

TÜNEL DELME MAKİNESİ VE KONVANSİYONEL YÖNTEM İLE AÇILAN TÜNELLERDE KAPLAMA/SEGMENT TASARIMI

Mehmet ALP
DSİ Genel Müdürlüğü, Proje ve İnşaat Dairesi Başkanlığı, Ankara,
mehmetalp@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 10.02.2016, Makalenin kabul tarihi:30.03.2016)

ÖZ

Su, kanalizasyon ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstündeki yapılara zarar verilmemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte konvansiyonel (klasik) tünel açma teknikleri yanında Tünel Delme Makineleri de (TDM) sıklıkla kullanılmaya başlanılmıştır. Sulama tünellerinde (3 km'yi geçen tünellerde) konvansiyonel yöntem ve TDM ile açılan yöntem arasında yapılan maliyet mukayesesi sonucuna göre tünel açma yöntemine karar verilmektedir.

Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da TDM'leri, istenilmeyen sorunları engelleme açısından ve imalat hızı nedeniyle günümüzde tercih edilmeye başlanılmıştır. TDM'ler, çevresel etkileri minimuma indirmekte ve daha emniyetli çalışma şartları sağlamaktadır.

Tünel delme makinesi ve konvansiyonel yöntem ile açılan tünellerde projelendirme farklılıkları önem arz etmektedir. Bu çalışmada, tünel delme makinesi ve konvansiyonel yöntem ile açılan tünellerde projelendirme esasları üzerine bir değerlendirme yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Tünel Delme Makinesi (TDM), konvansiyonel (klasik) tünel, segment tasarımı

DESİGN PRINCIPLES FOR EXCAVATION TUNNELS BY TUNNEL BORING MACHINE (TBM) AND CONVENTIONAL METHODS

ABSTRACT

During the excavation of water, sewer and underground tunnels, the selection of the excavation method to prevent damage to environment and above-ground structure is extremely important. With the technological advances, Tunnel Boring Machines (TBM) also has been used frequently for excavation tunnel besides the conventional (classical) tunneling techniques. According to the results of cost comparison between the conventional method and TBM method, it is decided to tunneling method for Irrigation tunnels (of minimum 3 km length).

Although initial investment costs of TBM method are high, TBMs have been started to prefer today in terms of production speed and preventing undesirable problems. TBMs minimize environmental impact and ensure a safer working conditions.

Design principles for excavation tunnel by tunnel boring machines and conventional methods are important. In this study, an assessment will be made on the basis of design principles for excavation tunnel by tunnel boring machines and conventional methods.

Keywords: Tunnel Boring Machines (TBM), conventional (classical) tunnel, segment design

1 GİRİŞ

Sulama tünelleri, kanal güzergâhı olarak yamacın dolaşılmasının, gerek topoğrafik gerek jeolojik nedenlerle mümkün olmadığı veya kanal boyunun çok uzaması nedeniyle ekonomik açıdan uygun görülmeyen durumlarda yapılan sanat yapılarıdır. Bunun dışında, güzergâh üzerindeki bir yerleşim yeri veya önemli bir tesisten kaçınmak için de tünel yapılması zorunlu sebep olabilir.

Yapılacak maliyet mukayesesi hesapları sonucunda tünel alternatifinin kanala nazaran daha ekonomik çıkması durumunda teknik yapılabilirlik de göz önünde bulundurularak kanalın devamlılığı tünel ile sağlanır.

2 TÜNELLERDE TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Tünel Güzergâhının Seçimi

Sulama tünelleri; kanal güzergâhının münhane boyunca devamlılığı mümkün olmadığı durumlarda, güzergâh üzerindeki bir yerleşim yeri veya önemli bir tesisten kaçınmak için ve kanal boyunun çok uzaması nedeniyle yapılacak maliyet mukayesesi hesapları sonucunda tünel alternatifinin daha ekonomik çıkması durumunda kanalın devamlılığı için yapılır. Pahalı ve inşası zor yapılar olması nedeniyle, genellikle tünel güzergâhları iki nokta arasını bağlayan en kısa düz hat olarak seçilir. Ancak, güzergâhın doğrusal olmasını mümkün olmayan topoğrafik durum veya fay hattından kaçınmak gibi önemli

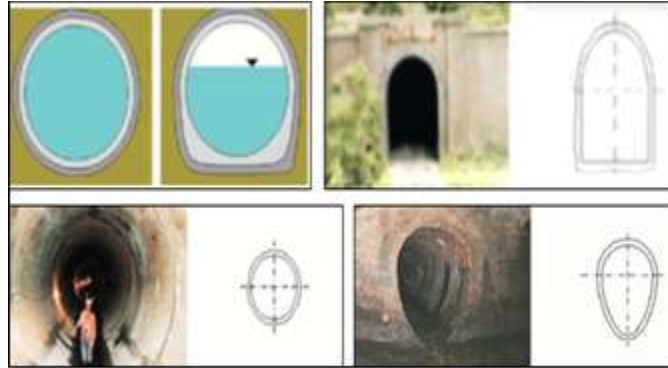
jeolojik nedenlerle güzergâh üzerine zorunlu olarak kurp veya kurplar koymak gerekebilir.

2.2 Tünel Açılmasında Jeoteknik Çalışmalar

Tünel mühendisliğinde en önemli unsur tünel güzergâhının jeolojisi. Jeolojik verilerin doğru olarak araştırılması ve saptanması çok önemlidir. Tünelde maliyetin artması ve inşaat süresinin uzaması, genellikle zorunluluk sebebiyle proje ve güzergâh değiştirilmesinden veya jeolojik çalışmaların yeteri kadar yapılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Tünelde zemin davranışının ve zemine ait jeoteknik özelliklerin önceden bilinmesi; tünel inşaatı sırasında çıkabilecek potansiyel sorunlara önceden çözüm getirmek tünel tasarımı açısından önemlidir. Bu nedenle yüzey araştırmaları ile birlikte yeraltı çalışmaları da detaylı olarak yapılmalıdır. Yeraltı araştırmalarında; sondaj, araştırma çukuru, galeri ve jeofizik araştırma yöntemleri kullanılır.

2.3 Tünellerin Sınıflandırılması

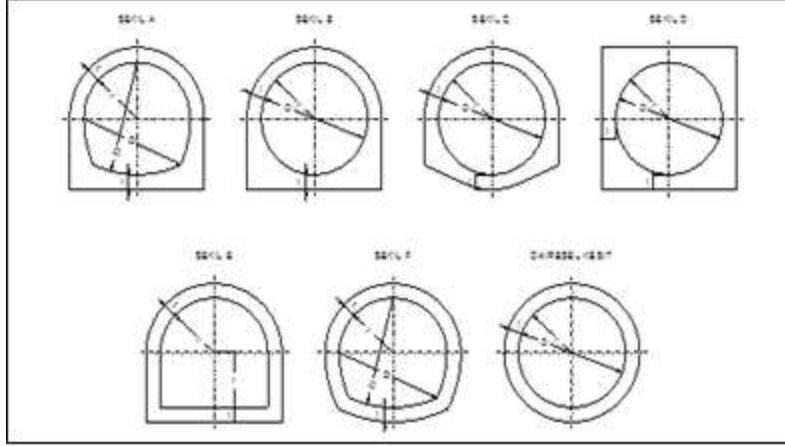
Tüneller iç basınç durumuna göre basınçlı ve serbest akımda çalışan basınçsız tüneller olarak sınıflandırılabilir. Basınçsız tüneller; demiryolu, karayolu tünelleri, metrolar, maden ocağı tünelleri ve kanal vazifesi gören tünellerdir. Basınçlı tüneller ise; genelde enerji maksatlı tünellerdir. Serbest akımda çalışan basınçsız tüneller için hidrolik açıdan uygun kesit tipi atnalıdır.



Şekil 1 - Çeşitli tiplerde tünel en kesitleri

Dairesel kesitlerde iç hidrostatik basınçlar uniform olarak dağıldığından ve teorik olarak iç ve dış yükler dairese kesitlerde en iyi şekilde karşılandığından bu tip kesitler daha çok basınçlı tünellerde tercih edilir. Tünel tip kesitleri,

her türlü yüke göre gerilme analizleri yapılmış olan Bureau of Reclamation yayınlarından "Beggs Deformeter Stress Analysis of Single Barrel Conduits" adlı kitapta tüm yük durumları için incelenmiştir [1].

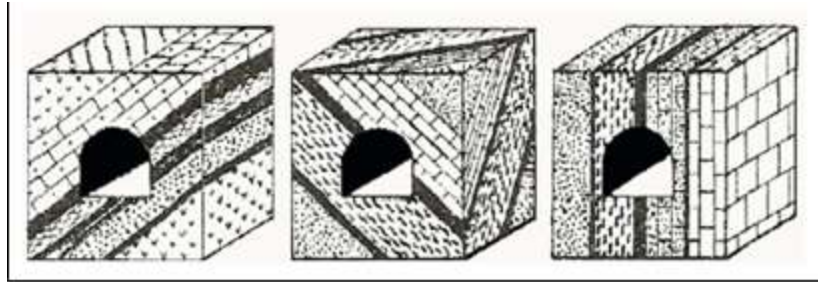


Şekil 2 - Tünel tip kesitleri

2.4 Tünel Girişinde Gerekli Minimum Örtü Kalınlığı, Kemerlenme

Kayaçlar, içinde bir kazı yapıldığında gerilmelerin etkisi ile açılan boşluğa doğru hareket etmek ister ve bu hareketi birbirlerine dayanarak bir dereceye kadar önlerler. Sonuçta denge oluşur. İşte bu denge haline 'Kemerlenme' denir. Kemerlenme kayaçlarda açılan boşlukların destek gerekmeden durabilme özelliği olarak da tarif edilebilir. Kemerlenme, kayacın jeolojik özelliklerine, doğrultu eğimi ile

tünel doğrultusu arasındaki ilişkiye, desteksiz kalan kısmın uzunluğuna bağlı olarak değişir. Masif, çatlaksız sert kayalarda kemerlenme fazladır ve tünel desteğe gerek duymadan açılabilir. Bir tünel kaplaması üzerine gelecek toplam basınç ve bu basıncın tünel güzergahı boyunca dağılım şekli doğrudan doğruya, tünelin içinde yer alacağı kayacın tabakalanma şekline bağlıdır. Kaya tabakalarını farklı biçimde kesen tüneller Şekil 3.'de gösterilmiştir [2].



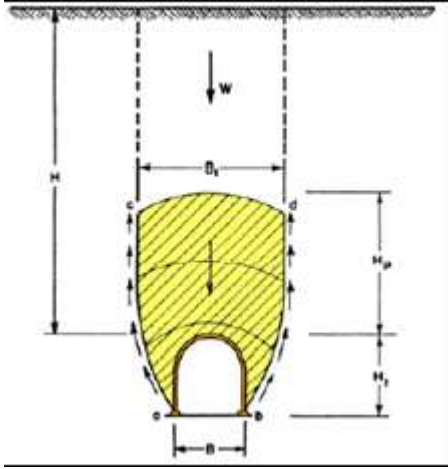
Şekil 3 - Kaya tabakalarını farklı biçimde kesen tüneller

Kemerlenme etkisinden dolayı, tünel giriş ve çıkışında üst kaplamadan itibaren belirli bir örtü

kalınlığı şartı aranır. Minimum örtü kalınlığı $H > 2,5-3,0 D$ (D: Tünel çapı) alınabilir.



Resim 1 - Tünel girişi



Şekil 4 - Tünel üzerinde oluşan kemerlenme

2.5 Tünellerde Yeraltısuyu (YAS)

Tünel güzergâhında açılacak sondajlarla yeraltısuyu seviyesi araştırılmalıdır. Tünelin yeraltısuyu seviyesi altında açıldığında, tünel açımı sırasında yeraltı su seviyesinde bir hareketlilik başlar. Süreksizlikler, boşluklar ve damarlar boyunca gelen su akımı açılan tünel boşluğuna doğru yönelir. Killi ve çok sık çatlaklı kayalar tünel boşluğuna hareket ederek tünel açılmasını zorlaştırır. Özellikle sıkışma ve şişme kapasitesi yüksek karakterli kaya ortamlarında tünel kazısı oldukça güçleşebilir.

Tünel drenajı, tünellerde taban kaplama betonu seviyesi altına su miktarına göre yerleştirilen $\Phi 200-500$ mm drenaj büzleri ile sağlanır. YAS altındaki bazı tünellerde büyük su hacmi ile karşılaşmakta ve inşaat büyük ölçüde aksayabilmektedir. Bu durumda, drenaj büzü yetersiz kalmakta olup tünel içinde belli aralıklarla açılacak su toplama çukurları ve buradan yapılacak pompalı tahliyelerle suyun boşaltımı sağlanabilir.

Zamantı tüneline kazısı sırasında $0,435 \text{ m}^3/\text{s}$, Silvan tüneline ise $1,60 \text{ m}^3/\text{s}$ su çıkışı meydana gelmiştir. Bu durum tünellerde çalışmayı imkânsız hale getirmiştir. Zamantı tüneline $\Phi 800$ mm'lik boru tüneline tabanına döşenerek su uzaklaştırılmış, Silvan tüneline ise kimyasal enjeksiyon yapılarak çalışma şartları sağlanmıştır. Bu çalışmalar tünel inşaatı aşamasında beklenmeyen durumlar olması sebebiyle tünel maliyetinde artışlara neden olmuştur.



Resim 2 - Silvan tüneli kazısı sırasında karşılaşılan su çıkışı

2.6 Tünellerde Enjeksiyon

Enjeksiyon, tünel çevresindeki kayada boşlukların doldurularak kaya kalitesinin iyileştirilmesi işlemidir. Tünelleri sağlamlaştırmak; beton kaplama ile kayayı çimento ile birbirine bağlamak, kaya içindeki çatlakları doldurarak geçirimsiz hale getirmek şeklinde tanımlanabilir. Enjeksiyon çalışmaları genelde iki aşama halinde yapılır. İlk aşama Kontak Enjeksiyonudur. Tünelde kaplama çalışmaları tamamlandıktan sonra tünel betonu ile zemin arasında kalan boşluğun doldurulması işlemine Kontak Enjeksiyonu denir. Tünel betonunun dökülmesi sırasında tünel tavanı ile kemer betonu arasında yerçekimi etkisinden kaynaklanan beton boşlukları oluşur. Bu boşluklar enjeksiyon ile doldurulmadığı zaman boşluklara dolan basınçlı su betonu zorlayacaktır. Ayrıca bu durum tünelde göçüklerin olmasına neden olabilir. Zemin içinde kalan boşlukların doldurulması işlemine ise Konsolidasyon Enjeksiyonu denir. Konsolidasyon enjeksiyonunun başlıca amacı beton çevresindeki kayaların stabilitesinin sağlanmasıdır.

3 TÜNELLERDE KAYA SINIFLANDIRMASI

Tünellerin projelendirilmesi ve inşaatı aşamasında, emniyet ve ekonomi göz önünde bulundurulması gereken iki önemli faktördür. Tünellerin emniyetle inşa edilebilmeleri için inşaat öncesi jeolojik etüt ve araştırmaların gereken hassasiyetle yapılarak projelendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Tünel açma ve destekleme işleri için çeşitli kaya sınıflamaları yapılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanlar;

- Terzaghi kaya sınıflandırması,
- RMR (Rock Mass Rating) kaya sınıflandırması ve
- Q (NGI = Norveç Jeoteknik Enstitüsü) kaya sınıflandırmasıdır.

3.1 Terzaghi Kaya Sınıflandırması

Terzaghi kaya sınıflandırması kayaları 9 grupta toplamış ve her grup için fiziksel özellikler, düşey yük aralıkları ve destek tipleri belirtilmiştir.

Çizelge 1 - Terzaghi kaya sınıflandırması ve yükleri ve destekleme tipleri

No	Fiziksel özellik	Düşey yük	Desteklenme tipi
1	Sağlam ve çatlaksız	0	Kaya bulonu veya az destek
2	Sağlam tabakalı veya şistsel	0-0,5 B	Kaya bulonu ve/veya az destek
3	Eklemlili ve çatlaklı	0-0,25B	Kaya bulonu ve/veya destek
4	Parçalı ve kil çatlaklı	0,25B-0,35(B+Ht)	Sık kaya bulonu (2 m aralıklı) ve/veya destek
5	Çok parçalı ve kil çatlaklı	(0,35-1,10)(B+Ht)	Dairesel destek ve flexible kaplama
6	Tamamen parçalanmış	1,10(B+Ht)	Dairesel destek ve flexible kaplama
7	Az şişen	(1,10-2,10)(B+Ht)	Dairesel destek ve flexible kaplama
8	Orta derecede şişen	(2,10-4,50)(B+Ht)	Dairesel destek ve flexible kaplama
9	Çok şişen	(B+Ht)'ye bağlı kalmadan 250 ft'e kadar çıkabilir	Dairesel destek ve flexible kaplama

Tünel ile ilgili yapılan jeolojik etütlerde, deneylere bağlı olarak düşey yük katsayıları kesin olarak belirtilmemiş ise Tablo 1'de belirtilen katsayılardan faydalanılır. Terzaghi bu tabloyu hazırlarken uzun yıllar laboratuvarında deneyler yaparak zemin kemerlenmesini incelemiştir.

3.2 RMR (Rock Mass Rating) Kaya Sınıflandırması

Bu sınıflandırmada; sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı, RQD değeri, eklem aralığı, eklem koşulları, eklem su durumu ve süreksizliklerin tünel eksenine göre durumu dikkate alınarak değerlendirme yapılır. RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen parametreler esas alınmaktadır.

- Kayanın tek eksenli basınç dayanımı (MPa),
- RQD kaya niteliği (%),
- Çatlakların ara uzaklığı (m),
- Çatlakların durumu (ayrışma, pürüzlülük, dolgu ve açıklık),
- Yeraltısuyu koşulları,
- Çatlakların doğrultu ve eğimi.

Çizelge 2 - RMR (Rock Mass Rating) kaya sınıflandırması

Sınıf No	RMR Puanı	Tanımlama
I	100-81	Çok iyi kaya
II	80-61	İyi kaya
III	60-41	Orta kaya
IV	40-21	Zayıf kaya
V	<20	Çok zayıf kaya

3.3 Q (NGI = Norveç Jeoteknik Enstitüsü) Kaya Sınıflandırması

Q (NGI) sistemi 1974 yılında, Norveç Jeoteknik Enstitüsü araştırmacıları tarafından ortaya konmuştur. Q kaya sınıflamasını belirten eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

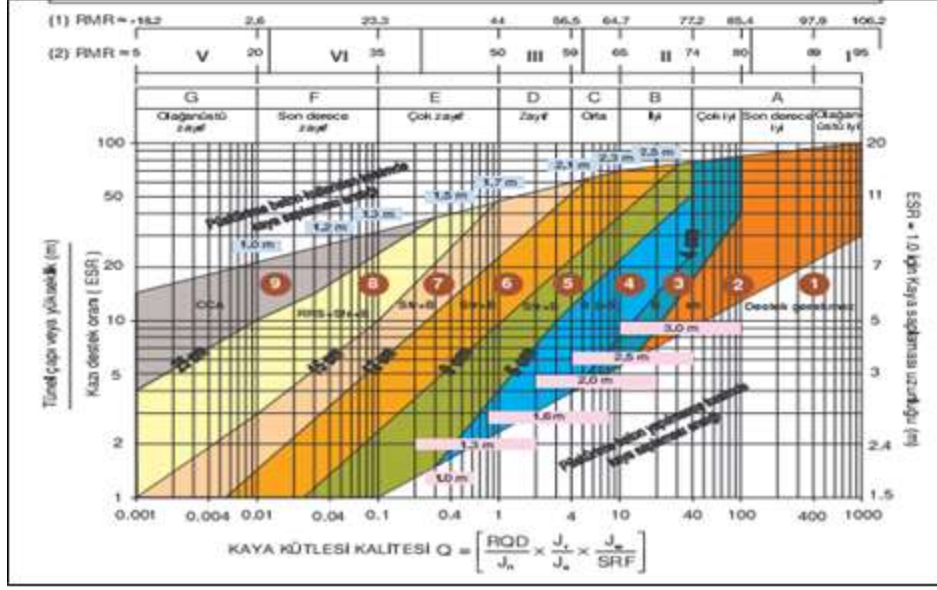
Burada;

Q: Kaya kütlesi niteliğini,
RQD: Kaya kalitesinin belirlenmesini (%),
J_n: Çatlak sistemi değerini,
J_r: Çatlak pürüzlülük değerini,
J_a: Çatlak ayrışma değerini,
J_w: Çatlak suyu azaltma faktörünü ve
SRF: Gerilme azaltma faktörünü ifade eder.

Q kaya kütlesi tanımlama sisteminde Q değerlerine bağlı olarak Terzaghi kaya sınıflandırmasında olduğu gibi 9 grupta kaya kütlesi tanımlanmıştır. Tünelin destek gerektirip gerektirmeyeceğini belirlemek için Eşdeğer Boyut (De) olarak bir kavram tanımlanmıştır. Eşdeğer Boyut (De) = En, çap veya yükseklik (m) / Kazı destek oranı (ESR) formülü ile hesaplanır. Q kaya kütlesi ve Eşdeğer boyut (De) değerleri kullanılarak Şekil 5'ten tünel destek tipi belirlenir.

Çizelge 3 - Q (NGI) kaya sınıflandırması

Q	Tanımlama
0,001-0,01	Olağanüstü zayıf
0,01-0,1	Aşırı zayıf
0,1-1	Çok zayıf
1-4	Zayıf
4-10	Orta
10-40	İyi
40-100	Çok iyi
100-400	Aşırı iyi
400-1000	Olağanüstü iyi kayaç



Şekil 5 - Q (NGI) kaya sınıflandırmasında destek sisteminin belirlenmesi

Burada;

- 1-Destek gerekmez
- 2-Lokal kaya saplaması(bulonlama) (sb)
- 3-Sistematik kaya saplanması (B)
- 4-Sistematik kaya saplanması ve 4-5 cm kalınlığında takviyesiz püskürtme beton (B(+S))
- 5-Kaya saplamalı, çelik kafes takviyeli 5-9 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
- 6-Kaya saplamalı, kafes takviyeli 9-12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
- 7-Kaya saplamalı, kafes takviyeli 12-15 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
- 8-Kaya saplamalı, çelik iksalı, kafes takviyeli 15-25 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
- 9-Beton kemerli (CCA) 'yi ifade eder [3, 10].

4 TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tünel projesi hazırlanmadan tünel açma önce yöntemi belirlemek için çalışmalar yapılması gerekir. Tünel açma yöntemine; tünel kazı çapı ve uzunluğu, kazı yapılacak güzergâhın jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, tünel üzerindeki örtü kalınlığı, yapım süresi ve maliyeti göz önüne alınarak karar verilir. Belirtilen parametrelerden en önemlisi ve yöntem belirlemede asıl belirleyici olan tünel çapı ve tünel uzunluğudur. Jeolojik, topoğrafik ve proje özellikleri gibi şartlarla birlikte tünel uzunluğunun 3,0 km civarında olması halinde ekonomik mukayese yapılarak tünel açma yöntemi belirlenmelidir.

En yaygın kullanılan tünel açma yöntemleri:

- Konvansiyonel (Klasik) Tünel Açma Yöntemi (del-patlat),
- Tünel kazma makinesi (roadheader) ile tünel açma,

- Boru itme yöntemi (pipe – jacking) ile tünel açma ve
- Tam kesit tünel delme makinesi (TBM=TDM) ile açılan tünel açma yöntemleridir.

Burada, tünel delme makinesi (TDM) ve konvansiyonel (klasik) tünel açma yöntemi ile açılan tünellerde yapılması gereken proje çalışmaları incelenecektir.

4.1 Konvansiyonel (Klasik) Tünel Açma Yöntemi

Del-patlat yöntemi de denilen bu yöntemde gerekmesi halinde kullanılan patlayıcı madde özelliklerinin bilinmesi ve delik geometrisinin özenli bir çalışma sonucu oluşturulması gerekmektedir. Bu yöntem hemen hemen her türlü kaya şartlarında emniyet ve başarı ile kullanılmaktadır.

Yapım aşamaları şunlardır:

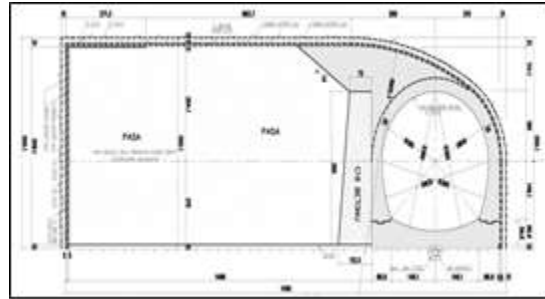
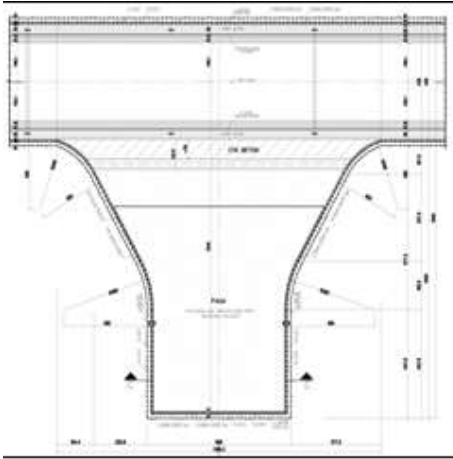
- Tünel aynasında patlayıcıların yerleştirileceği delikler açılır.
- Açılan deliklere daha önceden hesaplanmış miktarda patlayıcılar yerleştirilir
- Deliklerde bulunan patlayıcılar ateşlenir ve patlatmadan meydana gelen gazların giderilmesi için havalandırma yapılır.
- Düşme ihtimali olan kayaç parçaları düşürülür, gerekli durumlarda yeni açılan kısma iksa yapıldıktan sonra çıkan kazı malzemesi taşınır.
- Tünel kazısı ve desteklemeleri tamamlandıktan sonra beton kaplaması yapımına başlanır.

Bu yöntemde; ilk malzeme ve teçhizatın ucuzluğu, hemen hemen her türlü kayaç koşullarında kullanılabilirliği gibi üstünlükleri yanında ilerlemenin yavaş olması, aşırı sökülmenin önüne geçilememesi dolayısıyla da

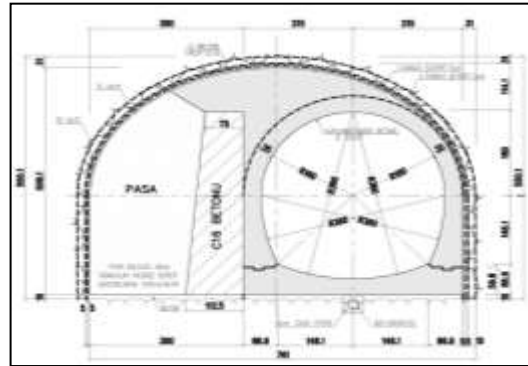
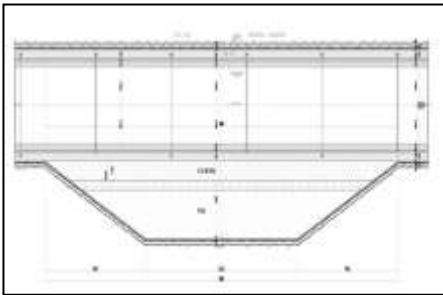
tünel en kesitinin aynen açılmasının mümkün olmaması, çevredeki kayaçları yumuşatması, ne kadar hassasiyet gösterilirse gösterilsin patlatmanın sebep olduğu gevşemelerden kaçınılamaz olması gibi sakıncaların bulunduğunu belirtmek gerekir. Fakat kaya şartlarının tünel güzergâhı boyunca değiştiği durumlarda veya çok yüksek mukavemetli kayalarda uygulanabilecek en uygun yöntem olabilir.

4.1.1 Tünellerde Karşılaşma, Trafo ve Manevra Cepleri

Tünel ilerleme hızının sağlanabilmesi, tünel kazılarında ve beton kaplama yapımında nakliye araçlarının karşılaştıma ve dönüş yerleri için ve dinamit atımlarında sığınak olarak kullanılmak üzere yaklaşık 250 m aralıkla cep yapılır. Karşılaştıma ve manevra ceplerinin yapılmaması durumunda tünel kazı çalışmaları aksamakta ve yapım süresi uzamaktadır.



Şekil 6 - Manevra cebi planı ve kesiti



Şekil 7 - Karşılaştıma cebi planı ve kesiti

Uzun tünellerde proje çalışmaları sırasında mümkün olduğu kadar yaklaşım tüneli yapımı düşünülmelidir. Belirlenen yaklaşım tünelinin uzunluğu ile yaklaşım tünelinin çalışmaya kazandıracağı hız ve sağlayacağı ekonomik katkı değerlendirilerek yaklaşım tünelinin yapılıp yapılmamasına karar verilmelidir.

Tünel uzunluğu, topoğrafik şartlar ve işin ekonomisi dikkate alınarak, tünele bir veya birden fazla yaklaşım tüneli açılıp açılmayacağı konusunda gerekli inceleme ve araştırmalar yapılmalıdır.

4.1.3 Ödeme Hattı

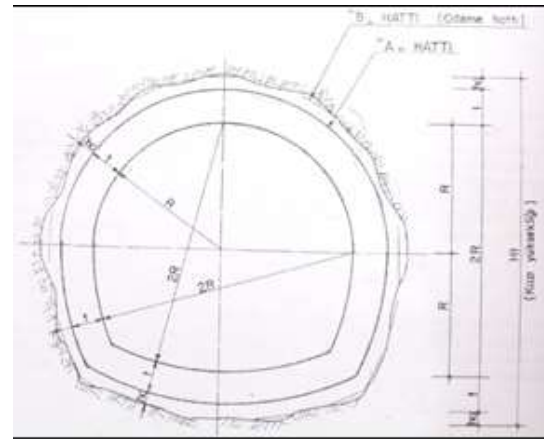
Tünelde yüzey desteklemesi yapılmayan kısımlarda, kaplama betonun dış yüzü A hattı olarak kabul edilecektir. A hattı içerisinde kazılmamış yer bırakılmayacaktır. B hattı ise ödemeye esas oluşabilecek kaya parçalanmalarını ve dökülmelerini ifade eden bir mesafedir. Yüzey desteklemesi yapılan (çelik iksa, tel kafes, ön kaplama betonu, püskürtme betonu vs.) yerlerde ise destek imalatlarının dış yüzü A hattı olarak kabul edilecektir.

4.1.4 Tünellerde Kazı Destekleme Tipleri

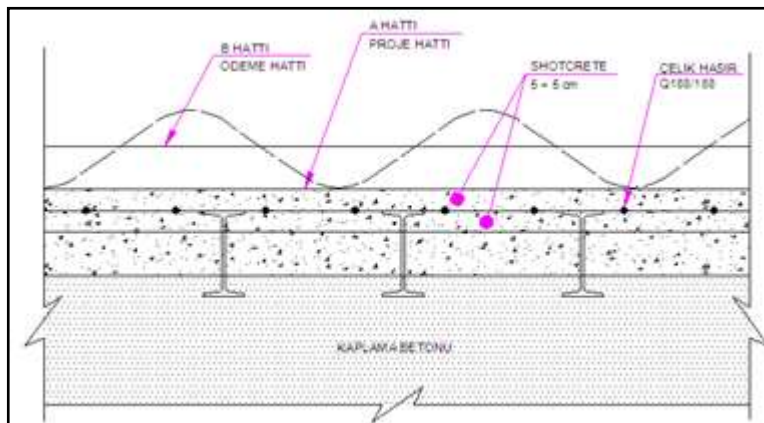
Yeraltında açılan boşluğun aynı geometride kalabilmesini sağlamak için, bozulmasına neden olacak faktörlerin ortadan kaldırılması veya başka bir tedbirle desteklenmesi gerekir. Kazı sonrası tünel çevre kayasında oluşan yeni gerilmeler deformasyona neden olur. Bu

deformasyona karşı tünelin doğal kemerlenme ile kendisini tutabilme süresi içinde bazı destek sistemleri ile direncinin artırılması gerekir. Bunun için çelik iksa, püskürtme betonu, tel kafes, kaya bulonu, süren vb. destekleme elemanları kullanılır [4].

Tünelde kazı çalışmaları sırasında alınacak tedbirlerden, zemin sınıfına göre bazen bir tanesi bazen de birden fazlası uygulanır. Proje hazırlığı aşamasında; “Mühendislik Jeolojisi Raporu”na göre tünelde karşılaşılması muhtemel zemin sınıfları için ayrı ayrı olmak üzere kazı destek projeleri hazırlanır. Bu projelere göre kazı çalışmaları yapılır.



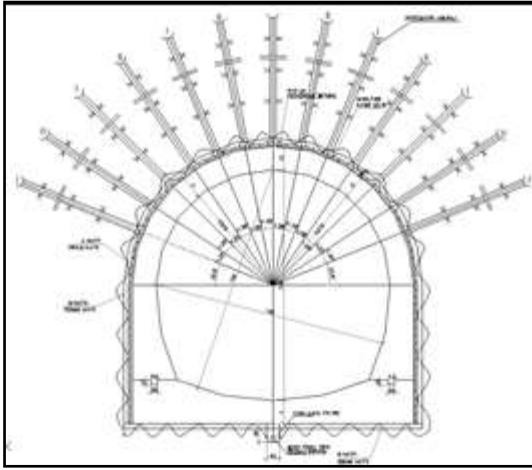
Şekil 8 - Klasik tünel tip kesiti



Şekil 9 - Klasik tünelde kaplama ve destekleme kesiti



Resim 3 - Tünelde püskürtme betonu, süren ve çelik iksa uygulaması



Şekil 10 - Tünelde sistematik kaya bulunu uygulaması

4.1.5 Konvansiyonel (Klasik) Tünel Açma Yönteminin Avantajları/Dezavantajları

- İlk malzeme ve teçhizatın ucuzdur,
- Hemen hemen her türlü kayaç koşullarında kullanılabilir,
- Kaya şartlarının tünel güzergâhı boyunca değiştiği durumlarda veya çok yüksek mukavemetli kayalarda uygulanabilecek en uygun yöntem olabilir.
- Tünel açım hızı yavaştır,
- Kaplama yapım süresi geciktirdiğinden tünel çevresindeki kayaçları yumuşatır,
- Aşırı sökülmenin önüne geçilememesi sebebiyle tünel en kesitinin projesine uygun açılması zordur, ne kadar hassasiyet gösterilirse gösterilsin patlatmanın sebep olduğu gevşemelerden kaçınılamaz olması gibi sakıncaların bulunduğunu belirtmek gerekir.

- Emniyetli kazı şartlarının sağlanabilmesi için maliyeti yüksek tünel desteklemelerinin yapılması gerekmektedir.

4.2 Tam Cepheli Tünel Delme Makinesi (TBM=TDM) ile Açılan Tünel Açma Yöntemi

Bu tür makineler için "Fullface Tunelling Machine" veya sadece "Tunnel Boring Machine" (TBM) deyimleri kullanılmaktadır. Makine ile tünel açımından söz edildiğinde ilk akla gelen tam kesit makinelerdir. Küçük çaplı (2-3 m) tünel kesitlerinde kullanılmaya başlanan bu makineler, son zamanlarda 18-19 m çapındaki tünellerde de başarılı olarak kullanılmaktadır.

Tünel delme makinesinin çalışma aşamaları;

- Kazı yapılması,
- Segmentlerin yerleştirilmesi,
- Segmentlerle kazı yüzeyi arasına yastık dolgusu yapılması,
- Enjeksiyon yapılmasıdır.



Resim 4 - Tam kesit tünel delme makinesi

Tünel delme teknikleri geçmişten günümüze çok büyük değişim göstermiştir. Özellikle tünel delme makinelerinin hızla gelişmesi, zemin şartları ne olursa olsun her durumda tünel açılabilmesini de beraberinde getirmiştir. İnşaat hızı göz önüne alındığında tünel delme makineleri ile kazı güvenli ve çoğu zaman avantajlıdır.

Tam cepheli tünel delme makineleri, kalkanlı (single) ve kalkansız (ripper) TDM olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir.

Günümüzde en çok tercih edilen kalkanlı tünel delme makinesi çeşitleri;

- **Tek Kalkanlı (Single Shield) TDM,**
- **Çift Kalkanlı (Double Shield) TDM,**
Sağlam zemin koşullarında açılacak tünellerde tek veya çift kalkanlı TDM tercih edilmektedir.
- **EPB / Slury (Zemin Basınç Dengeleyici) TDM,**

Zayıf zemin koşulları ve yeraltısuyu bulunan zemin formasyonunda geçen tünellerde yanal ve üst basınçları dengeleyip deformasyona izin vermeyen EPB tipi kullanılmalıdır.

- **Karışık (Mixshield) TDM'ler ise,**
Zemin koşullarının değişken olduğu güzergâhlarda ise karışık tip TDM seçilmesi uygun olacaktır.

TDM seçiminde, detaylı hazırlanmış olan jeolojik rapor incelenerek doğru seçimin yapılmasına dikkat edilmelidir.

4.2.1 TDM Giriş Platformu

Tünel delme makinesinin montajının yapılacağı, kazı malzemesinin ilk depolanacağı, segment üretim tesisi ve segment depolama alanı için tünelin çıkışına bir alan oluşturulur. Arazi şartlarının durumuna göre segment üretim tesisi farklı bir alanda yapılabilir.



Resim 5 - Tünel delme makinesi giriş platformu

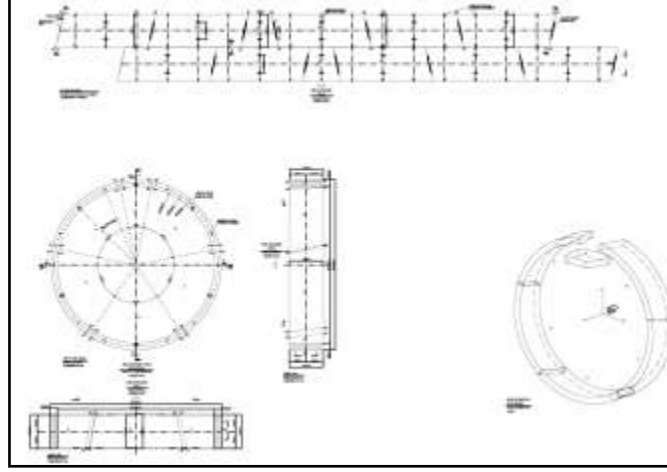


Resim 6 - Segment fabrikası, segment donatısı ve kalıbı

4.2.2 TDM İle Açılan Tünelde Segment Tasarımı

TDM ile açılan tünellerde kaplama olarak prefabrik üretilmiş segment betonu kaplamalar kullanılır. Segmentler bal peteği, trapez, universal vb. tipte olabilir. Universal tip segment

uygulamada başarılı sonuçlar sağlamaktadır. TDM segment tasarımında C40-C45 beton sınıfı kullanılmaktadır. Ayrıca TDM ile açılacak tünel güzergahında gerekmesi halinde, TDM'nin ve segmentlerinin sorunsuz bir şekilde geçebileceği dönüş kurp açıları kullanılmalıdır.



Şekil 11 - Universal tip tünel segmenti ve halka görünümü

Çizelge 4 - İç çapa göre yaklaşık segment kalınlıkları ve uzunlukları

Tünel İç Çapı, D (m)	Segment Kalınlığı, t (cm)
2-5	15-25
5-8	20-40
> 8	30-75

Çizelge 5 - Yaklaşık segment adeti ve uzunlukları

Tünel İç Çapı, D (m)	Segment Adeti	Segment Halka Uzunluğu, L (cm)
2-5	3-6	75-150
5-8	6-9	125-200
> 8	> 9	150-225

Tünele ait jeolojik raporda; jeolojik arazi gözlemleri, temel sondajları, yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen jeolojik-jeoteknik veriler detaylı olarak değerlendirilerek tünel jeolojisi belirlenmelidir. Jeolojik parametreler tespit edilmelidir [5].

Örnek bir çalışmadan alınan verilerle segment tasarımı değerlendirilecektir [6].

Segment kaplama tasarımı için en kritik jeolojik kesitler belirlenir. Tünel delme makinesi ile açılan tünellerde jeolojik rapor detaylı olmalı, tünelde karşılaşılabilecek jeolojik sorunlar kapsamlı şekilde irdelenmelidir. Tünel güzergâhında fay hattı bulunuyorsa deprem analizlerinde dikkate alınmalıdır. Tünel jeolojik raporundan tünel güzergâhının jeolojik kesitlerine ait zemin parametreleri tespit edilir.

Çizelge 6 - Tünel güzergahı jeolojik formasyon dağılımı

Başlangıç Km	Bitiş Km	Uzunluk [m]	Jeolojik Birim	Min. Örtü Kalınlığı [m]	Ortalama Örtü Kalınlığı [m]	Max. Örtü Kalınlığı [m]
0+000	0+635	635	Gercüş	38	118	198
0+635	2+190	1555	Midyat	220	259	298
2+190	3+530	1340	Gercüş	255	293.5	332
3+530	4+590	1060	Midyat	82	169.5	257
4+590	4+950	360	Germik	129	143	157
4+950	5+300	350	Silvan	27	78	129

Çizelge 7 - Tünel güzergâhında kritik jeolojik kesitlere ait parametreler

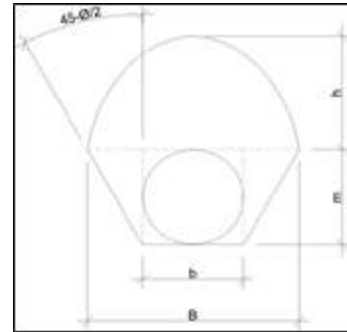
Kesit	KM Değişimi	Jeolojik Birim	Analiz Kesiti	Örtü Kalınlığı [m]	Yeraltı Suyu Yüksekliği [m]	γ [kN/m ³]	C [KPa]	ϕ [°]	E [MPa]	ν	K_0
A	0+350	Gercüş	Max. Yeraltı Suyu Seviyesi	198	77	24.5	700	40	1800	0.31	0.45
B	2+950	Gercüş	Max. Örtü Kalınlığı	332	-	24.5	900	35	1800	0.31	0.45
C	3+530	Midyat	Midyat takı Max. Örtü Kalınlığı	257	-	25.5	480	27	1270	0.33	0.49
D	4+340	Midyat	Min Örtü Kalınlığı	82	-	25.5	250	35	1270	0.33	0.49
E	4+700	Germik	Germik'teki Max. Örtü Kalınlığı	157	-	25	380	29	1720	0.3	0.43

Yukarıdaki tabloda beş farklı jeolojik analiz kesiti belirlenmiştir. Tünel yeraltısuyu altında ise su yükü (Kesit A'da) hesaplamalarda tünele etki ettirilmelidir.

Tasarım Yüklerinin Hesaplanması;
Belirlenmiş olan her bir analiz kesiti için; yapının dairesel şeklinden dolayı zeminde oluşacak kemer etkisini dikkate alan "Protodyakonov Teorisi", tünel etrafındaki kaya kütlelerinin doğal haldeki gerilmenin dağılımı ile tünel segment kaplaması tamamlandıktan sonraki yeniden dağılımını dikkate alan "Karakteristik Eğri Teorisi" (Characteristic Line Method) metodu ve Terzaghi tarafından önerilen formülasyona göre tasarım yükü hesabı yapılabilir. Her bir kesit için kritik sonuç veren metot dikkate alınmalıdır.

4.2.2.1 Protodyakonov Teorisi'ne Göre Zemin Yükü Hesabı

Protodyakonov Teorisi'ne göre tünel kazısı sırasında meydana gelebilecek kaya yükü; kırılma yüzeylerinin kesişim noktasından başlayan bir parabol ve tünel kesitinin tam altından geçecek yatay bir çizgi tarafından çevrelenen zeminin yükü olarak kabul edilebilir.



$$h = B/(2f)$$

$$B = b + 2 \text{ m tan } (450 - \phi/2)$$

$$\phi = \text{İçsel sürtünme açısı}$$

$$f = \text{Dayanım faktörü (sertlik katsayısı)}$$

$$m = b = \text{Tünel dış çapı}$$

Şekil 12 - Protodyakonov parabolü

Burada dayanım faktörü (f), tünel jeolojisine göre belirlenmelidir [2].

Çizelge 8 - Dayanım faktörü (sertlik katsayısı, f) ve içsel sürtünme açıları (ϕ)

Zemin Cinsi	Dayanım faktörü (sertlik katsayısı, f)	İçsel Sürtünme Açıları (ϕ)
Adi kumtaşı, demir cevherleri	6,0	80°
Kumlu şistler, şistli kumtaşı	5,0	75°
Sert killi şistler, gevşek kumtaşı ve kalkerler, yumuşak konglomera	4,0	75°
Çeşitli gevşek şistler, sert marn	3,0	71°
Yumuşak şist, çok yumuşak kalker, kaya tuzu, donmuş toprak, adi marn, kırıklı kumtaşı, taşlaşmış toprak	2,0	63°
Çakıllı zeminler, kırıklı şistler, yumuşak konglomera, sert taş kömürü, sert kil	1,5	56°
Sert kil, taş kömürü	1,0	45°
Hafif kumlu kil, lösler	0,8	38°
Turbalar, kumlu kil, rutubetli kum	0,6	30°
Kum, ince çakıl, kazılmış zeminler, kazılmış kömür	0,5	26°
Balçık ve diğer topraklar	0,3	16°

Protodyakanov Teorisine göre tünele etkileyen zemin yüksekliği ve düşey-yatay zemin yükleri hesaplanır.

Çizelge 9 - Tünel segmentine etkileyen yükler

Parametreler		Birim	A	B	C	D	E	F
Kohezyon	c	kPa	700	900	480	250	380	100
Birim ağırlık	γ	kN/m ³	24.50	24.50	25.50	25.50	25.00	24.00
İçsel sürtünme açısı	ϕ	°	40	35	27	35	29	20
İçsel sürtünme açısı	ϕ	rad	0.698	0.611	0.471	0.611	0.506	0.349
Poisson oranı	ν		0.31	0.31	0.33	0.33	0.30	0.30
Yatay / Düşey gerilme oranı	K_0		0.45	0.45	0.49	0.49	0.43	0.50
Tünel yarıçapı	R_0	m	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80
Protodyakonov dayanım faktörü	f		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.50
Hesaplanan Değerler	b		7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
	m		7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
	B		14.69	15.51	16.91	15.51	16.55	18.24
Sonuçlar		Birim	A	B	C	D	E	F
Protodyakonov yüksekliği	h	m	3.67	3.88	4.23	3.88	4.14	18.24
Kaplamaya etkileyen düşey yük	p_v	kPa	90	95	108	99	103	438
Kaplamaya etkileyen yatay yük	p_h	kPa	40	43	53	49	44	219

4.2.2.2 Karakteristik Eğri Metoduna (Characteristic Line Method) Göre Zemin Yükü Hesabı

Tünel kazılarında; kazıdan önce kayadaki mevcut gerilme, tünel çevresindeki kaya kütlelerinde ve tamamlanmış tünel kaplamasında yeniden dağılıma sebep olur. Gerçekte tünel kazısı sırasında dengelenmemiş bir kuvvet ortaya çıkar, tünelin stabilitesini sağlamak için dengelenmemiş kuvveti kısmen tünel etrafındaki kayadaki tekrar dağılımı ve kısmen de tamamlanmış kaplamanın verdiği sıkıştırma basıncı tarafından denge durumuna ulaştırıldığı düşünülür.

Tünelde, $[\lambda \times \text{kuvvet} (p_0)]$ kadarlık kuvvetin kaplama tamamlanmadan önceki kaya

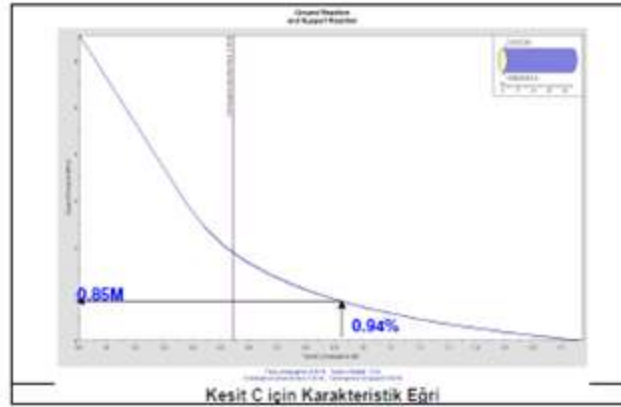
kütlesinde oluşan yeniden dağılım tarafından dengelenir ve bu kazı yapılan kesitte kaplama tamamlanmadan oluşan yeni durumdur. $[(1 - \lambda) \times \text{kuvvet} (p_0)]$ kadarlık kuvvetin ise analiz yapılan kesite ait tamamlanmış tünel kaplaması tarafından karşılandığı kabul edilir.

P0 tünelde oluşan kuvveti, λ katsayısı ise "Gevşeme Katsayısı" olarak adlandırılır ve 1 ve 0 arasında değişir. (1;kaplamada hiç basınç yokken ve kaya kütlelerindeki yeniden dağılım tamamlandıktan sonra, 0; kaplama tarafından karşılanan basınç, kaya kütlelerinin kazıdan önceki doğal iç basıncı p_0 'a eşit olunca kullanılır).

Kaya ortamındaki derin tünellerde oluşan kuvvetin (p_0) büyük kısmı kaplama tamamlanmadan önce kemer etkisi sebebiyle

kaya kütlesi içerisindeki yeniden dağılım $[\lambda \times p_0]$ tarafından dengelenir. Bu nedenle genellikle $[(1 - \lambda) \times p_0]$ kadarlık kısım başlangıç gerilmesinden

daha küçüktür. Belirlenen kuvvetlere göre kaplamaya aktarılan yük; tünel karakteristik eğrisine göre belirlenir. [6].



Şekil 13 - Karakteristik eğri metodu ile hesaplanan yük

Çizelge 9 - Karakteristik eğri metodu ile hesaplanan yükler

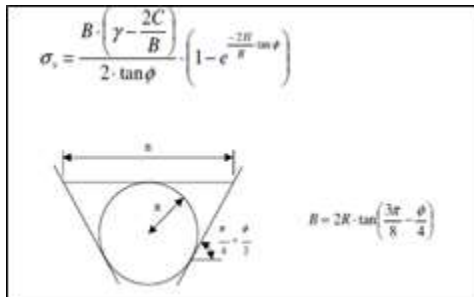
Hesaplanan Değerler		Birim	A	B	C	D	E	F
Kaplamaya gelen düşey yük	p_v	MPa	0.00	0.60	0.85	0.00	0.00	0.30
		kPa	0	600	850	0	0	300
Kaplamaya gelen yatay yük	p_h	kPa	0	270	419	0	0	150

Yeraltı suyu yüksekliği	h_w	m	77	0	0	0	0	20
Kaplamaya gelen düşey yük (yeraltı suyu dikkate alınarak)	p_v	kPa	0	600	850	0	0	300
Kaplamaya gelen su yükü	p_w	kPa	770	0	0	0	0	200
Toplam düşey yük	Σp_v	kPa	770	600	850	0	0	500
Kaplamaya gelen yatay yük	p_h	kPa	770	270	419	0	0	350

Jeolojik kesitlerden kritik değer verenlerden; A, D ve E için Protodyakonov Teorisi, B, C ve F için ise Karakteristik Eğri Metodu dikkate alınmalıdır.

4.2.2.3 Terzaghi Tarafından Önerilen Formülasyona Göre Zemin Yükü Hesabı

Düşey yük hesabı;



σ_v : tünel üzerindeki gevşeyen zemin yükü (ton/m²)

B: tünel üzerindeki gevşeyen zemin genişliği (m)

γ : zemin birim ağırlığı (ton/m³)

C: kohezyon (ton/m²)

ϕ : İçsel sürtünme açısı (°)

H: zemin derinliği (m)

R: ortalama tünel yarıçapı (m)

Yatay yük hesabı;

$K_0 = \gamma / (1 - \gamma)$ veya $K_0 = 1 - \sin \phi$ formülleriyle bulunur.

Zemin yükü, çok bloklu ve çatlaklı olan kayalarda 0.7~2.2D kadar alınabilir. Olası bir kaya kütlesi sıkışması durumuna karşılık hesaplarda iki tünel çapı (2D) kadar örtü kalınlığı dikkate alınabilir. Bu yaklaşıma göre düşey ve yatay zemin yükü;

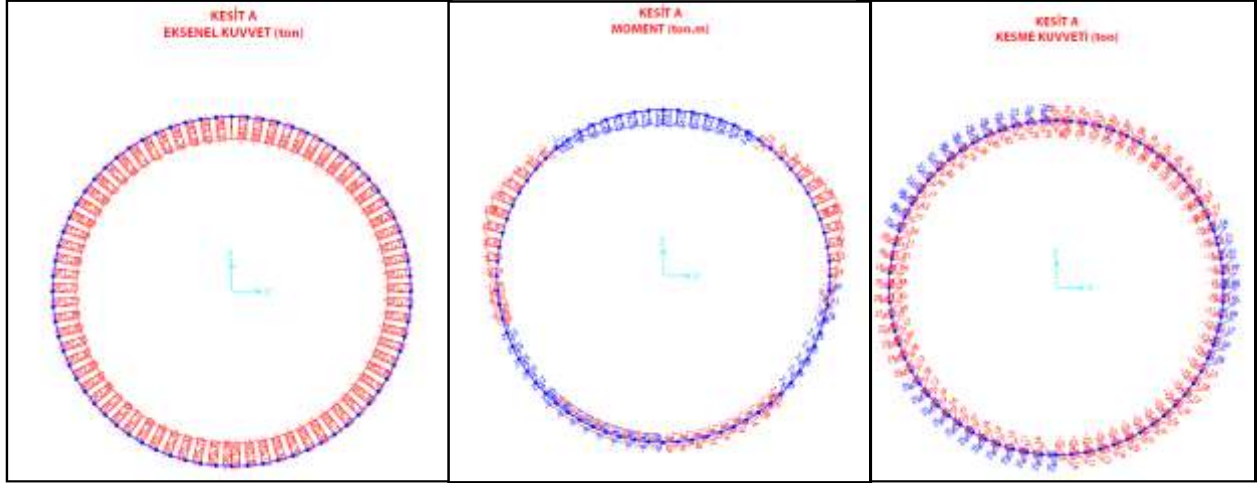
$\sigma_{düşey} = 2 \times D \times \gamma$

$\sigma_{yatay} = K_0 \times \sigma_{düşey}$ 'dir [7].

Yukarıda belirtilen yöntemlerle bulunan kritik kesit yükleri dikkate alınarak yük

kombinasyonları oluşturularak SAP2000 programında hesaplamalar yapılır. Yük kombinasyonlarında tünel kesitine; zati yük, düşey zemin yükü, yatay zemin yükü, yer altı suyu basıncı ve tünel iç su basıncı farklı yük

kombinasyonları ile uygulanır. Bu yüklere ilave olarak, şişme potansiyeli olan zeminlerde zemin şişme yükü ile tünelin fay hattına yakın olması durumunda deprem yükü de analizlerde dikkate alınır.



Şekil 14 - Analiz sonuçları

Çizelge 10 - Analiz sonuçları

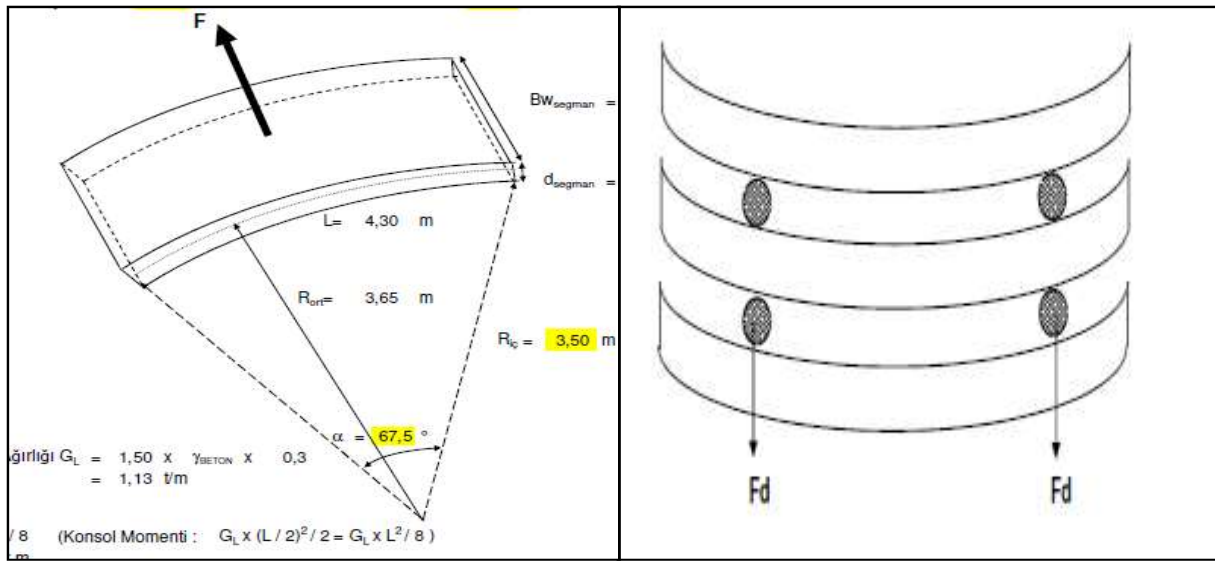
		L = 1,5 m Segman Genişliği İçin Analiz Sonuçları				
	Kombinasyon	M _{max} (t.m)	N (t)	M (t.m)	N _{max} (t)	V _{max} (t)
KESİT A	COMB-1	10,29	675,76	6,59	676,21	37,85
	COMB-2	10,27	591,68	0,49	595,84	31,39
KESİT B	COMB-3	12,11	500,08	2,03	505,16	32,50
	COMB-4	12,52	449,60	1,76	454,36	30,67
KESİT C	COMB-5	16,67	718,28	4,42	722,12	46,25
	COMB-6	17,23	667,41	3,63	670,72	44,66
KESİT D	COMB-7	2,60	90,26	0,37	97,63	6,11
	COMB-8	3,44	39,03	0,14	46,47	4,81
KESİT E	COMB-9	2,74	91,41	0,26	99,14	6,25
	COMB-10	3,38	40,44	0,06	48,29	4,88
KESİT F	COMB-11	8,64	320,32	7,24	320,69	22,38
	COMB-12	7,37	256,92	1,74	263,70	21,88

Analizler; momentler (M), eksenel kuvvetler (N) ve kesme kuvvetleri (V) hesaplanır. Analiz sonuçlarından kritik olanlara göre donatı hesapları yapılır.

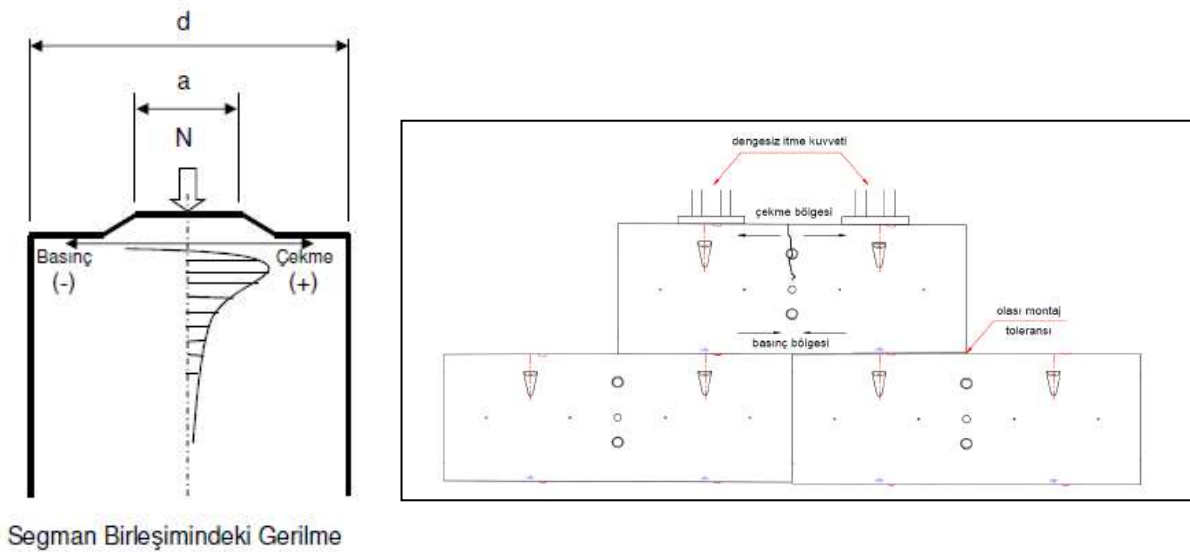
Ayrıca segment için; kesme hesabı, segment kaldırma hesabı, segment depolama hesabı, segment birleşim noktaları için ezilme analizleri yapılmalıdır [6].



Resim 7 - Segment taşınması ve segmente TDM'nin piston etkisi



Şekil 15 - Segment kaldırma, segment depolama durumu



Şekil 16 - Segment birleşim noktaları

4.2.2.4 TDM ile Açılan Tünellerin Avantajları/Dezavantajları

Avantajları;

- Günümüzde TDM'leri her çeşit zeminde kullanmak mümkündür.
- Kazı sırasında yüksek güvenlik ve hız sağlamaktadır.
- Kesitleri düzgün şekilde açtığı için gereksiz kesit fazlası kazı yapılmamaktadır.
- İleri düzeyde mekanizasyon imkânı sunulduğu için el işçiliğinden tasarruf yapılmaktadır. Bu da kazanın ve ağır işçiliğin azalmasını sağlamaktadır.
- Tünel kazısı düzenli bölümler halinde yapıldığından yükleme ve taşınması daha kolaydır.
- Tünel segmenti, klasik tünel kaplamasına göre daha narin ve donatı miktarı daha azdır.
- Kayanın uygun olması durumunda günlük ilerleme hızı ortalama 30-35 metreye kadar ulaşabilir.
- En önemli avantajlarından biri, kayaç formasyonlarının kırılıp çatlamaması ve aşırı sökülmenin en az olmasıdır. Buna bağlı olarak destekleme masrafları önemli ölçüde azalmaktadır.

Dezavantajları;

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- TDM'in zemine batmaması ve su altında kalması için jeolojik ve jeoteknik araştırmalara daha çok önem verilmelidir.
- Aynadan gelebilecek büyük miktarda su, makine başlığının arızalanmasına yol açabilir.
- TDM'in montajı, demontajı, nakliyesi ve tünel içinde tamiri güçtür.
- Makinelerin nakil ve montaj sürelerinin uzun olması nedeniyle kısa tünellerde veya orta uzunlukta olan çok geniş çaplı tünellerde kullanışlı değildir.
- Tozlanmayı ve ısınmayı düşürmek için ve ayna yakınında çalışmaya uygun şartları sağlamak için, havalandırma sistemi önem arz etmektedir.
- Kaya şartlarının değişmesi durumlarında gerekli teknik ve malzeme ayarlamaları daha zordur.
- Çok sert kayada makine ile tünel açımının maliyeti yüksektir ve bu nedenle alışıla gelmiş yöntem kadar ekonomik olmayabilir.

- Şişen, sıkışan, akan zemin ihtiva eden aşırı ayrışmış ve kırıklı kaya zonlarında tünel açma makinelerinin verimi çok düşüktür.
- TDM' ler genellikle projenin amacına göre özel yapılmıştır. Bu nedenle elde jeolojik şartlar hakkında doğru bilgi olmaması halinde aniden değişen yeraltı jeolojik şartlarını karşılayacak şekilde bir makinenin yapım ve inşası mümkün olmayabilir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

- Tünellerin projelendirmesi aşamasında; proje güzergâhının jeolojisine, geçilecek formasyonların jeoteknik özelliklerine, bölgenin tektonizmasına ve yeraltısuyu durumuna özel önem verilerek yeterli sayıda ve derinlikte sondaj ile arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmalıdır.
- Tünel uzunluğu, fay hattı, yeraltısuyu, zemin değişimleri zehirli ve patlayıcı özelliğe sahip gazlar vb. hususlar tünel açım tekniğini belirlerken değerlendirilmelidir.
- Tünelde çalışma koşulları, enjeksiyon, havalandırma, ulaşım gibi hususlar dikkate alınarak tünel iç çapı; uzunluğu 7,5 km'ye kadar olan tünellerde en az 4,00 m, daha uzun tünellerde ise en az 4,50 m ve 0,50 m'nin katları şeklinde seçilmelidir.
- TDM seçiminde, tünelin jeoteknik etüt raporunda belirtilen birimlerin özellikleri dikkate alınarak;
 - Zayıf zemin ve yeraltısuyu bulunan zemin formasyonunda geçen tünellerde yanal ve üst basınçları dengeleyip deformasyona izin vermeyen EPB/EPB Slurry tipi TDM,
 - Sağlam zemin koşullarında açılacak tünellerde tek veya çift kalkanlı TDM ve
 - Zemin koşullarının değişken olduğu güzergâhlarda ise karışık tip TDM seçilmesine dikkat edilmelidir.
- Klasik yöntemle açılacak tünellerde; destekleme tipleri (püskürtme betonu, bulon, süren, çelik iksa vb.), yaklaşım tüneli, manevra ve karşılaşma cepleri, kaplama kalınlığı ve daha fazla donatı miktarı maliyet hesaplarında göz önünde bulundurulmalıdır. İnşaat kolaylığı açısından, her jeolojik formasyona uygun destekleme projeleri hazırlanmalıdır.

- TDM giriş-çıkış alanları, segment, üretimi, yeraltısuyunun kontrolü vb. maliyetler hesaplanmalıdır. TDM ile açılan tünellerde segment kalınlıkları klasik tünel beton kaplamasına göre daha narin ve donatı miktarı daha az olmaktadır. Gerekmesi halinde fay hatları veya çok farklı jeolojik formasyonlar için farklı segment projeleri hazırlanmalıdır.

6 KAYNAKLAR

- [1] "Beggs Deformeter Stress Analysis of Single Barrel Conduits", US Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1986
- [2] Yıldız, K., "Hidroelektrik Santraller Hesap Esasları ve Projelendirilmesi", Ankara, 1992.

- [3] "DSİ Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri" Cilt I, Adana, 1986
- [4] Doğan, E., "Sulama Tünellerinin Projelendirilmesi", Ankara, 1996
- [5] Arioğlu, E., 2011. Tünel Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [6] "Babakaya Tüneli Segment Raporu", 2013
- [7] Terzaghi, K., "Rock Defects and Loads on Tunnel Supports"
- [8] "Seismic Design and Analysis of Underground Structures", International Tunnelling Association (ITA), 2001
- [9] "Seminer Notları", 2013
- [10] Bhawani Singh, Rajnish K. Goel, John A. Hudson Freng, "Tunnelling in Weak Rocks", Elsevier Geo-Engineering Book Series Volume 5, 2006
- [11] <http://www.herrenknecht.com>
- [12] <http://www.selitunnel.com/>