2B Dairesel Limit Denge Şev Stabilitesi Doğrulama Belgesi

SlopePro hesap çekirdeği · Bishop, Spencer ve Fellenius yöntemleri

Tanımlı 2B dairesel limit denge kapsamında Bishop ve Spencer sonuçları, Rocscience Slide2 doğrulama kılavuzundaki beş yayımlanmış problemde Slide ile %0,4 içinde örtüşür. Aynı kayma dairesinde bağımsız bir limit denge çekirdeğiyle fark %0,06'yı geçmez. Fellenius tek Slide referansıyla (%0,3) ve bağımsız çekirdekle karşılaştırılmıştır.

Yayımlayan	Yapidan.com
Revizyon	Rev. 2 · 25 Eylül 2026
Önceki revizyon	Rev. 1 · 25 Nisan 2026 (bu belgeyle geçersizdir)
Kanıt dosyaları	`docs/tool-readiness/evidence/sp2-*`, `sp1-*`

İçindekiler

1. Amaç ve kapsam
2. Hesap yöntemleri
3. Doğrulama yöntemi
4. Kabul ölçütleri
5. Slide2 doğrulama problemleri: sonuçlar
6. Kıyas dışı bırakılan referanslar
7. Bağımsız çekirdek kıyası
8. Davranış kontrolleri
9. Bu revizyonda hesap çekirdeğinde yapılan düzeltmeler
10. Kullanım notları ve sınırlar
11. Kaynaklar ve revizyon geçmişi

1. Amaç ve kapsam

Bu belge, Yapidan.com'da yayımlanan SlopePro şev stabilitesi aracının hesap çekirdeğinin hangi problem ailesinde, hangi referanslara karşı ve hangi doğrulukla sınandığını kayda geçirir. Doğrulama iddiası yalnız aşağıdaki kapsam için geçerlidir.

- İki boyutlu, dairesel kayma yüzeyli limit denge analizi.
- Bishop (basitleştirilmiş), Spencer ve Fellenius (Ordinary) yöntemleri.
- Homojen, yatay tabakalı ve poligon malzeme bölgeli zemin modelleri; kuru ve pseudo-statik yatay sismik yükleme (Slide karşılaştırmalı).
- Su tablası, r_u, alan tabanlı boşluk suyu, çekme çatlağı, yüzey yükleri, sınırlandırılmış arama ve palyeli geometri. Bu özellikler yayımlanmış bir problemle değil, davranış kontrolleri ve bağımsız çekirdek kıyasıyla sınanmıştır.

Dairesel olmayan ve kompozit kayma yüzeyleri, iksa, ankraj, zemin çivisi ve geosentetik destekli sistemler, istinat duvarları, üç boyutlu analiz, sonlu eleman sızma ve gerilme–deformasyon analizleri, kaya kama ve düzlemsel kayma, Newmark deplasman analizi, olasılıksal güvenilirlik ve geri analiz bu belgenin kapsamı dışındadır.

2. Hesap yöntemleri

Kayan kütle düşey dilimlere ayrılır. Dilim sınırları, istenen dilim sayısına göre eşit aralıklı sınırlara ek olarak kayma yayının malzeme sınırlarını kestiği ve arazi yüzeyinin kırıldığı noktalara yerleştirilir. Böylece her dilim tabanı tek malzemede kalır. Aşağıda W dilim ağırlığı, α taban eğimi, l taban uzunluğu, b dilim genişliği, u boşluk suyu basıncı, k_h yatay sismik katsayıdır.

2.1 Fellenius (Ordinary)

Dilimler arası kuvvetler ihmal edilir; taban normal kuvveti tabana dik dengeden bulunur. Sismik kuvvet taban normalini de azaltır.

$$N = W\cos\alpha - k_h W\sin\alpha, \quad F = \Sigma[c\,l + (N - u\,l)\tan\varphi] \,/\, \Sigma[W\sin\alpha + k_h W\, y_g/R]$$

y_g: dilim ağırlık merkezinin daire merkezine düşey uzaklığı, R: yarıçap.

2.2 Bishop (basitleştirilmiş)

Dilimler arası kesme kuvvetleri sıfır kabul edilir; normal kuvvet düşey dengeden, F daire merkezine göre moment dengesinden yinelemeyle bulunur.

$$F = \Sigma\{[c\,b + (W - u\,b)\tan\varphi] / m_\alpha\} / \Sigma[W\sin\alpha + k_h\,W\,y_g/R], \quad m_\alpha = \cos\alpha + \sin\alpha\tan\varphi / F$$

2.3 Spencer

Dilimler arası bileşke kuvvetlerin eğimi θ tüm dilimlerde aynı kabul edilir. Her dilimde bileşke Q, taban paraleli ve tabana dik denge denklemlerinden bulunur. Kuvvet dengesi ΣQ = 0 koşulundan $F_f(\theta)$, moment dengesinden $F_m(\theta)$ elde edilir; θ, iki güvenlik sayısı eşit olacak şekilde kiriş yöntemiyle, gerekirse tarama ve ikiye bölmeyle çözülür. θ = 0'da F_m Bishop sonucuna eşittir.

$$Q = \{W\sin\alpha + k_h W\cos\alpha - [c\,l + (W\cos\alpha - k_h W\sin\alpha - u\,l)\tan\varphi]/F\} / [\cos(\alpha - \theta) + \sin(\alpha - \theta)\tan\varphi / F]$$

Su dolu çekme çatlağının itkisi, kayan kütlenin çatlak yüzüne etkiyen yatay dış kuvvet olarak alınır. Su kesme taşımadığı için bu sınıra dilimler arası kesme kuvveti yüklenmez.

3. Doğrulama yöntemi

3.1 Slide2 doğrulama problemleri

Referans olarak Rocscience Slide2 Slope Stability Verification Manual'daki beş dairesel problem kullanıldı: #1 (ACADS 1(a)), #3 (ACADS 1(c)), #4 (ACADS 1(d)), #14 (Arai & Tagyo 1985, Örnek 1) ve #17 (Yamagami & Ueta 1988). Geometri, malzeme parametreleri ve Slide sonuçları kılavuzdan alındı. Slide modeli sola bakar, SlopePro geometrisi sağa bakar; koordinatlar topuk ve tepe noktaları eşlenecek biçimde aynalandı (X = A − x, Y = y + B). Slide model alanı, SlopePro arama sınırlarıyla taklit edildi: giriş ve çıkış noktaları alanın yatay sınırları içinde, yay tabanı alan tabanının üstünde kalır.

Problem	Geometri (Slide, m)	Malzeme (c′ kPa, φ′°, γ kN/m³)	Yükleme
#1 ACADS 1(a)	Topuk (30, 25), tepe (50, 35); alan x 20–70, taban 20	3,0 · 19,6 · 20,0	Kuru
#3 ACADS 1(c)	#1 ile aynı; üç malzeme bölgesi	Z1 0 · 38 · 19,5; Z2 5,3 · 23 · 19,5; Z3 7,2 · 20 · 19,5	Kuru
#4 ACADS 1(d)	#3 ile aynı	#3 ile aynı	k_h = 0,15
#14 Arai & Tagyo	Topuk (18, 15), tepe (48, 35); alan x 0–66, taban 0	41,65 · 15 · 18,82	Kuru
#17 Yamagami & Ueta	Topuk (5, 5), tepe (15, 10); alan x 0–25, taban 0	9,8 · 10 · 17,64	Kuru

Her problem ve yöntem için iki arama koşuldu: parçacık sürüsü (PSO, 2 500 deneme) ve merkez ızgarası (Slide tarzı). Dilim sayısı 50, yakınsama toleransı 10^{-4}'tür. Raporlanan değer iki aramanın küçüğüdür.

3.2 Bağımsız çekirdek

SlopePro'dan ayrı yazılmış bir Python limit denge çekirdeği (Bishop, Spencer, Ordinary; Slide'a karşı ayrıca doğrulanmış) iki biçimde kullanıldı. Birincisinde SlopePro'nun bulduğu kritik daireler bu çekirdekle yeniden çözüldü (aynı daire kıyası). İkincisinde çekirdek kendi aramasını yaptı: geçerlilik denetimli merkez–taban ızgarası ve her yöntem için Nelder–Mead iyileştirmesi.

3.3 Davranış kontrolleri

Yayımlanmış referansı olmayan özellikler için ACADS 1(a) geometrisi üzerinde beklenen yön sınandı: su, r_u, çekme çatlağı, sismik katsayı, tepe yükü, zayıf bant ve tanımlı daire.

4. Kabul ölçütleri

Kabul ölçütleri Rev. 1 ile aynı tutuldu; bu revizyonda eklenen tek ölçüt aynı daire kıyasıdır.

Ölçüt	Hedef	Üst sınır	Ölçülen en büyük
Bishop, Slide referansına göre sapma	≤ %5	≤ %8	%0,38
Spencer, Slide referansına göre sapma	≤ %5	≤ %8	%0,23
Fellenius, Slide referansına göre sapma	≤ %7	≤ %10	%0,30
İki arama arasındaki fark (PSO ve ızgara)	—	≤ %2	%0,30
Aynı dairede bağımsız çekirdekle fark	—	≤ %0,1	%0,058

5. Slide2 doğrulama problemleri: sonuçlar

Tabloda "Slide" sütunu kılavuzdaki dairesel sonucu, "Bağımsız" sütunu bağımsız çekirdeğin kendi aramasıyla bulduğu en küçük güvenlik sayısını gösterir. Sapma SlopePro'nun Slide'a göre farkıdır.

Problem	Yöntem	Slide	SlopePro	Sapma	Bağımsız
#1 ACADS 1(a)	Bishop	0,987	0,9851	−%0,19	0,9850
	Spencer	0,986	0,9842	−%0,18	0,9840
	Fellenius	—	0,9423	—	0,9423
#3 ACADS 1(c)	Bishop	1,405	1,4027	−%0,16	1,4027
	Spencer	1,375	1,3719	−%0,23	1,3720
	Fellenius	—	1,2274	—	1,2274
#4 ACADS 1(d), k_h 0,15	Bishop	1,016	1,0128	−%0,31	1,0129
	Spencer	0,991	0,9891	−%0,19	0,9892
	Fellenius	—	0,8825	—	0,8825
#14 Arai & Tagyo	Bishop	1,409	1,4036	−%0,38	1,4038
	Spencer	(1,319)	1,4013	bkz. §6	1,4015
	Fellenius	—	1,3436	—	1,3441
#17 Yamagami & Ueta	Bishop	1,344	1,3416	−%0,18	1,3423
	Spencer	—	1,3398	—	1,3405
	Fellenius	1,278	1,2742	−%0,30	1,2746

Yöntem	Slide referans sayısı	Ortalama |sapma|	En büyük |sapma|	En büyük sapmalı problem
Bishop	5	%0,25	%0,38	#14 Arai & Tagyo
Spencer	3	%0,20	%0,23	#3 ACADS 1(c)
Fellenius	1	%0,30	%0,30	#17 Yamagami & Ueta

Sapmaların hepsi negatiftir. SlopePro, Slide'ın kılavuzdaki aramalarına göre (#1 ve #3'te 20 × 20 ızgara ve nokta başına 11 daire, #14 ve #17'de auto-refine) biraz daha düşük güvenlik sayılı daireler bulur. Bağımsız çekirdeğin kendi araması da aynı değerlere iner (en büyük fark %0,054). Referans literatür değerleri Slide sonuçlarıyla birlikte verilmiştir: #1 için hakem değeri 1,00 (Giam & Donald 1989), #14 için Arai & Tagyo Bishop 1,451, #17 için Yamagami & Ueta Bishop 1,348 ve Ordinary 1,282.

6. Kıyas dışı bırakılan referanslar

Rev. 1'deki referans eşlemesi Slide kılavuzuyla yeniden karşılaştırıldı. Aşağıdaki değerler dairesel yöntem kıyasına uygun olmadığı için çıkarıldı.

Rev. 1 referansı	Kılavuzdaki karşılığı	Karar
#1, #3, #14 Fellenius 0,975 / 1,350 / 1,400	Kılavuzda bu problemler için Ordinary sonucu yok	Çıkarıldı
#4 Fellenius 0,965	Janbu düzeltilmiş sonucu	Çıkarıldı
#17 Spencer 1,325	Dairesel olmayan yüzey (Monte-Carlo optimizasyonlu rastgele arama)	Çıkarıldı
#14 Spencer 1,319	Dairesel sonuç; aynı tabloda Bishop 1,409, GLE 1,414, Janbu düzeltilmiş 1,407	Aykırı, kıyas dışı

#14 Spencer değeri için gerekçe şudur: yarım sinüs fonksiyonlu GLE ile sabit fonksiyonlu Spencer dairesel yüzeylerde genellikle birbirine çok yakındır; kılavuzun iki yöntemi birlikte verdiği #1, #3 ve #4'te aralarındaki fark en çok %0,2'dir. Bu problemde Spencer değeri GLE'den %6,7 düşüktür. Bağımsız çekirdeğin Spencer sonucu 1,4015, SlopePro sonucu 1,4013'tür.

7. Bağımsız çekirdek kıyası

Aynı daire kıyasında SlopePro'nun hesapladığı güvenlik sayısı, aynı kayma dairesi ve aynı dilim sayısı için bağımsız çekirdeğin sonucuyla karşılaştırıldı.

Set	Kıyas	En büyük |fark|
Slide problemleri, iki aramanın kritik daireleri (5 × 2 × 3 yöntem)	30	%0,058
18 daire: kuru, sismik k_h 0,15, r_u 0,3, kohezyonsuz, iki tabaka, iki tabaka + sismik + r_u (× 3 yöntem)	54	%0,0016
Su dolu çekme çatlaklı daireler (5 × 3 yöntem)	15	%0,0004

Çatlak setinde bağımsız çekirdek, çatlak suyunu ilk dilim sınırına dilimler arası kuvvet olarak koyar ve Spencer'da bu sınıra θ eğimli kesme de yükler. Bu varsayımla bir dairede Spencer farkı %0,70 çıktı. Çekirdeğin bir kopyasında yalnız o sınırdaki kesme sıfırlandığında fark %0,0003'e indi. Tabloda bu kopyanın sonucu kullanılmıştır, çünkü suyun kesme taşımadığı kabulü SlopePro'nun fiziksel modelidir.

8. Davranış kontrolleri

ACADS 1(a) geometrisinde (25 dilim, tol 10^{-4}, PSO) üç yöntemin her biri için aşağıdaki yönler sınandı. 21 kontrolün 21'i geçti.

Aile	Beklenen	Bishop	Spencer	Fellenius
Taban (kuru)	—	0,9858	0,9849	0,9420
Su tablası (tepeden 2 m)	Islak < kuru	0,5463	0,5524	0,4241
r_u 0,2 / 0,4	Kuru > 0,2 > 0,4	0,7914 / 0,5966	0,7917 / 0,6005	0,7365 / 0,5167
Çekme çatlağı 2 m kuru / su dolu	Kuru ≥ çatlak > su dolu	0,9858 / 0,9688	0,9849 / 0,9679	0,9421 / 0,9358
Sismik k_h 0,1 / 0,2	Statik > 0,1 > 0,2	0,7901 / 0,6515	0,7906 / 0,6536	0,7543 / 0,6198
Tepe yükü 20 kPa, 12 m	Yüklü < yüksüz	0,9534	0,9522	0,9103
Zayıf bant (c 1, φ 12°)	Bantlı < homojen	0,9099	0,8973	0,7766
Tanımlı daire	Kritik daire verilince aynı F	$\lvert\Delta F\rvert < 10^{-9}$	$\lvert\Delta F\rvert < 10^{-9}$	$\lvert\Delta F\rvert < 10^{-9}$

Fellenius kuru çatlaklı arama 0,9421 buldu; çatlaksız arama 0,9420'dir. Program her dairede çatlaklı ve çatlaksız değerin küçüğünü aldığından fark (%0,0075) arama gürültüsüdür ve kontrol %0,05 arama toleransıyla yazılmıştır.

9. Bu revizyonda hesap çekirdeğinde yapılan düzeltmeler

Konu	Önceki durum	Düzeltme ve etkisi
Spencer formülasyonu	Moment denklemi θ = 0'da Bishop'a indirgenmiyordu; sonuç Bishop'un %3 üstünde kırpılıyordu, bazı dairelerde yakınsamıyordu.	Spencer (1967) formülasyonu kuruldu (§2.3). Bağımsız hesapla 54 değerde birebir.
Arama yarıçapı	Üst sınır 2H'ydi; ACADS 1(a) kritik dairesi (r ≈ 2,8H) bulunamıyordu, sonuç %2,9 yüksekti.	Üst sınır 4H. ACADS 1(a) Bishop 0,985–0,987.
Dilim sınırları	Eşit aralıklı dilimde taban malzemesi orta noktadan alınıyordu. Üç tabakalı ACADS 1(c)'de aranan sonuç 25 dilimde %1,5, 50 dilimde %0,7 düşük çıkıyordu.	Dilim sınırları malzeme sınırlarına ve arazi kırıklarına oturtuldu. 50 dilimde bağımsız çekirdekle fark ≤ %0,005; ACADS 1(c) 25 dilimde arama sapması −%1,48'den −%0,07'ye indi.
Fellenius sismik	Taban normalinden $k_h W \sin\alpha$ düşülmüyordu; sismik durumda sonuç %6–7 yüksek (güvensiz yönde) çıkıyordu.	$N = W\cos\alpha - k_h W \sin\alpha$. ACADS 1(d) Fellenius 0,9375 → 0,8825.
Su dolu çekme çatlağı	İtki her dairede tam çatlak derinliğiyle hesaplanıyordu. Yay çatlağı sığda kestiğinde küçük kamalara tam itki yükleniyor, arama bunlara oturuyordu (ACADS 1(a), z_c 3 m: Bishop 0,244, Fellenius 0,008).	İtki kayan kütlenin çatlak yüzü yüksekliğiyle, $h = \min(z_c$, yüzey − kesim kotu), hesaplanıyor. Aynı örnekte Bishop 0,968, Fellenius 0,936.
Negatif etkin ağırlık	Bishop etkin dilim ağırlığını sıfıra kırpıyordu, Spencer ve Fellenius kırpmıyordu. r_u = 1,1 sınamasında Bishop Spencer'ın %8 üstünde (güvensiz yönde) çıkıyordu.	Kırpma kaldırıldı; Bishop ve Spencer bağımsız çekirdekle ≤ %0,003. Uyarı artık su tablası dışında r_u ve alan tabanlı boşluk suyu için de çalışıyor.

10. Kullanım notları ve sınırlar

- Arayüzün varsayılanı 25 dilim ve 0,005 toleranstır. ACADS 1(a), 1(c) ve 1(d)'de bu ayarla bulunan sonuç, aynı dairenin 1000 dilimli değerinden en çok %0,11 düşüktür. Karar hesabında 50 dilim ve 10^{-4} tolerans önerilir.
- Çekme çatlağı tepe kırığında tek bir düşey çatlak olarak modellenir. Slide'daki gibi tepe boyunca uzanan bir çatlak çizgisi yoktur; iki programın çatlaklı sonuçları bu nedenle doğrudan karşılaştırılamaz.
- Fellenius yalnız bir Slide referansıyla karşılaştırılabildi. Sismik ve boşluk suyu basınçlı durumlarda Bishop veya Spencer tercih edilmelidir.
- Su, r_u, alan tabanlı boşluk suyu, yük, palyeli geometri ve giriş–çıkış araması yayımlanmış bir problemle değil, davranış kontrolleri ve bağımsız çekirdekle sınanmıştır.
- Boşluk suyu kuvveti dilim ağırlığını aştığında (örneğin $r_u > 1$ ya da artezyen basınç) hiçbir yöntem sürtünme katkısını kırpmaz; katkı negatif alınır ve rapor uyarı verir. Bağımsız çekirdeğin Ordinary yöntemi bu durumda N − u l'yi sıfıra kırptığı için Fellenius sonuçları orada ondan ayrışır.
- Sonuçlar mühendislik kararının yerine geçmez; saha verisi, proje kabulleri ve sorumlu mühendis değerlendirmesiyle birlikte kullanılmalıdır.

11. Kaynaklar ve revizyon geçmişi

- Rocscience Inc. Slide2 Slope Stability Verification Manual, Problem #1, #3, #4, #14, #17.
- Giam, P. S. K. & Donald, I. B. (1989). Example problems for testing soil slope stability programs. Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University.
- Arai, K. & Tagyo, K. (1985). Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis. Soils and Foundations, 25(1), 43–51.
- Yamagami, T. & Ueta, Y. (1988). Search noncircular slip surfaces by the Morgenstern-Price method. Proc. 6th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, 1335–1340.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Revizyon	Tarih	Açıklama
Rev. 1	25 Nisan 2026	İlk yayım.
Rev. 2	25 Eylül 2026	Hesap çekirdeği düzeltmeleri (§9) sonrası bütün kıyaslar yeniden koşuldu. Referans eşlemesi Slide kılavuzuna göre düzeltildi (§6). Bağımsız çekirdek kıyası ve davranış kontrolleri eklendi. Rev. 1'deki yeniden üretilemeyen toplu kontrol sayıları çıkarıldı.