

Farklı kür sıcaklıklarında kireçle stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi bir zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile tahmini

Estimation of shear strength parameters of a high plasticity clayey soil stabilized with lime at different curing temperatures using Response Surface Methodology (RSM)

Hakan Alper KAMILOĞLU^{1*}, Hüseyin TURAN²

^{1,2}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye.
hkamiloglu@bayburt.edu.tr, turannuseyin@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.09.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 10.02.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 09.02.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.83707
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), yanıtın optimum değerini bulmak, bağımsız değişkenler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi incelemek veya çok karmaşık ve zaman alan sayısal analizleri kısaltmak için kullanılmaktadır. YYY, birçok mühendislik dalında yaygın olarak tercih edilen bir yöntem olmasına rağmen, bu yöntemin kullanımı geoteknik çalışmalarda sınırlıdır. Bu çalışmada, kür sıcaklığının, kireçle stabilize edilmiş killi bir zeminin serbest basınç dayanımı ve kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, daha az deneysel çaba ile bu parametrelerin tahmin edilmesi için Yanıt Yüzey Yöntemi'nin kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada sıcaklığın etkisi beş farklı kür sıcaklığı seviyesi (3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C, 43 °C) ile kontrol edilmiştir. 28 gün boyunca çeşitli sıcaklıklarda kürlenmiş 40 adet stabilize edilmiş zemin numunesi üzerinde üç eksenli basınç (UU) ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel tasarım, test sayısını azaltmak için Yanıt Yüzey Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, numunelerin deviyatör dayanımını tahmin etmek için istatistiksel olarak bir denklem YYY ile türetilmiştir. İstatistiksel analizler, 18 adet örneğin deviyatör dayanımları dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, Yanıt Yüzey Yöntemi ile daha az sayıda deney sonucu kullanılarak numunelerin kayma mukavemeti ve serbest basınç dayanımlarını doğru bir şekilde tahmin etmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kimyasal stabilizasyon, Kür sıcaklığı, Yanıt yüzey yöntemi, Kayma mukavemeti parametreleri, Serbest basınç dayanımı.

Abstract

Response Surface Methodology (RSM) is useful to find the optimum value of the response, to examine the relationship between independent variables and responses, or to shorten very complicated and time-consuming numerical analyses. Although the RSM is a commonly used method in many branches of engineering, the use of this method is limited in geotechnical studies. In this study, the effect of curing temperature on shear strength and unconfined compressive strength parameters of lime stabilized clayey soil was examined. Within the scope of the study, it was aimed to evaluate the Response Surface Method to estimate these parameters with less experimental effort. In the study effect of the temperature was controlled with five different curing temperature level (3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C, 43 °C). Three axial (UU) and unconfined compression tests were performed on 40 pieces of stabilized soil samples cured along 28 days at various temperatures. The experimental design was performed with Response Surface Methodology to reduce the test number. Within this scope, an equation was derived statistically to estimate the deviator strength of the samples. Statistical analyses were performed considering deviator strengths of the 18 pieces of samples. As a result of the study, it was seen that it is possible to estimate shear strength and unconfined compression strengths of the samples accurately by using fewer test numbers with Response Surface Methodology.

Keywords: Chemical stabilization, Curing temperature, Response surface methodology, Shear strength parameters, Unconfined compression strength.

1 Giriş

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), birden fazla etken ile bu etkenlerin oluşturduğu sonuçlar arasında matematiksel ve istatistiksel temelli ilişkiler kuran, mühendislik problemlerinin modellenmesinde ve analizinde etkili sonuçlar veren bir yöntemdir [1]. Literatürde 'Response Surface Method' olarak tanımlanan bu yöntem, ulusal çalışmalarda 'Cevap Yüzey Yöntemi', 'Tepki Yüzey Yöntemi' ya da 'Yanıt Yüzey Yöntemi' şeklinde tanımlanmaktadır [2]-[4]. Yanıt Yüzey Yöntemi ilk olarak Box ve Wilson (1951) tarafından ortaya koyulmuş ve daha sonra deney tasarımı ve veri analizi için geliştirilmiştir [5]. Yanıt yüzey yönteminde (YYY), deneysel sonuç 'Yanıt', 'Çıktı' ya da 'Ürün' olarak tanımlanır. Deney kapsamında sonuç üzerinde etkisi olduğu

düşünülen faktörler ise 'Bağımsız Değişkenler', 'Tahmin Ediciler' veya 'Etki' olarak isimlendirilir. Yöntemin ana amacı; bağımsız değişkenlerden etkilenen yanıt parametresini optimize etmek ve bağımsız değişkenler ile yanıt arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmektir [1]. Bu nedenle yöntem özünde, yanıtı etki eden bağımsız değişkenlerin etki derecelerini istatistiksel olarak belirleme ve bu ilişkileri göz önünde bulundurarak yanıt ile bağımsız değişkenler arasında bir fonksiyon oluşturma esasına dayanır. Yanıt yüzey yöntemi (YYY) ile deneysel bir sonucu (y) etki eden faktörlerin (ζ) fonksiyonu belirli bir istatistiksel hata değeri (ε) ile kabaca aşağıdaki gibi ifade edilir [6].

$$y = f(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n) + \varepsilon \quad (1)$$

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Eşitlik (1)'de ifade edilen yanıtın (y) hassas şekilde tahmin edilmesi uygun fonksiyonun (f) kullanımına bağlıdır. Yanıt yüzey yönteminde, bağımsız değişkenler ile yanıt arasındaki matematiksel ilişki doğrusal, lineer olmayan, üssel, eksponansiyel ya da farklı derecelerdeki polinom modeller vasıtası kurulur [7]. Yanıt yüzey yöntemi ile yanıt (y) tahmininde sık kullanılan, ikinci dereceden polinom baz alınarak kurulan eşitlik aşağıdaki gibidir. Eşitlikte bağımsız değişkenler x_n ile ifade edilmiştir. β katsayıları ise istatistiksel analiz sonucunda belirlenen regresyon katsayılarıdır

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad (2)$$

Yanıt yüzey yöntemi tasarım süreci üç başlık altında özetlenebilir.

- Yanıtların yeterli ve güvenilir ölçümü için bir dizi deneyin tasarlanması (eleme denemeleri),
- Bağımsız değişkenler ve yanıt arasında uyumu en iyi olan matematiksel modelin belirlenmesi ve yanıtın maksimum-minimum değerini üreten optimum deney parametreleri kümesinin belirlenmesi (bölge araştırması),
- Sürece etki eden parametrelerin etkilerinin iki veya üç boyutlu grafiklerle ifade edilmesi şeklindedir [8],[9].

Cornell (1990), yanıt yüzey yönteminin yanıtı minimize ya da maksimize eden optimum bileşenlerin belirlenmesinde kullanılmasının yanında, farklı amaçlarla da kullanılabileceğine değinmiştir. Bu amaçlar:

- Yanıt ve bağımsız değişken ilişkisinin daha iyi anlaşılması,
- (ii) Uygulaması saatler alabilen, girift nümerik analiz serisinin yerine basitleştirilmiş eşdeğer yanıt yüzeyinin elde edilmesi sureti ile nümerik analiz sonuçlarının tahmin edilmesi şeklinde özetlenebilir [10].

Yanıt yüzey yönteminin iki önemli kısıtlaması bulunmaktadır. Bu kısıtlamalardan biri yöntemin 'kara kutu yaklaşımı'nın (black box approach) benimsemesidir. Bu yaklaşımda sadece sisteme giren ve çıkan parametreler incelendiğinden yaklaşım hatalarının büyüklüklerinin tahmin edilmesi çok zordur. Yöntemin bir diğer kısıtı da yerel bir analiz olmasıdır. Bu nedenle geliştirilen yanıt yüzeyi sınırları dışında kalan bölge (bağımsız değişkenler için belirlenen maksimum ve minimum değer aralığı dışındaki değerler) için sağlıklı yorumlar geliştirilememektedir [11].

Yanıt yüzey yöntemi mühendislik dalları içerisinde kimya, gıda, makine ve endüstri mühendisliği alanında sıkça kullanılmaktadır. Çeşitli mühendislik alanlarında sık kullanılan bir yöntem olmasına karşın, geoteknik mühendisliği alanında yanıt yüzey yönteminin kullanıldığı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde şevler [12]-[14], yüzeysel temeller [15],[16], dayanma duvarları [17] ve yanal yüklü kazıklar [18],[19] için yapılan güvenilirlik analizlerinde yanıt yüzey yöntemini kullanan çalışmalar mevcuttur. Bunun yanında bazı çalışmalarda, çözümü uzun zaman alan, karmaşık nümerik analizlerin istatistiksel eşitlikler kullanılarak kolaylaştırılması amacıyla YYY kullanılmıştır. Zangeneh ve diğ. (2002), dinamik durumda deniz altındaki şevler için yapılan Newmark deformasyon analizlerinde bu yöntemi kullanmışlardır. Çalışma sonucunda kullanım kolaylığı olan, çok daha hızlı sonuç veren YYY'nin uzun nümerik analiz serileri yerine başarılı şekilde kullanılabileceğine değinmişlerdir [11].

Yapılan çalışmaların bazılarında ise optimum çözümlerin elde edilmesinde YYY'nin kullanıldığı görülmektedir. Lu ve diğ. (2015), organik madde içeren zeminlerin stabilizasyonunda çimento, alçı taşı, fulvik asit ve hümik asit gibi maddelerin zeminin serbest basınç direncine olan etkisini irdelemişler, maksimum serbest basınç mukavemetini veren ideal çimento ve alçı taşı miktarlarını YYY ile belirlemişlerdir [20]. Güllü ve Fedakar (2016), kötü derecelenmiş kumlu zeminlerin katkılı stabilizasyonunda, maksimum serbest basınç direncini veren optimum atık su arıtma çamuru külü, polipropilen fiber donatı ve kür süresi miktarlarını YYY ile belirlemişlerdir [21]. Madun ve diğ. (2018), yumuşak killi bir zeminin taş kolon uygulaması ile iyileştirilmesini konu alan çalışmalarında YYY'yi kullanarak kolonların taşıma gücüne ve oturmasına etki eden çap ve uzunluk değerlerini belirlemişler, optimum kolon çapı ve kolon boyunu önermişlerdir [22].

Yüzeysel iyileştirme yöntemleri yol dolgusu, bina ve yol temelleri gibi uygulamalarda sıkça kullanılırlar [21]. Kimyasal stabilizasyon uygulamalarında kireç, tek başına [23]-[25] yada bir takım malzemelerle karıştırılması sureti ile [26]-[28] killi zeminlerin mühendislik özelliklerini ciddi şekilde yükseltmektedir. Arazide gerçekleştirilecek olan kireç katkılı kimyasal stabilizasyon uygulamalarında, minimum ortam sıcaklığının 3 °C'nin üzerinde olması talep edilmektedir [29]-[30]. Kireçle yapılan zemin iyileştirme uygulamalarında, minimum ortam sıcaklığı üzerindeki sıcaklıkların serbest basınç direnci ve kayma mukavemeti parametrelerine olan etkisi değişkendir. Sıcaklık farkının, bu parametreler üzerindeki etkisini konu alan çalışmalar olmasına karşın, söz konusu parametrelerin istatistiksel yöntemlerle tahminine yönelik az sayıda çalışma vardır. İstatistiksel yöntemlerle yapılan deney tasarımlarının deney sayısını ciddi şekilde azaltması nedeni ile avantajları bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışmada farklı sıcaklıklarda kürlenmiş, kireçle stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi bir zeminin serbest basınç dayanımı ve kayma mukavemeti parametrelerinin (c , ϕ) daha az sayıda deney gerektiren YYY ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Yanıt yüzey yönteminin yerel bir analiz olması nedeniyle, yöntem sadece modelleme sürecinde dikkate alınan parametrelerin alt ve üst sınırları dahilinde geçerli olan sonuç vermektedir. Bu nedenle oluşturulan yöntemin doğruluğu aynı zemin numunesi üzerinde farklı şartlarda yapılan deneylerle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda standart prosedüre göre 40 adet deney numunesi kullanılarak, 3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C, 43 °C' lik kür sıcaklıklarında 28 gün küre tabi tutulan örneklerin, 0 kN/m², 50 kN/m², 100 kN/m² ve 200 kN/m² lik çevre basınçları altında dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçları dikkate alınarak örneklerin serbest basınç dayanımı (q_u), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın ikincini bölümünde 18 adet numuneye uygulanan tek eksenli ve üç eksenli basınç deney sonuçları kullanılarak, Design Expert 12 [31] programı yardımıyla yanıt yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde üç farklı kür sıcaklığı (3 °C, 23 °C, 43 °C) ve çevre basıncı (0 kN/m², 100 kN/m² ve 200kN/m²) değeri bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda kür sıcaklığı, çevre basıncı parametrelerine bağlı deviator dayanımı veren eşitlik türetilmiştir. Kontrol amacıyla, elde edilen eşitliğe farklı kür sıcaklıkları (3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C, 43 °C) ve çevre basıncı (0 kN/m², 50 kN/m², 100 kN/m², 200 kN/m²) değerleri

girilerek elde edilen deviyatör gerilme değeri kullanılarak c , ϕ ve q_u değerleri hesaplanmıştır. YYY ile belirlenen formül kullanılarak hesaplanan parametreler, klasik deneylerle belirlenen parametrelerle karşılaştırılmıştır.

2 Deneysel çalışma

Çalışmanın bu bölümünde yüksek plastisiteli killi zemin ve kireç katkısı ile stabilize edilmiş zeminin mühendislik özellikleri, YYY ile deney tasarımı için gerekli olan parametrelerin elde edilmesinde kullanılan deney standartları ve numune hazırlama yöntemleri açıklanmıştır.

Zemin örneği üzerinde yapılan elek analizi (ASTM D2487-17e1), plastik ve likit limit (ASTM D4318) deneyleri sonucunda çalışmada kullanılan zeminin USCS'ye göre yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu belirlenmiştir. Kireçle stabilize edilecek olan zemin için optimum kireç miktarı ASTM D6276 Standardına göre yapılan pH deneyi sonrasında %6 olarak belirlenmiştir. Zemin-kireç karışımına eklenecek olan su miktarı ASTM D6276 standardına göre yapılan standart kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optimum su miktarı olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan stabilize edilmiş ve stabilize edilmemiş zeminlerin mühendislik özellikleri Tablo 1'de aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Tablo 1. Zemin ve zemin-kireç karışımının bazı fiziksel özellikleri.

Table 1. Some physical properties of soil and soil-lime mixture.

Özellik	Zemin	Zemin+kireç
	Değer	Değer
Optimum su içeriği, %	21.4	21
Maksimum kuru yoğunluk, gcm ⁻³	1.61	1.64
Likit limit, %	53.1	45.5
Plastik limit, %	28.5	-
Plastisite İndisi, %	24.6	-

Çalışma kapsamında kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi ve YYY ile belirlenen deney planına veri sağlamak için ASTM D2166, ASTM D2850-03 standartlarına göre serbest basınç deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyler için 50 mm çaplı ve 100 mm yüksekliğinde toplamda 40 adet silindirik örnek hazırlanmıştır. Örneklerin hazırlanmasında Tablo 1'de verilen su içerikleri dikkate alınmıştır. Örnekler Şekil 1(a)'da görülen numune kalıpları çerisinde standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmıştır. Standart kompaksiyon enerjisinin oluşturulması için Şekil 1(b)'de görülen aparatlar kullanılmış, 0.025 kN ağırlığındaki tokmak, 0.3 m yükseklikten numune üzerine 16 defa düşürülmüştür.



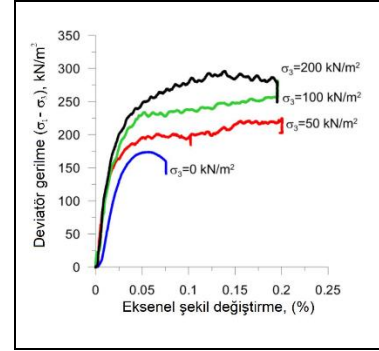
Şekil 1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan aparatlar. (a): Numune kalıbı ve zemin örneği. (b): Numune kalıbına uygun kompaksiyon çekici.

Figure 1. The apparatus used in sample preparation. (a): Sample mould and soil sample. (b): Compaction hammer suitable for sample mould.

Sıkıştırma sonucunda numune çıkarıcı ile kalıptan çıkarılan numuneler, polietilen film ile sarılmış, yaklaşık %99 nem oranına sahip desikatörlere yerleştirilen numuneler 3 °C, 13 °C, 23 °C, 33 °C ve 43 °C'lik sabit ortam sıcaklıklarında 28 günlük küre tabi tutulmuştur.

2.1 Kayma mukavemeti parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi

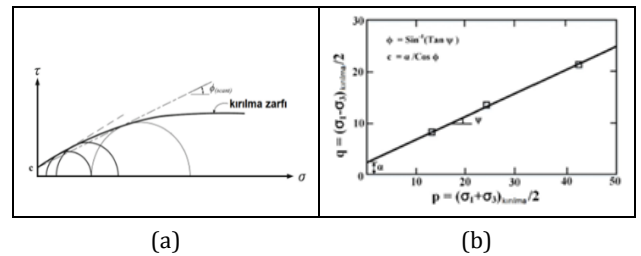
Üç eksenli basınç deneyleri ve serbest basınç deneyleri sonrasında, farklı çevresel gerilmeler için yüksek plastisiteli killi zemine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Yüksek plastisiteli kil numunesinin farklı çevresel gerilme basınçları için deviyatör gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Figure 2. Deviator stress-strain curves of the high plasticity clayey soil samples for various confining pressures.

Gevşek ve normal konsolide killi zeminlerde, kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için çizilen Mohr-Coulomb kırılma zarfı, doğrusal özellik gösterdiğinden c ve ϕ değerlerini Mohr çemberlerine teğet olarak çizilen doğrusal kırılma zarfından kolayca belirlemek mümkündür. Bununla birlikte stabilize edilmiş yada yoğun biçimde sıkıştırılmış zeminlerde Mohr-Coulomb kırılma zarfı Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi içbükey şekillidir. Bu tip zeminlerde doğrusal şekilde çizilen kırılma zarfı, kayma mukavemeti parametrelerinin saptanmasında belirsizlik oluşturmaktadır. Bu durumda c ve ϕ değerlerinin elde edilmesi için Şekil 3(b)'de görülen p - q diyagramının kullanılması önerilmektedir [32]. Bu nedenle yapılan çalışmada c ve ϕ parametreleri p - q diyagramları ile belirlenmiştir.



Şekil 3(a): Yoğun şekilde sıkıştırılmış bir zemine ait Mohr-Coulomb kırılma zarfı. (b): p - q diyagramı ile c ve ϕ nin belirlenmesi [32].

Figure 3(a): Mohr-Coulomb failure envelope of heavily compacted soil. (b): Determination of c and ϕ with p - q diagram [32].

Önerilen p-q diyagramı kullanılarak çalışmada kullanılan zemine ait plastisite indisi, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Tablo-2 de sunulmuştur. Bunun yanında belirlenen değerler, bazı çalışmalarda kohezyonlu zemin stabilizasyonunda kullanılan zeminlerle karşılaştırılmıştır [33]-[35]. Çalışma kapsamında elde edilen kayma mukavemeti parametreleri drenajsız ve konsolidasyonsuz üç eksenli basınç deneyleri sonucu elde edildiği için karşılaştırmada kullanılan c ve ϕ değerleri de UU üç eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen parametrelerdir.

Tablo 2. Stabilize edilmemiş zeminin plastisite indisi ve kayma mukavemeti parametrelerinin literatürde benzer tipteki kohezyonlu zeminlerle karşılaştırılması

Table 1. Comparison of plasticity index and shear strength parameters of the untreated soil samples with similar cohesive soils in the literature.

	Plastisite İndisi (%)	ϕ (°)	C (kN/m ²)
Stabilize edilmemiş zemin	24.6	18.5	155
[33]	12.3	25.6	72.9
[33]	34.4	26.9	124
[34]	30	-	107.5
[35]	57	9.15	33.48

2.2 Yanıt yüzey yöntemi ile kayma mukavemeti parametrelerinin tahmini

Yapılan çalışmada YYY 'nin kullanılmasındaki amaç kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi sürecinde test sayısını ve deney süresini kısaltmaktır. Bu nedenle farklı çevresel basınç şartlarında kayma mukavemeti parametrelerini veren, istatistiksel tabanlı formülün çıkarılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, deney tasarımı ve istatistiksel analizler Design Expert 12 [31] programı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada bağımsız değişkenler olarak kabul edilen kür sıcaklığı (T) ve çevresel basınç (σ_3) parametrelerinin, yanıt olarak belirlenen deviyatör gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) üzerine olan etkilerinin incelenmesinde Merkezi Karma Tasarım [5] yöntemi kullanılmıştır. Regresyon analizlerinde Eşitlik (3) ile gösterilen kuadratik model kullanılmıştır. Söz konusu eşitlikte y; tahmin edilen yanıtı (deviyatör gerilme), X_i ve β ise sırası ile bağımsız değişkenleri (kür sıcaklığı ve çevresel basınç) ve regresyon katsayılarını temsil etmektedir.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_{0i}X_i + \sum \beta_{ij}X_i X_j + \sum \beta_{ij}X_i^2 \quad (3)$$

Analizlerde kullanılan bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınır değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınır değerleri.

Table 3. Upper and lower limits of independent variables.

Bağımsız Değişkenler	Sıcaklık	Çevresel Basınç	
Birim	°C	kN/m ²	
Sembol	X_1	X_2	
	Kodlanmış	Gerçek	
Faktör Seviyesi	-1	3	0
	0	23	100
	+1	43	200

Yapılan çalışma kapsamında, Tablo 4'te sunulan deney tasarımı dikkate alınarak serbest basınç ve üç eksenli basınç

deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli ve üç eksenli basınç deneylerinden el edilen deviyatör dayanım, programa yanıt olarak tanıtılmıştır. Parametreler için deneyler iki tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. Deney tasarımı.

Table 4. Experimental design.

D. No	Bağımsız değişkenler		Yanıt
	Sıcaklık X_1 (°C)	Çevre basıncı X_2 (kN/m ²)	Deviyatör dayanım Y_1 (kN/m ²)
1	3	200	1024.73
2	3	0	543.46
3	3	200	935.45
4	3	0	562.45
5	3	100	807.9
6	3	100	760.51
7	23	0	2527.88
8	23	0	2630.61
9	23	200	3005.48
10	23	200	2900
11	23	100	2901.19
12	23	100	2790.8
13	43	0	5151.18
14	43	0	5351.65
15	43	100	5518.73
16	43	200	6102.49
17	43	200	6335.07
18	43	100	5707.03

Tablo 4'te verilen deneysel tasarım dikkate alınarak, yanıt için istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde, yanıt yüzey modelinin oluşturulması için kuadratik model kullanılmıştır. Modelin tahmin gücünün artırılması için istatistiksel olarak etkisiz terimler ($p>0.1$), geri analiz (backward analysis) yardımıyla kuadratik modelden ayrıştırılmıştır. İstatistiksel analizlerin sonucunda regresyon katsayısı (R^2) düzeltilmiş regresyon katsayısı (R^2_{adj}) ve tahmini regresyon katsayısı (R^2_{pre}) değerleri sırasıyla $R^2=0.997$, $R^2_{adj}=0.996$, $R^2_{pre}=0.995$ olarak belirlenmiştir. Oluşturulan model, normal dağılımlı bir seride üç ve daha fazla bağımsız ortalama arasındaki farkın anlamlılığının hesaplanmasında kullanılan 'Tek Yönlü Varyans Analizi' (ANOVA) [31] ile değerlendirilmiştir. Oluşturulan merkezi karma model için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Deviyatör dayanım için ANOVA sonuçları.

Table 5 ANOVA results for the deviatör strength.

Deviyatör Dayanım, Y_1					
Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri	
Model	7.464E7	4	1.866E7	1305.36	<0.0001 *
X_1	7.268E7	1	7.268E7	5083.99	<0.0001
X_2	1.042E6	1	1.042E6	72.89	<0.0001
X_1X_2	1.459E5	1	1.459E5	10.21	0.0070
X_1^2	7.77E5	1	7.77E5	54.65	<0.0001
Artan	1.858E5	13	14295.18		
Uyum eksikliği	98746.93	4	24686.73	2.55	0.1120 -
Hata	87090.43	9	9676.71		
Cor	7.483E7	17			
Total					

*: Önemli, -Önemsiz.

Tablo 5'te sunulan ANOVA sonuçlarının incelenmesi sonucunda geliştirilen modelin p değerinin 0.0001'den daha küçük olması nedeniyle istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda tahmin edilen regresyon katsayısı ile düzeltilmiş regresyon katsayısının birbirleri ile

uyumlu olduğu gözlenmektedir. Modelin F değerlerinin de yüksek oluşu, oluşturulan modelin anlamlı olduğunu vurgulamaktadır. Hazırlanan yanıt yüzey modeli ile kayma mukavemeti parametrelerinin tahmininde kullanılacak olan deviatör dayanımının, ortam sıcaklığı ve çevresel basınç parametrelerine bağlı olarak istatistiksel tahmini Eşitlik (4) ile formülize edilmiştir.

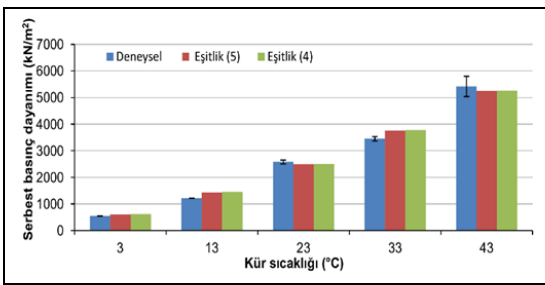
$$y = 406.05657 + 65.61204X_1 + 1.39349X_2 + 0.067529X_1X_2 + 1.10182 \quad (4)$$

3 Bulgular ve tartışmalar

Çalışmanın bu bölümünde yanıt yüzey yöntemi ile elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Her bir kür sıcaklığı için, ortalama üç tekrarla yapılan serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımları ve bu dayanımların standart sapmaları Şekil 4'te verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler, iki farklı şekilde YYY ile tahmin edilen serbest basınç dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bunlardan ilki, $\sigma_3=0$ ve beş farklı kür sıcaklığı parametrelerini Eşitlik 4' de yerine koyulması ile elde edilen serbest basınç değeridir. Bu yöntemle hesaplanan serbest basınç dayanımı grafikte 'Eşitlik 4' şeklinde ifade edilmiştir. Diğer q_u tahmini ise her kür sıcaklığı değeri için YYY ile tahmin edilen kayma mukavemeti parametrelerini (c, ϕ), Eşitlik 5'te yerine koymak sureti ile hesaplanan q_u değeridir. Bu değer de Şekil 4'te 'Eşitlik 5' olarak gösterilmiştir.

$$q_u = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (5)$$

Şekil 4'ün incelenmesi sonucunda beklenen şekilde artan kür sıcaklığının zeminin serbest basınç dayanımında artışa sebebiyet verdiği görülmektedir. Ek olarak, her iki yöntemle hesaplanmış olan serbest basınç dayanımlarının deneysel verilerde belirtilen alt ve üst sınırlar içerisinde kaldığı ya da bu sınırlara çok yakın değerler aldığı gözlenmektedir. Deneysel olarak belirlenen değerlerin YYY ile tahmin edilen değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir.

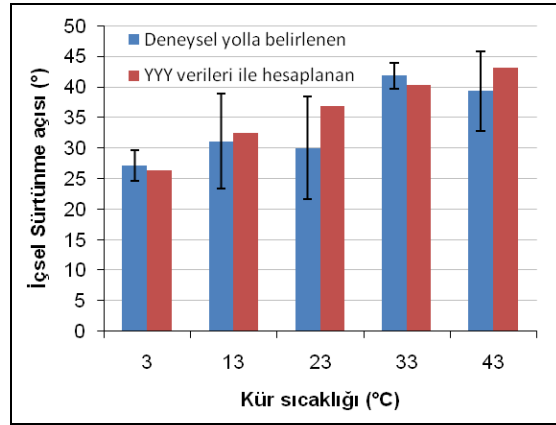


Şekil 4. Deneysel olarak belirlenen ve hesaplanan serbest basınç dayanımlarının mukayesesi.

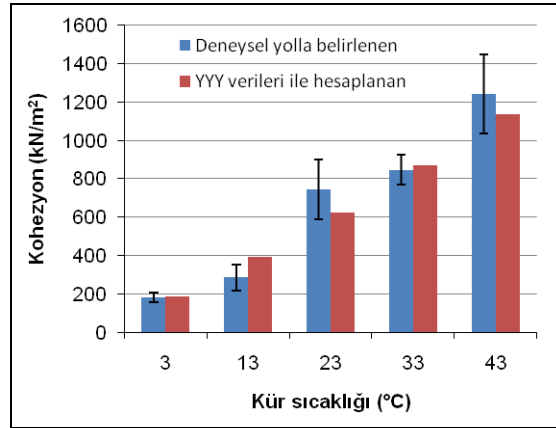
Figure 4. Comparison between experimentally determined and calculated unconfined compression strengths.

Eşitlik (4) kullanılarak farklı kür sıcaklığı ve çevresel basınç değerleri için deviatör gerilme değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerler kullanılarak p-q diyagramı yardımıyla c ve ϕ değerleri belirlenmiştir. Şekil 5'de deneysel yolla belirlenen kayma mukavemeti parametrelerinin YYY kullanılarak tahmin edilen parametrelerle karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 5(a) ve 5(b)'te üç eksenli basınç deneyleri sonucu ile elde edilen sırasıyla içsel sürtünme açısı

ve kohezyon değerleri ile bu değerlerin standart sapmaları görülmektedir. Buna göre, Şekil 5a ve 5b'den literatürle uyumlu olarak içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametrelerinin artan kür sıcaklığıyla birlikte artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, kür sıcaklığındaki artışın zeminin kohezyon parametresi üzerinde içsel sürtünme açısına nazaran daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 5a'da YYY verileri ile hesaplanan içsel sürtünme açısı değerlerinin deneysel yolla belirlenen içsel sürtünme açısı değer aralığında olduğu görülmektedir. Şekil 5b'nin incelenmesi sonucunda benzer durumun kohezyon parametresi için de geçerli olduğu görülmektedir. Ancak, 13 °C için YYY ile yapılan kohezyon tahmininin deneysel verilerin bir miktar üzerinde sonuç verdiği anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 5. Deneysel olarak belirlenen ve tahmin edilen kayma mukavemeti parametrelerinin karşılaştırılması. (a): $\phi_{deneysel} - \phi_{tahmin}$, (b): $C_{deneysel} - C_{tahmin}$.

Figure 5. Comparison between experimentally determined and estimated shear strength parameters for various curing temperature. (a): $\phi_{experimental} - \phi_{estimated}$, (b): $C_{experimental} - C_{estimated}$.

4 Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, kür sıcaklığının kireçle stabilize edilmiş killi bir zemin kayma mukavemeti ve serbest basınç dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, daha az deneysel çaba ile bu parametrelerin tahmin edilmesi için Yanıt Yüzey Yöntemi'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar

ve istatistiksel analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Artan kür sıcaklığı kayma mukavemeti parametreleri ve serbest basınç dayanımı değerlerinin artmasına neden olmaktadır,
- ANOVA sonuçları ve deneysel karşılaştırmalar dikkate alınarak, kayma mukavemeti parametrelerinin ve serbest basınç dayanımının YYY yaklaşımı ile hassas şekilde tahmin edilebileceği anlaşılmaktadır,
- Yanıt yüzey yöntemi ile toplam deney sayısını yaklaşık %55 azaltarak hassas şekilde kayma mukavemeti parametreleri ve serbest basınç dayanımı değerlerini tahmin etmek mümkündür,
- Deneysel çalışmalarda, deneysel hata ya da malzeme heterojenliğinden kaynaklanan nedenlerle sonuçlarda standart sapma yüksek olabilmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda sabit bir kür sıcaklığı için değişken c ve ϕ değerleri elde edilebilmektedir. Bu durumda standart sapmayı azaltmak için deney sayısının artırılması gerekmektedir. Ancak, YYY geniş numune yelpazesini dikkate alarak istatistiksel analizler yaptığından daha az sayıda deney sonucu kullanarak daha kararlı sonuçlar vermektedir.

5 Conclusions

In this study, the effect of curing temperature on shear strength and unconfined compressive strength parameters of a lime stabilized clayey soil was examined. Within the scope of the study it was aimed to use Response Surface Method to estimate these parameters with less experimental effort. As a result of the experimental and statistical analyses the following conclusions were drawn:

- Increasing curing temperature leads to increase in unconfined compression strength and shear strength parameters,
- By considering the ANOVA results and the experimental comparison, it can be seen that shear strength and unconfined strength parameters can be estimated accurately with RSM approach,
- It is possible to estimate the shear strength and unconfined compression strength parameters accurately with response surface methodology which reducing the total number of the tests by 55%,
- In experimental studies, variable c and ϕ values were obtained for a constant curing temperature due to the standard deviation originating from experimental errors. Thus, number of experiments needs to increase to decrease the standard deviation. However, as the Response Surface Method makes statistical analysis by considering wide range of samples, gives more stable results using fewer numbers of tests.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hakan Alper KAMİLOĞLU fikrin oluşması, deney tasarımının yapılması, elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirmesi başlıklarında; Hüseyin TURAN, kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır. Çalışmada yazar olarak yer almayan

Sn. Arş. Gör. Bilal TAYFUR üç eksenli basınç deneyi için Arduino kodlarının temini konusunda çalışmaya yardımcı olmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Aslan N, Cebeci Y. "Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals". *Fuel*, 86(1-2), 90-97, 2007.
- [2] Şahin B, Özgen, S. "Zencefil ve keten tohumu oleoresinlerinin elde edilmesi ve ekstraksiyon koşullarının cevap yüzey yöntemi ile optimizasyonu". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20, 602-613, 2020.
- [3] Demir Z, Baday Ş, Sönmez F. "AISI 1050 çelik malzemenin delinmesinde tepki kuvvetini etkileyen parametrelerin yüzey yanıt yöntemi ile analizi". *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1), 75-85, 2020.
- [4] Bayram O, Köksal E, Göde F. "Yanıt yüzey metodolojisi şartlarında karabaş otu yağının kompleks koaservasyon Yöntemi ile enkapsülasyonu". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 508-515, 2020.
- [5] Box, GEP, Wilson KB. "On the experimental attainment of optimum conditions". *Journal of The Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 13(1), 1-35, 1951.
- [6] Myers, RH., et al. "Response surface methodology: a retrospective and literature survey". *Journal of Quality Technology*, 36(1), 53-77, 2004.
- [7] Alpaslan E. Tarihi Yiğma Köprü Hasarlarının Analitik Model ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2019.
- [8] Gunaraj V, Murugan N. "Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes". *Journal of Materials Processing Technology*, 88,(1-3), 266-275, 1999.
- [9] Koç B, Kaymak-Ertekin F. "Yanıt Yüzey Yöntemi ve gıda işleme uygulamaları". *Gıda*, 35(1), 1-8, 2010.
- [10] Cornell j. *How to Apply Response Surface Methodology*. 2nd ed. Milwaukee, USA, American Society for Quality, 1990.
- [11] Zangeneh N, Azizian A, Lye L, Popescu, R. "Application of response surface methodology in numerical geotechnical analysis". *Proc. 55th Canadian Society for Geotechnical Conference*, Hamilton, Canada, 20-23 October 2002.
- [12] Wong, FS. "Slope reliability response surface method". *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(1), 32-53, 1985.
- [13] Huang ML, Sun DA, Wang CH, Keleta Y. "Reliability analysis of unsaturated soil slope stability using spatial random field-based Bayesian method". *Landslides*, 18, 1177-1189, 2021.
- [14] Wang B, Liu L, Li Y, Jiang Q. "Reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil properties based on efficiently identified representative slip surfaces". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(3), 642-655, 2020.

- [15] Ray R, Kumar D, Samui P, Roy LB, Goh ATC, Zhang W. "Application of soft computing techniques for shallow foundation reliability in geotechnical engineering". *Geoscience Frontiers*, 12(1), 375-383, 2021.
- [16] Malhora M, Sricvastava A, Jawaid S. "Reliability analysis of shallow foundation in the vicinity of the existing buried conduit". *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2), 149-158, 2020.
- [17] Wang H, Chen H, Wang Y, Han L, Li H. "Reliability analysis for stability of the gravity retaining wall under mountain torrent". *Systems Science & Control Engineering*, 8(1), 434-440, 2020.
- [18] Tandjiria V, Teh, CI, Low BK. "Reliability analysis of laterally loaded piles using response surface methods". *Structural Safety*, 22(4), 335-355, 2000.
- [19] Rajeswari JS, Sarkar R. "Reliability analysis of single pile in lateral spreading ground: A three-dimensional investigation". *Geohazards*, 86, 383-398, 2021.
- [20] Lu J, Xu R, Li X. "Application of response surface methodology in organic matter soil stabilization". *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(8), 3633-3646, 2015
- [21] Güllü H., Fedakar Hİ. "Response surface methodology for optimization of stabilizer dosage rates of marginal sand stabilized with sludge ash and fiber based on UCS performances". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1717-1727, 2017.
- [22] Madun A, Meghzili SA, Tajudin SAA, Yusof MF, Zainalabidin MH, Al-Gheethi AA, Md Dan MF, Ismail MAM. "Mathematical solution of the stone column effect on the load bearing capacity and settlement using numerical analysis". *International Seminar on Mathematics and Physics in Sciences and Technology*, Malaysia, 28-29 October 2017.
- [23] Bell FG. "Lime stabilization of clay minerals and soils". *Engineering Geology*, 42(2), 223-237, 1996
- [24] Ghobadi MH, Abdilor Y, Babazadeh R. "Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611-619, 2013.
- [25] Raja PSK, Thyagaraj T. "Effect of short-term sulphate contamination on lime-stabilized expansive soil". *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(8), 964-976, 2021.
- [26] Yılmaz F, Demir E. "Freezing-thawing and wetting-drying behavior of clayey soil stabilized with lime and silica fume". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3), 1724-1732, 2019.
- [27] Wang D, Korkiala-Tanttu L. "1-D compressibility behaviour of cement-lime stabilized soft clays". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(7), 1013-1031, 2020.
- Lei H, Lou J, Li X, Jiang M. "Stabilization effect of anionic polyacrylamide on marine clay treated with lime". *International Journal of Geomechanics*, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001680](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001680)
- [28] National Lime Association. "Lime-treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization and Lime Modification". National Lime Association, USA, 41, 2003
- [29] Kestler MA. "Stabilization Selection Guide For Aggregate-And Native-Surfaced Low-Volume Roads". Department of Agriculture. Forest Service. USA National Technology & Development Program.
- [30] Trial version 12, Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA.
- [31] Wu JTH, Tung SCY. "Determination of model parameters for the hardening soil model". *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(3), 55-68, 2020.
- [32] Szendefy J. "Impact of the soil-stabilization with lime". *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 02-06 September 2013.
- [33] Jasim OH, Çetin D. "Effect of sawdust usage on the shear strength behavior of clayey silt soil". *Sigma*, 34(1), 31-41, 2016.
- [34] Durmaz M. "Killi zeminlerin kireç ile stabilizasyonunun deneysel çalışması ve sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 973-980, 2020.