

JET GROUT KOLON ÇAPININ TEORİK FORMÜLASYONLARLA VE DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF DIAMETER OF JET GROUT COLUMN WITH THEORETICAL FORMULATIONS AND EXPERIMENTAL RESULTS

Esra URAY¹

Asaf KELEŞ²

İsa KUL³

Özcan TAN⁴

ABSTRACT

Nowadays, jet grout method has been used as a practical and widespread soil improvement method in soils with problems of bearing capacity, settlement and liquefaction. Although the jet grout method has many advantages, it requires different diameter design for different types of soils. In solution of problem, it is possible to obtain approximate results by using theoretical formulations which are developed as to experimental data. There are many studies in the literature about attaining of estimated column diameter theoretically. In this study, proposed mathematical formulations with %15 relative error have been used in determination of estimated column diameter. The effect of design input parameters on jet grout column design has been investigated by statistical methods. Pressure of injection, rate of rod withdraw, flowrate of injection and corrected standard penetration number (SPT-N) have been taken into consideration as parameters in investigation of the design criteria. In study of design criteria, Taguchi method has been used and analyzes of signal/noise, variance and optimization have been performed. As a result, it is obtained that SPT-N is the most effective parameter in design.

Keywords: Soil improvement, Jet grout method, Theoretical formulations, Taguchi method

ÖZET

Günümüzde, taşıma gücü, oturma ve sıvılaşma problemlerinin olduğu problemlili zeminlerde jet grout metodu pratik ve yaygın bir zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Jet grout metodu birçok avantaja sahip olmasına rağmen, farklı zemin türlerinde farklı çap tasarımı gerektirmektedir. Bu problemin çözümünde yaklaşık sonuçlar elde etmek, deneysel verilere bağlı olarak geliştirilen teorik formülasyonlar kullanılarak mümkün olmaktadır. Literatürde kolon çapının teorik olarak elde edilmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında tahmini kolon çapının belirlenmesinde %15 rölatif hata değerine sahip önerilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır. Tasarım giriş parametrelerinin jet grout kolon tasarımına etkisi istatistik metotlarla bulunmuştur. Tasarım kriterlerinin araştırılmasında parametreler olarak enjeksiyon basıncı, tij geri çekme hızı, enjeksiyon debisi ve düzeltilmiş standart penetrasyon sayısı (SPT-N) dikkate alınmıştır. Tasarım kriterlerinin araştırılmasında Taguchi yöntemi kullanılmış ve sinyal/gürültü, varyans ve

¹ Research Assistant, KTO Karatay University, Department of Civil Engineering, esra.uray@karatay.edu.tr

² Undergraduate Student, KTO Karatay University, Department of Civil Engineering, asafkeles@gmail.com

³ Assistant Professor, KTO Karatay University, Department of Civil Engineering, isa.kul@karatay.edu.tr

⁴ Professor, Konya Technical University, Department of Civil Engineering, ozcantan@hotmail.com

optimizasyon analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak düzeltilmiş SPT-N nin tasarımında en etkili parametre olduğu elde edilmiştir.

Anahtar Kelime: Zemin iyileştirme, Jet grout metodu, Teorik formüller, Taguchi yöntemi

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde özellikle taşıma gücü düşük ve oturma gibi problemlere sahip zeminlerde jet grout iyileştirme yöntemi yaygın olarak farklı projelere göre zemin iyileştirmesi veya su izolasyonu amacıyla her çeşit zeminde kullanılmaktadır. Jet grout kolon oluşturma işleminin pratik olması ve kısa zamanda yapılması sebebiyle projelerde zamandan tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca pratik olması sebebiyle maliyeti diğer sistemlere göre düşüktür ve zeminin geçirgenlik özelliğinin azaltılması veya tamamen engellenmesi yönüyle diğer sistemlere göre daha uygundur. Üretilen kolonun zemin gerilmesi sebebiyle derinlerde daha küçük çapta olması, projede istenen kolon çaplarının sahada yapılan enjeksiyonla elde edilememesi, zemin derinliklerinde oluşan kolonların çap kontrolünün yapılamaması gibi durumlar bu yöntemin dezavantajları arasında yer almaktadır.

Jet grout zemin iyileştirme metodu 1970 yıllarına uzanan tarihçesiyle yeni bir zemin iyileştirme metodu olarak zayıf nitelikli zeminlerin ıslahında kullanılan yöntem ilk olarak Japonyada Nakanishi (MİKİ 1989) adında bir bilim adamı tarafından geliştirilmiştir. Jet grout sistemi ilk olarak Japon bilim adamları tarafından 1973 yılında bulunmuştur. (Yahiro ve Yoshida, 1973). Yahiro ve Nakanishi (Xanthakos, 1994) tarafından dünyaya tanıtılmıştır. 1980' lerin başında Jet 3 tipi jet grout sisteminin geliştirilmesinden sonra jet grout kullanım alanı genişlemiş ve bütün dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Jet 3 tipi jet grout sistemi ile daha büyük çapta kolon çapları oluşturulmuş ve daha ekonomik şekilde zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Jet grout zemin iyileştirme sisteminin teorik çalışmalarını ilk olarak İtalyan bilim insanları yapmıştır. Jet grout kolon çap analizi hakkında ki önemli çalışmaları Croce ve Flora adlı İtalyan bilim adamları yapmıştır. Yaptıkları çalışmalarda Jet 1 tipi jet grout sisteminin maksimum kolon çaplarını zemin çeşitlerine göre analizleri yapılmış ve kapasiteleri hakkında raporlar hazırlamışlardır (Croce ve Flora,2000; Modoni ve diğ., 2006; Modoni ve Bzòwka, 2012).

Hinze (1948) tarafından yapılan çalışmada batık jet prensibi ile batık altındaki bir jetin çalışma şekli incelenmiş ve yüksek hızdaki viskoz akışkanın nozuldan çıktıktan sonraki hızını tahmin ederek ne kadar yol alabileceği hesaplanmıştır. Jet grout sisteminde çimento şerbetinin (grout) akışkanın mekaniği açısından davranışını temel alarak jet grout kolon çapının teorik olarak elde edilmesi ile ilgili ilk olarak İtalyan bilim adamları çalışma yapmışlardır. Jet grout sisteminde iyileştirme yapılan zemin türünün farklı olmasının jet grout tasarımına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, Akışkan nozuldan çıktıktan sonra çakıllı bir zemin ile karşılaştığında sızma davranışı, killi veya kumlu bir zeminle karşılaştığında erozyon davranışı gösterdiğini bulmuşlardır (Kauschinger ve diğ., 1992; Miki, 1985; Croce ve Flora, 2000).

Jet grout sürecinde nozuldan ayrılan enerji kaybının belirlenmesinde kullanılacak olan akışkanın viskozitesi önerilen teorik denklemlerle hesaplanmıştır (Raffle ve Greenwood 1961; Bell, 1993). Hesaplanan enerji ile zeminin kesme direnci arasında ilişki kurularak iyileştirme yapılan zeminin kesme direncine göre akışkanın (çimento şerbeti) ne kadar yol alabileceği tahmin edilmeye çalışılmıştır (Farmer ve Attewell, 1965; Dabbagh ve diğ., 2002).

Teorik modellemeler ve arazi deneyleri sonucu zemin tiplerine göre jet grout kolon çapı tahmini için denklem geliştirilmiştir (Flora ve diğ., 2013).

Bu çalışmada, literatürde jet grout kolon çapının teorik olarak elde edilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar incelenerek Flora ve diğ. (2013) tarafından önerilen matematiksel ifadeler kullanılarak jet grout kolon tasarım kriterleri araştırılmıştır. Jet grout kolon tasarımında kullanılan enjeksiyon basıncı, tij geri çekme hızı, enjeksiyon debisi ve düzeltilmiş standart penetrasyon sayısının kumlu zeminler için tasarım kriterleri araştırılmıştır. Tasarım kriterlerinin araştırılmasında ortogonal dizileri kullanarak az sayıda analiz ile kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini de minimize eden istatistik tabanlı bir yöntem olan Taguchi (Taguchi ve diğ., 1989) yöntemi kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

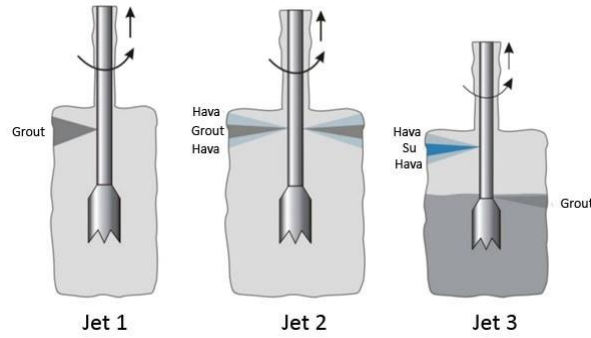
2.1. Jet Grout Zemin İyileştirme Yöntemi

Jet grout iyileştirme yöntemi belirli su/çimento oranına sahip karışımın belli bir basınçla iyileştirilmesi yapılacak derinliğe enjeksiyon edilmesi prensibine dayanmaktadır. Çimento şerbetinin delgi makinesine bağlı tij ile yüksek basınçta yapılan enjeksiyon işlemi de tij belli bir hızda döndürülüp yüzeye çekilmesiyle silindirik kolonlar oluşturulmaktadır. Bu kolonlar, zeminin taşıma kapasitesi artırması ve zemin içinde duvar oluşturması gibi farklı prensiplerle çalışmaktadır. Jet grout zemin iyileştirme yöntemi 4 ana sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemler pompa, mikser, çimento silosu ve delgi makinasıdır. Su ve çimento mikserde karıştırılarak kolon oluşturulması amaçlanan jet grout kolon çapına göre pompayla belirli bir basınç ile iyileştirme yapılacak derinliğe indirilen delgi makinasına aktarılmaktadır. Delgi makinesi bağlı tijin belirli bir hızda dönerek yukarı çekilmesiyle jet grout kolonu oluşturulmaktadır.

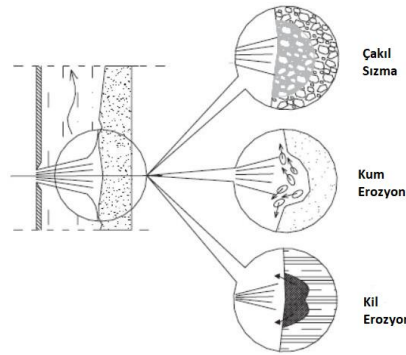
Jet grout sisteminin tasarımında farklı zemin tiplerinde daha iyi sonuç ve daha büyük kolon çapları elde edebilmek için gerekli çalışmalar yapılmış ve Şekil 1’ de verilen Jet 1, Jet 2 ve Jet 3 olmak üzere farklı jet grout sistemleri geliştirilmiştir (Kazemian ve Huat, 2010). Küçük çaplı kolon oluşturulmasında ideal ve pratik bir sistem olan Jet 1 sisteminde çimento ve su karışımı aynı anda enjekte edilmektedir. Daha büyük çapta kolon elde etmek amacıyla hava basıncının eklendiği Jet 2 sisteminde çimento şerbetinin oluşturduğu kesme kuvvetinin artırılması amaçlanmıştır. Kil gibi sıkı zeminlerde yapılan tasarımlarda istenilen büyük kolon çapını elde etmek amacıyla 3 farklı enjeksiyon sistemi kullanılmaktadır. Jet 3 sisteminde, basınçlı su ve hava aynı nozuldan yıkama yapıp daha sonra ikinci farklı bir nozuldan çimento şerbeti enjekte edilmektedir. Jet sistemlerinin çalışma prensibi Şekil 2’ de gösterilmiştir.

Jet grout metodunda kolon çapı tasarımına etki eden parametreler kontrol edilebilir parametre ve kontrol edilemeyen parametre olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Jet grout uygulamasının giriş parametreleri olan jet grout tipi, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon debisi, su/çimento oranı ve tij geri çekme hızı tasarımda etkili olan kontrol edilebilir parametrelerdir. Bununla birlikte, zemin tipi, tabakalanma durumu, yeraltı su seviyesi, zemin çimento karışımı ile reaksiyonu kontrol edilemeyen parametrelerdir. Yapılan çalışmalar sonucu zemin türüne göre iki farklı durumda kolon oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu kolon oluşumu killi ve kumlu zeminlerde erozyon (aşınma) ile gerçekleşirken, çakıllı zeminlerde ise sızma olarak gerçekleşmektedir (Şekil 2). Bu durum, basınçla zemine enjekte edilen çimento

şerbeti kil ve kum zeminde grout ile bir karıştırılmış bir yapı oluştururken, çakıl zeminde tane boyutu etkisiyle boşlukları dolduran bir yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır.



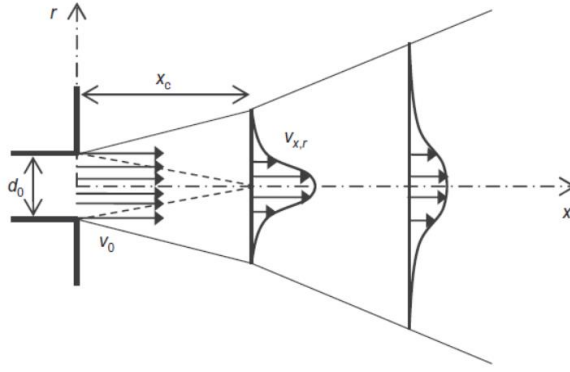
Şekil 1. Jet Grout Sistemleri (Keller, 2009)



Şekil 2. Jet Grout Çalışma Prensipleri (Modoni ve diğ., 2006)

2.2. Batık Jet Prensibi ve Teorik Kolon Çapı için Matematiksel İfadeler

Jet grout kolonunun teorik çapı, jet grout pompasının sensörleriyle ölçülen aşınma enerjisi ve zeminin direnci dikkate alan batık jet enerji teoremi ile tahmin edilebilmektedir. Batık jet enerji teoremi üzerinde çalışan Hinze (1948), batık jet ucundan çıkan bir akışkanın enerjisini ve hızını istenilen uzaklıktaki enerjisini bulan teoremleri bulmuştur. Nozulden çıkış anında V_0 hızına sahip akışkanın (grout) hidrodinamik özellikleri dikkate alınmıştır. Batık jet enerji prensibine göre çalışan jet grout sisteminde, kolon çapı jet grout sisteminin oluşturduğu enerjinin zemin direnci ile kıyaslanmasıyla elde edilebilmektedir. Flora ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada Hinze tarafından araştırılan batık jet enerji prensibinde ki hız geçişleri Şekil 3' te verilmiştir. Buna göre nozulden çıkan şerbetin x uzaklıktaki hızını teorik olarak elde edebiliriz. Batık jet prensibinde nozulden çıkan akışkan bir süre sonra nozul şekline ve çapına göre laminar akımdan türbülanslı akıma geçmektedir. Bu geçişteki enerji kayıpları teorik formüllerle tespit edilebilmektedir. Elde edilen x uzaklıktaki hız, şerbetin yoğunluğu ile birlikte enerjiye çevrilmektedir. Elde edilen bu enerji zeminin direnci ile eşitlenerek bir tahmin yapılabilir. Bu çap en kesit düzleminde oluşmaktadır. Teorik modellemede jet groutun kendi ekseninde oluşturduğu dönme en enkesit düzleminde oluşturduğu dairesel hareketten dolayı sabit olarak alınmıştır. Yüksekliğide sabit aldığımız zaman dönme süresine göre limitin oluşturduğu alan teorik modellemede kullanılan çapı vermektedir.



Şekil 3. Jet Grout Çalışma Prensibi (Flora ve diğ., 2013)

Jet grout sisteminin daha verimli hale getirmek için jet grout sisteminin giriş parametreleri olan kontrol edilebilen faktörler dikkate alındığı zaman kolon çapı tahmini için bir teorik denklemin mümkün olduğu görülmüştür. Jet grout sistemi bir pompada üretilen enerji ile enjeksiyon yapmaktadır. Çeşitli matematiksel teoriler ile tahmin edilebilen bu enerjiyi zeminin karşı koyduğu direnç ile kıyaslayarak akışkanın ilerleme mesafesi tahmin edilebilmektedir. Elde edilen bu mesafe kullanılarak batık jet enerji prensibini temel alan matematiksel denklem ile kolon çapı tahmini yapılabilmektedir (Modoni ve diğ., 2006).

Flora ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada batık jet prensibi ve zeminin karşı koyduğu direnci dikkate alarak bir denklem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada kolon çapı tasarımında daha pratik ve kullanışlı olması sebebiyle Flora ve diğ. (2013) tarafından önerilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır. Bu matematiksel ifadeye göre elde edilen kolon çapları ile literatürde deney sonuçları bilinen kolon çapları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda önerilen ortalama kolon çapı Eşitlik 1 ile verilmiştir.

$$D_a = D_{ref} \times J^\beta \times S^\delta \quad (1)$$

Burada, J ve S birimsiz terimler olup sırasıyla batık jetin erozyon kapasitesi ve zeminin erozyona direncine karşılık gelmektedir ve Eşitlik 2-Eşitlik 7 ile verilmiştir. D_{ref} zemin özelliklerine bağlı referans çaptır ve β ve δ katsayıları ile birlikte araziden alınan deney sonuçlarına göre kalibre edilmiş değerlerdir. Zemin sınıfları çakıl, kum ve kil olmak üzere 3 zemin sınıfına ayrılmış olup D_{ref} değeri zemin sınıflarına göre sırasıyla 1.0, 0.8 ve 0.5 olarak verilmiştir (Çizelge 1).

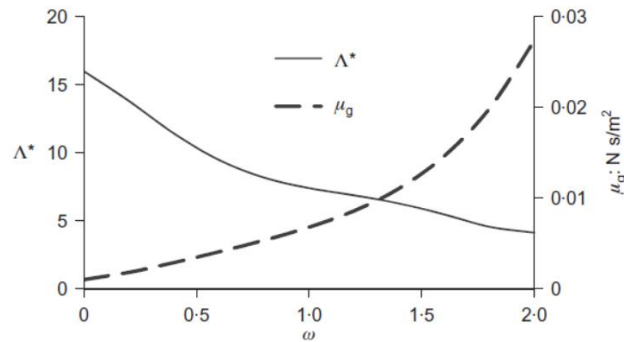
$$J = \frac{\alpha \times \Lambda^* \times E_n'}{\alpha_{ref} \times \Lambda_{ref}^* \times E_{nref}'} \quad (2)$$

Burada, α jet grout tipine göre değişen bir katsayı olup Jet 1 sistemde değeri 1 olarak alınırken Jet 2 ve Jet 3 için yapılan deneyler sonucunda $\alpha > 1$ olduğu gözlemlenmiş ve $\alpha = 6$ olarak alınması önerilmiştir (Çizelge 1).

Λ^* değeri şerbetin karışım oranına bağlı olarak değişen şerbetin kinematik viskozite değeridir (Şekil 3). Şekil 3' te verilen μ_g çimento şerbetinin viskozite değeri ve ω ağırlıkça çimento-su oranıdır.

Çizelge 1. Zemin Türlerine Göre β ve α Katsayıları (Flora ve diğ. (2013))

Zemin Türü		ASTM D2487 zemin sınıflandırması	D_{ref}	β	α
İri Daneli	İçinde İnce Dane Olmayan	GW-GP- SW-SP (%5 ten az ince malzemesi olan)	1.0	0.20	-0.25
	İçinde İnce Dane Olan	GM- GC-SM-SC (%5 ten fazla ince malzemesi olan)	0.8		
İnce Daneli		CL- ML-OL- CH- MH-OH-Pt (Kil, Silt ve organik zeminler)	0.5		



Şekil 4. Jet Grout Şerbeti kinematik viskozite değerleri (Flora ve diğ., 2013)

E_n' (MJ/m) şerbetin nozuldan ayrılmadan önceki enerji değeridir ve şerbetin nozuldan ayrılmadan önceki değerin okunması önerilmektedir (Eşitlik 3, Flora ve Lirer, 2011).

$$E_n' = 0.9 \times E_p' \quad (3)$$

Yukarıda belirtilen E_p' enjeksiyon pompasından jet grout nozul ucuna kadar olan kısımda ki enerji kaybına karşılık gelmekte olup bu enerji kaybı ideal şartlarda %10 olarak önerilmiştir. Pompa ile nozul arasında ki mesafe arttıkça bu rakam yeniden belirlenmelidir. Yukarıda enjeksiyon pompasında oluşan enerjinin hesaplanması için Eşitlik 4 önerilmiştir (Tornaghi, 1989). Burada, Q (m^3/sn) nozuldan çıkan şerbetin debisini, P (bar) şerbetin basıncını ve V_r (m/sn) ise tijin geri çekme hızını belirtmektedir. α_{ref} , Λ_{ref}^* ve E_{ref}' referans değerleri yapılan deneyler sonucu önerilmiş olup formülde 1m kolon için gereken değerler verilmiştir (Eşitlik 5). Zeminin erozyona karşı direnci, S , SPT zemin etüdü için Eşitlik 6 ve CPT zemin etüdü için Eşitlik 7 verilmiştir.

$$E_p' = \frac{Q \times P}{V_r} \quad (4)$$

$$\alpha_{ref} = 1 \quad \Lambda_{ref}^* = 7.5 \quad E_{ref}' = 10 \text{ MJ/m} \quad (5)$$

$$S = \frac{N_{SPT}}{N_{SPT_{ref}}} = \frac{N_{SPT}}{10} \quad (6)$$

$$S = \frac{q_c}{q_{c_{ref}}} = \frac{q_c}{1.5} \quad (7)$$

Bu çalışmada detayları verilen kolon çapı belirlenmesinde kullanılan matematiksel ifade kullanılarak jet grout tasarım kriterleri araştırılmıştır.

2.3. Taguchi Yöntemi ve Tasarım Parametreleri

Jet grout kolon tasarımında kullanılan olan parametrelerin etki değerlerinin belirlenmesi tasarım aşamasında önemlidir. Farklı zemin türlerinde farklı özelliklere sahip olarak üretilen jet grout kolonlar için geliştirilmiş gerçek duruma yakın sonuç veren analiz programı bulunmamaktadır. Bu sebeple Çizelge 2’ de seviyeleri ile birlikte verilen tasarım parametrelerini kullanarak elde edilen teorik kolon çapının belirlenmesinde Flora ve diğ. (2013) tarafından önerilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır (Eşitlik 1). Tasarım parametrelerinin seviyelerinin belirlenmesinde Flora ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada kullanılan deney verilerinden faydalanılmıştır.

Çizelge 2. Tasarım parametre ve seviyeleri

Kontrol edilebilen parametre	Sevive 1	Sevive 2	Sevive 3	Sevive 4
P (bar): Enieksivon basıncı	100	200	300	400
Vr(m/s): Tii geri çekme hızı	0.001	0.002	0.003	0.004
O(m ³ /s): Enieksivon debisi	0.5	1	1.5	2
SPT-N: Düzeltilmiş SPT-N sayısı	5	10	15	20

Taguchi Metodu, ortogonal dizileri kullanarak kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini minimize etmeye çalışan istatistik tabanlı tasarım yöntemidir. Parametrelerin tasarıma etkisinin araştırılmasında Taguchi tarafından önerilen ortogonal dizin tablolarından biri olan L₁₆ tasarım tablosu kullanılmıştır (Çizelge 3).

Taguchi tarafından tanımlanan “Sinyal/Gürültü oranı (S/N)”, deney tasarımında kontrol edilen parametrelerin sonuç üzerinde etkisini minimize etmek için kullanılan ve analiz değişkeni ya da performans kriteri olarak adlandırılan bir orandır. Bir dizi istatistik olarak ifade edilen S/N oranı uygulamada ki çalışma sonunda ulaşılması istenen hedef türüne göre en küçük en iyi, en büyük en iyi ve hedef değer en iyi olarak üçe ayrılmıştır. Bu çalışmada jet grout kolon tasarımına parametrelerin etkisi “en büyük en iyi” duruma göre hesaplanmıştır (Eşitlik 8).

$$S/N = -10 \log \left[\frac{\sum (1/Y^2)}{n} \right] \quad (8)$$

Burada, Y, hedef değere ve n, deneme sayısına karşılık gelmektedir.

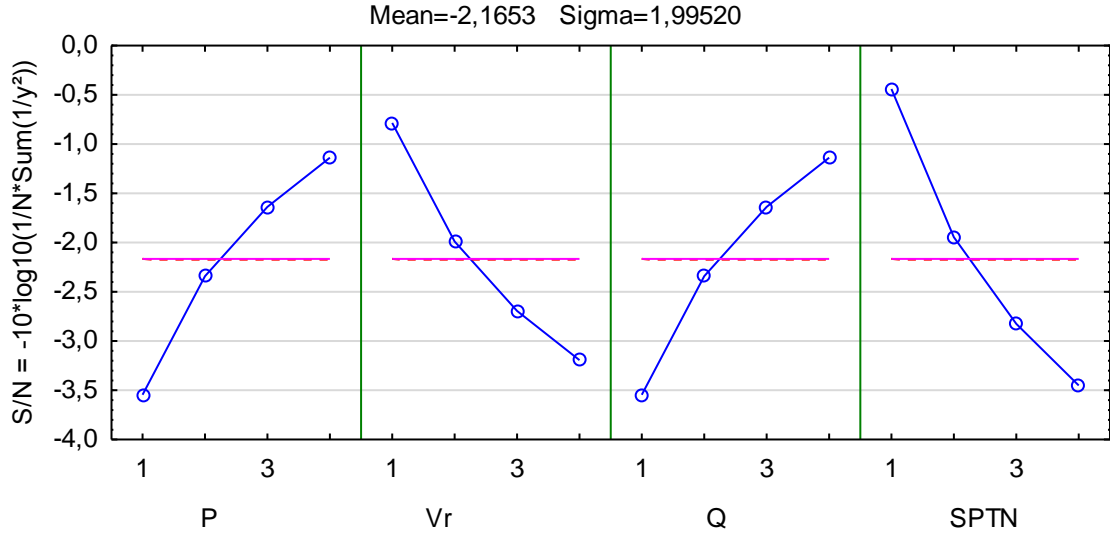
3. TASARIM KRİTERLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Jet grout kolon tasarımında, tahmini kolon çapına etkisi tasarım kriterlerinin araştırılmasında S/N oranları kullanılmıştır. Düzenlenmiş L₁₆ ortogonal tasarım tablosu göre hesaplanmış D_a değerleri kullanılarak elde edilen S/N oranları Çizelge 3’ te verilmiştir. Aynı tabloda Çizelge 2’ de verilen tasarım parametrelerine göre güncellenmiş L₁₆ tasarım tablosu ve Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmış kolon çapları (D_a) verilmiştir. Bu çalışma kapsamında kum zeminde jet grout kolon tasarımı araştırılması sebebiyle D_{ref}, 0.8 olarak alınmıştır.

Çizelge 3. L₁₆ ortogonal dizin tablosu

Tasarım No	Tasarımların yapılacağı parametre seviyeleri				P (bar)	V _r (m/s)	Q (m ³ /s)	SPT-N	D _a (m)	S/N
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄						
1	1	1	1	1	100	0.5	0.001	5	0.81	-
2	1	2	2	2	100	1	0.002	10	0.68	-
3	1	3	3	3	100	1.5	0.003	15	0.62	-
4	1	4	4	4	100	2	0.004	20	0.57	-
5	2	1	2	3	200	1	0.001	15	0.81	-
6	2	2	1	4	200	0.5	0.002	20	0.57	-
7	2	3	4	1	200	2	0.003	5	0.99	-
8	2	4	3	2	200	1.5	0.004	10	0.74	-
9	3	1	3	4	300	1.5	0.001	20	0.89	-
10	3	2	4	3	300	2	0.002	15	0.88	-
11	3	3	1	2	300	0.5	0.003	10	0.68	-
12	3	4	2	1	300	1	0.004	5	0.88	-
13	4	1	4	2	400	2	0.001	10	1.19	1,491
14	4	2	3	1	400	1.5	0.002	5	1.16	1,292
15	4	3	2	4	400	1	0.003	20	0.70	-
16	4	4	1	3	400	0.5	0.004	15	0.62	-

Parametre seviyelerine (seviye 1, 2, 3 ve 4) göre belirlenmiş olan ortalama S/N oranlarının değişimi Şekil 5’ te görülmektedir. Verilen grafiksel değişim incelendiği zaman maksimum kolon çapının elde edilmesinde enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon debisi arttıkça kolon çapında artış; tij geri çekme hızı ve düzeltilmiş standart penetrasyon sayısı arttıkça kolon çapında azalma elde edilmiştir.



Şekil 5. Parametre seviyelerine göre ortalama S/N oranlarının değişimi

İstatistiksel bir kavram olan varyans, verilerin aritmetik ortalamadan sapmalarının karelerinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Jet grout kolon çapına etkisi araştırılan tasarım parametrelerinin varyans analizleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4’ te verilmiştir.

Çizelge 4’ te verilen parametre etki oranları incelendiği zaman kolon çapı tasarımına en fazla etki eden parametrenin SPTN olduğu görülmektedir. Ayrıca, diğer parametrelerin tasarıma etkisinin %22 lik değeriyle aynı olduğu sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4. Varyans analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi (DOF)	Kareler Toplamı (Ss)	Varyans	Etki oranı (P) (%)
P (bar)	3	13.088	4.363	22
V _r (m/s)	3	13.088	4.363	22
Q(m ³ /s)	3	13.088	4.363	22
SPTN	3	20.449	6.816	34
Toplam	15	59.712		

Taguchi yönteminde maksimum jet grout kolon tasarımında maksimum kolon çapının elde edilmesi için tasarım parametresinin seviye değerini elde edilebilmektedir. Taguchi optimizasyon analizleri sonucu elde edilen maksimum kolon çapı için önerilen parametre seviyeleri ve beklenen kolon çapı Çizelge 5’ te görülmektedir. Bu parametre seviyelerine karşılık gelen parametre değerleri kullanılarak maksimum kolon çapı Eşitlik 1’ e göre hesaplanmıştır. Beklenen kolon çapı ve doğrulama analiz kolon çapı kullanılarak hesaplanan rölatif hata değeri %1.9 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5 Taguchi optimizasyon analiz sonuçları

Parametre	Parametre Seviyesi	Parametre Değeri
P (bar)	4	400
V _r (m/s)	1	0,001
Q(m ³ /s)	4	2
SPTN	1	5
Beklenen maksimum kolon çapı (m)		1,44
Doğrulama analizi maksimum kolon çapı		1,41
Rölatif Hata (%)		1,9

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada son zamanlarda zemin iyileştirme tekniği olarak yaygın olarak kullanılan jet grout kolon tasarımında etkili parametreler literatürde kolon çapı için önerilen teorik matematiksel ifadeler kullanılarak araştırılmıştır. Kum zeminde yapılan tasarıma etki eden parametreler olarak enjeksiyon basıncı, tij geri çekme hızı, enjeksiyon basıncı ve iyileştirme yapılacak zemine ait düzeltilmiş standart penetrasyon sayısı alınmıştır. Tasarım kriterlerinin araştırılmasında istatistik tabanlı Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi tarafından önerilen 4 seviyeli 4 parametre için L₁₆ ortogonal dizin tablosu kullanılmıştır. Normal şartlarda her parametrenin her seviyesinin oluşturduğu tüm kombinasyonların sonuç üzerine etkisini araştırmak zaman almaktadır. Bu sebeple seçilen tasarım parametre ve seviyelerine göre düzenlenmiş L₁₆ ortogonal dizin tablosu kullanılarak kolon çaplarının kısa zamanda hesaplanması amaçlanmıştır. Değişken zemin koşullarında zemin malzemesi kullanılarak oluşturulan kolonların farklı özelliklere sahip olması sebebiyle günümüzde yaygın olarak kullanılan jet grout metodu ile ilgili geliştirilmiş gerçek duruma yakın tasarımlar yapabilen bir yazılım bulunmamaktadır. Bu çalışmada kolon çapının elde edilebilmesi için literatürde verilmiş teorik formülasyonlar kullanılmıştır.

Taguchi yöntemi ile yapılan tasarım ve analizler sonucunda homojen zemin ortamı için, jet grout kolon imalatlarında kolon çapı üzerinde en etkili parametrenin %34 ile düzeltilmiş standart penetrasyon vuruş sayısı olduğu belirlenmiştir. SPT darbe sayısı (diğer bir ifade ile zeminin sıklığı) arttıkça kolon çapında yaklaşık lineer bir azalma meydana gelmektedir.

Diğer parametrelerin (enjeksiyon basıncı, geri çekme hızı ve enjeksiyon debisi) JG kolon çapı üzerindeki etki oranları %22 olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon debisi arttıkça kolon çapı artarken, geri çekme hızı arttıkça kolon çapı azalmaktadır. Etki oranlarının yüksek ve birbirine yakın olması, tasarım ve imalat esnasında bu parametrelerin hepsinin dikkate alınması ve farklı işletim parametreleri için deneme kolonlarının yapılarak en uygun çap oluşumunun gerekli olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Bell, A. L. (1993), Engineering properties of soils. London: E & FN Spon.
- Burke, G. K. (2004), "Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages", In Proceeding of GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods and Specialty Foundation Systems, pp. 875-886, DOI: 10.1061/40713(2004)75.
- Croce, P., Alessandro, F. (2000), "Analysis of Single-Fluid Jet Grouting", Geotechnique, Vol 50, 739-748.
- Dabbagh, A. A., Gonzalez, A. S. ve Pena, A. S. (2002), "Soil Erosion by a Continuous Water Jet", "Soils and foundations", Vol 42.5, 1-13.
- Durgunoğlu, T., Kulaç, F., İkiz, S., Sevim, O. ve Akçakal, O. (2012), "Offshore Jet Grouting: A Case Study", In Proceedings of the ISSMGE-TC211 International Symposium on Ground Improvement, pp. 225-234.
- Erkan, İ. H. (2013), "Jet Grout Kolonların Performansını Etkileyen Faktörlerin Deneysel Olarak Araştırılması", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erol, O. A., Çekinmez Bayram, Z. (2018), "Jet Enjeksiyon Yöntemi", Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Ankara.
- Farmer, I. W., Attewell, P. B. (1965), "Rock Penetration by High Velocity Water Jet: A Review of the General Problem and an Experimental Study", In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol 2.2, pp. 135-153, Pergamon.
- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S. ve Croce, P. (2013), "The Diameter of Single, Double and Triple Fluid Jet Grouting Columns: Prediction Method and Field Trial Results", Géotechnique, Vol 63.11, 934.
- Hinze, J. O. (1948), "Turbulence", New York, USA, McGraw-Hill (1st edn.).
- Kauschinger, J. L., Perry, E. B. ve Hankour, R. (1992), "Jet grouting: State-of-the-Practice", In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE, pp. 169-181.
- Kirsch, K., Bell, A. (Eds.), (2012). "Ground improvement", CRC Press(First Edt.).
- Modoni, G., Croce, P. ve Mongioli, L. (2006), "Theoretical Modelling of Jet Grouting", Géotechnique, Vol 56.5, 335-348.
- Modoni, G., Bzowka, J. (2012), "Design of Jet Grouting for Foundation", J. Geotech. Geoenviron. Engng, ASCE, Vol 138.12, 1442-1454, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000718](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000718).
- Miki, G. (1985), "Soil Improvement by Jet Grouting", In Proceedings of 3rd Int. Geotech. Seminar on Soil Improvement Methods, Singapore, pp. 45-52.
- Ochmański, M., Modoni, G. ve Bzówka, J. (2015), "Prediction of the Diameter of Jet Grouting Columns with Artificial Neural Networks, Soils and Foundations, Vol 55.2, 425-436.
- Ribeiro, D., Cardoso, R. (2017), "A review on Models for the Prediction of the Diameter of Jet Grouting Columns, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 21.6, 641-669.
- Rollins, K. M., Adsero, M. E. ve Brown, D. A. (2008), "Use of Jet Grouting to Increase Lateral Pile Group Resistance in Soft Clay", In Proceedings of the 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Shibazaki, M. (2003), "State of Practice of Jet Grouting", In Proceedings of the Grouting and Ground Treatment (pp. 198-217).
- Taguchi, G., Elsayed, E. A. ve Hsiang, T. C. (1989), "Quality Engineering in Production Systems", McGraw-Hill, New York. 173.
- Ueda, H., Hinze, J. O. (1975), "Fine-Structure Turbulence in the Wall Region of a Turbulent Boundary Layer, Journal of Fluid Mechanics, Vol 67.1, 125-143.
- Yahiro, T., Yoshida, H. (1973), "Induction Grouting Method Utilizing High Speed Water Jet", In Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4, 359-362.

Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. ve Bruce, D. A. (1994), "Ground Control and Improvement", John Wiley & Sons.