



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yüksek plastisiteli killerde rezidüel kayma direncinin direkt kesme deneyi sonuçları kullanılarak tayin edilmesi

The estimation of the residual shear strength of high plastic clays based on direct shear test results

Yazar(lar) (Author(s)): Ebru AKIŞ

ORCID: 0000-0001-8417-2405

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Akış E., “yüksek plastisiteli killerde rezidüel kayma direncinin direkt kesme deneyi sonuçları kullanılarak tayin edilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24(1): 39-44, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.616690

Yüksek Plastisiteli Killerde Rezidüel Kayma Direncinin Direkt Kesme Deneyi Sonuçları Kullanılarak Tayin Edilmesi

The Estimation of the Residual Shear Strength of High Plastic Clays Based on Direct Shear Test Results

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Rezidüel kayma dayanımı / Residual shear strength
- ❖ Pik kayma direnci / Peak shear strength
- ❖ Tekrarlı direkt kesme deneyi / Multi reversal direct shear test
- ❖ Rezidüel dayanımın pik dayanıma bağlı tahmini / Prediction of residual strength based on peak shear strength
- ❖ Rezidüel dayanımın pik dayanıma ve zemin indeks parametrelerine bağlı tahmini / Prediction of residual strength based on peak shear strength and soil index properties

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çizelge. 1 ϕ_r 'nin PI, CF ve ϕ_p 'ye Göre Değişimi / Table .1 (The Variation of ϕ_r as a Function of PI, CF ve ϕ_p)

σ_N (kPa)	Tahmin Denklemi, Equations	
100	$\phi_r = -0.0262PI + 0.0201CF + 0.4854\phi_p$	$\phi_r = 0,0433\phi_p^2 - 1.3826 \phi_p + 18.887$
200	$\phi_r = -0.0502PI - 0.0693CF + 0.7130\phi_p$	$\phi_r = 0.0546\phi_p^2 - 1.678 \phi_p + 21.121$
300	$\phi_r = -0.0411PI - 0.0659CF + 0.7305\phi_p$	$\phi_r = 0.075\phi_p^2 - 2.2892 \phi_p + 25.691$

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı yüksek plastisiteli killerin rezidüel kayma direncinin pik kayma dayanımı kullanılarak tayin edilmesidir. / The aim of this study is the estimation of the residual shear strength of high plastic clays based on peak shear strength parameters.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Ülkemizde rezidüel kayma dayanımı ile ilgili olarak yapılan çalışmaların sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve değişkenlere karar verilmiştir. Daha sonra bir optimizasyon programı kullanılarak bu değişkenler ile pik kayma direnci arasındaki ilişkiyi tahmin eden denklemler elde edilmiştir. / The results of the studies in our country's literature were evaluated statistically and the variables were decided. Then, using an optimization program, empirical equations to predict the relationship between these variables and peak shear strength values are obtained.

Özgünlük (Originality)

Ampirik ilişki bulmak için kullanılan deney sonuçları ülkemiz literatüründen alınmıştır. / The data used to find empirical correlation are taken from the results of the studies in our country's literature.

Bulgular (Findings)

Araştırmada ülkemiz literatüründeki çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, kalıcı kayma direnci ile zemin indeks parametreleri ve pik kayma direnci arasında ampirik bağıntılar öngörülmesi ve örselenmiş yüksek plastisiteli kil numuneler üzerinde yapılan tekrarlı direkt kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar ile bağıntılar kullanılarak bulunan değerler karşılaştırılmıştır. / In this study, the empirical correlations between the peak shear strength, index properties and the residual shear strength were obtained by evaluating the results of the studies in our country's literature and then, the residual shear strength parameters obtained from the multi reversal direct shear tests and the ones obtained from the empirical correlations were compared.

Sonuç (Conclusion)

Yüksek plastisiteli killerin rezidüel kayma direncini, pik kayma dayanımı ve zemin indeks özelliklerine bağlı olarak tahmin eden denklemler önerilmiştir. / In this study, the empirical relations that predicts the residual shear strength of high plastic clays based on peak shear strength parameters and soil index parameters are derived.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Yüksek Plastisiteli Killerde Rezidüel Kayma Direncinin Direkt Kesme Deneyi Sonuçları Kullanılarak Tayin Edilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ebru AKIŞ*

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Atılım Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 06.09.2019 ; Kabul/Accepted : 27.01.2020)

ÖZ

Heyelanlar doğal afet sayılarının afet türlerine göre dağılımı dikkate alındığında %45 ile en sık karşılaşılan doğa olaylarıdır. Heyelan çözüm projelerinin yapılabilmesi için heyelan sırasında kayma düzleminde oluşan rezidüel kayma dayanımı parametrelerinin gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilmesi gerekir. Söz konusu parametreler, tekrarlı direkt kesme ve halka kesme deneyleri yapılarak tayin edilebildiği gibi, geri analiz ya da zeminin fiziksel özellikleri yardımıyla literatürdeki korelasyonlar kullanılarak da öngörülebilir. Kayma dayanımı parametreleri geri analiz yöntemi kullanılarak tayin edilirken, yeraltı suyu durumunun rezidüel kayma dayanımı değerlerini direkt olarak etkilediği bilinmektedir. Ayrıca, heyelan sırasındaki yeraltı suyu durumunun gerçeğe yakın olarak öngörülmesinin zorluğu aşıkardır. Öte yandan, literatürden elde edilen rezidüel kayma dayanımı parametreleri oldukça geniş bir aralıkta sonuçlar verebilmektedir. Tüm bunların yanı sıra, halka kesme deneyleri laboratuvarlarda yaygın olarak yapılmamakta, yaygın olarak yapılan tekrarlı direkt kesme deneylerinin ise zemin cinsine bağlı olarak çok düşük hızlarda yapılması gerekebilmektedir. Bu sebeple, deney süresi deneylerin pratikte kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Yukarıda belirtilen kısıtlamaların çerçevesinde bu çalışmada normal konsolide ve yüksek plastisiteli killerde pik ve rezidüel kayma direnci açıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Araştırmanın ilk kısmında ülkemiz literatüründeki çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, kalıcı kayma direnci ile zemin indeks ve pik kayma direnci arasında ampirik bağıntılar öngörülmüştür. Daha sonra, örselenmiş yüksek plastisiteli kil numunelerle tekrarlı direkt kesme deneyleri yapılmış, elde edilen sonuçlar ile önerilen bağıntılar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, rezidüel kayma dayanımı, pik kayma direnci, direkt kesme deneyi.

The Estimation of the Residual Shear Strength of High Plastic Clays Based on Direct Shear Test Results

ABSTRACT

Landslides are the most common incidents with a rate of 45% considering the distribution of natural disaster numbers to disaster types. In order to make remedial measures for the landslides, the residual shear strength parameters formed in the shear plane during the landslide must be estimated as close to the reality as possible. These parameters can be determined by multi-reversal direct shear, ring shear tests, back calculations, correlations in the literature by means of physical properties of the soil. The difficulty of predicting the groundwater conditions during landslide is obvious and it directly affects the residual shear strength values when shear strength parameters are determined using the back analysis method. On the other hand, residual shear strength parameters obtained from the literature can give a wide range. Besides, ring shear tests are not commonly performed in laboratories and depending on the type of soil, multi reversal direct shear tests may need to be performed at very low speeds. Relatively long test time adversely affects the practical use of the multi reversal direct shear tests. In this study, the relationship between peak and residual shear strength in normally consolidated high plastic clays was studied within the framework of the above restrictions. Firstly, the empirical correlation between the residual shear strength and the index properties and peak shear strength was predicted by evaluating the results of the studies in our country's literature. Then, the results obtained from the multi reversal direct shear tests with remoulded high plastic clay samples and the predicted values were compared.

Keywords: Landslide, residual shear strength, peak shear strength, direct shear test.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rezidüel kayma dayanımı parametreleri laboratuvarda tekrarlı direkt kesme ve halka kesme deneyleri yapılarak, literatürdeki korelasyonlar kullanılarak veya geri analizler yapılarak tayin edilebilmektedir. Direkt kesme deney cihazları yaygın olarak kullanılmasına rağmen, tekrarlı direkt kesme deneylerindeki gerek deney tekrar

sayısının fazlalığı gerekse zeminin cinsine bağlı olarak çok düşük olabilen kesme hızları nedeniyle özellikle heyelan önleme projelerinde kullanımı kısıtlıdır. Öte yandan halka kesme deneyinde, kesmede sürekliliğin sağlanabilmesi nedeniyle rezidüel kayma dayanımı güvenilir olarak belirlenebilmekle birlikte [1,2] cihazlar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunların yanı sıra, 31 Ağustos 2018 tarihinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ebru.akis@atilim.edu.tr

“Kazı Güvenliği ve Alınacak Önlemler” konulu genelge ile proje tasarım hesaplarında kullanılacak olan parametrelerin konsolidasyonlu, drenajlı, üç eksenli veya direkt kesme deneylerinden elde edilmesini zorunlu hale getirilmiştir. Drenajlı parametrelerin direkt kesme deneyleri ile tayin edilmesi numune cinsine göre zaman alabilmektedir. Özellikle rezidüel kayma direncinin tekrarlı direkt kesme deneyleri ile tayin edilmesi gereken projelerde deney süreleri çok uzun sürebilmektedir.

Rezidüel kayma dayanımı parametreleri geri analiz yöntemi kullanılarak da tahmin edilebilmektedir. Söz konusu yöntemde, mevcut geometrik koşullar ve yeraltı su durumu modellenecek güvenlik sayısını 1.00 olarak sağlayan kayma direnci parametreleri bulunmaktadır. Ancak bu analizlerde yeraltı suyu seviyesi, şevin güvenlik sayısını doğrudan etkilemektedir. Bununla beraber, şevin göçme anındaki yeraltı suyu durumunun tahmini önemli belirsizlik içermektedir. Bu belirsizliğin heyelan mekanizması modeli ve rezidüel kayma dayanımı parametrelerinin tahmini üzerindeki etkisi oldukça belirgin olabilmektedir.

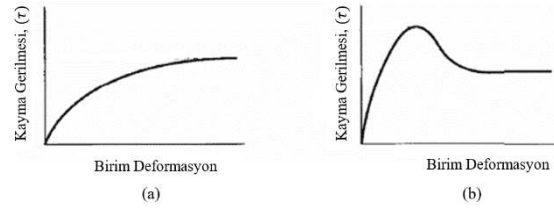
Rezidüel kayma direncinin zeminin plastisite indisi, likit limiti, kil oranı gibi özellikleri yardımıyla literatürde verilen bağıntılar kullanılarak tahmin edilmesi de mümkündür [2-15]. Farklı zeminler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bu ampirik yaklaşımlar sonucu tahmin edilen rezidüel kayma direnci değerleri önemli değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı heyelan problemlerinde deneysel verilerin de kullanılabilmesi için deney süreçlerinin pratikleştirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada normal konsolide ve yüksek plastisiteli killerde pik (ϕ_p) ve rezidüel (ϕ_r) kayma direnci açıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Başka bir deyişle, heyelan projelerinde kullanılacak rezidüel parametrelerin konsolidasyonlu drenajlı direkt kesme deneyi sonuçlarından tayin edilmesi hedeflenmiştir. Bu araştırma sürecinde ülkemiz literatüründeki çalışmaların sonuçları değerlendirilerek kalıcı kayma direnci ile zemin indeksi ve pik kayma direnci arasında ampirik bağıntılar öngörülmüştür. Çalışmanın deneysel kısmında ise, Ankara’da alınan örselenmiş yüksek plastisiteli kil numuneler üzerinde tekrarlı direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve önerilen ampirik bağıntılar sonucu öngörülen değerler karşılaştırılmıştır.

2. KALICI KAYMA DİRENCİ (RESIDUAL SHEAR STRENGTH)

Zeminlerde kesme gerilmesi-birim deformasyon arasındaki bağıntı sünek ve gevrek olmak üzere iki şekilde ifade edilir. Normal konsolide killer sünek olarak değerlendirilebilir. Artan deformasyon ile kayma dayanımı kaybı (deformasyon yumuşaması) zemin daneciklerinin yeniden yönelimi ve zemin dokusunun kırılması ile açıklanır (Şekil 1-a). Aşırı konsolide killer ise gevrek bir gerilme-birim deformasyon eğrisine sahiptir (Şekil 1-b). Eğrilerdeki en yüksek nokta pik dayanımı; çok daha büyük bir kesme deformasyonunda

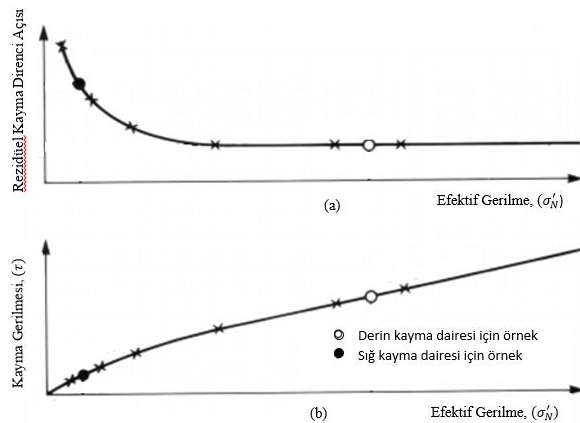
oluşan daha düşük dayanım ise rezidüel (kalıcı) dayanımdır.



Şekil 1. Normal Konsolide (a) ve Aşırı Konsolide (b) Killerde Kayma Gerilmesi – Birim Deformasyon Eğrileri (Shear Strength-Strain Curves for (a) Normally Consolidated (b) Overconsolidated Clays).

Daha önce kayan ve kaymanın tekrarlandığı şevlerde ve dolgularda stabilite analizleri yapılırken rezidüel kayma dayanımı parametreleri kullanılmaktadır. Pik kayma direnci, artan yer değiştirme ile birlikte dane yönelimine bağlı olarak düşmekte ve gerilme rezidüel kayma direnci olarak anılan sabit değere gelmektedir [11]. Bu düşüş, kil yüzdesi (CF) ve plastisite indeksi (PI) yüksek olan zeminlerde çok daha yüksek olmakla beraber, dane yöneliminin bir faktör olmadığı düşük plastisiteli ve çok yüksek plastisiteli killerde sıfıra yakındır [11,16].

Hawkins ve Privett [17] kalıcı kayma direnci değerinin normal gerilme değerlerine doğrudan bağlı olduğunu ve bu nedenle zeminin kalıcı kayma direncinin sabit olmadığını ve arazideki gerilme durumuna göre değiştiğini belirtmektedir. Bu durum aynı zemin içerisinde kayma dairesinin sığ veya derin olmasına göre farklı kalıcı dirençlerin kullanılması gerektiğini işaret etmektedir. Şekil 2’de rezidüel kayma direnci açısının ve kayma gerilmesinin efektif normal gerilmeye göre değişimi gösterilmiştir. Bu nedenle yapılan çalışmada bağıntılar farklı normal gerilme değerleri için oluşturulmuştur.



Şekil 2. Rezidüel Kayma Direnci Açısının ve Kayma Gerilmesinin Efektif Normal Gerilmeye Göre Değişimi (Variation of Residual Friction Coefficient and Shear Stress with Effective Normal Stress) [18]

Zeminlerin likit limit, plastik indeks, aşırı konsolidasyon oranı değerleri ve gerilme durumu kayma direnci

parametrelerini etkileyen faktörlerdir. Aşırı konsolidasyon oranının (OCR) zeminin pik dayanımı etkilediği bilinmektedir. Bunların yanı sıra, Skempton [19] efektif normal gerilme şartlarının aynı olması koşuluyla, aşırı konsolidasyon oranının zeminlerin kalıcı kayma direncine etkisinin olmadığını belirtmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada normal konsolide killerde yapılan deneyler göz önünde bulundurulmuştur.

Killerde kayma gerilmesi-efektif gerilme davranışı incelendiğinde yenilme zarfının eğrisel olduğu görülür (Şekil 2-b). Skempton [11] rezidüel kohezyon değerinin çok düşük olduğunu ve büyük olasılıkla sıfırdan çok farklı olmadığını belirtmiştir. Bu nedenle çalışmada, kil kayma dayanımı her normal gerilme için sekant kayma direnci açısı değeri hesaplanarak elde edilmiştir.

3. KALICI KAYMA DAYANIMININ TAHMİN EDİLMESİ İÇİN ÖNERİLEN AMPİRİK BAĞINTILAR (EMPRICAL CORRELATIONS FOR ESTIMATING RESIDUAL SHEAR STRENGTH)

Bu bölümde ülkemizde rezidüel kayma dayanımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelenerek sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan istatistiksel değerlendirmelerde Hatipoğlu'nun [2] (73 adet numune) ve Ürkmez'in [7] (39 adet numune) yüksek plastisiteli, normal konsolide kil numuneleri üzerinde yaptıkları deneyler için birinci kesme sonucu elde edilen pik ve tekrarlı kesmeler sonucu elde edilen rezidüel kayma direnci değerleri kullanılmıştır. Söz konusu çalışmalarda kullanılan kil numunelerin PI değerleri %23-%95; CF değerleri %5-%60 ve ϕ_p değerleri 15° - 42° arasında değişmektedir. Aşamalı regresyon analizinde (ARA), her bir aşamada değişkenler (yordayıcılar) PI, CF, ϕ_p sırası ile analize dâhil edilmiştir. ARA sonuçları değerlendirildiğinde üç değişkenin de ϕ_r 'yi istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yordadığı görülmüştür. ARA sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin (PI, CF, ϕ_p) bağımlı değişken (ϕ_r) üzerindeki etkisi şöyledir: ϕ_r 'yi PI, %34.5, $F(110,1)=58.003$, $p<0.001$; CF, %4.6 $F(109,1)=35.006$,

küçük olması tüm testlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, gruplar arası varyansın grup içi varyansa oranını gösteren F değeri, bağımsız değişken olarak en yüksek etkiye sahip olan PI değeri için en yüksek değer olarak bulunmuştur. PI ve CF bağımsız değişkenlerinin rezidüel kayma direnci açısı üzerinde etkisi daha önce birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve rezidüel kayma direnci açısını tahmin etmek için ampirik bağıntılar önerilmiştir. Yapılan bu istatistiksel çalışma ile ϕ_p bağımsız değişkeninin rezidüel kayma direnci açısı üzerindeki etkili olduğu görülmektedir (%15.1). Detaylı istatistikler Çizelge 1'de verilmektedir. Bu sonuç ışığında, rezidüel kayma direnci açısı yalnızca ϕ_p ve söz konusu üç değişkene bağlı olarak tayin edilmiştir.

İkinci aşamada bir optimizasyon programı kullanılarak, rezidüel kayma parametreleri; zeminin plastisite indeksi ve kil oranı gibi fiziksel özellikleri ile ilk kesme sonucu elde edilen pik kayma direnci arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı normal gerilmeler altındaki zeminler için Hatipoğlu [2] ve Ürkmez'in [7] yaptıkları deneyler üzerinden elde edilen bağıntılar Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 2. ϕ_r 'nin PI, CF ve ϕ_p 'ye Göre Değişimi ($\phi_r = f(PI, CF, \phi_p)$) (The Variation of ϕ_r as a Function of PI, CF ve ϕ_p)

Normal Gerilme (kPa)	Tahmin Denklemi
100	$\phi_r = -0.0262PI + 0.0201CF + 0.4854\phi_p$
200	$\phi_r = -0.0502PI - 0.0693CF + 0.7130\phi_p$
300	$\phi_r = -0.0411PI - 0.0659CF + 0.7305\phi_p$

İlk kesme sonucunda elde edilen ve pik olarak adlandırılan kayma direnci açısı ile rezidüel kayma direnci açısı arasındaki bağıntıyı bulmak için yukarıda belirtilen çalışmalara [2,7] göre hesaplanan pik ve rezidüel kayma direnci açılarını kullanarak farklı normal

Çizelge 1. İstatistiksel Olarak PI, CF ve ϕ_p Değerlerinin ϕ_r Üzerindeki Etkisi (The Effect of PI, CF and ϕ_p on ϕ_r)

	\bar{X} (Aritmetik ortalama)	S (Standart sapma)	R (Çoklu regresyon katsayısı)	R^2 (Deterni nasyon katsayısı)	F (Gruplar arası varyansın grup içi varyansa oranı)	p (Anlamlılık derecesi)	β (Standartlaştırılmış regresyon katsayısı)	t (t testi)	Sig. (Anlamlılık derecesi)
PI	46.830	16.475	0.588a	0.345	58.003	0.000	-0.334	-4.365	0.000
CF	28.009	11.976	0.625b	0.391	35.006	0.000	-0.170	-2.591	0.011
ϕ_p	24.435	4.972	0.736c	0.542	42.542	0.000	0.459	5.956	0.000

Not: a yordayıcı: (Sabit), PI

b yordayıcı: (Sabit), PI, CF

c yordayıcı: (Sabit), PI, CF, ϕ_p

Bağımlı değişken: ϕ_r

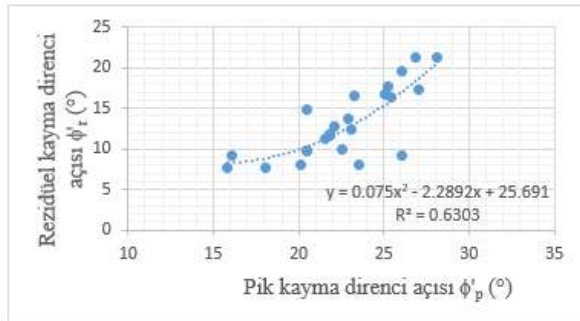
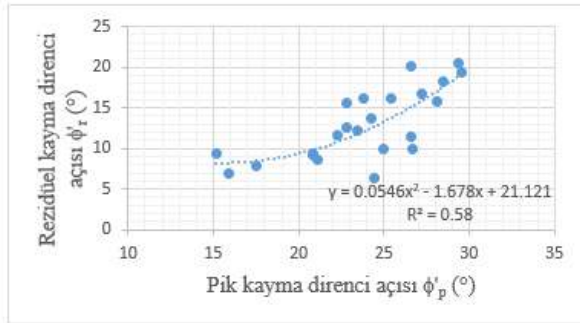
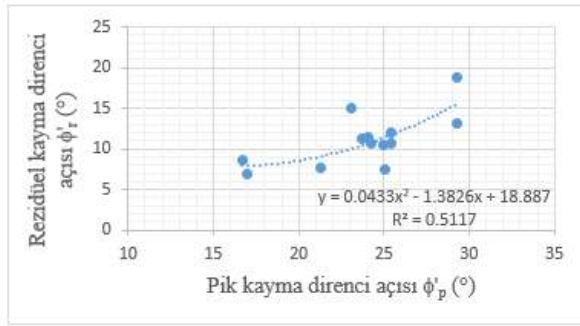
$p<0.001$ ve ϕ_p , %15.1, $F(108,1)=42.542$, $p<0.001$ olarak etkilemektedir. Anlamlılık derecelerinin (p) 0.05'den

gerilmeler için çeşitli bağıntılar bulunmuştur. Hatipoğlu [2] ve Ürkmez [7] tarafından yapılan deney sonuçlarının

grafiksel olarak sunumu Şekil 3’de verilmektedir. Grafiklere ikinci derece polinom olarak eklenen eğim çizgisi ile farklı normal gerilmeler için elde edilen ampirik bağıntılar ise Çizelge 3’de verilmektedir.

Çizelge 3. ϕ_r 'nin ϕ_p 'ye Göre Değişimi ($\phi_r = f(\phi_p)$) (The Variation of ϕ_r as a Function of ϕ_p)

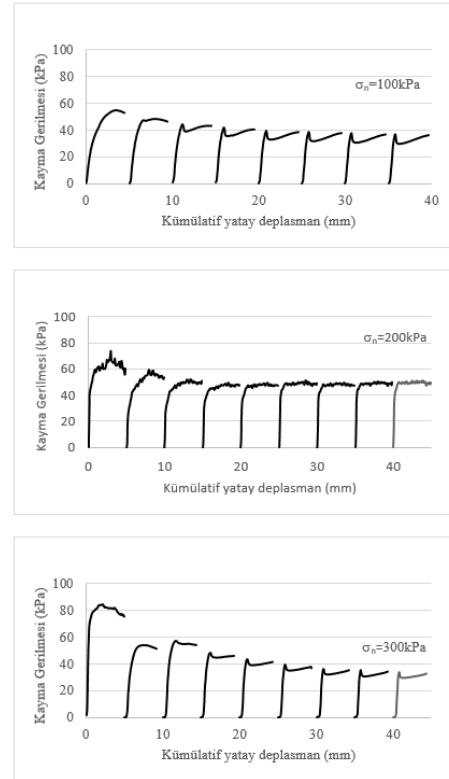
Normal Gerilme (kPa)	Tahmin Denklemi
100	$\phi_r = 0,0433\phi_p^2 - 1.3826\phi_p + 18.887$
200	$\phi_r = 0.0546\phi_p^2 - 1.678\phi_p + 21.121$
00	$\phi_r = 0.075\phi_p^2 - 2.2892\phi_p + 25.691$



Şekil 3. Farklı Normal Gerilmeler Altında Pik-Rezidüel Kayma Direnci Açısı Değişimi (a) $\sigma_N = 100 \text{ kPa}$, (b) $\sigma_N = 200 \text{ kPa}$, (c) $\sigma_N = 300 \text{ kPa}$ (The Variation of Residual Friction Angle with Peak Friction Angle for Different Effective Normal Stress Values)

4. TEKRARLI DİREKT KESME DENEYLERİ (MULTI REVERSAL DIRECT SHEAR TESTS)

Bu çalışma kapsamında, Ankara'dan temin edilen yüksek plastisiteli kil numune üzerinde tekrarlı direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kil numune, Atılım Üniversitesi Kampüsünden alınmış olup birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre (USCS) yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Numunenin kil oranı (CF) %34'dür. Atterberg deneyleri sonucunda likit limit ve plastisite indeksi sırasıyla %61.7 ve %37.4 olarak tayin edilmiştir. Deneylerde kesme hızı 0.035 mm/dk ve geri çekme hızı 0.122 mm/dk olarak uygulanmış olup bir sonraki kesme öncesinde oluşabilecek boşluk suyu basıncının dağılmasına izin vermek için BS1377 [20] (Kısım 7)'de belirtildiği gibi iki kesme arasında 12 saat beklenmiştir. Skempton [11] yaptığı deneyler sonucunda rezidüel dayanıma 1-2 inç (25-51 mm) deplasman sonrasında ulaşılabildiğini belirtmiştir. Bu sebeple direkt kesme deneyinde her kesme 5 mm olmak üzere toplam 8-9 kesme (40 mm-45 mm) yapılarak rezidüel kayma direncine ulaşılmıştır. Deney öncesi numuneler likit limit değerindeki su içeriğinde hazırlanıp en az 36 saat desikatör içinde bekletilmiştir. Tekrarlı direk kesme deneyi öncesi numuneler direkt kesme kutusu içinde her yük kademesinde en az 24 saat olmak üzere konsolide edilmiştir. Yük kademeleri, 12.5kPa'dan başlamak üzere



Şekil 4. Farklı Normal Gerilmeler Altında Yapılan Tekrarlı Direkt Kesme Deney Sonuçları (Multi Reversal Direct Shear Test Results Under Different Normal Stresses)

hedeflenen normal gerilme seviyesine gelinceye kadar gerilmenin iki katı olacak şekilde artırılarak uygulanmıştır. 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilme altında yapılan tekrarlı direkt kesme deneylerinden elde edilen kayma dayanımı-kümülatif yatay deplasman grafikleri Şekil 4’de verilmektedir.

göre 18.8° ile 20.5°; Ataç’a [6] göre 12.9 ile 14.0° arasında; Ürkmez’e [7] göre 13.0° ile 13.6° arasında öngörülmektedir. Numune içindeki kil yüzdesi (CF=%34) verisi kullanıldığında ise Skempton [11] ilişkisine göre 14.2°, Skempton vd.’ne [12] göre 15°, Hatipoğlu’na [2] göre 11.2° olarak hesaplanabilmektedir.

Çizelge 4. Tekrarlı Direkt Kesme Deneyleri Sonucu Elde Edilen ve Bağlıntılar ile Hesaplanan Rezidüel Kayma Direnci Değerlerinin Karşılaştırması (The Comparison of ϕ_r Values Obtained from the Multireversal Direct Shear Tests with the Ones Obtained From Suggested Correlations)

Deney Sırasında Uygulanan Normal Gerilme	Deney Sonucu Elde Edilen Kayma Gerilmesi		Deney Sonucu Elde Edilen Kayma Direnci		Bu Çalışmada Önerilen Ampirik Bağlıntılar ile Hesaplanan Kayma Direnci (Çizelge 2 ve 3)		Bu çalışmada Önerilen Ampirik Bağlıntılar ile Hesaplanan Kayma Direnci Arasındaki Fark	
	σ_N (kPa)	τ_p (kPa)	τ_r (kPa)	ϕ_p (°)	ϕ_r (°)	$\phi_r = f(PI, CF, \phi_p)$ (°)	$\phi_r = f(\phi_p)$ (°)	$\frac{(\phi_{r,deney} - \phi_{r,hesaplanan})}{(\phi_{r,deney})} \times 100$
100	55.0	29.8	28.8	16.6	13.7	15.0	17.5%	9.6%
200	74.0	47.0	20.3	13.2	10.2	9.6	22.7%	27.3%
300	84.4	29.2	15.7	5.6	7.7	8.2	-37.5%	-46.4%

Tekrarlı direkt kesme deneyleri sonucunda elde edilen pik ve rezidüel kaya dayanımı değerleri ile çalışmada elde edilen ve Çizelge 2 ve 3’te verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan rezidüel kayma direnci değerleri ise Çizelge 4’ de verilmektedir.

Ampirik korelasyonlar sonucu elde edilen ϕ_r değerleri ve deney sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 5’de verilmiştir.

5. DENEYLERDE KULLANILAN KİL NUMUNENİN KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN LİTERATÜRDEKİ BAĞINTILAR İLE TAHMİNİ (ESTIMATION OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF CLAY SAMPLE USED IN EXPERIMENTS WITH CORRELATIONS FROM LITERATURE)

Bu bölümde deneylerde kullanılan zemin numunesinin pik ve rezidüel kayma dayanımı parametreleri literatürdeki ampirik bağıntılar ile tayin edilmeye çalışılmıştır. Zemin numunesinin fiziksel özellikleri kullanılarak, pik kayma direnci açısı Sorensen ve Okkels’e [21] göre 21.7°, Ameratunga vd.’ne [22] göre 27.3°, Bjerrium ve Simons’a [23] göre 25° ile 29.5° arasında tahmin edilmiştir.

Zeminin rezidüel kayma direnci açısı ise likit limit, plastisite indeksi ve kil yüzdesi gibi parametrelere bağlı olarak literatürde verilen bağıntılar yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Araştırmada kullanılan kil numunesinin plastisite indeksi (PI=%37.4) için rezidüel kayma direnci açısı Olsen vd.’ne [24] göre 8°; Lambe [13] tarafından önerilen bağıntıya göre $\sigma_n=100$ kPa için 10.5°, $\sigma_n=200$ kPa için 12.5°; Filz vd.’ne [14] göre ise 12.9°-16.5°; İyisan vd.’ne [4,8] göre 16.3°, 15° ve Hatipoğlu’na [2] göre 13.4° olarak tahmin edilebilmektedir. Numunenin likit limit değeri (LL=%61.7) kullanılarak rezidüel kayma direnci açısı Stark ve Eid’e [10] göre $\sigma_n=100$ kPa ve CF=34% için 18.6°; Mesri ve Cape-Diaz’a [15] göre 15.0°; Bayın’a [9]

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND RESULTS)

Bu çalışmada öncelikle ülkemiz literatüründen çalışmalar incelenerek rezidüel kayma dayanımı ile pik kayma dayanımı ve zemin fiziksel özellikleri arasında ampirik bağıntılar bulunmuştur. Daha sonra Ankara’dan alınan kil numuneler üzerinde tekrarlı direkt kesme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar hem önerilen tahmin denklemlerinden elde edilen kayma dayanımlarıyla hem de literatürdeki bağıntılar ile elde edilen kayma dayanımı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde kilin pik direnci açısının, 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilme altında sırasıyla 28.8°, 20.3° ve 15.7° olarak bulunmuştur. Bu değerler literatürden zeminin fiziksel özelliklerine göre ampirik bağıntılar ile elde edilen değerler ile uyumludur.

Deneylerde kullanılan kil numunelerinin rezidüel kayma direnci açısı, tekrarlı direkt kesme deneyleri sonucunda 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilme altında sırasıyla 16.6°, 13.2° ve 5.6° olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar kalıcı kayma direnci değerinin normal gerilme değerlerine doğrudan bağlı olduğunu doğrulamaktadır. Çizelge 5’te literatürde verilen ampirik bağıntılar kullanılarak elde edilen rezidüel kayma direnci açısı değerleri karşılaştırılmıştır. Söz konusu değerler incelendiğinde, gerilme durumunu dikkate alan bağıntıların deney sonuçlarına %-12.1, %5.3 ve %36.7 oranlarında yaklaştığı görülmektedir. Normal gerilme durumunu dikkate almayan bağıntılar ise deney sonucunu %-266.1 ila %130.4 yakınlığında tahmin

edebilmektedir. Bu bağıntılar içinde %0.6 fark ile sonuç tahmini yapıldığı da görülmektedir.

Bu çalışmada Hatipoğlu[2] ve Ürkmez[7]'in PI, CF ve ϕ_p değerleri sırasıyla, %23-%95; %5-%60 ve 15°-42° arasında değişen kil numuneler üzerinde yaptıkları deney sonuçları kullanılarak, farklı gerilme durumları için Çizelge 2 ile Çizelge 3'de verilen tahmin denklemleri elde edilmiştir. Bu çalışma ile yapılan ϕ_r tahminleri, drenajlı pik kayma direnci açısından bağlı olarak %9.6, %27.3 ve %-46.4; pik kayma açısı ile zeminin CF ve PI değerlerine bağlı olarak ise %17.5, %22.7 ve %-37.5 fark ile yapılabilmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki değerlerle karşılaştırıldığında, önerilen ampirik bağıntıların oldukça gerçekçi sonuçlar verdiği söylenebilir. Elde edilen ampirik bağıntılar kullanılarak, heyelan bölgesinden alınacak yoğunlaşmış numuneler üzerinde makul sürede tamamlanabilen drenajlı direkt kesme deneyi sonuçları ve zeminin fiziksel özellikleri yardımıyla rezidüel kayma dayanım parametrelerinin gerçeğe yakın tahmin edileceği düşünülmektedir. Sonraki çalışmalarda, deney hızının da bir parametre olarak incelenmesi ve rezidüel kayma dayanımına olası etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bishop A.W., Green G. E., Garga V.K., Andresen A., Brown J.D., "A New Ring Shear Apparatus and Its Application to the Measurement of Residual Strength", *Geotechnique* 21, No. 4: 273-328, (1971)
- [2] Hatipoğlu M., "Kalıcı Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleri ile Belirlenmesi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2012).
- [3] Yılmaz E., "Zeminlerin Endeks Özelliklerinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2006).
- [4] İyisan R., Çevikbilen G., Koltuk S., Yılmaz E., "Sıkıştırılmış Zeminlerde Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Eylül 7-8, (2006).
- [5] Koltuk S., "Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2005).
- [6] Ataç A.E., "Plastisitenin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2009).
- [7] Ürkmez A.R., "Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Yöntemi ile Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2009).
- [8] İyisan R., Çevikbilen G., Hatipoğlu M., Ürkmez A.R., Ataç A.E., "Yüksek Plastisiteli Killerin Kalıcı Kayma Direnci" 3. *Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana, (2009).
- [9] Bayın A., "Plastisitenin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2011).
- [10] Stark T. D., and Eid H. T., "Drained Residual Strength of Cohesive Soils". *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5):856-871, (1994).
- [11] Skempton A.W., "Long-term Stability of Clay Slopes", *Geotechnique*, 14(2): 75-101, (1964).
- [12] Skempton A. W., Leadbeater A. D., & Chandler, R. J., "The Mam Tor Landslide, North Derbyshire". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 329(1607): 503- 547, (1989).
- [13] Saleh A. A. & Wright S. G., "Shear Strength Correlations and Remedial Measure Guidelines for Long-Term Stability of Slopes Constructed of Highly Plastic Clay Soils" (No. *FHWA/TX-98/1435-2F*), (1997).
- [14] Abramson L. W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M., "Slope Stability and Stabilization Methods". John Wiley & Sons, Second Edition, San Francisco, (2002).
- [15] Mesri G. and Cepeda-Diaz A. F., "Residual Shear Strength of Clays and Shales". *Geotechnique*, 36(2): 269-274, (1986).
- [16] Mesri G. and Shahien M., A., "Residual Shear Strength Mobilized in First-Time Slope Failures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1): 12-31, (2003).
- [17] Hawkins A.B. and Privett K.D., "Measurement and Use of Residual Shear Strength of Cohesive Soils", *Ground Engineering*, 18(8): 22-28, (1985).
- [18] Lupini J. F., Skinner A. E., Vaughan P. R. "The Drained Residual Strength of Cohesive Soils." *Geotechnique*, London, England, 31(2): 181-213, (1981).
- [19] Skempton A. W., "Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and The Laboratory." *Geotechnique*, 35(1): 3-18, (1985).
- [20] *BS 1377-7:1990* "Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, Shear Strength Tests (total stress)".
- [21] Sorensen K.K. and Okkels N., "Correlation Between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays", *Proceedings of The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, Presses des Ponts, 1: 423-428, (2013).
- [22] Ameratunga J., Sivakugan N., Das B.M., "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Springer, India (2016).
- [23] Bjerrum L. and Simons N.E., "Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays", *Proc. ASCE Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soil*, Boulder, 711-726, (1960).
- [24] Bowles J. E., "Foundation Analysis and Design". McGraw-Hill Book Company, New York, (1988).