

Şev Stabilite Analizlerinde Malzeme Özelliklerinin Geri Analizi

Back Analysis of Material Properties in Slope Stability Analyses

Melih İPHAR^{1*}

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, Eskişehir

*Sorumlu yazar: miphar@ogu.edu.tr

Özet

Şev stabilite analizlerinde kullanılan malzeme parametrelerinin belirlenmesi, jeoteknik mühendisliği uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir. Ancak; sahadan elde edilen verilerin sınırlı olması ve laboratuvar sonuçlarının gerçek saha koşullarını tam olarak yansıtmaması nedeniyle, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde geri analiz yöntemleri tercih edilmektedir. Bir açık işletmenin şevlerinde ya da bir pasa döküm sahasında yaşanmış olan duraysızlıklar dikkate alınarak, şevin açıldığı jeolojik birimin veya pasa yığınının kohezyonu ve içsel sürtünme açısı gibi malzeme dayanım parametreleri sayısal yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntemle belirlenmiş olan malzeme özellikleri, incelenen sahada ileriye dönük açılması planlanan şevlerin stabilite analizlerinde güvenli bir şekilde kullanılabilir. Bu çalışmada, örnek bir saha verisi kullanılarak şev stabilite analizlerinde geri analiz yöntemi kullanılarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan stabilite analizleri sonucunda geri analiz yöntemiyle elde edilen parametrelerin, daha güvenilir ve gerçekçi olacağı vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Geri analiz, limit denge yöntemi, malzeme parametreleri, sayısal modelleme, şev stabilitesi.*

Abstract

The determination of material parameters used in slope stability analyses is critical in geotechnical engineering applications. However, due to the limited data obtained from the field and the inability of laboratory results to fully reflect real site conditions, back-analysis methods are preferred for determining material properties. By considering the instabilities that have occurred in the slopes of an open pit or a waste dump site, the cohesion and internal friction angle of the geological unit where the slope is excavated or the waste pile can be determined using numerical methods. The material properties identified through this method can be safely used in stability analyses of slopes planned for future excavation in the studied site. This study aims to determine material properties using the back-analysis method in slope stability analyses, utilizing sample field data. It has been emphasized that the parameters obtained through the back-analysis method will be more reliable and realistic as a result of the stability analyses conducted.

Keywords: *Back analysis, limit equilibrium method, material parameters, numerical modeling, slope stability*

1. Giriş

Mühendislik jeolojisi ve geoteknik mühendisliği disiplinlerinde, şev stabilitesinin sağlanması gerek açık ocak madenciliğinde oluşturulan şevlerde ve pasa döküm sahalarında gerekse karayolu, demiryolu ve baraj gibi büyük inşaat projelerinde kritik rol oynamaktadır (Tang ve ark., 2012). Şev stabilite analizleri, genellikle zemin ve kaya ortamlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile başlar. Ancak, saha koşullarının heterojen yapısı nedeniyle laboratuvar ortamında elde edilen parametrelerin saha koşullarını temsil etmesi her zaman

mümkün olmayabilir. Bu belirsizlikleri gidermek ve daha güvenilir analiz sonuçlarına ulaşabilmek için geri analiz (*Back Analysis*) yöntemleri geliştirilmiştir.

Duraysızlık problemi yaşanmış bir şevde, şev malzemesinin kayma anındaki dayanımının belirlenmesinde kullanılan güvenilir bir yaklaşım limit denge geri analizi yöntemi olarak adlandırılmaktadır (Topal ve Akin, 2009). Bu yöntem, kaymış olan bir şevin ya da istenilen emniyet katsayısını sağlayacak bir şevin açıldığı malzemenin dayanım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle kayma meydana gelmiş şevlerde, bu yöntemle malzeme özellikleri geriye dönük olarak hesaplanabilir ve gelecekteki tasarımlar için daha gerçekçi parametreler elde edilebilir.

Geri analiz yöntemlerinde temel amaç, bilinen geometri ve kayma olayına dayanarak şev stabilite analizlerinde kullanılan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve birim hacim ağırlığı (γ) gibi parametrelerin geriye dönük olarak hesaplanmasıdır. Şevlerde yapılan geri analizlerde elde edilen kayma dayanımı parametreleri, şev stabilitesini iyileştirme önlemlerinin tasarımı sürecinde laboratuvar ya da yerinde testlerle elde edilen parametrelere göre daha tutarlı kabul edilmektedir (Popescu ve Schaefer, 2008).

Geri analiz yöntemi, özellikle maden mühendisliği uygulamalarında gelişmiş ve zamanla baraj dolgu şevleri, karayolu ve demiryolu şevlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Hoek ve Bray (1981, 1999) ve Duncan (2014) tarafından yapılan çalışmalar, geri analiz yöntemiyle elde edilen malzeme parametrelerinin, sahada gözlemlenen şev davranışlarını görece daha iyi temsil ettiğini göstermiştir.

Özellikle sayısal modelleme tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, şev stabilitesi analizlerinde geri analiz yöntemlerinin giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Griffiths ve Marquez (2007), sonlu elemanlar yöntemine dayalı stokastik geri analiz tekniklerini kullanarak, farklı zemin parametrelerinin olası varyasyonlarının şev stabilitesi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Bu yaklaşım, özellikle sınırlı veriyle çalışılan durumlarda oldukça yararlıdır.

Nassirzadeh ve ark. (2024); Azerbaycan'da bulunan Anjerd ve Daraloo bakır madeninde yapmış oldukları çalışmada, şevlerin ve pasa döküm sahalarının geri analizlerini yaparak belirledikleri malzeme özelliklerini kullanarak duraysızlık problemi yaşanmış şevleri yeniden dizayn etmişler ve aynı jeoteknik koşullarda açılan şevlerin tasarımını yapmışlardır. Söz konusu çalışma, özellikle pasa döküm sahaları gibi heterojen zeminlerde geri analiz yönteminin önemini vurgulamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, geri analiz yönteminin sadece geçmişte yaşanan kaymaların değerlendirilmesinde değil, aynı zamanda yeni tasarımların doğrulanmasında da kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, kayma oluşmuş bir şev örneği üzerinden geri analiz yöntemiyle malzeme parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametrelerin girdi olarak kullanıldığı sayısal modeller yardımıyla istenilen emniyet katsayısını sağlayacak ve güvenli bir şekilde duraylı kalabilecek şev geometrileri belirlenmiştir.

2. Yöntem

Zemin ya da sık eklemli kayada açılan şevlerde beklenen kayma tipi, kaşık şeklindeki yüzey boyunca oluşan dairesel kayma türü yenilmedir. Bu tip yenilmelerde kritik parametreler:

- Şev aynasının yüksekliği,
- Şev açısı,

- Basamak genişliği,
- Yenilme yüzeyi boyunca malzemenin makaslama dayanımı,
- Şevdeki yeraltı suyunun dağılımı,
- Potansiyel yüzey yükleri ya da deprem yükleri,

olarak sıralanmaktadır. Analiz yöntemi olarak, şev emniyet katsayısının parametrik çalışmalarında kullanılan kritik kayma yüzeyini otomatik olarak araştırma özelliğine sahip iki boyutlu sınır denge yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında yararlanılan Slide2 yazılımı, kaya ya da zeminde açılan şevlerde dairesel ya da dairesel olmayan yenilme yüzeylerinde kayma olasılığının bulunup bulunmadığının belirlenmesinde ya da sınır denge yöntemlerini kullanarak şev emniyet katsayısının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bir bilgisayar programıdır (Slide2, 2025a,b).

Slide2 yazılımında şev emniyet katsayısı hesaplanırken, dairesel kayma türü yenilme için geliştirilmiş olan düşey dilimler yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler; sınır denge yöntemleri ile kaymanın belirli bir yüzeyde olduğu kabulüne dayanıp, kayan kütleyi dilimlere bölerek her bir kütlenin dengesinin ve bu dilimlerin kayan kütlenin bütününe olan etkisinin incelenmesi esasına dayanmaktadır. Slide2 yazılımında kullanılabilen düşey dilimler yöntemleri şunlardır:

1. Basitleştirilmiş Bishop (*Bishop Simplified*),
2. Corps of Engineers #1,
3. Corps of Engineers #2,
4. GLE / Morgenstern-Price,
5. Basitleştirilmiş Janbu (*Janbu Simplified*),
6. Geliştirilmiş Janbu (*Janbu Corrected*),
7. Lowe-Karafiath,
8. Ordinary / Fellenius,
9. Spencer,
10. Sarma.

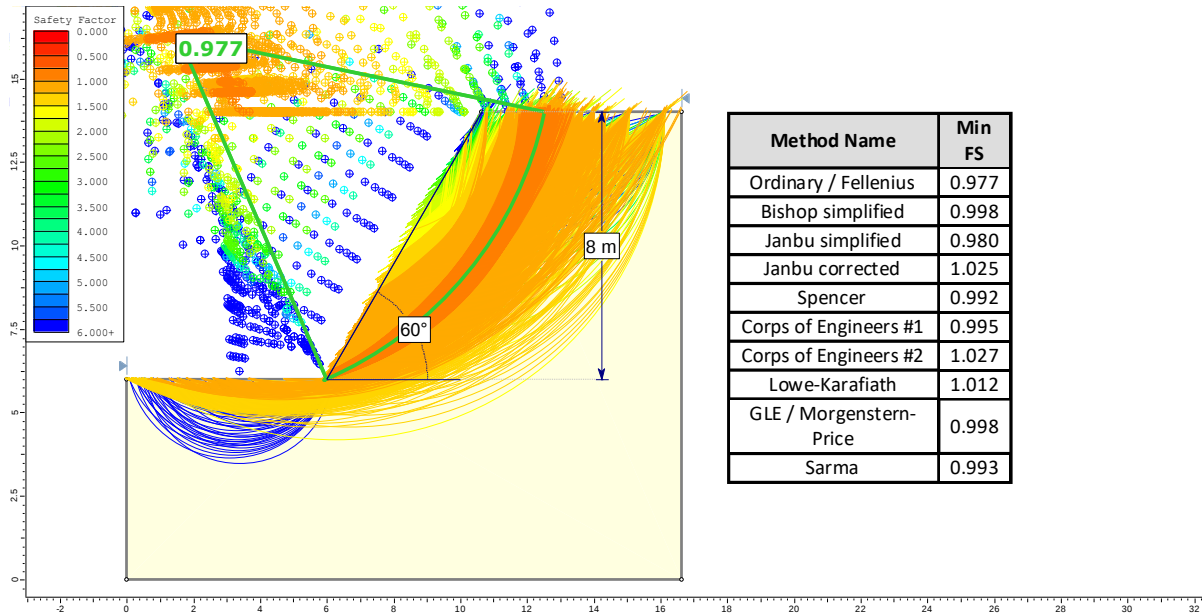
Yukarıda sıralanan yöntemlerin dayandığı kabuller ve denge koşullarının sağlanmasındaki farklılıklar, aynı şev için yapılan analizlerde şev emniyet katsayısının (F) farklı hesaplanmasına yol açabilmektedir. Bu durumda; en düşük emniyet katsayısını hesaplayan yöntemin esas alınması, F'ye göre yapılacak olan değerlendirmelerde güvenli tarafta kalınmasını sağlayacaktır. Çalışmada, örnek bir açık ocak şevinde geçmişte meydana gelmiş bir kayma olayı temel alınmıştır. Birim hacim ağırlığı $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ olan jeolojik birim içerisinde açılmış olan şevin geometrik özellikleri şöyledir:

- Şev yüksekliği, $H=8 \text{ m}$
- Şev eğimi, $\alpha= 60^\circ$
- Basamak genişliği, $B=6 \text{ m}$

Yukarıda verilen şev geometrisi dikkate alınarak Slide2 yazılımında (Slide2, 2025a) oluşturulmuş şev modeli için en düşük şev emniyet katsayısının hesaplandığı yöntem “*Ordinary/Fellenius*” yöntemi olmuştur. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında yapılmış olan şev stabilite analizlerinin tamamında en düşük emniyet katsayısının hesaplandığı Ordinary/Fellenius yönteminin sonuçları dikkate alınmıştır.

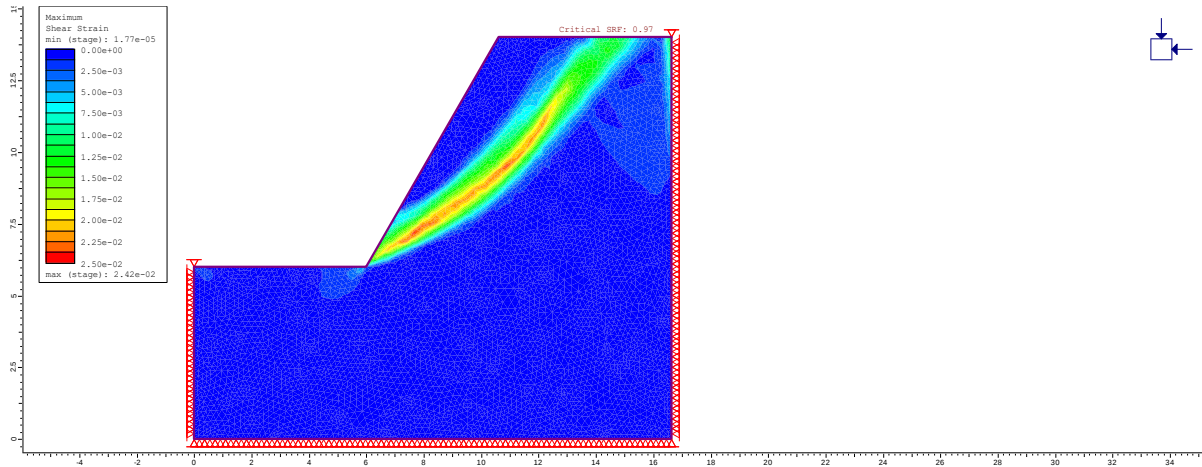
3. Uygulama Çalışması

İlk aşamada, $H=8 \text{ m}$ yüksekliğindeki ve 60° açıdaki şevin emniyet katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan stabilite analizi sonucunda şev emniyet katsayısının $F=0.977$ olduğu belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. $H=8\text{ m}$, $\alpha=60^\circ$ açındaki şevin stabilite analizi

Şev stabilite analizlerinde sınır denge yöntemlerini kullanan yazılımlarla birlikte sonlu elemanlar yöntemini (*Finite Element Method*) kullanan yazılımlarla da şev stabilite analizleri yapılmalıdır. Şekil 1’de görülen şev modeli için, RocScience firmasının RS2 yazılımı kullanılarak analiz yapılmıştır (RS2, 2024). Yapılan analizden, gerilme azaltma faktörünün (*Strength Reduction Factor*) $SRF=0.97$ olduğu belirlenmiştir.

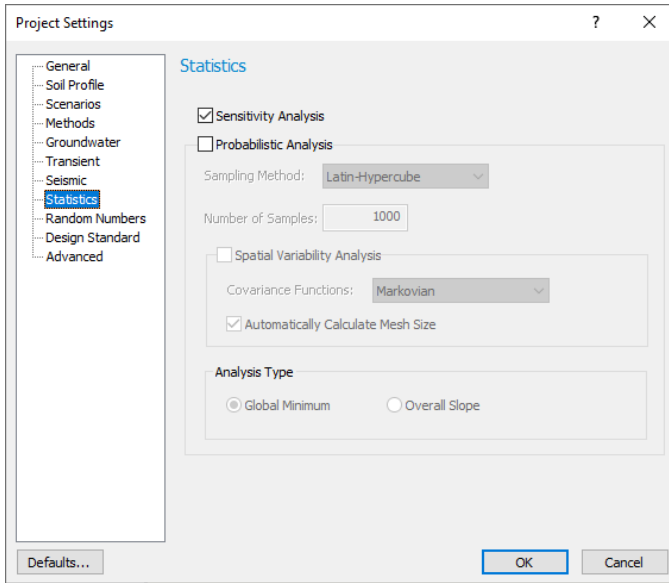


Şekil 2. RS2 yazılımıyla yapılan analiz sonucu

RS2 yazılımıyla yapılan analiz sonucunda elde edilen $SRF=0.97$ değeri ile Şekil 1’de verilmiş olan şev için hesaplanmış olan şev emniyet katsayısının ($F=0.977$) birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucunda, şevde meydana gelen gerilme değerleri ile birlikte beklenebilecek yer değiştirme miktarları hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, sınır denge yöntemiyle yapılan analizlerin sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazılımlarla da gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

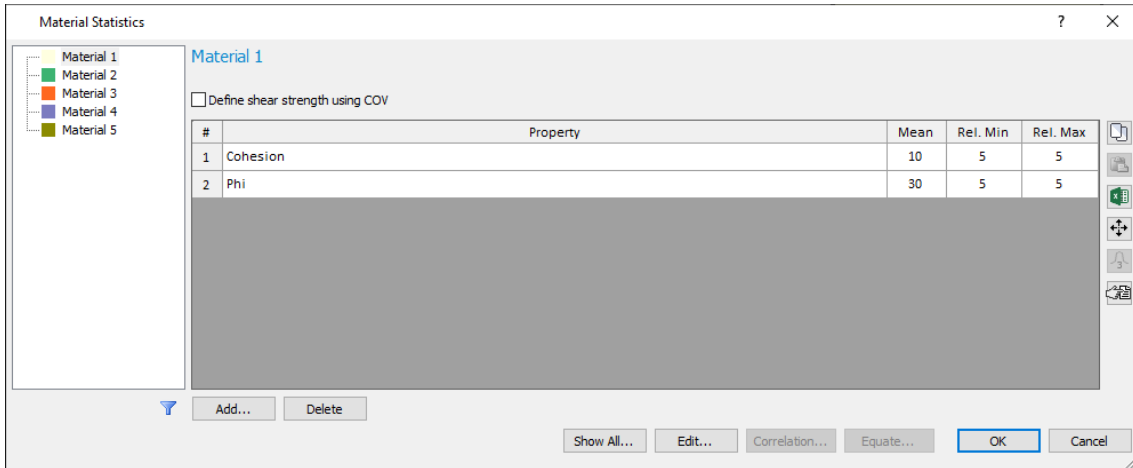
Şev stabilite analizi için geliştirilmiş olan yazılımlarda, duyarlılık analizi ve olasılık analizi yapılabilmektedir. Böylece, şevin açıldığı malzeme özelliklerinin geri analiz yöntemiyle hesaplanabilmesi ve dayanım parametreleri arasındaki istatistiksel ilişkinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Slide2 yazılımında, proje ayarlarındaki Statistics

menüsünde yer alan duyarlılık analizi (*Sensitivity Analysis*) seçeneği aktif hale getirilmiştir (Şekil 3).



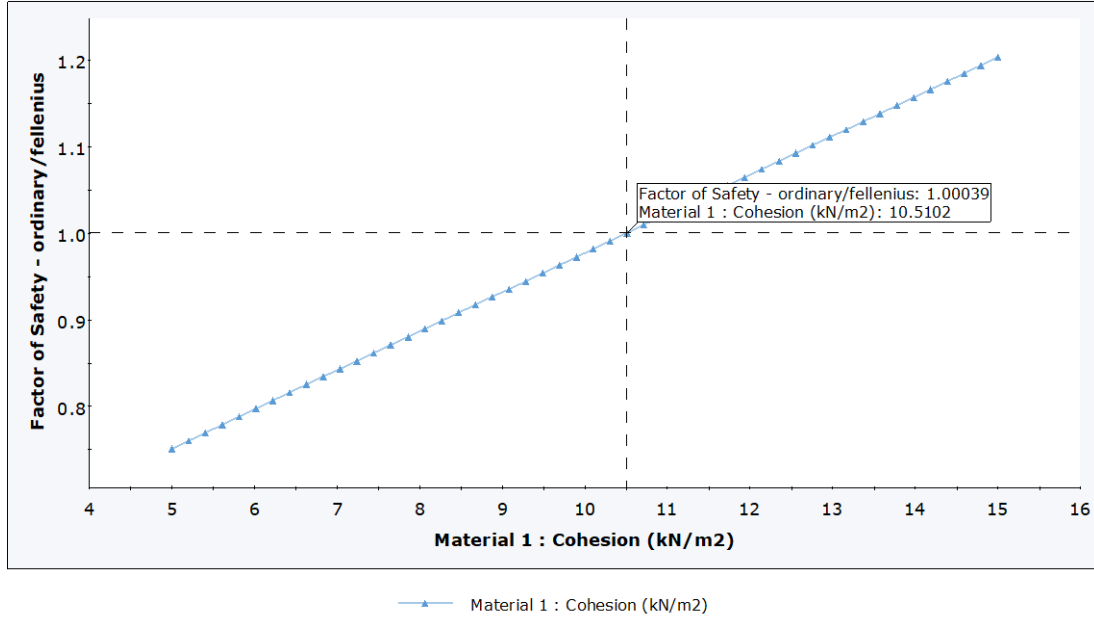
Şekil 3. Geri analiz yapılabilmesi için gereken proje ayarları

Geri analiz yöntemiyle belirlenecek olan malzeme özellikleri kohezyon ve içsel sürtünme açısı olarak eklendikten sonra Şekil 4'te görüldüğü gibi bu özelliklerin ortalama değeri ile ortalamanın altındaki ve üstündeki sınır değerler belirlenmelidir. Bu çalışmada, kohezyon için ortalama değer 10 kPa, ortalamanın altı ve üstü için ise 5 kPa olarak tanımlanmıştır. Bir başka ifadeyle, kohezyonun değişim aralığının 5-15 kPa olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, içsel sürtünme açısı için ortalama değer 30°, ortalamanın altı ve üstü için ise 5° olarak tanımlanmıştır (Şekil 4).

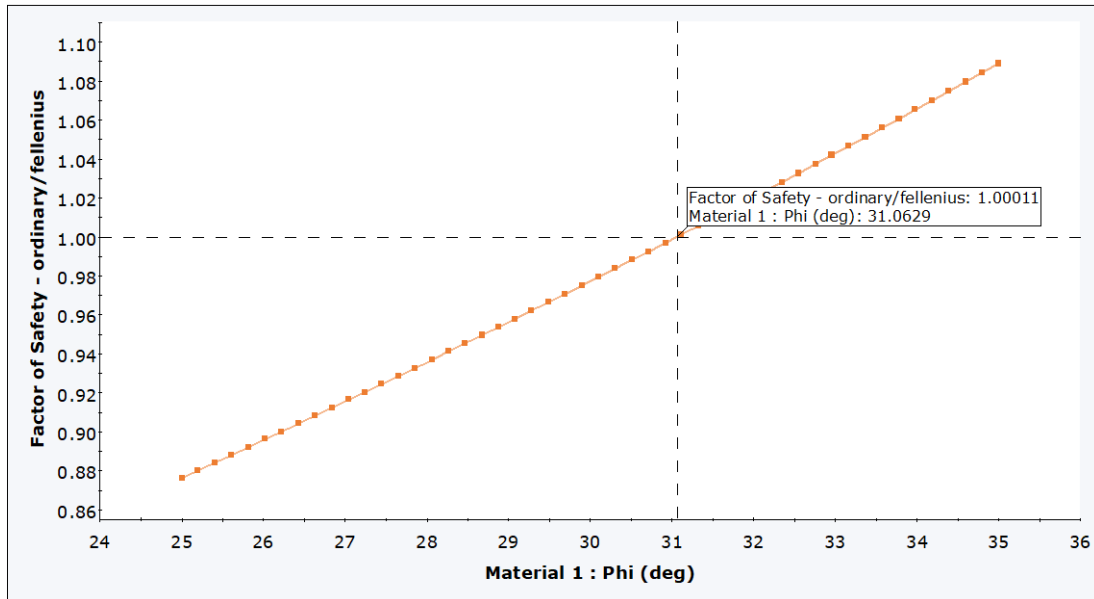


Şekil 4. Malzeme özelliklerinin eklenmesi ve değişim aralıklarının tanımlanması

Bir dizi c ve ϕ parametrelerini ($c=10 \text{ kPa} \pm 5$, $\phi=30^\circ \pm 5$) kullanarak yapılan geri analizde, $F=1$ değerini veren c değerinin 10.51 kPa olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Aynı geri analizde, $F=1$ değerini veren içsel sürtünme açısının da $\phi = 31^\circ$ olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).

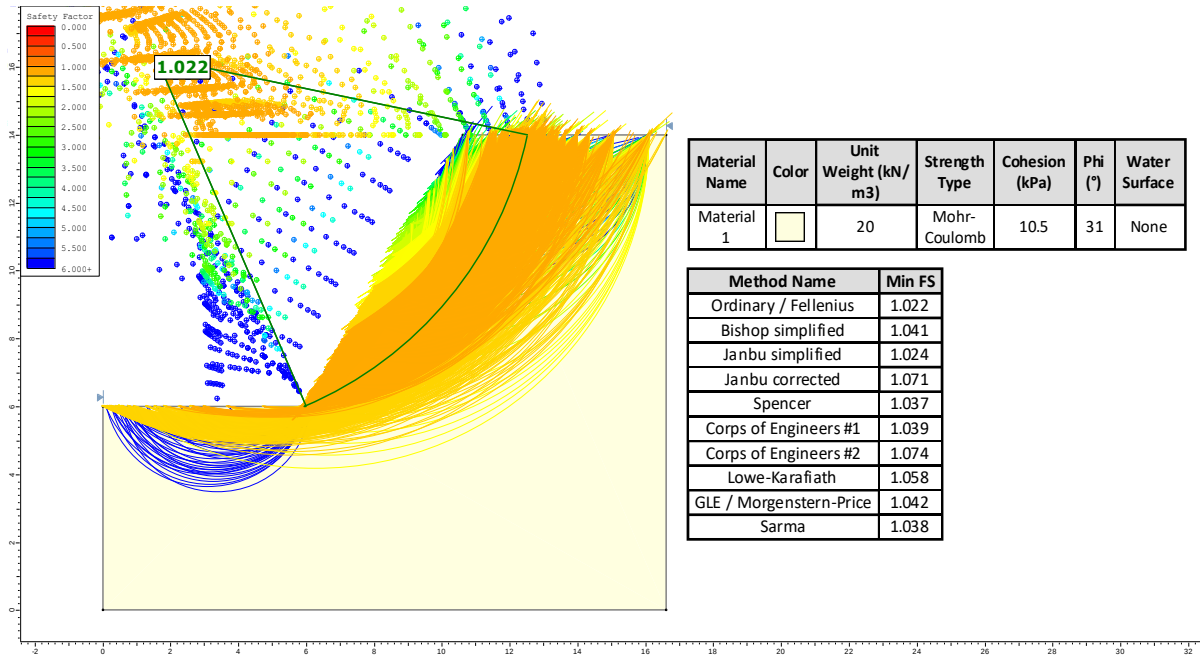


Şekil 5. Geri analizden elde edilen c - F ilişkisi



Şekil 6. Geri analizden elde edilen ϕ - F ilişkisi

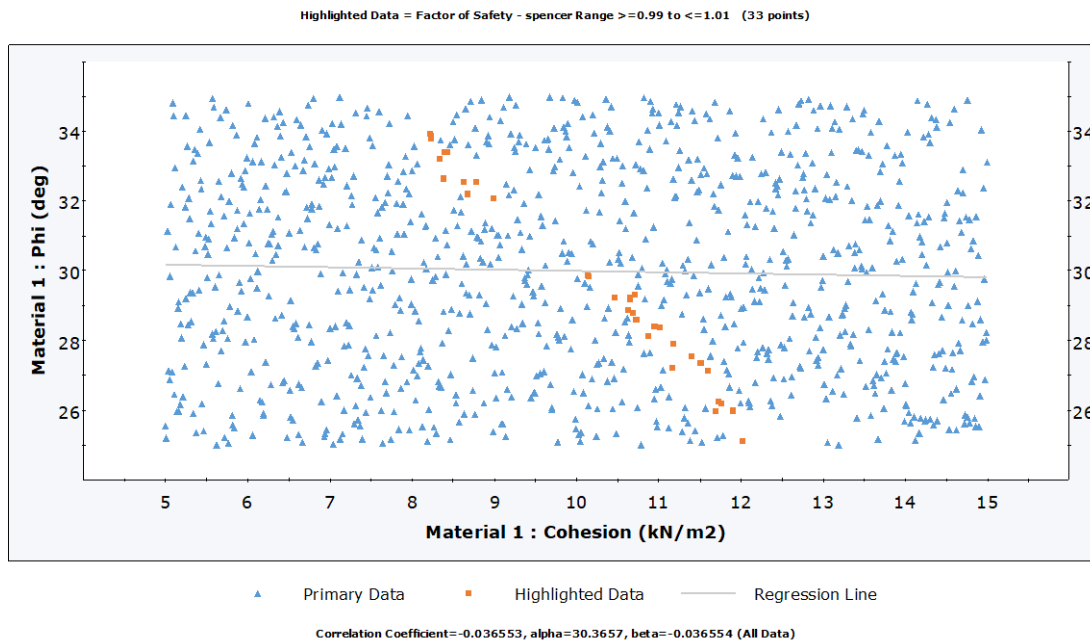
Kontrol sağlamak amacıyla, şevin açıldığı malzeme özellikleri $c=10.5$ kPa ve $\phi=31^\circ$ olarak tanımlandıktan sonra 8 m yüksekliğindeki ve 60° açındaki şev için stabilite analizi yapılmıştır. Şekil 7'den görüldüğü gibi, söz konusu şevin emniyet katsayısı $F=1.022$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, kayma sınırındaki bir şev için belirlenmiş olan malzeme parametrelerinin geçerli olduğunu ve şevin açıldığı jeolojik birime ait dayanım parametrelerinin $c=10.5$ kPa ve $\phi=31^\circ$ olarak güvenli bir şekilde seçilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Geri analizde belirlenen dayanım parametrelerinin kontrolü

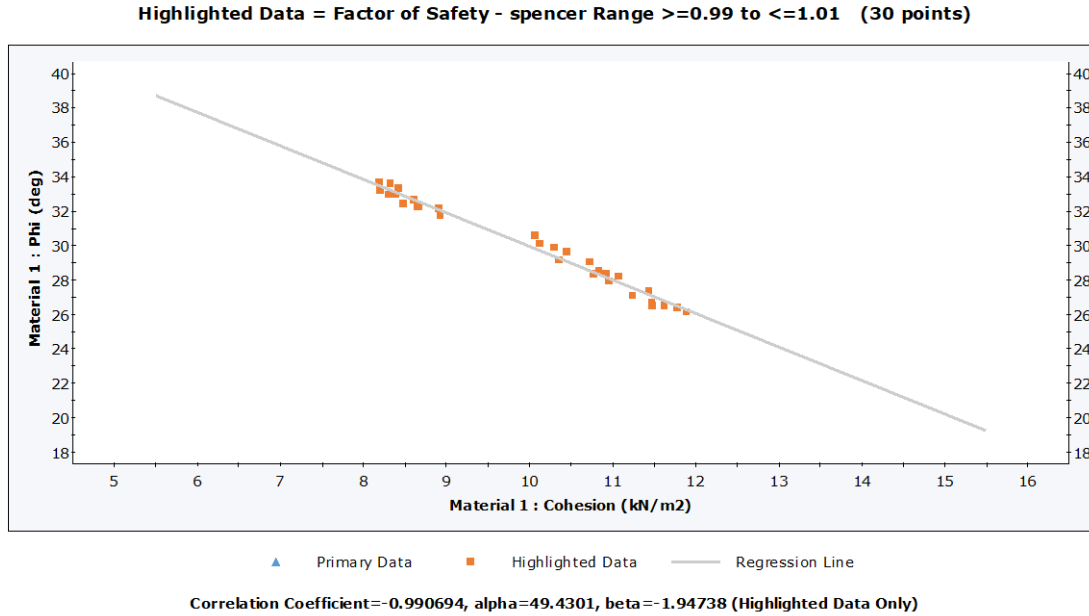
İncelenen şev modeli için, proje ayarlarından “Olasılık Analizi (*Probability Analysis*)” aktif hale getirilerek şev stabilite analizi tekrarlanmalıdır. Böylece, şevin açıldığı ve yenilmenin olduğu jeolojik birim için geçerli olacak kohezyon-işsel sürtünme açısı arasındaki istatistiksel ilişki belirlenir.

Şekil 8’de görülen veriler, şevin açıldığı jeolojik birime ait malzeme özelliklerin için belirtilen aralıklarda (yani kohezyon 5 ile 15 kPa arasında ve işsel sürtünme açısı 25° ile 35° arasında) düzgün bir şekilde üretilmiştir. Turuncu renkle gösterilmiş olan veriler ise şev emniyet katsayısının 0.99 ile 1.01 arasında olduğu verileri işaret etmektedir.



Şekil 8. Tüm F değerleri için c - ϕ ilişkisi

Bilindiği gibi, limit denge yöntemlerine göre hesaplanmış olan şev emniyet katsayısının $F=1$ olması denge sınırını ifade eder. F değeri 1'in altına düştüğünde, ilgili şevin kuramsal olarak duraylı kalması mümkün değildir. Dolayısıyla; kayma olayı yaşanmış olan bir şevde emniyet katsayısının $F=1$ 'in hemen altında olduğu düşünülürse, geri analiz yöntemiyle belirlenecek olan malzeme özellikleri arasındaki ilişkinin yaklaşık $F=1$ olarak belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, $F=0.99$ ile $F=1.01$ emniyet katsayısını veren kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkinin elde edilmesi, malzeme özelliklerinin daha güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında incelenen şev için $F=0.99-1.01$ değerini verecek malzeme özellikleri arasındaki ilişki Şekil 9'da verildiği gibidir.



Şekil 9. $F=0.99 - 1.01$ aralığındaki emniyet katsayısı değerleri için $c-\phi$ ilişkisi

Şekil 9'da görülen grafik; incelenen şev modeli için yaklaşık $F=1$ emniyet katsayısını veren, kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermektedir. Doğrusal ilişkiye ait istatistiksel bilgiler grafiğin altbilgisinde bulunur. Buna göre; incelenen model için, kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasındaki doğrusal ilişkinin korelasyon katsayısı -0.990694, alfa katsayısı (regresyon eşitliğindeki sabit) 49.4301 ve bağımsız değişken çarpanı -1.94738 olarak belirlenmiştir. Buna göre, içsel sürtünme açısının tahmin edilmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılabilir:

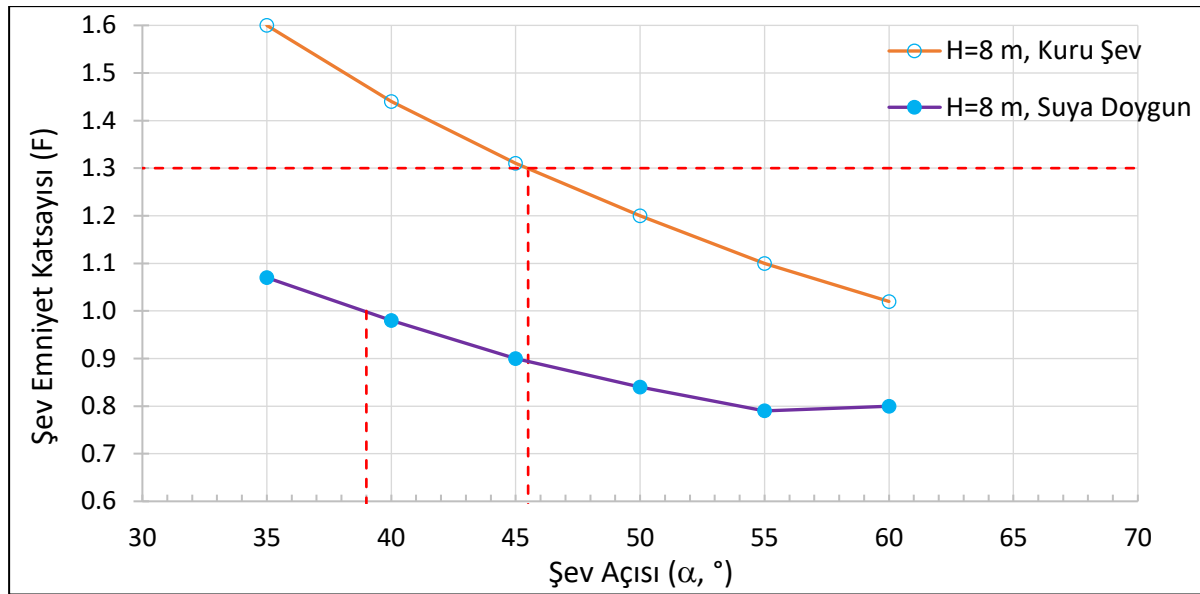
$$\phi = -1.94738 \cdot c + 49.4301 \quad (r = 0.99) \quad (1)$$

Burada, ϕ içsel sürtünme açısıdır ($^{\circ}$) ve c ise kohezyon değeridir (kPa). Eşitlik 1 yardımıyla, değişen kohezyon değerine karşılık hesaplanacak olan içsel sürtünme açısı değerleri ile oluşturulacak bir sayısal modelin şev emniyet katsayısı $F=1$ civarında olacaktır. Ayrıca; incelenen jeolojik birime ait malzeme parametrelerinin en kötü koşullara göre seçilmiş olacağı düşünülürse, belirlenmiş olan dayanım parametreleri kullanılarak oluşturulacak bir sayısal modeldeki şevin istenen emniyet katsayısı en az $F=1.3$ olduğunda, tasarımı yapılan şevin duraylı olarak kalacağı sonucuna ulaşılabilecektir. Böylece, şev stabilite analizi amacıyla oluşturulacak bir sayısal modelin girdi parametreleri daha güvenilir olacaktır.

Burada tanıtılan örnek uygulama, sadece Mohr-Coulomb malzemesinin dayanım parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısının geri analizle belirlenmesine yöneliktir. Ancak, şev

stabilite analizinde kullanılan yazılımlardan yararlanarak hemen hemen tüm girdi parametreleri için duyarlılık veya olasılık analizleri benzer şekilde yapılabilir. Bu tarz analizler, Hoek-Brown gibi farklı yenilme ölçütlerine göre ya da anizotropik malzemeler gibi farklı malzemelere göre de yapılabilmektedir.

Geri analiz yöntemiyle belirlenmiş olan malzeme özellikleri kullanılarak, duraylı kalabilecek şev tasarımının belirlenmesine yönelik stabilite analizleri gerçekleştirilebilir. Bu amaçla, farklı şev geometrisine sahip senaryolar uygulanarak şev emniyet katsayıları hesaplandıktan sonra uzun ömürlü şevler için gereken en düşük emniyet katsayısı $F=1.3$ şartını sağlayan emniyetli şevler oluşturulabilir. Şev emniyet katsayısının arttırılmasını sağlayabilmek amacıyla şev yüksekliğinin düşürülmesi, şev açısının azaltılması ve basamak genişliğinin arttırılması gibi şevin geometrik özellikleriyle ilgili olan yöntemler ya tek başına ya da bu yöntemlerin kombinasyonu şeklinde uygulanmalıdır. Bu çalışmada, şev açısı değişiminin şev emniyet katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geri analizde belirlenmiş olan dayanım parametreleri kullanılarak ($c=10.5$ kPa, $\phi=31^\circ$) $H=8$ m yüksekliğindeki şevin açısı 60° 'den 35° 'ye kadar düşürülerek hem kuru şev için hem de suya doymun şev için stabilite analizleri yapılmıştır. Hesaplanan şev emniyet katsayılarının şev açısına göre değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Şev açısı – şev emniyet katsayısı arasındaki ilişki

Şekil 10 incelendiğinde, 8 m yüksekliğindeki kuru şevin uzun ömürlü olarak duraylı kalması istenirse ($F=1.3$) yaklaşık $\alpha=45-46^\circ$ açıda açılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bilindiği gibi, şevin suya doymun hale gelmesi durumunda şev emniyet katsayısı azalacaktır. Bu nedenle, bu tip stabilite analizleri sadece kuru şev için değil en kötü koşulların göz önüne alınmasını sağlayan suya doymun durum için de tekrarlanmalıdır. İncelenen şevin suya doymun haldeki emniyet katsayıları incelendiğinde (Şekil 10) $F=1.3$ şartını sağlayan şev açısının bulunmadığı görülmektedir. Şevin 39° 'den daha düşük açılarda planlanması durumunda $F \geq 1$ olduğu için şev kuramsal olarak dengede olacaktır ancak istenilen emniyet katsayısını verecek şekilde emniyetli olmayacaktır. Bu nedenle, söz konusu şevin $H=8$ olan yüksekliğinin düşürülmesi veya şev stabilitesini arttıran yöntemlerden drenaj yöntemini uygulayarak şevin suya doymun hale gelmesinin önlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Böyle durumlar için, suya doymunluk derecesinin şev stabilitesi üzerindeki etkisinin araştırıldığı duyarlılık analizi yapılarak hangi suya doymunluk derecesinden sonra şev emniyet katsayısının istenilen değerin altında kaldığı belirlenebilir. Böylece, şevde duraysızlık yaşanmaması için en yüksek hangi suya doymunluk

seviyesinin aşılmaması gerektiği hesaplanır ve buna göre şevin takibi yapılarak güvenli bir çalışma ortamı sağlanır.

Şev açısı değişiminin emniyet katsayısı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan stabilite analizlerine benzer şekilde şev yüksekliğinin değiştirilmesi ile oluşturulacak farklı senaryolara göre stabilite analizleri yapılabilir. Bu tarz bir analiz sonrasında, istenilen emniyet katsayısının veren belirli bir açıda şevin yüksekliği belirlenmiş olur.

Geri analiz yapılarak belirlenmiş olan malzeme özellikleri, şevin kayma sınırını temsil ettiğinden dolayı duraylılık anlamında en kötü koşulları ifade etmektedir. Bu nedenle; geri analizden elde edilen parametrelerin şev stabilite analizlerinde kullanılması, yapılan analiz sonuçlarının oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Geri analiz yöntemiyle elde edilen malzeme parametreleri, saha koşullarını ve kayma olayının gerçekliğini daha iyi yansıtmaktadır. Özellikle zayıf malzeme içeren şevlerde veya pasa döküm sahalarında, laboratuvar deneyleriyle elde edilen parametrelerin gerçekte daha yüksek olabileceği ve analizlerin bu nedenle gerçekte olduğundan daha güvenli sonuçlar verebileceği görülmektedir. Ancak geri analiz yönteminin de bazı sınırlamaları bulunmaktadır:

1. Analizler sadece gerçekleşmiş kaymalar için geçerlidir.
2. Sahadaki su etkisi, boşluk suyu basıncı gibi faktörler göz ardı edilirse hata yapılabilir.
3. Farklı kayma mekanizmaları için parametrik analiz gerekebilir.

Bu çalışmada, şev stabilitesi analizlerinde malzeme özelliklerinin geri analiz yöntemiyle belirlenmesinin önemine dikkat çekilmiştir. Yapılan uygulama çalışması sonucunda, geri analiz yöntemiyle elde edilen parametrelerin sahada gözlemlenen davranışı daha iyi temsil edeceği ve güvenli bir şekilde duraylı kalabilecek şev tasarımlarının yapılabileceğine dikkat çekilmiştir.

Ülkemizde yapılan madencilik faaliyetleri sırasında yaşanan şev kayması problemlerinin işletmeler tarafından mutlaka kayıt altına alınması gerekir. Duraysızlık problemlerinin yaşandığı şevin geometrisi (şev açısı, şev yüksekliği ve basamak genişliği), şevin suya doygunluk derecesi (yeraltı su seviyesi) ve şevin açıldığı jeolojik birimin özellikleri arşivlenmelidir. Geçmişte sorun yaşanan şevler için derlenen bu verilerden yararlanarak geri analiz yöntemiyle belirlenecek malzeme özelliklerinin kullanılacağı şev stabilite analizleriyle ileride açılacak şevler için güvenilir şev tasarımları yapılabileceği unutulmamalıdır.

Yeni projelerde, saha ve laboratuvar verileri birlikte kullanılmalı; analizler sürekli olarak güncellenmelidir. İleri çalışmalar için probabilistik geri analiz yöntemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Kaynaklar

- Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon, T.L., 2014. Soil Strength and Slope Stability. Wiley.
- Griffiths, D.V., Marquez, R.M., 2007. Three-dimensional slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 57(6), 537-546.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1999. Kaya Şev Stabilitesi. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını.

Nassirzadeh, R., Dini, A., Balagar, V., 2024. Back analysis of cohesion and friction angle of failed slopes using probabilistic approach: two case studies. *International Journal of Geo-Engineering*, 15(1), 3.

Popescu M, Schaefer V (2008) Landslide stabilizing piles: a design based on the results of slope failure back analysis. *Landslides Eng Slopes Past Future* 1:1787–1793

RS2, 2024. 2D Geotechnical Finite Element Analysis, Version: 11.023 Build: Mar 27 2024, RocScience Inc.

Slide2 Modeler, 2025a. 2D Limit Equilibrium Analyses for Slopes, Build: 9.038, RocScience Inc.

Slide2, 2025b. User Manual, Rocscience Inc.

Tang, X.S., Li, D.Q., Chen, Y.F., Zhou, C.B., Zhang, L.M., 2012. Improved knowledge-based clustered partitioning approach and its application to slope reliability analysis. *Comput. Geotech.* 45:34–43.

Topal, T., Akin, M., 2009. Geotechnical assessment of a landslide along a natural gas pipeline for possible remediations (Karacabey-Turkey). *Environ. Geol.* 57:611.