BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI İSTANBUL ŞUBESİ

Heyelanların Oluşum Mekanizması, Tespiti ve Önlenmesinde Geoteknik Yaklaşımlar

Prof. Dr. Eyübhan AVCI
Bursa Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Geoteknik Anabilim Dalı Başkanı

HEYELAN NEDİR?

Heyelan; bir yamaçtaki zemin, kaya veya dolgu kütlesinin, yerçekimi etkisiyle yamaç aşağı hareket etmesidir.

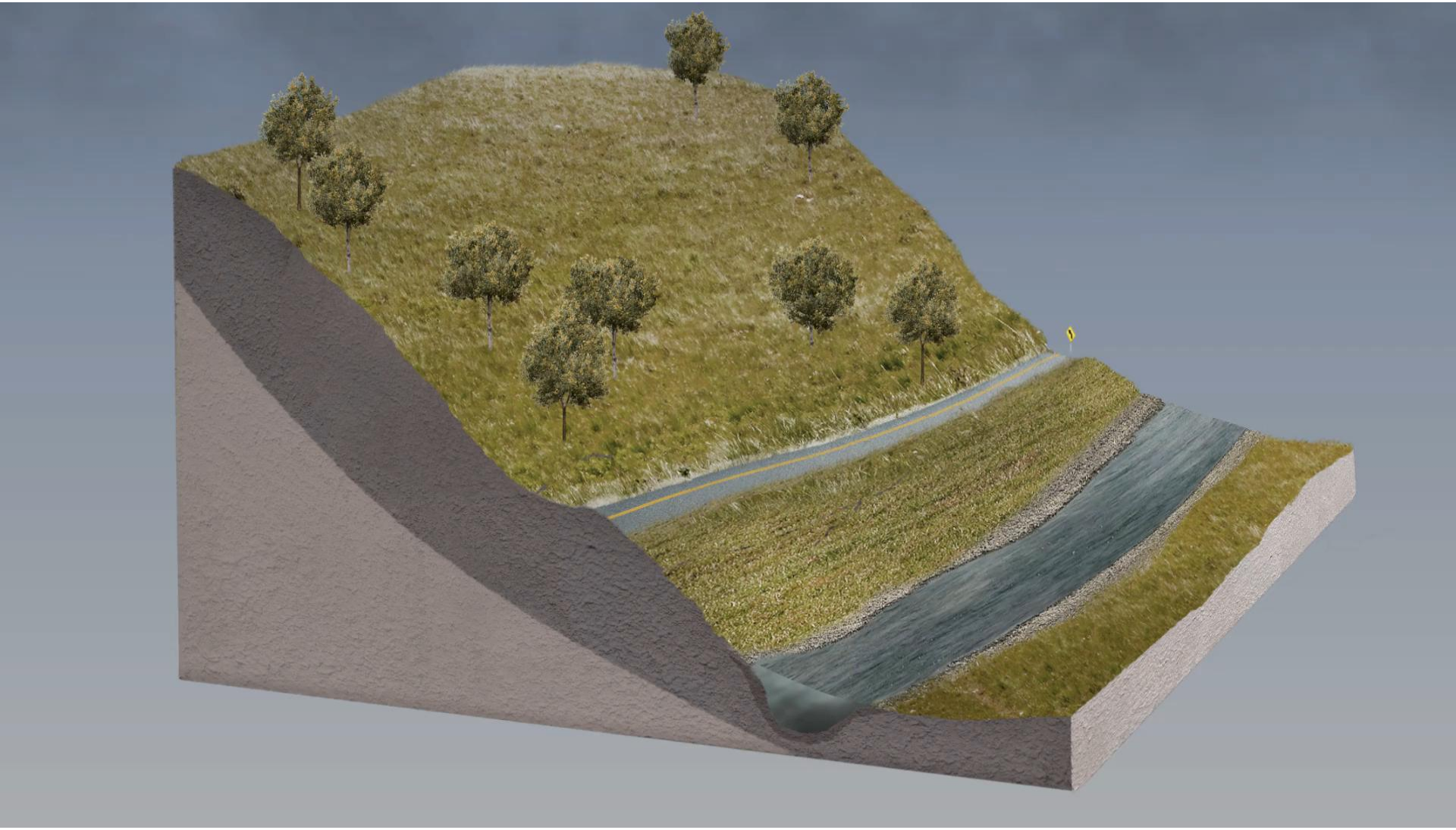
Temel mekanizma: Kaydırıcı etkilerin, kaymaya karşı koyan zeminin kayma mukavemetini aşmasıdır.

Başlıca tetikleyiciler

- Yağışlar, yeraltı su seviyesinde değişiklikler, boşluk suyu basıncında artışlar
- Deprem
- Yamaçta yapılan kazılar
- Yamaç üzerine ilave yük



Hareket, çok yavaş gelişebileceği gibi aniden ve yüksek hızla da gerçekleşebilir.



ŞEV YENİLMELERİ VE HEYELANLAR

Ülkelere göre yıllık ekonomik zarar



Ülke	Yıllık tahmin (ABD doları)
ABD	1,8 milyar
Japonya	4 milyar
İtalya	2,6–5 milyar
Kanada	70 milyon–1,4 milyar
Almanya	300 milyon
İspanya	200 milyon
Güney Kore	60 milyon

Yaklaşık literatür değerleri; farklı dönemlere aittir. 2026 fiyatlarına uyarlanmamıştır; ülkeler doğrudan sıralanamaz.

Toplam maliyet, doğrudan ve dolaylı kayıpları kapsar.

Kaynaklar: USGS; Sim ve ark. (2022), *Geoenvironmental Disasters*, 9:3.

CAN KAYIPLARI



Ülke	Can kaybı	Dönem / açıklama
ABD	25–50 kişi/yıl	Genel yıllık ortalama
Nepal	≈113 kişi/yıl	1971–2021 ortalaması
Türkiye	≈15 kişi/yıl	1929–2019 tarihsel ortalaması
İtalya	5 kişi	Yalnızca 2024 yılı

Türkiye: 389 ölümcül heyelan olayında toplam 1.343 can kaybı.

İtalya değeri tek yıla aittir; yıllık ortalama değildir. Dönem ve kayıt yöntemleri farklı olduğundan ülkeler doğrudan sıralanamaz.

Kaynaklar: USGS; Adhikari ve Gautam (2022); Fidan ve Görüm (2020), FATALDOT; ISPRA (2024 verileri).



Heyelan sonucunda baraj heyelan sebebiyle taşmış ve sel meydana gelmiş 100000 kişi ölmüştür.

1929 OF–SÜRMENE HEYELAN FELAKETİ

Doğu Karadeniz • Trabzon–Rize çevresi

5 TEMMUZ 1929
Afetin tarihi

148
Can kaybı

ŞİDDETLİ YAĞIŞ
Heyelanları tetikleyen etken

1929–2019 dönemini kapsayan araştırmada, Türkiye'de en fazla can kaybıyla kaydedilen heyelan felaketi.

Şiddetli yağış → Yamaçlarda dengenin bozulması → Heyelanlar

148 can kaybı, bölgesel heyelan felaketinin bilançosudur; tek bir kayma kütlesini ifade etmez.

Kaynak: Fidan ve Görüm (2020), Türk Coğrafya Dergisi, 74: 123–134; FATALDOT.

Arka plan: temsili görselleştirme

TÜRKİYE'DE YAŞANMIŞ BÜYÜK HEYELANLAR

2016–2024 • Seçilmiş olaylar



Olay / yer	Tarih	Can kaybı / etki	Hareket türü
Arhavi, Artvin	8 Aralık 2024	**4 can kaybı** ≈100 bin m³ malzeme	**Moloz çığı**
İliç–Çöpler, Erzincan	13 Şubat 2024	**9 can kaybı**	**Liç yığını kayması**
Araklı–Çamlıktepe, Trabzon	18 Haziran 2019	**10 can kaybı***	**Taşkın ve heyelan**
Aybastı–Sağlık, Ordu	16 Mayıs 2019	**Can kaybı yok** 31 konut ve 1 cami yıkıldı	**Yerleşim alanı heyelanı**
Şirvan–Madenköy, Siirt	17 Kasım 2016	**16 çalışan kütle altında kaldı** ≈1 milyon m³ toprak hareketi	**Açık ocak heyelanı**

- *Araklı'daki 10 can kaybı, taşkın ve heyelanın birleşik bilançosudur.
- Aybastı'da önceden tahliye yapılması sayesinde can kaybı yaşanmadı.

Kaynaklar: AFAD; Siirt Valiliği; TBMM (2024); KTÜ–İMO Araklı Raporu (2019); Arhavi teknik raporu / AA (2025).

Görsel: temsili

İLİÇ–ÇÖPLER MADEN SAHASI

Liç yığını kayması • Erzincan

13 ŞUBAT 2024
Olay tarihi

9
Can kaybı

Yenilmede öne çıkan etkenler*

- Kapasite artışı ve aşırı yükleme
- Drenaj yetersizliği
- Tasarım, uygulama ve izleme eksiklikleri

**Bilirkişi raporlarında belirtilen etkenlerin özeti.*



Gerçek saha fotoğrafı • Kaynak: NOS, 21.02.2024

Liç yığınının stabilitesini kaybetmesiyle büyük ölçekli kütle hareketi gelişti.

Kaynaklar: Büyükakpınar ve ark. (2025), The Seismic Record; bilirkişi raporu aktarımları (2024–2025).

ŞEV DURAYSIZLIĞI ÇEŞİTLERİ

KAYA DÜŞMESİ VE DEVRİLMESİ

KAYA DÜŞMESİ

Kopan kaya parçaları serbest düşme, sıçrama ve yuvarlanma ile ilerler.



GÖRÜLEBİLEN KAYA TÜRLERİ

Kireçtaşı • Dolomit • Granit • Bazalt • Andezit • Kumtaşı • Mermer

Elverişli yapı: Çatlaklarla ayrılmış bloklar.

KAYA DEVRİLMESİ

Kaya blokları tabanlarındaki bir nokta veya eksen etrafında öne doğru döner.



GÖRÜLEBİLEN KAYA TÜRLERİ

Sütunsal bazalt • Dik tabakalı kireçtaşı ve kumtaşı • Şist • Fillit • Arduvaz

Elverişli yapı: Dik süreksizliklerle ayrılmış sütun ve levhalar.

BAŞLICA TETİKLEYİCİLER


Donma–çözülme


Çatlaklarda su basıncı


Kök etkisi


Deprem sarsıntıları

Belirleyici olan yalnızca kaya türü değil; süreksizliklerin yönelimi ve yamacın dikliğidir.

ROTASYONEL KAYMA (DÖNEL KAYMA)

ROTASYONEL HAREKET

Kütle, yukarı doğru içbükey bir kayma yüzeyi boyunca dönerek hareket eder.





Tipik ortam:
Homojen veya homojene yakın zeminler ve dolgulıar.

Ayırt edici özellik:
Eğrisel kayma yüzeyi ve kütlede geriye yatma.

ÖTELENMELİ KAYMA (DÜZLEMSEL KAYMA)

HAREKET MEKANİZMASI

Kütle, düzlemsel veya düzleme yakın bir kayma yüzeyi boyunca yamaç aşağı ötelenir.

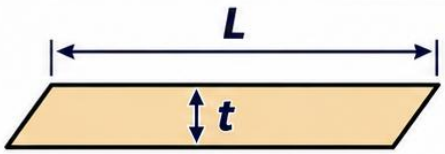
YAPISAL KONTROL

Kayma yüzeyi çoğunlukla zayıf zonlar, tabakalanma veya süreksizlik düzlemleri boyunca gelişir.



GEOMETRİ

Kalınlık / uzunluk oranı çoğu zaman 0,1'den küçüktür.



$t / L < 0{,}1$

BLOK KAYMASI

Hareket eden kütle bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğunda blok kayması olarak adlandırılır.

Ayırt edici özellik: Düzlemsel yüzey boyunca ötelenme; belirgin dönme hareketi yoktur.

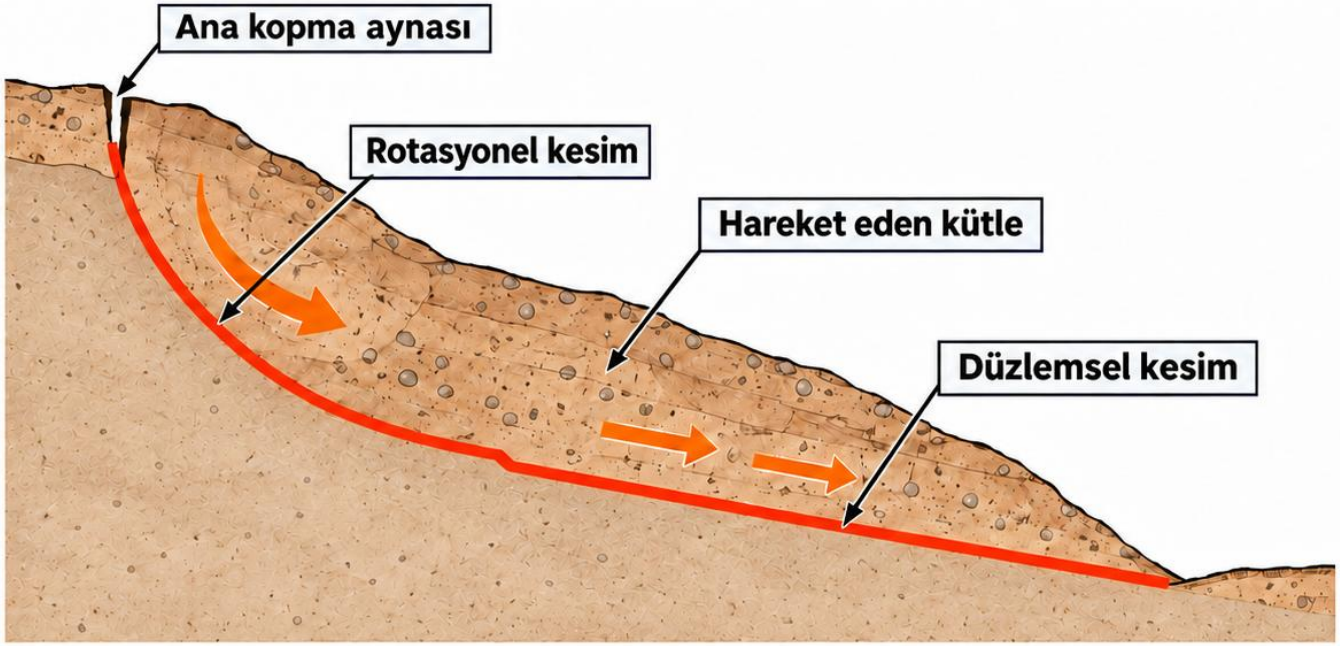
BİLEŞİK KAYMA

HAREKET MEKANİZMASI

Rotasyonel ve ötelenmeli kaymanın özelliklerini birlikte gösterir.

KAYMA YÜZEYİ

Üst kesimde rotasyonel olan kayma yüzeyi, alt kesimde düzlemsel olarak devam eder.



ÜST KESİM: DÖNME

ALT KESİM: ÖTELENME

Ayırt edici özellik: Rotasyonel ve düzlemsel bölümlerden oluşan kayma yüzeyi.

KARMAŞIK KAYMA

BİRDEN FAZLA HAREKET TÜRÜ

Kayma, devrilme veya akma gibi farklı hareket türleri aynı olayda birlikte ya da ardışık olarak gelişir.

KAYMADAN AKMAYA GEÇİŞ

Kayan kütle parçalanarak bütünlüğünü kaybedebilir ve yamaç aşağı akma hareketine dönüşebilir.



Ayırt edici özellik: Birden fazla hareket türünün birlikte veya ardışık gelişmesi.

Şematik örnek: Kayma → akma

YAYILMALAR (YANAL YAYILMA)

HAREKET MEKANİZMASI

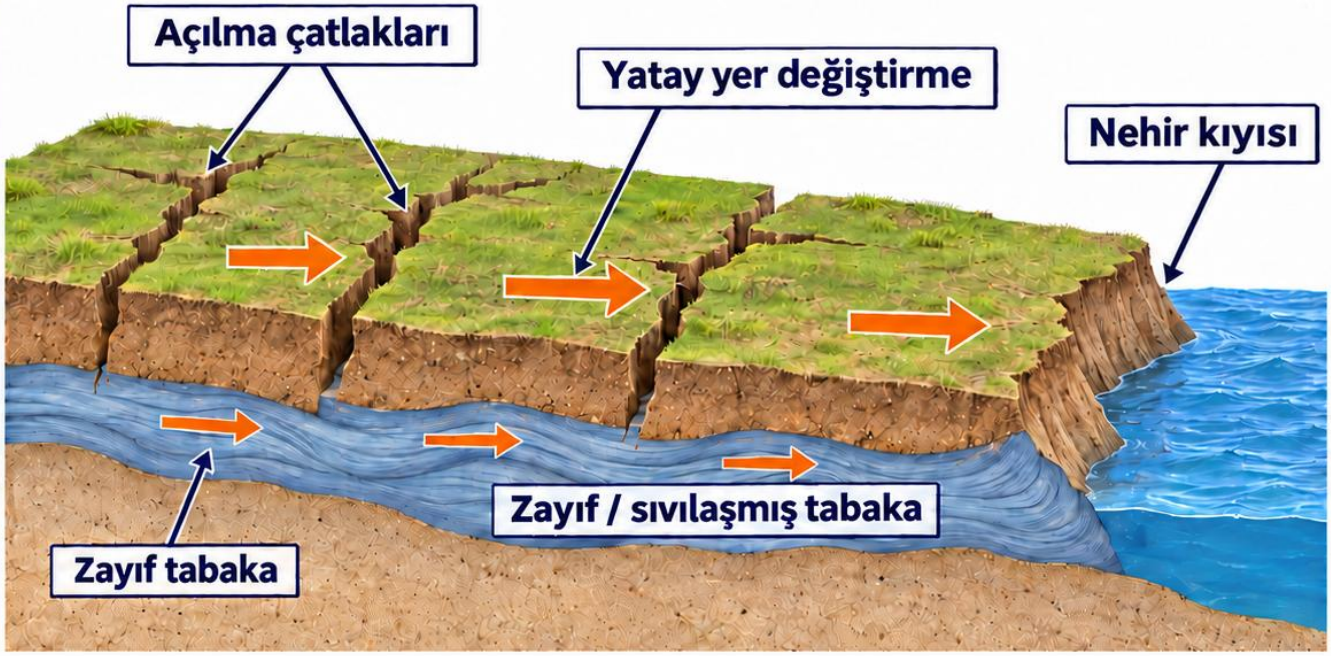
- Üstteki zemin kütlesi, alttaki sıvılaşan zeminin deformasyonu ile bloklara ayrılarak yanal yönde yayılır.

TETİKLEYİCİ KOŞUL

- Deprem sırasında sıvılaşma yaşanması ile gelişir.

GÖRÜLDÜĞÜ ALANLAR

- Düz veya hafif eğimli arazilerde; özellikle nehir kıyıları gibi serbest yüzlere yakın alanlarda gelişebilir.



DAYANIM KAYBI → **BLOKLARIN AYRILMASI** → **YANAL YAYILMA**

Geniş alanları etkileyebilir; yapılarda ve altyapıda ciddi hasara yol açabilir.

AKMALAR: SIVILAŞMA VE DÖKÜNTÜ AKMASI



SIVILAŞMA

Deprem sırasında boşluk suyu basıncı artar; efektif gerilme ve kayma dayanımı azalır.

AKMA YENİLMESİ

Kalan dayanım, statik kaydırıcı etkileri karşılayamazsa zemin kütlesi akarak hareket edebilir.

DÖKÜNTÜ AKMALARI

Su ve zemin karışımı; kaya parçaları, kütük ve moloz taşıyabilir. Yağış ve kar erimesiyle tetiklenebilir, taşkınlara eşlik edebilir.

KISA ÖZET

Akmalar, farklı mekanizmalarla gelişebilen, zemin ve su karışımının yer değiştirdiği hızlı kütle hareketleridir. Başlıca türleri, depremle tetiklenen sıvılaşma akması ve yağışla gelişebilen döküntü akmasdır.

Deprem kaynaklı sıvılaşma akması

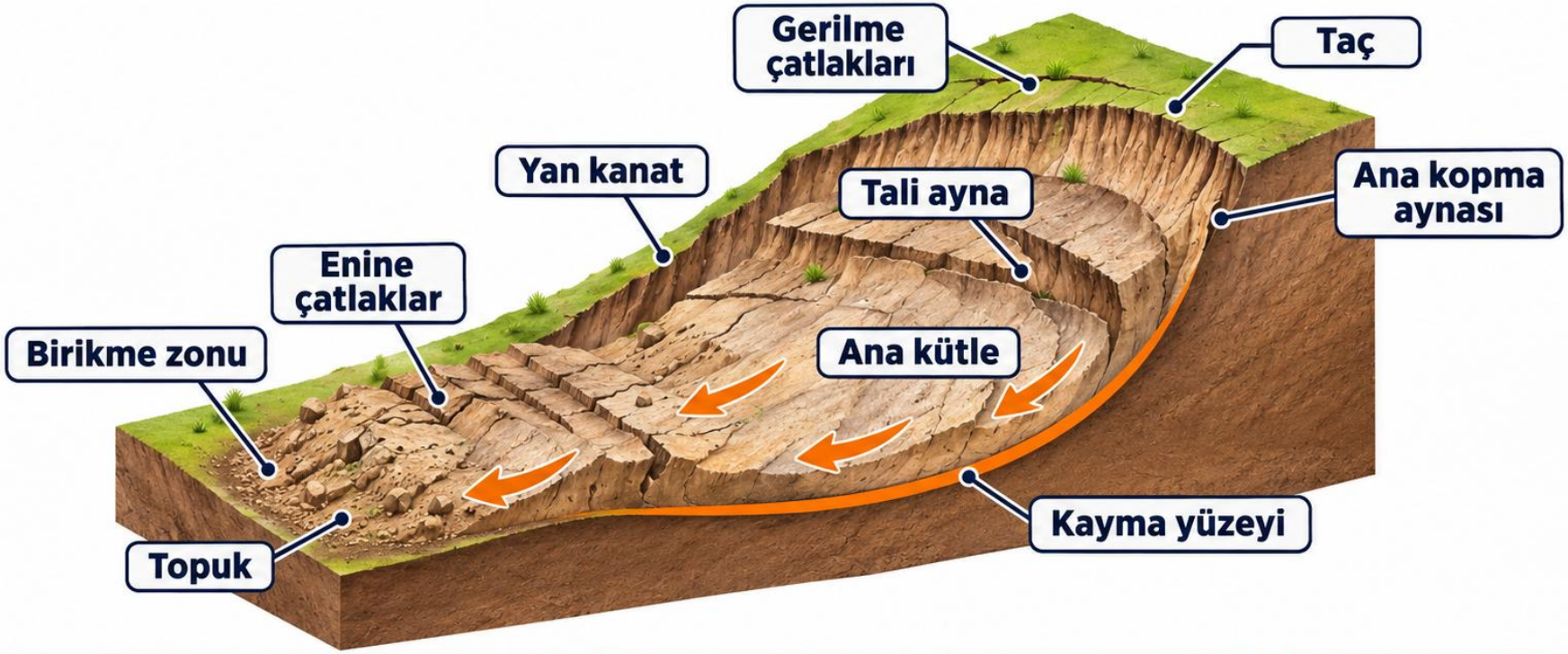


SARSINTI → BASINÇ ARTIŞI → DAYANIM KAYBI → AKMA

Hızlı akmalar uzun mesafelere ulaşabilir; taşınan iri malzemeler yapılarda ve araçlarda ağır hasar oluşturabilir.

Sıvılaşma her zaman akmaya dönüşmez; yağış kaynaklı döküntü akmaları farklı bir mekanizmayla gelişebilir.

HEYELANIN BÖLÜMLERİ VE GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ



TAÇ:	AYNA:	ANA KÜTLE:	KAYMA YÜZEYİ:	TOPUK:
Ana kopma aynasının gerisindeki üst bölüm.	Kopma sonucu açığa çıkan dik veya dike yakın yüzey.	Kayma yüzeyi boyunca yer değiştiren malzeme.	Hareketin geliştiği alt sınır.	Hareket eden kütlenin yamaç aşağı uy bölümü.

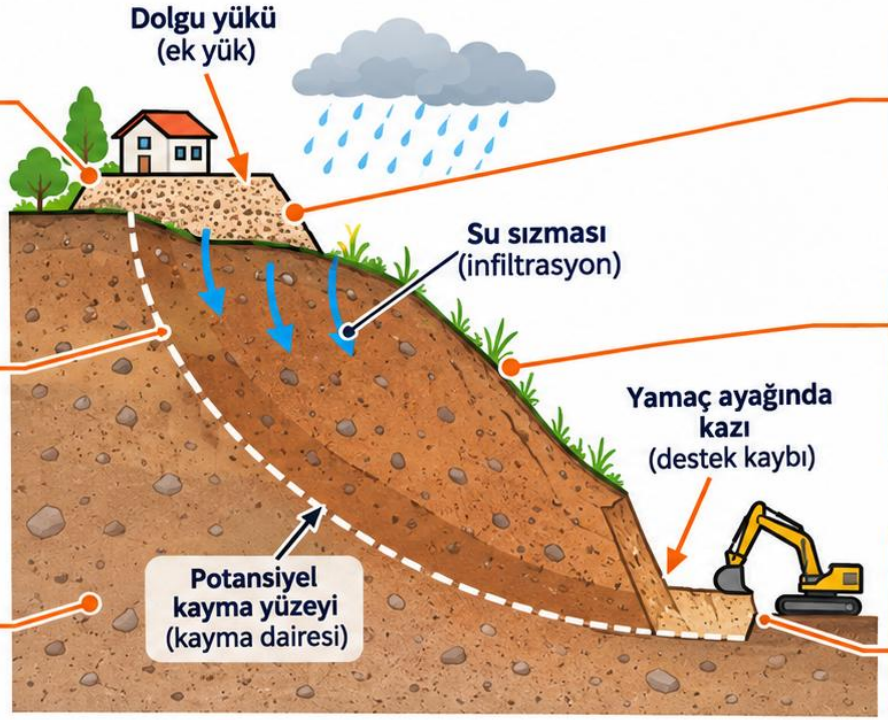
HEYELAN OLUŞUMUNU TETİKLEYEN FAKTÖRLER

HEYELAN OLUŞUMUNU TETİKLEYEN FAKTÖRLER

ŞİDDETLİ VE UZUN SÜRELİ YAĞIŞ
Su sızması ve boşluk suyu basıncı artısı

KAR ERİMESİ VE SU SEVİYESİ DEĞİŞİMİ
Zeminin doygunlaşması veya hızlı su çekilmesi

DEPREM VE TİTREŞİMLER
Geçici kuvvetler ve dayanım kaybı



YAMAÇ ÜSTÜNE EK YÜK
Dolgu, yapı ve malzeme birikimi

DRENAJIN BOZULMASI VE SU KAÇAKLARI
Yamaç içinde kontrolsüz su birikimi

YAMAÇ AYAĞINDA KAZI VE EROZYON
Desteğin azalması, eğimin dikleşmesi

Ortak etki: Kaydırıcı kuvvetlerin artması ve/veya kayma direncinin azalması.

Eğim, jeolojik yapı ve ayrışma, yamacın heyelana duyarlılığını belirler.

YAĞIŞLAR HEYELANI NASIL TETİKLER?

1 SU ZEMİNE SIZAR

Şiddetli veya uzun süreli yağış zeminin su içeriğini artırır.

2 KAYMA DİRENCİ AZALIR

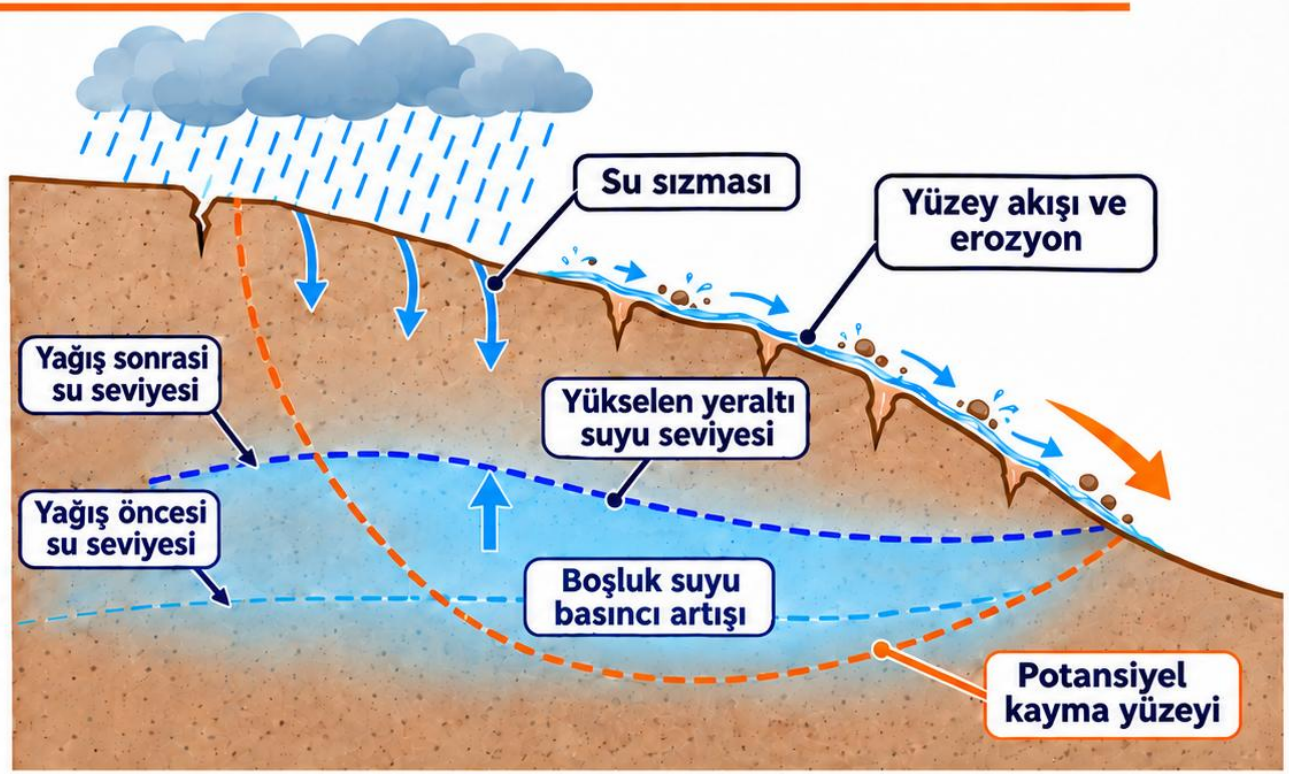
Boşluk suyu basıncı artar; efektif gerilme ve kayma dayanımı azalabilir.

3 STABİLİTE BOZULUR

Artan ağırlık ve azalan dayanım kaymayı tetikleyebilir.
Güvenlik katsayısı 1'in altına iner (FS < 1).

4 YÜZEYSEL EROZYON

Yüzey akışı zemini aşındırır; oyulma ve yerel destek kaybı oluşturabilir.



YAĞIŞ → SU SIZMASI → BASINÇ ARTIŞI → KAYMA

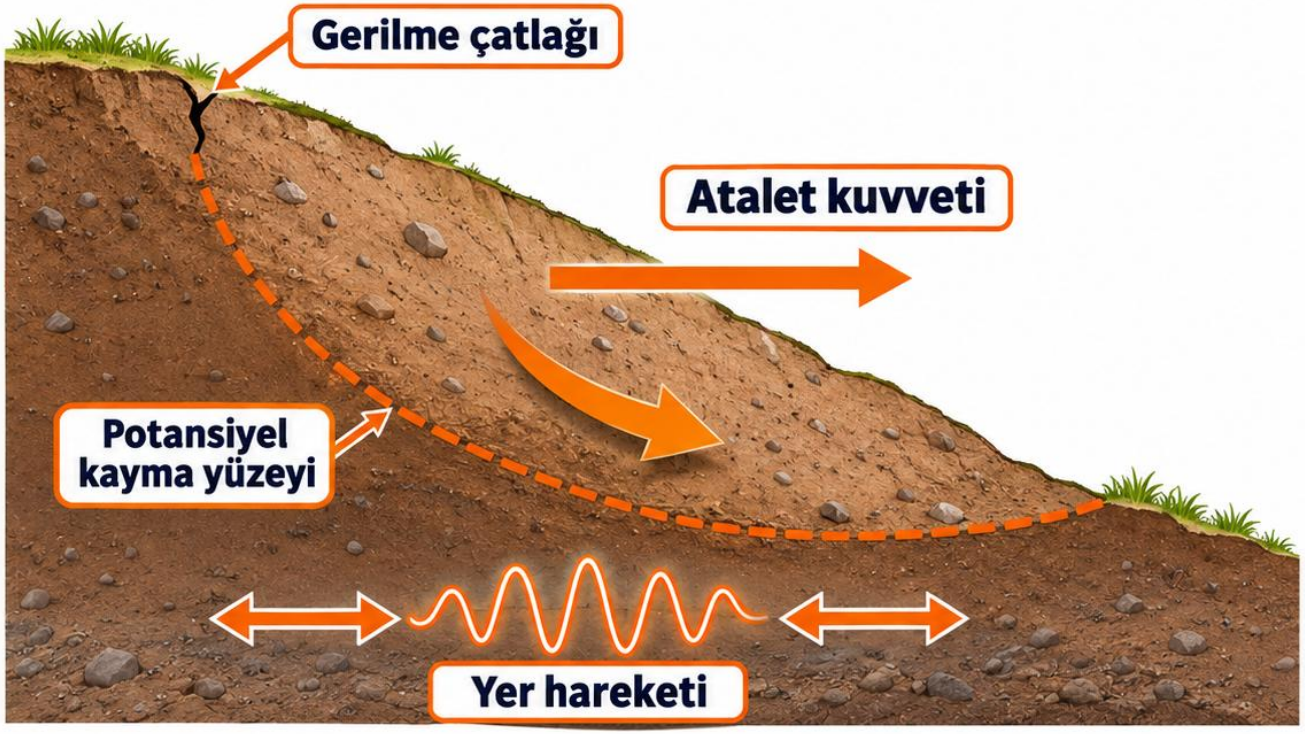
DEPREM VE TİTREŞİMLER HEYELANI NASIL TETİKLER?

1 KAYDIRICI KUVVETLER ARTAR
Sarsıntının oluşturduğu atalet kuvvetleri yamaç dengesini zorlar.

2 DAYANIM AZALABİLİR
Tekrarlı yükler zeminde deformasyona ve dayanım kaybına yol açabilir.

3 SU BASINCI ARTABİLİR
Suya doygun, duyarlı zeminlerde boşluk suyu basıncı artışı gelişebilir.

4 STABİLİTE BOZULABİLİR
Güvenlik katsayısı 1'in altına indiğinde kayma gelişebilir (FS < 1).



SARSINTI → ATALET KUVVETLERİ → STABİLİTE KAYBI → KAYMA

Titreşim kaynakları: Deprem • Patlatma • Kazık çakımı • Ağır makineler

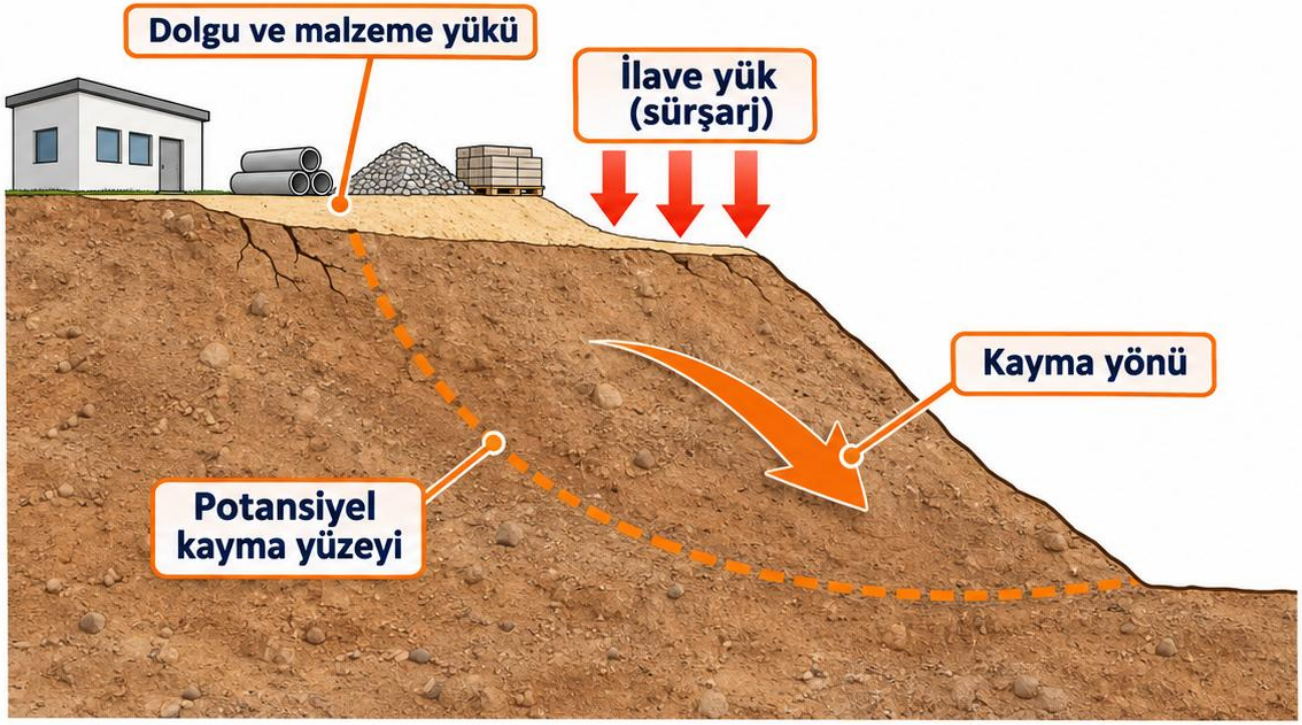
ŞEV ÜZERİNE YÜKLEME HEYELANI NASIL TETİKLER?

1 ŞEV ÜZERİNDE YÜK ARTAR
Dolgu, yapı, stok malzemesi ve ağır araçlar ilave yük oluşturur.

2 KAYDIRICI ETKİ ARTABİLİR
Özellikle şev başına yakın yükler, kaydırıcı kuvvet ve momentleri artırabilir.

3 ZEMİN TEPKİSİ DEĞİŞİR
Doygun ve az geçirgen zeminlerde hızlı yükleme boşluk suyu basıncını artırabilir.

4 STABİLİTE BOZULABİLİR
Güvenlik katsayısı 1'in altına indiğinde kayma gelişebilir (FS < 1).



EK YÜK → KAYDIRICI ETKİ ARTIŞI → STABİLİTE KAYBI → KAYMA

Etki; yükün büyüklüğüne, konumuna, yükleme hızına ve zemin özelliklerine bağlıdır.

ŞEVDE KAZI HEYELANI NASIL TETİKLER?

1 | ŞEVİN TOPUĞUNDA DESTEK AZALİR
Kazı, kaymaya karşı koyan zemin kütlesini kaldırabilir.

2 | ŞEV GEOMETRİSİ DEĞİŞİR
Dikleşen veya yüksekliği artan şevde kaydırıcı etkiler artabilir.

3 | GERİLMELER YENİDEN DAĞILIR
Gerilme boşalması çatlaklara ve deformasyonlara yol açabilir.

4 | STABİLİTE BOZULABİLİR
Güvenlik katsayısı 1'in altına indiğinde kayma gelişebilir (FS < 1).



KAZI → DESTEK KAYBI → STABİLİTE KAYBI → KAYMA

Özellikle şev topuğundaki kontrolsüz ve desteksiz kazılar stabiliteyi olumsuz etkileyebilir.

ŞEVDE DERİN KAZI HEYELANI NASIL TETİKLER?

1 YANAL DESTEK KALKAR
Derin kazı, yamaç kütlesinin önündeki desteği azaltabilir.

2 ŞEV GEOMETRİSİ DEĞİŞİR
Kazı derinliği arttıkça yüksek ve dik bir kazı yüzeyi oluşur.

3 DEFORMASYONLAR GELİŞEBİLİR
Gerilme değişimleri zeminde çatlaklara ve yer değiştirmelere yol açabilir.

4 STABİLİTE BOZULABİLİR
Güvenlik katsayısı 1'in altına indiğinde kayma gelişebilir (FS < 1).



DERİN KAZI → DESTEK KAYBI → STABİLİTE KAYBI → HEYELAN

Özellikle uygun iksa ve kazı sıralaması olmadan yapılan derin kazılar heyelanı tetikleyebilir.

HEYELANIN TESPİTİ

HEYELANLAR NASIL TESPİT EDİLİR?

1 ARAZİ BELİRTİLERİ

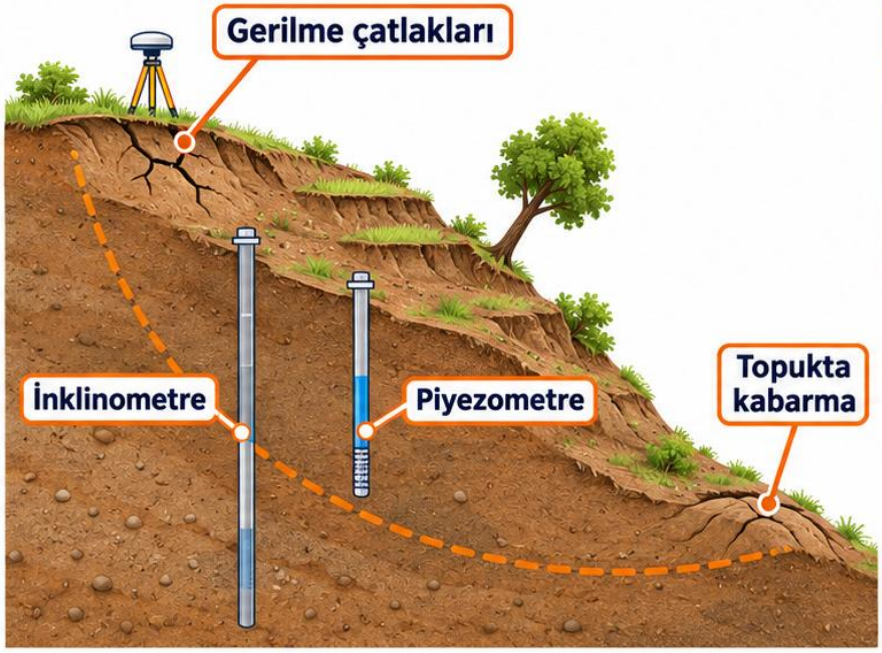


Çatlaklar, kademelenmeler, eğilen ağaç ve direkler, topukta kabarma.

2 ZEMİN ARAŞTIRMALARI



Sondajlar, numuneler ve deneylerle zemin yapısı ve olası kayma zonu araştırılır.



3 HAREKETİN ÖLÇÜLMESİ



İnklinometre ile derindeki; GNSS ve jeodezik ölçümlerle yüzeydeki yer değiştirmeler izlenir.

4 SU VE UZAKTAN ALGILAMA



Piyezometre ile su basıncı; İnSAR, LiDAR ve İHA ile yüzey değişimleri izlenir.

GÖZLEM → **ARAŞTIRMA** → **ÖLÇÜM** → **BİRLİKTE DEĞERLENDİRME**

⚠ Yüzey belirtileri tek başına kesin tanı koydurmaz; bulgular ölçüm ve araştırmalarla birlikte değerlendirilir.

HEYELANIN ARAZİDEKİ BELİRTİLERİ



Bu belirtiler heyelana işaret edebilir; bina çatlakları tek başına heyelan kanıtı değildir.













ARAZİ VE LABORATUVAR DENEYLERİ İLE HEYELANIN İNCELENMESİ

Arazi boyunca zemin profili oluşturulur; kaymaya duyarlı zonlar profil üzerinde gösterilir.

ARAZİ ARAŞTIRMALARI

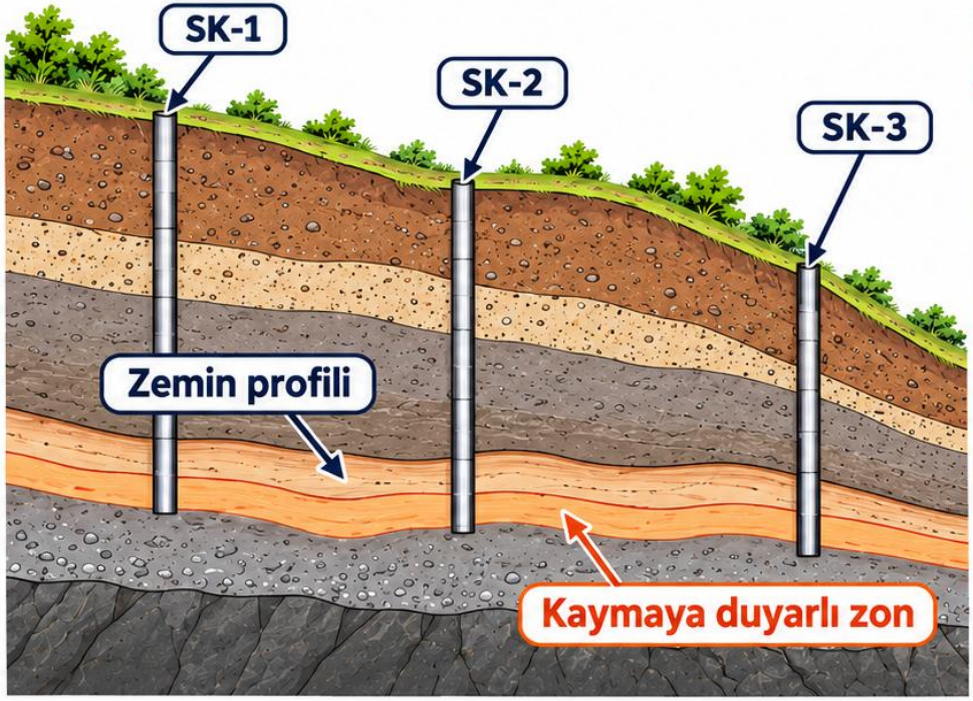


- Sondaj ve numune alma
- SPT, CPTu, kanatlı kesici, presiyometre

ELDE EDİLEN BİLGİLER



- Tabakalanma, zayıf seviyeler ve yerinde zemin davranışı

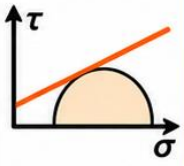


LABORATUVAR DENEYLERİ



- Sınıflandırma ve su muhtevası
- Kesme kutusu, üç eksenli ve konsolidasyon deneyleri

ELDE EDİLEN PARAMETRELER



- Kayma dayanımı, sıkışabilirlik ve fiziksel özellikler

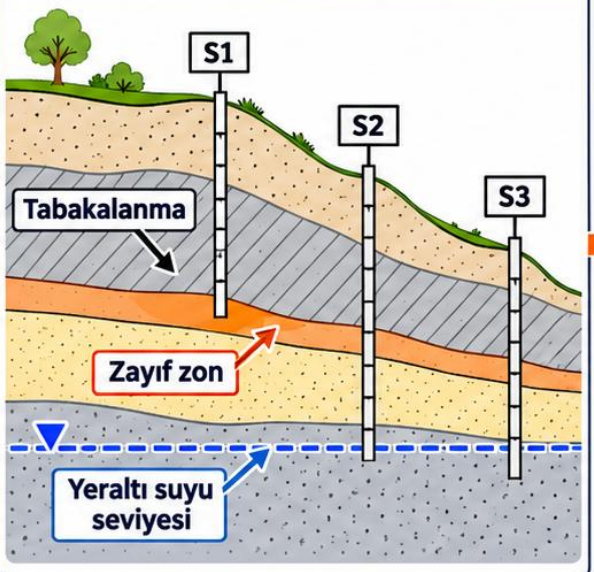
ARAZİ + LABORATUVAR → ZEMİN PROFİLİ → KAYMAYA DUYARLİ ZONLAR

Arazi ve laboratuvar verileri birlikte değerlendirilerek stabilite analizlerine esas zemin modeli oluşturulur.

ZEMİN MODELİNDEN ŞEV STABİLİTE ANALİZİNE

Arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin profili ve zemin parametreleri, şev stabilite analizlerinde kullanılır.

1 ZEMİN PROFİLİ



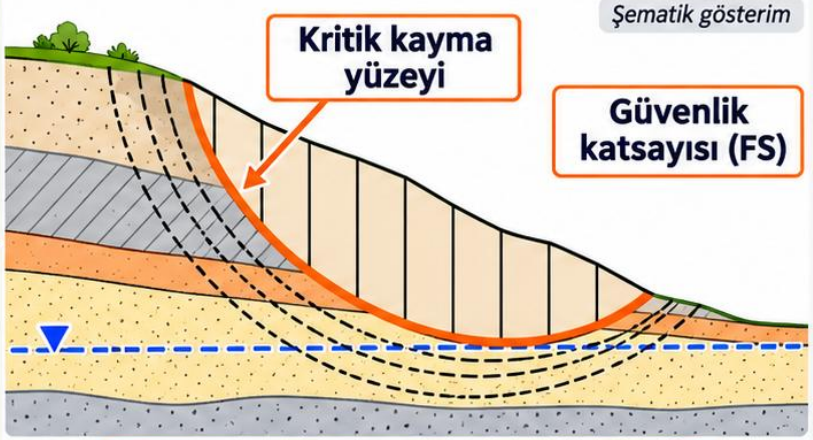
2 ZEMİN PARAMETRELERİ

- Birim hacim ağırlık: γ
- Kohezyon: c'
- İçsel sürtünme açısı: ϕ'
- Drenajsız kayma dayanımı: su
- Su basıncı ve drenaj koşulları

Parametreler analiz koşullarına uygun seçilir.

3 ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

Şematik gösterim



$$FS = \frac{\text{Kaymaya karşı koyan etkiler}}{\text{Kaydırıcı etkiler}}$$

Kritik kayma yüzeyi | **Güvenlik katsayısı** | **İyileştirme gereksinimi**

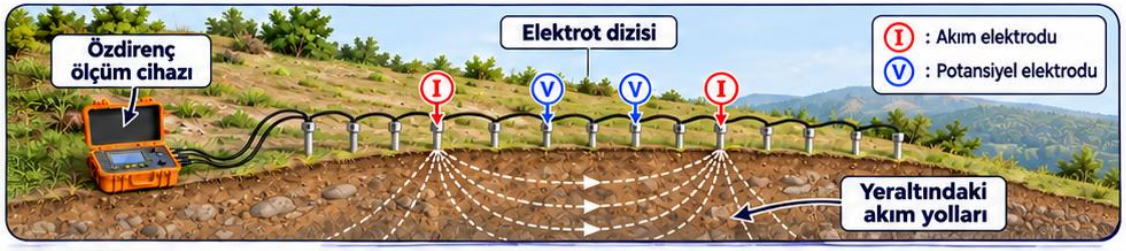
Analizlerde şev geometrisi, yeraltı suyu, ek yükler ve deprem etkileri birlikte değerlendirilir.

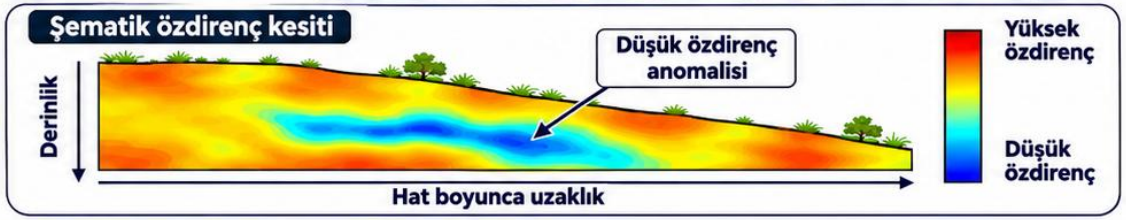
ELEKTRİK ÖZDİRENÇ TOMOGRAFİSİ (ERT)

Zeminin mühendislik dayanımının düşük olabileceği bölgelerin belirlenmesine yardımcı olur.

NASIL ÇALIŞIR?

Toprağa yerleştirilen elektrotlar yardımıyla yer altına doğru akım verilir ve oluşan potansiyel farkı ölçülür. Ohm yasası temelinde özdirenç dağılımı modellenir.





KULLANIM ALANLARI

HİDROJEOLOJİ
Yeraltı suyu ve akifer araştırmaları; su tablasının yorumlanması.

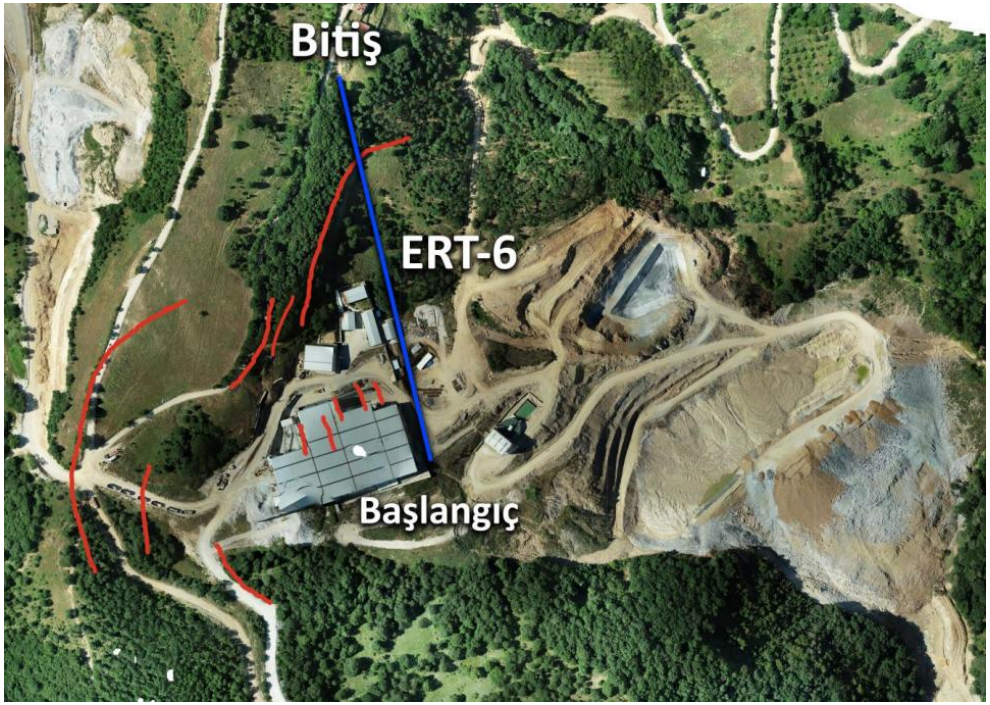
MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ
Zemin etütleri, birimlerin ayrımı ve ana kaya derinliği.

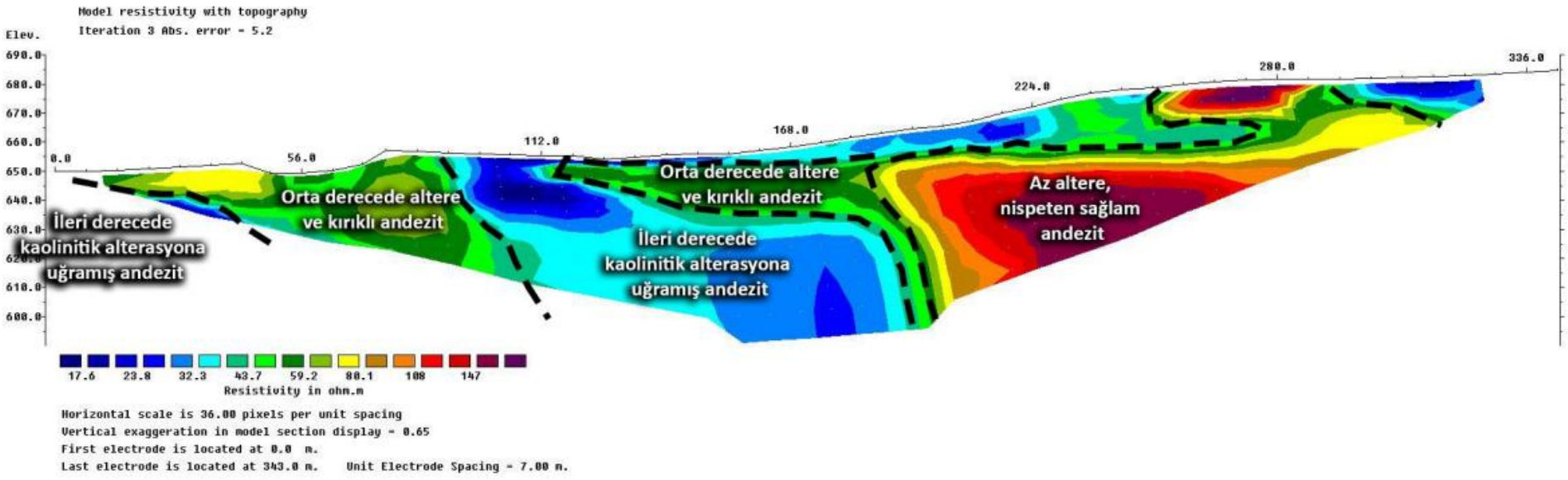
AFET VE RİSK ARAŞTIRMALARI
Fay zonları, olası heyelan zonları ve karstik boşlukların araştırılması.

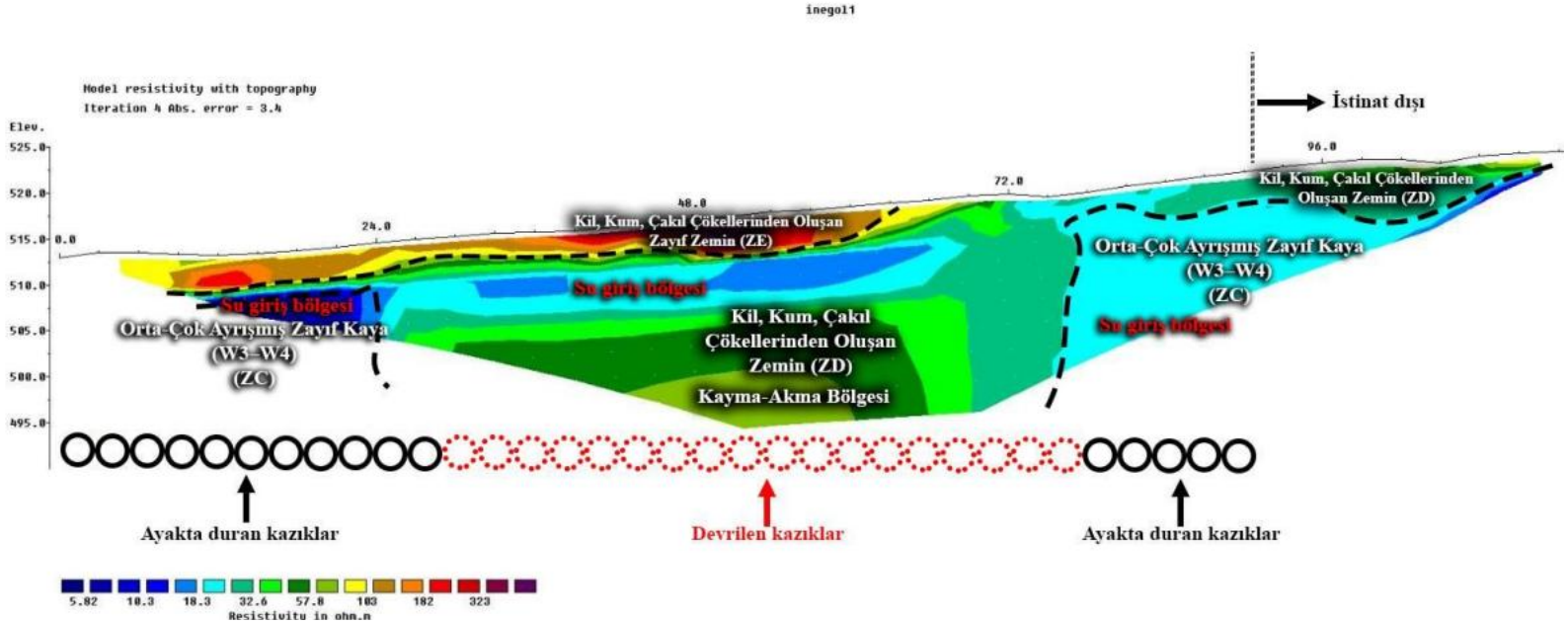
ÇEVRE VE KİRLİLİK
Kirletici sızıntıları ve tuzlu su girişiminin izlenmesi.

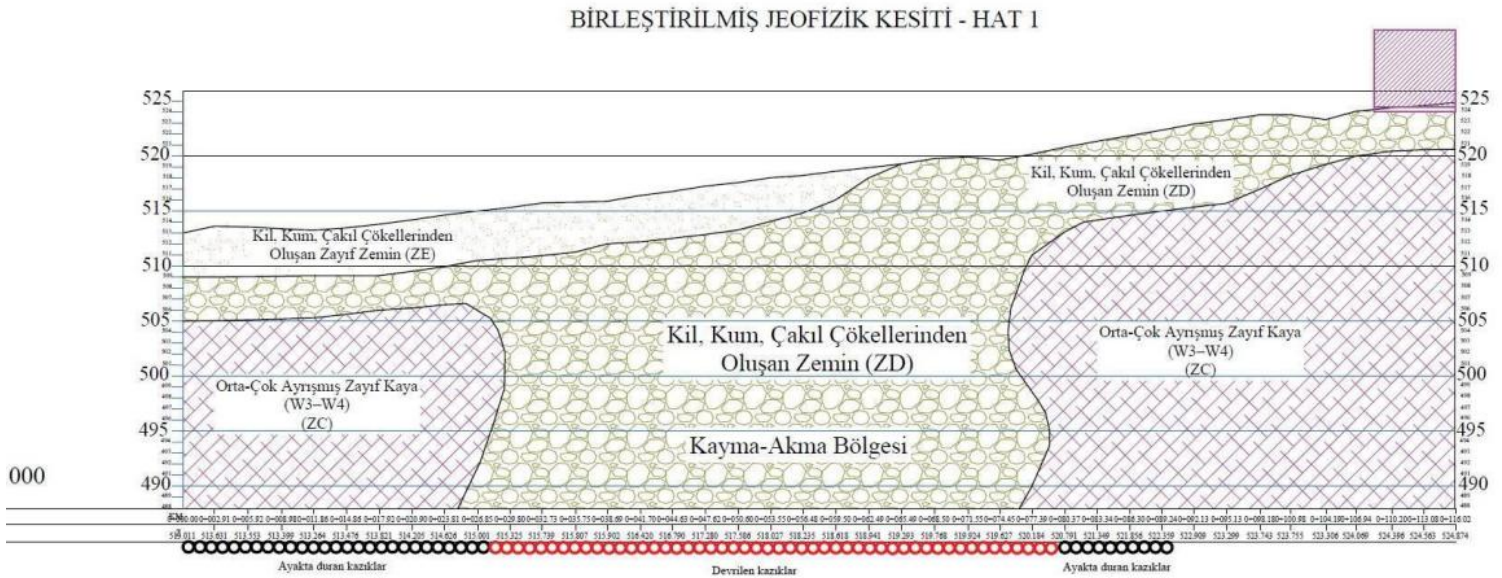
MADENCİLİK VE ARKEOLOJİ
Maden aramaları ve gömülü yapıların araştırılması.

Özdirenç anomalileri, sondaj ve jeolojik verilerle birlikte yorumlanır; tek başına dayanımı göstermez.


Bitiş
ERT-6
Başlangıç


Model resistivity with topography
Iteration 3 Abs. error = 5.2
Elev.
690.0
680.0
670.0
660.0
650.0
640.0
630.0
610.0
600.0
0.0
56.0
112.0
168.0
224.0
280.0
336.0
İleri derecede kaolinitik alterasyona uğramış andezit
Orta derecede altere ve kırıklı andezit
İleri derecede kaolinitik alterasyona uğramış andezit
Orta derecede altere ve kırıklı andezit
Az altere, nispeten sağlam andezit
17.6
23.8
32.3
43.7
59.2
80.1
108
147
Resistivity in ohm.m
Horizontal scale is 36.00 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.65
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 343.0 m.
Unit Electrode Spacing = 7.00 m.


inegol1
Model resistivity with topography
Iteration 4 Abs. error = 3.4
Elev.
525.0
520.0
515.0
510.0
505.0
500.0
495.0
0.0
24.0
48.0
72.0
96.0
İstinat dışı
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zayıf Zemin (ZE)
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zemin (ZD)
Orta-Çok Ayrışmış Zayıf Kaya (W3–W4) (ZC)
Su giriş bölgesi
Su giriş bölgesi
Orta-Çok Ayrışmış Zayıf Kaya (W3–W4) (ZC)
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zemin (ZD)
Kayma-Akma Bölgesi
Su giriş bölgesi
Ayakta duran kazıklar
Devrilen kazıklar
Ayakta duran kazıklar
5.82
10.3
18.3
32.6
57.8
103
182
323
Resistivity in ohm.m


BİRLEŞTİRİLMİŞ JEOFİZİK KESİTİ - HAT 1
525
520
515
510
505
500
495
490
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zayıf Zemin (ZE)
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zemin (ZD)
Orta-Çok Ayrışmış Zayıf Kaya (W3–W4) (ZC)
Kil, Kum, Çakıl Çökellerinden Oluşan Zemin (ZD)
Orta-Çok Ayrışmış Zayıf Kaya (W3–W4) (ZC)
Kayma-Akma Bölgesi
Ayakta duran kazıklar
Devrilen kazıklar
Ayakta duran kazıklar

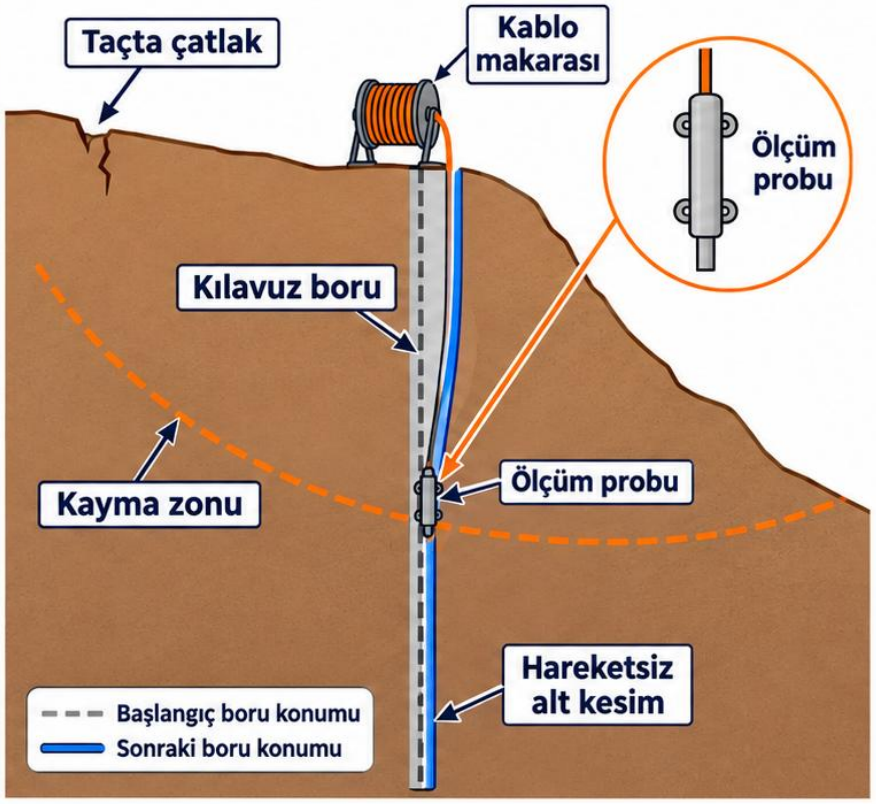
İNKLİNOMETRE İLE HEYELAN DERİNLİĞİNİN TESPİTİ

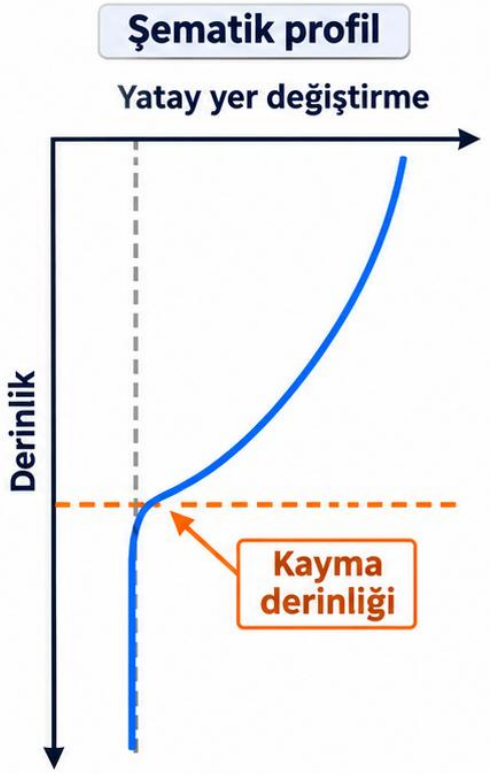
İNKLİNOMETRE NEDİR?

Sondaj kuyusuna yerleştirilen kılavuz boru içinde eğim değişimlerini ölçen bir sistemdir. Tekrarlı ölçümlerden derinlik boyunca yatay yer değiştirmeler hesaplanır.

KAYMA DERİNLİĞİ NASIL BELİRLENİR?

Yer değiştirme profilindeki belirgin değişim, kayma zonunun derinliğine işaret eder. Boru, kayma zonunun altındaki hareketsiz zemine kadar uzatılır.

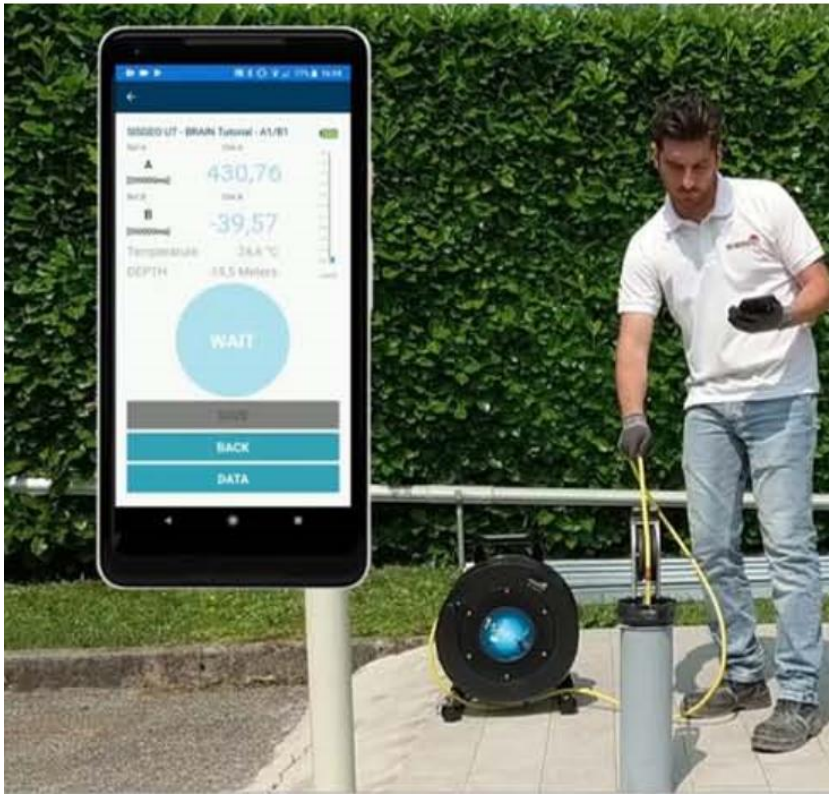




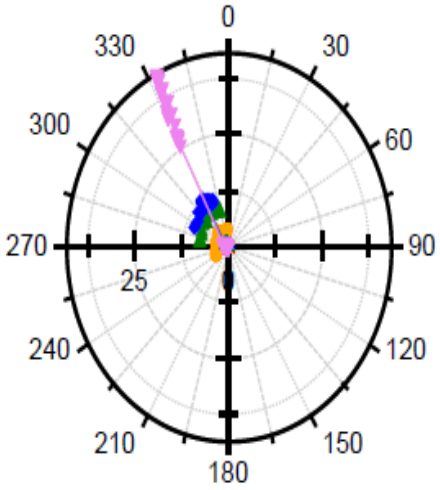
Kayma zonu, tekrarlı ölçümlerde yer değiştirmenin yoğunlaştığı derinlik aralığından belirlenir.




Digitilt AT
Digitilt Reader
DGSI

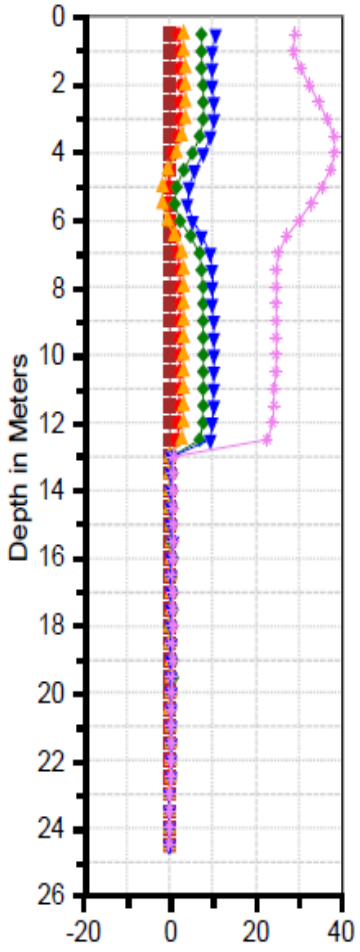

430,76
-39,57
WAIT
BACK
DATA

INK-2 (SK4) 1 Top View



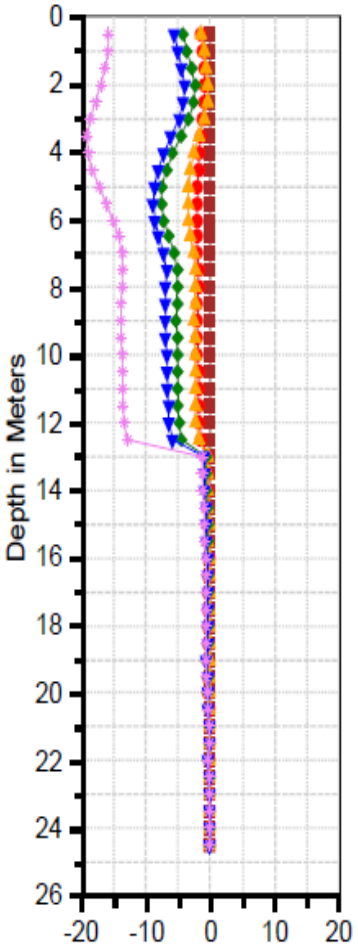
Resultant Profile_Change in mm

INK-2 (SK4) 1 A



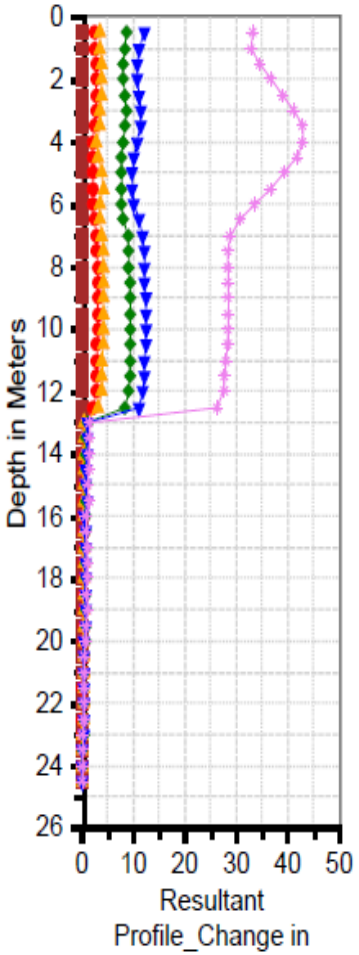
Profile Change in mm
Corrections:
Orientation

INK-2 (SK4) 1 B



Profile Change in mm
Corrections:
Orientation

INK-2 (SK4) 1 Magnitude



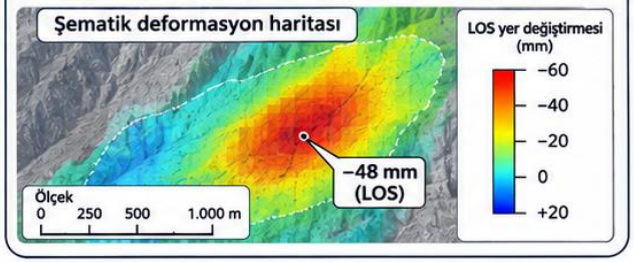
Resultant
Profile_Change in mm
Corrections:
Orientation

InSAR, LiDAR VE İHA İLE YÜZEY HAREKETİNİN TESPİTİ

1 InSAR | Uydu radar interferometrisi

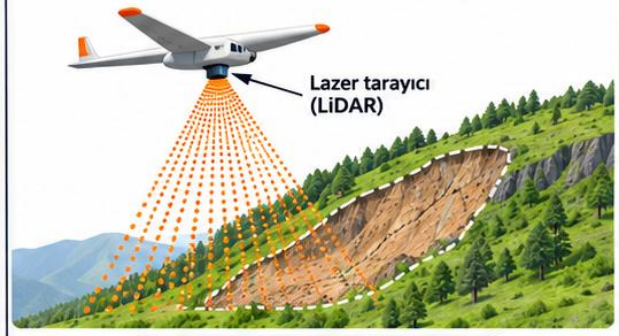
- Farklı tarihlerdeki radar görüntülerinin faz farkları karşılaştırılır.
- Uydu bakış doğrultusundaki yüzey yer değiştirmesi belirlenir.

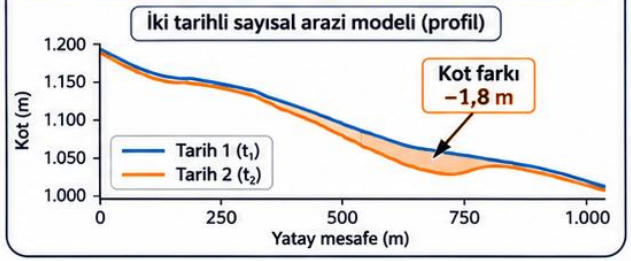




2 LiDAR | Lazer tarama

- Tekrarlı taramalarla ayrıntılı üç boyutlu yüzey modelleri oluşturulur.
- Modeller karşılaştırılarak yüzeydeki konum ve kot değişimleri araştırılır.





3 İHA | Fotogrametri

- Örtüşen fotoğraflardan ortofoto ve üç boyutlu yüzey modeli üretilir.
- Farklı tarihler karşılaştırılarak çatlaklar ve yüzey yer değiştirmeleri izlenir.





TEKRARLI ÖLÇÜM → **TARİHLERİN KARŞILAŞTIRILMASI** → **YÜZEY DEĞİŞİMİ**

Bu yöntemler yüzey değişimini izler; kayma derinliği için zemin araştırmaları ve kuyu içi ölçümler gerekir.

ŞEV DURAYLILIK PROBLEMLERİNİN ANALİZİ

Şev duraylılığı, nitel ve nicel yöntemlerin birlikte değerlendirilmesiyle incelenir.

NİTEL YAKLAŞIM



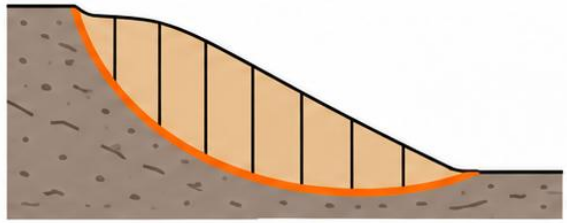
- Saha gözlemleri ve jeolojik haritalama
- Geçmiş hareketler ve performans
- Olası yenilme mekanizmasının tanımlanması

YARI NİCEL YAKLAŞIM



- Gözlemlerin sınıflandırılması
- Puanlama ve karşılaştırmalı değerlendirme
- Ön inceleme ve önceliklendirme

NİCEL YAKLAŞIM



- Zemin parametrelerine dayalı hesap
- Güvenlik katsayısı ve deformasyon
- Limit denge ve sayısal analiz

HAREKET TÜRÜNE UYGUN YÖNTEM



Düşme ve devrilme:
Süreksizlik geometrisi ve kinematik değerlendirme.



Kaymalar:
Kayma yüzeyi ve güvenlik katsayısı.



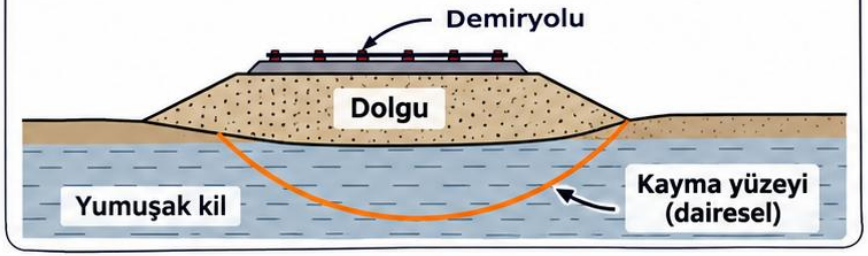
Akmalar:
Akış davranışı ve ulaşma mesafesi.

Hesap sonuçları; saha gözlemleri, jeolojik model ve izleme verileriyle biriikte yorumlanır.

MODERN ŞEV DURAYLILIK ANALİZLERİNİN KÖKENİ

İSVEÇ'TE GEOTEKNİK SORUNLAR

- Hassas deniz killerindeki düşük kayma dayanımı, yarma ve dolgu çalışmalarında duraysızlıklara yol açmıştır.
- Liman ve demiryolu inşaatları, sistematik incelemeleri hızlandırmıştır.



1913 — **Demiryolu göçmesi**
Yaşanan yenilme, sistematik araştırma ihtiyacını ortaya koydu.

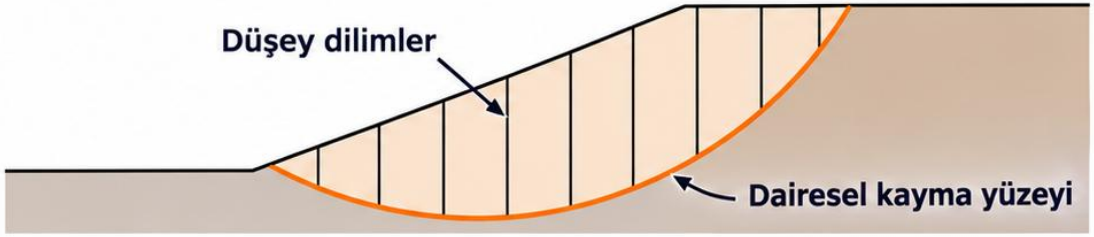
↓

1910'LAR — **Geoteknik Komite çalışmaları**
İsveç Devlet Demiryolları bünyesinde incelemeler yürütüldü.

↓

1922 — **Komite raporu**
İsveç kayma dairesi yaklaşımı raporlandı.

İSVEÇ KAYMA DAİRESİ YAKLAŞIMI



- **Dairesel kayma yüzeyi varsayımı**
- **Daha sonra geliştirilen analiz yöntemlerine temel oluşturdu.**

1920'lerden itibaren yöntem, farklı denge kabulleri ve hesap teknikleriyle geliştirilmiştir.

İSVEÇ KAYMA DAİRESİ VE DİLİM YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ

1913-1914: Demiryolu komisyonu

- Yarma ve dolgulardaki yenilmeler üzerine sistematik incelemeler başlatıldı.

1916: Stigberg Rıhtımı

- Göteborg'daki göçme incelemeleri, dairesel kayma yüzeyi yaklaşımının gelişimine katkı sağladı.

1922: Nihai rapor

- İsveç Geoteknik Komisyonunun çalışmaları yayımlandı.

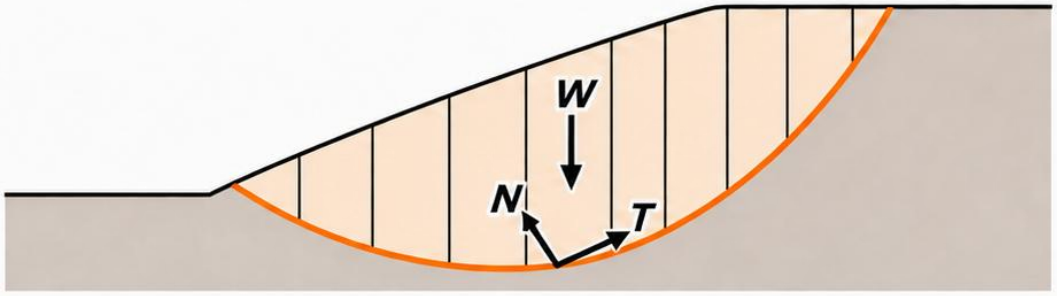
FELLENIUS'UN KATKISI

- Dairesel kayma yaklaşımını kohezyon ve sürtünmeyi içerecek biçimde geliştirdi; dilim yönteminin yaygınlaşmasına katkı sağladı.

GEOTEKNİK TERMİNOLOJİSİ

- Komisyon çalışmaları, geoteknik kavramının ve disiplininin kurumsallaşmasında önemli rol oynadı.

İSVEÇ DİLİM YÖNTEMİ (FELLENİUS)



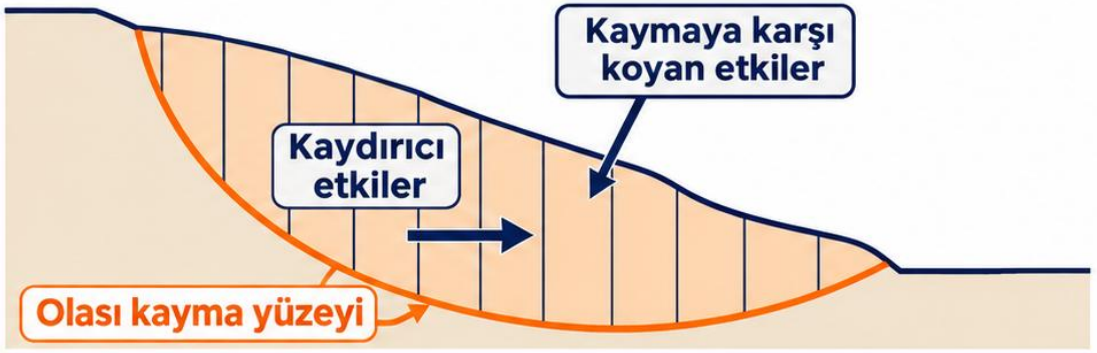
- Kayan kütle düşey dilimlere ayrılır.
- Dilim ağırlıkları ve tabandaki kayma direnci değerlendirilir.
- Dilimler arası kuvvetler ihmal edilir.

Hesabı basittir; çoğu durumda daha düşük güvenlik katsayısı verebilir, ancak bu her koşulda garanti değildir.

SINIR DENGE ANALİZİ VE GÜVENLİK KATSAYISI

SINIR DENGE YAKLAŞIMI

Olası kayma yüzeyi boyunca mevcut kayma dayanımı ile mobilize kayma gerilmesi karşılaştırılır. **Kütlenin bütünü için denge** değerlendirilir.



DETERMİNİSTİK ANALİZ

Seçilen geometri, zemin parametreleri ve su koşulları için bir **güvenlik katsayısı** hesaplanır.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau}$$

τ_f : Kayma dayanımı

τ : Mobilize kayma gerilmesi

$F < 1$	$F = 1$	$F > 1$
Dayanım yetersiz	Sınır denge	Teorik dayanım payı

TASARIMDA BELİRSİZLİKLER

Zemin profili • Kayma dayanımı • Yeraltı suyu • Yükleme koşulları

F > 1 olması tek başına tasarım yeterliliğini göstermez; hedef güvenlik düzeyi proje koşulları ve ilgili kriterlerle belirlenir.

TOPLAM VE EFEKTİF GERİLME ANALİZLERİ

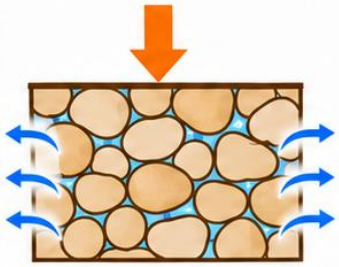
EFEKTİF GERİLME ANALİZİ

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

- c': Efektif kohezyon
- ϕ': Efektif içsel sürtünme açısı
- u: Boşluk suyu basıncı

Kum ve çakıllarda, drenajın sağlandığı statik koşullarda genellikle efektif gerilme analizi kullanılır. Yüklemeden doğan aşırı boşluk suyu basıncı azdır veya sönümlenir.



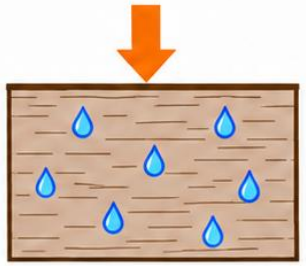
TOPLAM GERİLME ANALİZİ

$$\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u$$

$\phi_u = 0$ kabulünde: $\tau_f = s_u$

- c_u, ϕ_u: Toplam gerilme dayanım parametreleri
- s_u: Drenajsız kayma dayanımı

Doygun silt ve killerde, kısa süreli drenajsız koşullarda toplam gerilme analizi kullanılabilir. Oluşan aşırı boşluk suyu basıncının etkisi drenajsız kayma dayanımıyla temsil edilir.



YÖNTEM SEÇİMİ

Geçirgenlik • Yükleme süresi • Drenaj koşulları • Doygunluk

Analiz türü yalnızca zemin adına göre seçilmez; dayanım parametreleri ve su koşulları tutarlı kullanılmalıdır.

KRİTİK KAYMA YÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

1

OLASI YÜZEYLER TANIMLANIR

Jeolojik yapı ve zemin profiline uygun farklı potansiyel kayma yüzeyleri seçilir.

2

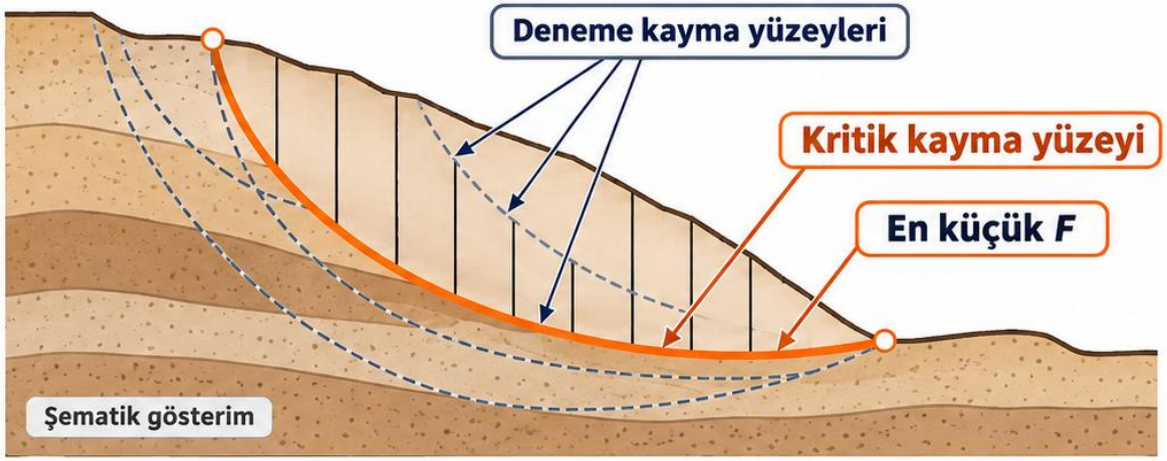
HER YÜZEY İÇİN F HESAPLANIR

Deneme yüzeyleri sistematik veya otomatik arama yöntemleriyle analiz edilir.

3

EN KÜÇÜK F BELİRLENİR

İncelenen yüzeyler arasında en düşük güvenlik katsayısını veren yüzey kritiktir.





BİLGİSAYAR DESTEKLİ ARAMA

Çok sayıda yüzey taranır; kritik bölge daha ayrıntılı incelenir.

YÜZEY SEÇİMİ → **GÜVENLİK KATSAYISI HESABI** → **KARŞILAŞTIRMA** → **KRİTİK YÜZEY**

$$F_{kritik} = \min(F_1, F_2, \ldots, F_n)$$

Sonuç, kullanılan zemin modeli, yükleme ve su koşulları ile arama kapsamına bağlıdır.