

CORRELATIONS BETWEEN COMPACTION PARAMETERS AND INDEX PROPERTIES OF SOILS

Osman SİVRİKAYA

Asst. Prof. Dr.
Niğde Univ., Depart. of Civil Eng.
Niğde, Türkiye

Alper ÖLMEZ

Cons. Civil Engineer
Tuvenan Eng. Consulting
Aksaray, Türkiye

ABSTRACT

Compaction is required to construct fill or embankment under control in field. In this context, mechanical compaction is the method used the most commonly in the surface ground improvement. Under laboratory conditions, compaction parameters, maximum dry unit weight (γ_{dmax}) and optimum water content (w_{opt}) are determined by proctor tests. In this study, empirical models are described and examined to find which of the index properties correlate well with the compaction characteristics for estimating maximum dry unit weight (γ_{dmax}) and optimum water content (w_{opt}) of soils with fine content at the standard compactive effort. The compaction data are correlated with different combinations of soil index properties by performing Multi Linear Regression (MLR) analyses. It has been shown that the models giving the reliable results have been reached as a result of MLR analyses and it is recommended that the proposed correlations will be useful for a preliminary design of a project where there is a financial limitation and limited time.

ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİ İLE İNDEKS ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Osman SİVRİKAYA

Yrd. Doç. Dr.
Niğde Üniv., İnşaat Müh. Böl.
Niğde, Türkiye

Alper ÖLMEZ

İnş. Yük. Müh.
Tuvenan Mühendislik Ltd.
Aksaray, Türkiye

ÖZET

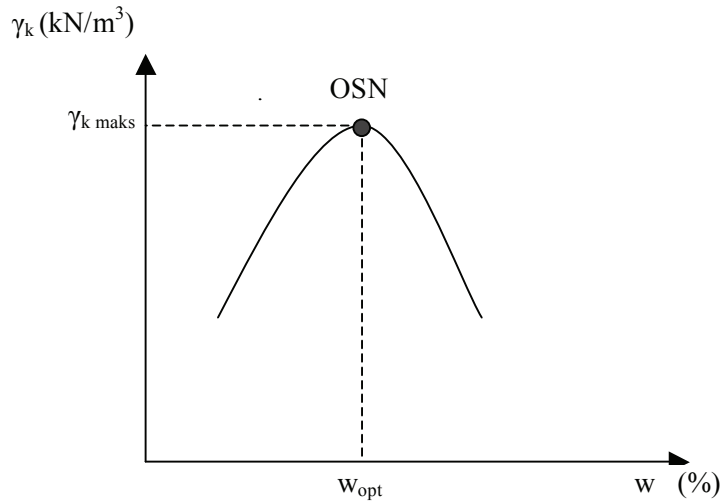
Arazide kaliteli bir dolgu yapılabilmesi için kontrollü sıkıştırılması gerekir. Bu amaçla, mekanik kompaksiyon (sıkıştırma), zeminin yüzeysel iyileştirme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan ekonomik bir yöntemdir. Kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}), laboratuvar şartlarında, Proktor deneyleri ile belirlenir. Bu çalışmada, kaba daneli zeminler üzerinde yapılan Standart Proktor deneylerinden elde edilen γ_{kmax} ve w_{opt} verileri ile zeminin indeks özellikleri arasında Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) analizleri yapılarak, ilişkiler araştırılmış ve istatistiksel açıdan ampirik modeller geliştirilmiştir. Analizler sonucunda, oldukça güvenilir sonuç veren modellere ulaşılmış ve önerilen korelasyonların, projenin tasarım aşamasında, finansal yetersizliğin ve sınırlı zamanın olması hallerinde kullanılmasının yararlı olacağı önerilmiştir.

GİRİŞ

Zor ve zaman alıcı deneylerle elde edilen bazı zemin parametreleri, istatistiksel olarak daha kolay elde edilebilir parametreler ile elde etmek, zaman zaman kaçınılmaz hale gelmektedir. Yeterli verilerle ve tatmin edici güvenlik sınırları içerisinde sonuçlar elde edildiği takdirde, zemin parametrelerinin tahmininde istatistiğin kullanılması makul görülmektedir. Bunun içinde çoğunlukla korelasyon ve regresyon analizleri kullanılmaktadır. Bu durumda, hem ekonomik hem de zaman açısından bir kazanım söz konusudur. Ayrıca çoğu kez yeterli laboratuvar cihazının bulunmamasında ve zamanın kısıtlı olması durumlarda, korelasyon denklemlerin kullanılması anlamlı hale gelmektedir. Fakat korelasyon denklemlerinin sağlıklı kullanılabilmesi için korelasyonların hangi deney tipi sonuçları kullanılarak elde edildiği, korelasyonların istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadığı, korelasyonların hangi zemin sınıfı için geçerli olduğu bilinmelidir (Sivrikaya ve Toğrol, 2007).

Arazide, kontrollü ve iyi bir dolgu yapılabilmesi için arazinin sıkıştırılması gerekir. Mekanik kompaksiyon (sıkıştırma), yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerinden en sıklıkla kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}), laboratuvar şartlarında, proktor deneyleri ile belirlenir. Kompaksiyon, mekanik enerji uygulayarak zeminin yoğunluğunun artırılması esasına dayalı bir stabilizasyon yöntemidir. Bu işlemler sonrasında zemin, daha kararlı bir hale gelir, geçirimsizliği azalır, uygulanan dış yükler altında yeterli dayanıma sahip olur, yapacağı oturmalar azaltılır ve bu özelliklerini çok uzun yıllar koruyabilir.

Laboratuvar kompaksiyon deneyi sonucunda, zeminin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) ve su muhtevası (w) arasında bir ilişki elde edilir. Bunun için, zeminin hangi su muhtevası ile sıkıştırılması halinde, maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{kmaks}) elde edileceğinin bilinmesi çok önemlidir. Kuru halde bulunan zemine bir miktar su ilave edildiğinde su daneleri bu suyu emerler. Daha fazla su ilavesi durumunda zemin daneleri birbirlerine göre kolaylıkla bağlı hareket yapabilirler. Bir miktar daha su ilavesi halinde zemin içerisinde bulunan boşluklar su ile dolmaya başlar ve zeminin yoğunluğu artar. Ancak zemin içerisindeki boşlukların tamamen su ile doldurulması ve suyun sıkışmaması nedeniyle bir noktadan sonra yapılan su ilaveleri zeminin yoğunluğunu arttıramayacağı gibi azalmasına sebep olacaktır (Şekil 1).



Şekil 1. Su muhtevası - kuru birim hacim ağırlık ilişkisi

İlave edilen suyun çok az ya da çok fazla olması halinde zeminde maksimum kuru birim hacim ağırlıktan daha küçük değerlere ulaşabilmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığın elde edilmesini sağlayan su muhtevasına optimum su muhtevası (w_{opt}) denir. Kuru birim hacim ağırlığın su muhtevasına bağlı olarak değişimi yukarıda, Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu yüzden,

optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık noktalarından oluşturulan Optimum Sıkışma Noktası (OSN), birçok mühendislik projesinde kilit durumu oluşturmaktadır. Bilinen bir çalışmadaki OSN tanımlanırsa, böylece zeminin sıkıştırılması için gerekli mühendislik parametreleri belirlenmiş olur (Holtz ve Kovacks, 1981).

İnce daneli zeminlerin sıkıştırılmasında, kompaksiyon parametreleri olan su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum birim hacim ağırlığının (γ_{kmaks}) belirlenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. İnce daneli zeminler için geliştirilen korelasyonlarda, w_{opt} ve γ_{kmaks} ile zemin tipi, indeks özellikleri, dane birim hacim ağırlığı (γ_s) ve dane çapı dağılım parametreleri arasında ilişkiler geliştirilmiştir (Davidson ve Gardiner, 1949; Jeng ve Strohm 1976). Joslin (1959) tarafından 26 farklı sıkışma eğrisinden oluşan standart Proktor (SP) deneyinden belirlenen bir su muhtevası (w) - kuru birim hacim ağırlık (γ_k) noktası yardımıyla, oldukça popüler olan model geliştirilmiştir. Johnson ve Sallberg (1960) SP kompaksiyon deney dataları ile likit limit (w_L) ve plastik limit (w_P) değerlerini kullanarak yalnızca w_{opt} tahmin etmek için grafik geliştirmiştir. Ring ve diğ. (1962), indeks özelliklerine ilaveten ortalama dane çapı, ince dane içeriği ve ortalama incelik parametrelerini içeren ilişkiler önermiştir. Onunla birlikte, Ramiah ve diğ. (1970), w_{opt} ve γ_{kmaks} 'ı sadece w_L ile ilişkilendiren korelasyonlar cinsinden elde etmeye çalışmışlardır. Jeng ve Strohm (1976), SP kompaksiyon deneylerinden elde edilen kompaksiyon parametreleri (w_{opt} ve γ_{kmaks}), zeminlerin indeks özellikleri açısından korele etmişlerdir. Wang ve Huang (1984), bentonitin içine silt, kum ve ince çakıl karıştırarak hazırladıkları zeminlerde, w_{opt} ve γ_{kmaks} 'ı tahmin etmek için, korelasyon denklemleri geliştirmişlerdir. Korelasyon denklemlerinde; özgül yoğunluk, incelik modülü, plastik limit, üniformluk katsayısı, bentonit miktarı ve dane çaplarını (D_{10} - D_{50}) bağımsız parametreler olarak dikkate almışlardır. Su muhtevası (w) - kuru birim hacim ağırlık (γ_k) ilişkisi üzerine Nagaraj (1994) tarafından yapılan çalışmada, sadece w_L 'e dayanan bir lineer regresyon modeli, w_{opt} ve γ_{kmaks} 'ı tahmin etmekte iyi sonuç vermiştir. Sridharan ve Nagaraj (2005) ve Sivrikaya (2007) ince daneli zeminler için SP kompaksiyon deney sonuçlarını içeren kendi ve literatürdeki verileri kullanarak w_{opt} ve γ_{kmaks} 'ı w_L ve w_P ile ilişkilendiren ampirik formüller geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, ayrıca ince daneli zeminler için Sivrikaya (2007) zeminlerin tüm indeks parametrelerini içeren kombinasyonları için bir çok model geliştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada w_{opt} , w_P ile w_L ve I_p 'ye kıyasla oldukça iyi bir ilişkiye sahip olduğu sonucunu çıkarmıştır. Granüler zeminler için Korfiatis ve Manikopoulos (1982), ortalama dane çapına (D_{50}) ve ince dane yüzdesi gibi zeminin dane çapı dağılımı eğrisindeki parametrelere bağlı olarak, Modifiye Proktor (MP) kompaksiyonunda oluşan γ_{kmaks} 'ı tahmin etmek için parametrik ilişkiler geliştirmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, ince daneli zeminlerde

kompaksiyon üzerine birçok çalışma mevcut iken kaba daneli zeminlerde ise sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada, kaba daneli zeminlerin SP deneyinden elde edilen kompaksiyon parametrelerinin istatistiksel yaklaşımlarla belirlenmesi amaçlanmıştır. Zeminlerin çeşitli özellikleri kullanılarak, kaliteli bir dolgu yapılabilmesi için gerekli olan zemin parametrelerinin, istatistiksel özellikleri ve regresyon analizleri ile tahminleri belirlenip, gerçek değerlerle karşılaştırılmaları yapılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Bazı mühendislik problemlerinde bir değişkenin, başka değişkenler yardımıyla bulunması istenir veya ihtiyaç duyulur. Değişkenler arasında bir ilişki olup olmadığını, istatistiğin korelasyon analizi ile; eğer varsa bu ilişkinin derecesini, şeklini ve yönünü araştırmak için regresyon analizi metotları kullanılır. İki değişken arasında bir ilişki bulunması, bunlardan birinin diğerinden etkilenmesi veya her iki değişkenin başka değişkenlerden birlikte etkilenmelerinden kaynaklanabilir. Bu ilişki en iyi fonksiyonla tanımlanabilir ve bu fonksiyon, ilişkinin şekline göre lineer bir doğru veya lineer olmayan bir eğri şeklinde tanımlanabilir.

Bu çalışmada, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına (USCS) göre kaba daneli olan zeminlerin, SP deneyinden elde edilen kompaksiyon parametreleri (w_{opt} ve γ_{kmaks}), zeminlerin indeks özellikleri kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Analizlerde kullanılan veriler, Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki zeminler üzerinde gerçekleştirilen SP deneylerinden elde edilmiştir. Burada, bina, otoyol ve zemin dolgu barajları gibi mühendislik uygulamalarında kullanılan zeminlerin, kompaksiyon ve indeks parametreleri kullanılmıştır. Laboratuvar sonuçları, indeks deneyleri ile SP deney sonuçlarını içermektedir. Veriler, kıvam indeksleri (likit limit, plastik limit ve plastisite indisi), dane boyu dağılımı (çakıl, kum ve ince dane yüzdesi) ve kompaksiyon parametreleri (optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı) içermektedir (Tablo 1). Bu çalışmada, dane birim hacim ağırlığı (γ_s), belirlenmediği (veya bilinmediği) için dikkate alınmamıştır.

Tablo 1. ÇLR analizinde kullanılan veri seti.

Veri sayısı	Zemin cinsi	Dane boyutu dağılımı			w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	w _{opt} (%)	γ _{kmaks} (kN/m ³)
		Çakıl (%)	Kum (%)	İD (%)					
1	GP-GC	53	35	12	21	16	5	6.5	22.1
2	GP-GC	70	20	10	20	15	5	6.5	22.6
3	GP-GC	84	9	7	37	16	21	9.5	19.9
4	GP-GC	77	15	8	26	11	15	10	20.4
5	GP-GC	81	13	6	22	13	9	9	22
6	GP-GC	67	26	7	22	44	11	9	21.1
7	GP-GC	69	19	12	27	13	14	9	20.5
8	GP-GC	47	46	7	24	13	11	12	19.6
9	GP-GC	82	12	6	26	15	11	8	20.7
10	GP-GC	72	18	10	24	14	10	8	21.5
11	GP-GC	64	30	6	22	11	11	9	21.6
12	GP-GC	80	15	5	31	17	14	9	20.6
13	GW-GC	47	41	12	21	12	9	9.9	20.2
14	GW-GC	89	4	7	44	22	22	18	17.1
15	GW-GC	52	40	8	19	13	6	9.5	19.6
16	GW-GC	69	25	6	31	21	10	13	18.9
17	GW-GC	64	27	9	38	21	17	13	18.8
18	GW-GC	80	14	6	30	18	12	10	19.8
19	GW-GM	64	26	10	40	26	14	20	16.5
20	GW	85	11	4	22	13	9	7.5	22.2
21	GW	88	9	3	28	17	11	8.5	21.1
22	GW	92	6	2	25	16	9	11	20.9
23	GW	78	18	4	20	12	8	6	20.1
24	GW	88	8	4	37	19	18	10	20.2
25	GP	97	2	1	26	17	9	9.5	21.8
26	GP	78	18	4	22	11	11	8	21.2
27	GP	96	2	2	25	19	6	11	20.1
28	GP	60	14	26	26	15	11	14	18.8
29	GC	67	15	18	53	19	34	11	19.6
30	GC	66	17	17	28	13	15	10.5	20.8
31	GC	64	18	18	29	14	15	10	20.4
32	GC	67	16	17	52	31	21	23	14.6
33	GC	59	10	31	62	33	29	30	13.1
34	GC	72	14	14	47	30	17	27.5	14.9
35	GC	43	31	26	32	14	18	14	18.8
36	GC	41	31	28	45	27	18	19	16.3
37	GC	45	36	19	30	14	16	10	20
38	GC	41	35	24	27	16	11	10	19.4
39	GC	68	16	16	35	19	16	11	19
40	GC	59	26	15	23	12	11	9	21.4
41	GC	61	20	19	26	14	12	12	19.9
42	GC	57	29	14	25	13	12	14	18.6
43	GC	55	22	26	39	19	20	16	17.7
44	GC	50	33	17	26	12	14	9	20.7
45	GC	38	27	35	26	15	11	13	19.1
46	GC	41	37	22	34	21	13	13.5	18.6
47	GC	57	22	21	32	18	14	11	20.4
48	GC	54	27	19	28	16	12	11.5	19.8
49	GC	28	26	46	33	16	17	14	18.8

50	GC	65	24	13	25	13	12	9	20.3
51	GC	40	39	21	30	16	14	11	19.6
52	GC	42	28	30	33	18	15	15.5	17.1
53	GC	62	24	14	39	22	17	13.9	18.6
54	SP-SC	0	72	28	25	13	12	13.5	18.7
55	SP-SC	29	60	11	34	25	9	14	17.7
56	SP-SC	29	60	11	35	19	16	17	17.3
57	SP-SC	42	48	10	25	18	7	9	20.1
58	SP	44	53	3	40	23	17	21	16.2
59	SC	20	66	14	26	13	13	11	18.7
60	SC	33	46	21	53	34	19	32	13.4
61	SC	2	49	49	39	18	21	16	17.4
62	SC	0	79	21	23	12	11	14	17.9
63	SC	2	63	35	37	15	22	13	18.8
64	SC	13	57	30	27	10	17	9.5	20.3
65	SC	8	61	31	47	19	28	17	17.4
66	SC	7	70	23	32	12	20	12	18.9
67	SC	22	45	33	28	15	13	11.9	19.2
68	SC	26	44	30	21	11	10	10	20
69	SC	17	40	43	25	12	13	11	18.8
70	SC	24	45	31	22	10	12	10	20
71	SC	41	45	14	30	17	13	8	20.6
72	SC	18	61	21	83	43	40	32	12.7
73	SC	1	51	48	41	22	19	19	16.3
74	SC	18	38	44	32	20	12	17	17.5
75	SC	18	43	39	29	14	15	14	19

Tablo 1’de 75 adet SP deney sonuçları ve kullanılan zeminlerin indeks özellikleri verilmiştir. Bu veriler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına (USCS) göre zemin sınıfı ve veri sayısı (n) toplu olarak Tablo 2’de özetlenmiştir. Buna ek olarak, her bir veri seti için, zemin parametrelerinin istatistiksel parametreleri belirlenmiş ve Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 2. ÇLR analizlerinde kullanılan verilerin zemin tipi ve veri sayısı.

Zemin cinsi	Veri sayısı (n)
GP-GC	12
GW-GC	6
GW-GM	1
GW	5
GP	4
GC	25
SP	1
SP-SC	4
SC	17
Toplam	75

Tablo 3. Analizde kullanılan verilerin istatistiksel parametreleri.

	Dane boyutu dağılımı			w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	w _{opt} (%)	γ _{kmaks} (kN/m ³)
	Çakıl (%)	Kum (%)	İD (%)					
Maksimum	97.00	79.00	49.00	83.00	44.00	40.00	32.00	22.60
Minimum	0.00	2.00	1.00	19.00	10.00	5.00	6.00	12.70
Yayılım	97.00	77.00	48.00	64.00	34.00	35.00	26.00	9.90
Ortalama	51.05	31.23	17.79	31.59	17.60	14.43	12.86	19.13
Ortanca	55.00	27.00	15.00	28.00	16.00	13.00	11.00	19.60
Standart sapma	25.99	18.29	12.06	10.67	6.73	6.01	5.43	2.06
Varyasyon	675.60	334.52	145.53	113.92	45.28	36.11	29.52	4.23
Varyasyon kats.	0.51	0.59	0.68	0.34	0.38	0.42	0.42	0.11
Çarpıklık kats.	-0.32	0.60	0.80	2.10	2.01	1.69	1.91	-1.13
Basıklık kats.	-0.79	-0.38	-0.03	6.58	4.75	4.62	3.99	1.49

Her bir bağımsız değişkenin (çakıl oranı, kum oranı, ince dane oranı, I_p, w_L, w_P), bağımlı değişkenlerle (w_{opt}, γ_{kmaks}) ilişkisi, en küçük kareler metoduna göre Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) analiz ile araştırılmış ve geliştirilmiştir.

$$f(w_{opt}, \gamma_{kmaks}) = a + b\text{Ç} + cK + d(\text{İD}) + eI_p + fw_L + gw_P \quad (1)$$

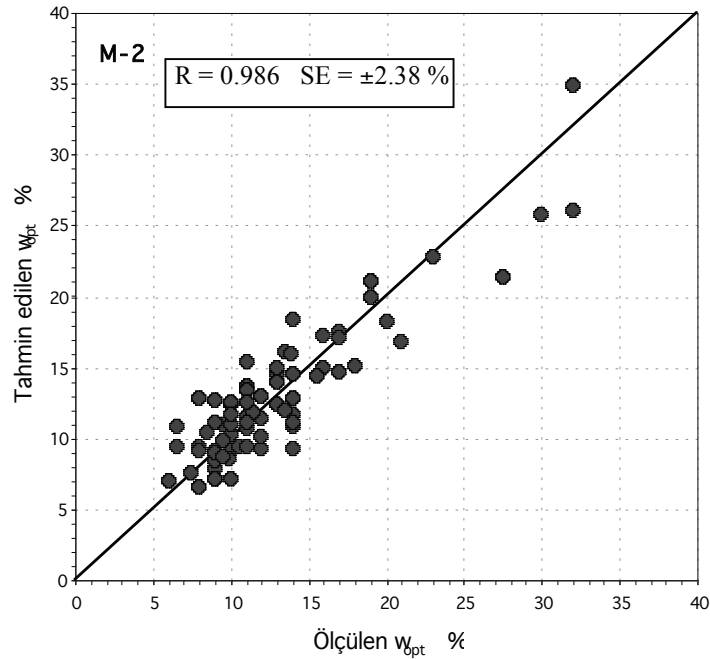
Burada, a, b, c, d, e, f, g regresyon katsayıları, Ç çakıl oranı, K kum oranı, İD ince dane oranını göstermektedir. Bağımsız değişkenler, denklemde tam sayılar ile ifade edilmişlerdir. Korelasyon katsayısı (R) ve elde edilen korelasyon denkleminin standart hatası (SE), elde edilen denklemin istatistiksel olarak anlamlılığını ve güvenilirliğini göstermesi açısından ele alınmıştır. Standart hata, regresyon doğrusundan veya düzleminden ne kadar sapıldığına işaret etmektedir.

Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) analizi, bir bağımlı değişkeni, birden fazla bağımsız değişkenler ile tanımlamak için kullanılan metottur. Bu çalışmada, her bir istatistiksel parametre ve korelasyon denklemleri için %5 anlamlılık düzeyi dikkate alınmıştır. Regresyon katsayılarının anlamlılığı, “t-test”leri ile incelenmiş ve bunların modeller üzerinde anlamlılığa sahip olduğu bulunmuştur. Optimum su muhtevasını ve maksimum birim hacim ağırlığını tahmin etmek için, altı bağımsız değişken (Ç, K, İD, I_p, w_L ve w_P) arasında her biri için korelasyonlar aranmıştır. Her bir analiz için, korelasyon katsayıları (R) ve standart hatalar (SE) Tablo 4 ve 5’de verilmiştir. Geliştirilen modelin istatistiksel anlamlılık açısından en uygun olduğuna karar vermek için, geliştirilen modelin aynı anda hem en yüksek R’ye ve hem de en düşük SE’ye sahip olması gerekir.

VERİLERİN ANALİZLERİ VE YORUMLANMASI

SP deney sonuçları kullanılarak w_{opt} ve γ_{kmaks} ile indeks özellikleri arasındaki ilişkiler için 29 adet korelasyon modeli geliştirilmiştir. ÇLR analizleri sonucu, w_{opt} ile indeks parametreleri arasında elde edilen en uygun korelasyonlar bulunmuş olup, Tablo 4’de topluca bütün geliştirilen modeller verilmiştir.

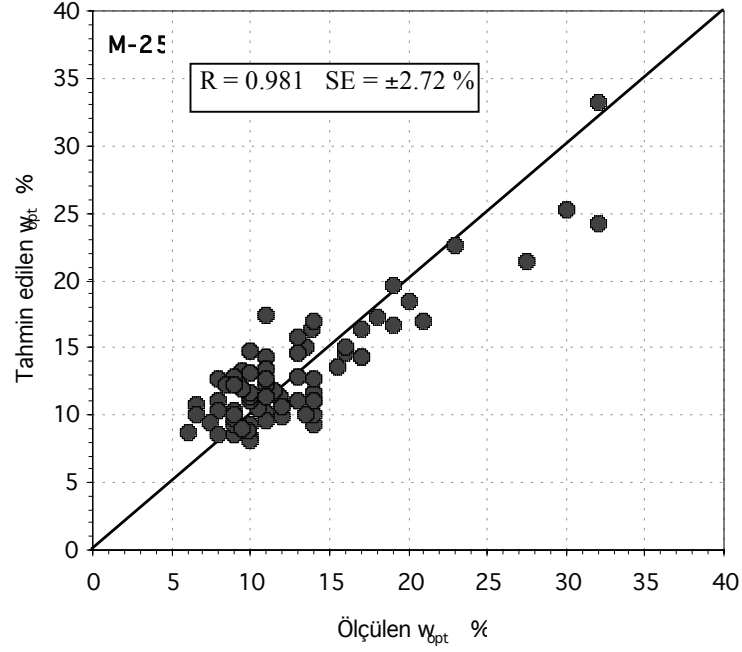
w_{opt} ile indeks özellikleri arasındaki ilişkiler için R açısından ele alındığında, en düşük 0.868 ve en yüksek 0.986 değerleri bulunduğu görülmüştür. M-1 ve M-2 modelleri en yüksek R’ye sahip iken M-21 model en düşük değere sahiptir. M-21 modelin sadece dane dağılım yüzdesinden olan bağımsız değişkenler olan K ve ID olduğu dikkat çekicidir. Modeller SE açısından ele alındığında ise, en düşük değer olarak 2.38 % ve en yüksek değer olarak 7.03 % bulunmuştur. M-2 modeli en düşük SE’ye sahip iken, M-21 model en yüksek değere sahiptir. Hem R ve hem de SE açısından aynı anda bakıldığında, M-2 model, en iyi elde edilen model gözükmemektedir. Bununla beraber, M-25 ($R = 0.981$ ve $SE = 2.72$ %) modeli, sadece kıvam limitleri içermesi ve M-2’nin istatistiksel parametrelerine ($R = 0.986$ ve $SE = 2.38$ %) oldukça yakın değerlere sahip olduğundan, bu modeli kullanmanın daha avantajlı olacağı düşünülmektedir (Şekil 2 ve 3).



Şekil 2. M-2 için ölçülen w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} ’nin karşılaştırılması.

Tablo 4. w_{opt} elde etmek için ÇLR analizlerinden bulunan korelasyon denklemleri.

Model numarası	Korelasyon denklemi	R	SE %
M-1	$w_{opt} = -0.033\zeta + 0.053ID + 0.657w_L + 0.06w_p - 0.57 I_p$	0.986	± 2.39
M-2	$w_{opt} = -0.032\zeta + 0.002K + 0.052ID + 0.712w_L - 0.623I_p$	0.986	± 2.38
M-3	$w_{opt} = -0.015\zeta + 0.013K + 0.069ID + 0.482w_p + 0.244I_p$	0.975	± 3.19
M-4	$w_{opt} = -0.028\zeta + 0.002K + 0.037ID + 0.295w_L + 0.241w_p$	0.982	± 2.72
M-5	$w_{opt} = -0.018\zeta + 0.011K + 0.023ID + 0.413w_L$	0.979	± 2.91
M-6	$w_{opt} = -0.006\zeta + 0.024K + 0.119ID + 0.586w_p$	0.972	± 3.39
M-7	$w_{opt} = 0.038\zeta + 0.061K + 0.074ID + 0.535 I_p$	0.955	± 4.27
M-8	$w_{opt} = 0.09\zeta + 0.121K + 0.226ID$	0.930	± 5.25
M-9	$w_{opt} = 0.053ID + 0.381w_L$	0.978	± 2.93
M-10	$w_{opt} = 0.144ID + 0.585 w_p$	0.971	± 3.38
M-11	$w_{opt} = 0.088ID + 0.743I_p$	0.947	± 4.52
M-12	$w_{opt} = -0.020\zeta + 0.030ID + 0.421w_L$	0.979	± 2.90
M-13	$w_{opt} = -0.009\zeta + 0.134ID + 0.612 w_p$	0.971	± 3.40
M-14	$w_{opt} = 0.035\zeta + 0.122ID + 0.603I_p$	0.951	± 4.39
M-15	$w_{opt} = -0.021\zeta + 0.016K + 0.423w_L$	0.979	± 2.90
M-16	$w_{opt} = -0.012\zeta + 0.064K + 0.644 w_p$	0.967	± 3.63
M-17	$w_{opt} = -0.032\zeta + 0.079K + 0.601I_p$	0.953	± 4.31
M-18	$w_{opt} = 0.018K + 0.038ID + 0.373 w_L$	0.978	± 2.94
M-19	$w_{opt} = 0.026K + 0.121ID + 0.566w_p$	0.971	± 3.37
M-20	$w_{opt} = 0.054K + 0.042ID + 0.692 I_p$	0.950	± 4.44
M-21	$w_{opt} = 0.178K + 0.289ID$	0.868	± 7.03
M-22	$w_{opt} = 0.108\zeta + 0.226K$	0.911	± 5.84
M-23	$w_{opt} = 0.111\zeta + 0.380ID$	0.915	± 5.72
M-24	$w_{opt} = 0.318 w_L + 0.166w_p$	0.979	± 2.90
M-25	$w_{opt} = 0.618 w_L - 0.453I_p$	0.981	± 2.72
M-26	$w_{opt} = 0.343 I_p + 0.448w_p$	0.971	± 3.36
M-27	$w_{opt} = 0.409w_L$	0.977	± 2.99
M-28	$w_{opt} = 0.712w_p$	0.961	± 3.90
M-29	$w_{opt} = 0.844I_p$	0.945	± 4.61



Şekil 3. M-25 için ölçülen w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'nin karşılaştırılması.

ÇLR analizleri sonucu, γ_{kmaks} ile indeks parametreleri arasında elde edilen en uygun korelasyonlar bulunmuş olup, Tablo 5'de topluca verilmiştir. Modeller R açısından ele alındığında, en düşük 0.891 ve en yüksek 0.999 değerleri bulunduğu görülmüştür. M-1, M-2, M-4 ve M-5 modelleri en yüksek R'ye sahip iken M-29 model en düşük değere sahiptir. Modeller SE açısından ele alındığında ise, en düşük değer olarak 0.91 kN/m^3 ve en yüksek değer olarak 8.77 kN/m^3 bulunmuştur. M-29 modelin sadece kıvam indisi olan I_p bağımsız değişken olması, bu modelin zayıf bir ilişki içinde olduğunu ($R = 0.891$ ve $SE = 8.77 \text{ kN/m}^3$) göstermektedir. M-2 modeli ($SE = 0.91 \text{ kN/m}^3$) en düşük SE'ye sahip iken, M-29 modeli ($SE = 8.77 \text{ kN/m}^3$) en yüksek değere sahiptir. Hem R ve hem de SE açısından aynı anda bakıldığında, M-2 modeli ($R = 0.999$ ve $SE = 0.91 \text{ kN/m}^3$), en iyi elde edilen model gözükmemektedir (Şekil 4).

Ayrıca bu çalışmada, w_{opt} ile γ_{kmaks} arasında lineer ve lineer olmayan regresyon analizleri yapılarak, ilişkiler araştırılmış ve oldukça güvenilir sonuçlar veren ilişkiler bulunmuştur. Analizler sonunda elde edilen denklemler aşağıda verilmiştir. Şekil 5'de ise elde edilen denklemler, grafiksel olarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

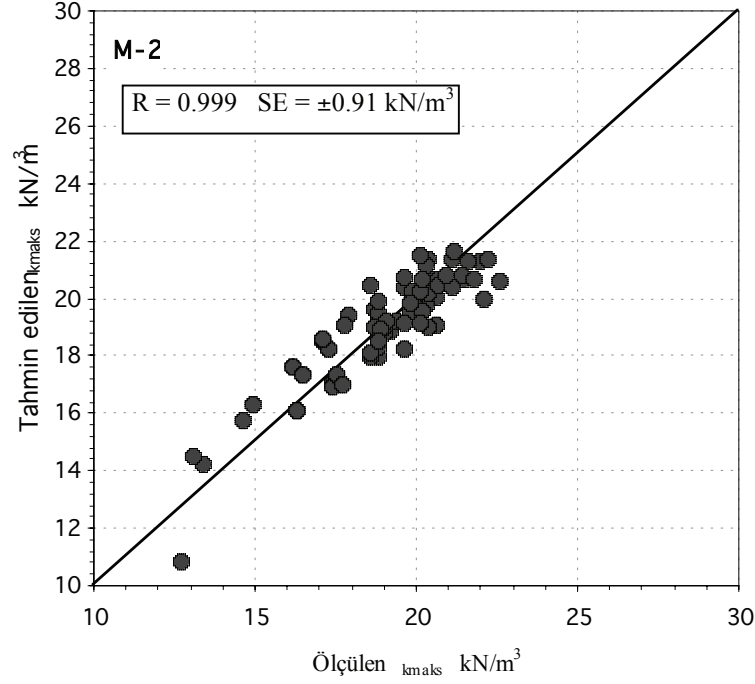
$$\gamma_{kmaks} = 23.77 - 0.36w_{opt} \quad R = 0.953 \quad SE = \pm 0.63 \text{ kN/m}^3 \quad (2)$$

$$\gamma_{kmaks} = 41.22w_{opt}^{-0.31} \quad R = 0.948 \quad SE = \pm 1.03 \text{ kN/m}^3 \quad (3)$$

$$\gamma_{kmaks} = 24.83e^{-0.021Wopt} \quad R = 0.967 \quad SE = \pm 1.03 \text{ kN/m}^3 \quad (4)$$

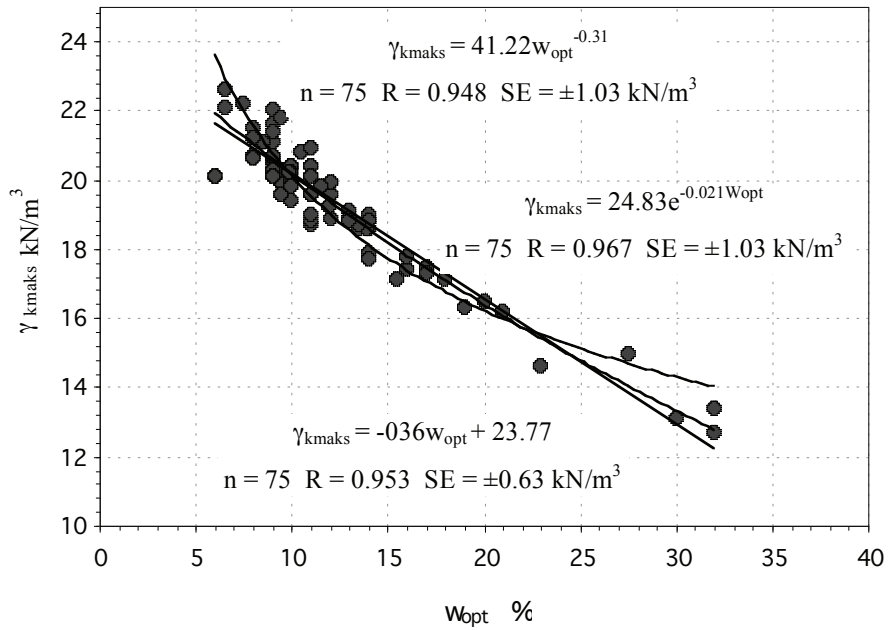
Tablo 5. γ_{kmaks} elde etmek için ÇLR analizlerinden bulunan korelasyon denklemleri.

Model numarası	Korelasyon denklemi	R	SE kN/m ³
M-1	$\gamma_{kmaks} = 0.254\dot{C} + 0.232K + 0.215ID - 0.244w_L - 0.007w_p - 0.204 I_p$	0.999	± 0.92
M-2	$\gamma_{kmaks} = 0.254\dot{C} + 0.232K + 0.215ID - 0.251w_L + 0.210I_p$	0.999	± 0.91
M-3	$\gamma_{kmaks} = 0.247\dot{C} + 0.227K + 0.210ID - 0.164w_p - 0.099I_p$	0.998	± 1.20
M-4	$\gamma_{kmaks} = 0.252\dot{C} + 0.231K + 0.221ID - 0.115w_L - 0.072w_p$	0.999	± 1.02
M-5	$\gamma_{kmaks} = 0.249\dot{C} + 0.228K + 0.225ID - 0.150w_L$	0.999	± 1.06
M-6	$\gamma_{kmaks} = 0.243\dot{C} + 0.223K + 0.189ID - 0.206w_p$	0.998	± 1.30
M-7	$\gamma_{kmaks} = 0.229\dot{C} + 0.211K + 0.208ID - 0.198 I_p$	0.997	± 1.54
M-8	$\gamma_{kmaks} = 0.206\dot{C} + 0.188K + 0.152ID$	0.995	± 1.92
M-9	$\gamma_{kmaks} = 0.130ID + 0.458w_L$	0.918	± 7.76
M-10	$\gamma_{kmaks} = 0.227ID + 0.722 w_p$	0.918	± 7.75
M-11	$\gamma_{kmaks} = 0.160ID + 0.914I_p$	0.897	± 8.62
M-12	$\gamma_{kmaks} = 0.219\dot{C} + 0.379ID + 0.016w_L$	0.977	± 4.14
M-13	$\gamma_{kmaks} = 0.191\dot{C} + 0.315ID + 0.158 w_p$	0.981	± 3.83
M-14	$\gamma_{kmaks} = 0.197\dot{C} + 0.335ID + 0.136I_p$	0.980	± 3.93
M-15	$\gamma_{kmaks} = 0.134\dot{C} + 0.054K + 0.297w_L$	0.958	± 5.61
M-16	$\gamma_{kmaks} = 0.139\dot{C} + 0.109K + 0.379 w_p$	0.963	± 5.28
M-17	$\gamma_{kmaks} = 0.146\dot{C} + 0.373K + 0.373I_p$	0.957	± 5.68
M-18	$\gamma_{kmaks} = 0.141K + 0.101ID + 0.333 w_L$	0.954	± 5.90
M-19	$\gamma_{kmaks} = 0.141K + 0.214ID + 0.399w_p$	0.949	± 6.21
M-20	$\gamma_{kmaks} = 0.152K + 0.233ID + 0.376 I_p$	0.938	± 6.79
M-21	$\gamma_{kmaks} = 0.244K + 0.379ID$	0.918	± 7.71
M-22	$\gamma_{kmaks} = 0.225\dot{C} + 0.274K$	0.978	± 4.06
M-23	$\gamma_{kmaks} = 0.223\dot{C} + 0.411ID$	0.981	± 3.75
M-24	$\gamma_{kmaks} = 0.252 w_L + 0.468w_p$	0.948	± 6.22
M-25	$\gamma_{kmaks} = 0.254 w_L + 0.513I_p$	0.945	± 6.37
M-26	$\gamma_{kmaks} = 0.473I_p + 0.558w_p$	0.915	± 7.88
M-27	$\gamma_{kmaks} = 0.527w_L$	0.914	± 7.86
M-28	$\gamma_{kmaks} = 0.922w_p$	0.903	± 8.31
M-29	$\gamma_{kmaks} = 1.097I_p$	0.891	± 8.77



Şekil 4. M-2 için ölçülen γ_{kmaks} ile tahmin edilen γ_{kmaks} 'ın karşılaştırılması.

Elde edilen ilişkiler R açısından ele alındığında, en uygun olarak lineer ilişki olan Denklem (2) için $R = 0.953$ ile lineer olmayan ilişki olan Denklem (4) için $R = 0.967$ olarak bulunmuştur. SE açısından bakıldığında ise, Denklem (2) en düşük $SE = \pm 0.63 \text{ kN/m}^3$ değerine sahipken Denklem (3) ve (4) en yüksek $SE = \pm 1.03 \text{ kN/m}^3$ değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Böylece, lineer ilişki (Denklem 2) en uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 5. γ_{kmaks} ile w_{opt} arasındaki ilişkiler.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) zemin mühendisliği projelerinin çoğunda, kalite kontrol ve tasarımında önemli roller oynar. Bu kompaksiyon parametreleri, özellikle ön tasarımda, zamanın ve ekonominin yetersiz olduğu durumlarda korelasyon denklemleri yardımıyla bulunması oldukça önemlidir. Korelasyonlarda önemli olan istatistiksel parametrelerin (R ve SE gibi) bilinmemesi halinde, korelasyon denklemleri istenilmeyen sonuçlara sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, çeşitli kamu kuruluşları laboratuvarlarında Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılmasına (USCS) göre sınıflandırılmış, kaba daneli zeminler üzerinde gerçekleştirilmiş SP deneyleri sonucunda belirlenen, zeminin w_{opt} ve γ_{kmaks} ile birlikte aynı numune üzerinde gerçekleştirilen kıvam limit, granülometre ve hidrometre deneyi sonucu parametreleri kullanılarak korelasyon ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- w_{opt} tahmin etmek için kullanılacak en iyi model, Tablo 4’de ki, M-2 modeli ($R = 0.986$ ve $SE = \pm 2.38 \%$) olmakla birlikte, pratik yaklaşım için M-27 modeli de kullanılabilir ($R = 0.977$ ve $SE = \pm 2.99 \%$).
- γ_{kmaks} tahmin etmek için kullanılacak model, Tablo 5’de geliştirilen M-2 modeli ($R = 0.999$ ve $SE = \pm 0.91 \text{ kN/m}^3$) olmakla birlikte, daha kolay ve az bağımsız değişken kullanılmasından dolayı Tablo 4’de ki M-27’den veya M-2’den bulunan w_{opt} ’nın Denklem (2)’de ($R = 0.953$ ve $SE = \pm 0.63 \text{ kN/m}^3$) yerine konularak γ_{kmaks} ’ın bulunması tavsiye edilmektedir.
- Kıvam limitleri içerisinde w_{opt} ile en iyi bir korelasyon içeren parametre likit limit (w_L) olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Davidson, D.T., and Gardiner, W.F. Calculation of standard proctor density and optimum moisture content from mechanical, analysis, shrinkage factors and plasticity index. Highway
- Gurtug, Y., and Sridharan, A., Compaction behaviour and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy. Soil and Foundation 44(5), 27-36. 2004.
- Holtz, R. D and Kovacs, W.D., An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, USA. 1981.
- Jeng, Y.S. and Strohm W.E., Prediction of the shear strength and compaction characteristics of compacted fine-grained cohesive soils, Final report, U.S. Army engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavement Laboratory, Vicksburg. 1976.

- Johnson, A.W., and Sallberg, J.R., Factors that influence compaction of soils. Highway Research Board, No. 272, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Joslin, J.C., Ohio's typical moisture-density Curves, ASTM STP 239:111–118. 1959.
- Korfiatis, G.P. and Manikopoulos C.N., Correlation of maximum dry density and grain size, ASCE. 1982.
- Nagaraj, T.S., Analysis and prediction of compaction characteristics of soils, Unpublished work. 1994.
- Ramiah, B.K., Viswanath V. and Krishnamurthy H.V., Interrelationships of compaction and index properties, Proc., Second Southeast Asian conf. on soil energy, Singapore, 577-587. 1970.
- Research Bulletin, No. 29, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 447-481. 1949.
- Ring, G.W., Sallgerb, J.R. and Collins, W.H., 1962 Correlation of compaction and classification test data, HRB, 325: 577-587. 1960.
- Rowan, H.W., and Graham, W.W., Proper compaction eliminates curing period in construction fills. Civil Engineering 18, 450-451. 1948.
- Sivrikaya, O ve Toğrol, E. Türkiye'de SPT-N değeri ile İnce Daneli Zeminlerin Drenajsız Kayma Mukavemeti arasındaki ilişkiler, IMO Teknik Dergisi, Ekim 2007 (basımda).
- Sivrikaya, O., Models of Compacted Fine-Grained Soils used as Mineral Liner for Solid Waste, Environmental Geology 2007.
- Sridharan, A. and Nagaraj, H.B., Plastic limit and compaction characteristics of fine-grained soils, Ground Improvement 9(1), 17-22. 2005.
- Wang, M.C. and Huang, C.C., Soil compaction and permeability prediction models, J. Environ. Engrg. ASCE, Vol110. 6:1063-1083. 1984.