

ÇİMENTO ENJEKSİYONLARININ KUMLARA ENJEKTE EDİLEBİLİRLİĞİNİN DİSKRİMİNANT ANALİZİ İLE İRDELENMESİ

Erhan TEKİN ve S. Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
tekin@gazi.edu.tr, soakbas@gazi.edu.tr

(Geliş / Received: 22.10.2009 ; Kabul / Accepted: 13.04.2010)

ÖZET

Bu çalışmada çok değişkenli istatistiksel bir teknik olan diskriminant analizinin, enjekte edilebilirliğin tahmin edilmesine uygulanabilirliği araştırılmıştır. Öncelikle diskriminant analizinin yapısı özetlenmiştir. Enjekte edilebilirliğin, süspansiyonun reolojik özellikleri, enjeksiyon basıncı, zeminin dane çapı dağılımı, zeminin rölatif sıklığı ve ince dane miktarı ile değiştiği göz önünde bulundurularak, literatür ve deneysel çalışmalardan 88 adet enjeksiyon veri seti sağlanmış, bu veriler üzerinde diskriminant analizi uygulanmıştır. Diskriminant fonksiyonları oluşturulan iki ayrı model için elde edilmiştir. Belirlenen fonksiyonlar, enjekte edilebilirliğin tahmininde en önemli etkenin zeminin ağırlıkça %15'inin geçtiği elek çapının (D_{15}), enjeksiyon malzemesinin ağırlıkça %85'inin geçtiği elek çapına (d_{85}) oranı olduğunu göstermiştir. Oluşturulan modellerden ilki, literatürde yer alan ampirik yöntemler ile elde edilen sonuçlar temelinde karşılaştırıldığında, bu modelin, kullandığı az sayıda değişkene rağmen, var olan yöntemlerin içerisinde en iyi ikinci sonucu verdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon, enjekte edilebilirlik, diskriminant analizi.

ESTIMATION OF THE GROUTABILITY OF GRANULAR SOILS WITH CEMENT-BASED GROUTS USING DISCRIMINANT ANALYSIS

ABSTRACT

In this study, the applicability of discriminant analysis, which is a multivariate statistical technique, on the estimation of groutability is investigated. First, a general overview of discriminant analysis is presented. Considering that the groutability is a function of the rheological properties of the grout, the injection pressure, the grain size distribution, the fines content, and the relative density of the soil, a discriminant analysis is applied to a database that consists of 88 laboratory grouting test results. Discriminant functions are developed for two separate models. The developed functions indicate that the most significant variable for the estimation of groutability is the ratio of the grain diameter of soil corresponding to 15% passing (D_{15}) to the diameter of the injected material particles corresponding to 85% passing (d_{85}). Even though it uses only two parameters, the first method proposed herein ranks second in the percentage of successful predictions when compared with other groutability estimation methods.

Keywords: Grouting, groutability, discriminant analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enjeksiyon, sıvı materyallerin genellikle sondaj delikleri vasıtasıyla, basınç altında zemin boşluklarına veya kayaç çatlaklarına enjekte edilmesi işlemidir [1]. Genelde zemin içerisindeki boşluklara nüfuz ederek, formasyonun mukavemetini artırmak, deforme olabilirliğini ve geçirimsizliğini azaltmak amacıyla kullanılır. Permeasyon enjeksiyonlarının zemine zerk ol-

ması süspansiyon partiküllerinin geçirimli ortamdan taşıyıcı sıvı ile taşınarak; içsel-granüler boşluk ortamına akan süspansiyon içerisindeki parçacıkların depolanması şeklinde gerçekleşir. Fiziksel olarak enjeksiyonun zemine penetre olmasına ya da olma-masına, geçirgenli ortamın enjekte edilebilirliği (N) adı verilmektedir.

Kimyasal enjeksiyon sonrası ortaya çıkabilecek olası çevre kirliliği problemleri ve zamanla oluşabilecek mukavemet azalmaları sebebi ile, çimento enjeksiyonlarının özellikleri ve davranışı üzerinde yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermektedir [2, 3]. Çimento enjeksiyonlarının uygulanmasında karşılaşılan en büyük sorun enjekte edilebilirliğin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesinde yaşanan zorluklardır. Enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilebilirliği zamana bağlı karmaşık bir iletim problemi olup, bunu kontrol eden en önemli etkenler, kullanılan enjeksiyon türü, enjeksiyon basıncı (P), formasyonun boşluk boyutu, enjeksiyon malzemesinin tane boyutu, hidrolik eğim ve enjeksiyon malzemesinin reolojik özellikleridir. Genelde problem, enjekte edilebilirlik kriteri fiziksel olarak enjeksiyon malzemesinin zemine penetre olacağını gösterirken, uygulamada bunun tersi olarak, enjeksiyonun başarıyla sonuçlanmamasıdır. Bu durum küçük parçacıkların kimyasal filtrasyona yol açması özelliğinin sonucu olarak, ince taneli çimento enjeksiyonunun enjekte edilebilirliğini etkilemesiyle açıklanabilir. Bunun ötesinde, enjeksiyonun özellikleri ve davranışı, kimyasal reaksiyondan dolayı sabit değişim içerisinde [4]. Bu sebeplerle, enjekte edilebilirliğin tahminine yönelik farklı modellere rastlanmaktadır [5, 6, 7, 8].

Temel ilkeleri ilk kez Fisher [9] tarafından ortaya konulan ve iki veya daha fazla grubun ayırıcı özelliklerinin istatistik araçları kullanılarak belirlenmesini içeren diskriminant analizi, çok sayıda değişkenin söz konusu olduğu problemler kapsamında, birçok bilim dalında uygulama alanı bulmuştur [10, 11]. Geoteknik mühendisliği çalışmalarında da diskriminant analizi sınıflama potansiyelinin belirlenmesinde [12], şev stabilitesi problemlerinde [13], yer altı yapıları tehlike analizlerinde [14] ve kaya mekaniği uygulamalarında [15] kullanılmıştır. En basit biçimde diskriminant analizi, veri örneklerini en az hata ile ait oldukları kitlelere ayırmak için yapılan işlemler topluluğu olarak tanımlanabilir. Diskriminant fonksiyonunun oluştu-

rulmasında, belirlenecek grupların ortalamaları arasındaki farklılığın maksimum olması amaçlanmaktadır [16]. Bu kapsamda, çok sayıda değişkenin etkisi altında olması ve bunların birbiri ile etkileşimi dolayısı ile, diskriminant analizi kullanıma çok uygun bir problem olan enjekte edilebilirliğin tahmininde, bu yöntemin uygulandığı bir çalışmaya literatürde rastlanmaması şaşırtıcıdır. Bu durum, diskriminant analizinin kumların ince taneli çimento ile enjekte edilebilirlik tahmini üzerindeki başarısının sorgulanması ihtiyacını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, öncelikle literatürde varolan enjekte edilebilirlik ilişkilerinden yaygın olarak kullanılan ve kabul görmüş olan bağıntılar özetlenmiştir. Ardından, literatürden ve deneysel çalışmalardan kumların ince taneli çimento ile enjekte edilebilirliği üzerine 88 adet örnekten oluşan bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veriler üzerinde diskriminant analizinin kullanılabilirliğini saptamak amacıyla enjeksiyon parametrelerinin uygunluğu istatistiksel olarak denetlenmiştir. İki farklı diskriminant modeli oluşturularak, bu modellerin nihai başarısı birbirleri ve diğer sık kullanılan bağıntılar ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. ENJEKTE EDİLEBİLİRLİĞİ TAHMİN ETMEDE KULLANILAN AMPİRİK YÖNTEMLER (EMPIRICAL METHODS FOR THE ESTIMATION OF GROUTABILITY)

Enjekte edilebilirliği tahmin etmekte başlangıç noktası olarak Hazen [17] tarafından bir eşitlik geliştirilmiştir [5]. Hazen Denklemi özellikle örselememiş kumlu zeminlerde oldukça doğru sonuçlar verir. Bu doğrultuda zeminin enjekte edilebilirliği hakkında Tablo 1'e bakılarak yorum yapılmalıdır [18]. Burwell ve Mitchell denklemi de, pratikliği ve az sayıda değişken içermesi sebebiyle çimento enjeksiyonlarının granüler zeminlere enjekte edilebilirliğinin tahmininde sıkça kullanılan bir diğer yaklaşım olup, zemin ve enjeksiyon malzemesinin gradasyonlarını karakterize eden iki değer karşılaştırılmasına dayanır [5, 6].

Tablo 1. Ampirik enjekte edilebilirlik yaklaşımları (Empirical Methods for Estimation of Groutability)

Yöntem	Enjeksiyon yorumu
Burwell ve De Beer [5; 17] $k \text{ (cm/s)} = 116 (0.7 + 0.034t) (D_{10})^2$ $t = \text{sıcaklık (}^\circ\text{C)}$	$k > 1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$, çimento enjeksiyonu ile mümkün $k > 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, ince taneli çimento enjeksiyonu ile mümkün $k > 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, solüsyon enjeksiyonu ile mümkün
Burwell ve Mitchell [5; 6] $N_\alpha = (D_{15}) / (d_{85})$ $N_\alpha > 25$ ise N_β hesaplanmalı: $N_\alpha = (D_{10}) / (d_{95})$	$N_\alpha > 25$, enjeksiyon sürekli mümkün, $N_\alpha < 11$, enjeksiyon mümkün, $11 < N_\alpha < 25$, arazi deneyleri yapılmalı, $N_\beta > 11$, enjeksiyon sürekli mümkün, $N_\beta < 5$, enjeksiyon mümkün değil, $5 < N_\beta < 11$, arazi deneyleri yapılmalı,
İncecik ve Ceren [7] $N_\gamma = (D_{10}) / (d_{90})$	$N_\gamma > 10$, enjeksiyon mümkün, $N_\gamma < 10$, enjeksiyon mümkün değil,
Akbulut ve Sağlamer [8] $N_\zeta = \frac{(D_{10})}{(d_{90})} + k_1 \frac{s/\zeta}{FC} + k_2 \frac{P}{D_r}$ $k_1 = 0.5, k_2 = 0.01 \text{ 1/kPa}$	$N_\zeta > 28$, enjeksiyon mümkün, $N_\zeta < 28$, enjeksiyon mümkün değil.

İncecik ve Ceren [7] de enjekte edilebilirliği yine süspansiyon ve zeminin dane çaplarıyla ilişkilendiren bir yaklaşım getirmişlerdir. Granüler zeminler için enjekte edilebilirliği belirleyen yeni ve sık kullanılan diğer bir denklem de Akbulut ve Sağlamer [8] tarafından ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımın $0 < \text{ince tane yüzdesi (FC)} < \%6$, $0,8 < \text{su çimento oranı (s/ç)} < 2$, $50 < P < 200$ kPa değerleri arasında daha uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Enjekte edilebilirliği değerlendirme yöntemleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

3. DOĞRUSAL DİSKRİMİNANT ANALİZİ (LINEAR DISCRIMINANT ANALYSIS)

Diskriminant analizi, değişkenleri doğrusal kombinasyon kümelerine ayırarak, grup içerisinde değerlerin birbirine yakın olmasını, gruplar arasında ise olabildiğince farklı olmasını amaçlar. Bu doğrusal kombinasyonlar diskriminant fonksiyonları olarak isimlendirilir ve aşağıdaki biçimde gösterilir:

$$Y_{km} = a_0 + a_1 X_{1km} + a_2 X_{2km} + \dots + a_p X_{pkm} \quad (1)$$

Burada, $Y_{km} = k$ grubunda m örneği için diskriminant fonksiyonundaki değer, $X_{ikm} = k$ grubunda m örneği için X_i diskriminant değişkenindeki değer, $a_i =$ fonksiyonda istenilen özellikleri sağlayan katsayıdır. Böyle bir fonksiyon bulunurken, gruplar arası varyansın grup içi varyansa göre en büyük hale getirilmesi gerekir. Bu düşünceyle a_i katsayılarının bulunmasında kullanılan ilk eşitlik Fisher tarafından aşağıdaki biçimde verilmiştir [9]:

$$\frac{a^T B a}{a^T W a} \quad (2)$$

Burada $B = p \times p$ boyutlu gruplar arası varyans matrisi, $W = p \times p$ boyutlu grup içi varyans matrisidir. Eş. 2 ifadesinin çözümü $W^{-1}B - \lambda I = 0$ denklemi yardımıyla yapılır. Bu matrisin özdeğerleri (λ) ve özvektörlerinin hesaplanmasıyla diskriminant fonksiyonu için

gerekli ağırlıklar bulunmuş olur. Benzer şekilde, varsa ikinci diskriminant fonksiyonu için özdeğerler ve özvektörler hesaplanır. İkinci diskriminant fonksiyonu için katsayılar, ilk diskriminant fonksiyonunun değerleriyle bağıntı kurulmadan sabit-lenerek, gruplar arası farkları maksimize etmek için türetilmiştir. Bir başka deyişle ikinci diskriminant fonksiyonu ilkinin ortogonaldır. Üçüncü diskriminant fonksiyonu ise ikinciyeye ortogonaldır. Türetilebilecek olan maksimum fonksiyon sayısı grup sayısından bir eksiktir veya diskriminant değişkenlerinin sayısına eşittir.

Analizin uygulanabilmesi için, bütün gruplar için kovaryans matrislerinin eşit olması, değişkenlerin çoklu normal dağılıma sahip olmaları ve bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı probleminin olmaması gerekir. Diskriminant fonksiyonunun istatistiksel uygunluğu için en yaygın test geri kalan ayırma dayanır. Eğer nihai ayırma çok küçükse daha fazla fonksiyon türetmeye gerek yoktur. Bu kararı vermek için en eski ve en sık kullanılan yöntem Eş. 3 ile tanımlanmış olan Wilks’in lamdasıdır (Λ) [19]:

$$\Lambda = \prod_{i=k+1}^q \frac{1}{1 + \lambda_i} \quad (3)$$

Burada, λ_i özdeğeri, k türetilen fonksiyon sayısını gösterir. Örneğin; $\Lambda = 1.0$ ayırma olmadığını ve grup merkezlerinin aynı, $\Lambda = 0$ en büyük ayırmanın olduğu ve grup merkezlerinin birbirinden uzak olduğunu gösterir. Λ 'nın istatistiksel uygunluğu ise Ki-kare dağılımı yaklaşımına çevirilerek test edilir.

4. ENJEKTE EDİLEBİLİRLİĞİN DİSKRİMİNANT ANALİZİ İLE SINIFLANDIRILMASI (CLASSIFICATION OF GROUTABILITY WITH DISCRIMINANT ANALYSIS)

İnce taneli çimento ile granüler zeminlere enjeksiyon modellemesi için kullanılan deney verileri Tablo 2’de sunulmuştur. Bu kayıtlar 5 farklı deney çalışmasından

Tablo 2. Enjeksiyon model deneyleri parametreleri (Parameters for Grouting Experiments)

No	S/Ç	D _r (%)	P (kPa)	FC (%)	D _{10,zemin} (mm)	D _{15,zemin} (mm)	d _{85,enj} (mm)	d _{90,enj} (mm)	d _{95,enj} (mm)
1	1	80	50	1	2.50	2.70	0.03100	0.04000	0.06000
2	1	80	100	1	1.28	1.40	0.03100	0.04000	0.06000
3	1	80	100	1	0.60	0.65	0.03100	0.04000	0.06000
4	1	80	100	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
5	1	80	150	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
6	1	80	250	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
7	2	30	100	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
8	2	30	200	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
9	1	80	100	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
10	1	80	150	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
11	1	80	200	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
12	2	30	100	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
13	2	30	200	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
14	1	80	100	33	0.70	0.85	0.03100	0.04000	0.06000
15	1	80	100	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000

alınmıştır. 1 ile 38 numaralı veriler Akbulut ve Sağlamer [8], 39-57 numaralı veriler Zebovits vd. [20], 58-72 numaralı örnekler Tekin [21] ve geriye kalan 73-88 numaralı örnekler de bu makale için yapılan deney sonuçlarından oluşmaktadır. Toplam 88

adet deneyden 51 tanesi enjeksiyon işleminde başarıya ulaşırken, 37 adet deney, enjekte edilebilirlik anlamında başarısızlıkla sonuçlanmıştır.

Tablo 2. (Devamı) (Continued)

No	S/Ç	D _r (%)	P (kPa)	FC (%)	D _{10,zemin} (mm)	D _{15,zemin} (mm)	d _{85,enj} (mm)	d _{90,enj} (mm)	d _{95,enj} (mm)
16	1	80	150	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
17	1	80	200	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
18	1	30	200	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
19	2	30	200	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
20	1	80	100	15	0.54	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
21	2	30	200	15	0.54	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
22	1	80	100	10	0.60	0.73	0.03100	0.04000	0.06000
23	1	80	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
24	1	80	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
25	1	80	150	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
26	1	80	200	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
27	1	30	200	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
28	2	30	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
29	2	30	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
30	3	30	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
31	2	30	200	100	0.32	0.35	0.03100	0.04000	0.06000
32	2	30	200	34	0.37	0.44	0.03100	0.04000	0.06000
33	1	80	200	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
34	2	30	200	15	0.48	0.60	0.03100	0.04000	0.06000
35	1	80	100	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
36	1	80	150	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
37	1	80	200	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
38	1	30	200	5	0.76	0.88	0.03100	0.04000	0.06000
39	4	70	517	100	0.15	0.17	0.00600	0.00640	0.00800
40	4	70	517	100	0.14	0.16	0.00600	0.00640	0.00800
41	4	70	517	100	0.13	0.15	0.00600	0.00640	0.00800
42	4	70	690	100	0.13	0.15	0.00600	0.00640	0.00800
43	4	70	690	100	0.12	0.13	0.00600	0.00640	0.00800
44	4	70	483	25	0.35	0.43	0.00600	0.00640	0.00800
45	4	70	517	25	0.32	0.40	0.00600	0.00640	0.00800
46	4	70	690	25	0.12	0.15	0.00600	0.00640	0.00800
47	4	70	690	25	0.12	0.15	0.00600	0.00640	0.00800
48	4	70	690	25	0.30	0.35	0.00600	0.00640	0.00800
49	2	70	655	100	0.15	0.17	0.00600	0.00640	0.00800
50	4	70	517	100	0.15	0.17	0.00600	0.00640	0.00800
51	6	70	345	100	0.15	0.17	0.00600	0.00640	0.00800
52	2	70	552	65	0.19	0.22	0.00600	0.00640	0.00800
53	4	70	483	65	0.19	0.22	0.00600	0.00640	0.00800
54	6	70	241	65	0.19	0.22	0.00600	0.00640	0.00800
55	2	70	552	25	0.35	0.43	0.00600	0.00640	0.00800
56	4	70	448	25	0.35	0.43	0.00600	0.00640	0.00800
57	6	70	241	25	0.35	0.43	0.00600	0.00640	0.00800
58	1	30	100	100	0.10	0.12	0.00880	0.01100	0.01500
59	1	27	100	20	1.04	1.07	0.00880	0.01100	0.01500
60	1	30	100	19	0.36	0.51	0.00880	0.01100	0.01500
61	1	32	100	23	0.28	0.40	0.00880	0.01100	0.01500
62	1	30	100	29	0.23	0.30	0.00880	0.01100	0.01500
63	1	30	90	19	0.36	0.51	0.00880	0.01100	0.01500
64	1	30	100	23	0.28	0.40	0.00880	0.01100	0.01500

Diskriminant analizinde kullanılacak parametreler, enjeksiyonun s/ç oranı, rölatif sıklık (D_r), enjeksiyon basıncı (P), 0.6mm elekten geçen ince malzeme yüzdesi (FC), zeminin ağırlıkça %15'inin geçtiği elek çapının (D₁₅) enjeksiyon malzemesinin ağırlık-

ça %85'inin geçtiği elek çapına (d₈₅) oranı (D₁₅/d₈₅) olmak üzere beş girişten oluşmaktadır. Başarılı ve başarısız olarak gruplanan verilerin istatistiksel özellikleri Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 2. (Devamı) (Continued)

No	S/Ç	D _r (%)	P (kPa)	FC (%)	D _{10,zemin} (mm)	D _{15,zemin} (mm)	d _{85,enj} (mm)	d _{90,enj} (mm)	d _{95,enj} (mm)
65	1	30	100	29	0.23	0.30	0.00880	0.01100	0.01500
66	1	30	100	33	0.20	0.27	0.00880	0.01100	0.01500
67	1	30	100	38	0.17	0.22	0.00880	0.01100	0.01500
68	1	30	100	19	0.36	0.51	0.00880	0.01100	0.01500
69	1	30	100	23	0.28	0.40	0.00880	0.01100	0.01500
70	1	28	100	29	0.23	0.30	0.00880	0.01100	0.01500
71	1	31	100	33	0.20	0.27	0.00880	0.01100	0.01500
72	1	30	100	38	0.17	0.22	0.00880	0.01100	0.01500
73	1	30	350	100	0.09	0.10	0.00080	0.00085	0.00130
74	1	30	350	78	0.10	0.12	0.00080	0.00085	0.00130
75	1	30	350	67	0.10	0.12	0.00080	0.00085	0.00130
76	1	30	350	60	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
77	1	30	350	56	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
78	1	30	350	48	0.14	0.20	0.00080	0.00085	0.00130
79	1	30	350	22	0.52	0.57	0.00080	0.00085	0.00130
80	1	30	350	60	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
81	1	30	350	69	0.11	0.13	0.00080	0.00085	0.00130
82	1	30	350	78	0.10	0.12	0.00080	0.00085	0.00130
83	1	50	600	56	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
84	1	50	600	64	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
85	1	50	600	68	0.11	0.13	0.00080	0.00085	0.00130
86	1	60	600	44	0.14	0.20	0.00080	0.00085	0.00130
87	1	60	600	52	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
88	1	60	600	66	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
77	1	30	600	55	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
78	1	30	600	47	0.14	0.20	0.00080	0.00085	0.00130
79	1	30	600	24	0.52	0.57	0.00080	0.00085	0.00130
80	1	30	600	64	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
81	1	30	600	64	0.11	0.13	0.00080	0.00085	0.00130
82	1	30	600	78	0.10	0.12	0.00080	0.00085	0.00130
83	1	50	600	56	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
84	1	50	600	63	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130
85	1	50	600	69	0.11	0.13	0.00080	0.00085	0.00130
86	1	60	600	45	0.14	0.20	0.00080	0.00085	0.00130
87	1	60	600	55	0.13	0.15	0.00080	0.00085	0.00130
88	1	60	600	60	0.12	0.14	0.00080	0.00085	0.00130

5. MODELLERİN OLUŞTURULMASI VE BAŞARI ORANLARI (MODEL FORMATION AND SUCCESS RATES)

Diskriminant analizinde DA1 ve DA2 olmak üzere 2 adet model oluşturulmuştur. DA1 modelinde değişkenleri seçerken adimsal ayırma metodunun, DA2

modelinde ise tüm bağımsız değişkenlerin kullanılması amaçlanmıştır.

DA1 ve DA2 modellerinin bağımsız değişkenlerine ait korelasyon matrisi incelenmiştir (Tablo 4). Korelasyon katsayılarının tümü 0.70'den küçük olduğu için değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı yoktur.

Tablo 3. Enjeksiyon örneklerinin istatistiksel özellikleri (Statistical parameters for grouting samples)

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart sapma	Varyans
S/Ç	1 ^a	0.8	6.0	1.90	2.40
	0	0.8	4.0	1.59	0.97
D _r (%)	1	27.0	80.0	51.53	435.57
	0	30.0	80.0	55.95	597.00
Basınç, P (kPa)	1	50.0	690.0	338.33	40154.11
	0	100.0	690.0	209.73	30886.04
İnce tane oranı, FC (%)	1	1.0	100.0	43.80	1013.52
	0	5.0	100.0	39.65	1308.73
D ₁₅ /d ₈₅	1	19.0	762.0	99.74	14079.27
	0	10.0	58.0	19.62	88.13

a - 1: Başarılı enjeksiyon, 0: başarısız enjeksiyon örneği

Tablo 4. DA1 ve DA2 için korelasyon matrisi (Correlation matrix for DA1 nad DA2)

Değişkenler	S/Ç	D _r	P	FC	D ₁₅ /d ₈₅
S/Ç	1.000	0.264	0.439	0.300	-0.247
D _r	0.264	1.000	0.162	-0.030	-0.235
P	0.439	0.162	1.000	0.491	0.306
FC	0.300	-0.030	0.491	1.000	0.047
D ₁₅ /d ₈₅	-0.247	-0.235	0.306	0.047	1.000

DA1 için eşit kovaryans testini test etmek için Box'ın M testi kullanılmıştır. Box'ın M istatistiği 137.215 ve anlamlılık düzeyi 0.0 olduğundan gruplar kovaryans matrisleri açısından eşittir. DA2 modelinde bütün bağımsız değişkenlerin kullanılması amaçlandığından bu test uygulanmamıştır. Bu iki varsayım da sağlandığı için doğrusal diskriminant analizinin DA1 modelinde uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır.

Kanonik korelasyon, ayırma skorları ve gruplar arasındaki ilişkiyi ölçer ve açıklanan toplam varyansı gösterir [22]. DA1 için kanonik korelasyon değerinin (0.404) karesi (0.404²) enjekte olan ve olmayan grup arasındaki varyansın %16.3'ünü açıklayabilmektedir. DA2 için ise bağımlı değişkendeki varyansın %21.3'ünü açıklayabilmektedir. Özdeğerler ise 0.195 ve 0.272 olduğundan DA1 ve DA2 modellerinin çok iyi ayrımcılık sağladığı söylenemez (Tablo 5).

DA1 ve DA2 modelleri için sırasıyla Wilks'in λ değerleri 0.837 ve 0.786; Ki-kare değerleri 15.210 ve 22.095 olduğundan 1 serbestlik derecesinde, 0.00 önem seviyesinde ve 5 serbestlik derecesinde, 0.001 önem seviyesinde diskriminant fonksiyonlarının ayırt etme gücü anlamlıdır (Tablo 5).

Bağımsız değişkenlerin öneminin değerlendirilmesinde diskriminant fonksiyonu katsayılarına bakmak gerekir (Tablo 6). DA1 modeli ele alındığında D₁₅ / d₈₅ için standart kanonik diskriminant fonksiyonu katsayısı 1.0'dır. Buna göre enjeksiyonun başarılı veya başarısız olduğunu anlayabilmek için sadece D₁₅/d₈₅ değişkeni kullanılmıştır. Diğer değişkenler model dışında bırakılmıştır. Yapı matrisi her bir

değişkenin ayırma fonksiyonu ile olan korelasyonunu gösterir. Yapı matrisinden görüldüğü üzere diskriminant fonksiyonuna en önemli katkısı D₁₅/d₈₅ yapmıştır. En az katkı yapan değişkenler ise sırasıyla FC, D_r, S/Ç ve P'dir. Bu sebeple model sadece tek değişkenden oluşan diskriminant fonksiyonunu kullanılmıştır. DA2 modeli ele alındığında ise değişkenlerin önem sırasına göre D₁₅ / d₈₅, P, S/Ç, D_r ve FC olduğu Tablo 6'dan görülebilir.

Standart olmayan kanonik diskriminant fonksiyonu katsayıları, yeni örnekleri sınıflandırmada kullanılacak tahmin modelini oluşturmada yer alır. Buna göre Eş.6'daki genel ifadeyi diskriminant fonksiyonunu elde etmek amacıyla DA1 modeline uygulanacak olursak:

$$Y_{DA1} = -0.729 + 0.011(D_{15} / d_{85}) \quad (4)$$

DA2 modeli için:

$$Y_{DA2} = -0.950 + 0.009(D_{15} / d_{85}) + 0.002(P) + 0.267(S / Ç) - 0.006(FC) - 0.007(D_r) \quad (5)$$

denklemleri elde edilir. Örnekleri değerlendirirken Tablo 7'de gösterilen grupların ortalama ayırma fonksiyon merkezlerine bakılarak hangi gruba (enjeksiyon başarılı / başarısız) ait olduğuna karar verilir.

Herbir örnek için Eş. 4 ve Eş. 5 ile gösterilen denklemlerde diskriminant fonksiyonu değerleri hesap-

Tablo 5. DA1 ve DA2 modellerine ait özdeğerler ve Wilks'in λ değerleri (Eigenvalues and Wilks' Lambda values for DA1 and DA2 models)

Model	Özdeğer	Varyans yüzdesi	Kanonik korelasyon	Wilks λ	Ki-kare	df	Sig.
DA1	0.195	100.0	0.404	0.837	15.210	1	0.000
DA2	0.272	100.0	0.462	0.786	20.065	5	0.001

Tablo 6. DA1 ve DA2 için standart ve standart olmayan kanonik diskriminant fonksiyon katsayıları ve yapı matrisi (Standardized and unstandardized canonical discriminant function coefficients and structure matrix for DA1 and DA2)

Model	Standart kanonik diskriminant katsayıları		Yapı Matrisi		Standart olmayan kanonik diskriminant katsayıları	
	DA1	DA2	DA1	DA2	DA1	DA2
D ₁₅ /d ₈₅	1.000	0.789	1.000	0.847	0.011	0.009
P	-	0.382	0.306	0.647	-	0.002
S/Ç	-	0.358	-0.247	0.221	-	0.267
FC	-	-0.219	0.047	0.118	-	-0.006
D _r	-	-0.166	-0.235	-0.189	-	-0.007
Sabit	-	-	-	-	-0.729	-0.950

lanarak sınıflandırma için modelin başarısı ortaya koyulmuştur (Tablo 8).

Tablo 7. Grup merkezlerinin ayırma fonksiyon değerleri (Separation function values of the group centroids)

Grup	Grup merkezi	
	Model DA1	Model DA2
Başarılı enjeksiyon, Y_{DA1}	0.372	0.439
Başarısız enjeksiyon, Y_{DA2}	-0.512	-0.605

DA1 modelinde 51 adet başarılı enjeksiyon uygulaması deneyinden 40 tanesi doğru tahmin edilirken 11 tanesi yanlış tahmin edilmiş; 37 adet başarısız enjeksiyon deneyinden ise 34 tanesi doğru tahmin edilirken 3 tanesi yanlış tahmin edilmiştir. DA1 modelinin başarısına iki grup içinde bakılmak gerekir-se 88 adet örneğin 74 tanesi doğru tahmin edilmiş ve başarısı genelde %84.1 olarak bulunmuştur. DA2 modelinde başarılı enjeksiyon deneylerinden 38 tanesi doğru 13 tanesi yanlış tahmin edilmiş; başarısız enjeksiyon deneyleri grubunda 26 tane doğru tahmine karşın, 11 tane yanlış tahmin yapılmıştır.

DA2 modelinin sonuçlarına bakıldığında 88 adet verinin %72.7'sini doğru sınıflandırabilmiştir. Buna göre doğru sınıflandırma olasılıklarına bakılacak olursa %84.1 değeriyle DA1 modelinin DA2 modeline göre daha başarılı olduğu söylenebilir.

Geleneksel enjekte edilebilirliği değerlendirme yöntemlerinden Mitchell [6] ve Akbulut ve Sağlamer'in [8] ortaya koyduğu yaklaşımlardan sınır değerlere denk gelen sonuçlarda kesinlik yoktur. Değerlendirilmeyen veri örnekleri (DVS) başarı oranının (BO) hesaplanmasına dahil edilerek yöntemlerin performansını ölçmede kullanılmıştır (Tablo 9). Başarı oranı, doğru tahmin (DT) edilen enjekte edilebilirlik sonu-

cunun toplam veri seti sayısına bölünmesi ile bulunur (Eş. 6).

$$BO = (88 - HS - DVS) / 88 \quad (6)$$

Tablo 9'da gösterilen oranlar incelendiğinde, Akbulut ve Sağlamer [8] tarafından ortaya konulan metodun en yüksek başarıya sahip olduğu görülmektedir. Diskriminant analizi kullanılarak bu çalışmada oluşturulan ilk yöntem ise, sadece iki değişken kullanarak, başarı sıralamasında onu takip etmektedir.

6. SONUÇLAR (RESULTS)

Literatür ve deneysel çalışmalardan oluşturulan veri seti üzerinde diskriminant analizi uygulanarak, çimento enjeksiyonlarının kumlara enjekte edilebilirliğinin tahminine yönelik iki farklı model oluşturulmuştur. Adımsal ayırma yöntemi ile belirlenen ilk model, girdi olarak sadece D_{15}/d_{85} değerini kullanmasına rağmen, D_{15}/d_{85} , P, S/Ç, D_r ve FC'den oluşan beş değişken kullanan ikinci modelden daha başarılı sonuç vermiştir. Oluşturulan veri seti için % 84.1 başarılı tahmin oranına ulaşan ilk yöntem, literatürde sıkça kullanılan diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında, % 87.5 başarılı tahminde bulunan Akbulut ve Sağlamer [8] modelinden sonra en başarılı yöntem olarak belirlenmiştir. Sunulan bu yöntemin, veri değerlendirmede herhangi bir sınırı da bulunmadığı gözönüne alındığında, özellikle kum ve enjeksiyon malzemesinin tane çapı dağılımı dışında yeterli bilgi bulunmayan durumlar için oldukça kullanışlı olacağı açıktır.

Tablo 8. Sınıflandırma sonuçları (Classification results)

Sınıflandırma	Tahmin edilen grup				Toplam	
	1: başarılı		0: başarısız		DA1	DA2
Model	DA1	DA2	DA1	DA2	DA1	DA2
Sayı						
Başarılı enjeksiyon (1)	40	38	11	13	51	51
Başarısız enjeksiyon (0)	3	11	34	26	37	37
%						
Başarılı enjeksiyon (1)	78.4	74.5	21.6	25.5	100.0	100.0
Başarısız enjeksiyon (0)	8.1	29.7	91.9	70.3	100.0	100.0

Tablo 9. Yöntemlerin başarı oranları (Success rates of the methods)

Yöntem	Hata sayısı (HS)	Değerlendirilmeyen veri sayısı (DVS)	Doğru tahmin (DT)	Başarı oranı (BO) (%)
De Beer (1970)	37	0	51	57.9
Burwell (1958) & Mitchell (1981)	5	25	58	65.9
Incecik ve Ceren (1995)	23	1	64	72.7
Akbulut ve Sağlamer (2002)	9	2	77	87.5
Model DA1	14	0	74	84.1
Model DA2	24	0	64	72.7
Deneysel çalışma	0	0	88	100

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

λ	özdeğer
Λ	Wilks'in lamdası
BO	başarı oranı
D_{10}	zeminin ağırlıkça %10'unun geçtiği elek çapı, [cm]
D_{15}	% 15 geçen zemine karşılık gelen tane çapı
d_{85}	% 85 geçen enjeksiyon malzemesine karşılık gelen tane çapı
d_{90}	% 90 geçen enjeksiyon malzemesine karşılık gelen tane çapı
d_{95}	% 95 geçen enjeksiyon malzemesine karşılık gelen tane çapı
D_r	rölatif sıklık
DT	doğru tahmin
DVS	değerlendirilmeyen veri sayısı
FC	0.6mm elekten geçen ince tane miktarı
HS	hata sayısı
k	hidrolik iletkenlik, [cm]
N	enjekte edilebilirlik
P	enjeksiyon basıncı, [kPa]
s/ç	su çimento oranı
t	sıcaklık, [°C]

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hausmann, M. R., "Modification at Depth by Grouting", **Engineering Principles of Ground Modification**, Mc Graw Hill, Singapur, 346-376, 1990
- Akbulut, S., **The Improvement of Geotechnical Properties in Granular Soils by Grouting**, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
- Kim, J-S., Lee, I-M., Jang, J-H., and Choi, H., "Groutability of Cement-Based Grout with Consideration of Viscosity and Penetration Phenomenon", **Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, DOI: 10.1002/nag.785, 2009.
- Schwarz, L. G., **Roles of Rheology and Chemical Filtration on Injectability of Microfine Cement Grouts**, Doktora Tezi, Northwestern Univeristy, 9-32, 1997.
- Burwell, E.B., "Cement and Clay Grouting of Foundations: Practice of the Corps of Engineering", **Journal Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE 84, 1551/1-1551/22, 1958.
- Mitchell, J. K., "Soil improvement: State-of-the-Art", **10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Stockholm, Cilt 4, 509-565, 1981.
- İncecik, M., Ceren, İ., "Cement Grouting Model Tests". **Bulletin of The technical University of Istanbul**, Cilt 48, No 2, 305-317, 1995.
- Akbulut, S., Sağlamer, A., "Estimating the Groutability of Granular Soils: A New Approach", **Tunnelling and Underground Space Technology**, Cilt 17, No 4, 371-380, 2002.
- Fisher, R. A., "The Use of Multiple Measurement in Taxonomic Problems", **Ann. Eugenics**, Cilt 7, 179-188, 1936.
- Huberty, C. J., **Applied Discriminant Analysis**, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1994.
- Rao, C. R., Toutenberg, H., **Linear Models: Least Squares and Alternatives**, Springer-Verlag, New York, ABD, 1999.
- Lai, S. Y., Lin, P.S., Hsieh, M. J., Jim, H. F., "Regression Model for Evaluating Liquefaction Potential by Discriminant Analysis of the SPT N value", **Canadian Geotechnical Journal**, Cilt 42, No 3, 856-875, 2005.
- Liao, H. J., Lin, Y. C. & Liao, J. T. "Evaluation of Slope Stability with Discriminant Analysis", **Proc. of 14th Southeast Asian Geotechnical Conference**, Balkema, Hong Kong, 1131-1134, 2001.
- Gong, F-Q., Li, X-B., Zhang, W., "Over-Excavation Forecast of Underground Opening by Using Bayes Discriminant Analysis Method", **Journal of Central South University of Technology**, Cilt 15, No 4, 498-502, 2008.
- Elshayeb, Y., Kouniali, S., Josien, J. P., Guerniffey, Y., "Towards the Determination of Surface Collapse Type Over Abandoned Mines in the Lorraine Iron Basin", **Rock Mechanics - a Challenge for Society**, Balkema, 819-824, 2001.
- Tatlıdil, H., **Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz**, Ziraat Matbaacılık, Ankara, 2002.
- De Beer, E. E., **Volume 2 of Grondmechanica**, Standard Scientific Publishers, 1970.
- Landry, E. Lees, D., Naudts, A., "New Developments in Rock and Soil Grouting: Design and Evaluation", **Geotechnical News**, Cilt 18, No 3, 38-44, 2000.
- Huberty, C. J., Olejnik, S., **Applied MANOVA and Discriminant Analysis**, John Wiley & Sons, USA. 48-49, 2006.
- Zebovitz, S., Krizek, R. J., Atmatzidis, D. K., "Injection of Fine Sands with Very Fine Cement Grout", **Second International Grouting Seminar**, Kanada, 1717-1733, 1990.
- Tekin, E., **İnce Taneli Çimento (Rheocem 900) Enjeksiyonu ile Değişik Gradasyonlu Kumların Enjekte Edilebilirliği Üzerine Deneysel Çalışmalar**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- Kalaycı, Ş., **SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri**, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, 2006.

