



"Cumhuriyetin İlk Üniversitesi"

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

Jeoloji
Mühendisliği

KAYA MEKANIĞI DERS NOTLARI

Ders : Kaya Mekaniği
Konu : Kaya Mekaniğine Giriş
Hazırlayan : Doç. Dr. Mustafa FENER
Sunan : Doç. Dr. Mustafa FENER
Yıl : 2014



KAYA MEKANİĞİ HAFTALIK DERS PROGRAMI

1. Hafta : Kaya Mekaniğine Giriş
1. Hafta : Kaya Malzemesi ve Kaya Kütlesi Kavramı
1. Hafta : Kayaçların Malzeme Ölçeğinde Tanımlanması
2. Hafta : Kayalarda Gerilme Birim Deformasyon
3. Hafta : Kayanın Yüklemeler Karşısında Davranışı
4. Hafta : Kayada Yenilme (Kırılma) Kriterleri
5. Hafta : Yerinde Gerilmeler ve Gerilme Dağılımları
6. ve 7. Hafta : Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri
8. Hafta : Sınav Haftası
9. Hafta : Kayada Tünel Açma Yöntemleri
10. Hafta : Tünellerde Yenilme Mekanizmaları ve Tahkimat Tasarımı
11. ve 12. Hafta : Kaya Mekaniğinin Yüzey Yapılarına Uygulanması
13. ve 14. Hafta : Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri
15. Hafta : Kaya Mekaniği Arazi Deneyleri
16. Hafta : Kaya Zeminlerde Taşıma Gücü
16. Hafta : Kayada Enjeksiyon Uygulamaları

SUNU PLANI

Kaya Mekaniğine Giriş

- Kaya Mekaniği ve Tarihçesi
- Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliğinin Tanımı
- Kaya Mühendisliğinin Çalışma Alanlarının Sınıflandırılması
- Yüzeylerde Kaya Mühendisliği
 - Doğal Kaynaklar Olarak Taş; Taş Ocakları ve Kaya Kullanımı
 - Kaya Yamaç Şevlerin Stabilitesi ve Kazıları
 - Kaya Temeller
 - Barajlar
 - Yüzeye Yakın İnşaatlar
- Yeraltında Kaya Mühendisliği
 - Tüneller ve Şehirleşme
 - Yeraltı Açıklıkları
 - Madencilik ve İnşaat Mühendisliği Alanları
 - Rezervuar Mühendisliği

Kaya Malzemesi ve Kaya Kütlesi Kavramı

Kayaçların Malzeme Ölçeğinde Tanımlanması

Kaya Mekaniği ve Tarihçesi

- Tarihi maden ve inşaat mühendisliğinin ilk günlerine dayanır.
- M.Ö. 2000 yıllarında Mısırda ve sonraki Roma dönemlerinde taş işleme işçiliği önem kazandı.

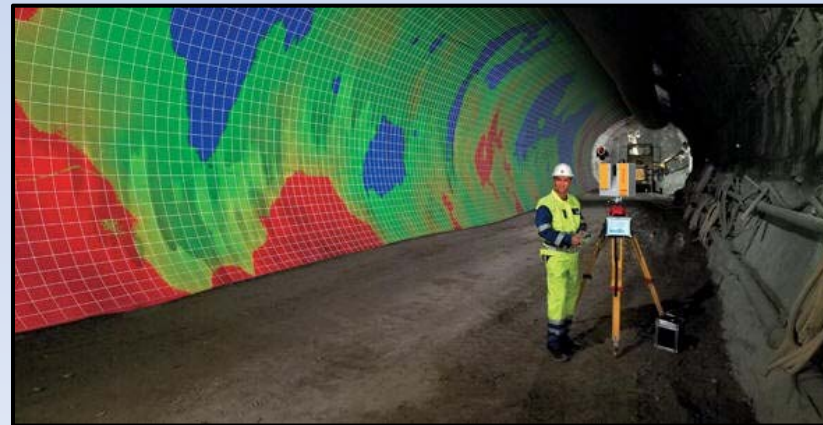
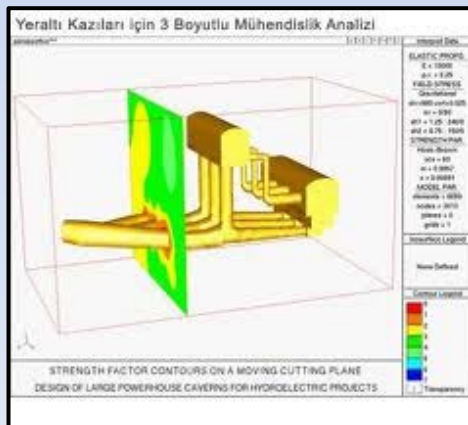


- Askeri amaçlı ilk yeraltı kazıları günümüz tünel teknolojisinin temelini oluşturur.
- Kaya mekaniğinin ilk tanımı 1964 yılında ABD ulusal Kaya Mekaniği tarafından yapılmıştır.
- Kaya mekaniği: kaya kütleleri ve kayanın mekanik davranışını inceleyen teorik ve uygulamalı bir bilimdir.
- Kaya mekaniği jeomekaniğin bir alt dalıdır.
- Endüstriyel yapıların büyümesiyle kaya mekaniği kendisine daha iyi yer bulmuştur.
- Kaya kütlelerinin davranışı ile zeminin davranışı aynı değildir.

- Son 100 yıldaki aşağıdaki gelişmeler ve buluşlar kaya mekaniğinin gelişmesinde önemli yer tutar.

- Dinamit ve AN /FO patlayıcılar : 1867
- Elektrikli detonatör : 1876
- Tünel açma makinaları : 1881
- Püskürtme harç : 1909
- Kaya blonları : 1918
- Püskürtme beton : 1942
- Sondaj burgusu : 1940
- Yeni Avusturya tünel açma yöntemi : 1950
- Darbeli sondaj : 1971

- Günümüz koşullarında yapılan birtakım ölçümlerle kaya kütlelerini modelleyebiliriz.



Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliğinin Tanımı

- Kaya Nedir ?
- **Kaya**; Tortul, magmatik yada metamorfik kökenden gelen kristalli veya taneli sert ortamlara kaya denir.
- Mekanik Nedir ?
- **Mekanik**; Bir cismin hareketini ve dengesini inceleyen bilim dalıdır. Bir malzemenin uygulanan bir kuvvet karşısında verdiği tepki ise bu malzemenin mekanik davranışıdır.
- Kaya Mekaniği Nedir ?
- **Kaya Mekaniği**; Kaya ve kaya kütlelerinin mekanik davranışını inceleyen kuramsal ve uygulamalı bilim dalıdır. Mekaniđin bu dalı kaya ve kaya kütlelerinin buldukları fiziksel ortamlarda, etkisi altında kaldıkları kuvvet alanlarına karşı tepkisini kapsar
- Kaya Mühendisliği Nedir ?
- **Kaya Mühendisliği**; Kaya mekaniğinin tünel, baraj, temel vs gibi herhangi bir mühendislik projesi alanındaki uygulamalarını kapsar.
- Herhangi bir kaya kütlelerinin yerçekimi etkisiyle yamaç aşağı doğru hareketi kaya mekaniğinin konusu iken, bir yol güzergahındaki şevlerin dizaynı kaya mühendisliğinin konusudur.



Kaya Mekanığı



Kaya Mühendisliği

- Jeoteknik Mühendisliği Nedir ?

- **Jeoteknik Mühendisi**; Yerkürenin davranışını, malzeme kullanımı ve yer ile ilgili mühendislik sorunlarının çözümü için bilimsel yöntemlerin ve mühendislik ilkelerinin veri toplama değerlendirme, analiz ve tasarım amacıyla ve yeri oluşturan jeolojik malzemelere ilişkin bilgilerin kullanılmasını kapsayan, zemin mekaniği ve kaya mekaniğinin yanı sıra, uygulamalı jeoloji ve jeofiziğin pek çok kavramlarını da içine alan disiplinler arası uygulamalı bir bilimdir (ISEG, 2006)

- Jeolog ile jeoteknik mühendisi arasındaki fark nedir ?

- **Jeolog**; Klasik anlamda kayaçların tarihini ve orijinlerini anlamaya çalışan kişi. **Jeoteknik Mühendisi veya mühendislik jeologu**; jeolojik bir malzemenin doğrudan yada dolaylı olarak mühendislik projelerinde kullanılması durumunda geleceğe ait davranışlarını inceleyen kişidir.

Kaya Mühendisliğinin Çalışma Alanlarının Sınıflandırılması

Çalışma Alanları	Proje Türü	Çalışmanın Türü
Yüzey Yapıları	Konut arsaları	Kaya şevler, heyelanlar, patlatma, deformasyon analizi, sökülebilirlik
	Köprüler, yüksek binalar, enerji yapıları	Jeoteknik sondaj, heyelan, fay, beton agregası, ankraj, taşıma gücü
	Barajlar	Heyelan, fay, agrega, gövde tipi seçimi, tünel ve şev destekleri, deformasyon analizi, patlatmalar
	Taş ocakları ve maden işi	Kaya şevler, heyelanlar, patlatma, deformasyon analizi, sökülebilirlik ve kesilebilirlik
	Dolu savaklar	Kaya şevler, heyelanlar, patlatma, deformasyon analizi, sökülebilirlik

Çalışma Alanları	Proje Türü	Çalışmanın Türü
Ulaşım Hatları	Kara ve demiryolları	Heyelan, kazı yönelimi ve eğimi, şevler, patlatma, deformasyon analizi
	Kanallar ve boru hatları	Heyelan, kazı yönelimi ve eğimi, şevler, patlatma, deformasyon analizi
	Cebri borular	Heyelan, deformasyon analizi

Çalışma Alanları	Proje Türü	Çalışmanın Türü
Yeraltı Yapıları	Tüneller	Gerilme deformasyon analizi, destek seçimi, kazı yöntemi
	Galeriler	Gerilme deformasyon analizi, destek seçimi, kazı yöntemi
	Büyük yeraltı boşlukları	Gerilme deformasyon analizi, destek seçimi, kazı yöntemi
	Savunma amaçlı açıklıklar	Gerilme deformasyon analizi, destek seçimi, kazı yöntemi

Çalışma Alanları	Proje Türü	Çalışmanın Türü
Enerji Gelişim	Petrol	Kaya çatlakları ve faylar, permeabilite
	Jeotermal	Kaya çatlakları ve faylar, permeabilite
	Nükleer enerji santralleri	Kaya çatlakları ve faylar, permeabilite
	Nükleer atık alanları	Kaya çatlakları ve faylar, permeabilite
	Enerji depolama odaları	Gerilme deformasyon analizi, destek seçimi, kazı yöntemi, kaya çatlakları ve faylar, permeabilite

YÜZEY YAPILARI

Konut arsaları



Köprüler, yüksek binalar, enerji yapıları



Taş ocakları ve maden işi



Barajlar ve dolu savaklar



ULAŖIM HATLARI

Kara ve demiryolları



Kanallar ve boru hatları



Cebri borular



Cebri borular



YERALTI YAPILARI

Tüneller



Galeriler



Büyük yeraltı boşlukları

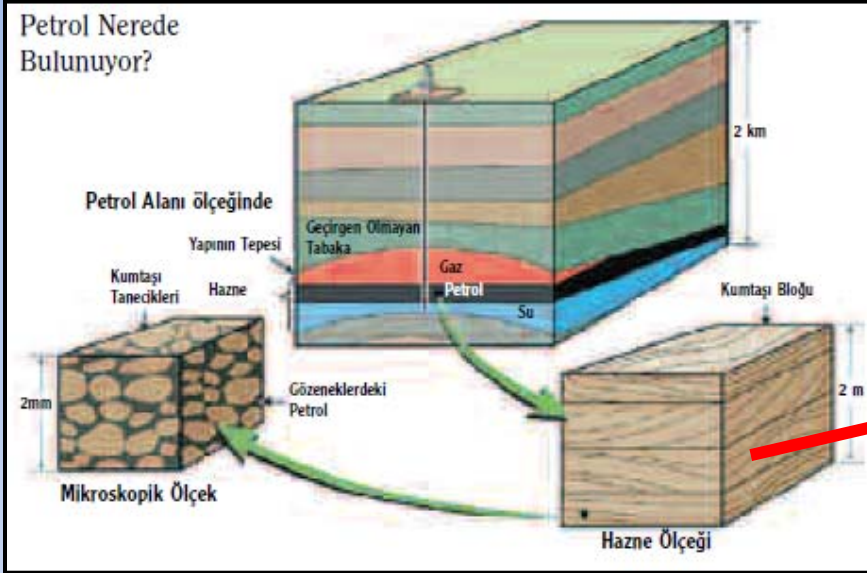


Savunma amaçlı sığınaklar



ENERJİ - KAYA İLİŞKİLİ

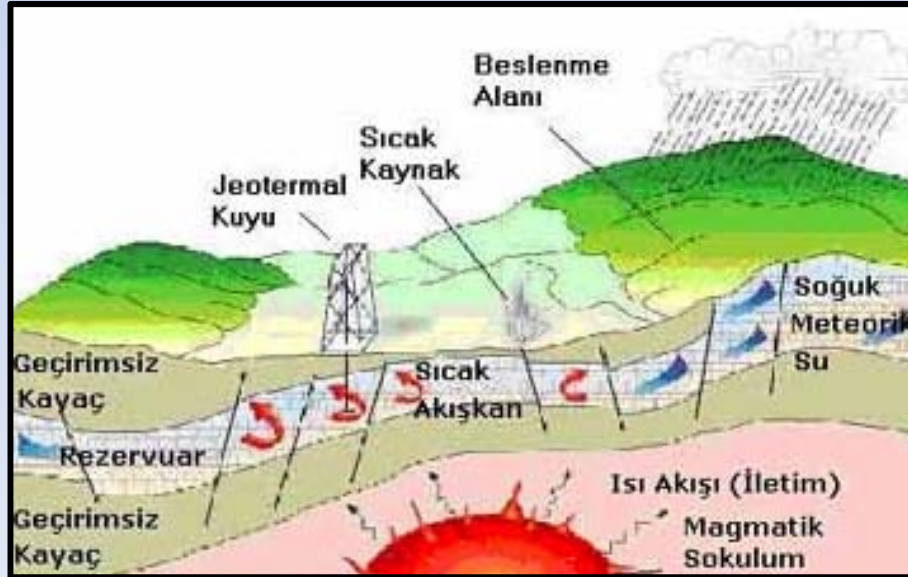
Petrol



Petrol Kayası



Jeotermal



Nükleer atık alanları



ENERJİ - KAYA İLİŞKİLİ

Kaya Gazı



Yeraltı enerji depoları



Kayaç Malzemesi ve Kaya Kütlesi ile İlgili Temel Kavramlar

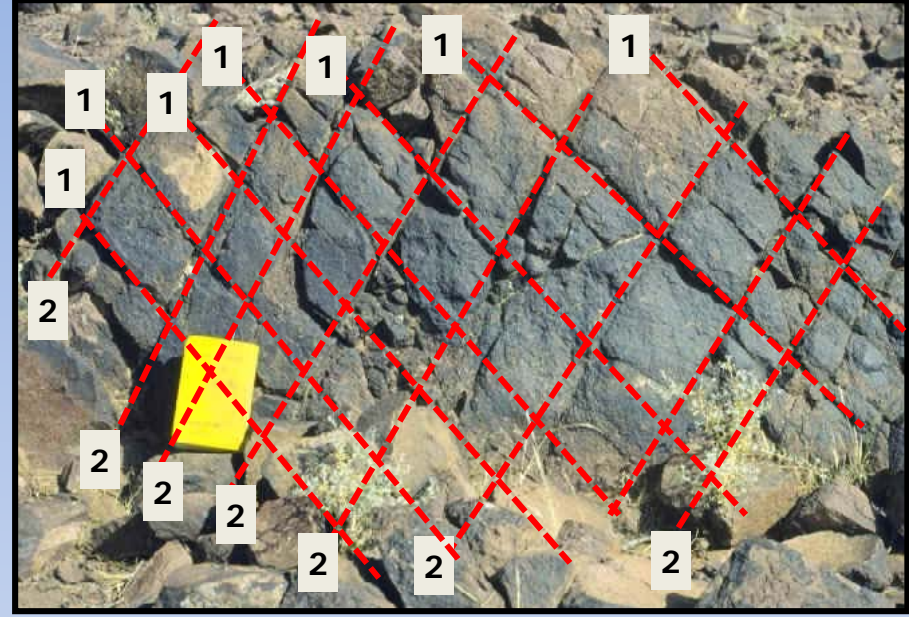
Kayaç Malzemesi (intact rock material)

- Kaya kütlesinde, tabakalanma, şistozite, fay vs gibi doğal süreksizliklerin arasında kalan malzemenin çekilme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık içermeyen değişik boyutlardaki parçalarıdır.
- Diğer bir ifadeyle sağlam kayaç malzemesi, herhangi bir kırık tarafından ayrılmamış en küçük kaya elemanıdır.
- Kayaç malzemesi içerisinde bazen mikro çatlaklar bulunabilir, bunlar süreksizlik olarak değerlendirilmezler.



Süreksizlik (discontinuity)

- Kaya kütlelerinde çekilme dayanımı olmayan veya çok düşük çekilme dayanımına sahip tabakalanma düzlemi, eklem, fay, makaslama zonu, dilinim, şistozite vb gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemlerinin tümüne süreksizlik denir.
- Bu kavram süreksizliğin yaşı geometrisi ve kökeni gibi hususları içermez
- Doğal süreksizlikler gibi bazen patlatma vs gibi nedenlerle oluşmuş yapay süreksizliklerde olabilir.
- Süreksizliklerin konumları ve yönelimleri kaya kütlelerinin deformasyon, dayanım, geçirgenlik gibi özelliklerini etkiler.
- Süreksizliklerin üç boyutlu karmaşık yapısı, süreksizlik ağı veya kaya yapısı olarak adlandırılır.

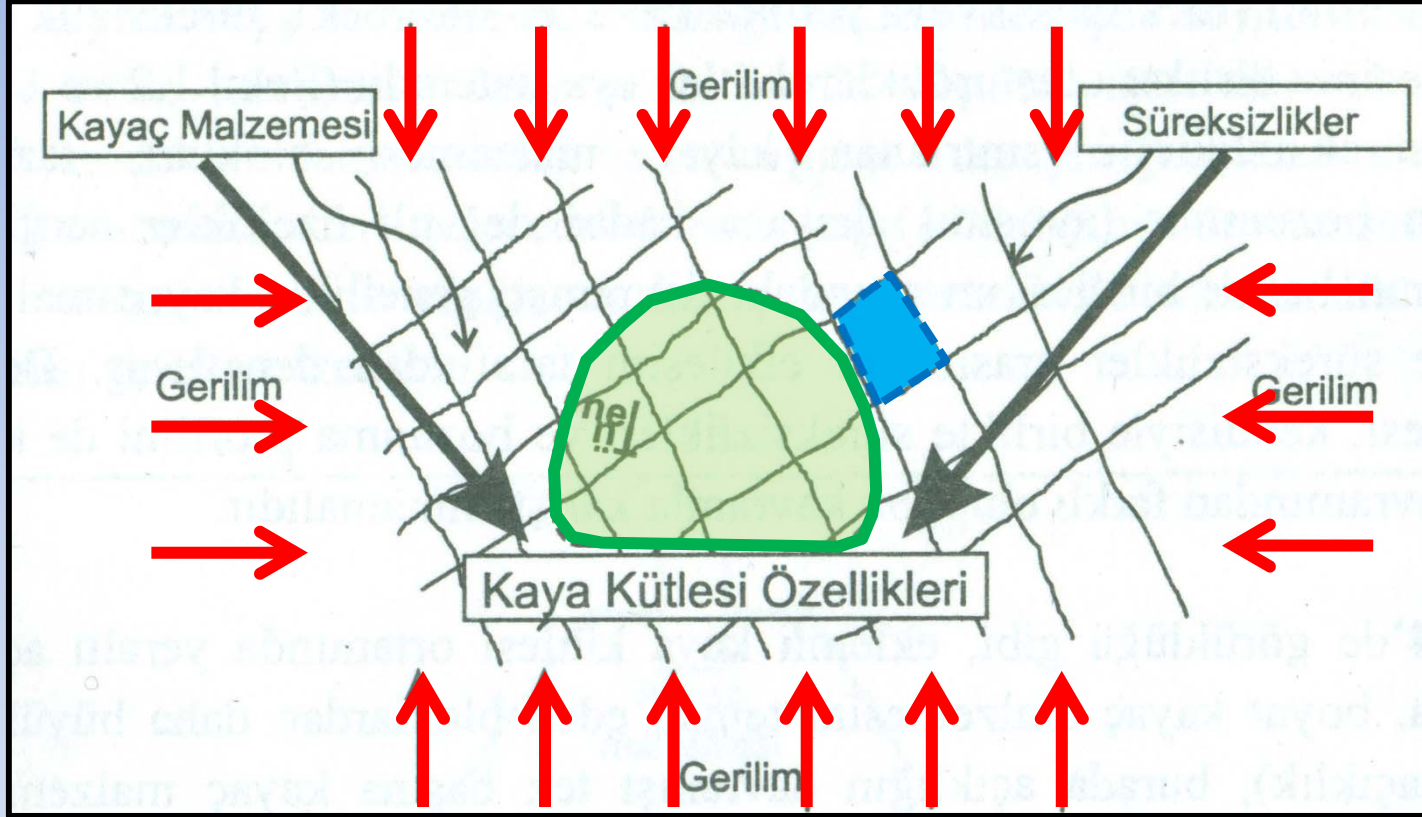


- Süreksizlikler her zaman doğrusal olmayabilir.



Kaya Kütlesi (Rock mass)

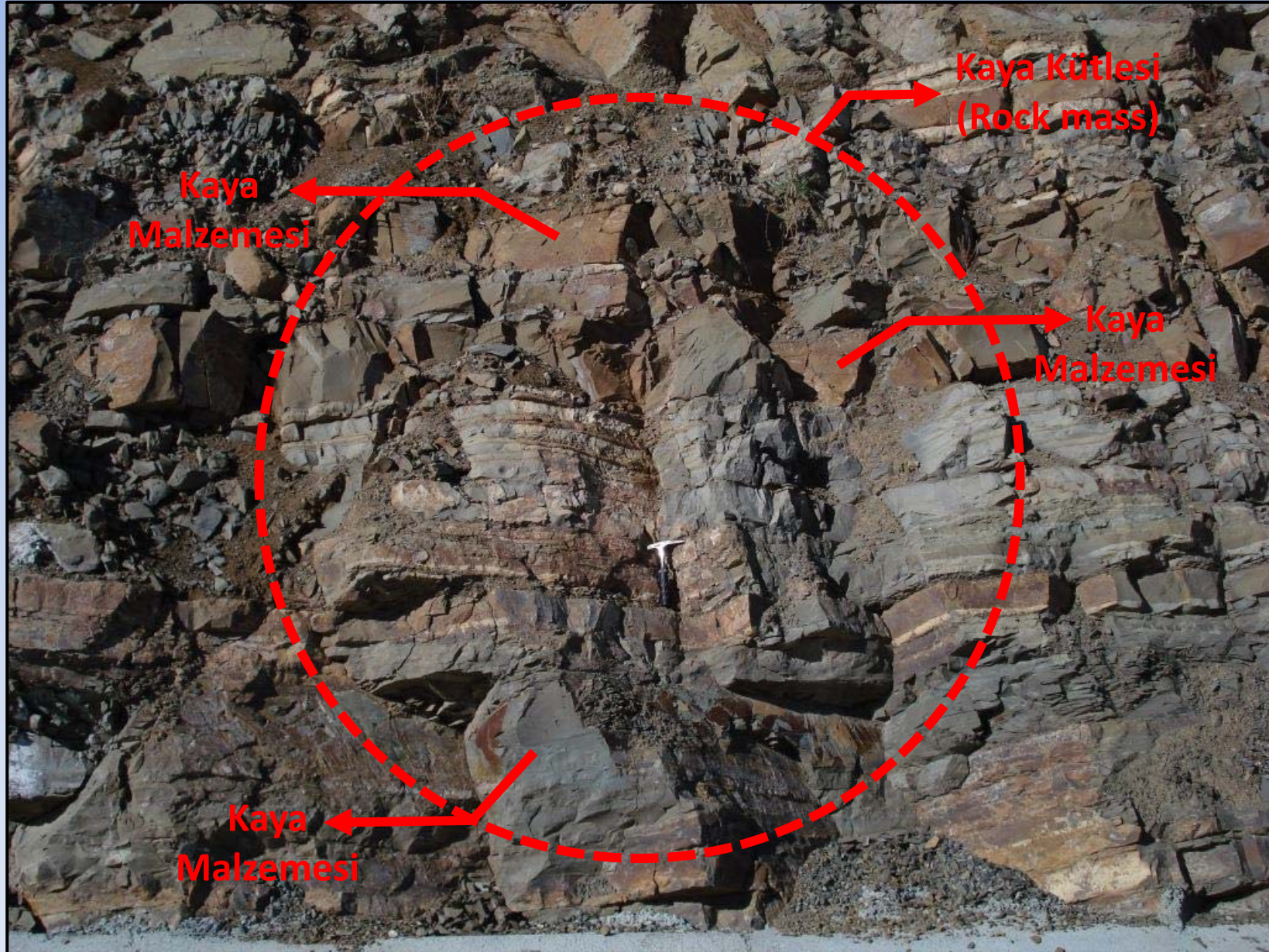
- Süreksizlik ağı ile kayaç malzemesinin birlikte oluşturdukları kütle veya sistemdir.



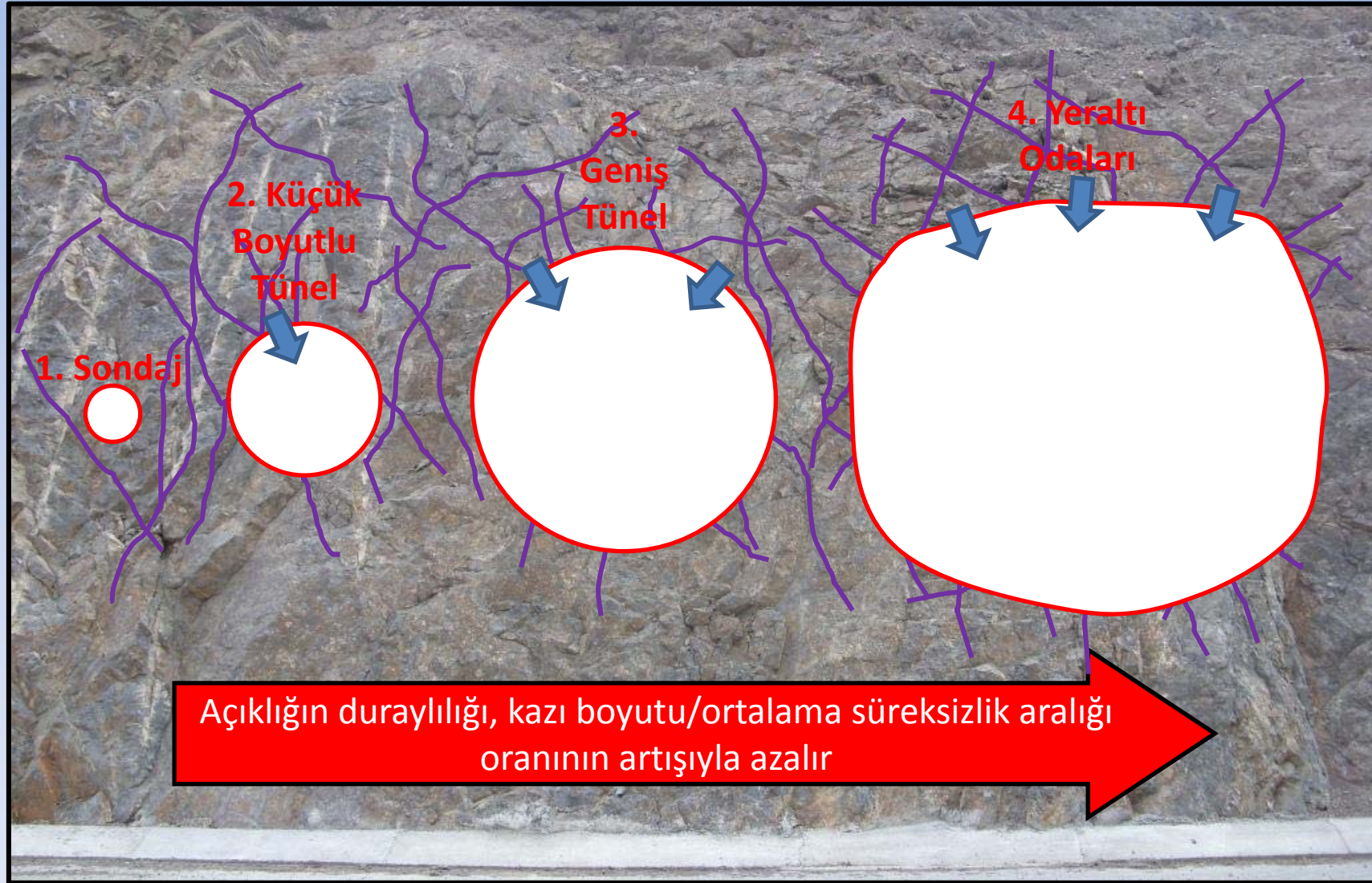
Kayaç malzemesi, süreksizlik ve kaya kütlesi kavramlarını tanımlayan şematik kesit

- Kaya kütlelerinde süreksizliklerle sınırlanan kayaç malzemesi blokları, taze kayaç malzemesinden bozmuş kayaca kadar değişik özellikler sergileyebilir.
- Kaya kütlelerinin gerilme altındaki davranışları genellikle kayaç malzemesine ait bloklar ile süreksizlikler arasında etkileşim tarafından denetlenir.

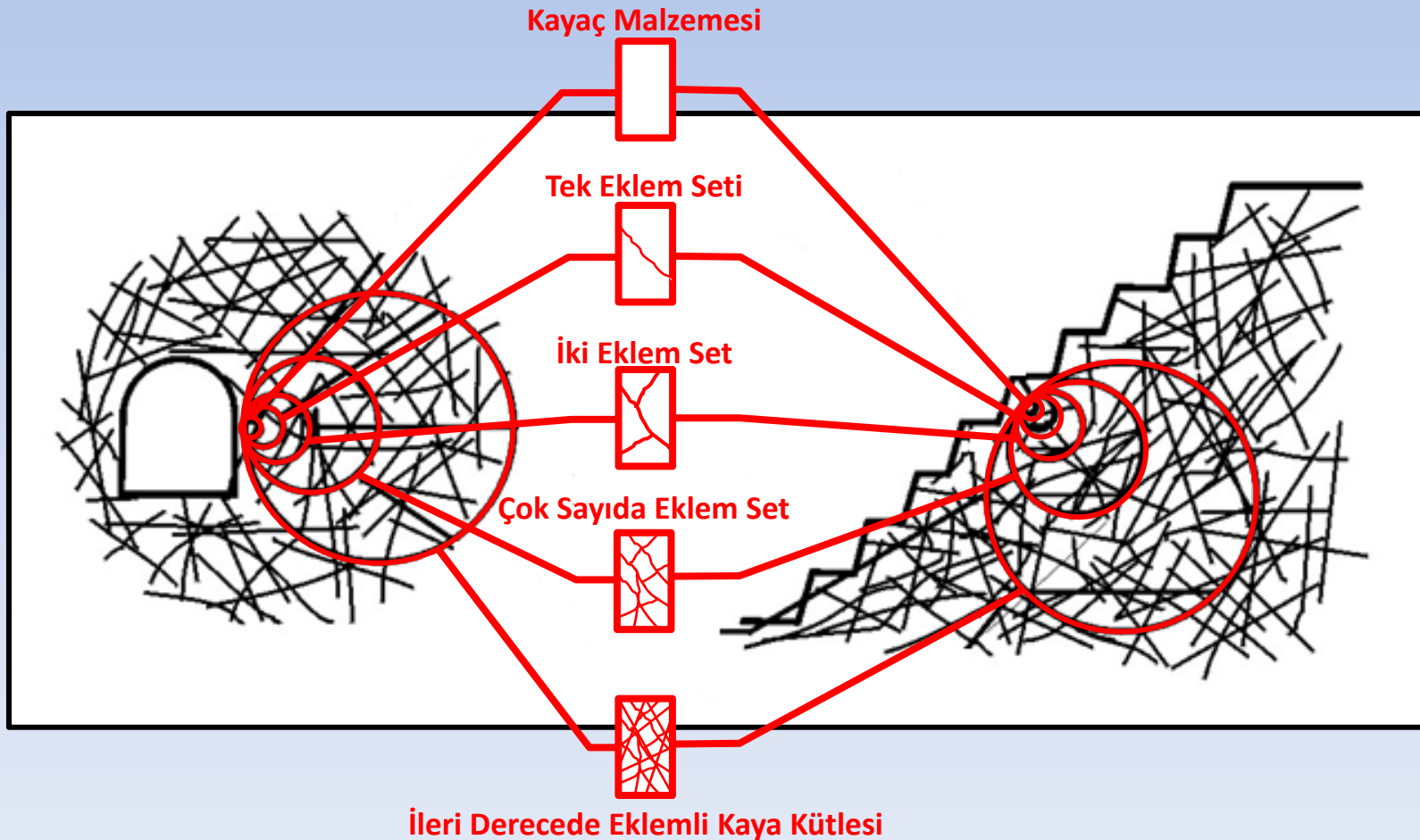
- Kayaç malzemesi kaya kütlesi ile karıştırılmamalıdır.





- Eklemlı bir kaya kütlesinde yeraltı açıklılığının boyutu büyüdükçe, boyut kayaç malzemesini temsil eden bloklardan daha büyük olacağı için açıklılığın davranışı hem kayaç hem de süreksizlikler tarafından denetlenir.



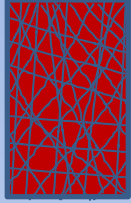
- Bir kayaç 10 veya daha fazla sayıda süreksizlik seti (takımı) içeriyor ise bu kayaç homojen ve izotrop kabul edilir, bu yaklaşımdan kaynaklı hata payı % 5'i geçmez (Bray, 1967)
- Bir kayaç çok az sayıda süreksizlik içeriyor yada masif ise bu kayaçta ideal olarak homojen ve izotrop kabul edilir.
- Az sayıda süreksizlik seti içeren mühendislik yapılarında bu süreksizlikler boyunca devrilme, kayma gibi duraysızlıklar olur. Çok sayıda süreksizliklerde şevin tamamını içine alan kütlelel bir duraysızlık modeli ile karşılaşılır. Bu koşul en kritik koşulu oluşturur.



- Kayaç malzemesinden ileri derecede eklemli kaya kütlesine geçiş aşamaları ve bu aşamalardaki dayanım özellikleri aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.
- Tanımlamada **eklem** sözcüğü sadece bir süreksizlik türünü ifade ederken burada kaya mekaniği terminolojisindeki kullanım dikkate alınarak diğer süreksizlik türlerinizde içine alacak şekilde kullanılmıştır.

Tanımlama	Dayanım Özellikleri	Dayanım Deneyleri	Teorik Hususlar
 <p>Kayaç malzemesi</p>	Kırılğan-elastik ve genellikle izotrop davranır.	Karot örnekleri üzerinde yapılan üç eksenli deneyler ile dayanımı belirlenir	Elastik – izotrop davranış sunar, pek çok uygulama için yeteri derecede anlaşılmıştır
 <p>Eğimli tek süreksizlik içeren kayaç malzemesi</p>	Süreksizliğin eğilimine ve makaslama dayanımına bağlı olarak oldukça anizotrop özellik	Doğrudan makaslama deneyi tercih edilir	Elastik – izotrop davranış sunar
 <p>Birkaç süreksizlik seti içeren masif kaya</p>	Süreksizliklerin sayısı yönelimi ve makaslama dayanımına bağlı olarak anizotrop özellik	Örnek örselemesi ve boyut sınırlandırılmasından dolayı laboratuvar deneyleri yapılamaz	Bloklar arasındaki karmaşık etkileşim çok az olarak anlaşılmıştır

Tanımlama	Dayanım Özellikleri	Dayanım Deneyleri	Teorik Hususlar
-----------	---------------------	-------------------	-----------------

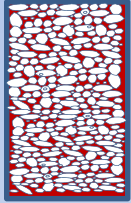


İleri derecede eklemli kaya kütlesi

Kırılgan-elastik ve genellikle izotrop davranır.

Örnek örselemesi ve boyut sınırlandırılmasından dolayı laboratuvar deneyleri yapılamaz

Kenetlenen köşelerin davranışı çok az anlaşılabilmiştir.

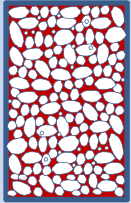


Sıkıştırılmış kaya Dolgusu veya zayıf Çimentolu konglomera

Oldukça izotrop, Dokunun tahrip olmasından dolayı daha az kabaran ve düşük dayanımlı

Üç eksenli deneyleri yapılabilir, geniş hücre gerektirir

Taneli zeminlerde yapılan deneyler ile davranışı daha da anlaşılır



Gevşek kaya parçaları veya çakıllar

Zayıf sıkıştırma dönme Eğilimine ve düşük dayanıma neden olur.

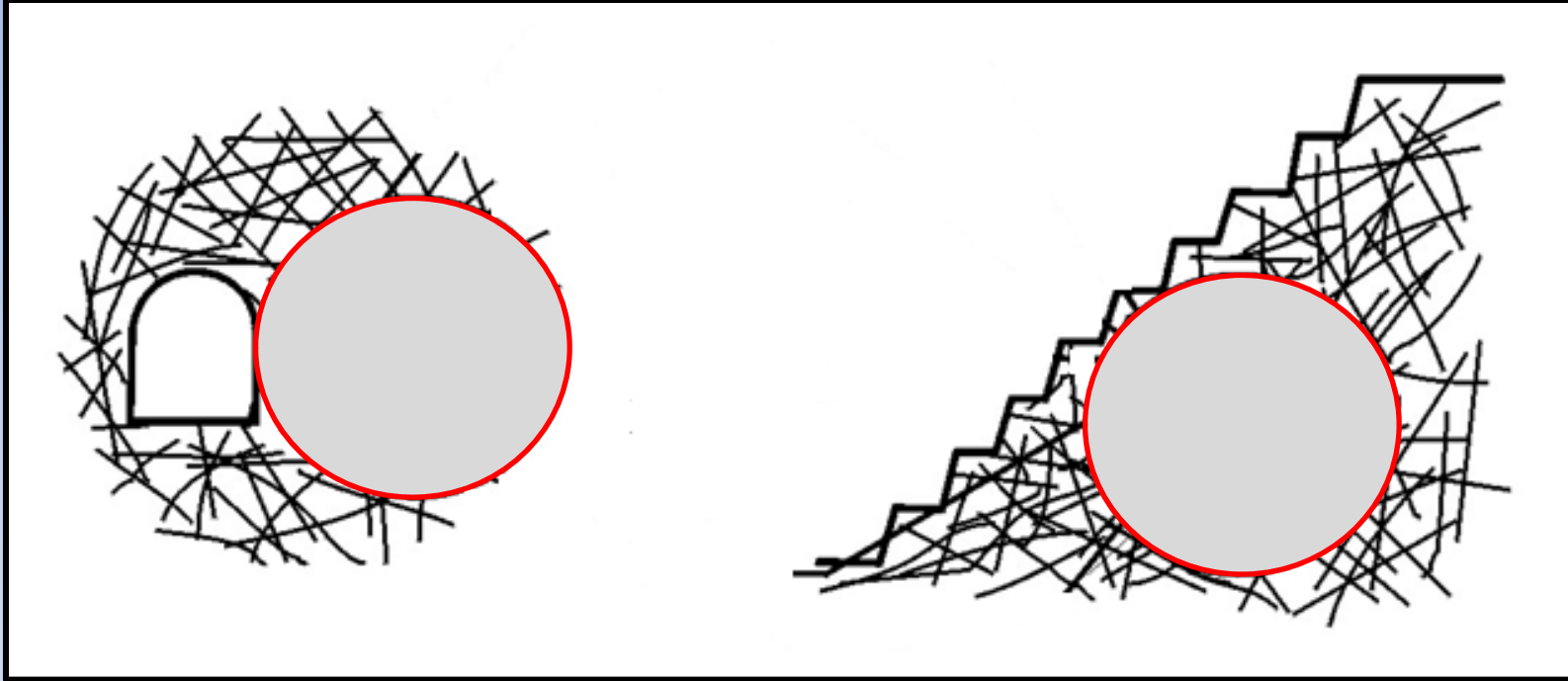
Üç eksenli deneyler ve doğrudan makaslama deneyleri basittir, ancak pahalıdır

Pek çok uygulamada yeteri düzeyde anlaşılmiştir

- Sert kayalar gerilme koşullarında ani yenilme sonucu kırılmalı bir davranış sunarken zayıf sedimanter kayalar daha sönümlü bir davranış modeli sunarlar.

- Farklı yönelimlerde gelişmiş çok sayıda süreksizlik tarafından bölünmüş kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri **hem süreksizliklerin hem de kaya malzemesinin** özellikleri tarafından denetlenir.

- İleri derecede eklemlili kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon karakteristiklerinin laboratuvar ortamında çok büyük boyutlu numuneler üzerinde tanımlamak neredeyse imkansızdır.



- İleri derecede eklemlili kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon karakteristiklerinin laboratuvar ortamında çok büyük boyutlu numuneler üzerinde tanımlamak neredeyse imkansızdır.

-Bu sınırlamalar, araştırmacıları ileri derecede eklemlili kaya kütlelerinde dayanım ve deformasyon özelliklerinin daha pratik bir şekilde belirlemeye zorlamıştır. Hoek – Brown görgül yenilme ölçütü bu eksikliği önemli ölçüde gidermiştir.

Başlıca Kaya Kütlesi Türleri

Kaya kütleleri, yapısal ve mekanik özellikleri açısından başlıca dokuz ana gruba ayrılır (Goodman, 1995)

1. Eklemsiz kaya kütleleri

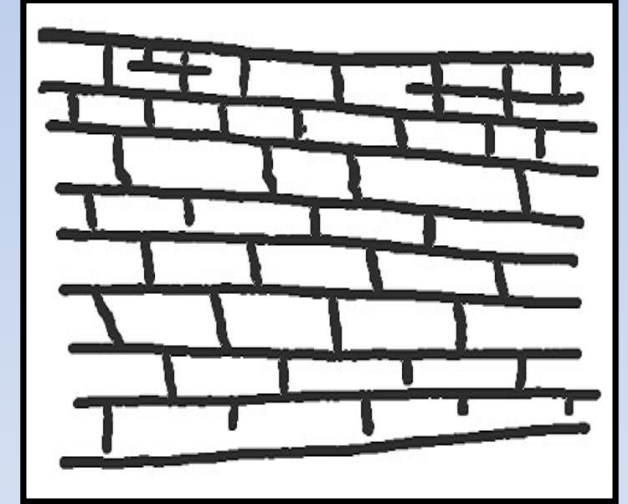
- Bu tür kaya kütleleri, bozunma zonunun altında bulunurlar ve örneğin masif mermerler ve granitik kayalar ile foliasyon içermeyen temel kaya kütleleri bu grupta yer alırlar.
- Masif kaya kütleleri sürekli, homojen, izotrop ve doğrusal elastik davranış gösteren kayalar olarak kabul edilirler.



Masif Kayaç

2. Kısmen Eklemlı Kaya Kütleleri

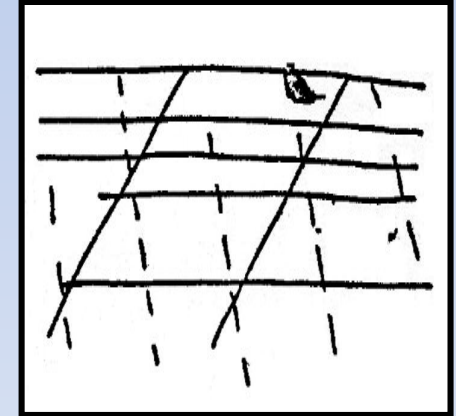
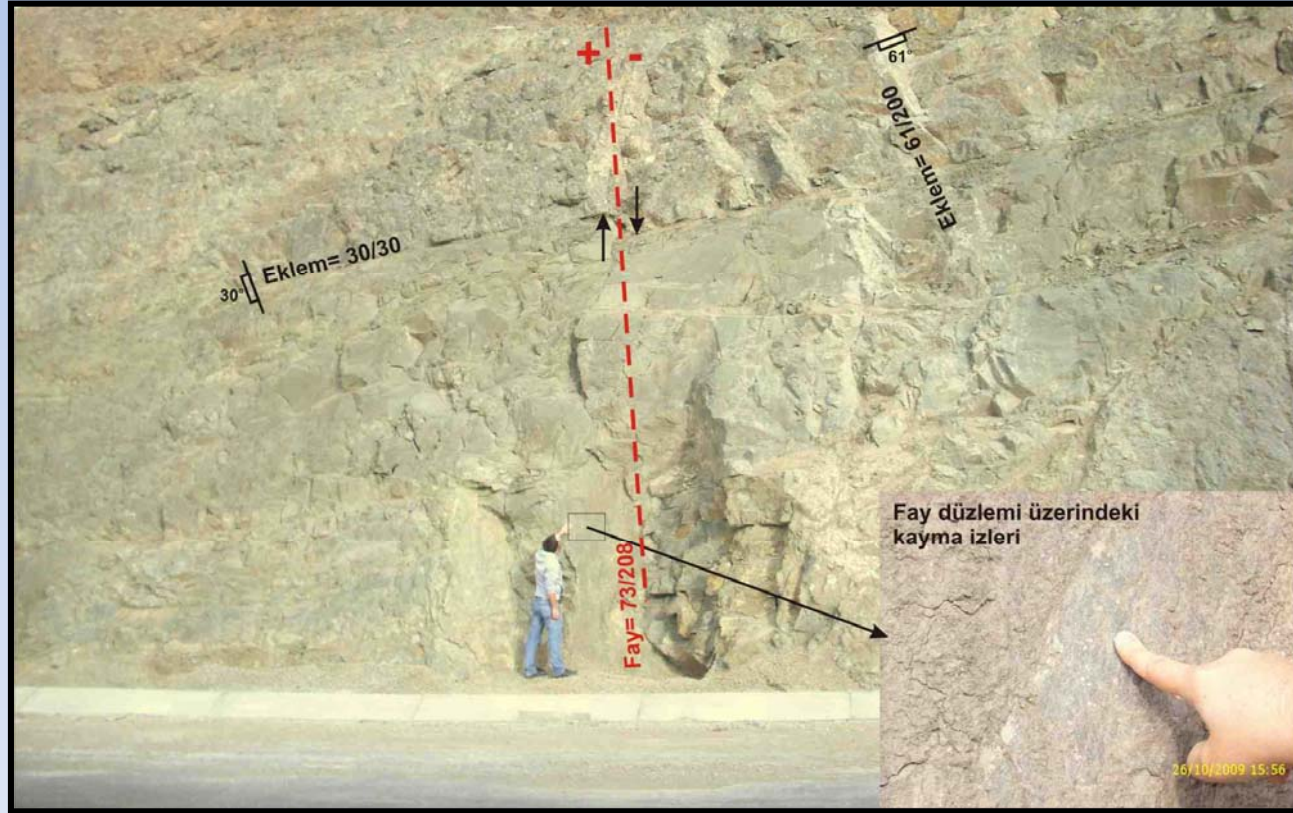
- Bunlar üçten az sayıda devamlı eklem seti içeren ve kazıldıkları zaman münferit blokların elde edilmediği kaya kütleleridir.
- Bu tür kaya kütleleriyle ilgili mühendislik hesaplamalarında, özellikle kırık mekaniğinin esaslarından yararlanır.



Kısmen eklemlı kaya kütlesi

3. Kısmen Bloklı Kaya Kütleleri

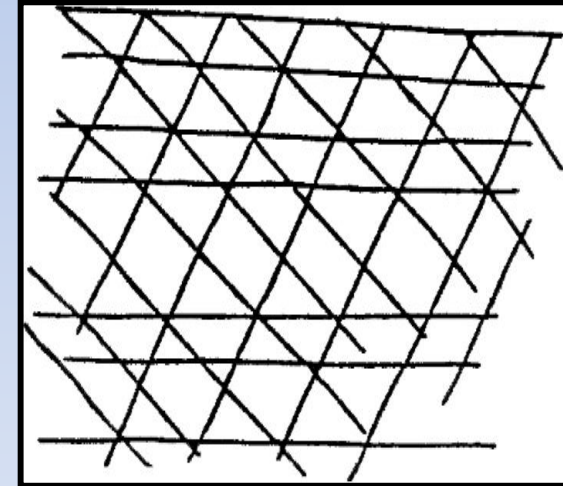
- Bu tür kaya kütleleri açık veya yumuşak malzeme tarafından doldurulmuş, sayısı üçten az olan eklem setlerinin yanı sıra, kapalı ikincil süreksizlikleri de içerir.
- Kapalı eklem setlerinden birinin deformasyona bağlı olarak açılması halinde, kaya kütlelerinde gerçek anlamda bir bloklanma gelişebilir.



Kısmen bloklı kaya kütleleri

4. Bloklü Kaya Kütleleri

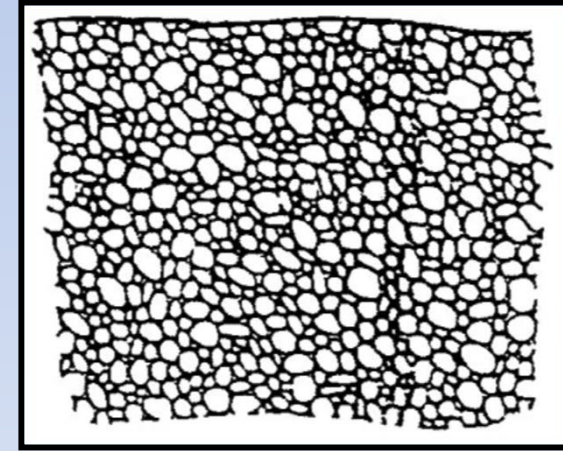
- İyi gelişmiş, açık veya yumuşak malzeme dolgulu, devamlılığı yüksek, üçten fazla sayıda süreksizlik seti içeren kaya kütleleri bloklü kaya kütleleri olarak tanımlanır.
- Bu tür kaya kütlelerinde kütle çok sayıda süreksizlik tarafından bölünmüş olduğu için, kazı sırasında blok elde edilmesi kolaydır.



Bloklü kaya kütlesi

5. Çok Gözenekli Kaya Kütleleri

- Bu tür kaya kütlelerinde önemli miktarda gözenekler; poro - elastisite, akışkan içeriği, akışkanın hareketi ve gerilim altında gözeneklerin tahrip olması gibi nedenlerle kayacın mekanik davranışını etkiler.
- Çok gözenekli kaya kütlelerine sürekli cisimler mekaniğinin ilkeleri uygulanır.



Bloklı kaya kütleсі

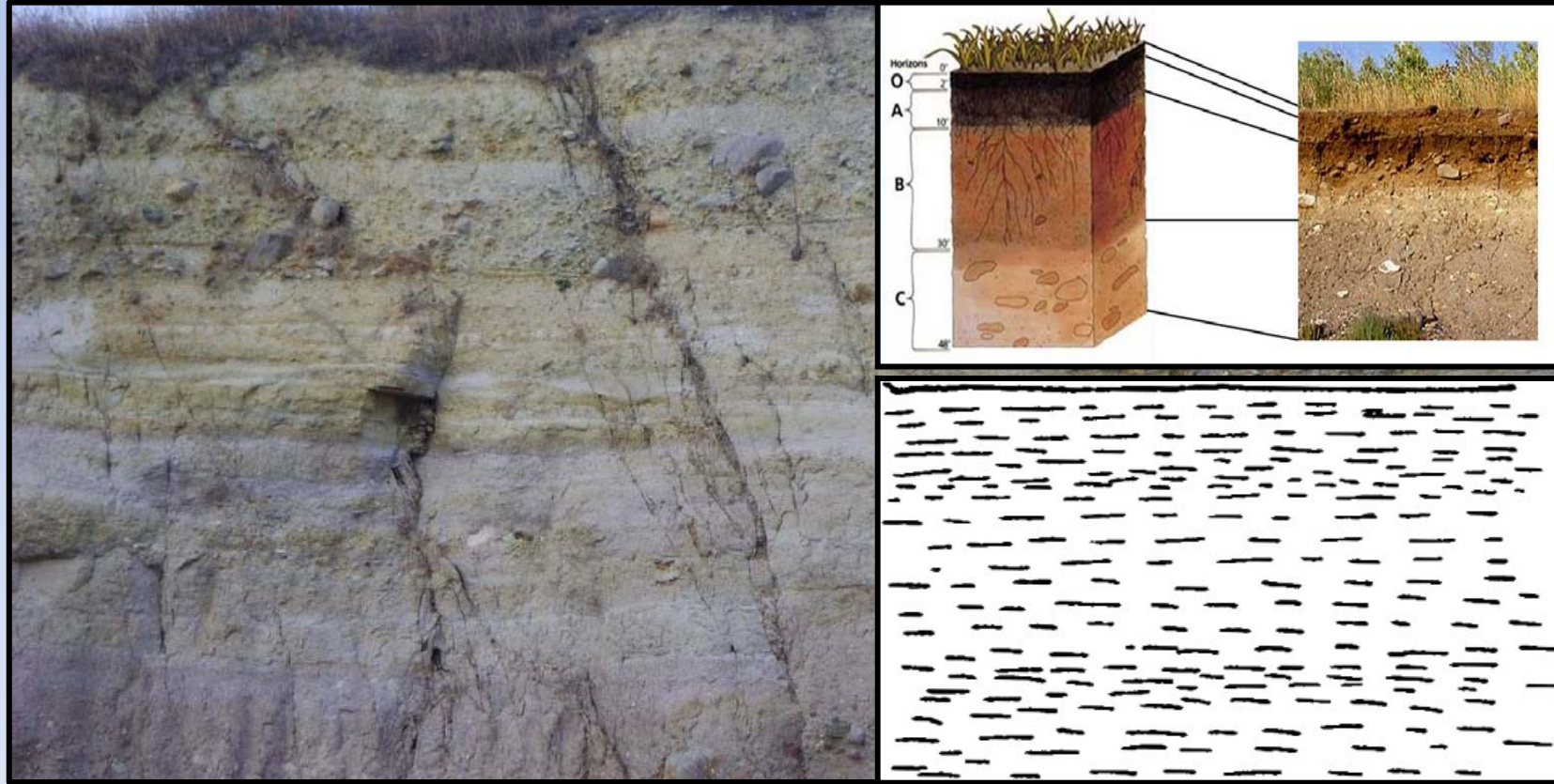
6. İleri derecede fisürlü kaya kütleleri

- Fisürlü kayalar, önemli ölçüde kırılmalığa ve anizotropiye, ayrıca tüm mekanik özellikler açısından sapmalara neden olan, sıkı aralıklı küçük süreksizlikler içerirler.
- Bu tür kaya kütlelerinden örnek alımı ve deney yapılması oldukça güç olup mekanik davranışı yönüyle sıkı fisürlü killerle benzerlik gösterir.



7. Sıkışan ve şişen kaya kütleleri

- Bu tür kaya kütleleri suyla temas ettiklerinde ani ve gecikmeli olarak çatlayarak hacim değişimine uğrarlar ve aktif kil mineralini içerirler.
- Ayrıca yüzeyde atmosferik koşullar altında bozunma ürünlerine dönüşebilen bu tür kaya kütlelerine zemin mekaniğinin ilkeleri ve yöntemleri uygulanır.



8. Ayrık Düzenli Kayaçların Karışımı

- İzotrop ve gelişigüzel karışımlar ve foliasyonlu gelişigüzel karışımları içerebilirler.
- Düzenli bir ardalanmaya sahip litolojik birlikteliklerdir (Ör; kumtaşı şeyl ardalanması).
- Bu tür kayaçların mekanik anlamda değerlendirilmesi için geliştirilmiş ayrıntılı bir sınıflandırma sistemi yoktur.



9. Boşluklu Kaya Kütleleri

- Kaya kütlesi içerisinde çözülme yada farklı nedenlerle gelişmiş kırık ve çatlakların ötesinde büyük boyutlu boşluklar içeren kaya kütleleridir.
- Bu grupta çözülebilir özellikteki kireçtaşları dolomit, jips, tuz, çözülebilir bir çimento ile tutturulmuş kırıntılı sedimanter kayalar yer almaktadır.



Boşluklu kaya kütleleri

Yararlanılan Kaynaklar

- 1. Reşat Ulusay, Harun Sönmez., "Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 60**
- 2. Celal Karpuz, Mehmet Ali Hindistan., "Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları", TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları: 116**
- 3. Richard E. Goodman (Çeviren: Kamil Kayabalı)., "Kaya Mekaniğine Giriş", Gazi Kitabevi, 2003, Ankara**