



Katkılı Zeminlerde Taşıma Gücünün İstatistiksel Yöntemlerle Tahmini

Ömer Faruk Altuntaş¹, Gamze Bilgen^{2*}

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Programı, Zonguldak, Türkiye
omraltuntas@gmail.com , *bilgamze@gmail.com 

Makale gönderme tarihi:08.09.2021, Makale kabul tarihi: 23.03.2022

Öz

Bu çalışmada, katkılı zeminlerde taşıma gücü değerleri ile Proctor değerleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Bu amaçla, California Taşıma Oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı (UCS) bağımlı değişkenlerinin, maksimum kuru yoğunluk (MDD) ve optimum su muhtevası (OWC) bağımsız değişkenleri ile ilişkisinin olup olmadığı, çok değişkenli regresyon analizi (MLR) kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan veri setinde yazarlar tarafından laboratuvarında yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra literatürdeki araştırma sonuçlarından da yararlanılmıştır. MLR analizleri sonucunda ampirik korelasyonlar geliştirilmiştir. Elde edilen farklı bağıntılardan, UCS değerinin bağımsız değişken ve CBR, OWC ve MDD değerinin bağımlı değişken olduğu korelasyonun belirleyicilik katsayısı %82 olarak tespit edilmiştir. Geliştirilen ampirik korelasyonların, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan katkıların, zeminin CBR ve UCS değerlerinde yapacağı değişikliğin, özel ekipman gerektiren, zahmetli ve uzun zaman alan deneysel çalışmalar yapmadan, sadece Proctor deneyi sonucu ile tahmin edilmesine katkı sağlaması umulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: CBR, katkılı zeminler, regresyon analizi, UCS

Estimation of The Bearing Capacity of Treated Soils by Statistical Methods

Abstract

In this study, the relationship between the bearing capacity parameters and the Proctor values of the treated soils was examined. Therefore, multiple linear regression (MLR) was used to determine whether there was a relationship between dependent variables such as California bearing ratio (CBR) and unconfined compressive strength (UCS) and independent variables such as maximum dry density (MDD) and optimum water content (OWC). In the data set used in the research, besides the experimental studies carried out by the authors in the laboratory, the results of the research in the literature were also used. Empirical correlations were developed as a result of MLR analyses. From the different correlations obtained, the coefficient of determination of the correlation was determined as 82%, where the UCS value was the independent variable and the CBR, OWC and MDD value was the dependent variable. It is expected that the empirical correlations developed will contribute to the estimation of the changes in the CBR and UCS values of the soil by the additives used only with the result of the Proctor test without performing laborious and time-consuming experimental studies that require special equipment.

Keywords: CBR, treated soils, Regression analysis, UCS

GİRİŞ

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma yönteminde (USCS) zeminler dane dağılımına göre (granülometrik olarak) sınıflandırılırlar. Çakıllar ve kumlar, iri daneli zeminler (kohezyonsuz zeminler) sınıfına girerler ve sahip oldukları geoteknik özellikler bakımından yol ve dolgu çalışmalarında kullanım için standartlara uygun agrega olarak değerlendirilen malzemelerdir (Aksoy ve ark. 2018). Killi ve siltli zeminlerin oluşturduğu ince daneli

zeminler (kohezyonlu zeminler) ise standartlarca belirlenmiş olan geoteknik özellikleri taşımadığı için yol ve dolgu çalışmalarında, iyileştirme yapılmadan kullanılmasına izin verilmeyen malzemelerdir (Bilgen 2021; Houlihan ve ark. 2021; Meskini ve ark. 2021). Bu sebeple, yol ve dolgu çalışmaları yapılan uygulama alanında killi zemin bulunması durumunda, ya bu zayıf zemin sökülüp uzaklaştırılarak yerine iri daneli zeminler yerleştirilir

Research article/Araştırma makalesi
 DOI:10.29132/ijpas.993022

yada killi zeminin yerinde iyileştirilmesi için iyileştirme (stabilizasyon) çalışmaları gerçekleştirilir(Bilgen ve ark. 2012; Iravanian and Ahmed 2021).Günümüzde doğal kaynakların azalması, ekolojik dengenin korunması gibi etmenler, katkı malzemeleri ile yapılan yerinde iyileştirme çalışmalarını tercih sebebi yapmıştır (Bilgen ve ark. 2013; Sharma ve ark. 2021).

Kohezyonlu zeminleri yerinde iyileştirilmek için üzerinde en çok çalışma yapılan katkı malzemesi kireçtir (Jacques ve ark. 2021). Kireci, çimento, uçucu kül, yüksek fırın curufu, mermer tozu, cam tozu gibi malzemeler takip etmektedir(Bilgen ve ark. 2012; Kavak ve ark. 2012; Bilgen 2020).

Kullanılan katkı malzemeleri, kimyasal olarak zemini iyileştirdiğinden, uygulandığı zeminin mineral yapısına bağlı olarak her zemin için farklı seviyelerde etki yapar. Bu sebeple, her bir uygulama öncesi, bir seri geoteknik deneyin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu da uzun ve maliyetli bir süreç olarak görülebilir. Dolayısı ile, nispeten daha az maliyetli ve süre olarak daha az zaman alan laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile CBR ve UCS değerlerinin tahmin edilebiliyor olması, çalışmalarda önemli ölçüde zaman kazanılmasına aracı olacaktır başka bir deyiş ile kolaylık sağlayacaktır.

Literatürde, geoteknik deney sonuçları arasındaki ilişkilere istatistiksel olarak yaklaşımda bulunan ve bu deney sonuçları arasında bağıntılar kurmayı hedefleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekilde sıralanabilir: Chen ve ark. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada kireç, uçucu kül ve çimento ile stabilize edilen zeminlere ait regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Ghosh (2010) tarafından yapılan çalışmada, CBR değerini tahmin etmek üzere istatistiksel yaklaşımlar sergilenmiş ve kireç ve uçucu külün yanı sıra alçı taşı ile stabilize edilen zeminler de ele alınmıştır.Adefemi and Wole (2013) ise regresyon analizi aracılığı ile, kireçle stabilize edilmiş zemin özelliklerinden faydalanarak CBR değerinin belirlenmesi üzerinde çalışmıştır. Amir-Faryar ve ark. (2017) siltli zeminlerde çimento katkısı ile CBR bağımsız değişkenlerinden UCS bağımlı değişkenini tahmin etmeye yönelik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Patel and Patel (2013), farklı bölgelerden alınmış katkısız zeminlerde gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği veriler

doğrultusunda MDD ve OWC' ye bağlı olarak UCS ve CBR değerlerini tahmin etmeye yönelik çoklu regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Yurtcu and Özocak (2016)sıkışma indisinin istatistiksel ve yapay zeka yöntemleri ile tahmin edilmesi konularını ele almıştır.

Sunulan bu araştırmanın amacı, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan katkıların, dayanıma etkisinin tahmin edilmesi için ampirik bir denklem geliştirmektir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada geliştirilen ampirik bağıntıda, girdilerin belirlenmesinde deneysel çalışma yapılması gerekmektedir. Böylece, CBR ve UCS gibi deneylerin yapılmasına gerek kalmadan, nispeten daha kısa zamanda gerçekleştirilebilen Proctor deneyi aracılığı ile katkıların dayanıma etkilerinin belirlenebilir olması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, istatistiksel bir yaklaşımla, Proctor deneyinden elde edilen OWC ve MDD verileri kullanılarak çok değişkenli regresyon analizi (MLR) gerçekleştirilmiş ve ampirik denklemler üretilmiştir.

TAŞIMA GÜCÜNÜN LABORATUVAR ORTAMINDA BELİRLENMESİ

Katkı kullanımı ile yapılan çalışmalarda, farklı oranlarda katkı malzemesi ile karıştırılan zeminler ve katkısız zeminler bir takım geoteknik deneylere tabi tutulur. Böylece katkılı zeminin taşıma kapasitesindeki artış belirlenmiş olur.

Geoteknik açıdan, taşıma gücü özelliklerinin laboratuvar ortamında belirlenmesi için yapılan deneyler Kaliforniya taşıma oranı (CBR), kesme kutusu, üç eksenli basınç dayanım (UU, CU, CD) deneyleri ve serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleridir. CBR ve UCS değerleri, yol ve dolgu çalışmaları için, diğerlerine göre daha yaygın olarak kullanılan deneylerdir(Aksoy ve Gor 2017; Tajdini ve ark. 2017; Mohanty ve ark. 2021). Nitekim Amerika karayolları zemin sınıflandırma sistemi (AASHTO) yol çalışmalarında kullanılacak zeminleri CBR değerlerine göre belirlemektedir (Bilgen ve ark. 2020). Bu deneyler ile ilgili detaylar 2.1, 2.2 ve 2.3 nolu başlıklar altında sunulmaktadır.

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

CBR Deneyi(ASTM D1883 2007)özellikle yol yapımında kullanılacak olan malzemelerin uygunluğunun belirlenmesinde, yol tabanı zemininin mekanik davranışını değerlendirmek amacı ile

kullanılan bir penetrasyon testidir. Deney tipik olarak, sıkıştırılmış zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılırken, arazi CBR deneyi, zemin yüzeyinde veya kazılmış çukur içerisinde düz bir yüzeyde de gerçekleştirilir. Bu çalışmada arazi CBR deneyleri değil, laboratuvar CBR deneyleri verileri kullanılmıştır. Laboratuvar CBR deneyi, tercihen Proctor deneyi (ASTM D1557 2003)sonucunda bulunan optimum su içeriği ile hazırlanmış olan ortalama 6 kg'lık zemin numunesi ile gerçekleştirilir.Hazırlanan numune, 6 inç (152 cm) çapında,filtre kağıdı yerleştirilmiş, delikli taban plakası olan özel CBR kalıplarında sıkıştırılır. Zemin numunesinin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye temsil eden bir sürşarj yükü altında, 96 saat (4 gün) su banyosunda (kür havuzda) bekletilir.Bu süre sonunda sudan çıkarılan numune deneye tabi tutulur. Deney esnasında, 49.63 mm (1,954 in) çapa sahip olan bir piston, 1,27 mm/ dk. (0,05 in/dk.) hızla numune içerisine batırılır. Böylece, pistonun batma derinlikleri ve bu derinlikler için ne kadar yük uygulanması gerektiği belirlenir. 2,54 mm ve 5,08 mm batma (penetrasyon) derinliğine karşılık gelen basınç hesaplanır. Elde edilen basınç değerleri, standartlarca belirlenmiş olan değere oranlanır. Standart değerler, aynı piston ile düzgün gradasyona sahip kırma taştan hazırlanan bir numunede, aynı penetrasyon derinliğine karşılık gelen basıncı temsil etmektedir. Böylece zemine ait CBR değeri belirlenmiş olur. CBR bir oran olduğu için “%” olarak ifade edilir. CBR deneyi, kilden ince çakıla kadar, her tür zeminlere uygulanabilir.

Katkıların CBR değerine etkilerinin belirlenmesi için, hazırlanan numunenin su havuzuna konmadan ve deneye tabi tutulmadan önce, 21 (± 3)°C sıcaklıkta ve %95 nemli ortamda 0, 7, 28, 90 günlük periyotlarda bekletilmesi (kürlenmesi), puzolanik etkinin görülmesi için en uygun yöntemdir.

Tablo 1’de(Eren and Filiz 2009) CBR değerlerine göre zeminlerin yol ve dolgu çalışmalarında kullanımı ile ilgili uygunluk dereceleri gösterilmektedir. CBR değeri %0 ila %5 arasında olan zeminler çok zayıf zemin, %5-%8 arası zeminler zayıf zemin olarak adlandırılırlar. Yol yapımında alt temel malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin %25 veya daha yüksek CBR değerine sahip olması tercih edilir.

Serbest basınç dayanımı (UCS) deneyi

UCS deneyi, zeminlerin hızla yüklenerek kırılması sureti ile kayma dayanımını belirlemeye aracı olan bir deneydir. UCS değeri “ q_u ” olarak da sembolize edilir (ASTM D2166 2013). UCS, bozulmamış zemin örneklerinde uygulanabildiği gibi yeniden kalıplaşmış veya sıkıştırılmış zemin örneklerinde de uygulanabilir. Boy çap oranı 2 olan numunelere uygulanan deneyde, numune 0.5 ila 2 mm/sn. hızla itilen piston tarafından kırılıncaya kadar yüklenir. Kırılma anında taşıdığı yükün numunenin kırıldığı andaki alanına bölünmesi ile UCS değeri belirlenmiş olur. Tablo 2’ de zeminlerin kıvamı ile UCS değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.

Tablo 1. CBR değerlerine göre zeminlerin yol alt yapında kullanım ölçütleri (Eren and Filiz 2009)

CBR Değeri	Derecesi
> %24	Çok iyi
%8 - %24	İyi
%5 - %8	Orta
%3 - %5	Kötü
%2 -%3	Çok kötü

Katkılı zeminlerin UCS değerlerinin belirlenmesinde, CBR deneyinde olduğu gibi hazırlanan numunelerin deneye tabi tutulmadan önce 21 (± 3)°C derece ve %95 nemli ortamda 0, 7, 28, 90 günlük periyotlarda bekletilmesi katkıların puzolanik etkisinin görülmesi için en uygun yöntemdir.

Tablo 2. Kıvamlarına göre kilerde görülen UCS değerleri (Herrmann and Bucksch 2014)

Kıvam	UCS (kN/m ²)
Çok Sert Kil	> 400
Sert Kil	200 – 400
Orta Sert Kil	100 – 200
Orta Yumuşak Kil	50 – 100
Yumuşak Kil	25 – 50
Çok Yumuşak Kil	< 25

Proctor Deneyi

Özellikle dolgu yapımında kullanılan Proctor deneyi, zeminlerin su-yoğunluk ilişkilerini tanımlamakta kullanılır. Standart (ASTM ASTM D698-12 2003) ve modifiye (ASTM D1557 2003) şeklinde farklı uygulamaları olan Proctor deneyi, zeminin en iyi şekilde sıkışması için gerekli olan su

muhtevasını (OWC) ve bu su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığını (MDD) belirlemeye aracı olur. ASTM standartlarına göre, standart Proctor deneyinde zemin, 3 tabakada 2.5 kg ağırlığındaki tokmak ile 1000 cm³ hacmindeki kalıpta farklı su muhtevalarında sıkıştırılır. Modifiye Proctor deneyinde ise bu değerler, sırası ile 5; 4.5 kg ve 1000 cm³ şeklindedir. Farklı su muhtevalarında, ortalama 5 kez tekrarlanan deney sonucu elde edilen grafikte, en yüksek kuru birim hacim ağırlığı ve bu değeri veren su muhtevası Proctor değerleri olarak kabul edilir.

MALZEME VE YÖNTEM

İstatistiksel çalışma yapılabilmesi için ilk olarak bir veri seti oluşturulmuştur. Veri setinde toplamda 210 adet deneysel çalışma sonucu kullanılmıştır. Tablo 5 de sunulan veri seti, yazarlar tarafından yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra, literatürde bulunan 23 farklı çalışmadan derlenmiştir. Belirtilen çalışmaların seçiminde, zemin iyileştirme amacı ile farklı katkıların kullanılmış olması ve bu katkıların Proctor, CBR ve UCS değerlerine etkisinin deneysel olarak belirlenmiş olması hususu dikkate alınmıştır.

Oluşturulan veri seti üzerinde çoklu doğrusal regresyon modeli (MLR) analizleri yapılmıştır. MLR, y bağımlı değişken; x₁, x₂, ... , x_n bağımsız değişkenler olmak üzere değişkenler arasındaki sebep-sonuç ilişkisini matematiksel bir model olarak ortaya koyan istatistiksel bir yöntemdir (Tabar ve ark. 2021). MLR' de amaç açıklayıcı (bağımsız) değişken(ler) ile açıklanan (bağımlı) değişken arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasıdır.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k \quad (1)$$

MLR analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin biçimini veren regresyon denkleminin genel formülü denklem (1) ile ifade edilebilir. Burada y ve x₁, ...x_k gözlenebilen değerler ve regresyon katsayılarını; β_j parametreleri x_j' lerdeki birim değişim için y'de olması beklenen değişimi temsil etmektedir. Başka bir deyiş ile bu denklem aracılığı ile, değişken kategorisini belirli bir düzeyde tutup, bu düzeye göre diğer değişkenin nasıl değişim gösterdiği belirlenir. Yapılan çalışmada regresyon analizi için araştırılan model Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Regresyon analizi için araştırılan model

Bağımlı Değişken (y)	Bağımsız Değişken (x _j)
UCS CBR	$\beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2$

Tablo 3 de x_i değerleri MDD ve OWC, β₀, β₁, β₂ ise bilinmeyen parametreleridir. Regresyon modeline ait katsayıların anlamlı olup olmadığının araştırılması t testi ile gerçekleştirilmektedir. t istatistiğine ait anlamlılık değeri (p) dir.

p, 0.05' ten küçük olduğunda, varsayım kabul edilmekte ve modelde bulunan katsayıların anlamlı olduğu sonucuna varılmaktadır. p değeri istatistiksel anlamlılığın varlığının ve varsa ise var olan farklılığın kanıtının düzeyinin belirlenmesi amacı ile kullanılan bir değerdir. Anlamlılık seviyesi genellikle 0.05 ve 0.01 olarak alınmaktadır. %5 anlamlılık seviyesi %95 güven aralığını, %1 anlamlılık seviyesi %99 güven aralığını ifade etmektedir. "p" değerinin yorumlanmasındaki genel yaklaşım Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. "p" değerinin yorumlanması

p değeri	Yorumu
0.01 < p ≤ 0.05	İstatistiksel anlamlılık
0.001 ≤ p < 0.01	Yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık
p < 0.001	Çok yüksek istatistiksel anlamlılık
0.05 ≤ p < 0.10	Anlamlılık eğilimi (sınırdan anlamlılık)
p > 0.10	İstatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmamıştır

SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, dayanım ve Proctor değerleri arasında 6 farklı korelasyon denklemi belirlenmiştir. Tüm denklemler ile ilgili standart hata, anlamlılık F testi ve olasılık P testi ile ilgili veriler Tablo 5 de sunulmuştur.

Belirlenen denklemlerin ilkinde, UCS ve CBR arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı analiz edilmiştir. Bağımlı değişken UCS ve bağımsız değişken CBR değerleri arasında yapılan regresyon analizinden elde edilen veri denklem (2)olarak gösterilmiştir.Tablo 5'de sunulan verilere göre bağımsız değişken olan UCS değeri ve bağımlı değişken olan CBR değerinin anlamlılık F değeri 4,47E-35'tir. Bu değer 0,00'a çok yakın olması değişkenler arasında anlamlılık olduğunu

göstermektedir. Denklem (2)'nin veri setinde bulunan tüm katkılı zeminlerde 0.52'lik bir belirleyiciliği vardır. Bu durumda denklem (2)'nin katkılı zeminlerin CBR tahmininde yaklaşık olarak %50 doğruluk payı olduğu söylenebilir.

İkinci aşamada, zeminin Proctor değerleri ile dayanım değerleri arasındaki ilişki analizi yapılmıştır. Bağımlı değişkenler UCS ve CBR, bağımsız değişkenler ise MDD ve OWC değerleri olarak tanımlanan regresyon analizi ile elde edilen denklemler denklem (3) ve denklem (4) olarak görülmektedir. Denklem (3)'de görüldüğü üzere bağımsız değişkenler olan MDD, OWC ve UCS değerleri, bağımlı değişken ise CBR değeridir. Denklem (3)'te analiz edilen OWC değerinin P olasılık değeri 0,0356 bulunmuştur. Bu değer, denklemdaki anlamlılık açısından olması gerekenden yüksek çıkmıştır. Bu durumda OWC değişkeni denklem (3)'e dahil edilmeyebilir. Denklem (3)'ün belirleyicilik katsayısı 0,61 olarak bulunmuştur ve bir bütün olarak sonuçların anlamlılık düzeyinin yüksek olduğu görülmektedir. Denklem (4)'ün, belirleyicilik katsayısı 0,60 olarak görülmektedir. Aynı şekilde denklem (4) için OWC değişkeninin P olasılığının düşük olduğu ve bu sebeple denkleme dahil edilmesine gerek olmadığı söylenebilir. Katkılı zeminler ile CBR arasındaki ilişki denklem (5) de, UCS ile ilişkisi ise denklem (6) da görülmektedir. Denklem 5'e ait belirleyicilik katsayısı 0,82 olarak tespit edilmiştir. Denklem 5, veri setindeki gerçek değerlere en yakın sonuçlar veren denklemdir. Denklem (6)'ya ait belirleyicilik katsayısı 0,78 olarak tespit edilmiştir. Denklem (5) ve (6) için OWC değişkeninin etkisi olmadığı söylenebilir. Şekil 1 ve Şekil 2 de sırası ile 5 ve 6 nolu denklemlerin kullanılması ile elde edilen grafik ile gerçek deney sonuçlarından elde edilen grafiklerin kıyaslanması sunulmaktadır. Görüldüğü gibi hesaplanan taşıma gücü değerleri ile deneylerden elde edilen veriler birbirleri ile anlamlı şekilde uyumlu görülmektedir. Nitekim geoteknik açıdan bakıldığında, OWC, istenilen MDD yi elde

etmek için, numune hazırlamada kullanılan su miktarıdır. Dolayısı ile, elde edilen denklemler geoteknik açıdan da anlamlıdır.

Daha sonraki çalışmalarda, kireç, uçucu kül, cam tozu gibi spesifik katkıları için özel olarak geliştirilmiş istatistiksel yaklaşımlar yapılmasının, konunun daha ayrıntılı bir şekilde geliştirilmesi adına uygun olacağı düşünülmektedir.

Tablo 5. Elde edilen korelasyonlara ait istatistiksel veriler

	R ²	Standart Hata	ANOVA (Anlamlılık F testi)	Olasılık (P testi)
Denklem (2)	0,52	22,164	4,47E-35	
Sabit	-	-	-	0,4313
UCS	-	-	-	4,47E-35
Denklem (3)	0,61	19,97	1,97E-42	
Sabit	-	-	-	0,000197
MDD	-	-	-	5,01E-10
OWC	-	-	-	0,0356
UCS	-	-	-	1,39E-42
Denklem (4)	0,60	353,90	2,67E-41	
Sabit	-	-	-	3,63E-07
MDD	-	-	-	4,53E-09
OWC	-	-	-	0,0504
CBR	-	-	-	1,39E-42
Denklem (5)	0,82	10,94	3,31E-38	
Sabit	-	-	-	1,63E-06
MDD	-	-	-	3,66E-09
OWC	-	-	-	0,6054
UCS	-	-	-	3,25E-35
Denklem (6)	0,78	304,38	1,71E-33	
Sabit	-	-	-	3,51E-05
MDD	-	-	-	1,96E-06
OWC	-	-	-	0,9757
CBR	-	-	-	3,25E-35

$$CBR = 1,6442 + 0,04125 * UCS \quad (2)$$

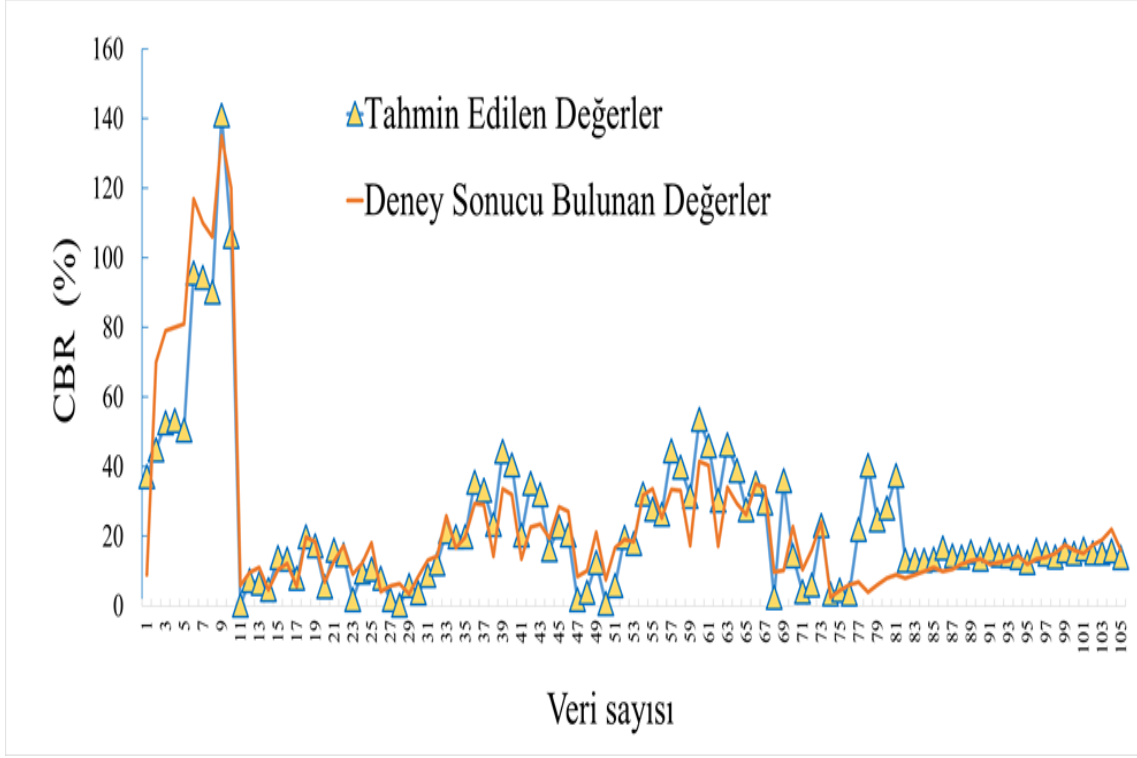
$$CBR = -29,98 + 2,567 * MDD - 0,4492 * OWC + 0,0436 * UCS \quad (3)$$

$$UCS = 715,61 - 43,115 * MDD + 7,415 * OWC + 13,698 * CBR \quad (4)$$

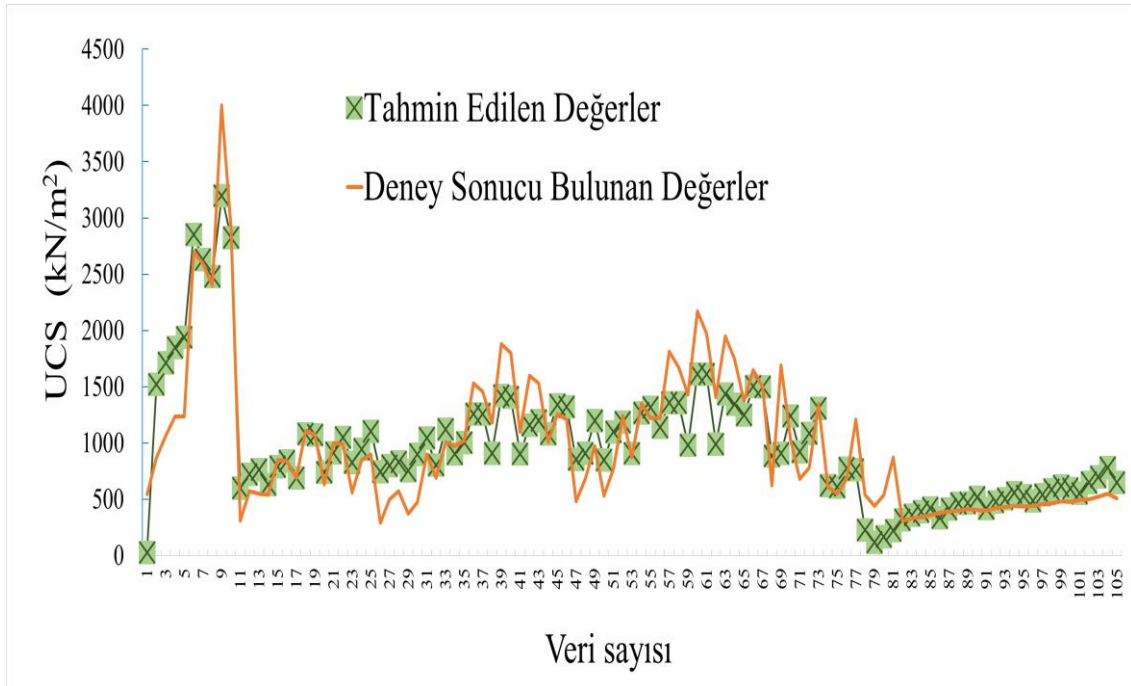
$$CBR = -113,40 + 7,094 * MDD + 0,1498 * OWC + 0,03179 * UCS \quad (5)$$

Research article/Araştırma makalesi
DOI:10.29132/ijpas.993022

$$UCS = 2761,09 - 163,80 * MDD - 0,245 * OWC - 24,603 * CBR \quad (6)$$



Şekil 1. Denklem (5)'de geliştirilen bağıntının deney sonuçları ile kıyaslanması



Şekil 2. Denklem (6)'da geliştirilen bağıntının deney sonuçları ile kıyaslanması

Tablo 6. Çalışmada kullanılan veri seti

Veri Sayısı	MDD kN/m ³	OWC %	CBR %	UCS kN/m ²
1	18.34	20.2	9	546.67
2	18.05	18.5	70	866.67
3	18.25	18.4	79	1066.67
4	17.56	19.3	80	1233.33
5	17.17	19.4	81	1233.33
6	14.92	23.5	10.57	242.14
7	14.36	25	11.27	252.99
8	14.31	25.1	12.07	257.79
9	14.14	26.3	11.87	226.36
10	14.22	26.25	11.51	224.63
11	17.27	11	2.05	116.7
12	17.36	10.7	3	140
13	17.56	10.5	7.8	152.7
14	17.75	10.1	11.05	149.4
15	17.85	9.9	9	145
16	16.3	21	1.68	60
17	16	22	1.82	65
18	15.8	24	2.25	71
19	15	25	2.7	83
20	14.6	27	3.21	95
21	14	28	3	90
22	13.4	29.2	2.8	85
23	15.6	20.4	1.6	55
24	15.8	19.8	1.8	60
25	16.2	19.4	2.3	68
26	16.5	18.9	2.7	75
27	17.1	18.4	3	82
28	17.5	18	3.5	90
29	18.1	17.6	4	98
30	15.89	23	10	200
31	14.91	26	75	1200
32	14.22	28	140	1900
33	13.24	32	185	3100
34	18.1	17	6	350
35	18.1	17	21	960
36	17	17.6	117	2700
37	17.3	16	110	2600
38	17.6	16	106	2400
39	17.6	16	135	4000
40	17.6	17	120	2900
41	14.34	25.32	2.23	73.8
42	14.05	27.12	5.85	310
43	13.84	29.31	9.52	570
44	13.80	29.92	10.99	550
45	13.66	27.05	4.63	540
46	13.55	28.55	10.34	850
47	13.52	28.8	12.22	840
48	13.42	28.07	5.49	690
49	13.20	28.78	19.81	1110
50	13.03	29.02	18.44	1070
51	13.33	28.88	6.88	630
52	13.16	29.28	12.8	1000
53	13.01	29.81	17.26	990
54	13.13	29.09	9.13	560
55	12.92	29.92	12.41	850
56	12.80	30.43	18.17	900
57	12.87	32.76	4.09	290
58	12.78	33.32	5.75	500
59	12.68	33.87	6.3	570
60	12.73	36.71	3.48	370

Tablo 6. Devam 1

61	12.58	36.84	8.41	470
62	12.42	37.08	13.2	900
63	18.64	11	1	220
64	19.68	9.5	3	226
65	19.62	9.5	1	214
66	14.7	11.25	10	100
67	16.6	21	59	200
68	17.0	18	65	300
69	17.1	16	68	350
70	17.2	14	74	450
71	17.3	11	95	500
72	18.3	16	100	1100
73	18.6	17	125	1190
74	18.8	18	135	1280
75	19.0	18	142	1350
76	19.2	15	155	1420
77	17.68	13.75	20.49	28.9
78	17.58	12.89	24.65	48.7
79	17.49	11.93	27.35	73.8
80	17.42	11.9	29	92.19
81	17.39	11.86	34.8	108.14
82	17.44	12.75	26.53	55.4
83	17.36	11.88	29.52	91.5
84	17.28	11.73	32.82	118.4
85	17.25	11.66	38.2	132.2
86	17.39	12.53	28.23	65.2
87	17.27	11.43	32.66	109.3
88	17.19	11.21	35.77	134.1
89	17.17	11.19	36.12	140.23
90	14.9	23.5	10.57	240
91	14.4	25	11.27	249
92	14.3	25	12.07	250
93	14.2	26.2	11.87	225
94	12.7	33	18.73	320
95	12.7	33	20.7	325
96	12.7	33	38.7	340
97	16.66	12.23	3.02	42.02
98	16.02	14.92	3.52	53.07
99	15.11	15.88	4.05	67.99
100	14.22	16.45	4.48	78.33
101	13.08	16.88	4.11	72.32
102	12.52	17.22	5.11	88.7
103	11.91	17.88	5.92	101.19
104	11.29	18.63	6.96	122.4
105	10.44	19.68	7.83	148.11
106	9.47	21.47	7.22	135.61
107	13.4	16	2.5	610
108	13.8	18	4.5	548
109	13	20	6	680
110	13.2	22	6.8	1210
111	18.8	22	4	540
112	17	24	6	440
113	17	26	8	536
114	16.8	26.7	9	870
115	13.9	19	3.5	396
116	13.2	22	4	335
117	14.6	24	4.5	600
118	14.1	26	5	486
119	18.10	14.01	3.2	155.5
120	17.66	16	5.2	283.9
121	17.56	16.1	4.8	379.4
122	17.17	14.9	4.6	372
123	17.07	14.2	4.5	341.4
124	1.93	11.57	2.65	476

Tablo 6. Devam 2

125	1.94	10.25	3.5	500
126	1.95	9.5	5	1000
127	1.955	9.25	4.7	900
128	1.945	10	4.8	600
129	1.955	9.25	5.2	1100
130	1.96	9	4.9	1200
131	1.955	9.5	23	1300
132	1.975	8.75	48	1500
133	1.99	8.5	38	1400
134	16.87	18.02	4.4	81.51
135	16.38	18.92	18	130.5
136	15.99	19.32	21	105
137	15.60	20.05	34	100
138	17.02	19.18	14.84	346.72
139	17.46	18.4	15.64	422.27
140	17.76	18.2	16.54	540.09
141	18.00	17.62	22.44	541.62
142	18.20	16.98	24.81	552.66
143	17.76	20.03	7.95	356.28
144	17.07	19.12	10.95	345.1
145	17.41	18.4	13.66	439.9
146	17.76	18	15.66	452.35
147	18.54	17.94	15.92	510.14
148	18.64	17.1	17.66	518.14
149	17.61	21.1	7.14	442.6
150	17.37	17	14.73	454.44
151	17.76	16.82	10.68	423.19
152	18.10	16.5	11.83	517.9
153	18.35	16.45	12.93	607.1
154	18.88	16.07	21.64	606.08
155	17.47	19.78	12.18	359.13
156	12.2	35	5	147
157	13.1	30	6	162
158	13.6	29	7	247
159	14.1	24	8	291
160	16.5	16	9	32
161	17.1	14	13	49
162	17.1	14	14	49
163	17.2	14	24	66
164	16.1	20	11	410
165	17.1	16	16	461
166	17.2	15	22	503
167	17.3	13	32	560
168	12.2	35	7	178
169	13.1	30	28	676
170	13.6	29	32	772
171	14.1	24	35	795
172	16.5	16	11	63
173	17.1	14	30	70
174	17.1	14	40	115
175	17.2	14	46	128
176	16.1	20	18	615
177	17.1	16	33	907
178	17.2	15	59	1328
179	17.3	13	62	1563
180	17.1	16.71	8.01	538
181	17.62	16.32	9.13	508
182	17.83	15.33	10.27	437
183	18.01	15.11	11.12	420
184	18.05	13.52	12.65	325
185	18.45	12.73	14.26	268
186	16.58	16.8	7	269
187	16.09	17.4	8	310
188	15.99	17.9	9	330

Tablo 6. Devam 3

189	15.94	18	10	340
190	15.89	18.2	11	360
191	16.28	17	10	380
192	15.89	17.8	10.5	390
193	15.79	18	12	400
194	15.94	17.6	13	415
195	15.70	18.2	13.5	405
196	16.09	17.5	12	400
197	15.79	17.9	12.5	420
198	15.70	18.3	13	430
199	15.60	18.6	14.5	440
200	15.40	18.8	12	435
201	15.89	17.8	13.5	440
202	15.65	18.4	14	460
203	15.50	18.6	15	465
204	15.70	18	17.5	480
205	15.60	18.2	16	475
206	15.70	18	15	495
207	15.50	18.6	17.5	500
208	15.40	18.8	19	520
209	15.35	19.2	22	550
210	15.25	19.5	16	510

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemektedir.

YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

KAYNAKLAR

- Adefemi BA, Wole AC (2013) Regression analysis of compaction delay on CBR and UCS of lime stabilized yellowish brown lateritic soil. *Electron J Geotech Eng* 18:3301–3314
- Aksoy HS, Gor M (2017) High-speed railway embankments stabilization by using a plant based biopolymer. *Fresenius Environ Bull* 25:7626–7633
- Aksoy HS, Gör M, İnal E (2018) Determination of Friction Angles Between Soil and Steel - FRP Piles. *Turkish J Sci Technol* 13:19–23
- Amir-Faryar B, Suter KE, Finnen RE (2017) Strength of Cement Treated Piedmont Residual Silty Soils. *Geotech Geol Eng* 35:1819–1830. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0211-2>
- ASTM ASTM D698-12 (2003) Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kn-m/m³)). *ASTM Stand Guid* 3:1–10. <https://doi.org/10.1520/D0698-12E01.1>

ASTM D1557 (2003) Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))

ASTM D1883 (2007) Standard test method for California bearing ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils

ASTM D2166 (2013) Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil

Bilgen G (2021) Sürdürülebilir çevre kavramı çerçevesinde inşaat ve yıkım atıkları (Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar). *Güven Plus Gurup A.Ş. Yayınları*

Bilgen G (2020) Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. *Geotech Geol Eng* 38:3163–3173. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>

Bilgen G, Aksoy SH, Cana Ö (2013) Effect of marble dust on consistency limits and compressibility of a clayey soil (in Turkish). In: 5. Geotechnical Symposium, Adana, Turkey

Bilgen G, Houlihan M, Ryoo S, et al (2020) Hydraulic and environmental compatibility of RCA with filters and subgrades in highways. *Environ Geotech* 1–13. <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00040>

Bilgen G, Kavak A, Çapar ÖF (2012) Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane curufunun kullanılması ve kireç ile

Research article/Araştırma makalesi
 DOI:10.29132/ijpas.993022

- etkileşiminin araştırılması. *Karaelmas Sci Eng J* 2:30–38.
<https://doi.org/10.7212/zkufbd.v2i2.92>
- Chen Y, Li Z, Wang X (2009) Research on rapid curing technology of lime-fly ash-cement stabilized macadam. In: *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management-ASCE*. pp 357–364
- Eren Ş, Filiz M (2009) Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Dari{dotless}dere material. *Constr Build Mater* 23:2473–2480.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002>
- Ghosh A (2010) Characteristics and bearing ratio of pond ash stabilized with lime and phosphogypsum. *J Mater Civ Eng* 22:343–351.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000028](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000028)
- Herrmann H, Bucksch H (2014) *Soil Mechanics and Foundation Engineering*
- Houlihan M, Bilgen G, Dayioglu AY, Aydilek AH (2021) Geoenvironmental evaluation of RCA-stabilized dredged marine sediments as embankment material. *J Mater Civ Eng* 33:04020435.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003547](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003547)
- Iravanian A, Ahmed I ud din (2021) Geoenvironmental solution of plastic solid waste management using stabilization process. *Environ Earth Sci* 80:1–7.
<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09429-5>
- Jacques D, Phung QT, Perko J, et al (2021) Towards a scientific-based assessment of long-term durability and performance of cementitious materials for radioactive waste conditioning and disposal. *J Nucl Mater* 557:153201.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153201>
- Kavak A, Bilgen G, Capar OF (2012) Using ground granulated blast furnace slag with seawater as soil additives in lime-clay stabilization. In: *ASTM Special Technical Publication*. pp 481–497
- Meskini S, Samdi A, Ejjaouani H, Remmal T (2021) Valorization of phosphogypsum as a road material: Stabilizing effect of fly ash and lime additives on strength and durability. *J Clean Prod* 323:129161.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129161>
- Mohanty S, Roy N, Singh SP, Sihag P (2021) Effect of industrial by-products on the strength of stabilized dispersive soil. *Int J Geotech Eng* 15:405–417.
<https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1654281>
- Patel MA, Patel HS (2013) Laboratory assessment to correlate strength parameter from physical properties of subgrade. *Procedia Eng* 51:200–209.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.029>
- Sharma M, Satyam N, Reddy KR (2021) Rock-like behavior of biocemented sand treated under non-sterile environment and various treatment conditions. *J Rock Mech Geotech Eng* 13:705–716.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.006>
- Tabar ME, Başara AC, Şişman Y (2021) Çoklu Regresyon ve Yapay Sinir Ağları ile Tokat İlinde Konut Değerleme Çalışması. *Türkiye Arazi Yönetimi Derg* 3:1–7.
<https://doi.org/10.51765/tayod.832227>
- Tajdini M, Nabizadeh A, Taherkhani H, Zartaj H (2017) Effect of Added Waste Rubber on the Properties and Failure Mode of Kaolinite Clay. *Int J Civ Eng* 15:949–958.
<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0057-7>
- Yurtcu Ş, Özocak A (2016) İnce daneli zeminlerde sıkışma indisi'nin istatistiksel ve yapay zeka yöntemleri ile tahmin rdilmesi. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 31:597–608.
<https://doi.org/10.17341/gummfd.95986>