ytmk
YOLLAR TÜRK MİLLİ KOMİTESİ
TURKISH ROAD ASSOCIATION
BÜLTENİ
BULLETIN

Sayı 7 TEMMUZ-EYLÜL 2014

YOL ALTYAPI PROJELERİNDE TÜNELLE GEÇİŞİN TARİHSEL SÜRECİ VE ÖNEMİ

Ülkemizin, karayolu ulaşımının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi, yurt içi ve yurt dışında ilgili kuruluşlarla irtibat sağlayarak bilimsel ve teknolojik yeniliklerin izlenmesi ve desteklenmesi, kamu ve özel sektör kuruluşları ile üniversite mensuplarının bir araya gelmelerini ve aralarında işbirliği yapmalarını sağlayarak sorunların paylaşılıp çözüm yollarının bulunmasına katkı yapılması, sektörün, özellikle karayolu ulaşım alt yapısı ile ilgili yeni gelişmiş teorik ve pratik uygulamalardan ve düzenlediği ulusal ve uluslararası boyutlarda konferans, sempozyum, seminer ve benzeri etkinlikler ile ayrıca çıkardığı bülten vb. yazılı yayınlar vasıtası ile haberdar ve bilgi sahibi olmalarının sağlanması gibi bir misyonu olan Komitemiz, YTMK Bülteni'nin bu sayısını, son yıllarda ülkemizde, karayolu güzergahları üzerindeki; yapılan ve hizmete sunulan, inşa halinde olan ve halen proje çalışmaları devam eden ve dünya tünel literatürüne girecek tünellere ayırmaya karar vermiştir.

Tüneller, altyapı sistemi içinde geçmişten bugüne kadar çok yaygın olarak kullanılmış ve geldiğimiz an itibariyle gelişen teknoloji ve geliştirilen yapım metotları sayesinde, özellikle yolların, geometrik standartlarının yükseltilmesi açısından, vazgeçilmez sanat yapıları haline gelmiştir. Öncelikle tünellerin, yolların ayrılmaz bir parçası olarak inşa edilmesine kadar geçen süreçte benzer yapıların nerelerde ve ne amaçla kullanıldıklarından bahsederek geldiğimiz noktayı anlamak ve tanımlamak daha anlamlı olacaktır.

Elektrik üreten bir hidroelektrik santralında, ovalara hayat veren bir barajda, musluklardan akan sularda, demiryollarının geçtiği en kritik hatlarda, şehirleri birleştiren yollarda ve daha birçok alanda tünel mutlaka vardır.

Peki tünelin insanoğlunun yaşamında nasıl bir serüveni olmuştur?

İnsanoğlu; tarih öncesi çağlarda daha ahşap ve kerpici kullanmaya başlamadan önce kendisine barınak olarak mağaraları seçmiş ve ihtiyacı oldukça da bu barınakları genişleterek bilmeyerek de olsa yer altı kazıları işine başlamıştır. İnsanoğlu tarih öncesi çağlarda başlayan yer altı kazıları hakkındaki bilgisini, tarih çağları boyunca artırarak madencilik işlerinde ve aynı zamanda düşman ordusunu arkadan çevirme veya kaçma, düşman ordusunun şehre girme girişimleri gibi savaş taktiklerinde araç olarak kullanmıştır.





Örneğin Hititler kalkerli zeminlerde önce ateş yakıp sonra sirke dökerek maden galerileri açmayı keşfetmişlerdir. Yüzyıllar ile birlikte dünyamızdaki sosyal ve ekonomik düzen değişmiş bazı yerleşim yerleri, sanayi ve ticaret merkezleri haline gelmiş, ancak kontrolsüz ve gelişigüzel gelişmenin sonucunda merkezlerde ulaşım sorunları yaşanmaya başlanmıştır. Ulaşım sorununu çözmek amacıyla ilk defa 1863 yılında Londra'da bir yer altı demiryolu "Metropolitan Railway" adı ile işletmeye açılmıştır. 1868 yılında New York Metrosu hizmete girmiştir. Bu metro yeni dünyanın ilk yer altı demiryolu ulaşım sistemidir.

İngiltere ve Amerika'da bunlar olurken, Eugène-Henri GAVAND isimli bir Fransız mühendis Galata'dan asansör gibi kayışla çekilen ve tren gibi raylar üzerinde hareket eden bir taşıtı projelendirmiş ve Sultan Abdülaziz'den bu iş için tünel inşa etme izni almıştır. Ancak en önemli neden olarak kaynak sağlamadan tutun da daha başka nedenlerden dolayı oldukça gecikmeli olarak 573 metre boyundaki dünyanın ikinci metrosu 17 Ocak 1875 tarihinde törenle açılarak yolcularına hizmet vermeye başlamıştır.

Yukarıda bahsedildiği gibi Bültenimizin bu sayısında; tünellerin tarihçesinden, ilk tünel inşa metotlarından modern tünelcilik inşa metotlarına ve Türkiye'deki tünelcilik faaliyetlerinden; üyelerimizin ilgilenebileceği, birçok konuya değinerek bilgilendirmeyi amaçladık.

YTMK Yönetim Kurulu

İÇİNDEKİLER

Yol Altyapı Projelerinde Tünelle Geçişin Tarihsel Süreci ve Önemi
YTMK Yönetim Kurulu 1

Uzman Görüşü: Dünyada ve Türkiye'de Tünellerin Tarihçesi
Dr. Ebru AKIŞ 3

Uzman Görüşü: Geçmişten Günümüze Kadar Uygulanan Tünel İnşa Metotları
Ş. Özcan EROL 5

Sektör Bakışı: Modern Tünelcilik Yöntemleri NATM ve TBM
Bülent ULUKAN 11

Kurumsal Bakış: Uygulamadaki Avantaj ve Dezavantajlarına Göre TBM ve NATM Yöntemlerinin Karşılaştırılması
Rahşan YILDIRIM TELEK 14

Kurumsal Bakış: Karayolu Tünellerinde Proje ve Yapım Çalışmalarında Jeolojik-Jeoteknik Çalışmaların Önemi ve Yapım Maliyetine Olan Etkileri
Ahmet ŞİRİN 18

Sektör Bakışı: Karayolları Tünellerinde Güvenlik
Ahmet İrfan ÜNAL 23

YTMK'dan... YTMK'dan...
Dünden Bugüne Tünel Örnekleri 26

YOLLAR TÜRK MİLLİ KOMİTESİ BÜLTENİ

2014 / 07 / TEMMUZ-AĞUSTOS-EYLÜL

YOLLAR TÜRK MİLLİ KOMİTESİ ADINA

Yayın Sahibi
M. Cahit TURHAN

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Nürsen AYDIN

Bülten Komisyonu Üyeleri
A. Gürkan GÜNGÖR
Emin ENER
Kürşat KOÇ
Yrd. Doç. Dr. Hediye TÜYDEŞ YAMAN
Zeki NUMANOĞLU
Tuğba KİPER
Nürsen AYDIN
Ş. Özcan EROL

Yayın Türü
Yaygın Süreli

Yayın Aralığı
3 Aylık

Koordinasyon
Ebru ŞENTÜRK
Hülya HOŞAFÇI

Grafik Tasarım / Dizgi
Ö. Şirin MESCİGİL

Basım Yeri
Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası

Basım Yeri Adresi
Karayolları Genel Müdürlüğü
D-Blok Bodrum Kat
06100 Yücetepe / ANKARA
Tel: 0 (312) 415 88 50

Basım Tarihi / Yeri
30/09/2014 / Ankara

Yayın İdare Merkezi Adresi
Yollar Türk Milli Komitesi
Karayolları Genel Müdürlüğü F-Blok Kat: 1
06100 Yücetepe / ANKARA
Tel: 0 (312) 418 79 05
Faks: 0 (312) 425 82 10
E-posta: komite@ytmk.org.tr
Web: www.ytmk.org.tr

Gönderilen yazılar yayımlansın ya da yayımlanmasın iade edilmez. Yazarların başka eserlerden alıntı yapmaları halinde kaynak göstermeleri mecburidir. Yazıların başka bir yerde yayımlanması halinde kaynak gösterilmelidir. Bültende yer alan yazıların bütün hukuki ve cezai sorumluluğu yazarlarına aittir. Gönderilen yazıların yazım kurallarına uyması için düzeltme yapmak Bülten Komisyonu'nun yetkisindedir.

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE TÜNELLERİN TARİHÇESİ

Dr. Ebru AKIŞ
Atılım Üniversitesi / Yollar Türk Milli Komitesi

Tarihi boyunca insanoğlu kimi zaman barınmak, korunmak, su ihtiyaçlarını sağlamak, kimi zaman tapınak olarak kullanmak, kimi zaman ise ulaşım amacıyla tünelleri ve yer altı yapılarını inşa etmiş ve kullanmıştır.

En eski yer altı yapısının bir maden olduğu ve M.Ö. 40000'lerde Güney Afrika'da el ile kazıldığı, daha sonra yapılan kazılarda yardımcı olarak ateşin kayaları çatlatmasından yararlanıldığı bilinmektedir. İlk tünellerin, Babil'de M.Ö. 2200 yılında bir tapınak ile sarayı birbirine bağlayan tüneller olduğu bilinmektedir. Bu yapıları dini amaçlar için kullanılmak üzere yapılan yer altı kazıları ve şehirlere su getirmek için yapılan tünellerin inşası takip etmiştir.

Mühendisi bilinen ilk tünel Yunanistan'ın Sisam adasında M.Ö. 530 yılında yerleşim merkezine su getirmek için yapılmıştır. Eupalinos tarafından iki ağızdan kazılarak inşa edilen tünelin uzunluğu yaklaşık 1 km'dir. Romalılar tarafından maden, su, kanalizasyon ve drenaj tünelleri ile yer altı mezarları gibi farklı amaçlı yer altı tünelleri ve yapıları inşa edildiği bilinmektedir. Bu yapılardan biri Samandağı Çevlik civarında bulunan Titüs Tüneli'dir. Titüs Tüneli, şehir merkezini sel ve taşkınlardan korumak amacıyla M.Ö. 1. yüzyılda yapılmış olup, 1380 m uzunluğunda, 7 m yüksekliğinde ve 6 m genişliğindedir. Romalılardan sonra, tünelciliğin gelişmesinin yavaşladığı, ancak maden ve savunma amaçlı yer altı yapılarının inşasının geliştiği bilinmektedir. Buna en güzel örnek Kapadokya'daki 10000 kişilik Derinkuyu Yeraltı Şehridir. Derinkuyu Yeraltı Şehri ahır, kiler, yemekhane, kilise, şırahane, misyonerler okulu, günah çıkartma yeri ve vaftiz havuzu bölümlerinin yer aldığı 8 kattan oluşmaktadır ve derinliği yaklaşık 85 m'dir.

Rönesansla birlikte tünelcilik aktiviteleri de canlanmış olup, dönemin ilk tüneli İspanya'da Daroca kasabasında sel sularından korumak için yapılmıştır. İlk kanal tüneli ise 18. yy.'da Fransa'da yapılmış olup, bunu Avrupa'da birçok tünelin yapımı izlemiştir. Buhar motorunun 1825 yılında bulunması ve çelik rayların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte 17. yy'.dan beri kullanılan demiryollarının yapımına hız verilmiştir. Bu sayede, Avrupa'daki kent merkezlerinin birbirine bağlanabilmesi için aşılması gereken topoğrafik zorluklar tünellerin yapımını hızlandırmıştır.

İlk demiryolu tüneli Terre-Noir, 1477 m uzunluğunda olup Fransa'da açılmıştır. Bunu Avrupa'da yapılan diğer tüneller izlemiştir. Bu dönemde Cenis Dağı Tüneli (12.6 km), Saint Gotthard Tüneli (15.2 km) ve Simplon Tüneli (19.7 km) gibi ülkeleri birbirine bağlayan uzun demiryolu tünelleri yapılmıştır. Su altında açılan ilk tünelin yapımı da 19. yy.'da gerçekleşmiştir. Thames nehrinin altından geçen ilk tünel 1843 yılında tamamlanmış ve bunu ABD'de (Şikago) yapılan iki tünel ve ABD'yi Kanada'ya bağlayan Saint Clair Tünelleri izlemiştir. 1863 yılında Londra'da yapılan metro, şehiriçi ulaşım için yeni bir başlangıç olmuş ve bunu İstanbul, Budapeşte, Paris, Berlin, New York, Madrid, Moskova'da yapılan uygulamalar izlemiştir. Dünyanın ikinci yer altı toplu taşıma sistemi olan Karaköy Tüneli, 1875 yılı Ocak ayında İstanbul'da Galata ile Beyoğlu arasında kullanıma açılmıştır. 1871 yılında inşaatına başlanan bu tünel 573 m uzunluğunda olup mühendisi Fransız Eugène-Henri GAVAND'dır.

20. yy.'da şehiriçi ve şehirlerarası karayolu tünellerinin yapımının artmasının nedeni otomobil kullanımının yaygınlaşması olarak düşünülebilir. İlk şehiriçi karayolu tünelleri arasında Budapeşte ve Hamburg'daki tüneller sayılabilir. Bunların yanı sıra, 1980 yılında tamamlanan Gotthard Tüneli 17 km'lik uzunluğu ile dönemin en uzun karayolu tüneli olarak nitelendirilmektedir. Yüksek hızlı trenlerin 1980'den sonra yaygınlaşmasıyla, yüksek standartlara sahip uzun tünellerin yapımı kaçınılmaz olmuştur. Yüksek hızlı tren için yapılan uzun tünellere örnek olarak 1983 yılında Japonya'da yapılan, Honshu ve Hokkaido adalarını birbirine bağlayan 54 km uzunluğundaki demiryolu tüneli verilebilir. Yer altı yapıları inşaatı ve tünel mühendisliği konularında dünyanın lider ülkelerinden biri olan Norveç'te denizaltı tünelleri derin fiyordları geçerek adaları birbirine bağlamaktadır. Norveç'te ilk denizaltı tüneli Vardo Tüneli olup 1982 yılında yapılmıştır. Ayrıca, 24.5 km uzunluğu ile dünyanın en uzun karayolu tüneli olan Laerdal Tüneli yine aynı ülkede yapılmış olup 2000 yılında tamamlanmıştır. İngiltere ve Fransa'yı birbirine bağlayan ve yüksek hızlı tren için yapılan Manş (Channel) Tüneli 1994 yılında tamamlanmış olup 38 km'si denizaltında olmak üzere 51 km uzunluğundadır. 21. yy. başlarında ise ülkeleri birbirine bağlayan, sıradağları geçen büyük tünel projeleri görülmektedir.

Türkiye'deki Karayolu Tünellerinin Gelişimi

Cumhuriyet ilan edildiğinde 18 350 km'lik genellikle stabilize şose ve toprak yoldan oluşan bir yol ağımız bulunmaktaydı. 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü kurularak, yurt çapında yol planlama, etüt ve proje çalışmalarına başlanmıştır. Teşkilatın hedefi motorsuz taşıtlar için yapılmış olan yolları, çağdaş ulaşım araçlarının ihtiyaçlarına göre yeniden planlamak ve yeni yollar yapmak olarak belirlenmiştir.

Devlet yollarındaki en eski tünel olan ve Fatsa-Perşembe yolu üzerinde yer alan Hoynat Tüneli'nin yapımı da bu yıllara rastlamaktadır. 1954 yılında inşa edilen Hoynat Tüneli, 151 m uzunluğunda olup klasik yöntemle açılmıştır. 1960'lı yıllara gelindiğinde, Türkiye'nin o gün için gereksindiği 60 000 km'lik bir yol ağı oluşturulmuştur. Bu ağın yaklaşık 1.2 km'si tek tüp olarak açılmış tünellerden oluşmaktaydı. Tünel yapım çalışmaları çeşitli bölgelerde devam ederken 1965 yılında, Tunceli-Pülümür yolunda 16 adet çığ tüneli hizmete açılmıştır. 1970-1990 yılları arasında çok şeritli ekspres yollar ve otoyollar yapılmıştır. Diliskelesi (1980) ve Hereke Tünelleri (1980), İzmit Açık Tüneli (1981) ile Harp Akademileri Tünelleri (1988) otoyol tünelleri olup tek tüp olarak inşa edilen devlet yolu tünellerinden farklı olarak çift tüp olarak inşa edilmiştir. 1988 yılında Maçka-Torul yolunda yapımı tamamlanan Zigana Tüneli 1 702 m uzunluğu ile dönemin en uzun tünelidir. Bu yıllarda yapılan devlet yolu tünellerinin projelendirmesi klasik yöntem ile yapılmaktaydı. Klasik yöntemde tünelin açıldığı ortam ve örtü yükü gibi kriterler dikkate alınarak tünel kaplamasına etki eden yükün belirlenmesi ve buna göre tünel kaplamasını boyutlandırılması yapılmaktaydı. Tünellerin mümkün olduğunca sağlam kaya koşullarının olduğu kesimlerde yapılması planlanmaktaydı.

1990 sonrasında yapılan projelendirme ve inşasında ise Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılmıştır. Bu yöntem, ince ve geçici bir destekleme uygulayarak ve deformasyonlara izin vererek, tünele gelen kaya basıncını azaltmak, yükleri çevre kayaya dağıtmak ve bu sayede son kaplamaya gelecek yükü azaltmak olarak tanımlanabilir. Ancak, deformasyonların yapım sırasında ölçülmesi, değerlendirilmesi ve desteklemenin yeterliliğinin kontrol edilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Bu yöntem ile zayıf kaya ortamlarda aşamalı kazı ve destekleme yapılabilmektedir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine göre yapılan ilk devlet yolu tüneli Antalya-Dereboğazı yolu üzerinde yer alan Kargı Tüneli olup 1994 yılında trafiğe açılmıştır. Topoğrafik koşullar, jeolojik yapı, güzergahta kaçınılmak istenen heyelan, yüksek yarma vb. durumlarla karşılaşılması, iklim şartları ve standardı yüksek yolların yapımına duyulan ihtiyaç nedenleriyle 1990'lardan günümüze karayollarında yapılan tünel inşaatlarında çok hızlı bir artış görülmektedir. Gerek projelendirme ve yapım tekniklerinin gelişmesi, gerekse edinilen tecrübeler sonucunda tüneller tercih edilen yapılar olmuştur.

Karayolları ağında hizmet veren en uzun devlet yolu tüneli, Bolaman-Perşembe devlet yolu üzerinde yer almaktadır. 2006 yılında yapımı tamamlanan ve çift tüp olarak açılmış (3805 ve 3825 m) olan bu tünel, ülkemizde tünelciliğin gelişmesi, yaygınlaşması için üstün çaba sarf eden KGM Zemin Mekaniği ve Tüneller Şubesi Emekli Müdürü Nefise AKÇELİK'in adıyla anılmaktadır. İkizdere - İspir devlet yolu üzerinde yer alan ve tamamlandığında dünyanın en uzun tünelleri listesinde yer alacak olan Ovit Tüneli ve Kuzey Marmara Otoyolu kapsamında yapılan 2 x 4 şeritli Çamlık ve Riva Tünelleri yapım çalışmaları devam etmekte olan tünellerimize örnek olarak sayılabilir. 2014 yılı sonu itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğunda trafiğe açık 200 km, yapımı devam eden 143 km ve projelendirme aşamasında olan 230 km tünel bulunmaktadır.

Kaynaklar:

1. *http://www.ita-aites.org/en/cases-histories/history (Erişim 07.09.2014)*
2. *http://platos-academy.com/pythagoras/ (Erişim Tarihi 07.09.2014)*
3. *http://www.muze.gov.tr/derinkuyu (Erişim Tarihi 07.09.2014)*
4. *http://kurumsal.kultur.gov.tr/turkiye/genel/gezilecekyer/derinkuyu-yeralti-sehri (Erişim Tarihi 07.09.2014)*
5. *http://www.iett.gov.tr/tr/main/pages/tunel-hakkinda/93 (Erişim Tarihi18.09.2014)*
6. *http://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/hatay/gezilecekyer/titus-tuneli-ve-besikli-magara (Erişim Tarihi 07.09.2014)*
7. *http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/(Erişim Tarihi 07.09.2014)*
8. *Ar-Ge Dairesi Başkanlığı, Zemin Mekaniği ve Tüneller Şubesi Müdürlüğü Tünel Kursu Notları ve Tünel Envanteri Çalışması.*
9. *Member Nation - 2013 Activity Report, TRA*
10. *"Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı 2000", Karayolları Genel Müdürlüğü, 2000.*
11. *Karayolları Genel Müdürlüğü, 2014 yılı Tünel İcmali Verileri.*



Dr. Ebru AKIŞ

1995 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olan Dr. AKIŞ aynı bölümde 2002 yılında Yüksek Lisansını, 2009 yılında Doktorasını tamamlamıştır. 1995-1998 yılları arasında özel sektörde, 1998-2001 yılları arasında Ziraat Bankası'nda çalışan Dr. AKIŞ 2001 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü'nde çalışmaya başlamıştır. 2013 yılında Atılım Üniveristesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak göreve başlayan Dr. AKIŞ 2014 yılı Nisan ayından itibaren YTMK Tünelcilik ve Yer Altı Yapıları Şube Koordinatörü olarak görev yapmaktadır.

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE KADAR UYGULANAN TÜNEL İNŞA METOTLARI

Ş. Özcan EROL
Yollar Türk Milli Komitesi

Giriş

İnternette tünellerle ilgili literatür taraması yaparken, bir öğrencinin tünel ve kuyu teknolojisi dersinden, tünel açma yöntemlerinden biri olan Alman Yöntemini ödev olarak aldıklarını ancak ödevi hazırlayabilmek için kendilerine faydalı olabilecek bir kaynağa ulaşamadıklarını ve arayış içinde olduklarını öğrendim.

Bunun üzerine kendisinin öğrencisi olma şansına sahip olduğum Tünel Dersi hocamız İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Mehmet BOZKURT'un "Tüneller Ders Notları" kitabından faydalanarak hem bir kaynağın orijinaline işaret etmek hem de kısa bilgiler vermek için yazdığım Geçmişten Günümüze Kadar Uygulanan Tünel İnşa Metotları konulu bu yazının ilgilenen ve bilgilenmek isteyenler için yararlı olacağını düşündüm.

Tünel İnşasını Gerektiren En Önemli Nedenler

1- Eğimi sınırlı olan güzergahlarda,
2- Dağlık arazide yeryüzünden aşılamayan sırt ve tepelerin geçilmesinde,
3- Güzergahın bir kısmında, tünel inşası ile önemli bir kısalma meydana gelecekse ve bu kısalmadan sağlanacak ekonomik tasarruf tünel maliyetini karşılayacaksa veya tünel ile geçilmesi halinde yapım maliyeti artsa bile bu artış işletme masraflarından elde edilecek ekonomi ile karşılanabilecekse,
4- Güzergahın bir kısmının, önemli toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları ve çığ düşmeleri ile kapanmasının önlenmesinde,
5- Dar bir vadinin veya sırtın dönülmesi sırasında büyük dolgu yarma köprü ve viyadüklerin çıkmasının istenmediği veya uygun görülmediği durumlarda,
6- İnşası ve bakımı fazla masraflı kendini tutamayan zeminlerdeki büyük yarmalardan kurtulmak istendiğinde,
7- Yer üstü istimlaklarının çok pahalı olduğu yerlerdeki yolların genişletilmesi veya yeni yolların açılması olanağının bulunmadığı durumlarda veya kütle halinde büyük ölçüde insan taşınmasının gerekli görüldüğü durumlarda metro inşasında

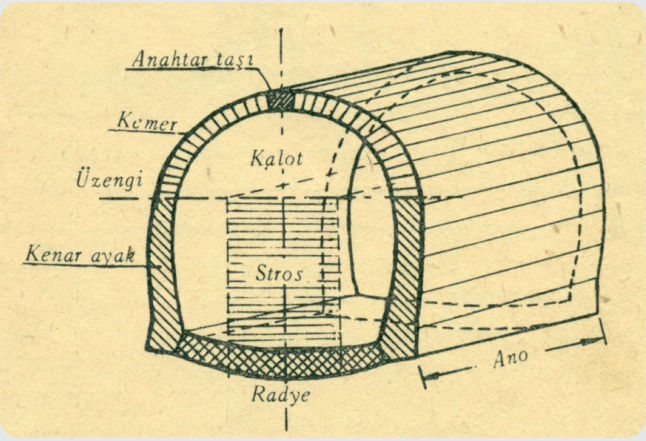
olarak sıralanabilir.

Yolun Cinsine Göre Tünellerin Sınıflandırılması

- **Demiryolu Tüneli**
- **Karayolu Tüneli**
- **Yaya Tüneli**
- **Kanal Tüneli**
- **Metropoliten Tüneli**

Tünel İnşası İle İlgili Terimler

Ano: Herhangi bir metodun tatbikinde bir işlemin yapıldığı tünelin bir parçasıdır.
Radye: Tünelin kenar ayakları altında genel olarak ters kemer şeklinde teşkil edilen taban kısmıdır.
Kenar ayaklar: Temelden üzengi seviyesine kadar yan duvarlar olup profiline göre inşa olunur.
Kemer: Yapının kenar ayaklara istinat eden tavan kısmıdır.
Anahtar: Kemerin enkesit eksenine rastlayan en yüksek kısmı olup, kenar ayaklardan itibaren örülen kemer kargiri burada anahtar taşı denen bir taşla kapanır.
Üzengi: Enkesitte kemerin ayaklara oturduğu seviyeden geçen çizgiye üzengi çizgisi, bunun tespit ettiği seviyeye de üzengi seviyesi denir.
Kalot: Enkesit alanının üzengi seviyesi üstünde kalan kısmıdır.
Stros veya çekirdek: Enkesit alanının üzengi seviyesinin altında kalan orta kısmıdır. Bu kısmın üst tarafına üst stros, alt tarafına da alt stros denir.



Şekil 1

İnşaatın emin ve mümkün mertebe ekonomik olması bakımından, içinde bulunulan şartlara göre toprak işleri ile iksa ve kaplama işlerinin en uygun şekilde yapılması gerekir. Uzun bir tecrübe geçirmiş tünelcilikte bu

maksatla zeminin sökülmesi, iksa edilmesi ve kaplama için takip edilecek sıra ve çalışma şekli bakımlarından birbirinden farklı bir takım metotlar ileri sürülmüş ve bu metotlar günümüze kadar tatbik edilegelmiştir.

Kendini emin bir şekilde tutabilen sağlam kaya cinsinden zeminlerin dışında, genel olarak az veya çok iksa gerektiren zeminlerde açılan tünellerde tatbik edilen inşa metotlarını, esas özellikleri bakımından üç sınıfa ayırmak mümkündür.

1- Tünelin Delinmesi İşinin Esas İtibariyle Tam Kesit Üzerine Yapıldığı Metotlar

Bu metotlardaki esas özellik, tünelin bir anoluk kısmında toprak işleri bittikten sonra kargir işlerinin yapılmasındadır. İksa edilecek yüzeylerin yükseklikleri fazladır. İlerleme hızı daha azdır. Fakat bunlara mukabil kargir örgü ve taşın işlerinde daha rahat bir çalışma şekli temin edilmiş olur.

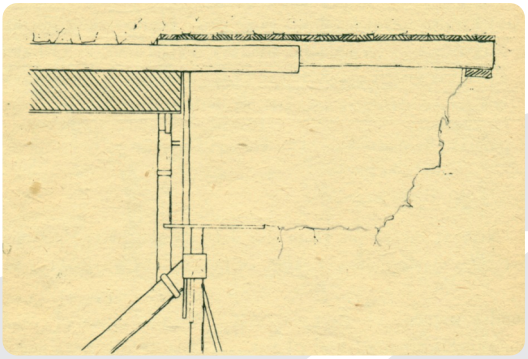
Bu sınıfa giren metotlardan da en çok kullanılanlar:

a) İngiliz metodu

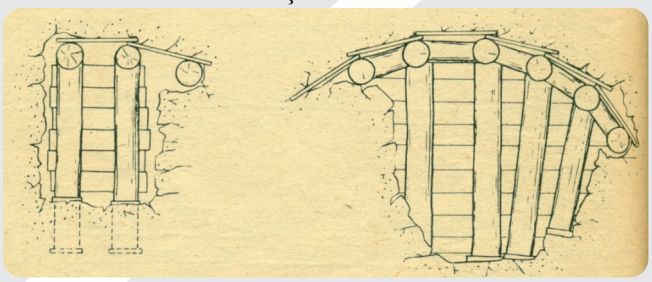
Bu metotta bir ano, 1.5 m ile 6 m arasında seçilir. Esas özelliği iksa elemanları olan boylamaların tünel eksenine paralel olarak konularak ön cephe dikmelerine oturuşu, bir ano boyunca tam kesit üzerinde yapılan toprak işlerinde zeminin tabaka tabaka kazılması bir anoluk toprak işleri ve iksa işleri bitince müteakip anoya başlamadan önce bu anonun kargirinin inşasıdır.

Önce tünel ekseni tabanında bir galeri açılır. Bundan sonra kemerin takriben 2 m yüksekliğindeki ilk toprak tabakasının kazılmasına geçilir. Bu iş için zeminin kendini tutabilme derecesine göre iki şekilde hareket edilir.

Eğer zemin bilhassa yan kısımlarda emniyetle kendini tutabiliyorsa, anahtar mevkiinde bir miktar zemin kazıldıktan sonra, bir evvelki anonun kargir örgüsü dışında kalan boylamalardan ilk ikisi özel manivela çubukları vasıtasıyla öne çekilerek bunların üzerine tavan lataları konur (Şekil 2). Bu iş için bir ano boyu ilerledikten sonra, kargiri örülmüş olan evvelki ano tarafından ileriye doğru olmak üzere, yan kısımların kazısı yine yandaki boylamalar ileri çekilmek ve üzerlerine tavan lataları konmak suretiyle yapılır. (Şekil 3 ve 4)



Şekil 2



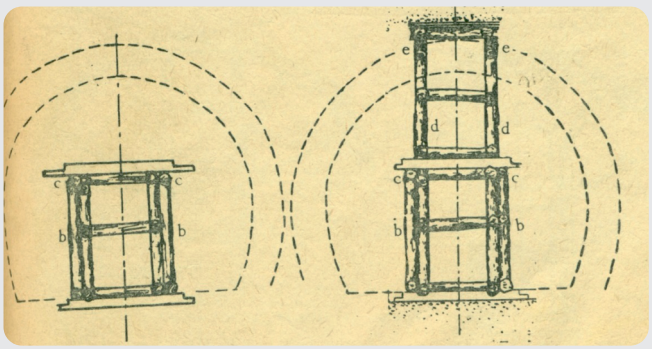
Şekil 3 Şekil 4

Bu metodun faydası, tam kesit üzerinde çalışmanın temin ettiği, bilhassa radye ve kargir inşaatındaki rahatlık ve buvazaj (Ahşap İksa) masrafının diğer metotlara göre daha az oluşudur.

En mühim mahzuru ise, toprak işlerinin tabaka tabaka yapılması neticesi taşın yolunun sık sık değiştirilmesi zorunluluğudur. Ayrıca bilhassa ilk tabakanın kazı ve buvazaj işlerinde dar bir alanda çalışılmasının organizasyonu zorlaştırması ilerleme hızını azaltmasıdır. Daha ziyade zemin cinsinin iyi ve tünel enkesitinin küçük olduğu durumlarda tatbik edilmesidir.

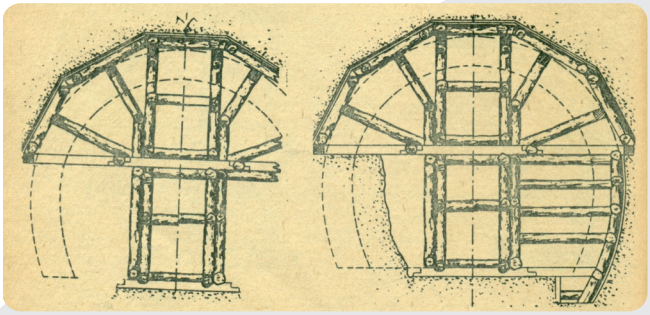
b) Avusturya metodu

Bu metotta tünel kemerinin buvazajı, makas şeklinde olup ano uzunluğu zeminin cinsine göre 1.5 m ile 9 m arasında seçilebilir. İşin ilerleme hızını artırmak maksadıyla toprak işleri, müteakip anolar'da kademeli olarak yapılır. (a) tabanı üzerine (b) dikmeleri de konularak bunların üzerine (c) boylamaları konulur (Şekil 5). Bundan sonra 2 ve 3 çerçeve uzunluğunca alt galeri, tünel dış yüzeyinin üstüne kadar yükseltilir (Şekil 6).



Şekil 5 Şekil 6

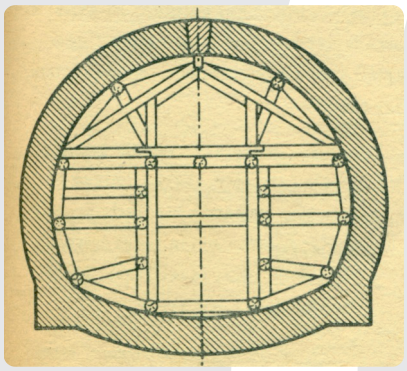
Bu iş alt galerinin bütün enince 2 veya 3 çerçeve uzunluğundaki bir kısmının yukarıya kadar yükseltilmesi suretiyle yapılır. Üst kısımdaki (d) dikmeleri alttaki (b) dikmelerinin hizasındadır. Bunlara da (e) boylamaları oturtulmuştur. Üst galeri tamamlanınca sıra, bu galeriyi yanlara genişleterek alt galeri tavanına kadar tünelin üst kısmındaki zeminin sökülmesine gelmiş olur (Şekil 7). Bundan sonra alt galerinin yan kısımlarında kalan zeminde kazılarak şekil 8'deki gibi bir ano boyunca buvazajı (iksası) yapılarak toprak işleri tamamlanmış olur.



Şekil 7

Şekil 8

Kargir kısmının teşkili bir ano boyunca kenar ayaklardan başlanarak yapılır. Radye (taban kısmı) en sonra örülür (Şekil 9). Bu metotta üst kısmından sökülen zeminin alt galerideki vagonetlere yüklenmesi ve taşınması kolay olur. İngiliz metoduna göre daha hızlıdır. İngiliz metodunun en nazik kısımlarından birini teşkil eden ön cephe iksası yoktur. Ancak buvazajı için kullanılan ahşap daha fazla olduğu gibi kargir örülen anodaki çalışma İngiliz metodundaki kadar rahat değildir. Makasların teşkili büyük bir dikkat ve tecrübe ister. Alçak kohezyonlu zeminlerde alt galerinin yükseltilmesi oldukça tehlikelidir.



Şekil 9

2- Tünellerin Galeriler Halinde Açılması Metotları

Bu metotta toprak işleri, iksa kargir ve kaplama işleri parça parça yapılmaktadır. Büyük iksa alanları icap ettirmeyen bu metotlar, bilhassa sağlam olmayan zeminlerde daha emin, aynı zamanda şantiye uzunlukları ve çalıştırılabilecek işçi sayısı daha fazla olduğu için diğer metotlara göre daha hızlı bir ilerleme temin ederler.

Bu sınıfa giren metotlardan en çok kullanılanlar:

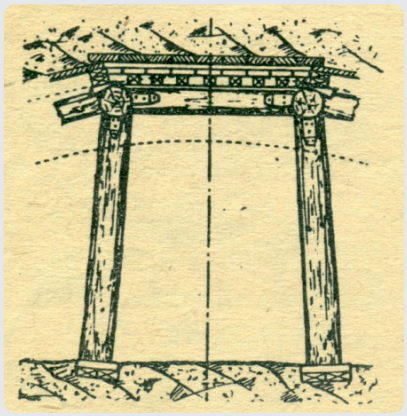
a) Belçika metodu

Birbirini takip eden farklı işlerin yapıldığı ve zemin cinsine göre her biri 3-6 m'lik ano uzunluğundan teşekkül eden şantiyelerden aynı tünelin inşaatında birkaçının birden bulunabildiği bir takım mahsurlarına rağmen ilerleme hızı en fazla olması dolayısıyla en çok tatbik edilen bir metot olmuştur. Esas özelliği önce kemer kargirinin örülmesi sonra bunu askıya almak suretiyle ayakların ve en sonunda radyenin teşkil edildiği bir metottur.

Uzun tünellerde önce tünel ekseninde bir ilerleme galerisi açılır. Kısa tünellerde bilhassa zemin cinsinin bilinmesi halinde bu galerilerin açılmasından vazgeçerek üst galeriyi aynı zamanda bir ilerleme galerisi olarak kabul etmek de mümkündür.

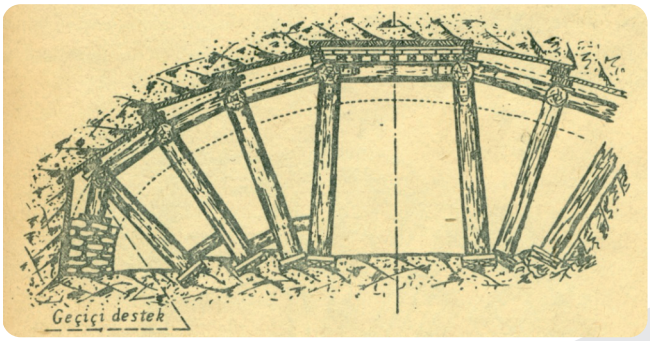
Bir anoda yapılacak işler şu sırayı takip eder.

1) Tünel ekseninde tavan iksası kemer dış yüzeyinin üstünde kalacak şekilde bir üst galeri açılır (Şekil 10). Eğer alt galeriden vazgeçilmişse bu aynı zamanda bir ilerleme galerisi olacağından bütün tünel boyunca açılması iyi olur fakat lüzum görülmezse bir ano boyunca açılır.



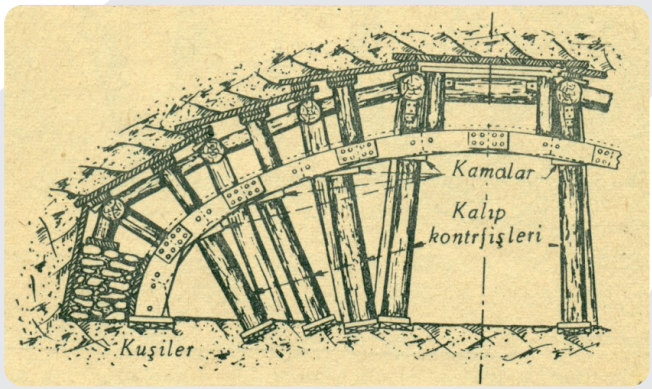
Şekil 10

2) Üst galeri bir ano boyu ilerledikten sonra buradaki çalışma, bir sonraki anoda devam ederken, ikinci bir posta her iki yandan da galerinin genişletilmesi işine başlar ve kalotun kazı işleri ve buvazaj (iksa) işleri böylece bitirilir (Şekil 11).



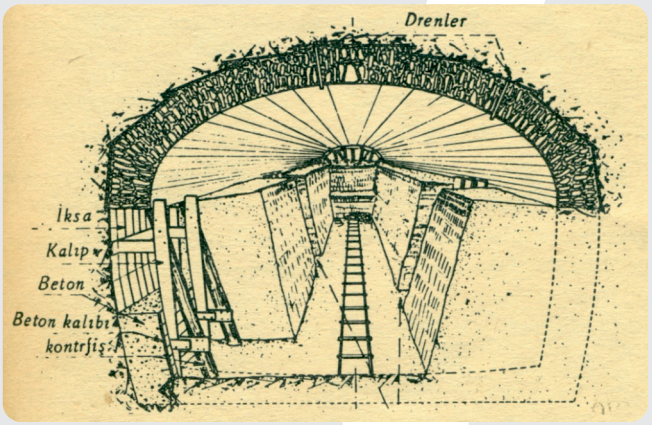
Şekil 11

3) Bundan sonra üzengi seviyesinden itibaren kalot kemerinin teşkili için kemer kalıbı yapılır ve her iki taraftan daha önce örülmüş olan duvarlardan itibaren kemer kargiri örülmeye başlanır ve bitirilir (Şekil 11 ve 12).



Şekil 12

4) Kemer bir ano boyunca örüldükten sonra strosun kazısına başlanır ve bitirilir (Şekil 13).



Şekil 13

5) Stros kazısından sonra kenar ayakların kazısı yapılır.
6) Mukavim olmayan zeminlerde radye yapılır.

Bir anoda yukarıda sıralanan bu işlerden herhangi biri yapılırken ondan sonraki anoda bir evvelki, daha evvelki anoda da bir sonraki iş yapılmaktadır.

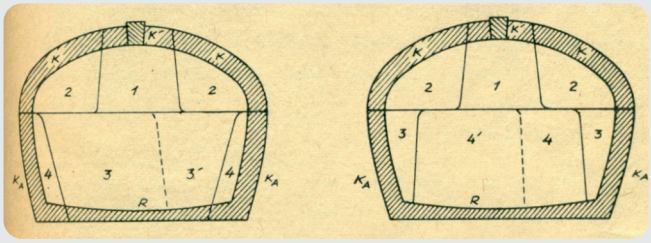
Bu yöntemin en önemli yararları, tavanın kısa sürede sağlamlaştırılabilmesi, kaya duyarlılığının sağlanması ve sürekli kazıya uygun olmasıdır. Sakıncaları ise; tavan-taban kaplamalarının çabuk yapılmasının gerekmesi, çalışma alanının dar olmasıdır.

Belçika metodunun değişik tatbik şekilleri

Esas Belçika Metodu yukarıda izah edildiği şekilde olmakla beraber, zeminin kendini tutma derecesi tünel enkesitinin büyüklüğü vs. gibi tatbik edilen yerdeki özelliklere göre bazı avantajlar sağlamak için bu metodun az ve ya çok değişik şekilleri de tatbik edilmektedir.

Biz burada misal olmak üzere bunlardan en çok tatbik sahası bulmuş olan birkaç tanesinden bahsedeceğiz.

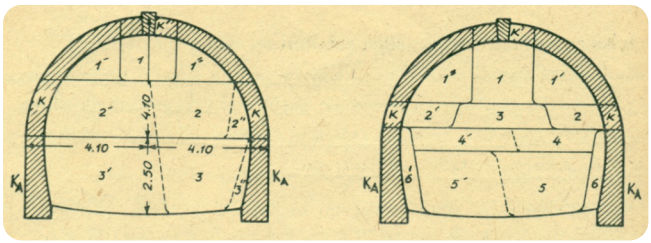
Şekil 14'deki işlerin birbirini takip sırası; (1) ilerleme galerisinin açılması, (2,2) bu galerinin yanlara genişletilmesi, (K K) üzengi seviyesinden itibaren iki taraftan kemer kargirinin örülmesi, (K′) kemer kargirinin tamamlanması, (3,3′) strosun kazısının yapılması, (4,4) kenar ayakların parça parça açılması, (KA) kenar ayakların örülmesi veya betondan teşkilinden sonra, (R) radyenin teşkil edilmesi şeklindedir.



Şekil 14 Şekil 15

Şekil 15'de işlerin takip sırası; önce kenar ayakların, (3,3) parça parça kazısının yapılması, örülerek veya betondan teşkil edilmesi, bundan sonra (4,4′) strosun, kazısının yapılarak açılması ve (R) radyesinin teşkil edilmesi şeklindedir. Bu şekil daha ziyade kendini tutamayan çürük zeminlerde stabilite bakımından Şekil 14'deki tatbik şekline nazaran daha emin olduğu gibi (1) ilerleme galerisindeki taşıt yolunun en sonra bozulması, kenar ayakların kazısında gereken iksa tertibinin daha kolay teşkili gibi faydalar sağlar. Ancak kenar ayakların teşkili dar bir alanda ve güç şartlar içinde yapılmaktadır.

Şekil 16'daki gibi kemer yüksekliğinin fazla olması halinde işlerin takip sırası; öncelikle, (1) ilerleme galerisinin açılması (1′,1″) bu galerinin yanlara genişletilmesi, sonra (2,2′,2″) kazılarıyla kazının üzengi seviyesine kadar indirilmesi, bundan sonra (K K,K′) kemeri örülüp (3,3′,3″) strosunun açılması ve (KA) kenar ayakların teşkil edilmesi şeklindedir.



Şekil 16

Şekil 17

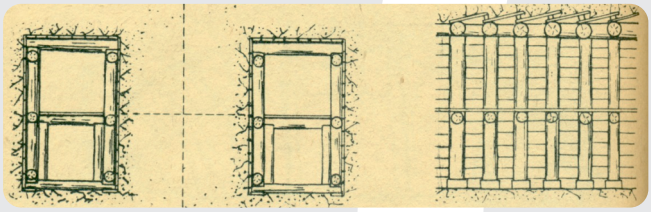
Şekil 17'de işlerin takip sırası; (1) ilerleme galerisinin açılması (1′,1″) bu galerinin genişletilmesi, (2,2′) yan kısımların üzengi seviyesine kadar indirilmesi , (K,K) kemerinin teşkili, strosun önce (3) sonra (4,4′) ve (5,5′) kısımlarının kazısının ve (6,6′) kenar ayak kazılarının yapılması ve nihayet (KA) kenar ayaklarının teşkil edilmesi şeklindedir. Tünel enkesit alanının çok büyük olması halinde bu son uygulamanın daha emniyetli olduğu görülmüştür.

Metodun özel tatbik şeklinin uygulanmasını gerektiren durumlardan biri de, bilhassa metro tünellerinde olduğu gibi, güzergahın büyük yapıların bulunduğu meskun yerlerin altına rastlaması ve tünelin pek derinden geçmemesi halinde kendini gösterir. Bu takdirde tasmanların üstteki yapılara zarar vermeyecek derecede sınırlandırılması gerekir. Bu maksatla üst galerinin yanlara genişletilmesinde mümkün mertebe kargir dış yüzeyi çizgisinin aşılmamasına veya bu çizginin aşılması zorunluluğunun bulunduğu köşelerde normal kemer kargiri ile tam olarak doldurulması, blokajla doldurma cihetine gidilmemesine dikkat edilir.

b) Alman metodu

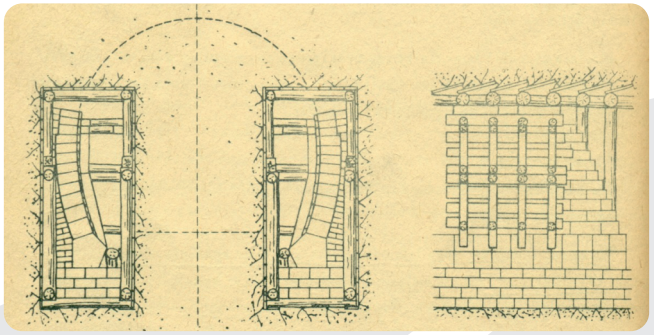
Kazı işleri galeriler vasıtasıyla yapılır.

İşe kenar ayaklarda birer galeri açmakla başlanır. Bu galerilerin genişlikleri kenar ayak kargirinin örülmesine müsait olmalıdır (Şekil 18).



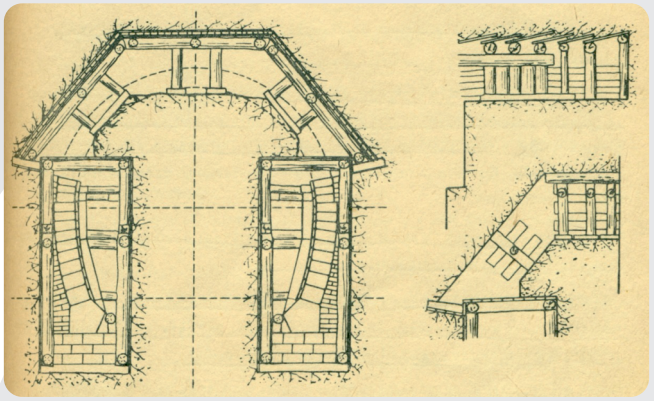
Şekil 18

Kenar ayak galerileri bir ano boyunca ilerleyince daha sonraki anoda aynı işleme devam edilirken ilk anoda galerilerin üst kısımları kazılarak yükseklikleri üzengi seviyesine kadar çıkarılır. Bundan sonra ayak kargiri örülür (Şekil 19).



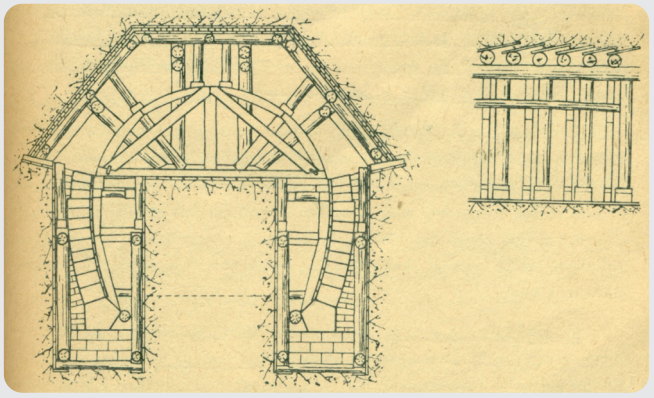
Şekil 19

Kalotun kazısı için önce tünel ekseninde bir üst galeri açılır. Sonra bu galeri yanlara doğru kenar ayak galerilerinin üstüne kadar genişletilir (Şekil 20).



Şekil 20

Daha sonra kalottaki makas askıya alınıp üzengi seviyesi üzerindeki üst stros kazısı yapılarak makas kontrfişleri (diagonal bağlantı elemanları) yerlerine konur. Daha sonra kemer kalıbı çerçeveleri teşkil olunur ve her iki kenar ayaklardan itibaren enkesit tipine uygun olarak kemer kargiri örülür. Nihai olarak alt storsun açılması ve radyenin teşkili ile anodaki iş bitirilmiş olur (Şekil 21).



Şekil 21

Bu metotla tünel açmada kemerin kenar ayaklara oturtulması sırasında oynaması ihtimali gibi bir mahsur bulunmaması, her türlü zeminde tatbiki imkanı gibi avantajlarının yanında kenar ayak kargirlerinin çok dar

bir alanda örülmeleri mecburiyeti, bir anoda kenar ayakları örülürken daha sonraki anolardan çıkan toprağın dışarıya taşınması ve içeriye malzeme taşınması işlerinde rastlanan güçlükler gibi mahsurları da bulunmaktadır.

3- Modern Tünel Açma Metotları

Yeni Avusturya tünel açma metodu

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan (NATM) "Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu" tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı ve en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği metottur.

Tünelcilikte, yeni bir anlayışın ortaya çıkmasına yol açan yöntem; tünelin kendisini, açıldığı kaya ortamına taşıtma ilkesine dayanır. Yöntemin prensibi, en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemleri kullanılarak kazı sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilizesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleten bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturulmasıdır.

NATM, kesin olarak belirlenmiş kazı ve tahkimat sistemlerini içermemektedir. En duyarlı ve ekonomik tahkimatın belirlenebilmesi için tahkimatın sürekli gözden geçirilmesi ve kaya hareketlerinin gözlemlenmesi esas olmak kaydıyla, tünelcilik ve kazı yöntemlerinin hepsi kullanılabilir.

Yöntem; özellikle zayıf zeminlere adapte edilen ince bir püskürtme beton tabakasıyla yüzey sağlamlaştırılması yapılan, kaya bulonları yardımıyla sağlamlaştırılan ve mümkün olduğu kadar kısa bir süre içinde ters kemer betonu ile kaplanan bir tünelcilik yöntemidir. Tünel zeminine uygun oranlarda donatı ve kaplama malzemesi kullanılır. Etkileşme ve kaplama basınçlarının yakından izlenmesi NATM'ın önemli bir kısmını oluşturur.





Karaköy Tüneli İstanbul - Eski ve Yeni Görünümü

Kaynaklar:

1. *Prof. Mehmet BOZKURT, Tüneller Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1970*
2. *Atakan EMİROĞLU, İstanbul (4. Levent - Hacıosman Arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2010*



Ş. Özcan EROL

1975 yılında İDMMA İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olan Ş. Özcan EROL 1975-77 yılları arasında TCDD Genel Müdürlüğü'nde görev yapmış ve 1982 yılında KGM Otoyollar Dairesi Başkanlığı Otoyolu Köprüler Şubesi Müdürlüğü'nde proje mühendisi olarak göreve başlamıştır. Çeşitli kademelerde görev yapan EROL 2010 yılında Şube Müdürü olarak emekli olmuştur. Ş. Özcan EROL halen YTMK Genel Koordinatörü olarak görev yapmaktadır.

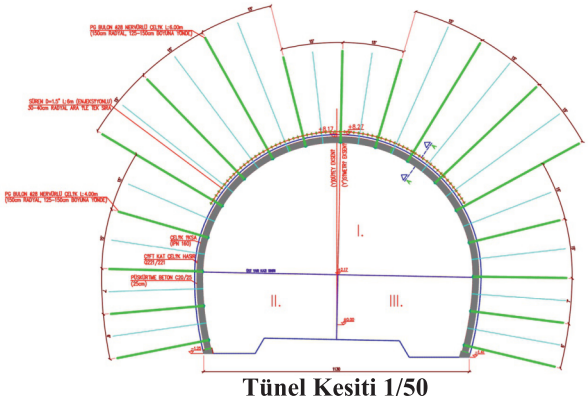
MODERN TÜNELCİLİK YÖNTEMLERİ NATM VE TBM

Bülent ULUKAN
EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.

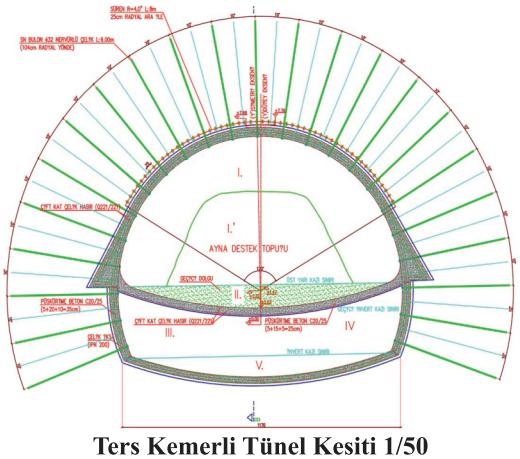
NATM Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu, değişik ülke uygulamalarında "Püskürtme Beton Yöntemi", "Klasik Tünelcilik Yöntemi", "Gözlemsel Yöntem" ve "Klasik Yöntem" gibi değişik isimlerle de anılmaktadır. Yöntem, değişkenlik gösteren kaya ve zemin koşullarında ve ayrıca geometrisi değişkenlik gösteren ana tünel kazılarında, ana tünele bağlantılı daha küçük kesitli tünel kazılarında, havalandırma ve trafo tesislerinin değişkenlik gösteren kazılarında tünel delme makinelerine (TBM) göre çalışma kolaylığı sağlamaktadır.

Ayrıca, karayolu, demiryolu ve su tünelleri gibi değişik amaçlı projelerin genellikle 20-150 metrekare olan kesitleri (Yapım ve Deformasyon Toleransları ile), çok zayıf olmayan zemin ve kaya koşullarında üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki aşamada; zayıf zemin koşullarında ise üst yarı, alt yarı ve invert kazısı (Ters Kemer) olmak üzere üç aşamada yapılmaktadır. Alt yarı kazısı tünel aynasından uygun mesafede geriden aynı anda gelirken, invert kazısı da alt yarı kazısını takip etmektedir. İnvert kazısına, sağlam kayada gerek görülmezken zayıf zemin koşullarında ters kemer olarak kazı yapılmaktadır. Bütün bu kazı aşamalarında iş makinalarının tünel aynasına ulaşabilmesi için alt yarı ve invert kazılarının en azından iki yarı kesitte yapılması gerekmektedir. Böylece alt yarının bir yarısında kazıya devam edilebilirken diğer yarısından oluşturulan bir rampa ile tünel içinde iş makinalarının hareketine imkân sağlanmaktadır. Tünel kaya kütlesi ve zemin koşullarının zayıf olması durumunda ise, üst ve alt yarı kazıları daha fazla alt kademelere (galerilere) bölünerek desteklenmesi gerekmektedir. Böylece tünel aynası çevresinde aşırı deformasyonların oluşması önlenerek daha ekonomik bir destek sistemi ile emniyetli bir çalışma ortamı sağlanır. Kazı ve yer altı suyu gibi dış yükler nedeniyle oluşacak gerilmelerin, tünel aynası çevresinde üniform olarak dağıtılması ve bir kemerlenme oluşması için kesit geometrisinin dairesel, at nalı, eliptik veya parabolik şekillerden biri olarak, projenin amacına uygun seçilmesi gerekmektedir. Tünel kazı kesiti; gerek büyüklük, gerekse de geometrik olarak projenin amacına (yol, demiryolu, su tüneli vb.) uygun olarak ve zemin koşulları ile havalandırma, elektrik-elektromekanik ve aydınlatma gerekleri de dikkate alınarak belirlenir.

Kaya kütlesi ve zemin koşulları ile destek sistemine bağlı olarak tünel üst yarı kazısı bir seferde 0,8-4,0 m ilerleme ile yapılabilmektedir. Kazıdan sonra kaya yüzeyinin düzgünlüğü sağlanarak ve serbest bloklar temizlenip gerekli geometri oluşturulduktan sonra yüzeye birkaç cm kalınlığında ince bir püskürtme betonu atılarak zeminin gevşemesi önlenir. Böylece ortamın gevşeyerek iksa sistemi üzerine bir yük olarak etkimesi önlenmiş ve püskürtme betonun kaya / zemin ortamla birlikte ilk kaplamanın yük taşıyan bir elemanı olarak çalışması sağlanmış olur. Kazı sonrası kaya yüzeyini kapatmak için uygulanan birkaç cm kalınlığındaki püskürtme betondan sonra hasır çelik, çelik iksa yerleştirilerek üzerine 10-25 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanır ve 2,5-9 m uzunluğunda sistematik veya lokal bulonlama yapılır. Alt yarı kazısı da üst yarı kazasına benzer şekilde yapılır ve eğer varsa invert kazısı da bitirilerek kesit tamamlanır. Püskürtme beton çelik liflerle uygulandığında hasır çelik kullanılmasına gerek olmayabilir. Destek sistemi elemanlarından bulon zemine kohezyon özelliği verirken, çelik iksa ise oluşabilecek münferit kaya yüklerinin karşılanmasında ve kesit geometrisinin iksa sistemi tamamlanana kadar korunmasında işlev görür. Tünel aynası çevresindeki radyal deformasyonların izin verilebilir miktarlarda sabitlenmesinden sonra beton veya minimum bir donatı ile 25-50 cm kalınlıkta nihai kaplama yapılır. Yalnız bu durumun bir istisnası sığ zayıf zemin tünelleri olup, söz konusu koşullarda kısa adımlarla (örneğin 0,80 cm) kazı ve rijit bir kaplama sistemi ile gerilmelerin taşıtılması gerekmektedir.



Tünel Kesiti 1/50



Ters Kemerli Tünel Kesiti 1/50

Ayrıca zemin suyu için drenaj kuyuları (dewatering wells), sıkıştırılmış hava, jet enjeksiyon, zemin dondurması, borulu enjeksiyonlu şemsiye yöntemi (Umbrella Arch) gibi zemin iyileştirme yöntemlerine gerek bulunmaktadır.

Normal koşullarda tünel çevresindeki yer altı suyunun drenajı tünel çevresindeki yatay drenlerle ve ilk kaplama ile final kaplama arasındaki geotekstil (örneğin 2 mm kalınlıkta) ve geomemrandan oluşan drenaj-yalıtım sistemi ile sağlanmaktadır. Fakat yer altı suyu akımının sürekli ve piyozometrik seviyenin söz konusu yatay drenlerle düşürülmesinin zor olduğu durumlarda tünel kaplama tasarımının su yükünü taşıyacak şekilde yapılması ve gene de geçirimsizliği sağlayacak kaplama sisteminin geomembran-geotekstil sistemi ile oluşturulması gerekmektedir.

NATM yönteminde diğer önemli bir husus ise, kazı sonucunda tünel çevresinde ne kadar radyal deformasyona izin verilerek destek basıncının belirleneceğidir. Destek sisteminin, az radyal deformasyona izin verilerek erken aşamada uygulanması durumunda maliyeti yüksek ağır bir destek sistemi uygulanmış olacak, geç aşamada fazla deformasyon yapmasına izin verilerek uygulanması halinde ise tünelin göçmesi riski göz önüne alınmış olacaktır. Tünelde göçme durumu gerçekleşmese bile tünelde maliyet artırıcı tamirat çalışmaları gerekebilecektir. Bu nedenle tünel göçme aşamasına varmadan oluşacak radyal deformasyona karşılık gelecek emniyetli destek basınçlarının uygulanması en doğru bir çözüm olmaktadır.

Bu durumda tünel etrafındaki kaya veya zemin olduğu kadar çok, ama emniyetli yük taşıyıcı bir eleman haline gelmektedir. Böylece daha esnek dolayısıyla daha az maliyetli destek sistemi uygulanabilmektedir. Bu prensip NATM'yi diğer geleneksel tünelcilik yöntemlerinden ayıran en önemli bir hususdur. Bu amaçla tünel çevresinde deformasyonların, püskürtme betonu arasındaki gerilmelerin ve bazı bulonlardaki kuvvetlerin sürekli ölçümlerle izlenmesi ve uzmanlar tarafından doğru değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca tünel üzerindeki örtü kalınlığının sığ olduğu yerleşim bölgelerinde zemin yüzeyindeki oturmalar izlenerek yapılarda oturma kaynaklı bir hasarın oluşup oluşmadığı belirlenmelidir.

NATM yönteminin önceki yıllarda yapılan uygulamalarında kaya sınıflaması; jeolojik ve geoteknik davranış, litoloji, suyun etkisi ve kazı dikkate alınarak sağlam, kırılgan, gevrek, baskılı, çok baskılı ve kohezyonsuz akıcı zemin olarak belirlenmekteydi. Günümüzde ise modern NATM uygulamasında Zemin Davranışları (Ground Behaviours), stabil, süreksizlik kontrollü blok düşmesi, sığ göçme, gerilmelerin neden olduğu büyük hacimli ve büyük deformasyonlu göçme, kaya patlaması, burkulma yenilmesi (Buckling), tavan göçmesi, yoğun çatlaklı ve blokları arasında zayıf bağ olan kaya ve zeminin sökülmesi (Ravelling Ground), akan zemin, şişen zemin ve deformasyon özellikleri sıkça değişen zemin (Heterogeneous Fault, Block in Matrix Rock, Tectonic Melanges) katogorileri altında tanımlanmaktadır.

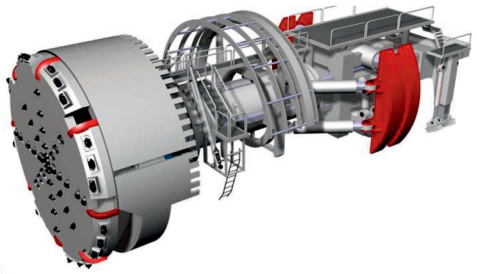
Projelendirme ve yapım uygulaması, kapsamlı zemin incelemelerine, arazi ve laboratuvar verilerine dayanan jeolojik model, geoteknik model ve tünel destek modeli oluşturularak uygulama yapılmaktadır. Jeolojik model; arazide jeolojik birimler haritalanarak, sondajlar ve jeofizik etütler yapılarak, alınan örnekler üzerinde arazi ve laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek, faylar, süreksizlikler ve portal bölgelerinde heyelan gibi potansiyel risk unsurları belirlenerek ve hidrojeolojik etütler yapılarak hem kaya-zemin hem de kütle özellikleri bağlamında belirlenmektedir. Tünel güzergâhı boyunca değişiklik gösteren jeolojik alt birimler tanımlanmaktadır. Jeolojik Modelin yeterli doğrulukta ve detayda belirlenmesi, ihale sürecindeki sorumluluğu ile birlikte esas olarak işverene ait olmaktadır. Bu aşamada zemin ve kayaların kayma dayanımı, deformasyon, dane dağılımı, permeabilite, doygunluk derecesi, şişme kapasitesi, su içeriği, süreksizlik, anisotropi ve petrografik vb. özellikleri belirlenerek Zemin Tipleri (Ground Types) tünel güzergâhı boyunca belirlenmektedir. Bu süreci takiben herhangi bir destek sistemi göz önüne alınmadan tam kesit tünel kazısına zeminin tepkisi olan Zemin Davranışı belirlenerek, Zemin Davranışı Tipleri (Ground Behavior Types) tanımlanmaktadır.

Bu tanımlamada birincil gerilme durumu, zemin suyu koşulları, kazı kesiti ile süreksizliklerin konum ilişkisi dikkate alınır. Analitik ve numerik yöntemler kullanılarak tünel güzergâhı boyunca tipik kesitler analiz edilerek deformasyon ve olası göçme mekanizmaları incelenir. Kazı ilerleme boyu ve kazı aşamaları dikkate alınarak tünel aynasının stabilitesi değerlendirilir. Yapım yöntemine ve yapım aşamalarına ve oluşan gerilmelere bağlı olarak Sistem Davranışı (System Behaviour) analiz edilir. Tünel kazısına destek sistemi uygulanarak Sistem Davranışı tünelin toplam stabilitesi göz önüne alınarak değerlendirilir. Gerekmesi durumunda Sistem Davranışı proje kriterlerini karşılamıyorsa kazı ve destek yöntemi revize edilir. Söz konusu bu projelendirme süreci yapım aşamasında yapılacak yerinde jeolojik etütler, haritalama ve ölçümlerle gerçek koşullara uyarlanır.

Tünel Delme Metodu (TBM)

Yapılan araştırmalarda kaya veya zemin koşullarının, önemli bir değişiklik göstermediği bir başka deyişle homojen olduğu ve tünel boyunun 3000 m'yi aştığı durumlarda tünel kesiti tam kazısının Tünel Delme Makinaları (TBM) ile yapılması, ilk yatırım maliyetleri yüksek olmakla birlikte büyük yapım kolaylığı ve projenin daha kısa sürede gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Bir Tünel Delme Makinası (TBM) genel olarak aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.



TUNEL AÇMA MAKINASI (GRIPPER SYSTEM)

- Ön kısmında üzerinde kesici ve kazıcı diskler olan bir başlık,
- Zemine yatay olarak itilen ve destek işlevi gören kalkan,
- Kazılan malzemeyi aynadan geriye taşıyan sistem,
- TBM'e itme kuvveti uygulamak için kriko sistemi
- TBM'i kazı yüzeyine tespit etmek için sürtünme elemanları.
- Kazı aynasında yer altı suyu veya yumuşak siltli kil, kum gibi akıcı zemin bulunması durumunda ayna stabilitesini sağlamak için basınçlı su, hava veya bentonit gibi akışkanları uygulama ünitesi,
- Kazı aynasından akışkan içinde geri gelen kırıntılı zeminin bulamaçınının geri dönüşümünü sağlayan ünite,
- 10-20 cm kalınlığında ve 1-3 m genişliğinde betonarme prekast kaplama elemanlarını kazı yüzeyine yerleştiren elemanlar.

Prekast kaplama elemanlarının derzleri şaşırtmalı yapılarak aşırı yük altında derzlerde kırılmanın sürekli olmaması sağlanır. Ayrıca derzlere su geçirimsizliğini sağlamak için contalar yerleştirilir. Pahalı bir yatırım olduğu için öncelikle zemin araştırmalarının kapsamlı yapılarak tipinin belirlenmesi çok önem taşımaktadır. Bu araştırmalarda TBM için kesici kafadaki elemanların kayayı keserken aşınmalarını belirlemek için kayanın serbest basınç dayanımını, sertliğini süreksizlik aralığı ve dolgusunu belirlemek önem taşımaktadır. Zeminin veya kayanın ayna stabilitesinin sağlandığı durumlarda kollu tünel açma makinası (Road Header) ile kazı yapılması yeterli olmaktadır. Yumuşak kil ve silt, kum, çakıl, çatlaklı yumuşak kaya zeminlerde kalkanlı TBM kullanılması uygun olmaktadır. 13-14 m çapa kadar kazabilen TBM sistemleri tünel boyu uzadıkça ve nispeten homojen bloksuz zeminlerde ilerlendikçe ekonomik olmaktadır.

NATM yapım aşamasında yapılan ölçümler, jeolojik ve geoteknik değerlendirmeler sonucunda öngörülen projelerde bir değişiklik yapılmasının gerekmesi durumunda bir tünel dizayn temsilcisinin sahada bulunmasında büyük yarar bulunmaktadır. Projenin paydaşları olan İdare, Müşavir, Projeci ve Yapımcı firma arasında oluşturulacak karşılıklı güvene ve işbirliğine dayalı bir ortamın işin zamanında ve bütçesinin sınırları içinde tamamlanmasına katkıları çok olacaktır.

Sonuç olarak NATM veya TBM yöntemlerinden herhangi birine zemin koşulları detaylı olarak araştırıldıktan sonra avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak karar verilmesi ve uygulamanın deneyimli ve bilgili takımlarca yapılması başarı için büyük önem taşımaktadır. NATM modern bir tünelcilik yöntemi olarak, zemin ve kaya koşullarının yerinde sürekli ölçüm ve araştırmalarla takibi ve gerçekçi proje revizyonuna olanak tanıması nedeniyle değişken zemin koşullarında, ihale uygulamasında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Kaynaklar:

1. *Austrian Society for Geomechanics, Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation, 2010*
2. *FHWA-NHI-09-010, Road Tunnel Manual, 2009*
3. *ITA-AITES, Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines, 2000*
4. *Felsbau 21 No. 4, Design Guidelines Continuous Excavation of Railway and Road Tunnels by Use of Tunnel Boring Machines, 2003*
5. *KGM Karayolları Teknik Şartnamesi, 2006*



Bülent ULUKAN

1976 yılında ADMMA Ankara Mühendislik Mimarlık Yüksek Okulu'ndan mezun olan ULUKAN DSİ Genel Müdürlüğü Proje İnşaat Dairesi'nde bir yıl çalıştıktan sonra askerlik dönüşü KGM 12. Bölge Müdürlüğünde göreve başlamıştır. 1988 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimini tamamlayan ULUKAN 1991-1992 yıllarında TÜBİTAK bursu ile Almanya'da Stuttgart Üniversitesi Otto Graf Enstitüsü'nde konuk bilimsel araştırmacı olarak çalışmalarda bulunmuştur. 2003 yılında KGM'den emekli olduktan sonra özel sektörde çalışan ULUKAN halen Emay Uluslararası Müh. ve Müş. A.Ş.'de görev yapmaktadır.

UYGULAMADAKİ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARINA GÖRE TBM VE NATM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Rahşan YILDIRIM TELEK
KGM, İşletmeler Dairesi Başkanlığı

1. Giriş

Tünel inşaatlarının, jeolojinin ve yapım metotlarının doğasında olan riskler yüzünden yapım sürelerinin uzun olduğu ve aşırı maliyetli oldukları yönünde, tüm dünyada geçerli bir kanı vardır. Bu nedenle büyük finansman gerektiren bu yapıların yapımından önce bir risk analizi yapılır.

Risk analizi yapılırken göz önüne alınan noktalar şunlardır:

- Teklif bedeli içinde kalınamaması
- Süresi içinde bitirilememesi
- Gereken kalite ve işletme gereksinimlerinin karşılanamaması
- Tünel içinde, yakınında ya da üstünde kabul edilemez veya olağandışı olayların meydana gelmesi

Riskin artmasına etki eden etmenler ise ihale öncesi yeterli derecede geoteknik araştırma yapılmaması, gerçekçi olmayan maliyet ve inşaat süresi beklentileri ve tünel metodolojisinin uygun olmamasıdır.

Risk analiz edilirken ele alınan en önemli etken tünel açma yönteminin seçilmesidir. Modern tünel açma yöntemlerinde iki tür yöntem önümüze çıkar. NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ve TBM (Tünel Kazma Makinesi).

1.1 NATM Yöntemi

NATM hem bir tasarım felsefesi hem de bir yapım yönteminin adıdır. Tasarım felsefesi olarak NATM, tünel etrafındaki zeminin kemerleşme etkisi ile taşıyabileceği yükü taşıması ve böylece daha ekonomik bir tahkimat yapılabilmesini ifade eder. Zeminin bir miktar hareket ederek bir kemer oluşturması sağlanır. "İlerledikçe tasarla" ya da daha doğru olarak "gözlemleyerek tasarla" yaklaşımıdır. Tünel aynasının gözlenmesi ve kazıdan sonra oluşan deformasyonların ölçülmesiyle, ilk anda yapılan geçici tahkimattan sonra kalıcı tahkimatın nasıl olacağına karar verilir. Bu tahkimata karar verilirken önce aynadan yapılan gözlemle geçilecek kısmın kaya sınıflandırması yapılır ve bu sınıflandırmaya denk gelen destek sınıfı belirlenir. Karayolları Teknik Şartnamesi Kısım 350'de sınıflandırmanın nasıl yapılacağı ve buna denk gelen destek sınıfı ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır. Kaya sınıfı güçlüden zayıfa doğru sırasıyla A (1, 2), B (1-3), C (1-5) şeklindedir ve destek sınıfları da aynı harf-rakam ikilisiyle belirtilir.

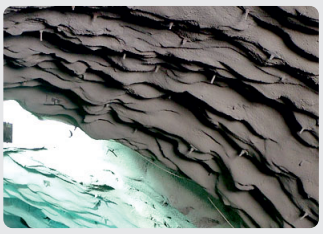
NATM yapım yöntemi olarak da; karşılaşılan zemin durumuna göre aşamalı bir kazı; püskürtme betonu, çelik hasır, çelik iksalar ve zeminin durumuna göre kaya bulonu, çelik levha, süren, enjeksiyon gibi zemin güçlendirme yöntemleri, su sızdırmaz bir membran ve üstüne yapılan yerinde dökme beton ile tünel kaplamasının tamamlanması süreçlerini ifade eder.





NATM yönteminde kazı patlatma ya da kazıcı makinelerle yapılabilir.

Zayıf zeminlerde kazının güvenli şekilde yapılabilmesi için kazı öncesinde tünel aynasından güçlendirmeler yapılır. Geçici desteklerden sonra deformasyonların kontrol edilmesiyle kalıcı desteklemeler tamamlanır.





1.2 TBM Yöntemi

Kazıcı makinenin TBM sayılması için tüm tünel aynasının tek kesit olarak açılıyor olması gerekir.

TBM'ler çapı 3,5 m'den az olan mikro tünel TBM'leri haricinde iş bazında tasarlanan makinelerdir. Çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirlerse de genel olarak önce Sert Kayaç TBM'leri ve Zemin TBM'leri olarak ayrılırlar.

1.2.1 Sert kayaç TBM'leri

Kendini tutabilen zeminlerde kullanılırlar, konik ya da disk kesicileri bulunur, açık ya da kalkanlı (shield)

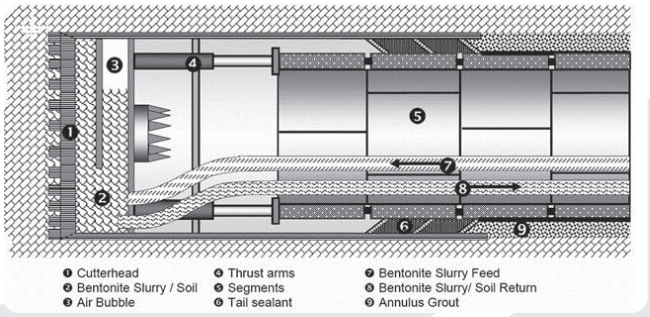
olabilirler. **Kalkanlı** TBM'lerde kesici kafanın arkasında ekipman ve personeli tünel cidarından kopan parçalardan korumak için bir kalkan bulunur. Tünel desteklemesi öndöküm segmanlarla yapılır ve TBM ilerlemesini bu segmanlara basıp kendini iterek yapar. Bu yüzden **tek kalkanlı** olanlarda destekleme ve kazı aynı anda yapılamaz. **Çift kalkanlı** olanlarda ise zeminin kendini tutabildiği yerlerde TBM segmanlara değil, pabuçlarla tünel duvarına basarak ilerler, formasyonun kırıklı çatlaklı olduğu yerlerde ise iki kalkan kenetlenir ve tek kalkanlı gibi çalışır. Ancak çift kalkanlı TBM'ler daha uzun sürtünme alanına sahip oldukları ve daha ağır oldukları için daha yüksek itme kuvvetine ihtiyaç duyarlar ve yine aynı sebeplerden dolayı, sıkıştırma özelliği bulunan zeminlerde sıkışıp kalma riskleri daha fazladır (böyle durumlarda kalkan kesilip bypass tüneli açılıp kesici kafanın önü boşaltılır, sonra kalkan geri kaynatılır). İlerlemek için pabuçların kullanıldığı kazılarda çatlak miktarı fazla olan zeminlerde kalkana malzeme girmesi sebebiyle ek temizlik süresine ihtiyaç duyulabilir. Diğer TBM'lerden daha karmaşık yapıda oldukları için hem kurulmaları hem de işletilmeleri daha zordur.

1.2.2 Zemin TBM'leri

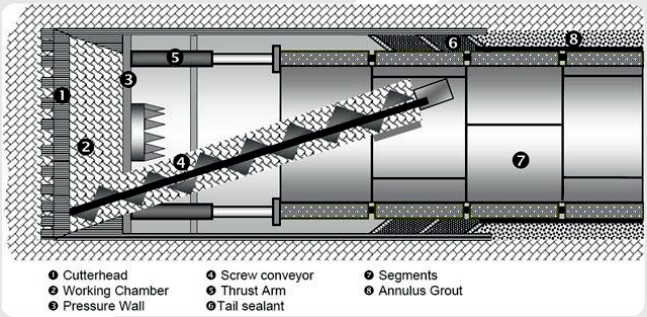
Genel olarak kendini destekleyemeyen formasyonlarda kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Kazı yaparken oluşan toprak basıncını dengelemek için aynada basınçlı bir alan oluşturulur. Bu basıncı oluşturmak için bentonit gibi bir madde kullanılarak dışarıda çamur hazırlanan tiplerine **Çamur basınçlı** (slurry type), kazılan toprağın kendisinin kullanıldığı tiplerine de **Pasa Basınçlı** (earth pressure balance) TBM denir.

Çamur basınçlı TBM'ler özellikle yer altı suyu basıncına bir çözüm olarak üretilmişlerdir en etkili olarak çakıllı, kumlu zeminlerde kullanılırlar. En büyük dezavantajları çamur hazırlamak için kurulacak tesisin getireceği ekstra maliyet ve iş yüküdür. Ancak Pasa Basınçlılara göre daha yüksek ayna basıncı olan zeminlerde kullanılabilirler.

Pasa basınçlı TBM'ler genellikle silt ve kil bulunan formasyonlarda kullanılırlar. Malzemenin kesici kafa içine girip helezon konveyörden geçişini kolaylaştırmak ve tıkanmaları önlemek için bir takım kimyasallar kullanılır.



Çamur Basınçlı TBM



Pasa Basınçlı TBM

2. NATM ve TBM Yöntemlerinde Karşılaşılabilecek Sorunlar

2.1 NATM yönteminde karşılaşılabilecek sorunlar

NATM yöntemindeki en büyük sorun yetersiz desteklemeler sebebiyle oluşabilecek göçüklerdir. Özellikle kazı anında ve kazının kalıcı desteklemelerinin henüz kurulmadığı, deformasyonların oluşarak kemerleşmenin beklendiği yeni kazı bölgelerinde bu risk mevcuttur. Herhangi bir sebeple bekleme sürelerinin uzaması ve kalıcı tahkimatın yapılmaması zeminin sökülerek göçmesi olasılığını ve baca oluşumunu arttırır. Sökülmeler hem tünelin yapımını maliyet ve süre olarak etkiler hem de can güvenliği gibi önemli bir durumu ortaya koyar. NATM'ın patlatma yöntemiyle yapılmasının getirdiği ekstra sorunlar vardır. Bunlardan en önemlisi patlatmanın etkisiyle tünel cidarındaki bölgenin gevşemesi ve yer altı suyu girişini artıracak çatlaklarının oluşmasıdır. Ayrıca kaya bulonu tahkimatı da tünele yer altı suyu girişini artıran bir uygulamadır. Yer altı suyu NATM için ekstra problem yaratan bir sorundur ve çözümü nispeten daha zordur. Hatta yer altı suyu basıncının yüksek olması ya da tünelin su altında yapılması gibi durumlarda NATM yöntemi direkt seçenek dışı kalabilir. Patlatmanın oluşturduğu bir diğer sorun da tünel kesitinden çok daha büyük boşlukların oluşabilmesidir. Kesiti gereken açıklığa getirmek maliyetli ve zaman alıcı bir iştir.

2.2 TBM yönteminde karşılaşılabilecek sorunlar

TBM'lerin en büyük sıkıntılarından biri sıkışma durumlarıdır. Sıkışma hem şişen zeminlerde hem kaya bloğunun düşebileceği fay hattı, bozunmuş dayk gibi alanlarda olabilir. Bunu önlemek için NATM yönteminde de yapılan, kazı öncesi zemin güçlendirmeleri uygulanabilir. En yaygın olanı Şemsiye Takviye (Umbrella Arch) uygulamasıdır. Kazı sürerken yapılan sondajlar, sorunlu zeminin kazı öncesinde fark edilip tedbir alınabilmesi açısından önemlidir. Böylelikle hem zemin güçlendirmesine gerek olup olmadığı anlaşılabilir hem de kazı hızında yapılan ayarlamalarla bazı sorunlar önlenebilir. Sıkışmanın olabileceği zeminlerde TBM'ye ekstra şanzıman (gearbox) montajı, sıkışma sorununa karşı alınabilecek önlemlerdendir. Ekstra şanzımanlar kesici kafanın hızını düşürüp torku arttırırlar. Ancak bunlar maksimum devri sınırladıkları için kötü zeminden çıkıldıktan sonra sökülmelidir.

TBM'lerin mekanik sorunları da zaman kaybı ve maliyet getirebilir. Bu makinelerin yurt dışında imal edilmeleri sebebiyle parçaların gelmesi de bir zaman kaybı oluşturabilmektedir. Aşırı titreşim makine parçalarında, özellikle ana rulmanda tamiri 20-30 günü aşabilen sorunlar oluşturabilir. Daha en baştan iyi bir TBM makinesinin seçilmesi birçok sorunu önler. Yer altında yakıt tehlike oluşturduğu için TBM makineleri elektrikle çalışır. Elektrik sisteminde, güç sağlayıcıda oluşan aksaklıklar kazıya direkt etki eder. TBM'li tünel kazılarında pasayı taşıyacak bir konveyör sistemi kurulması gerekir çünkü kazıdan sonra NATM'daki gibi pasayı taşıyacak araçların sürülebileceği düz bir zemin oluşmaz. Konveyör sisteminin aşırı yüklenmesi kazıyı yavaşlatacak başka bir sorundur. Bu tür destek sistemlerindeki sorunlar da kazıyı etkiler.

TBM'lerin diğer büyük sorunu da kesici kafanın temizliğinin gerektiği durumlardır. Zayıf anayapı içinde bulunan sert kaya blokları kesici kafayı kilitleyebilir. Özellikle aynanın karışık formasyonları içerdiği durumlarda temizlik zaman kaybı oluşturabilir. Yapışma özelliğine sahip kil zeminlerde kesici kafa açıklıklarının tıkanması bir sorundur. Bu sorun yapışmayı engelleyici köpük benzeri kimyasalların kullanılmasıyla bir miktar aşılabilir.

Diğer bir sorun da kesicilerin aşınması sebebiyle değiştirilmesinin gerekmesidir.

TBM'lerde yönlendirme sisteminin çalışmasında bazı zorluklar da kaydedilmiştir. Toz miktarının fazla olduğu formasyonlardaki kazılarda lazer ışınının prizmalara ulaşamaması, sert zemin kazılarındaki sarsıntının gene prizmalara lazerin ulaşmasını etkilemesi, çift kalkanlı TBM'lerde öndöküm duvar segmanları döşenirken üst kısımlarda panel erektörünün lazer ile prizmalar arasına girmesi gibi durumlar kazı hızını beklenenin altına düşürebilmektedir.

Zemindeki kırık ve çatlakların ve dökülmenin fazla olduğu zeminlerde kalkana giren malzeme TBM'nin ilerlemesini etkileyeceğinden bunların temizlenmesi gerekebilir.



Kalkan içine giren döküntü malzeme

TBM yönlendirmeleri dikkatli yapılmalıdır. Özellikle çift kalkanlı TBM'lerde teleskobik kalkanın birbirine sürterek sıkışması mümkündür.

3. NATM ve TBM Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Süre

TBM ile kazı yapmak NATM yöntemine göre en az iki kat daha hızlıdır. Zemin koşullarının iyi olduğu durumlarda bu hız daha da fazladır ancak TBM makineleri iş bazında tasarlanan makineler olduğu için çok önceden sipariş edilmeleri gerekir. Tedarik süreci 9 ay-1 yıl arasında olabilir. İkinci el TBM herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılırsa (değişiklikler genelde 3-6 ay sürer) bu tedarik süresi gerekmez ancak her halükarda TBM kurulması 3-6 hafta arasında bir süre alır. Metro gibi giriş yapısı ile yer altına inilecek yapılarda TBM kullanabilmek için önce giriş yapısının yapılması gerekir. NATM yönteminde ise giriş yapısı ve tünel eşzamanlı inşa edilebilir. Bu gibi durumlar TBM yönteminin hız avantajını ortadan kaldırabilir.

Maliyet

TBM ilk maliyeti yüksek bir yöntemdir. Özellikle 5 km'den kısa tüneller için uygun sayılmazlar. Bu durum NATM'ın en büyük avantajı gibi görünse de kazı öncesi zemin güçlendirmelerinin çokça yapılması gereken zeminlerde maliyet TBM maliyetini geçebilir.

Geometri esnekliği

NATM yönteminin en büyük avantajlarından biri sunduğu geometrik esnekliktir. TBM ile dairesel bir kesit kazılabilirken NATM yönteminde bu kısıtlama ortadan kalkar. TBM ile gerektiğinde galeriler, geometriden daha geniş alanlar yapmak zordur. Kesit sabit olduğu için destek işler için kullanılabilecek alan sınırlanmıştır. NATM yöntemi bunlarda esneklik sağlar. TBM'nin ağır bir makine olması sebebiyle tünel eğiminin %3'ten fazla olduğu durumlar TBM için zorluk oluşturur ve konveyörlerle malzeme atılabilmesi için tünel kazısının eğimin alt tarafından başlatılması gerekir. Benzer şekilde tünel kurp yarıçapının 150-400 m'den (TBM tipine göre) düşük olduğu durumlarda TBM uygulanamayabilir. Ayrıca TBM tarafından yapılan kazı alanı, araçlar için uygun bir düz yüzey oluşturmadığından inşaat sırasında araç girişi nispeten zordur. Düz bir platform yapmak için malzeme ve zaman harcanır. Ancak bunun yanında TBM temiz bir kesit verir. NATM yönteminde ise kesitin ihtiyaç duyulandan fazla olması veya az olması durumları oluşabilir.

İş güvenliği

TBM ile tünel kazılması hem personel hem ekipman açısından yapım yöntemi olarak daha güvenli olduğu gibi makinelerin uzaktan ve otomatik kontrollerinin mümkün oluşu da ekstra bir güvenlik unsurudur.

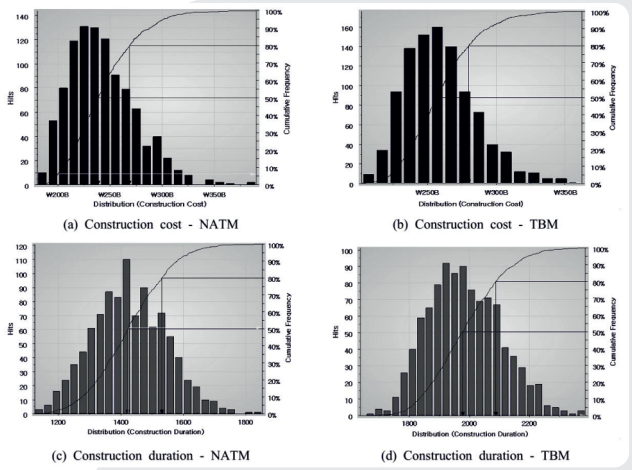
Diğer

Şehir içi yer altı yapılarında patlatmanın oluşturacağı gürültü ve titreşim, aynı zamanda oluşacak bir göçüğün üstteki yapılara zarar verebilmesi gibi nedenlerle TBM mecburi bir yöntem olabilir. Gene aşırı yer altı suyu basıncı olduğu durumlarda da TBM tek alternatif olarak kalabilir. Bazen konsolidasyon olması tercih edilmediğinden suyun aşırı drene edilmesi istenmeyebilir. Çamur basınçlı TBM'ler çözüm olabilir. TBM'lerin zeminde minimum örselenme oluşturması da ayrı bir avantajdır ancak TBM'ler zemindeki değişikliklere karşı daha az esneklik gösterirler.

4. Sonuç

Tünel açma yöntemleri ile ilgili yukarıda yapılan mukayeseli açıklamalara göre her ne kadar bazı durumlarda zeminin yapısı itibariyle tek alternatif seçeneği bulunsa da tünel açma yöntemine karar vermek çoğunlukla direkt maliyetle ilgilidir. Ancak maliyeti etkileyen durumların zamanla değişmesi (teknolojinin değişmesi ya da yaygınlaşmasıyla iş kalemlerindeki maliyet değişiklikleri) zemin belirsizlikleri gibi nedenlerle daha en baştan bir yönteme karar vermek mümkün olmamaktadır. Bunun için projenin başında bir risk analizi yapılmalıdır. Risk analizi her riski; sorunların oluşma sıklığını, önemini, süreye ve maliyete etkilerini incelemeli ve buna göre yöntem seçilmelidir.

Aşağıda örnek olarak Monte Carlo Simülasyonu ile hazırlanmış bir analiz görülmektedir.



Kaynaklar:

1. *Kim YOUNG-GEUN, Moon JOON-SHIK, Shim JAI-BEOM, Lee SEUNG-BOK, Choi CHANG-RIM, Chun YOUN-CHUL (2011); Comparative risk analysis of NATM and TBM for mixed-face large-diameter urban tunneling, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 1, January 2011*
2. *Uğur ATEŞ; Çift Kalkanlı TBM Kullanımında Karşılaşılan Sorunlar Ve Uygulanan Çözümler, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Bölümü, Madencilikte Özel Konular*
3. *Y. NISHIMOTO; October 12th 2011 ILC-CFS Face-to-face meeting; JPOWRE-NATM-TBM-_public.ppt(http://agenda.linearcollider.org/event/5369/contribution/7)*
4. *http://www.p3planningengineer.com/productivity/tunneling/tunneling.htm*
5. *http://wiki.iricen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=823:13.pdf*
6. *https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CEsQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.epl.gov.br%2Fhtml%2Fobjects%2F_downloadblob.php%3Fcod_blob%3D919&ei=ej3sVJneFNLOaJOmgvAD&usg=AFQjCNFMyjaIIGmb8JVcgztM8kxS_YQTNQ (www.epl.gov.br)*
7. *https://www.google.com.tr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0CFcQFjAI&url=http%3A%2F%2Fwww.wctmgurgaon.com%2Fdata%2Fprjectcivil%2FNATM%2Cppt.pptx&ei=ej3sVJneFNLOaJOmgvAD&usg=AFQjCNGS5070YwJsw5sGRhidZLsAJB6nVQ*



Rahşan YILDIRIM TELEK

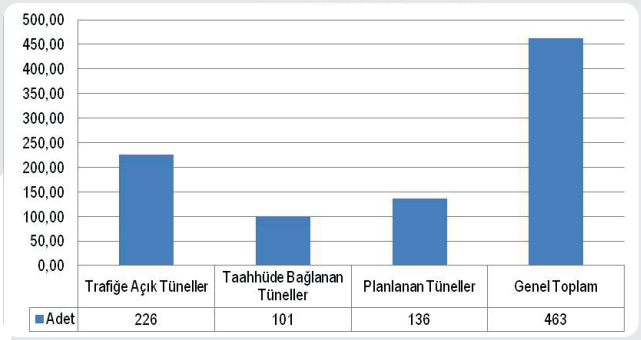
Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olan Rahşan YILDIRIM TELEK özel sektörde çalıştıktan sonra 2003 yılında Karayolları 16. Bölge (Sivas) Köprü Başmühendisliğinde işe başlamıştır. 2006 yılında Otoyolları Dairesi Başkanlığı, Köprüler Şubesi Müdürlüğüne atanan YILDIRIM TELEK halen İşletmeler Dairesi, Yapım ve Köprüler Şubesi Müdürlüğünde Sanat Yapıları Şefi olarak görev yapmaktadır.

KARAYOLU TÜNELLERİNDE PROJE VE YAPIM ÇALIŞMALARINDA JEOLOJİK-JEOTEKNİK ÇALIŞMALARIN ÖNEMİ VE YAPIM MALİYETİNE OLAN ETKİLERİ

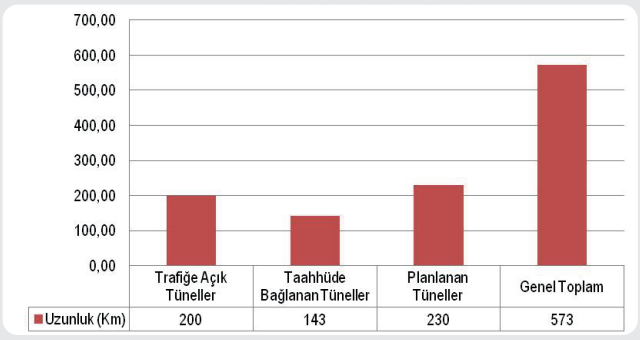
Ahmet ŞİRİN
KGM, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı

1. GİRİŞ

Ülkemizin uluslararası ulaşım yol ağlarının geçiş koridoru üzerinde olması, jeopolitik konumu gereği kıtalararası lojistik merkezi olma hedefi, ulusal ve uluslararası kamuoyu beklentileri Teşkilatımızın bölünmüş devlet yolu ve otoyol hedeflerinin kısa dönemde gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemiz coğrafyasının olumsuz jeolojik koşullar içermesi, aktif deprem kuşakları içerisinde yer alması, büyük ölçekte kaya ve zemin heyelanları ile sel ve doğal afet riskleri içermesi nedeniyle tüm bu altyapı çalışmalarının yüksek dağlık alanlar ve geçit noktaları üzerinde yapılmak zorunda olması ve çevresel hassasiyetlerin artması sonucu istenilen proje standartlarının oluşturulmasında tünel seçeneğinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğünün yol hedeflerinin gerçekleştirilmesinde proje öngörü ve tasarımındaki gelişme dünyanın takip ettiği önemli proje yapılarının yapımını beraberinde getirmiştir. Ülkemizde son yıllarda yapımının tamamlandığı ve halen devam eden önemli tünel yapılarına; Kuzey Marmara Otoyolu güzergahında yer alan dünyanın ilk 4 şeritli karayolu tünelleri (Sütlüce ve Riva Tünelleri), İstanbul-İzmir Otoyolu güzergahında yer alan 3 şeritli Samanlı ve Selçukgazi Tünelleri, İzmir Körfez Geçişi Yapay Ada ve Batırma Tünel Yapısı, Yeni Zigana Tüneli, Ovit Tüneli, Kop Tüneli, Kırık Tüneli, İzmir Konak Tünelleri, Sabuncubeli Tüneli, Ilgaz Tüneli, Zonguldak Şehir Geçişi Tünelleri (Mithatpaşa, Sapça ve Üzülmez Tünelleri), Erkenek ve Karahan Tünelleri, Geminbeli Tüneli, Kahramanmaraş-Göksun Aksında yer alan karayolu tünelleri (T0, T1, T2, T3 ve Çağlayan-Tekir Tünelleri) ve Karadeniz Sahil Yolu Tünelleri örneklenebilir. Tünel yapım ve proje envanterine bakıldığında; trafiğe açık tünellerimiz 226 adet (200 Km), yapım çalışmaları devam eden tünellerimiz 101 adet (143 Km) ve yapılması planlanan tünel adedi 136 olup uzunluğu 230 Km.dir (Grafik-1 ve 2). Buna göre yapım çalışmaları devam eden tünel uzunlukları toplam tünel uzunluğunun %25'ini ve planlanan tünellerimiz ise toplam tünel uzunluğuna göre %40'lık dilimi oluşturmaktadır. Bu veri halen karayolu tünelciliğinde yolun başında olduğumuzun bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Bu anlamda karayolu tünelciliğinin gelişiminde etkili olan güzergah planlaması, proje ve yapım aşamasındaki tünellerimizin giriş çıkış portal bölgeleri, tünel delme kesimlerinin güzergahın tünel kayası olma yönündeki davranış özelliklerinin ortaya koyulması ve yapım çalışmalarında karşılaşılacak olumsuz jeolojik-jeoteknik problemler ve çözümüne yönelik uygulama projelerinin geliştirilmesi ve sonucunda da kurumun tünelcilik hafızasının oluşturulmasına yönelik bilimsel yayın, elektronik belge ve arşiv sistemlerinin oluşturulmasını içeren birçok teknik hususların ortaya koyulması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Grafik-1: Tünel adet bilgileri



Grafik-2: Tünel uzunluk bilgileri

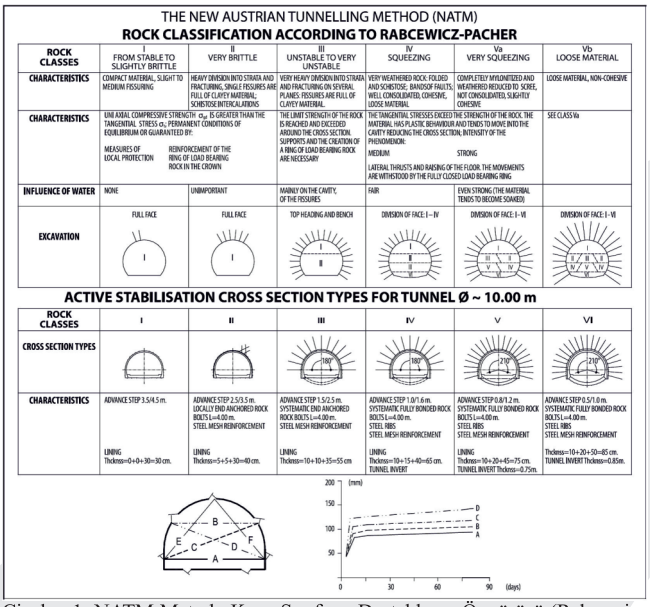
2. KARAYOLLARINDA TÜNELCİLİK

2.1 Metodoloji ve Tünel Kayası Sınıflaması

Karayolları Genel Müdürlüğünün 1997-2006 ve 2013 Karayolları Teknik Şartnamesi kapsamında yer alan tünel proje ve yapım şartlarının tariflendiği şartnamede; NATM [N(ew) A(ustrian) T(unneling) M(ethod)] metodu ile tünel açma yöntemi esas alınmaktadır (Çizelge-1). Bu yöntemle de;

- Kayalarda delme-patlatma ile; üstyarı-altyarı şeklinde (A1-A2-B1-B2-B3),
- Zayıf –çok zayıf kayalarda ise delme patlatma + makineli kazı; üstyarı –altyarı ve taban invertli kazı,

• Baskılı kaya / zemin ortamlarında; bölünmüş veya tam kesit üstyarı - bölünmüş ve tam kesit altyarı ve bölünmüş veya tam kesit invert kazı metotları ile C2 - C3 ve C4 sınıfları destek uygulanmaktadır.



THE NEW AUSTRIAN TUNNELLING METHOD (NATM)
ROCK CLASSIFICATION ACCORDING TO RABCEWICZ-PACHER

ROCK CLASSES	I FROM STABLE TO SLIGHTLY BRITTLE	II VERY BRITTLE	III UNSTABLE TO VERY UNSTABLE	IV SQUEEZING	Va VERY SQUEEZING	Vb LOOSE MATERIAL
CHARACTERISTICS	COMPACT MATERIAL, SLIGHT TO MEDIUM FISSURING	HEAVY DIVISION INTO STRATA AND FRACTURING, SINGLE FISSURES ARE FULL OF CLAYEY MATERIAL; SCHISTOSE INTERCALATIONS	VERY HEAVY DIVISION INTO STRATA AND FRACTURING ON SEVERAL PLANES: FISSURES ARE FULL OF CLAYEY MATERIAL	VERY WEATHERED ROCK: FOLDED AND SCHISTOSE, BANDS OF FAULTS; WELL CONSOLIDATED, COHESIVE, LOOSE MATERIAL	COMPLETELY MYLONITIZED AND WEATHERED REDUCED TO SCREE, NOT CONSOLIDATED, SLIGHTLY COHESIVE	LOOSE MATERIAL, NON-COHESIVE
CHARACTERISTICS	UNI AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH σ_D IS GREATER THAN THE TANGENTIAL STRESS σ_T; PERMANENT CONDITIONS OF EQUILIBRIUM OR GUARANTEED BY: MEASURES OF LOCAL PROTECTION / REINFORCEMENT OF THE RING OF LOAD BEARING ROCK IN THE CROWN	THE LIMIT STRENGTH OF THE ROCK IS REACHED AND EXCEEDED AROUND THE CROSS SECTION. SUPPORTS AND THE CREATION OF A RING OF LOAD BEARING ROCK ARE NECESSARY	THE TANGENTIAL STRESSES EXCEED THE STRENGTH OF THE ROCK. THE MATERIAL HAS PLASTIC BEHAVIOUR AND TENDS TO MOVE INTO THE CAVITY REDUCING THE CROSS SECTION; INTENSITY OF THE PHENOMENON: MEDIUM / STRONG. LATERAL THRUSTS AND RAISING OF THE FLOOR. THE MOVEMENTS ARE WITHSTOOD BY THE FULLY CLOSED LOAD BEARING RING			SEE CLASS Va
INFLUENCE OF WATER	NONE	UNIMPORTANT	MAINLY ON THE CAVITY, OF THE FISSURES	FAIR	EVEN STRONG (THE MATERIAL TENDS TO BECOME SOAKED)	
EXCAVATION	FULL FACE	FULL FACE	TOP HEADING AND BENCH	DIVISION OF FACE: I – IV	DIVISION OF FACE: I - VI	DIVISION OF FACE: I - VI

ACTIVE STABILISATION CROSS SECTION TYPES FOR TUNNEL Ø ~ 10.00 m

ROCK CLASSES	I	II	III	IV	V	VI
CROSS SECTION TYPES						
CHARACTERISTICS	ADVANCE STEP 3.5/4.5 m. LINING Thickness=0+0+30=30 cm.	ADVANCE STEP 2.5/3.5 m. LOCALLY END ANCHORED ROCK BOLTS L=4.00 m. STEEL MESH REINFORCEMENT LINING Thickness=5+5+30=40 cm.	ADVANCE STEP 1.5/2.5 m. SYSTEMATIC END ANCHORED ROCK BOLTS L=4.00 m. STEEL MESH REINFORCEMENT LINING Thickness=10+10+35=55 cm	ADVANCE STEP 1.0/1.6 m. SYSTEMATIC FULLY BONDED ROCK BOLTS L=4.00 m. STEEL RIBS STEEL MESH REINFORCEMENT LINING Thickness=10+15+40=65 cm. TUNNEL INVERT	ADVANCE STEP 0.8/1.2 m. SYSTEMATIC FULLY BONDED ROCK BOLTS L=4.00 m. STEEL RIBS STEEL MESH REINFORCEMENT LINING Thickness=10+20+45=75 cm. TUNNEL INVERT Thickness=0.75m.	ADVANCE STEP 0.5/1.0 m. SYSTEMATIC FULLY BONDED ROCK BOLTS L=4.00 m. STEEL RIBS STEEL MESH REINFORCEMENT Thickness=10+20+50=85 cm. TUNNEL INVERT Thickness=0.85m.

Çizelge-1: NATM Metodu Kaya Sınıfı ve Destekleme Öngörüsü (Rabcewicz ve KTŞ-2013).

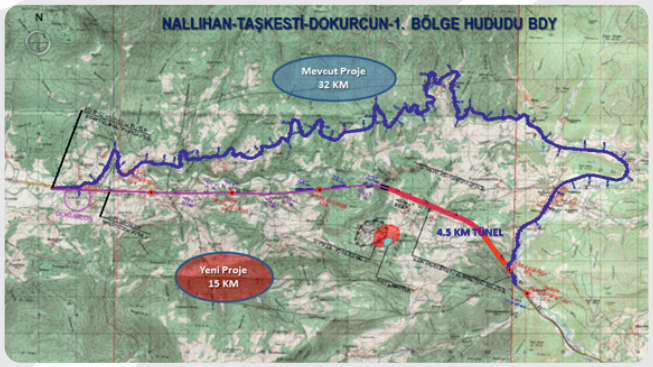
2.2 Tünel Proje Çalışmalarında Yapılan Jeolojik-Jeoteknik Çalışmalar

Karayolları Teknik Şartname içeriğinde yer alan tünel projelendirme çalışmaları kapsamında yapılan jeolojik - jeoteknik etüt çalışmalarında 3 önemli aşama yer almaktadır.

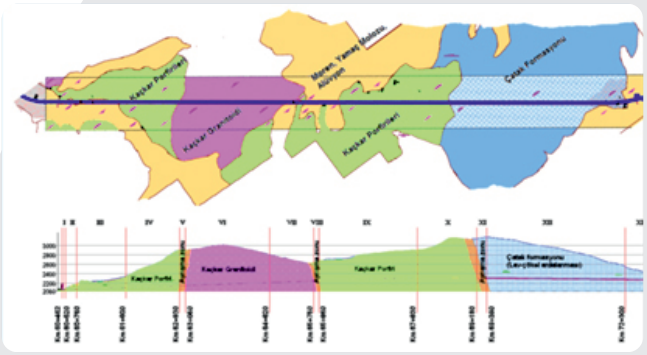
- **1/25000 Ölçekli Tünel Jeolojik-Jeoteknik Elverişlilik Etüdü;** Bu kapsamda tünel güzergahının, portal giriş ve çıkışlarının heyelanlı sahada olup olmadıkları, ülkemizin olumsuz tektonik yapısı ve aktif deprem kuşakları içerisinde olması nedeniyle aktif fay hatlarını kesip kesmedikleri ve/veya zorunlu güzergah geçişleri ise aktif fay hatları ile yapısal ilişkileri ortaya koyularak tünel yapılabilirliği teknik ve ekonomik yönden ortaya koyulduğu bilgileri içeren önemli bir aşamadır (Şekil-1).

- **1/5000 Ölçekli Tünel Ön Proje Jeolojik-Jeoteknik Etütleri;** Bu kapsamda tünel giriş ve çıkışları tünel delme kesimlerine ait yapılabilirlikler ve proje büyüklükleri ölçeği nispetinde ortaya koyularak kesin proje aşamasında daha detaylı olarak çalışılması gereken kesimlerin de tespit edildiği aşamadır.

- **1/1000-1/2000 Ölçekli Tünel Kesin Proje Jeolojik-Jeoteknik Etütleri;** Tünel ekseninin yatay ve düşey olarak kesinleştirildiği, portal giriş-çıkış bölgelerinin stabilite ve geometrik olarak yapı- jeolojik ortam (kaya-zemin) ilişkilerinin detaylı mühendislik jeolojisi, sondaj, yerinde deneyler (in-situ tests), jeofizik etütler ve laboratuvar deney sonuçları ile İdarenin Onaylı Jeolojik-Jeoteknik Plan, Profil ve Enkesitlerinin kesinleştirildiği ve buna göre uygulama projelerinin oluşturulduğu aşamayı tarif etmektedir (Şekil-2).



Şekil-1: Tünel yapılarının güzergah standartlarına olan katkısı ve sağladığı ekonomik fayda örneği.



Şekil-2: Tünel Mühendislik Jeolojisi Planı ve Jeolojik-Jeoteknik Profil Örneği.

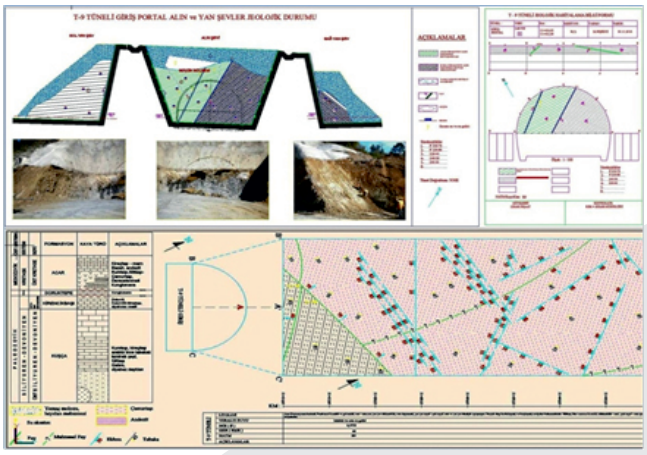
2.3 Yapım Çalışmalarında Yapılması Gerekli Jeolojik-Jeoteknik Çalışmalar

Kesin proje çalışmaları sonrasında ortaya koyulan tünel jeolojik-jeoteknik profiline göre oluşturulan kaya sınıflama ve destek sistemlerinin tünel yapımı esnasında gerçekleşmesinin takibi hem teknik açıdan hem de KTŞ'ye göre yapılması zorunlu çalışma kapsamındadır. Tünel yapımı esnasında yapılacak jeolojik-jeoteknik çalışmalarda aşağıda verilen sıralamanın kullanılması doğru bir yaklaşım olacaktır.

2.3.1 Jeolojik Haritalama ve Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

- Tünel Ayna Jeolojik Haritalama Formu ve Tünel Jeolojik Açılım Haritasının Yapılması (Şekil-3),
- Mühendislik jeolojisi verilerinin tutulması ve jeomekanik özelliklerin ortaya konulması,

- Q, RMR ve NATM kaya sınıflarının tespit edilerek belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil-3: Tünel portal şevleri, tünel ayna jeolojik harita kayıtları ve jeolojik açılım haritası örneği.

Aynanın jeolojik, yapısal ve jeomekanik özelliğinin nümerik ve grafiksel tanımları yapılmalıdır. Bunun için 3 farklı inceleme gerçekleştirilmelidir (Tablo-1).

a) Detaylı inceleme; Bu incelemede tünel kayasının detaylı stratigrafik, litolojik ve yapısal özelliklerinin ortaya koyulmasına yönelik mühendislik jeolojisi verileri; sertlik, çimentolanma, granülometri, alterasyon, süreksizlik özellikleri (süreksizlik tipi, pozisyonu yada yönelimi, geometrisi, dolgu durumu, JRC (joint rougness coefficiency), JCS (joint comprehensive strenght), yer altı suyu ve çatlak suyu durumu ve kazı esnasındaki kaya davranışı (ani göçme, gevrek, kırılgan, sünme, şişme gibi özellikler) kayıt altına alınmalıdır.

b) Ön İnceleme; Aynanın fotoğraf görüntüsü diye adlandırılan tünel kayasının niteliksel olarak litolojik, yapısal ve stratigrafik kayaç özellikleri ortaya koyulur. (a) maddesindeki jeolojik verilerin değişmemesi durumunda geçerlidir.

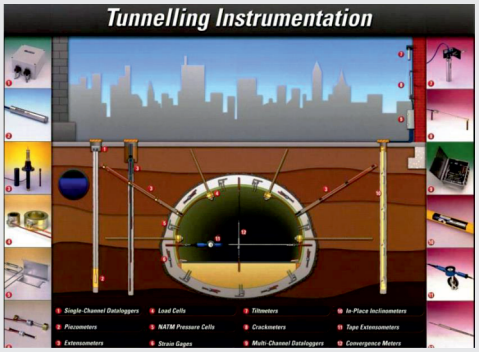
c) Ayna Kayıtları; Ölçekli jeolojik haritalama yapılması ve ayna fotoğrafının ve / veya gerekmesi durumunda video görüntülerinin alınması gerekmektedir.

2.3.2 Jeoteknik Ölçümler

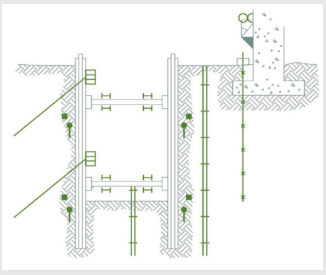
Tünel yapım aşamasında proje öngörülerinin takibi ve deformasyon toleranslarının radyal kapanım olarak takip edilmesi, destekleme - tünel kayası etkileşimlerinin takibi için tünellerde yapım çalışmaları ve servis ömrü boyunca deformasyon ölçümlerinin takibi büyük önem taşımaktadır. Öncelikli olarak her tünel projesinin kendi tasarım kriterlerine göre ***Deformasyon Ölçüm İstasyonlarının*** oluşturulması ve izleme programlarını oluşturması gerekmektedir [Şekil-4 (a, b, c)].

3. TÜNEL İZLEME SİSTEMİ (TİS) KAVRAMI

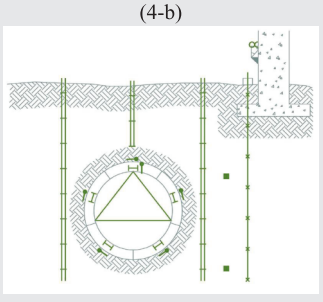
Tünel yapıları çok uzun süre hizmet öngörüsü ile inşa edildikleri için tünel yapımı esnasındaki jeolojik veri kayıtları, yer altı suyu kayıt ve ölçümleri, birimin hidrojeolojik potansiyeli, deformasyon ölçüm kayıtları ve uygulanan nihai projenin verileri gerek yapım çalışmaları esnasında gerekse ileri dönük oluşabilecek problemlerin çözümüne yönelik çok büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda tünelde delme-patlatma aşamasından başlayarak nihai kaplama betonuna kadar geçen sürenin ulaşabilir kayıtlarla denetlenmesi ve arşivlenmesi gerekmektedir. Bu ise basit ama kapsamlı bir TİS (tünel izleme sistemi) ile birlikte takip edilebilir ve kurumsal tünel hafızası oluşturulabilir. Tüm bu veri kayıtları ya da izleme sistemi dijital olarak takip edilebilecek bir sistemle kayıt altına alınabilir (Şekil-5).



(4-a)

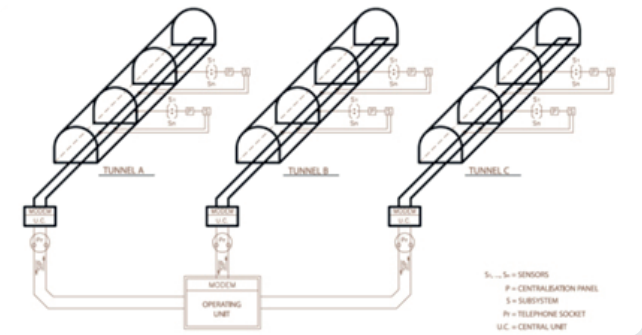


(4-b)



(4-c)

Şekil-4 (a, b, c): Aç-kapa ve sığ tünellerde üç boyutlu deformasyon ölçümü aletleri ve ölçüm uygulama şekilleri.



Şekil-5: Tünellerin veri aktarımı izleme sistemi şematik akış diyagramı.

TÜNEL İZLEME SİSTEMİ (TİS) SIKLIKLARI								
Tünel İzleme Sistemi (TİS)	A1 KAYASI	A2 KAYASI	B1 KAYASI	B2KAYASI	B3 KAYASI	C1 KAYASI	C2 KAYASI	C3 KAYASI
Ön ayna inceleme istasyonu	1 Ad/5 m	1 Ad/5 m	1 Ad/4 m	1 Ad/2 m	1 Ad/1.5 m	1 Ad/1.5 m	1 Ad/1 m	1 Ad/1 m
Analitik jeolojik inceleme istasyonu (detailed survey)	1 Ad/25 m	1 Ad/25 m	1 Ad/20 m	1 Ad/20 m	1 Ad/15 m	1 Ad/10 m	1 Ad/10 m	1 Ad/10 m
Radyal deformasyon ölçüm istasyonu (convergence)	1 Ad/25 m	1 Ad/25 m	1 Ad/20 m	1 Ad/20 m	1 Ad/15 m	1 Ad/10 m	1 Ad/5 m	1 Ad/5 m
Estrusion					1 Ad/10 m-gün		1 Ad/25 m-gün	1 Ad/25 m-gün
	1 okuma kazı öncesi, 1 ad/gün kazı esnasında, 1 ad okuma kazı sonrası							
Ana ölçüm noktaları istasyonları	Hassas jeolojik yapı, sığ örtü ve şehir geçişi tünelciliği, yeraltı suyu koşulları ve diğer nedenlere bağlı olarak özel ölçüm projesi hazırlanmalıdır.							

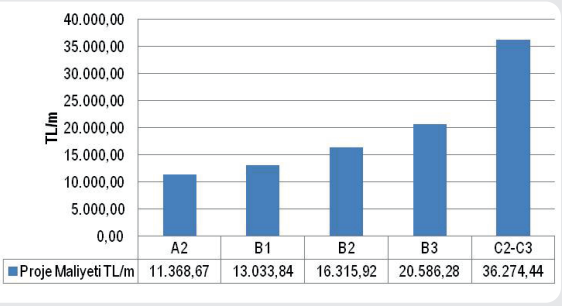
Tablo-1: Kaya Sınıflarına Göre Önerilen Tünel İzleme Sistemi (TİS) ölçüm sıklıkları (Taslak Öneri).

4. SONUÇLAR

Tünel projelendirme çalışmaları ve sonrasında tünel yapım çalışmaları aşamasında tünel kayasının kazı ve destekleme tipinin belirlenmesinde ayna jeolojik haritalaması ve uygulanan destek - deformasyon ilişkilerinin ortaya koyulmasında da deformasyon ölçümleri önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizin olumsuz jeolojik yapısına bağlı olarak yatay ve düşey kaya-zemin geçişlerinin çok sık değişkenlik göstermesi, aktif deprem kuşakları içerisinde yer alması, çok eğimli ve dalgalı dağlık arazi morfolojisi sunması gibi birçok faktörler nedeniyle yeterince mekanik sondaj, yerinde deneyler ve diğer araştırma çalışmalarının yapılamaması gibi nedenlerle tünel kayasının yapım aşamasında jeolojik açıdan takibi ve davranışı proje yapım maliyetleri açısından büyük önem taşımaktadır. Grafik-3'de ülkemizdeki kaya sınıfı ve buna bağlı destek sınıflarına göre ortalama maliyetleri görülmektedir. Bu verinin halen taahhüde bağlanarak tünel yapım çalışmaları sürdürülen tüneller ile Teşkilatımız 2023 hedefleri doğrultusunda yapılması planlanan tünel uzunlukları göz önüne alındığında kazı - destek sınıflarının tespitinde, bir alt kazı destek sınıfının bir üst destek olarak uygulanması veya gerekmesine rağmen bir üst destek yerine bir alt kazı destek sınıfının uygulanması sonrası yaşanabilecek olumsuz deformasyonlar ve mükerrer imalatlar gibi yapım çalışmalarını olumsuz etkileyebilecek sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Tüm bu hususların doğru uygulanması, proje hattının geçeceği güzergah aşamasından kesin proje aşamasına kadar projenin aplike edileceği arazinin jeolojik modelin ortaya koyulmasına ve yapım aşamasındaki jeolojik şartlara göre yapım çalışmalarının doğru yönlendirilmesine bağlıdır.

	Adet	Uzunluk (M)	1 M Tünel Ortalama Proje Bedeli (TL)	Proje Bedeli (TL)
Trafiğe Açık Tüneller	226	200.000		-
Taahhüde Bağlanan Tüneller	101	143.000	20.983,37	3.000.622.410,50
Planlanan Tüneller	136	230.000	20.983,37	4.826.175.905,00
Genel Toplam	**463**	**573.000**		**7.826.798.315,50**

Tablo-2: KGM Yapımı Planlanan Tünellerin Toplam Proje Maliyetleri Varlıkları



Grafik-3: Tünel proje maliyetleri

Ülkemizde karayolu tünelciliğinin geliştirilmesi adına tünel paydaşlarının sektörel anlamda aşağıdaki katkıları sağlaması önemsenmelidir.

- Yapım çalışmaları devam eden tünellerde kazı sınıflaması ve destek tipinin seçilmesinde temel çalışma olarak KTŞ'de de yer alan **"Jeolojik Ayna Haritalarının Hazırlanması, Tünel Kayasının Mühendislik Jeolojisi Özelliklerinin Tespiti, Kaya Sınıflamaları (RMR ve Q) Ve Deformasyon Ölçümleri Yapılarak, Ödemeye Esas NATM Kazı Ve Destek Sınıfının Belirlenmesi"** işlemlerinde Müteahhit ve İdare adına iş mahallinde yeterli ve tünel konusunda uzman personel bulundurulması,
- Projeye ek olarak ve/veya şantiye ortamında onaylı projesinden farklı olarak yerinde Bölgesince uygulanan projelerin yer aldığı as-built projeler hazırlanarak ortaya çıkan problemler ve çözümüne yönelik data arşivlerinin oluşturulması, ortak çözümlerin paylaşılarak sağlanacak katkı ve faydaların karayolu tünelcilik uygulamalarına aktarımının sağlanmasının gerekliliği,
- **Tünel Giriş Yapıları**nın jeolojik modellerinin ortaya konulmasında detaylı etütlerinin her koşulda titizlikle yapılarak;
  - o Tünel giriş yapılarında minimum kazı yapılacak şekilde projelendirme çalışmalarının yapılması,

- Bu genel yaklaşım ve prensip esas alınarak;
  - Tünel giriş yapılarında plansal görünümde dairesel kazı planlaması şeklinde yeni bir geometrik yaklaşımın geliştirilerek, halen uygulanan köşeli tünel giriş girişleri şeklindeki tasarım arasındaki farkların gerekli yapısal tasarımlarla mukayese edilerek yeni projelendirme tekniklerinin geliştirilmesi,
  - Bu yönteme ilave olarak en üstten tabana doğru yapım imalatı **(Top-Down Yöntemi) ve iyileştirilmiş dolgu ile tünel giriş yapısının oluşturulması,**
  - Yukarıdaki sıralanan bu yaklaşımların tünel giriş yapısı şev ve tünel kaya/zemin etkileşimlerinin araştırılması, destekleme ve mali analizlerinin ortaya konulması konulu **Ar-Ge Çalışması** yapılması,

- Özellikle dünyada ilk olabilecek 4 şeritli tünel yapılarının projelendirme ve yapımının gündeme geldiği Teşkilatımızda, son yıllarda uluslararası bilimsel ve yapımcılık alanında büyük bilimsel ve teknolojik ilgi gören **Hücresel Kemer Tipi Tünel Giriş Yapısı ve Tünel Açma Yöntemi** ile geniş kazı kesitlerinin üretilebilmesi bu yapım teknoloji transferinin yapılması ve buna yönelik **Ar-Ge Çalışması** yapılması,

- Tüm bu hususların bir ***Tünel Projelendirme ve Yapım Metodolojisi Yönergesi*** şeklinde düzenlenmesi,

- Ülkemizde halen karayolu tünellerinde uygulanan ve KTŞ'de yer alan NATM Uygulamalı Tünel Teknik Şartnamesi esaslarının ülkemizde ve dünyada yapılan tünel proje ve yapım şartları ile karşılaştırılarak yeniden yorumlanmasına ve yeni metodolojilerin oluşturulması, bu anlamda AASHTO ve diğer standartlarda yer alan;
  - Kaya tünelciliği (Rock tunneling),
  - Zayıf zemin tünelciliği (Soft soil tunneling),
  - Aç-kapa yapıları (Cut and cover construction),
  - Batırma tünelleri (Water proffing tunnel-Immersed Tunnel),
  - Tünel delme makineleri (Tunneling Boring Machine - TBM),
  - Tam kesit ayna tünelciliği (Full face tunneling construction),
  - Hücresel kemer tipi tünel açma (Tunneling with circular cell method),
  - Ve bu metotların birlikte uygulandığı diğer özel tip tünel proje ve yapım metodolojilerinin teknoloji transferlerinin gerçekleştirilerek ülkemiz şartlarına uyarlanması gerekmektedir.

Teşkilatımız 2023 hedeflerine bağlı olarak yapım programında olan toplamda 373 km uzunluğundaki tünellerimizin proje ve yapım gerçekleşmelerinde; yapılan tüm bu değerlendirmeler, esaslar ve öneriler dahilinde yapım koşullarının belirlenerek ***karayolu tünelciliğinin bilimsel, teknik ve ekonomik gelişiminin dünya ölçeğinde daha ileri seviyelere ulaştırılmasının gerekliliği*** sonucu ortaya çıkmaktadır.



Ahmet ŞİRİN
1991 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden mezun olan ŞİRİN 1995 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 1998 yılında Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nde çalışmaya başlayan ve Karayolları Genel Müdürlüğü bünyesinde değişik görevlerde bulunan ŞİRİN halen KGM Ar-Ge Dairesi Başkanlığı'nda Jeolojik Hizmetler Şubesi Müdürü olarak görev yapmaktadır.

KARAYOLLARI TÜNELLERİNDE GÜVENLİK

Ahmet İrfan ÜNAL
Yüksel Proje-Emay-Chodai Ortak Girişimi

1. Giriş

Karayolu tünelleri aşılması güç dağlık alanların geçilmesi için inşaa edilen büyük sanat yapısıdır. Tünellerin güzergâhı kısaltması sonucu; konfor, güvenlik ve çevresel koruma tedbirleri sağlanır ve ulaşım büyük ölçüde rahatlar. Coğrafi yönden dağlık arazi yapısına sahip olan ülkemizde Kuzey-Güney akslarında açılan koridorlarla buradaki dağları aşmak için yeni ve daha uzun tünellerin yapımı artmakta ve bunun doğal sonucu olarak tünel güvenliğinin önemi ön plana çıkmaktadır.

İstatistiklere göre tünellerde kazalar daha az gerçekleşmesine rağmen, tüneller kapalı yapılar olması nedeniyle yeterli güvenlik tedbirleri alınmadığında kaza sonrası bir de yangın çıkarsa çok ciddi sonuçlarla karşılaşılmaktadır.

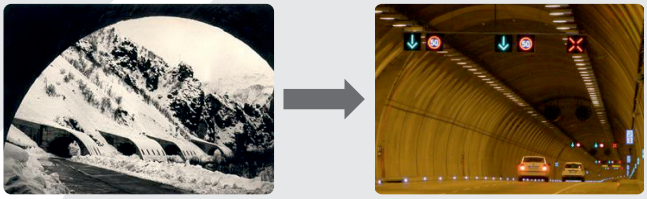
Karayolu tünellerinde minimum güvenlik kriterlerinin sağlanması, mevcut tünellerin eksiklerinin belirlenip bu kriterler doğrultusunda gerekli tedbirlerin alınması, yapılması planlanan tünellerin her aşamasında (proje, yapım, işletme) bu kriterlerin göz önünde bulundurulması önemlidir.



2. Türkiye'de Karayolu Tünellerinin Tarihçesi

Türkiye'deki tünellerin yapımı 1950'li yıllarda başlamıştır. Türkiye'de ilk tüneller mesafeyi kısaltıp ulaşımı kolaylaştırmak için değil daha çok doğal afetlerden (çığ, heyelan vb.) korunmak amaçlı inşa edilmiştir. Türkiye'de 1980'lerin sonlarında otoyolların yapımına hız verilmesiyle; tünel yapımında yeni ekipmanlar ve Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM) gibi yapım teknolojileri ile tanışılmıştır. Bu gelişmeler, Karayolları Genel Müdürlüğünü ve Türk müteahhitlerini yeni ve daha uzun tünellerin yapımı konusunda cesaretlendirmiştir. Otoyollarda çift tüplü tünellerin yapımı 1990'ların başlarında başlamış; son yıllarda otoyol tünellerinden elde edilen yapım teknikleri ve özellikle de elektromekanik sistemlerle ilgili bilgi ve tecrübe devlet ve il yollarına da aktarılmıştır.

2000'li yıllara girdiğimiz yıllarda 5 km ve üzerindeki tüneller üzerinde çalışılırken, 2010'lu yıllarda artık 10 km ile 15 km arasında değişen tüneller ihale edilmeye başlanmıştır.



İlk yapılan çığ tüneli ve günümüzde yapılmış tam donanımlı tünel örneği

3. Tünel Güvenliğini Etkileyen Faktörler

Altyapı

Tünel güvenliğini etkileyen altyapı önlemleri; tüp ve şerit sayısı, tünel geometrisi, aydınlatma, havalandırma, kaçış yolları ve acil çıkışlar, acil servisler için erişim, acil istasyonlar, acil güç kaynağı, cepler, drenaj, su temini, izleme sistemleri, haberleşme sistemleri, yol işaretleri, tünel kapatma ekipmanı, ekipmanın ateşe dayanıklılığı ve kontrol ünitesi olarak gruplandırılabilir. Altyapı önlemleri yapım esnasında gerektiği şekilde alınmadığı takdirde tünel işletmeye geçtiğinde telafisi zor durumlarla karşılaşılabilir.

İşletme

Tünel güvenliğinde bu maddelere ek olarak; tüneli işleten idare yetkili makamlarla (polis, itfaiye, ambulans) genel koordinasyon, acil durum planlaması, kaza ve olayların yönetimi, tünele alternatif güzergâhlar belirleme ve gerektiğinde yönlendirme, kontrol merkezinin faaliyetleri, tehlikeli maddelerin taşınması, taşıtlar arası mesafe ve hızın belirlenmesi gibi tünel işletme sürecindeyken de önlemler alınmalıdır.

Tünelde hem yapım hem de elektromekanik sistemlerin projelendirme aşamalarında, tünelin içinden geçecek trafik hacmi (yıllık ortalama günlük trafik,

tıkanma dönemlerinin süreleri ve sıklıkları vb.) projeksiyonları hesaplanmalıdır.

Ayrıca tünel kullanıcıları için bilgilendirme kampanyaları ve araç sahiplerinin aldığı tedbirler de (araçta yangın söndürücü bulunması gibi) tünel güvenliği açısından faydalı olacaktır. Görüldüğü gibi karayollarında tünel güvenliğinin sağlanması, altyapı önlemlerinin alınması yanında, güvenlik ekipmanlarının tesis edilmesinden, kamuoyunun bilinçlendirilmesine kadar çok geniş bir alanı kapsamaktadır.

4. Avrupa'da Karayolu Tünel Güvenliği

Avrupa'da meydana gelen karayolları tünellerinde oluşan kazalarda; Mont-Blanc'da 39, Tauern'de 12, Gotthard'da ise 11 insan hayatını yitirmiştir. Bu kazalar ve buna bağlı olarak yangınlar Avrupa'da tünel güvenliğinin yetersiz olduğunu gündeme getirmiştir. Avrupa Parlamentosu ve Konseyi 29 Nisan 2004 tarihinde **2004/54/EC** sayılı Direktifi ile **Trans-Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimlerini** belirlemiştir. Avrupa'da meydana gelen büyük tünel kazaları sonrası tünellerin onarımı ve yeniden güvenlik ekipmanlarının tesisi, daha sonra tünelin kapanmış olmasından kaynaklanan dolaylı maliyetler, çevresel zararlar ve tazminatlar Avrupa ekonomisini büyük ölçüde etkilemiştir.

Direktif kapsamına Trans-Avrupa Karayolu Ağı üzerindeki uzunluğu 500 metreden fazla olan tüneller girmektedir. Bu direktif proje safhasında, yapım aşamasında ve işletmeye açılmış olan tüm karayolu tünelleri için uygulanacaktır. Bu direktif, insan yaşamını, çevreyi ve tünel donanımlarını tehlikeye sokabilecek önemli olayların önlenmesi ve yanı sıra, kazalarda koruma sağlanması ile Trans-Avrupa Karayolu Ağındaki tünellerde minimum seviyede güvenlik temini hedeflemektedir.

Avrupa'da her tünelin farklı özellikler gösterdiği ülkeden ülkeye tünel güvenliğinin değiştiği görülmektedir. Genel olarak, AB Direktifinin yürürlüğe girmesi ile yeni yapılan tünellerde bu kriterlere uyulmuş, güvenliğin yetersiz kaldığı mevcut tünellerde ise bu kriterlere bağlı olarak iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

5. Türkiye'de Karayolu Tünel Güvenliği

Türkiye'nin son yıllarda uzun tünellerin yapımına ağırlık vermesi, Tünel Güvenliği konusundaki çalışmaların da önemini artırmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğünün bu konuyla ilgili iki çalışması mevcuttur. Referans alınabilecek bu iki çalışmadan biri, 'Tünel İşletme Ve Bakımı Hakkında Yönetmelik Tasarısı', diğeri ise 'Tünellerin Asgari Güvenlik Gereksinimlerine İlişkin Proje Kriterlerinin Belirlenmesi İle İlgili Komisyon Raporu'dur.

07.09.2004 tarihinde Karayolları Genel Müdürlüğünde çalışmalarına başlayan çok disiplinli komisyon dünyada bu uygulamalarda rehber olarak kullanılan;

- Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 29.04.2004 tarih ve 2004/54/EC sayılı Trans-Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri İçin Minimum Güvenlik Gereksinimleri,
- Tüneller İçin Acil Durum Tesisleri Şartnamesi (Japonya, 1997),
- UNECE-Karayolu Tünelleri Uzmanlar Grubu'nun Tavsiyeleri Nihai Rapor (TRANS/AC.7/9, 2001),
- PIARC Tünellerde Yol Güvenliği (1995),
- Avusturya Planlama Kılavuzu (RVS.9.281, RVS.9.282, RVS.9.261, RVS.9.262),
- CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu) kaynaklarını incelemiştir.

Karayolu Ağı Tünelleri için Minimum Güvenlik Gereksinimlerinin altyapı önlemleri bakımından esas alınmasına karar verilmiştir. Bu belgede yer almayan hususlar için yukarıdaki diğer standartların ilgili hükümlerinin uygulanması kararı da alınmıştır. Bu direktifin uygulanması ile yeni yapılmış veya yapılacak olan tünellerde güvenliğin artması beklenmektedir. KGM'nin 08.03.2005 tarihli Tünellerin Asgari Güvenlik Gereksinimlerine İlişkin Proje Kriterlerinin Belirlenmesiyle İlgili Komisyon Raporu bir Genelge olarak tüm Bölgelere ve Teknik Daire Başkanlık'larına gönderilmiştir.



Selâtin Tüneli (3.043 m) – İzmir-Aydın Otoyolu

6. Sonuç ve Öneriler

Büyük tünel kazaları sonucunda insan kaybı yaşanabilir, buna ek olarak ulaşımdaki uzun vadeli aksaklıklar ve ekonomik kayıplar ülkeleri olumsuz yönde

etkileyebilir. Bu konuyla ilgili Avrupa'da tünel güvenliği üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve son olarak da Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin onayladığı **2004/54/EC Sayılı 29 Nisan 2004 tarihli Trans-Avrupa Karayolu Ağı Üzerindeki Tüneller için Minimum Güvenlik Gereksinimleri Direktifi** Avrupa Resmi Gazetesinde yayımlanmıştır. Avrupa'daki bu gelişmeler, Avrupa Birliği müktesebat çalışmalarında ortak ulaştırma politikası kapsamında tünel güvenliğinin mevzuata girmesi ve Türkiye'de uzun tünellerin sayısının artması tünel güvenliği çalışmalarını daha da önemli hale getirmiştir. Bundan sonra atılacak adım Avrupa Birliği Direktifi ile Türkiye'de hazırlanan genelgenin farklılıkları ve eksikliklerinin biran önce belirlenip teknik çalışmanın bitirilmesidir.

Tünel projeleri, minimum güvenlik gereksinimlerine uygun bir şekilde yapılmalı ve bunun yanı sıra gerek yapımı gerekse bakım ve işletme masrafları ülke bütçesi düşünülerek en uygun düzeyde sağlanmalıdır. Bunun için tünellerin yapım aşamasından önce ilgili Genelge'ye göre sınıflandırması belirlenmelidir. Karayolu tünelleri içinde olası doğal afet, yangın, sabotaj veya ağır trafik kazalarında oluşacak hasarları azaltmak için Acil Durum Tesisleri tasarlanmalıdır. Ayrıca kritik tüneller için Risk Analizi yapılmalıdır. Tünelin inşa ve elektromekanik sistem çalışmalarının bir arada yapılması tünel güvenliğini olumlu yönde etkileyeceği gibi yapım ve işletim maliyetlerinin de önemli oranda azalmasını sağlayacaktır. Bütün bu güvenlik şartlarının sağlanması ve tünel kullanıcıları için bilgilendirme kampanyaları düzenlenmelidir. Gerek yurt içinde gerekse yurt dışında teknolojik yenilikleri takip ederek tünel güvenliği kriterleri devamlı güncel tutulmalıdır.

Avrupa Birliği'nde ve Türkiye'de malların değişimi ve insanların güvenle seyahat etmesi ekonomik gelişme ve medeniyet için temel faktördür. Bu mümkün olan en iyi koşullarda güvenli trafik akışını tünellerimizde gerçekleştirmekle mümkündür. Son 20 yıl içerisinde Türkiye'de özellikle karayolu tünellerinin sayısının hızla artması ve ilk defa uluslararası olarak İstanbul'da gerçekleştirilen 10. Ulaştırma Şurasında; 2023 yılına kadar Karayolları Genel Müdürlüğü hedefleri arasında uzun tüneller inşaa ederek Kuzey-Güney koridorlarının oluşturulması hedeflenmiştir. Bu hedef tünellerin işlevlerini ve tünel güvenliğinin önemini daha da önemli hale getirecektir. Bu nedenle karayolu tünellerinde çalışanlar görevlerinin önemini bilerek, güvenlik önlemlerini uluslararası standartlarda gerçekleştirmeye çalışmalıdır.

Kaynaklar:

1. *Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, (2004) Trans-Avrupa Karayolu Ağı Üzerindeki Tüneller İçin Minimum Güvenlik Gereksinimi Direktifi.*
2. *İrfan ÜNAL, (2004) 1. Avrupa Yol Kongresi, Lizbon/Portekiz, "Türkiye Karayolu Tünelleri ve Tünel Güvenliği için Acil Durum Tesisleri".*
3. *İrfan ÜNAL, (2005) 15. Uluslararası Yol Federasyonu (IRF), Dünya Toplantısı, Bangkok/Tayland, "Karayolu Tünel Güvenliği için Acil Durum Tesisleri".*
4. *İrfan ÜNAL, (2006) Avrupa Toplulukları Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATAUM), AB Uzmanlık Tezi, "AB Tünel Güvenlik Direktiflerinin Türkiye'de Uygulanması".*
5. *İrfan ÜNAL, (2008/146) Yapı Dünyası Dergisi, "Karayolu Tünel Güvenlik Kriterleri".*
6. *İrfan ÜNAL, (2010/166) Yapı Dünyası Dergisi, "Karayolu Tünel Güvenliği Çalışma Ziyareti (Mont-Blanc Tüneli)".*
7. *İrfan ÜNAL, (2011) 2. Karayolu Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, "AB Mevzuatında Karayolu Tünel Güvenliği".*
8. *"Avrupa Birliğine Katılım Sürecinde Karayolları Genel Müdürlüğü" Yönetmelik Taslağı (KGM) / Mart 2012*



Ahmet İrfan ÜNAL

1986 yılında inşaat mühendisliği lisans ve 2002 yılında lisansüstü eğitimini tamamlayan ÜNAL 1986-1991 yılları arasında özel sektörde çalışmıştır. 1994 yılında naklen atandığı Karayolları Genel Müdürlüğü'nde değişik görevlerde çalışan ÜNAL Mart 2014 tarihinde emekli olmuştur. ÜNAL halen Gebze-Orhangazi-İzmir Otoyolu Kontrol Teşkilatında (Yüksel Proje-Emay-Chodai İş Ortaklığı) Başmühendis olarak görev yapmaktadır.

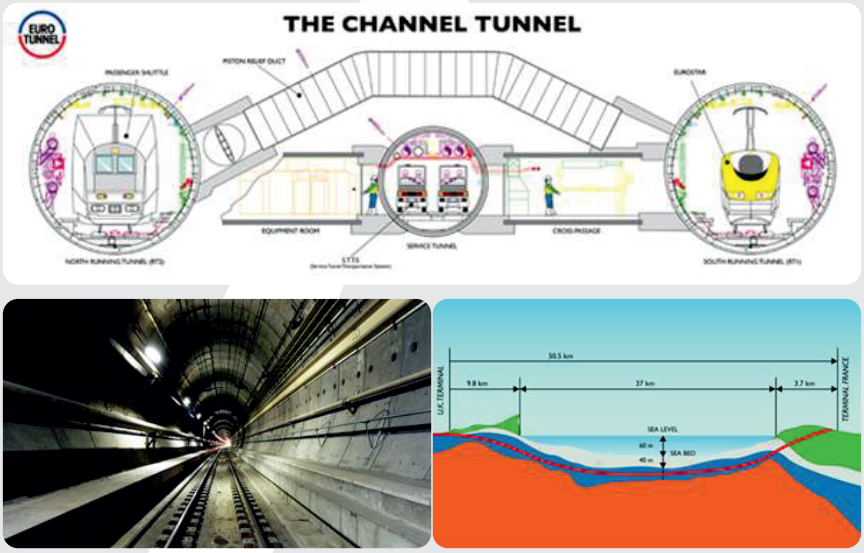
DÜNDEN BUGÜNE TÜNEL ÖRNEKLERİ



Eupalinos Tüneli
http://platos-academy.com/tunnel-of-eupalinos/



Derinkuyu Yeraltı Şehri
http://www.muze.gov.tr/tr/muzeler/derinkuyu-yeralti-sehri



Manş (Channel) Tüneli
http://www.eurotunnelgroup.com/uk/the-channel-tunnel/infrastructure/



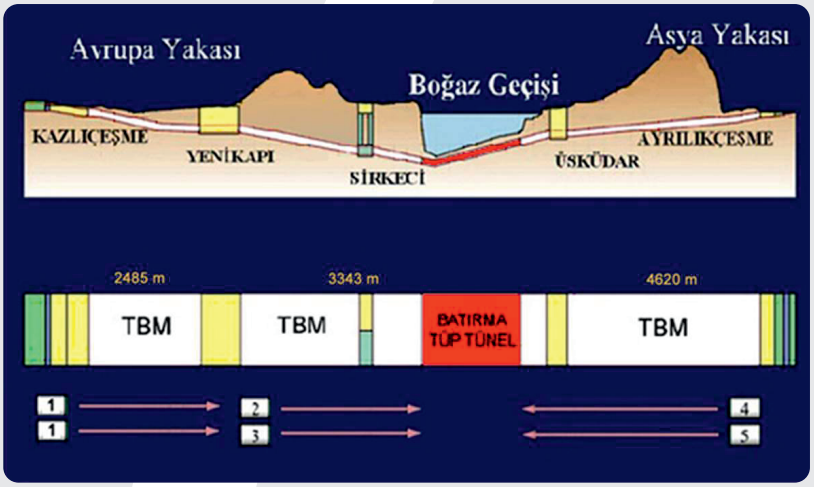
Selatin Tüneli



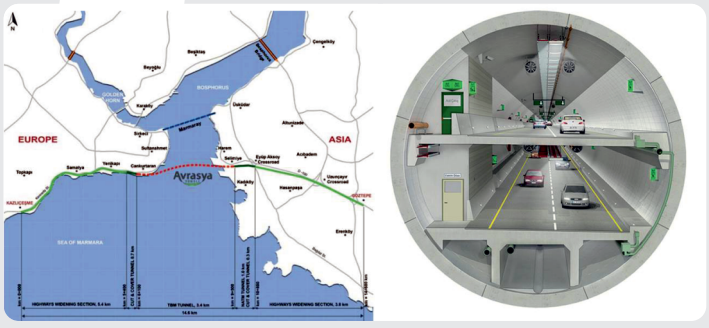
Ordu Nefise Akçelik Tüneli



Kuzey Marmara Otoyolu Çamlık ve Riva Tünelleri



Marmaray Projesi
http://www.marmaray.gov.tr/icerik/marmaray/Marmaray-Teknik-%C3%96zellikleri/56



Avrasya Tüneli
http://www.avrasyatuneli.com/tr/basin-odasi/foto-galeri





TOPLANTI TAKVİMİ

Ulusal/Uluslararası Toplantı Duyuruları:

13-15 Ekim 2014	**14th International Congress "Tunnels and Underground Space Risks and Opportunities"** Lyon / France http://www.congres.aftes.asso.fr/en/content/invitation
17-19 Kasım 2014	**1st IRF Asia Regional Congress & Exhibition** Bali / Indonesia http://www.irfnews.org/event/1st-asia-regional-congress/
25-27 Kasım 2014	**Karayolu 3. Ulusal Kongresi** Ankara www.kuk2014.org

YTMK Bülteni yazım esaslarına web sitemizden ulaşılabilir.