.

- Coulter S., Martin C.D., 2006. Single – fluid Jet Grout Strength and Deformation Properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 690-695.
- Doğanışık S. K., 2010. Jet Grout Kolonundaki Gerilme Dağılışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 95s, İstanbul.
- Doğu O., Yıldırım H., Durgunoğlu H. T., 2006. Zeminin İnce Dane Oranı ve SPT Vuruş Sayısının Jet Grout Kolonların Mukavemetine Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Birinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Durgunoğlu H. T., Kulaç H. F., Oruç K., Öge C.E., Eker F.Ş., 1998. Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme Üzerine Bir Uygulama. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Durgunoğlu H.T., Kulaç H.F., Oruç K., Yıldız R., Altuğu T., Emrem C.A., 2002. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim , Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Durgunoğlu H.T., Kulaç H.F., Yılmaz S., Koçak D., 2002. Levent Setat 2002 Kuleleri Temel Zemini Islahı Vaka Analizi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Durgunoğlu H. T., 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, 39-52, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Durgunoglu H.T., Chinchelli M., İkiz S., Emrem C., Hurley T., Catalbas F., 2004. Improvement with Jet-Grout Columns : A Case Study From the 1999 Kocaeli Earthquake. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering , New York , NY , April 13-17 .
- Düzceer İ. R., 2002. Kazık Yükleme Deneyleri ile Nihai Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Falcao J.F., Pinto A.L., Pinto F.D., 2000. Case Histories of Ground Improvement Solutions Using Jet-grouting. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, 349.
- Fırat, A. T., 2001. Jet Grouting Yöntemi ile Temel Takviyesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (yayınlanmamış).
- Garson, G.D., 2008. Guide to Writing Emprical Papers, Theses and Dissertation. <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>.

- Gazzarrini P., 2005. Case History of Jet-Grouting in British Columbia, Underpinning of CN Rail Tunnel in North Vancouver. Geotechnical News, December, 47-54.
- Gokalp A., Duzceer R., 2002. Ground Improvement by Jet Grouting Technique for Foundations of a Natural Gas Combined Cycle Power Plant in Turkey. Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, October , Nice, France.
- Gültekin, S., 2010. Yalova 22 Pafta, 22 Ada, 147 Parsel, Jet Grout Integrity Deneyi Nihai Raporu. ELC Group Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti, İstanbul, 26 Nisan.
- Handley B., Ball J., Bell A., Suckling T., 2006. Handbook on Pile Load Testing. Federation of Piling Specialists, Beckenham, Kent, BR3 1NR,10-16.
- Ichihashi Y., Shibasaki M., Kubo H., Lji M., Mori A., 1992. Jet Grouting at Airport Construction. Proc. ASCE Conf., Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, New Orleans, 1, 182 - 193.
- Jaritngam S., 2003. Design Concept of the Soil Improvement for Road Construction on Soft Clay. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4, October, 313-322.
- Jian-Guo Y., Yong-Li X., Yun-Zhou W., Wei M. , 2009. Pre-supporting with Horizontal Piles of Jet Grouting in Weak Loess Tunnel. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering , 4, 141-144 .
- Juran I., Ider H.M., Acar Y.B., 1988. Soil Improvement Methods for Reinforcing Foundation Soils. Jet Grouting and Compaction Grouting, 7, Lousiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- Kavak A., Mutman U., 2005. Düşük Basınçlı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin İyileştirilmesi. Deprem Sempozyumu, 1114-1119, Kocaeli.
- Kauschinger J.L., Perry E.B., Hankour R., 1992. Jetgrouting: State of the Practice. Proceedings of the Conference of Grouting Soil Improvement and Geosyntetics, New Orleans, Louisiana, 25-28 Februrary 1992, 1, 169-181, ASCE, New York.
- Keskin S.N., Çimen Ö., 2002. Zemin İyileştirilmesinde Jet Grout Yöntemi Kullanılması Üzerine Bir Uygulama. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim 2002, 641-648, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Küsin C. C., 2009. Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 157s, Adana.

- Laefar D.B., O'Neill D., O'mahony C. , 2009. Impact of Clay on Early Jet Grouting Strength. DFI Proceedings of the 34th Annual Conference on Deep Foundations.
- Langhorst O.S., Schat B.J., de Wit J.C.W.M., Bogaards P.J., Essler R.D., Maertens J., Obladen B.K.J., Bosma C.F., Sleuwaegen J.J., Dekker H., 2007. Design and Validation of Jet Grouting for Amsterdam Central Station. Geotechniek ECSMGE, 18-21.
- Lunardi P., 1977. Ground Improvement by Means of Jet-Grouting. Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, 1, 2, 65 - 86.
- Melegary C., Garassino A.L., 1997. Seminar on Jet Grouting. CI-Premier Pte. Ltd., Singapore.
- Nikbakhtan B., Osanloo M. , 2009. Effect of Grout Pressure and Grout Flow on Soil Physical and Mechanical Properties in Jet Grouting Operatitons. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46, 498-505.
- Nikbakhtan B., Ahangari K., 2010. Field Study of the Influence of Various Jet Grouting Parameters on Soilcrete Unconfined Compressive Strength and Its Diameter. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 685-689.
- Okay S., 1987. Yüksek Basıncılı Enjeksiyon. Rapor, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul.
- Ou C.Y., Teng F.C., Wang I.W., 2007. Analysis and Design of Partial Ground Improvement in Deep Excavations. Computers and Geotechnics, 35, 576 – 584.
- Özsoy B., Durgunoğlu H. T., 2003. Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması. 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Püsküllüoğlu A., 2010. Ceyhan Hidroelektrik Santrali Projesi (Cevdetiye-Osmaniye) Regülatör Yapılarındaki Geçirimsizleştirme Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 194s, Jeoloji Mühendisliği ABD, Adana.
- Racansky V., Schweiger H.F., Thurner R., 2008. FE-Analysis of the Behaviour of Buttressed Jet Grouted Retaining Walls. Proceedings of the 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3984 – 3992.
- Sakawa, M. 1993. Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw-Hill Inc., USA.

- Saplıoğlu, M., 2010. Şehiriçi Denetimsiz Kavşaklar İçin Bir Kaza Tahmin Modeli. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Sarı M.S., 2008. Temellerin Takviyesi ve Uygulamadan Örnekler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 168s, İstanbul.
- Schaefer, V.R., 1997. Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment Developments 1987-1997. Proceedings of Sessions Sponsored by the Committee of Soil Improvements and Geosynthetic of the Geoinstitute of the ASCE, Geotechnical Special Publication, 69.
- Semiz E., 2009. Metro İnşasında Kullanılan Zemin İyileştirme Çalışmalarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, 91s, Maden İşletme ABD, İzmir.
- Stark T.D., Axtell P.J., Lewis J.R., Dillon J.C., Empson W.B., Topi J.E., Walberg F.C., 2009. Soil Inclusions in Jet Grout Columns. DFI Journal, 3, 1, May, 33-44.
- StatSoft, Inc., 2008. İnternet sitesi. <http://statsoft.com/textbook/stathome.html>.
- Stoel, A.V.D., 2001. Grouting for Pile Foundation Improvement, PhD Thesis, Delft University, Amsterdam, Netherlands.
- Şen, Z., 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri. Bilge Kültür Sanat, İstanbul.
- Şenol A., Deneç G., 2007. Sinyal Eşleme Yöntemi Kullanılarak Kazık Süreklilik Deneylerinin Değerlendirilmesi ve Kazık Kalitesinin Belirlenmesi. İTÜ Dergisi/ D Mühendislik, 6, 5-6, 15 Nisan.
- Teodorovic, D., Vukadinovic, K., 1998. Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Tinoco J., Correia A.G., Cortez P. , 2009. A Data Mining Approach for Jet Grouting Uniaxial Compressive Strength Prediction. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 553-558.
- Tinoco J., Correia A.G., Cortez P., 2011. Application of Data Mining Techniques in the Estimation of the Uniaxial Compressive Strength of Jet Grouting Columns over Time. Construction and Building Materials, 25, 1257-1262.
- Tschuchnigg F., Schweiger H.F., 2008. Comparison of Different Models for Analysing Foundations on Jet Grout Columns. Proceedings of the 12th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3149 – 3157.

- TS EN-12716, 2002. Özel Jeoteknik Uygulamalar - Jet Enjeksiyon, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunçdemir F., 2004. Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri, 430, 2004/2, 59-64.
- Van Der Stoel A. E. C., Van Ree H. J., 2000. Strength & Stiffness Parameters of Jet Grouting Columns : Full Scale Test Amsterdam. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, 417.
- Welsh, J.P., Rubright, R.M. & Coomber, D.B., 1986. Jet Grouting for Support of Structures Session. ASCE Spring Convention, Seattle.
- Wong K.S., Li J.C., Goh A.T.C., Poh K.B., Oishi E., 1999. Effect of Jet Grouting on Performance of Deep Excavation in Soft Clay. Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Singapore, 279 - 284.
- Wong J.G., Poh T.Y., 2000. Effects of Jet Grouting on Adjacent Ground and Structures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 247 - 256.
- Yoshitake I., Mitsui T., Yoshikawa T., Ikeda A., Nakagawa K., 2004. An Evaluation Method of Ground Improvement by Jet-Grouting. Tunneling and Underground Space Technology, 19, 496-497.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, 8, 338-353.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Recep AKAN
Doğum Yeri ve Yılı : Adapazarı , 1986
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : recepakan@sdu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Eskişehir Fatih Fen Lisesi , 2004
Lisans : Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat
Mühendisliği, 2009

Mesleki Deneyim

Adapazarı Yapı Denetim	2009 - 2010
SDÜ Mühendislik Fakültesi	2011 -(halen)

Yayınları

Akan R., Uzundurukan S., Çimen Ö., Göksan T.S., Keskin S.N., Effects of layer depth on engineering properties of compacted soil samples. 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 876-881, 23-25 May 2013, Epoka University, Tirana, Albania.