

# Kaya Tüneli

## TÜNEL KAZISI

Üç yöntem arasında tercih. Hepsinde maliyet 1-20M £/km.  
**Delme-patlatma:** Her türlü kayada, tüm büyük tünellerde.  
**Önden sürmeli tünel açıcı:** Makinaya monteli dönel öğütücü kafa (kaya için özel); en iyi kullanımı UCS < 60 kayada olan esnek bir sistem.

**Tünel açma makinası (TBM):** 1 km'den kısa tünellerde ekonomik olmamasına rağmen giderek artan kullanım.  
Şaft açmasında kırıntı temizlemesi zordur; kendinden temizlemeli yukarı delme yöntemi genelde daha kolaydır.

## DELME VE PATLATMA TÜNELCİLİĞİ

Tam yüzey, palyeli veya kalot kazılı, kötü kayanın destek gerektirdiği yerde kırılma.

Kollarında 2-5 sondaj bulunan jumbo makinalar bulon deliği açmak üzere dönebilirler.

Sondaj delikleri önce patlatılan merkez kamaya doğru yakınsalar; rötarlı patlatmalar (1-100 ms) dışarıdaki delikleri merkez deliğe doğru göçertirir

Düz duvar bırakan patlatmalarda dış sıra deliklerinin aralıkları 1 m'den az tutulur, hafifçe yüklenir ve aynı anda patlatılırlar.

### TATES' CAIRN TÜNELİ: HONG KONG, 1989

Granitte genişliği 10,7 m, yüksekliği 8 m, tam yüzey şeklinde halen devam etmektedir.

10 saatlik iki vardiya, haftada 60 m ilerleme.

Delme (3 saat): 50 mm çaplı, 4,5 m derinlikte 90 delik; jumbo ile herbirinin açılması 3 dakika almaktadır.

Yükleme-patlatma (2,5 saat): Her deliğe 4,5 kg dinamit.

Pasa temizleme (4 saat): Kepçelerle 20 tonluk damperli kamyonu doldurulması 2 dakika; her seferde 1000 ton; yığınsal genişleme %50.

## TÜNEL AÇMA MAKİNALARI (TBM)

9 m'ye kadar çaplı, dönel disklerle veya koparıcı kazıcılarla donanmış, dakikada 2-10 devirli, tam yüzeyli baş. Sert kayada da çalışabilmektedir.

Çeperlere karşı krikolama veya yerleştirilen beton segment kaplama vasıtasıyla ilerleme.

İlerleme: Yumuşak kayada 30 m/gün; sert kayada daha az. Çapı değişmez; en keskin kurvanın yarıçapı 300 m.

Yer basıncının kalkanları dengelemesi sırasında bir miktar çalışma, yumuşak kayada dönel kafanın yüzey desteği.

## ZOR ZEMİN KOŞULLARI

**Faylar** çok problemlidir; kırılmış yer, artan su akışı, kaya türünde olası değişim demektir.

**Yeraltı suyu** yüksek akış koşullarında zordur; en kötüsü, 500 l/s'ye kadar debili karstik yarıklardır. Tüm yüzeyin izolasyonunu veya suyun çevrilmesini gerektirir.

Çatlaklı sert kayalarda **aşırı sökülme** sedimentler ve metamorfik kayalarda düşey yönde çok kötüdür.

**Sıkışan zemin** = plastik akış, çoğunlukla UCS/örtü gerilmesi oranının 2'den küçük olduğu kil ve şeyller.

**Kaya patlamaları** genellikle UCS > 140 MPa olan sert kayalarda 600 m'den büyük derinliklerde meydana gelir.

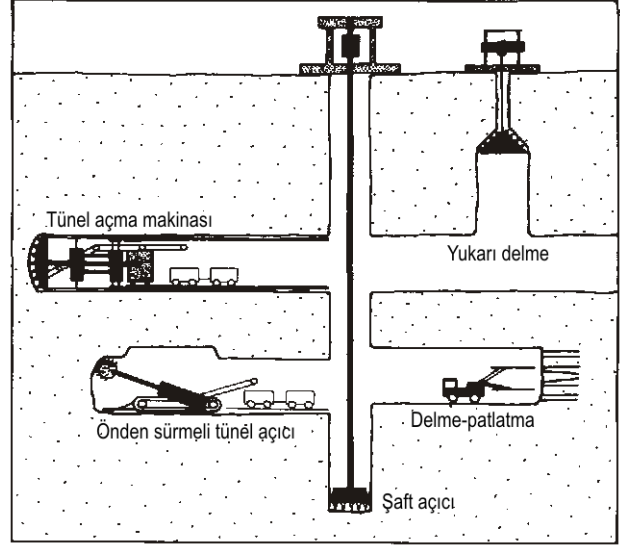
**Şişen zemin** = killerde artan su içeriğinden dolayı duvar kapanması.

Yerin **sıcaklığı** her 100 m derinlikte bir 2-4°C artar.

**Temel kaya profili** en tehlikeli kuşaktır; su altı tünelleri 20 m'den kalın kaya örtüsü altında açılır.

Tavanda **gerilme azalması** eklemli kayanın gevşemesine ve gecikmeli potansiyel yenilmeye neden olur.

Tünel duvarlarında **düşey gerilme** örtü yükünün 3 katına kadar çıkabilir.



### SEIKAN TÜNELİ: JAPONYA, 1985

Deniz seviyesinden 250 m aşağıda, 54 km uzunluğundaki demiryolu tüneli. UCS değeri 3-150 MPa arasında değişen faylı volkanik kayaların kötü karışımı. Delme-patlatma, 200 mm püskürtme beton kaplama, yumuşak kayada çelik kaburgalar; büyük su basmasından sonra fay zonlarında enjeksiyon; maliyeti: 2500M sterlin. Deniz tabanından 100 m aşağıda açılmış; devamlı surette ilerleme problemleri kullanılmıştır.

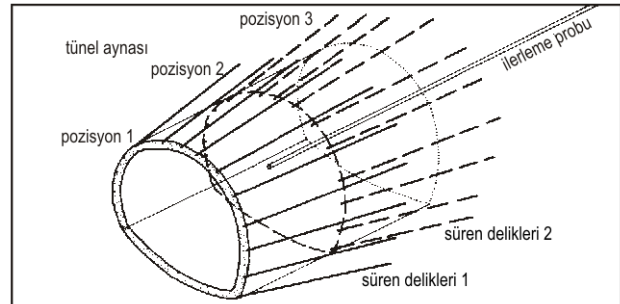
### MANŞ TÜNELİ: AVRUPA, 1992

7,6 m çaplı ikiz tüplü, 50 km'lik demiryolu tüneli. Çatlak sıklığı düşük geçirimsiz tebeşir marmında, UCS = 5-9 MPa, ideal tünel açma ortamına yakın özellikler. 8,7 m çaplı TBM ile açılmış, 360-540 mm kalınlıktaki prefabrik beton segmentleriyle kaplanmıştır. Maliyet: 900M sterlin. Taç ile deniz tabanı altında 20 m'lik sağlam kaya kalınlığı korunmuştur.

## İLERLEME ÖNCESİ ZEMİN İYİLEŞTİRME

Sürenler (spiling) tünel eksenine 10° açılı ve ayna gerisine yelpaze şeklinde yerleştirilmek suretiyle kaya dayanımını artırırlar. Benzer şekilde, yelpaze şekilli deliklerden ayna gerisine veya açığa çıkan zayıf kayalara çimento enjeksiyonu uygulanabilir.

Kuyu, enjeksiyon veya dondurma yoluyla yüzeyden drenaj kontrolü; sadece sığ derinlikteki zeminlere uygulanır.



## YER ARAŞTIRMALARI

Karmaşık zayıf kayada maliyeti projenin %0,5-3'ü kadar. Değişik yer koşulları ayna gerisinde 20-30 m uzunlukta ilerleme problemleri gerektirebilir.

Karada veya su altında sismik jeofizik ile elde edilen düşük hızlardan hareketle kötü kaya zonları belirlenebilir.

## KAYA TÜNELLERİ İÇİN DESTEK SİSTEMLERİ

### PASİF DESTEK

Dökme beton içine yerleştirilmiş çelik kaburgalar veya dış tarafı püskürtme betonla kaplanmış (çoğu zaman TBM ile yerleştirilen) prefabrik beton şeklidirler.

Desteğin bazı kısımlarına yüksek kaya gerilmeleri gelebilir. Dökme beton veya hareketli kalıp yöntemi yol tünelleri için ikincil kaplama olarak kullanılmaktadır.

### AKTİF DESTEK

Bir tünel açıklığı üzerindeki kaya kütlesi içinde kendini tutabilen duraylı bir kemer oluşturmak üzere, başlıca bulonlar ve püskürtme beton ile kayayı güçlendirir.

Zayıf zeminler hariç, her yerde pasif destekten daha iyidir.

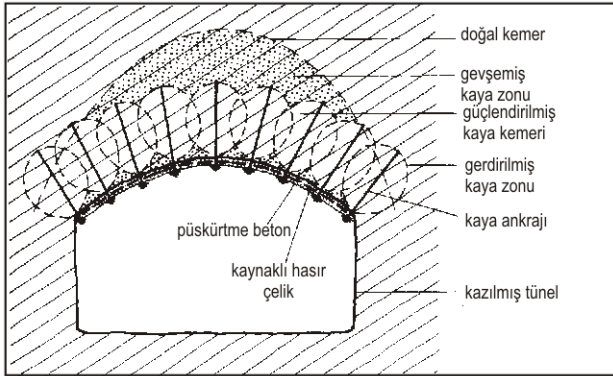
**Norveç Yöntemi** gerekli destek sistemini başarılı bir şekilde belirler; değişik kaya koşullarına (deneyime dayalı olarak) uyarlanabilir bir sistemdir. Püskürtmeli betonla birlikte veya tek başına, ankrajın kapsamı kaya kütlesi kalitesi ve tünel genişliği ile tanımlanır.

**Yeni Avusturya Yöntemi (NATM)** tünel etrafında sınırlı kaya deformasyonuna izin verir; bu da duraylı yeni bir durum elde etmek üzere gerilmeyi yeniden dağıtır; ancak, gevşemeye ve zayıflamaya izin vermeye yeterli değildir. Yükün bir kısmını karşılamak üzere, bulonlar ve ince esnek püskürtme beton kaplama çabucak yerleştirilir; ikinci kaplama yerleştirilmeden önce, kaya kalan gerilmeleri alırken deformasyona (10-100 mm) izin verilir.

### PÜSKÜRTME BETON

Kaya duvar üzerine püskürtülen, 20-200 mm kalınlıktaki beton. Kaya ile etkileştiği için ideal; pik gerilmenin yüzey zonundaki çatlaklı kayayı daha sağlam kaya kütlesine dönüştürür. 10 m<sup>3</sup>/saat hızla uygulanır, NATM'de çabuk ve esnek destek sağlayarak kayayı açığa çıkma zayıflamasından korur. 10 m çaplı tünelde sıkışma altında 150 mm kalınlığındaki kaplama 450 kN'luk yükü (= 20 m kalınlığında yenilmiş kaya) güvenle taşır. Çekme dayanımı kazandırmak üzere çelik hasır ile güçlendirilir.

**Lifli püskürtme beton (fibrecrete)** bir metre küp beton içinde herbiri 40-50 mm uzunluğunda 50-80 kg çelik lif içerir. Bütün şeklinde bir kaya-püskürtme beton kemeri elde etmek için, donatılı püskürtme beton kaya bulonlarının yükseltilmiş yakalarına bağlanır.



### KAYA BULONLARI

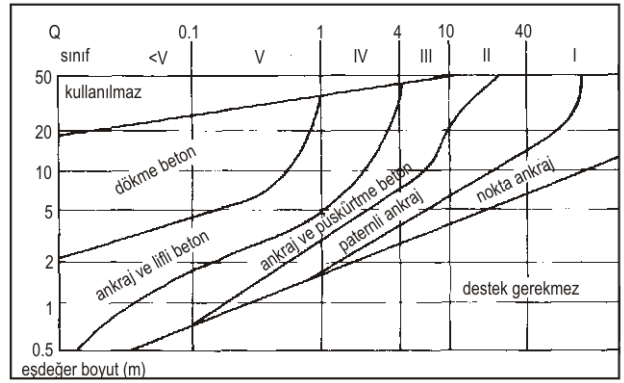
Çoğu zaman 2-5 m uzunlukta, 35 mm çaplı deliklere yerleştirilmiş, 100 kN'a kadar yüklenebilen elemanlardır.

Üç şekilde sabitlenirler:

- Genişleme pabucu; en ucuzudur; yükü anında alır.
- Çimento veya reçine ile içerden enjeksiyonlanan tür; en sağlamıdır.
- Sürtünme, değişik tipler: Swellex marka deforme tüp kuyuda 30 MPa su basıncıyla genişler; yükü anında alır; en basittir.

Kaya bulonlaması şunları içermelidir:

- uzunluk = 1,4 + (tünel genişliği/5) m
- açıklık = uzunluk/2 ve < (3 x eklem açıklığı)
- Başlık levhasına karşı %60 kapasitede gerdirme.



### DESTEK SİSTEMİNİN SEÇİMİ

Yukarıdaki diyagram, tünel boyutu ve kaya kütle kalitesine dayalı olarak uygun destek sistemlerini göstermektedir.

Q değeri Norveç yönteminde kaya kütlesi özelliklerini tanımlar (özeti Bölüm 40'da verilmiştir).

Sınıf, kaya kütlesine işaret eder (Bölüm 25).

Eşdeğer boyut = gerçek tavan genişliği/ESR.

Kazı Destek Oranı (ESR) güvenlik gereksinimini yansıtır:

Geçici maden açıklıkları	ESR = 3,0
Su tünelleri, pilot tüneller	1,6
Giriş ve minör demiryolu tünelleri	1,3
Büyük karayolu ve demiryolu tünelleri	1,0
Kamusal alanlar olarak yeraltı istasyonları	0,8

Aşağıdaki grafikte olduğu gibi, her bir destek sistemi içindeki boyutlar önemli ölçüde değişir; daha ileri ayrıntılar tam Norveç sınıflaması içindeki kaya sınıfı ve tünel boyutu ile ilişkilidir.

