



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
VAN MESLEK YÜKSEKOKULU
İNŞAAT BÖLÜMÜ

**TÜNEL YAPILARI VE NATM KUSKUNKIRAN TÜNEL ÖRNEĞİ DERS
NOTU**

Hazırlayan
Öğr. Gör. Fırat KIPÇAK

Mayıs-2022

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER DİZİNİ.....	3
TABLolar DİZİNİ	3
1. GİRİŞ	5
2. MÜHENDİSLİKTE TÜNELLER	6
2.1 Tünelciliğin Tarihi.....	6
2.2. Tünel Açma Yöntemleri.....	8
2.3. Tünel Açılmasının Amaçları	8
2.4. Tünellerin Ulaşımındaki Yeri.....	8
2.5. Tünel Galeri Tanımı	9
2.6. Tünelcilikte Maliyeti Etkileyen Temel Etkenler	10
3. TÜNEL JEOLojİSİ ÇALIŞMALARI.....	11
3.1. Tünel Güzergâhının Belirlenmesi Yönelik Çalışmalar	11
3.2. Ayrıntılı Jeolojik Araştırmalar	11
3.3. Jeoteknik Ölçümler.....	11
3.3.1. Tüneller için yapılan ölçümler.....	11
3.3.2. Sondaj kazısı ölçümleri.....	11
3.3.3. Teodolit ile lazer ölçümler.....	11
3.3.4. Mikrotremör ölçümleri	11
3.3.5. Çubuk Ekstansometreler.....	11
3.3.6. Tünel içi konverjans ve opto-trigonometrik ölçümler	12
3.3.7. Zemin sıkışma ve oturma ölçümleri	12
3.3.8. Ankraj ve kaya bulonu yük hücreleri.....	12
3.3.9. Ölçümlerin değerlendirilmesi	12
4. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ VE ZEMİN İLİŞKİSİ	13
4.1. Kaya Türü veya Kötü Zeminlerde Tünel Açma Yöntemleri.....	13
4.1.1. Kazı profilinin tanımı	14
4.2. Tünel İnşaatı Prensibi.....	14
4.2.1. Kemerlenme.....	14
4.2.2. Aşırı sökülme.....	15
4.2.3. Kaya çökmeleri.....	16
5. TÜNELLERDE SU, ISI VE GAZ SORUNU.....	17
5.1. Su Sorunu	17
5.2. Isı Sorunu	17
5.3. Gaz Sorunu	17
5.4. Fayların Tünel Kazısına Etkisi	17
5.5. Tipik Tünel En Kesitleri.....	18

6. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM-NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)	19
6.1. Genel Olarak NATM Yöntemi.....	19
6.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) Ana İlkeleri	19
6.3. NATM Tünel Kazı Destek Tipleri	20
6.4. Tünellerde Kazı ve Destekleme Çalışmaları	20
6.5. Kaya Sınıflandırma Sistemi.....	20
6.5.1. Tünel Bulon Uygulaması.....	24
6.6. Çelik Hasır Montajı	25
6.7. İksa Montajı.....	25
6.8. Püskürtme Betonu Uygulaması	26
6.9. Kaya Bulon Uygulaması	26
6.9.1. Enjeksiyonlu kaya bulonu.....	27
6.9.2. Süper Swellex kaya bulonu	27
6.9.3. IBO-kaya bulonu	27
6.10. Süren Uygulaması	27
6.11. Alt Yarı Kazı ve Destek Sistemi	28
6.12. Geçici ve Kalıcı Önlemler ve Destekler	28
6.13.1. Tünel kontrolleri	28
6.14. Beton Üretim, Döküm, Nakliye ve Kalıp Yöntemi.....	29
7. VAN-TATVAN (BİTLİS) ARASI KUSKUNKIRAN TÜNELİ	30
7.1. Genel Tanım ve Kapsam	30
7.2. Güzergâh Tanımı	30
7.3. Tünel Güzergahında Yer Alan Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri	30
7.3.1. Grafit ve Klorit şistlerin mühendislik özellikleri	31
7.3.2. Metakumtaşının mühendislik özellikleri	31
7.3.3. Metakoglomera mühendislik özellikleri	32
7.4. Zemin Parametreleri	32
7.4.1. Kaya sınıflandırmaları	33
7.5. Kazı Sırasında Jeolojik Harita Alımı.....	34
7.6. Destek Tipleri	34
7.6.1. B2 Destek türü	34
7.6.2. B3 Destek türü	34
8. KUSKUNKIRAN TÜNELİ YAPIM AŞAMASI EK FOTOĞRAFLAR.....	34
KAYNAKLAR	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CSIR	Eklemli kaya kütlelerinin Joe mekanik sınıflandırılması (RMR)
NGI (Q)	Tünel destekleme tasarımı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflandırılması
RQD	Kaya kalitesi tanımlaması
SRF	Gerilim azaltma faktörü
NATM	New Austrian Tunneling Method
RMR	Rock Mass Rating
RSR	Rock Structure Rating
TBM	Tunnel Boring Machine
GSI	Geological Strength Index
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 İlk TBM makinesi (Arioğlu, 2009).....	7
Şekil 2.2 Tünel açma yöntemlerinin sınıflandırılması.	8
Şekil 2.3 Tünel ve zeminin karakteristik kısımları.	10
Şekil 2.4 Tünel kısımları ve tanımı.	10
Şekil 4.1 Yeraltı kazılarında oluşan gerilme zonları. (Arioğlu, 2009).....	14
Şekil 4.2 Kazı profili, deformasyon ve yapım toleransı (KTŞ 2013).	14
Şekil 4.3 Yeraltı kazılarında oluşan çeşitli bölgeler (Arioğlu, 2009 değiştirilmiş).	15
Şekil 4.4 Değişik kazı kesitlerinde gerilme dağılımları.	15
Şekil 4.5 Aşırı Sökülme (KTŞ 2013).	16
Şekil 5.1 Fay doğrultuları ve fayların tünele etkisi (Ersoy, 2021).	17
Şekil 6.1 NATM Kazı Aşamaları.....	19
Şekil 6.2 A1, A2, A3 ve A4 tipi iksa destek sistemlerinin kesit görünümü (Uğurel, 2010).....	24
Şekil 6.3 A1, A2 ve A3 bulon dizilimi (Bozkurt, 1987).	25
Şekil 6.4 İksalar destek yoğunluğu (Fenner – Pacher eğrisi).....	26
Şekil 6.5 Bulon uygulaması.	27
Şekil 6.6 Süren uygulaması.....	28
Şekil 7.1 Çalışma alanının bulunduğu harita (mta.gov.tr).	30
Şekil 7.2 Kuskunkıran tünel bölgesinin genel jeolojik haritası (mta.gov.tr).	31
Şekil 7.3 Kuskunkıran tüneli kaya sınıflandırmaları (NATM) (KGM'den alınmıştır).....	32
Şekil 8.1 Kalıp aşamasında tünel portalı girişi.	35
Şekil 8.2 Tünel portalı girişi.	35
Şekil 8.3 Kazı aynası ve sürenler.	36
Şekil 8.4 Betonu dökülmüş tünel içi.	36

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1 Önemli tüneller ve yapılış yılları.	7
Tablo 2.2 Tünel yapılarının ulaşımındaki yeri.	9
Tablo 5.1 Tipik tünel kesitleri.....	18
Tablo 6.1 Kazı destek tipleri (KTŞ 2013).....	20
Tablo 6.2 Kaya sınıflandırma sistemi (KTŞ 2013).	21

Tablo 6.3 Kaya sınıfları ve özellikleri (KTŞ 2013).	21
Tablo 6.4 Destek Sınıfları (KTŞ 2013).	22
Tablo 6.5 Farklı kesit tiplerine göre işban adedi (KTŞ 2013).	25
Tablo 6.6 Püskürtme betonun karışım miktarı (KTŞ 2013).	26
Tablo 6.7 Püskürtme beton mukavemet değerleri (KTŞ 2013).	26
Tablo 7.1 Zemin parametreleri (Ensari, 2008).	32
Tablo 7.2 Kullanılan malzeme özellikleri (KGM’ den alınmıştır).	33

1. GİRİŞ

Bu ders notu kapsamında tünellerin tarihi, tünellerin açma yöntemleri, yapım aşamaları ve bunların kuralları anlatılmıştır. Türkiye’de oldukça kullanılan TBM yöntemi ve “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi” olan NATM (New Austrian Tunnel Boring Machine) yöntemi ele alınmış ve bunların yapım kuralları ile detayları işlenmiştir. Türkiye’de demiryollarından çok karayolu tünelleri yapılmakta ve bunun için uygulanan kesit özellikleri ve tünellerin açma yöntemleri de değişmektedir. Tünellerin açma yöntemlerinde sağlam zeminin bulunduğu yerlerde daha çok TBM makinesi diğer adıyla köstebek kullanılırken kötü zeminlerde NATM yöntemi kullanılmaktadır. Ders kapsamında NATM yöntemine örnek oluşturacak Van-Tatvan (Bitlis) arasında yapılmış olan Kuskunkıran Tünelinin özellikleri verilmiştir. Oldukça yoğun bir şekilde kullanılan bu yolun yanal genişliği yaklaşık 20m uzunluğu ise 170km’den oluşmaktadır. Ayrıca bu yol üzerinde 2234km’lik Kuskuskunkıran geçidi bulunmaktadır. Artan trafik yoğunluğu ile geçit trafikte aksaklığa neden olmuştur. Ayrıca mevcut yol bölgenin iklim koşullarından dolayı sürekli bakım çalışmalarını zorunlu kılmıştır. Bu aksaklığın giderilmesi ve yolun kalkındırılması için karayolları tarafından tüneller yapılmıştır. Geçit üzerinde yapılan Kuskunkıran Tüneli bu olumsuzlukları ortadan kaldırmış. 2234m rakımın geçildiği 9+500km’lik eski güzergâha alternatif bir yol açılarak 3+612km uzunluklu yüksek standartlı yol yapılmıştır. Bu tünellerin açılması ile Kuskunkıran Geçidi yaklaşık 6+000km kısaltılmış ve yolun geçiş süresi ortalama 30 dakikadan 5 dakikaya indirgenmiştir.

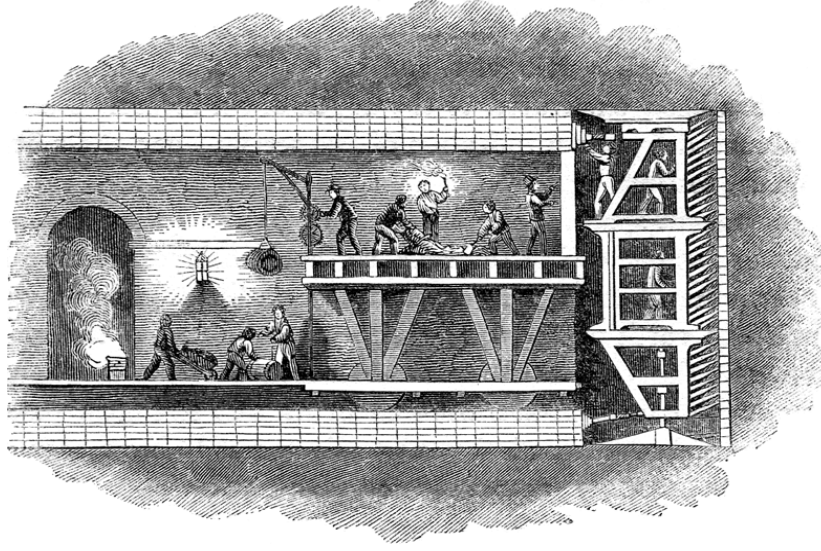
2. MÜHENDİSLİKTE TÜNELLER

2.1 Tünelciliğin Tarihi

Yeraltında yapılacak kazı ile istenilen boyutta boşluk oluşturulması ve boşluğun desteklenmesiyle inşa edilen yer altı yapısına tünel denir. Geçici şevler oluşturarak yapının inşa edilmesi, üzerinin ve yanlarının doldurulması şeklinde yapılan yapılar aç kapa tüneli olarak tanımlanır. Doğada, insan yapısı olmayan pek çok mağara ve galeri bulunmaktadır. Bunlar yer altı sularının dolması ve doldurduğu yeri terk etmesi, fay kırıklarının olması, depremlerle boşlukların oluşması gibi etkilerden oluşabilmektedir. Türkiye’de özellikle karstik kayaçların bulunduğu Akdeniz bölgesinde mağara ve galeri boşlukları zamanla daha kolay oluşmuştur. Ülkemizde derinliği 20m’yi bulan Ürnlü-Düden suyu mağarası, akarsuların açtığı galeri ve mağaralara güzel bir örnektir. Ayrıca Kapadokya’da bulunan mağara yapıları, Alanya’daki Damlataş Mağarası, Burdur’daki İnsuyu Mağarası, Mersin Silifke’deki Cennet Cehennem Mağaraları ülkemizin önemli mağaralarıdır. Dünyada ise ABD’de Mamut ve Jewel Mağaraları, Vietnam’da Son Doong Mağarası, Çin’de Reed Flute Mağarası gibi uzun ve büyük mağaralar bulunmaktadır. İlk insanlar yaşamlarını sürdürebilmek için galeri ve mağaraları uygun hale getirerek kullanmışlardır. Doğal mağara veya galeri boşluklarının bulunmadığı yerlerde ilkel aletler ve yöntemlerle mağara türü oyuklar açarak kendilerine yaşam alanları yaratmışlardır. İnsanların yer altı yapıları yaparak birtakım amaçlar içine girmeleri zemin ile olan bilgilerini arttırmış ve bu işte uzman kişilerin yetişmesine olanak sağlamıştır.

Mısır, Mesa Verde Uçurum Sarayı/ABD, Ellora Mağaraları/Hindistan, Guyaju/Maijishan Mağaraları/Çin, Derin kuyu yeraltı şehri/Türkiye gibi birçok eski uygarlıktan kalma yeraltı mağara şehirleri bulunmaktadır. Özellikle Mısır ve Romalılar daha çok su taşımak ve maden ocağı açmak amacı ile tünel ve galeriler açmışlardır. Mısırlılar dini amaçlı tüneller açarken Romalılar su taşıma amaçlı tüller açmışlardır. En eski dönemlere nazaran Romalıların Avrupa’da açtığı tüneller Afrika’dakilere göre çok daha iyi niteliklerdedir. Romalılar Avrupa ve Afrika’da şehirlere su taşımak amacıyla tüneller inşa etmişlerdir. Son yüzyıllarda tünel açma yöntemlerindeki en önemli gelişmelerden biri olan Fransız mühendis Marc Brunel tarafından, 1825 ve 1841 yılları arasında yapılan Rotherhithe’de Thames nehrinin altındaki ilk sualtı tünelidir. Brunel, bu tünelin yapımında özel bir tünel kazıcı aracı geliştirmiştir. Brunel’in ahşaplar yardımıyla geliştirdiği kazı aracı parça parça delerek ilerlediğinden bugünün TBM makinelerinin atası sayılmaktadır. Şekil 1.1’de ilk TBM makinesi görülmektedir.

Karayolu ve demiryolu ağlarının gelişmesi ile daha gelişmiş uzun tüneller inşa edilmeye başlanmıştır. Demiryolu hatlarında eğimlerin küçük olması ve kurp yarı çaplarının büyük olması gerektiğinden birçok dağlık bölgenin geçilmesi için demiryolu tünelleri inşa edilmiştir. Böylece teknolojik ve bilimsel gelişmelerdeki ilerleme ile tünel açma metotları ve makineleri zamanla geliştirilmiştir. Dünyaca ünlü Gotthard Base Tüneli/İsviçre, Eisenhower Tüneli/ABD, Manş Tüneli/İngiltere-Fransa, Laerdal Tüneli/Norveç tünelleri dağlık bölgede inşa edilmiş karayolu veya demiryolu tünellerine örnek gösterilebilir. Türkiye’de ise son yıllarda tünel yapıları ciddi önem kazanmış ve gelişmiştir. Türkiye’deki tünellere örnek olarak Toros tünelleri, Ayrar demiryolu tüneli, Soğucak tüneli (1912), Nefise Açelik tüneli 3825m (2007), Nurdağı tüneli 9950m (2021), Ovit dağı tüneli 14346m (2018), Yeni Zigana tüneli 14481m (2022) ve Avrasya tüneli 14600m (2016) gibi önemli tüneller gösterilebilir. Tablo 2.1’de ahşap iskele ile kurulan ilk tünel kazma aracı verilmiştir. Tablo 2.2’de ise önemli tüneller ve yapılış yılları gösterilmiştir.



Şekil 2.1 İlk TBM makinesi (Arioğlu, 2009).

Tablo 2.1 Önemli tüneller ve yapılış yılları.

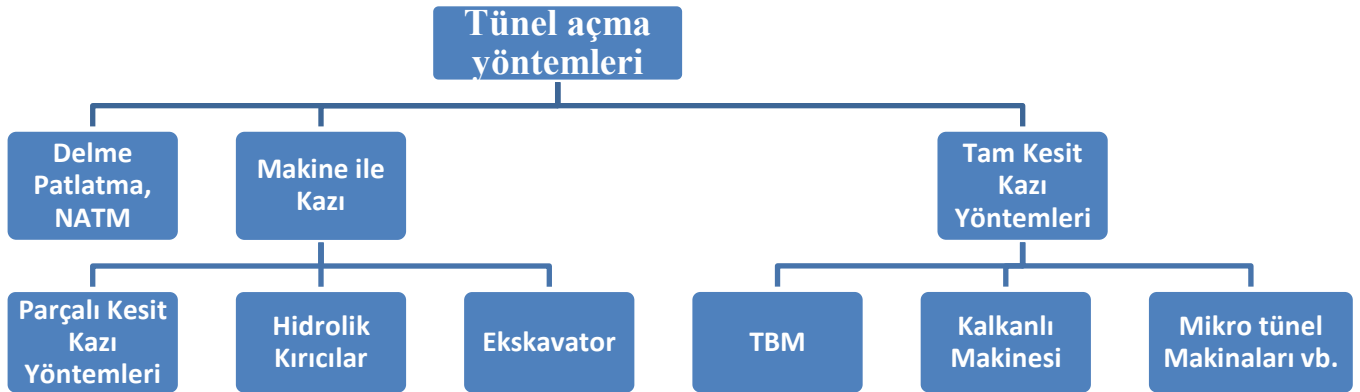
Tünel Adı	Uzunluk	Yıl
En önemli tüneller		
Gotthard Base (İsviçre)	57km	2016
Manş Tüneli (İngiltere-Fransa)	38km	1994
Avrasya Tüneli (Türkiye)	14.6km	2016
Laerdal Tüneli (Norveç)	24.5km	2000
Seikan Tüneli (Japonya)	53.8km	1988
Euro Tünel (Fransa-İngiltere)	51km	1994
Lotschberg (İsviçre)	14.6km	1913
Chahun Nanshan tüneli (Japonya)	18km	2007
Hsuehshan tüneli (Tayvan)	13km	2006
Arlberg tüneli (Avusturya)	10.2km	1978
Tunel De Guadarrama (İspanya)	28.4km	2007
En uzun tüneller		
Şanghay (Çin)	588km	1995-
Pekin (Çin)	554km	1969-
Londra (B. Krallık)	402km	1863-
New York (ABD)	375km	1870-
Moskova (Rusya)	333km	1935-
Seul (G. Kore)	331km	1974-
Tokyo (Japonya)	304km	1927-
Paris (Fransa)	214km	1900-

Son yüz yılda tünel yapıları alanında yapılan gelişmeler ile kazı, destek sistemi ve çalışma koşulları iyileştirilerek teknolojik aletler kullanılmaya başlandı. Kazı alanında yapılan gelişmeler ile ekipmanlar geliştirildi, patlatma yöntemleri ve kazı makineleri test edilerek en etkili ve ucuz yöntem tercih edilir oldu. Günümüzde kazı alanında enerjinin doğru kullanılması ile daha kısa sürede tüneller inşa edilmektedir. Jeoloji, jeofizik ve inşaat mühendisliğindeki gelişmeler tünel içi destek sistemlerindeki teknolojiyi arttırarak hasır çelik, çelik iksalar, bulonlar ve püskürtme beton gibi malzemelerin kullanımına olanak verdi. Havalandırma sistemlerinin, yer altı sularının dışarı atılması, ışıklandırma gibi sistemlerin gelişmesi ile tünel yapım çalışma koşulları iyileştirilmiş ve tünel yapım süresini azaltmıştır.

2.2. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel inşaatı tünelin açıldığı zemin cinsine, araç-gereç imkanına bağlı olarak çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Tünel inşaatı temelde 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar: kazı aşaması, destek sistemi aşaması ve son olarak kaplama aşamasıdır. Bu üç aşama bir arada yapılacağı gibi parçalı olarakta yapılmaktadır. Tünel açma yöntemleri, kazının yapılış şekline ilerleyişine göre üçe ayrılır. Bunlar delme-patlatma, makine ile kazı ve tam kesit kazı yöntemleridir. Teknolojik gelişmeler ile artan tüneller yöntemleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Şekil 2.2 Tünel açma yöntemlerinin sınıflandırılması.



2.3. Tünel Açılmasının Amaçları

Tüneller eski zamanlarda yerleşim yeri oluşturmak, su taşımak veya sığınak oluşturmak için inşa edilmekteydi. Günümüzde çoğunlukla bir engeli geçmek, ulaşımı sağlamak, su taşımak veya askeri amaçlı inşa edilmektedir. Özellikle şehirlerin büyümesiyle ulaşım alanında yaşanan aksaklıkların karşılanması amacıyla kent içi raylı ulaşım tünelleri gelişim göstermiştir. Aynı şekilde karayolu ulaşımı içinde önemli bir yapı türü olarak inşa edilmektedir. Kentsel altyapı ve iletişimi karşılamak için aç-kapa tünel yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yer altı maden yataklarının işlenmesi amacıyla tünel sistemleri yüzyıllardan beri kullanılmaktadır. Su alanında (temiz su taşımak, akarsu yatağını değiştirmek, atık suları toplamak vs.) tünel sistemleri de kullanılmaktadır. Ayrıca askeri amaçlı malzeme depoları veya sığınak gibi yapılarda inşa edilmektedir.

2.4. Tünellerin Ulaşımındaki Yeri

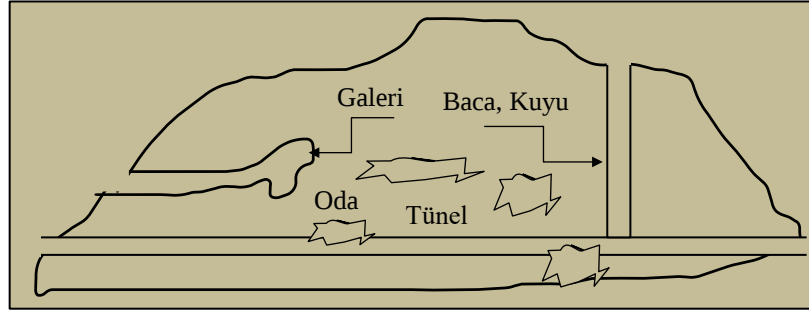
Tünel yapıları amaçlarına göre inşa edilmekte ve insanlığın ihtiyacını karşılamaktadır. Karayolu tüneli tepe veya dağ gibi bir engeli geçmek için kullanıldığında yol süresini azaltmakta ve ulaşım konforunu arttırmaktadır. Demiryolu tünelleri ise raylı ulaşımın küçük çaplı kurplarla yapılamayacağından çoğu zaman gerektiğinden yapılmaktadır. Ayrıca heyelan, çığ veya kapanma olabilecek demiryolu üzerlerinde yine tünel türü yapılar yapılmaktadır. Su iletimi amacına göre genellikle dairesel veya daireye yakın tünel kesiti tercih edilerek yapılır. Şekil 2.3’te tünel yapılarına örnek görseller verilmiştir.

Tablo 2.2 Tünel yapılarının ulaşımındaki yeri.

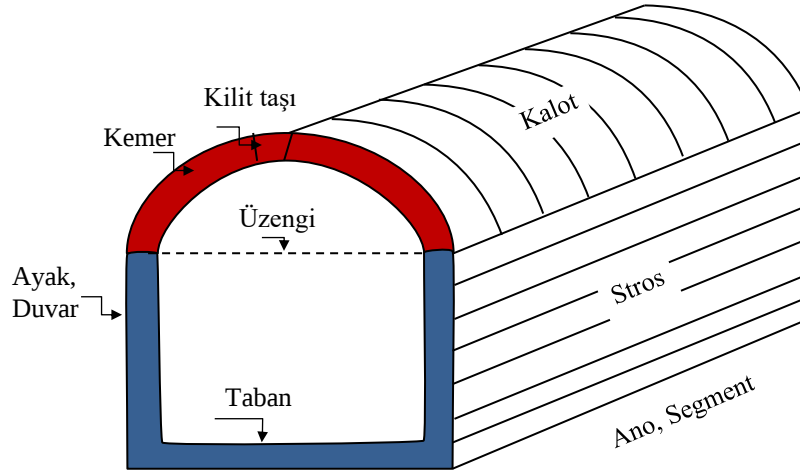
	
Karayolu Tüneli	Demiryolu Tüneli
	
Metro Tüneli	Geçit Tüneli
	
Su İletim Tüneli	Maden Ocağı Tüneli

2.5. Tünel Galerisi Tanımı

Giriş ve çıkış kısmı bulunan açık yeraltı kazılarına tünel, giriş kısmı olup çıkış kısmı olmayan tek uçlu yer altı kazıları veya boşluklarına ise galeri denir. Galeriler veya tüneller doğal olacağı gibi yapayda oluşturulabilmektedir. Tünel yapımı sırasında bazı yerlerde galeri boşluklarına da rastlanmaktadır. Tünel ve galeriler eski uygarlıklarda su iletimi veya askeri amaçlı açılmıştır. Günümüzde tünellerin açılma amaçları bölüm 2.3'te açıklanmıştır. Galeriler boşlukları ise günümüzde su tutma veya askeri amaçlı açılabilir. Şekil 2.3'te tünel, galeri boşluklarına ait görsel verilmektedir.



Şekil 2.3 Tünel ve zeminin karakteristik kısımları.



Şekil 2.4 Tünel kısımları ve tanımı.

2.6. Tünelcilikte Maliyeti Etkileyen Temel Etkenler

Tünel maliyetini tünel açmada kullanılan yöntem, tünelin uzunluğu, tünel jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, destek sistemi, işçilik, kullanılan makineler gibi birçok faktör etkilemektedir. Bu verilerin doğru olarak araştırılması ve saptanması çok önemlidir. İşin süresi, proje ve güzergâhın değiştirilmesi, jeolojik çalışmalar ve yapılan deneyler gibi etkenlerin tümü maliyeti doğrudan etkilemektedir. Ayrıca tünel açılacak yerin kayaç türü, kayaç tabaka durumları, kalınlıkları ve fiziki yapıları; yeraltı su durumu, kimyasal etkileri; tünel yapım sırasında karşılaşılabilecek doğal olaylar; fay hatlarının bulunması ve fayların aktif, pasif durumları gibi etkenlerde tünel yapım maliyetini etkilemektedir. Durumlar ne kadar kötü olursa tünel yapımı için harcanan malzeme, işçilik ve zaman o kadar artar ve bu da maliyeti arttırır. Örneğin kötü zeminlerde destek sistemleri artarken kayalık zeminlerde daha seyrek destek sistemleri kullanılmakta ve daha az maliyetle tünel yapılmaktadır. Bir diğer örnek bir tüp açılmış bir doğrultuda zemin özellikleri ve proje işlemleri bilindiğinden ve tecrübe arttığından hemen yanına yapılacak ikinci tüp daha hızlı ve daha ucuza yapılmaktadır.

3. TÜNEL JEOLJİSİ ÇALIşMALARI

3.1. Tünel Güzergâhının Belirlenmesi Yönelik Çalışmalar

Tünel yapımı zemin ortamında yapıldığından zemin mhendisliğı çalışmalarını zorunlu kılmaktadır. Zeminle ilgili özelliklerin belirlenmesinde jeoloji ve jeofizik mühendisliğinden yararlanılır. Zeminin litolojik, yapısal, tabaka kalınlığı, taşıma gücü parametreleri, hidrojeolojik özellikleriyle birlikte zeminde su, ısı ve gaz sorunu için yapılan çalışmalar tünel yapımı için gerekli parametrelerdir.

3.2. Ayrıntılı Jeolojik Araştırmalar

Yeraltı jeolojik ve jeofizik araştırmalar zemin kalınlığının az olduğu yerlerde sondaj ile yapılırken kalın olduğu yerlerde jeofizik yöntemler ile yapılmaktadır. Zeminin yapışma-ayrışma özellikleri ve buna uygun kazı yöntemi ve makine seçimi gibi özellikler belirlenmeye çalışılır. Ayrıca tünel su, ısı, gaz sorununun giderilmesi için çözümler üretilir. Sondaj ve kazılarda alınan zemin örneklerinin laboratuvar ortamında mekanik özellikleri belirlenir. Tünel kazı yerleri, sürenler, bulonlar ve iksa sistemi hakkında veriler sağlanır.

3.3. Jeoteknik lmler

3.3.1. Tüneller için yapılan lmler

Tünel yapımı için gerekli zemin ölçümleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Sondaj kazısı

- a. Sondaj kazısı ölçümleri
- b. Teodolit ile lazer ölçümler
- c. Mikrotremör lmleri
- d. Çubuk ekstansometreler
- e. Tünel içi konverjans ve opto-trigonometrik ölçümler
- f. Zemin sıkışma-oturma ölçümleri
- g. Ankraj ve kaya bulonu yk hücreleri

3.3.2. Sondaj kazısı lmleri

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik kesme deneyi veya penetrasyon deneyi gibi yöntemlerle sondaj derinliğinin ulaşabileceği ortamlarda belirli aralıklarla tünel güzergâhı zemini için mekanik özellikler belirlenebilmektedir.

3.3.3. Teodolit ile lazer lmler

Teodolit kazı alanı lazer hizalama ve poligon açı tayini yapımında kullanılır. Tünel inşaatı alanını kapsayan bir nirengi ağının oluşturulmasında proje parametrelerinin sürekli kontrol edilmesinde yine teodolitten yararlanılır.

3.3.4. Mikrotremör lmleri

Sondaj derinliğinin yetersiz olduğu zemin kalınlığının fazla olduğu yerlerdeki tünel yapımlarında mikrotremör'den yararlanılır. Zemin mekanik özellikleri, tabaka kalınlıkları, boşluk durumları vs. gibi etkenlerin belirlenmesinde mikrotremör kullanılır.

3.3.5. Çubuk Ekstansometreler

Zeminin düşey deformasyonunu belirlemek için sondaj kuyusuna ekstansometre konulmaktadır. Sondaj kuyusundan belirli aralıklarla tabaka deformasyonları ölçülmektedir. Tünel kazı aynasının olduğu yerlerde ilk defa boşluk oluştuğundan ve destek sisteminin tam oluşturulmamasından dolayı zeminde düşey sıkışma yaşanmaktadır. Bu nedenle ayana kazısına yakın yerlerde daha sık aralıklarla ölçüm alınmaktadır. Ayna kazısının ilerlemesiyle zemin deformasyonunda azalma olacağından ölçüm sayıları da azalmakta veya sonlandırılmaktadır.

3.3.6. Tünel içi konverjans ve opto-trigonometrik ölçümler

Konverjans ölçümleri ekstansometreler vasıtasıyla tünel kemeri ve ayaklarının deformasyonunu ölçmek amacıyla kullanılır. Opto-trigonometrik ölçümler ise tünel ayaklarının düşey ve yatay deformasyonunu ölçmek için kullanılır. Ayna kazısının bulunduğu yerde deformasyon fazla olacağından yine bu bölgede ölçümler sık yapılmaktadır. Tünel kazısında çökme yaşanmadan hızlı bir şekilde destek sistemlerinin oluşturulması için deformasyon parametrelerini vermektedir. Zemin sınıflandırılmasına göre ölçümler sıklaştırılabilir veya seyreltilebilir. Ayrıca destek sistemlerinin yapılması sonrası tekrar tünel kemer ve ayaklarında deformasyon miktarı ölçülerek tünel güvenliği kontrol edilir.

3.3.7. Zemin sıkışma ve oturma ölçümleri

Zeminde açılan tünel boşluğu tavanında ve ayaklarında sıkışmadan dolayı oturma oluşmaktadır. Bu nedenle tünel kesiti dışında oturma toleransı verilerek kazı yapılmaktadır. Ayakları ve kemerine çakılan bulonlar vasıtasıyla oturmalar ölçülmektedir. Ayna kazısının olduğu yerlerde ve özellikle kötü zeminlerde oturma fazla olacağından sık ölçümler ve daha fazla tahkimat (destek) yapılmaktadır. Ayna kazısında sık kazıya uzak 20-30m gibi uzaklıkta daha seyrek ölçüm yapılır. Tünel içi istasyon veya ara bölmelerde çap büyüyeceğinden daha sık ölçümler alınmaktadır.

3.3.8. Ankraj ve kaya bulonu yük hücreleri

Ankrajların ve kaya bulonlarının yerleştirilmesinde gerilme kuvvetlerinin değişimlerini izlemek amacıyla yük hücreleri kullanılır. Ankrajlarda ve bulonlarda uygulanan dönme kuvveti ölçülür ve gerekli tahkimat zemin analizine uygun bir şekilde yapılır.

3.3.9. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Yeraltı gibi karmaşık ortamda yapılan kazılar için birçok ölçüm ve destek sistemi gerekmektedir. Projeye uygun kesitin oluşturulması için harita ve kesit özellikleri işlenmekte. Elde edilen ölçüler bilgisayar yazılımları ile kayda alınmakta ve grafikler oluşturulmaktadır. Verilere göre 2 ve 3 boyutta kazı düzlemi oluşturularak kazı izlenmektedir. Ankraj ve bulonlardan alınan gerilmeler ile zemin ortamı değerlendirilmekte ve destek sistemi oluşturulmaktadır. Tünel giriş ve çıkış portalları harita verileri ve ayna kazısındaki ölçümler ile örtüştürülmekte, giriş ve çıkış ayna kazısı çakıştırılmaktadır. Aksi takdirde iki yönden açılan kazılar aynı hizaya denk gelmeyebilirler.

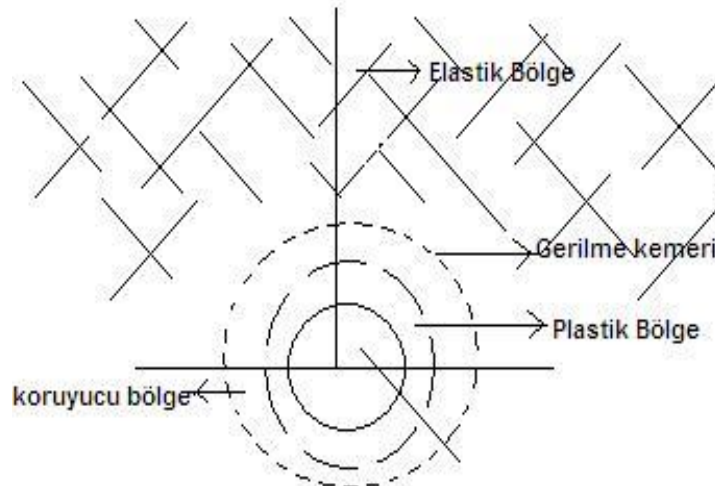
4. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ VE ZEMİN İLİŞKİSİ

Tünel açma yöntemleri zemin özelliklerine göre değişmektedir. Zeminin iyi olduğu kaya ortamında çökme miktarı daha az olduğundan kazıcı makineler kullanılabilir. Zeminin kötü olduğu ortamlarda çökme miktarı fazla olacağından destek sistemlerinin hızlı yapılması gerekmektedir. Bu nedenle TBM makinesi gibi makinelerin kötü zeminde kullanılması durumda çökme yaşanabilmekte ve makineler göçük altında kalabilmektedir. En güvenli kazı yöntemi olan parçalı kesit kazı yöntemi yine kötü zeminlerde makineler yardımıyla yapılabilir. Proje bütçesine ve deneyime göre de kullanılan yöntem değişebilmektedir. Bu nedenlerle günümüze kadar tünel açma yöntemi farklılıklar göstermiştir. Tünel açma yöntemleri temel olarak üç gruba ayrılabilir. Bunlar:

1. Delme Patlatma, NATM
2. Makine ile Kazı
 - a. Parçalı Kesit Kazı Yöntemleri
 - b. Hidrolik Kırıcılar
 - c. Ekskavator
3. Tam Kesit Kazı Yöntemleri
 - a. TBM
 - b. Kalkanlı Makinesi
 - c. Mikro Tünel Makinaları vb.

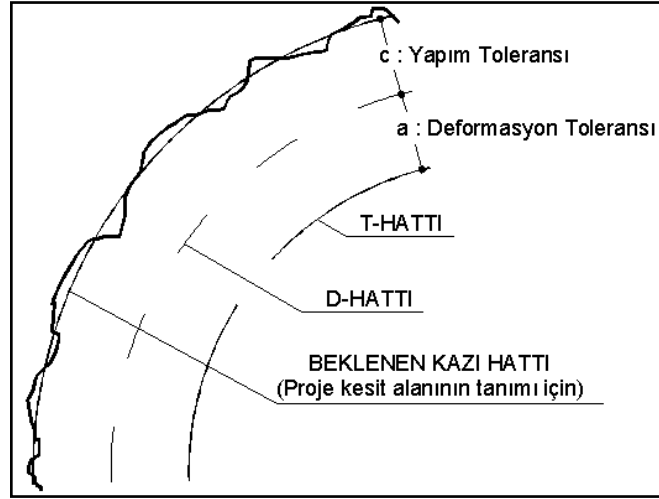
4.1. Kaya Türü veya Kötü Zeminlerde Tünel Açma Yöntemleri

Kaya türü sağlam zeminlerde çoğunlukla makineler ile kazı yapılmaktadır. Ekskavatör ve benzeri kırıcılar ile kazı aşaması yapıldıktan sonra destek sistemi yapılmakta ve ilerlenmektedir. Ayrıca delme-patlatma yöntemi de kullanılmaktadır. Kazı yöntemini zemin içerisinde bulunan gerilmeler etkilemektedir. Gerilmeler zemin kohezyon özelliklerine, su basıncına, tektonik ve volkanik faaliyetlere, fiziksel ve kimyasal olaylara göre değişmektedir. Zemin ortamında düşey ve yatay gerilmeler eşit dağılmamaktadır. Zeminin tek bir karışımdan meydana gelmediği homojen olmadığını, her yönde aynı davranışı göstermediği ise izotropik olmadığını göstermektedir. Yeraltında yatay gerilmeler düşey gerilmelerden daha fazla olduğu ölçülmüştür. Bu nedenle yatay gerilmelerin uyguladığı basınçla zeminde açılan bir boşluk etrafında kemerlenme meydana gelmektedir. Kemerlenme başlangıç seviyesinden yer yüzüne olan mesafede zemin elastik davrandığından bu bölgeye elastik bölge denilmiştir. Elastik bölgeden daha derinlerde ise basınç ve ısı etkisiyle zeminde yatay gerilmeler düşey gerilmelere oranla neredeyse 3 kat değişkenlik gösterdiğinden plastik ve yarı plastik özellikte olduğu belirlenmiştir. Elastik bölgenin altında sırasıyla kazı bölgesinde gerilme kemeri (koruyucu bölge), çöküntünün yaşandığı ve taşınması gereken plastik bölge (gevşeme zonu) bulunmaktadır. Kazı kesitinin şekline göre gerilme dağılışı farklılık göstermektedir. Köşeli kesitlerde gerilme yığılmaları köşelerde oluşurken dairesel veya eliptik kesitlerde gerilme yığılmaları oluşmamaktadır. Dairesel kesitlerde zeminde daha düzgün kemer oluşmakta ve yükler tabana aktarılmaktadır. Bu nedenle tünel yapımında köşeli kesitler yerine dairesel kesitler tercih edilir.



4.1.1. Kazı profilinin tanımı

Kazı profili tünel en kesit profilinden fazla olmak zorundadır. Tünel en kesit profili yani teorik profil T hattı ile gösterilmektedir. Zemin ortamında mekanik özelliklere göre radyal deformasyonlar meydana gelmektedir. Ayrıca tünel destek sisteminin yapılması için yapım toleransı gerekmektedir. Radyal deformasyonlarını karşılamak için D hattı “a” derinliği kadar dikkate alınır. Tünel destek sistemi olan süren, çelik hasır, çelik iksa, püskürtme betonu ve kaya bulunu yapımı için belirli kalınlığın kazıya verilmesi gerekmektedir. Bu kalınlık ise “c” derinliği kadar göz önüne alınmaktadır. Projede yapım ve deformasyon toleransı kazı sırasında kazanılan deneyime göre ve yan yana yapılan tüplerden ikinci tüpte elde edilen deneyime göre gerçek toleransa uygun olarak ayarlanabilmektedir. Tolerans değerleri zemin özelliklerine göre değişmektedir.



Şekil 4.2 Kazı profili, deformasyon ve yapım toleransı (KTŞ 2013).

4.2. Tünel İnşaatı Prensibi

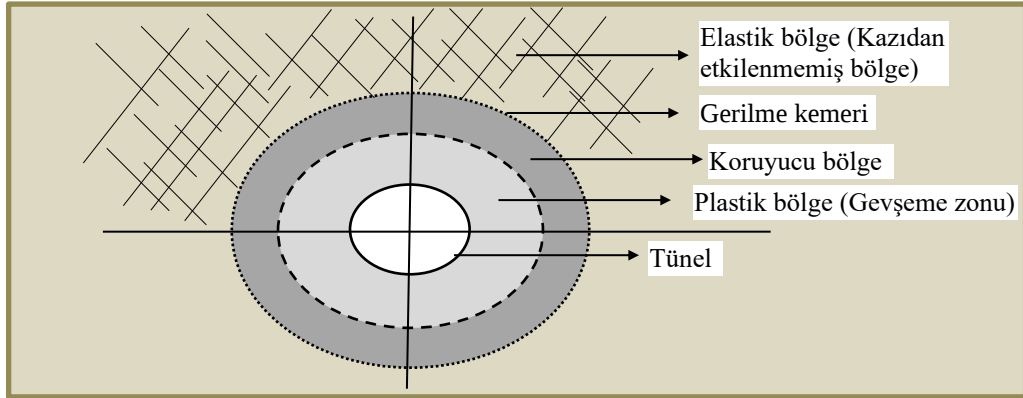
4.2.1. Kemerlenme

Yeraltı ortamı gerilmeleri su ortamındaki gerilme prensibi ile karıştırılmamalıdır. Su ortamında bir cisme etki eden düşey yük cismin üst yüzey alanının üzerindeki su kolunu yüksekliğinin tamamı ile çarpılması ile elde edilmektedir. Böylece derinlere inen bir cisim üzerindeki basınç yükü gittikçe artmaktadır. Ancak zemin ortamında aynı durum söz konusu değildir. Yeraltındaki bir cisim ne kadar derinde olursa olsun zemin özelliklerine bağlı olarak üzerinde belirli bir yükseklikte gerilme yayı oluşmaktadır. Buna kemerlenme denir. Kemerlenme sayesinde yükler cismin kenarında bir yay oluşturarak zemine iletilmektedir. Zemin ortamında açılan bir boşluk nedeniyle kayalar dayanımlarına göre boşluğu ilerlemektedir. Yine kayaların birbirini sıkıştırması ve desteklemesi sonucunda bir denge oluşmaktadır. Kaya direncine göre denge geniş bir kalınlıkta olacağı gibi daha dar bir kesitte olabilmektedir. Ancak ayna kazısının fazla olması durumunda çökmenin yaşanacağı kesi olmaktadır. Bu nedenle kazı ilerlemesi 1-3m arasında yapılır daha sonra destek sistemi kurularak çökme engellenir ve kazıya devam edilir. Yeraltında açılan boşluk çevresinde 3 zon oluşur. Bunlar dıştan içe doru:

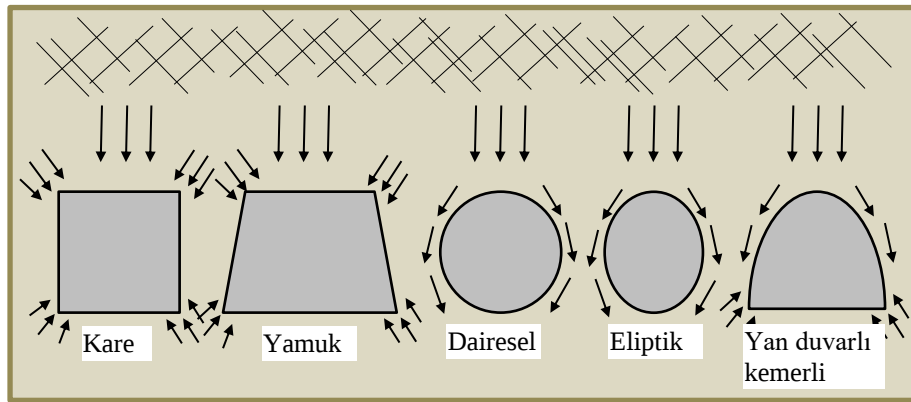
- Elastik Bölge (Kazıdan etkilenmemiş)
- Koruyucu bölge
- Plastik bölge (gevşeme zonu)

Tünel kesiti etrafında oluşan plastik bölge kohezyon, içsel sürtünme açısı, taşıma kapasitesi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Onun üzerinde koruyucu bölge oluşmakta bu bölge plastik bölgenin çökmesi ve gevşemesi sonucu plastik bölgeye geçiş zonudur. Onun üzerinde ise elastik bölge oluşmaktadır. İki bölgenin ayrıldığı yaya ise gerilme kemeri denilmektedir. Tünel kazı şekline göre gerilme dağılımı değişmektedir. Gerilme dağılımı kayaların dayanımını aşması ile çökme yaşanmakta

ve yeniden gerilme uyumu oluşuncaya dek ilerlemektedir. Köşeli tünel kazılarında köşelerde gerilme yığılmaları olduğundan durabilite sorunları yaşanmaktadır. Ancak dairesel kesitlerde daha düzgün bir yay boyunca gerilme kemeri oluşmaktadır. Bu nedenle tünel kesiti dairesel veya daireye yakın ekilde tercih edilmektedir. Kemerlenme kayaç mekanik özellikleri, su, fay, tabaka düzlemi gibi süreksizlikler ile desteksiz yapılan kazı boyu uzunluğuna göre değişir. Bu nedenle desteksiz kazı uzunluğu olabildiğince kısa ve optimum düzeyde tutulur.



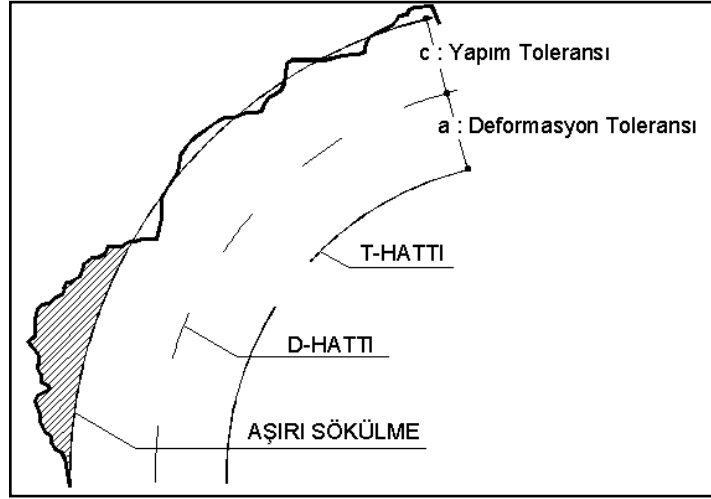
Şekil 4.3 Yeraltı kazılarında oluşan çeşitli bölgeler (Arıoğlu, 2009 değiştirilmiş).



Şekil 4.4 Değişik kazı kesitlerinde gerilme dağılımları.

4.2.2. Aşırı sökülme

Tünel kazılarında planlanan tünel kesitinden daha fazla yapılan kazılara "aşırı sökülme" denir. Aşırı sökülme, kayanın cinsi, ayrışma oranı, içerdiği süreksizlikler, tünel kesit alanı ve tipi, kazı boyu, destek sistemi gibi birçok parametre doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte kayaçların katmanları; katman kalınlığı, doğrultusu ve eğimi, fayların doğrultusu, eğimi ve yönü de etkilemektedir. Aşırı sökülme zeminin kemer oluşturmadağı yerlerin çökmesiyle meydana gelir. Çeşitli kaya sınıflarında aşırı sökülme farklı olacağından gereken destek elemanları, profillerin sıklığı ve boyutları da farklılık göstermektedir. Aşırı sökülme, engellemek için uygun kazı tekniğı, destek sistemi ve işçiliğın bulunması gerekmektedir. Zeminde açılan tünel boşluğu o bölgede gevşeklik oluşturacağından ve zeminin boşluğa ilerlemesinden tünel kesitinde bir miktar daralma oluşmaktadır. Bu daralma tünel profilini küçülteceğinden kesitin projeye uygun olması için kayaç türüne göre belirli miktarda fazladan kazı yapılır ve zemine deformasyon toleransı verilir. Ancak kötü zeminlerde çok görülen bir durum olan aşırı sökülme sorunu istenmeyen bir durumdur. Bunlara ait görsel şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Aşırı Sökülme (KTŞ 2013).

4.2.3. Kaya çökmeleri

Zeminin jeolojik özelliklerine bağlı olarak yapılan kazılar sonucunda kemer veya yan duvarlarda bulunan kayaların boşluğa çökmesi olayına denir. Küçük veya büyük malzemelerin bir kısmı tünel boşluğuna düşmektedir. Düşmeler kazı açma veya patlatma anında olacağı gibi sağlam zeminlerde saatlerden günlere uzanan bir aralıkta da yaşanır. Fay kırığının olduğu ve su çıkışı bölgelerinde kayaların çökmesine daha çok dikkat edilmektedir. Kaya çökmeleri hızlı yapılan hasır ve çelik iksalar ile durdurulmaktadır.

5. TÜNELLERDE SU, ISI VE GAZ SORUNU

5.1. Su Sorunu

Tünel açıldıktan sonra yeraltı suyu seviyesinin tünel kesitinin üzerinde olduğu durumlarda su çıkışı gerçekleşir. Suyun tahliyesi için drenaj kanalı açılır. Suyun asidik olması veya fazla olması durumunda can ve mal kaybına yol açacağı gibi tünel maliyetini de arttırmaktadır. Sıkışmış akifer katmanları arasında bulun yer altı sularının tünel ortamından tahliye edilmesi gerekir. Su akışı ile birlikte ayrılmış kaya malzemeleri de tünel boşluğunu kapatmaktadır. Suların kimyasal özelliği beton ve çeliğe etki ettiğinden beton için gerekli su geçirimi engelleyen katkı kullanılır. Su içerisinde sülfat etkisinin, NaSO_4 , MgSO_4 , H_2S , CO_2 ve CaSO_4 olup olmadığı araştırılır.

5.2. Isı Sorunu

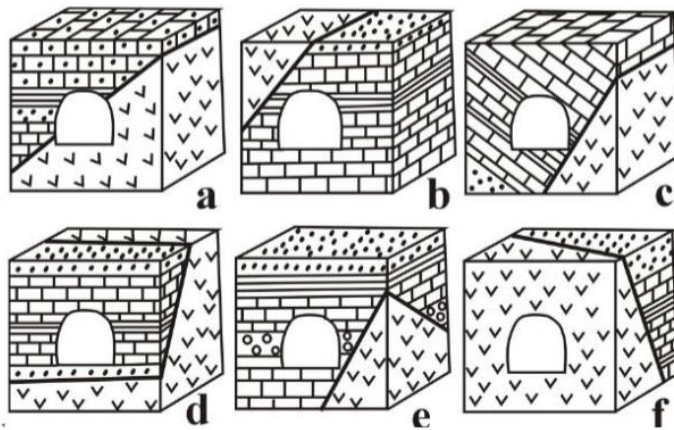
Derin tünel açılması gerekli yerlerde açılan tünellerde ısı artışı sorunu ile karşılaşılmaktadır. Ayrıca magmatik alanlarda kırıklı yapılardan yükselen magma tünel içindeki sıcaklığı arttırmakta. Isı artışını tünelin uzunluğu, havalandırma durumu ve çıkan kimyasal gazlar etkiler. Isının artışıyla kimyasal gazlar için patlayıcı ortam daha kolay olduğundan havalandırma ile ısı tünel dışına çıkarılır. Daha çok düşey ilerleme gösteren maden tünellerinde havalandırma dikey yönlü hızlı yapılabilirken yatay ve uzun tünellerde daha yüksek havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

5.3. Gaz Sorunu

Atmosfer ortamından uzak zemin ortamında jeolojik koşullar nedeniyle çeşitli gazlar bulunur. Bu gazlar zehirli, yanıcı veya patlayıcı olduğundan sürekli ölçümler alınmaktadır. Tünel içi gazların sürekli emniyetli sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir. Gazların tünelden çıkışını ve tünel emniyeti sağlamak için havalandırma sistemleri kullanılır. Karbondioksit (CO_2)'in %5'ten, Karbonmonoksit (CO)'in %0.01'den, Metan (CH_4)'nin %5'den, Kükürtdioksit (SO_2)'in 20ppm'den, Azot Oksitlerin 25ppm'den gibi gazların sınır değerlerinden daha fazla olması durumunda çalışma durdurulur ve tünel emniyeti sağlanır.

5.4. Fayların Tünel Kazısına Etkisi

Fay kırıkları tünel yapımında bulunduğu yer ve doğrultuya göre önemli yer almaktadır. Fayın geçtiği güzergahlarda depremsellik oluşacağından ve dinamik yükler tünele etkiyeceğinden gerekli önlemler alınır. Tünel derz boşluğu ile dinamik yükler absorbe edilmekte böylece tüm tünele zarar gelmesi önlenmektedir. Ayrıca dinamik yükler ile moment kuvvetleri yer değiştireceğinden fay kırığının olduğu bölgede tünel kesitindeki donatı miktarı değişmektedir. Tünel yapımını etkileyen konumları ve doğrultuları şekil 5.1'de verilmektedir.

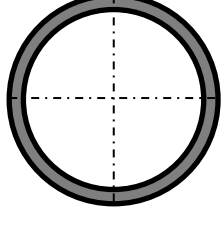
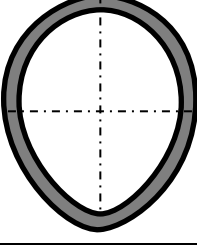
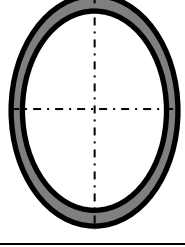
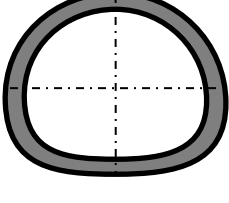
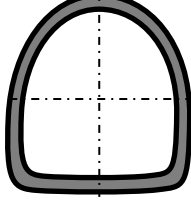
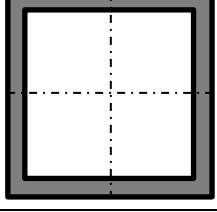


Şekil 5.1 Fay doğrultuları ve fayların tünele etkisi (Ersoy, 2021).

5.5. Tipik Tünel En Kesitleri

Tüneller kullanım amacına göre gerek duyulan kesitte boyutlandırılmaktadır. İç basınç durumuna göre basınçlı veya basınçsız olarak sınıflandırılmaktadır. İçinden sıvı veya gaz geçen tüneller iç basınca sahipken demiryolu, karayolu, metrolar, maden ocağı tünelleri iç basınca sahip değildir. Karayollarında geniş araçların geçişi için yol genişliği önemli bir konu olduğundan at nalı veya yan duvarlı kemerli tünel tercih edilir. Dış basıncı daha düşük olan aç-kapa veya menfez türü tünel kesitleri ise kutu tünel şeklinde yapılır. TBM makinesi dairesel kesit açarak ilerlediğinden daire kesitli tünellerin yapımında kullanılır. Dairesel kesitler çoğunlukla demiryolu veya karayolu için tercih edilir. İç ve dış basıncın olduğu sıvı veya gaz iletimini sağlayan tünellerde ise yumurta veya eliptik tünel şekli tercih edilir.

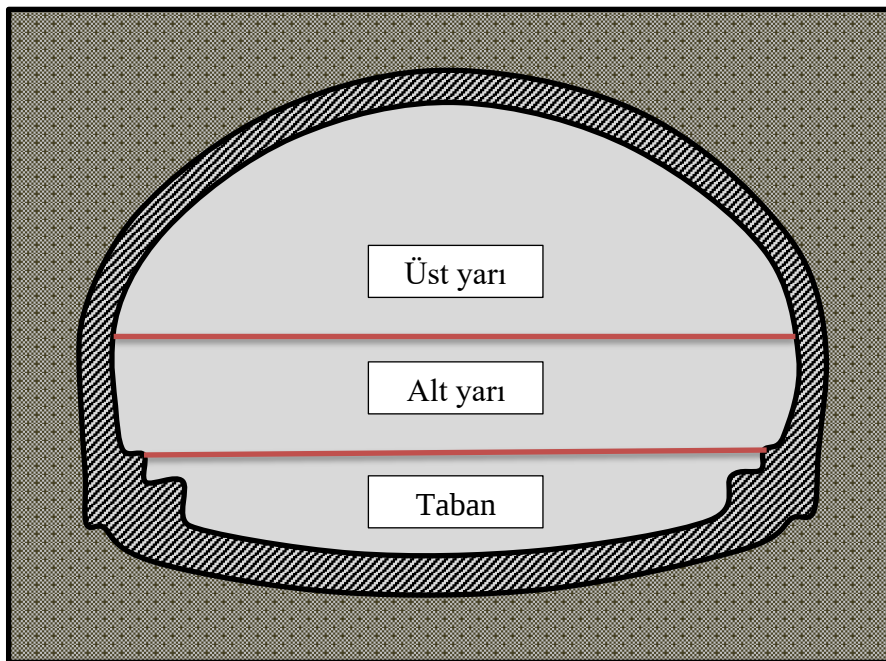
Tablo 5.1 Tipik tünel kesitleri.

		
Daire tünel	Yumurta tünel	Eliptik tünel
		
At nalı tünel	Yan duvarlı kemerli tünel	Kutu tünel

6. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM-NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)

6.1. Genel Olarak NATM Yöntemi

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde kazı işlemi parçalı yapılır ve kazılan kısmın destek sistemi oluşturularak kazıya devam edilir. Kazı işlemi bazı tünellerde kazıcı makine araçları ile yapılırsa da yaygın olarak del-patlat yöntemi kullanılır. Her ilerlemede maksimum 2.5-3m kazı uzunluğu açılır. Kazı işleminde kayaçların mukavemeti çok önemlidir. Kazı boşluğu etrafında oluşan gerilmelerin kayaç mukavemetini aşması durumunda çökme meydana gelmektedir. Kazı yapılmadan önce kemer ve yan duvarların bir kısmında ani çökmeyi engellemek ve destek sisteminin kurulum zamanı elde etmek için süren uygulaması yapılır. Kazı sonrası en kısa süre içerisinde destek sistemi olan iksalar kurulur. Tünel çevresindeki plastik zonun bir an önce tutulması gerekir. Bazı kayaç türlerinde birkaç saatte çökme yaşanırken bazılarında günler sonra çökme yaşanmaktadır. Destek sistemindeki ve kayaçlardaki gerilmeler sürekli kontrol edilir. Tünel şekli değişse de kazı yöntemi NATM olabilir. Tünel şekli gereksinim ve jeolojik özelliklere göre farklılık gösterebilir. Bu farklılıklar tünel destek sistemini, yapım hızını ve maliyetini etkiler. Kazı yönteminin NATM, Roadheader veya TBM makinesi olmasına yine olanaklar ve jeolojik özellikler karar vermektedir. TBM makinesi içerisinde kazı, destek ve tünel yapımı gerçekleştirildiğinden NATM yöntemine göre daha hızlı ilerlemektedir. NATM tünel yönteminde kazı esas olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlar üst yarı, alt yarı ve invert bölümüdür. Ancak tünel kesit alanının büyük olması durumunda diğer tünel tiplerinden farklı olarak üst ve alt yarı da kendi içerisinde 2-3 basamağa ayrılarak kazı yapılabilir. Bu yöntemde ana ilke; en uygun kazı ve destek sisteminin seçilerek kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde kazının yapılması ve kayaçların ilk mukavemetini koruyarak boşluğu çevreleyen kemer şeklinde kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmaktadır. Bu yöntemde destek elemanları oldukça önemlidir. Gerekli düzeyde ve titizlikle inşa edilmediği durumda ikincil gerilme ve deformasyonlarda artış meydana gelir. Tünel kazısı ilerledikçe ölçüm ve gözlemler ile tünel güvenliği denetlenir. Kayaların mukavemet direnci, yeraltı suyu drenajı, gevşeme ve sökümler, kazı sonrası ikincil gerilme durumları, püskürtme beton ve ankraj gerilmeleri gibi parametreler kontrol edilir.



Şekil 6.1 NATM Kazı Aşamaları.

6.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) Ana İlkeleri

Tünel yapısı çoğunlukla dairesel kesitlidir. Dairesel türde yapılan kazı ile boşluk çevresinde oluşan gerilme yan duvarlara taşınır. Yükün duvarlara aktarılması için gerekli destek sistemleri oluşturulur. Statik açıdan bir kemer gibi çalışarak kemerde çekme gerilmelerinin oluşmaması için uygun kesit

seçilir. Yüke yön verilerek tünel kesitinin üzerine tüm yükün binmesi önlenir. Aşağıda NATM yöntemine ait uygulamalar verilmektedir.

1. Kayaçların dayanımları korunarak kazı yapılır.
2. Kayaçtaki gevşeme ve çökme oluşmadan destek sistemi yapılır.
3. Destek sistemleri (süren, hasır, iksa, püskürtme betonu, bulon vs.) erken yapılır.
4. Su, ısı ve gaz sorunları için drenaj ve havalandırma sistemleri yapılır.
5. Tünel kesit betonu dökülür.

6.3. NATM Tünel Kazı Destek Tipleri

Kazı yapılan kayanın mukavemeti, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapılaşmanın niteliği, fay hatları ve konumları; kazı destekleme tipinin belirlenmesinde temel parametrelerdir. Tünel kayacının yapısal özellikleri ve su durumu kazı stabilitesini belirler. Eğer stabilite düşükse, buna bağlı olarak destek tipi değiştirilir ve arttırılır. Stabilite yüksek ise destek miktarı ve alınan önlemlerde azalır. Şehir içi yapılan tüneller yüzey yapılaşmasından etkileneceğinden kazı destek sistemleri de arttırılır. Tablo 6.1’de Karayolları Teknik Şartnamesine uygun tünel kazı destek tipleri ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.1 Kazı destek tipleri (KTŞ 2013).

	A1	A2	A3
	Sağlam Kaya	Orta-Sağlam Kaya	Zayıf Kaya
Çelik İksa (kafes kiriş)	Yok	Var	Var
Çelik Hasır	Tek Kat	Tek Kat	Çift Kat
Püskürtme Beton	d=10-15cm	d=20cm	d=20cm
Kaya Bulonu (şaşırtmalı, adet)	4-5	6-7	7-8
Süren (Sürgü Çubuğu), (adet)	Yok	12 (maks)	20 (maks)
Kazı Boyu (m) (maks)	1.5	1.0-1.2	0.8-1.0

6.4. Tünellerde Kazı ve Destekleme Çalışmaları

NATM yönteminde kazı 3 aşamadan gerçekleşir. Tünel ara bölme veya T tipi tünellerde üst ve alt yarı kısmı da parçalı olarak yapılır. Öncelikle üst yarı kazısı yapılır çelik iksalar ile destek kuurlduktan sonra alt yarı kazısı yapılır. Alt yarı destek sistemi sonrası püskürtme beton uygulaması yapılır. Kırıcılar veya del-patlat yöntemi ile yapılan kazı sonrası teorik kazı içerisinde kalan kazılmamış yerlerin kazıları tarama kazısı ile yapılır. Tünel kayaç tipine uygun destekleme sistemi uygulanır. Öncelikle kazı yapılacak kesit etrafına kazı doğrultusunda süren adı verilen çelik çubuklar çakılır. Kazı yapılır ve hasır çelik örgü ve çelik iksa duvar ve kemerlere uygulanır. Çökmeler engellenir ve püskürtme beton uygulanır. Beton içerisinden tünel kesitine dik yönde dağ içerisine bulon çakılarak enjeksiyon uygulanır. Kayaç özelliklerine göre destek miktarı belirlenir. Yüksek dayanımlı kayaçlarda yapılan tüneller için destek sistemleri azalacağından maliyette aynı oranda azalmaktadır. Su sorunun yüksek olması durumunda drenaj ve destek sistemleri artacağından maliyette artmaktadır.

6.5. Kaya Sınıflandırma Sistemi

Kaya sınıflandırması TBDY-2018 de binalar için verilen sınıflandırmadan farklı olarak daha geniş tanımlanmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesine göre 3 ana zemin grubu oluşturulmuştur. Bunlardan A grubu 2, B grubu 3, C grubu 5 ayrı sınıfa ayrılmıştır. Zemin sınıfları göz önüne alınarak destek sistemlerinin tipine karar verilir. Tablo 6.2. de kaya sınıflandırması, tablo 6.3’te ise kaya sınıfları ve özellikleri verilmektedir.

Tablo 6.2 Kaya sınıflandırma sistemi (KTŞ 2013).

Kaya Grubu	Sınıflandırma	
A	A1	Stabil
	A2	Sonradan Az Sökülen
B	B1	Gevrek
	B2	Çok Gevrek
	B3	Taneli
C	C1	Dağ Atma
	C2	Baskılı
	C3	Çok Baskılı
	C4	Akıcı
	C5	Şişen

Tablo 6.3 Kaya sınıfları ve özellikleri (KTŞ 2013).

KAYA SINIFI	TANIMI	ÖZELLİKLERİ
A	Stabil-hafif aşırı sökülen kaya kütleleri	Bu tür kaya kütleleri genellikle stabil olup elastik davranış gösterirler. Tünel açılması durumunda lokal çökmeler gerçekleşir. Çökmeler ile elastik davranıştan plastik davranışa geçiş yapılır. Daha geniş kazılarda çökmeler daha çok gerçekleşir.
B	Gevrek kaya kütleleri	Bu kaya kütlelerinin mukavemeti orta düzeyde olup yüksek olmadığından çökmeler, ayrışma ve gevşemeler daha çok görülür. Tünel çevresinde bir miktar gevşeme oluşarak tünel kesitinde küçülme meydana gelmektedir. Destek sisteminin gecikmesi durumunda çökme miktarında artış gözlenir. Destek yapımının gecikmesi halinde çökmeler artmaktadır.
C	Baskılı kaya kütleleri	Bu tür kaya kütlelerinin mukavemeti daha düşük olduğu için destek sistemlerinde artış sağlanır. Aşırı gerilmelerin ve su sorununun olması durumunda çökme, kesme, kesitte küçülme, burkulma gibi sorunlar meydana gelir. Kaya kütlesi için A ve B grubu zemine göre daha sık destek sistemi atılır. Destek sistemleri için süre daha kısıtlıdır. Erken destek sistemi kurulmadığı durumda çökmeler yaşanır. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer. Bu grup, aynı zamanda ayrışmış veya bozuşmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler gibi kaya türlerini de içerir. Kaya kütlelerinin düşük mukavemetleri nedeniyle kohezyon miktarına bağlı olarak elastik veya plastik aşırı gerilmeler ve çökmeler gerçekleşir.

Üç ana gruba ayrılan NATM yöntemi kaya sınıfları kaya kütlelerinin davranışına, su etkisine ve kazı destek sistemine tablo 6.4'te verilmektedir. C3, C4 ve C5 türü kaya sınıfları mukavemeti çok düşük olduğundan gevşek ve ayrışma aşırı olduğundan bu tür zeminlerde tünel yapımından kaçınılmaktadır.

Tablo 6.4 Destek Sınıfları (KTŞ 2013).

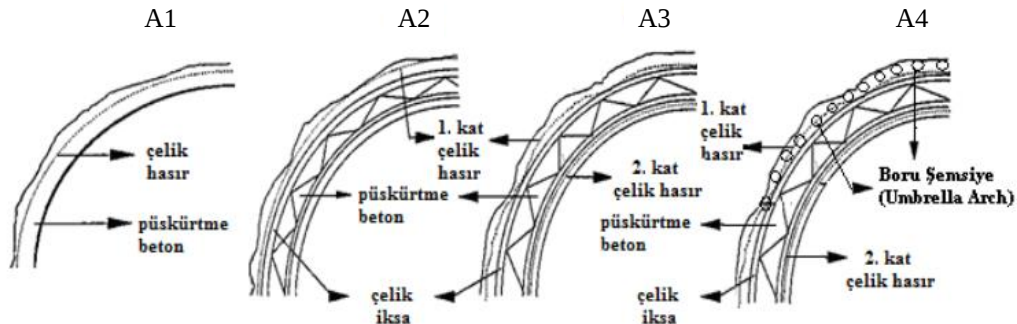
A1 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kaya kütlesi oldukça stabildir, elastik davranış gösterir. Ayırışma ve deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Serbest kaya parçaları temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Kayaç dayanımı yüksektir.
Su etkisi	Yoktur
Kazı	Kazı bir bütün olarak yapılabilir. Büyük kazı profili hallerinde, kazı genellikle üstyarı ve altyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Kayaç dayanımı yüksek olduğundan delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir.
A2 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kayaç dayanımı oldukça yüksektir ancak sonradan az sökülme görülmektedir. Deformasyonlar A1 de olduğu gibi küçüktür ve çok hızlı azalır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Tünel kemer kısmında ve yan duvarların üst kısmında süreksizlikler ve lokal sökümler oluşur.
Su etkisi	Önemsizdir.
Kazı	Kazı bir bütün olarak yapılabilir. Büyük kazı profili hallerinde, kazı genellikle üstyarı ve altyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Kayaç dayanımı yüksek olduğundan delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Üstyarı kazısında 2.5-3.5m, altyarda 4m ile sınırlanır.
Destekleme ve zamanlama	Bulonlama; az miktarda tünel tavanında ve yan duvarlarda blokların stabil hale getirilmesi amacıyla kullanılır. Bu durumda kullanılacak kaya bulonları, aynadan itibaren en çok bir ilerleme adımı geriden uygulanır. Kaya bulonlama yönü süreksizliklerin yönelimlerine göre seçilir.
B1 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kayaç dayanımı nispeten daha küçüktür. Kayaç gevrek davranış sergilediğinden “gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Kayaç sınıfı elastik ve plastik davranış gösterir. Patlatmadan kaynaklanan gevşemeler ile istenmeyen genişlikte tünel kemer kısmında sökümler meydana gelir.
Su etkisi	Genellikle önemsizdir.
Kazı	Kayaç yapısı tamamen stabil olmadığından destek sistemleri daha kısa mesafede yapılır. Kazı enkesiti üstyarı ve altyarı olarak bölünür ve delme-patlatma gereklidir. İlerleme adım uzunluğu üstyarı kazısında 2.0-3.0m arasında, alt yarıda ise 4.0m’dir. İlerleme adım uzunluğu zeminin desteksiz durma süresine, desteksiz açıklığa, destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır.
Destekleme ve zamanlama	Tünel kesitinde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Destekleme aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilir. Tehlikeli alanlar derhal desteklenmelidir. Su çıkışı fazla olan lokal yerlerde gerekli drenajlar yapılmalıdır.
B2 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kayaç mukavemeti B1’e göre daha düşüktür. “Çok gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Tünel destekleme sisteminin zamanında yapılması gerekir. Destek sistemiyle deformasyonlar hızla azalır. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde gevşemeler ve buna bağlı olarak

	sökülmeler meydana gelir.
Su etkisi	Ayrışmış kaya kütlesi içerisinde fazla su akışı olması durumunda kaya kütlesinin mukavemeti azalmakta ve destek sistemleriyle drenajı zorunlu kılmaktadır.
Kazı	Kazı tünel kesitine bağlı olarak alt ve üst yarıya bölünür. İlerleme adım uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üstyarı kazısında 1.5-2.0m altyarı da ise 3.0- 3.5m'den fazla olmamalıdır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır.
Destekleme ve zamanlama	Tünel kemer kısmı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde kemerde süren kullanılır.
B3 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kayaç yapısı taneli yapıdadır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur. Büyük kazı yapılması durumunda sökülmeler meydana gelir. Destek sistemi alt ve üst yarı olarak iki bölümde uygulanarak ilerlenir.
Su etkisi	Ayrışmış kaya kütlesi içerisinde fazla su akışı olması durumunda kaya kütlesinin mukavemeti azalmakta ve destek sistemleriyle drenajı zorunlu kılmaktadır.
Kazı	Kazı yapabilmek için kaya kütlesinin desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 1.25-1.50m, altyarıda ise 3m'den fazla olmamalıdır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde mekanik kazı yöntemleri kullanılır. İnvert (taban) kazısı ve taban betonu yapılması gerekli olabilir.
Destekleme ve zamanlama	Tünele sistematik çelik iksa ve hasır destekleme sistemi gerekir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Jeolojik şartlara göre, üstyarı kazısında yanasından 100-150m'den daha geride olmamak üzere invert (taban) beton kemeri yapılması gerekebilir.
C1 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	Kayaç türü kırılğan ve gevşek durumdadır. Taneli yapıda olan C1 sınıfı dayanımı düşüktür. Desteksiz uzun süre stabil kalmadığından sökülmeler derinlere doğru ulaşır.
Su etkisi	Ayrışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin dayanımı üzerinde önemli etkisi bulunur. Fazla su akışı olması durumunda kaya kütlesinin mukavemeti azalmakta ve destek sistemleriyle drenajı zorunlu kılmaktadır.
Kazı	Bölünmüş kazı ile ilerlenmelidir. Taban kazısı gereklidir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 1.5-2.0m altyarıda 3m'den fazla olmamalıdır. Kazı düzgün patlatma veya mekanik kazı metotları ile yapılabilir.
Destekleme ve zamanlama	Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları, çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütlesindeki basınç azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmaları da önlenir. Jeolojik şartlara göre üstyarı aynasından 100-150m'den daha geride olmamak üzere taban beton kemeri yapmak gerekebilir.
C2 sınıfı destek sistemi	
Kaya kütlesinin davranışı	“Baskılı” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Bu kaya kütlesinde plastik bölgeye ve derinlere ulaşan sökülmeler görülür. Kazı çevresindeki deformasyonların mertebe ve hızları orta derecededir ancak belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Plastik davranışlı lokal olarak yüksek kohezyonlu kaya kütlelerine sahiptirler.

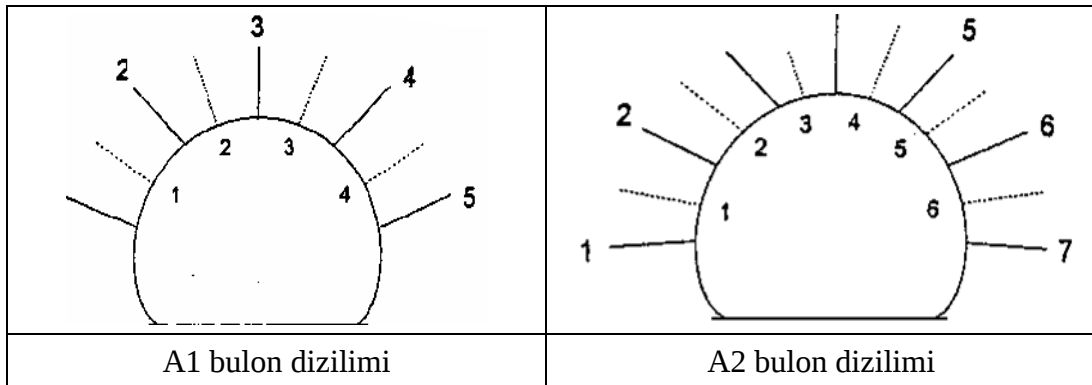
Su etkisi	Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlesi üzerinde önemli etkisi bulunur.
Kazı	Tünel kazısının, üstyarı, altyarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Portal bölgelerindeki özel durumlar hariç, üstyarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılır. Üstyarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekir. İlerleme adım uzunluğu üstyarıda 0.75-1.25m, altyarıda 2m'den fazla olmamalıdır. Kazı düzgün patlatma ve mekanik kazı yöntemleriyle yapılabilir.
Destekleme ve zamanlama	Genellikle tünel aynası stabildir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gerekir. Her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilir. Tünel tavanında süren uygulaması gereklidir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında imalatın ayna ve kemerdeki kaya kütlesini olumsuz etkilemesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üstyarı aynasından 50-100m'den daha geride olmamak üzere taban beton kemeri gereklidir.

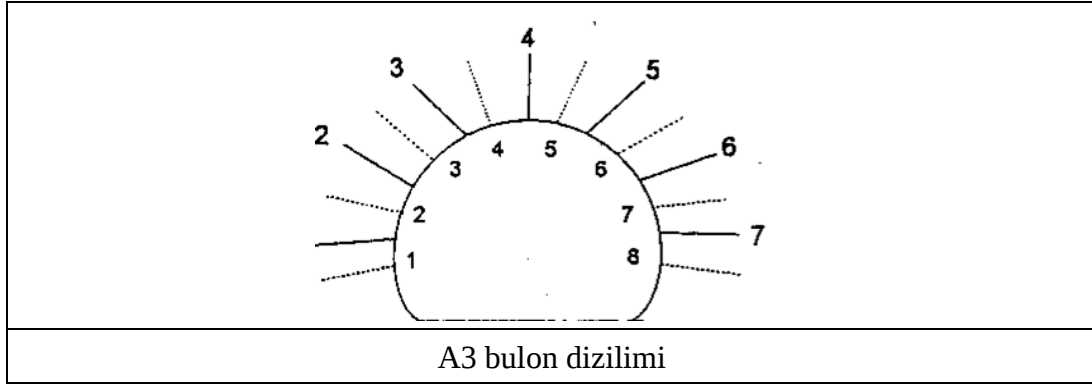
6.5.1. Tünel Bulon Uygulaması

Sağlam zemin koşullarında alınan önlemler az iken zayıf zeminlerde alınan önlemler daha fazladır. A türü zemin koşullarında az, B'de orta, C'de ise daha fazla destek sistemi önlemleri alınır. Şekil 6.2'de 4 tür iksa destek sistemi verilmiştir. A1 türünde sadece çelik hasır ve püskürtme beton uygulanmış. A2 türünde 1 kat çelik hasır, seyrek çelik iksa ve püskürtme betonu uygulanmış. A3 türünde 2 kat çelik hasır, yeteli sıklıkta çelik iksa ve püskürtme betonu uygulanmış. Son olarak A4 türünde ise 2 kat çelik hasır, yeterli çelik iksa, püskürtme betonu ve süren uygulanmıştır. Şekil 6.3'te bulon dizilimleri verilmektedir. A1 bulon diziliminde bulonlar seyrek ve kemerde uygulanırken A2'de kemer ve ayaklarda, A3'te ise kemer ve ayaklarda daha sık uygulanmıştır.



Şekil 6.2 A1, A2, A3 ve A4 tipi iksa destek sistemlerinin kesit görünümü (Uğürel, 2010).





Şekil 6.3 A1, A2 ve A3 bulon dizilimi (Bozkurt, 1987).

6.6. Çelik Hasır Montajı

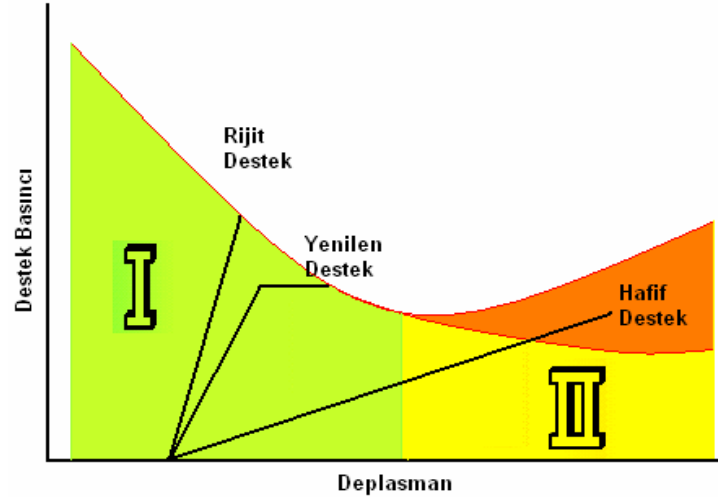
Kazı sonrası teorik tünel kesitini oluşturmak, kaya sökülmesini önlemek için mutlaka çelik hasır uygulanır. Kayaların dökülme durumuna göre çelik hasır belirlenir ve kaya yüzeyine montaj yapılır. Çelik hasırı yüzeyde tutabilmek için çelik iksa sistemi oluşturulur. Kaya sınıfının zayıf olduğu durumlarda iksa sonrası tekrar ikinci çelik hasır atılabilir.

6.7. İksa Montajı

Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde hasır çeliği kaya yüzeyinde tutmak ve sökülmesini engellemek için kullanılır. Eski ve az masraflı yapılan tünellerde özellikle eski maden tünellerinde sadece hasır ve iksa sistemi kullanılmıştır. Püskürtme beton içerisinde kalan iksa sistemi ile tünel kesiti çekme, basınç, kesme ve eğilme gerilmelerini karşılayabilecek dayanıma sahip olur. İlk kazısı yapılmış kaya yüzeyinin stabilitesini koruyarak tünel yapımında oluşacak çökmeleri önler. Çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H veya U hadde profiller veya kafes kiriş olarak seçilebilir. Çelik iksalar tünel kazısını çevreleyen kaya kütlelerini güçlendirmez. Kaya kütlelerine destek olarak deformasyon sonucu oluşacak çökmeler engellenmiş olur. İksa sistemi sürekli topoğrafik ölçümler ile uygulanır. Öncelikle üst yarı kazısı yapılan kesitin iksa sistemi uygulanırken sağlam zemine oturacak şekilde iksa sistemi uygulanır. İksa profillerini birbirine bağlayan çubuklara işban çeliği denir. İşban çubukları 20cm bindirme ile yapılır. Karayolları Teknik Şartnamesinde iksa tiplerine göre işban adetleri verilmiştir. Sırasıyla yaklaşık A tipinde 13, P tipinde 16, T tipi ana iksada 18, geçici iksada 5, B tipi iksada ise 13 adet işban çeliği kullanılır. Şekil 6.4'te Fenner – Pacher destek basıncı ve deplasman durumuna göre iksa yoğunlukları grafiği verilmiştir. Deplasmanın çok olduğu kayalarda iksa desteği artırılırken az olduğu kayalarda destek miktarı azaltılmıştır.

Tablo 6.5 Farklı kesit tiplerine göre işban adedi (KTŞ 2013).

Kesit tipi	A tipi	P tipi	T tipi		B tipi
			Ana iksa	Geçici iksa	
İşban adedi	13	16	18	5	13



Şekil 6.4 İksalar destek yoğunluğu (Fenner – Pacher eğrisi).

6.8. Püskürtme Beton Uygulaması

Püskürtme beton slumpı düşük yüzeye yapışan özellikteki beton türüdür. Priz hızlandırıcı katkı kullanılarak basınçlı araç ile yüzeye uygulanır. Ayrıca alt ve üst yapıda farklı amaçlarda kullanılır. Özellikle eğimli ve tavan yüzeylerinin bir miktar betonla kaplanması için uygulanır. Şev stabilitesi düşük yamaçlarda oldukça yaygın kullanılır. Farklı yapılarda onarım amacıyla da kullanılır. Tünel yapısında kaya sökülmesini önlemek ve kemer beton oluşumunu sağlamak için kullanılır. Tünelde püskürtme betonu uygulanacak yüzeyin su drenajı yapılmalıdır. Basınç gerilmelerini karşılayarak kemer şeklinde zemine iletilmesini sağlar. Tünel asıl betonunun doğrudan zemine temasını keser. Tablo 6.6’da tünel yapılarında kullanılan püskürtme beton karışım miktarları verilmektedir. Tablo 6.7’de ise püskürtme betonun zamana bağlı mukavemet değerleri verilmektedir.

Tablo 6.6 Püskürtme betonun karışım miktarı (KTŞ 2013).

Dozaj [kg]	Katkı %	D_{maks}	Su/Ç	Su [kg]	Doğal Kum [kg]	Kırma Kum [kg]	Kırma Taş [kg]
					0-2mm	2-5mm	5-12mm
400	5	12	0.36	144	460	568	859

Tablo 6.7 Püskürtme beton mukavemet değerleri (KTŞ 2013).

Zaman	Mukavemet (N/mm ²)
6 dk.	0.2-0.5
1 saat	0.5-1.0
24 saat	8-20
7 gün	30-35

6.9. Kaya Bulon Uygulaması

Kaya balonları püskürtme beton sonrası tünel kesitine dik yönde dağ içine uygulanarak tahkimatın tamamlayıcı elemanını oluşturur. Bulonlar püskürtme betonu yüzeyine yerleştirilen plaka parçalarını basınçla yüzeye yapıştırmak ve kaya içini güçlendirmek amacıyla uygulanır. Kemer yapının bir bütün olarak kaya ile birlikte çalışmasını sağlar. Kaya bulonları ankraj çubuğu olarak görev yapar kaya içinde üç eksenli gerilmeler, kayadan dolayı kemer üstünde oluşan yükü yine kayaya taşımak ve tünel çevresini iyileştirmek için kullanılır. Tünel yapılarında oldukça önemli olan kaya tahkimat sistemi zemin özelliklerine göre farklılık gösterir. Bulonlar 1.3-4.0cm çaplı ve uzunlukları tünel büyüklüğüne,

kaya özelliklerine göre değişir. Bulonlar ankraj yöntemiyle sabitlendiği gibi çimento enjeksiyonu ile de kayaya bağlanabilir. Plaka ve somun yardımıyla sıkıştırma işlemi yapılır. Bulonlar gerilmemiş, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç gruba ayrılır. A1, A2 ve A3 tipi uygulama olmak üzere bulonlar sırasıyla 4-5, 6-7 ve 7-8 adet şaşırtmalı olarak kayaya çakılmaktadır.



Şekil 6.5 Bulon uygulaması.

6.9.1. Enjeksiyonlu kaya bulonu

Püskürtme betonu sonrası delici makine tarafından delinen deliğe beton enjeksiyon malzemesi doldurulduktan sonra bulonun yerleştirilmesiyle yapılır. Bir ucu 10cm dişlidir ve 200x200x10mm boyutlarında taşıma plakaları 24mm'lik somunlar kullanılır. Yerleştiği delik çapı minimum 45mm'dir. Bulonlar minimum 3m boyunda nervürlü çelikten oluşmaktadır. Yalnızca su ve çimento karışımı olan enjeksiyon özel makineler ile uygulanmaktadır. Özellikle kırıklı kayalarda veya taneli zeminlerde tünel etrafında dayanıklı bir kemer zonunun oluşturulması için uygulanır. Bulon yerleştirildikten sonra enjeksiyonun priz alması beklenir sonrasında bulon sıkma işlemi uygulanır.

6.9.2. Süper Swellex kaya bulonu

Genel olarak özel üretim yapılır. Anında çalışır durumdadır. 54mm çapında 2mm cidar kalınlığında ve 3.6m uzunluğunda üretilir. Delgi makinesi ile delik açılır ve swellex kaya bulonu yerleştirilir. Bulon başına plaka takılır. Hidrolik genişleyen bulon türü olan bu bulonlar 300bar basınçlı hava ve su ile kaya içerisinde şişirilir. Kaya içerisinde oluşan gerilme ile bulonlar sıkıştırılır. Kaya içerisinde sıyrılma tehlikesi olduğundan düşük dayanımlı ince taneli zeminlerde uygulanmaz.

6.9.3. IBO-kaya bulonu

İçi boş dışı dişli olan 36mm çapında çelik bulonlardır. Delici makine ile döndürülerek kayaya vida gibi çakılır. Daha sonra bulon içindeki delikten beton enjeksiyonu uygulanarak bulon kayada sabitlenir. Ancak bu yöntemde de enjeksiyonun prizini ve mukavemetini alması için bir süre beklenir. Sonrasında bulonlar somunlar ile sıkıştırılır.

6.10. Süren Uygulaması

Kazı yapılacak kesitin kazı esnasında ve hemen sonrasında çökmesini engellemek amacıyla uygulanmaktadır. Sürenler tünel kesiti üzerinde şemsiye oluşturacak şekilde tüneli çevreleyen destek sistemleridir. Tünel kazısının ilerlemesi için gerekli kazı kesitini belirlemek için kullanılır. Böylelikle istenildiği kadar kazı yapılır. Kazı hafriyatı çıkarıldıktan sonra iksa destek sistemleri uygulanır. Kaya

tipine göre süren sıklığı değişmektedir. 6-9m uzunluğunda 32mm veya 51mm çapında içi boş bulonlardan oluşmaktadır. Yerine yerleştirilen bulonlara beton enjeksiyonu yapılarak tünel kemeri güçlendirilir. Süren boyuna ve sıklığına uygun olarak enjeksiyon miktarı belirlenir. Enjeksiyonda kazısı yapılacak alt kısma beton doldurmamak, kazıyı engellemek için bulonlar yatayla maksimum 5-10° açı yapacak şekilde çakılır. Çelik bulon içerisine uygulanan beton sayesinde bulonun dayanımı da artmaktadır.



Şekil 6.6 Süren uygulaması.

6.11. Alt Yarı Kazı ve Destek Sistemi

Üst yarı kazısını takiben alt yarı kazısı yapılır. Destek sistemleri üst yarı ile taban kısmını birbirine bağlar. Üst yarıda olduğu gibi hasır çelik, iksa, püskürtme beton ve kaya bulon uygulaması yapılır. Alt yarı kazı uzunlukları ortalama 3m kadardır. Kaya sınıfına göre bu miktar değişebilir. Alt yarı kazısı üst yarıdan daha kolay yapılır. Risk durumu daha düşüktür bu nedenle kazı ve destekleme daha hızlı yapılır.

6.12. Geçici ve Kalıcı Önlemler ve Destekler

Kazı yapımı aşamasında kaya stabilitesini korumak ve çökmeleri engellemek için destek sistemleri yapılır. Ancak destek sistemlerinin yapımı zaman almaktadır. Bunların yapımı için gerekli zaman önlemler alınarak sağlanır. Süren uygulaması, kazı adım uzunluğunu küçük tutmak, parçalı kazı ile kazı alanını küçültmek gibi önlemler alınır. Kalıcı destekleme sistemi ise tünel kaplama betonunun dökülmesi aşamasıdır. Destek sistemleri kurulmuş tünelde öncelikle invertli kısım daha sonrada ayaklar ile birlikte kemer kısmı betonu dökülür. Beton döküm uzunluğu karar verilen kalıp uzunluğu kadardır. Kalıp uzunluğu 9-12m arasındadır. Her bir beton döküm uzunluğuna ano veya segment denir.

6.13.1. Tünel kontrolleri

Tünel kazısı belirli deformasyon toleransına göre yapılmaktadır. Bu deformasyonlar ölçüm aletleriyle sürekli kontrol edilmektedir. Tahkimat ve destek sistemleri kalınlığı kazı miktarını küçülttüğünden olası taşmaların önüne geçmek için sürekli tarama yapılır. Kemer ve ayak betonu dökümü öncesi deformasyonların tamamen bitmiş veya çok düşük düzeyde olması gerekir. Deformasyonu devam eden tünel kesitinde yük aktarımı tünel kaplama betonuna etkiyeceğinden zamanla kaplamada çatlak ve kırıklar meydana gelir.

6.14. Beton Üretim, Döküm, Nakliye ve Kalıp Yöntemi

Beton üretimi hazır beton santralinden sağlanır. Beton nakliyesi kesintiye uğramamalıdır. Aksi durumda tünel içinde soğuk derz oluşumu gerçekleşebilir. Beton üretim hızı yüksektir. Beton döküm işlemi transmikserlerle taşınan betonun yer pompasıyla kalıba gönderilmesiyle gerçekleştirilir. Beton dökümü tünel son halini oluşturacağından kaliteli ve yeterli ekipman ile yapılır. Döküm yapılacak ano'nun (segment) dış etkilerden korunması sağlanır ve dilatasyon derzi yapılır. Tünel içi hava sıcaklığı düşük olduğundan antifrizli ve erken dayanımlı beton kullanılır ve hidrasyon ısı kontrol edilir. Beton döküm kısmı için drenaj sistemi kurulur ve sudan tamamen arındırılır. Döküm öncesi donatı montajı ve kalıp yağlanması işlemleri yapılır. Beton yerleştirildikten çok kısa süre sonra (birkaç saat içerisinde) kalıp sökülür. Beton kalıbı eğrisel ve belirlenen tünel kesitine uygun şekilde çelik sacdan üretilir. Yatay yönde hareket sağlayan yapıdadır ve düşey yönde yerleşim için hidrolik krikolar bulunur. Taban kısmı kalıbı üst kısımdan farklıdır. Önce taban betonu dökülür daha sonra düz yüzeyli sağlam beton üzerinde kemer ve yan duvar beton kalıbı taşınarak beton dökümü yapılır. Üst kalıp iki parçadan oluşmaktadır. Birinci parça kalıbın betonla temas eden sac panellerini taşır. İkinci parça ise sac panellerden oluşur. Kemer betonunun doğru şekilde yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için sac paneller üzerinde yeterli miktarda beton penceresi bulunur.

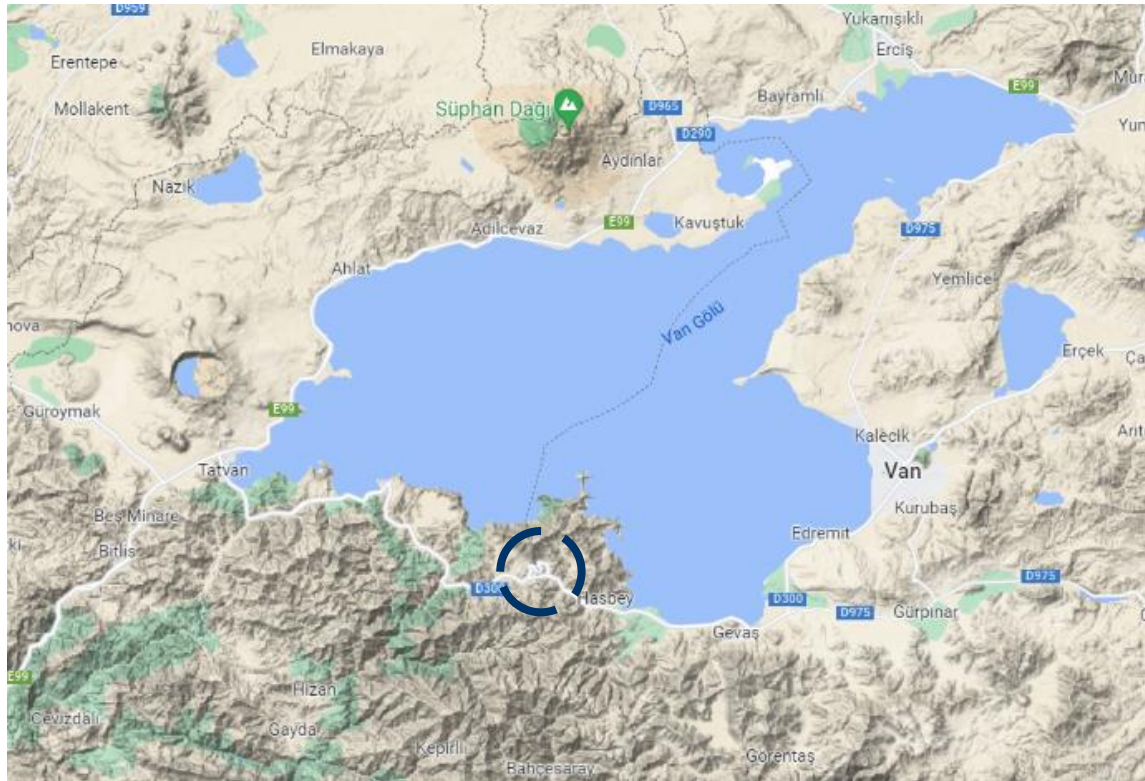
7. VAN-TATVAN (BİTLİS) ARASI KUSKUNKIRAN TÜNELİ

7.1. Genel Tanım ve Kapsam

Van ve Bitlisin Tatvan ilçesi arasında yapılan tünel yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile yapılmıştır. 2306m uzunluğunda tek tüten oluşan karayolu tüneldir. Tünelin yapımı 2004 yılında başlanmış 2012 yılında tamamlanmıştır. Tünel jeolojisi grafit şist, yer yer klorit şist ve meta kumtaşından oluşmaktadır. Tünel kazı çalışmaları sırasında zemin türleri ve destek türleri olarak B2, B3 ve C2 türleri belirlenmiştir. Türkiye maden tetkik ve arama haritaları incelendiğinde Bitlis masifi Permo-Karbonifer eski metamorfizmlerden ve kuvaterner eski kolüvyon ve alüvyondan oluşmuştur. Türkiye deprem tehlike haritalarına göre tehlikesinin yüksek olduğu DD-2 Deprem Tehlike Haritasına göre (50 yıllık periyotta %10 aşınma olasılığına sahip) tünel bölgesinde yaklaşık $S_s = 0.637$, $S_1 = 0.163$ kısa ve 1.0s periyot için harita spektral ivme katsayıları hesaplanmaktadır.

7.2. Güzergâh Tanımı

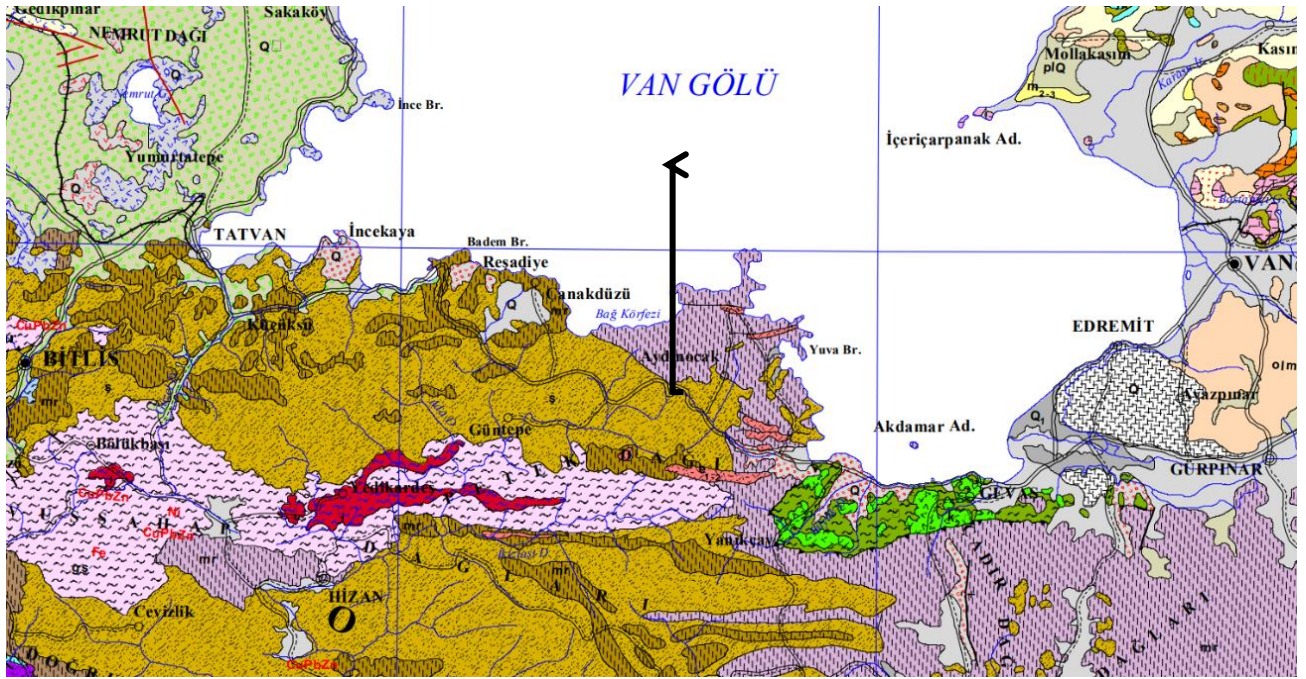
Güzergâh Van-Tatvan (Bitlis) yolunun 71+000 ile 81+000km'leri arasında yer almaktadır. Tünel güzergâhı üzerinde 2234m'lik rakımlı geçit bulunmaktadır. Bu geçidin aşılması ve otoyol süresini azaltmak için 2306m'lik tünel inşa edilmiştir. Yolun toprak, tesviye, sanat yapıları, üstyapı ve trafik güvenliği işleri düşük standartlı olduğundan Tünel yapımı öncesi kış aylarında ulaşım oldukça problemler yaşanmıştır. 2234m'lik geçit 9500m uzunluğu deplase ederek 2306m olan tünel uzunluğuna indirmiştir. Tünel alt yapısı ile birlikte yol üzerinde inşa edilen köprü, menfez yapıları ile yol standartları arttırılmıştır.



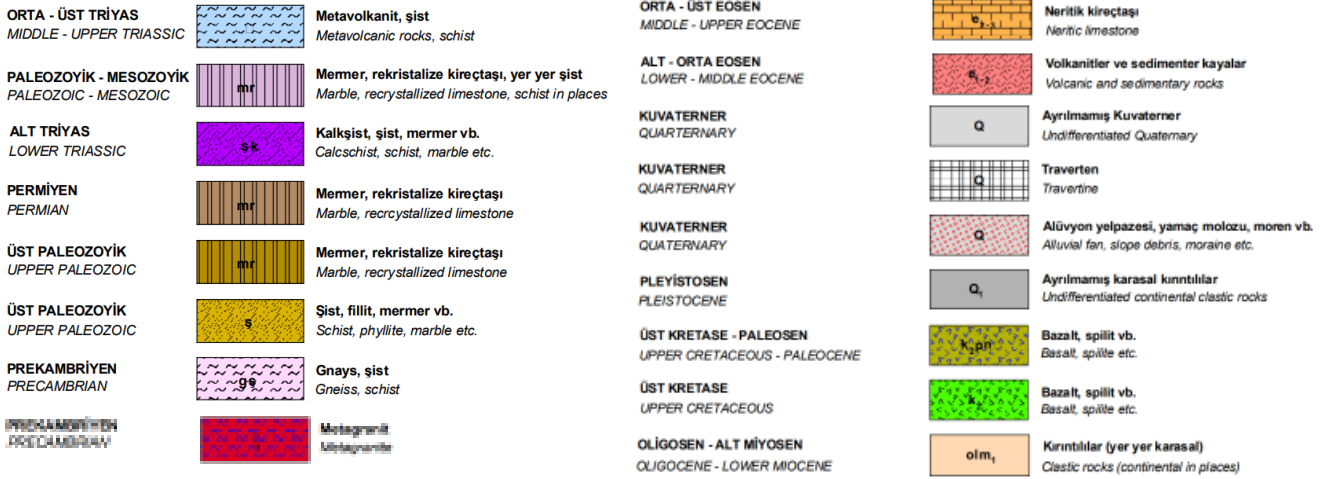
Şekil 7.1 Çalışma alanının bulunduğu harita (mta.gov.tr).

7.3. Tünel Güzergahında Yer Alan Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri

Tünel zeminini oluşturan kayalar esas olarak şist, meta konglomera ve kumtaşlarından oluşmaktadır. Şist birimi genel olarak grafit şist, klorit şist ve mika şist birimlerinden oluşmaktadır. Ayrıca kristalize kireçtaşı ve mermer bantları şist birimi içerisinde gelişigüzel dağılım göstermektedir. Sondaj ve arazi çalışmaları ile tünel güzergahı kayaç yapıları detaylı elde edilmiştir. Jeolojik bulgular, sondaj verileri, laboratuvar deneyleri ve fay durumu tünel güzergahı için oldukça önemlidir. Bitlis bölgesi eski kayalardan oluşmaktadır. Ancak Bitlis Van arası geçiş bölgesini oluşturmaktadır.



Ölçek 1/500.000



Şekil 7.2 Kuskunkiran tünel bölgesinin genel jeolojik haritası (mta.gov.tr).

7.3.1. Grafit ve Klorit şistlerin mühendislik özellikleri

Tünel güzergahı üzerinde egemen olan asıl kayaç tipi grafit şistlerdir. İnce taneli, zayıf-orta dayanımlı, az-orta derecede ayrılmış sınıflandırılır. Tünel güzergahı yer yer meta kumtaşı ve meta konglomera içermektedir. Ayrıca yer yer kuvarslı ve kalsit dolgulu katmanlar yer almakta. Katmanlar tünel eksenine paralel doğrultudadır. Aşırı parçalı ve mineralojik bileşimi nedeniyle grafit şist, dış etkenlere, özellikle suya karşı çok duyarlı olduğu yüzeye yakın kesimlerde çok ayrışmalı ve zayıf kaya türüdür. Levhalar halinde kolayca ayrılabilir yapıdadır. Sıcaklık ve basınç etkisi altında metamorfizmaya uğraması sonucu yapraklanmalı kayaçlara dönüşür. Klorit şistlerde yapraklanma düzlemlerinin konumları grafit şistin konumu ile benzerdir. Magmatik kayalarda piroksen, amfibol ve mika minerallerinin alterasyonu ile oluşur. Klorit şist metamorfik kayalarda yaygın olarak bulunan ve yeşil şist türünü karakterize eden bir kayaçtır.

7.3.2. Metakumtaşının mühendislik özellikleri

Grafit şist birimi içerisinde ara seviyeler şeklinde bulunan metakumtaşı; gri renkli, ince ve orta taneli, az-orta derecede ayrılmış; sert ve orta dayanımlıdır. Kum tanelerinin çimentolaşma ile yapışması sonucu oluşan fiziksel tortul kayaç türüdür. Tünel güzergahında koyu renkte bulunmaktadır. Tüm kumtaşları aynı genel minerallerden oluşur. Bu mineraller kuvars, fedispatlar ve litik şeklindedir.

Sıcaklık ve basınç altında kumtaşı çimentolaşması artmakta ve böylece dayanımı artmaktadır. Farklı ortamlar farklı metakumaşlarını oluşturabilir. Tünel güzergahında sıkı az su ortamı görülmüştür.

7.3.3. Metakonglomera mühendislik özellikleri

Konglomera çapı 2mm'den daha büyük kum ve çakılın basınçla birleşmesi ve zamanla sertleşmesi sonucu oluşur. Kum, silt ve killi meta konglomeraların matrisinde dolgu görevi görür. Çakıldan daha küçük ve ince taneli tortul kayalardır. Kumtaşları gibi ince malzemelerin çimentolaşması sonucu meydana gelir. Konglomeralar yüksek enerjili, basınçlı ortamlarda meydana gelir. Metakonglomera metamorfizma geçirmiş konglomeradan oluşmaktadır. Açık gri renkte, ince ve iri taneli, az ayrılmış, köşeli ve yuvarlak; sert ve orta dayanımlıdır.

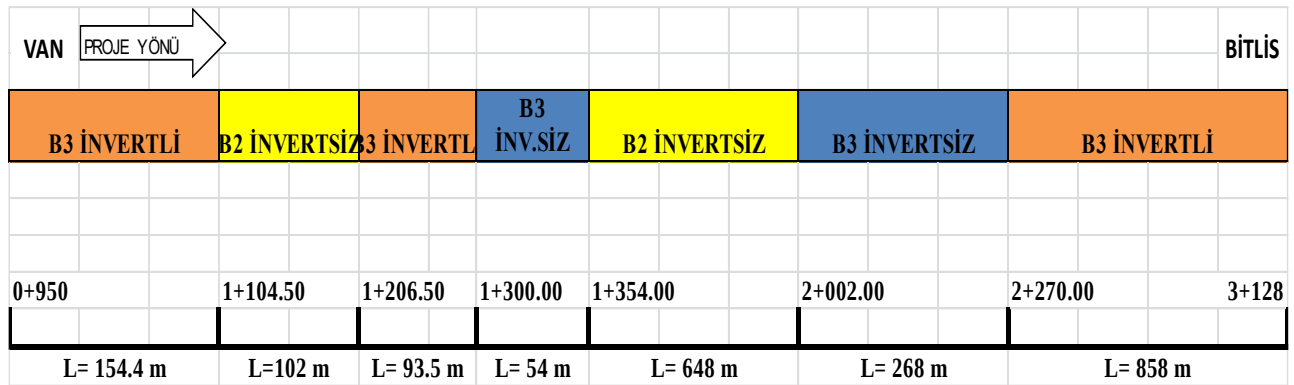
7.4. Zemin Parametreleri

Kuskunkıran tüneline görülen zemin parametreleri GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi), RMR, Hoek-Brown sayıları ve kay mekaniği deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile tespit edilmiştir. Kaya sınıflarına ait kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve elastisite modülü (E) değerleri zemin hakkında önemli bilgileri içerir. Bu değerlerden kohezyon zemin malzemesinin yapışmasını, normal efektif gerilmeden bağımsız olarak makaslama dayanımını; İçsel sürtünme açısı malzemenin basınç altında kayma gerilmesine karşı dayanımını; Elastisite modülü ise malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyduğu direncini ifade etmektedir. Kuskunkıran tünel güzergahının tümünde ortaya çıkan zemin türleri tablo 7.1'de verilmektedir.

Tablo 7.1 Zemin parametreleri (Ensari, 2008).

	c (kPa)	ϕ	E (Gpa)
B2	250	36°	7
B3	150	30°	3
C2	100	27°	1.7

Tünel yapımı öncesi güzergahta bazı yerlerde C2 zemin türü öngörülmesine rağmen tünel çalışması sırasında karşılaşılmamıştır. Bununla birlikte görülen zemin türleri bulundukları konumları, aralıkları ve uzunlukları şekil 7.3'te gösterilmektedir. Çoğunlukla B3 zemin türünde çalışılmıştır.



Şekil 7.3 Kuskunkıran tüneli kaya sınıflandırmaları (NATM) (KGM'den alınmıştır).

Lejant

	B3 İnvertli
--	-------------

	B3 İnvertsiz
	B2 İnvertsiz

İnvertli kısım toplam uzunluk: **1106m**

İnvertsiz kısım toplam uzunluk: **1072m**

Tünel inşaatında destek sistemleri yapımında püskürtme betonu, kaplamada normal dayanımlı beton, alt temel yapımında ise grobeton kullanılmıştır. Kaplama betonu imalatında nervürlü betonarme donatı çeliği kullanılmıştır. Bunlara ait değerler tablo 7.3'te verilmektedir.

Tablo 7.2 Kullanılan malzeme özellikleri (KGM' den alınmıştır).

Beton	C30/37
Grobeton	C16/20
Püskürtme Beton	C20/25
Donatı	S420

7.4.1. Kaya sınıflandırmaları

7.4.1.1. B2 Kaya sınıfı

Çok gevrek kaya kütlesi olarak sınıflandırılır. Desteklemenin kazıdan hemen sonrasında yapılması durumunda deformasyon gözlenmez, desteklemenin gecikmesi durumunda kopmalar ve sökülmeler meydana gelir. Lokal kırıklar veya bozukluklar gerekir bu nedenle kemer kazısında süren uygulama ihtiyacı vardır. Ortamda su bulunması durumunda kaya mukavemetine olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Bu nedenle su çıkışı var ise gerekli drenajlar yapılmalıdır. Tünel kazısından hemen sonra sistematik destekleme gereklidir. Taban kemerine ihtiyaç duyulmadığından "İnvertsiz" olarak sınıflandırılır.

7.4.1.2. B3 Kaya sınıfı

Taneli kaya kütlesi olarak adlandırılır, bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler ve çökmeler görülebilir. Kohezyonun az olması kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur. Büyük kazı yapılması durumunda sökülmeler meydana gelir. Destek sistemi alt ve üst yarı olarak iki bölümde uygulanarak ilerlenir. Kaya içerisinde su bulunması durumunda kayanın dayanımı düşmektedir. Üstyarı mesafesi 1-1.50m'dir. Jeolojik koşullara göre "İnvertli" veya "İnvertsiz" (Taban kemerli veya taban kemersiz) olarak yapılır. Ayrıca tünel kayasını temsil eden B2 ve B3 kaya sınıfı için NATM kaya sınıflandırılmasında önerilen desteksiz durma süreleri;

B2 (çok gevrek) 5-10 saat

B3 (taneli) 2 saat

Q ve RMR değerleri ve ölçülen değerlere göre NATM kaya sınıflandırılması dikkate alındığında kazının B2, B3 ve C2 kaya sınıfları için üstyarı ve altyarı şeklinde aşamalı olarak yapılması stabilite yönünden uygun olacağı görülmüştür. Ancak C2 kayası çıkmadığı için çalışmalar B2 ve B3 üzerinden ilerlenmiştir. Delme-patlatma yöntemi ile açılacak tünellerde ilerleme uzunluğu zeminin desteksiz durma süresi, desteksiz açıklık ve destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlıdır. Buna göre tüneli temsil eden B2 ve B3 kaya sınıfları için önerilen ilerleme uzunluğu aşağıdaki değerlerle sınırlandırılmıştır. Ancak tünel girişlerinin stabilitesi düşük olduğundan ilk birkaç metresinde bu uzunluklar maksimum 1.0m'den kadar alınmıştır.

B2 2.0-2.5m / 3.5m

B3 1.0-1.5m / 3.0m

Kazı aynası ilerlemesinde desteklenmiş üstyarı kazısı ile altyarı aynası arasındaki mesafe mümkün olduğu ölçüde kısa tutulmuştur. B2 için 30-40m, B3 için 20-30m arasında değişen bu mesafe jeolojik koşullar göz önüne alınarak değişiklik göstermiştir. Yapılan arazi çalışmaları sırasında tünel kazı çalışmalarında üstyarı ve altyarı ayna açılımında standartlara uygun bir şekilde ilerleme yapılmıştır. Tünel yapımı sırasında kazı ve tünel emniyeti için deformasyon ölçümleri belirli periyotlarla yapılmıştır.

7.5. Kazı Sırasında Jeolojik Harita Alımı

Tünel kazısı sırasında jeolojik koşulların belirlenmesi amacıyla sistematik haritalama yapılmaktadır. Tünel güzergahının belirlenmesinde giriş ve çıkış portallarının çakıştırılmasında harita verilerinden yararlanılır. Yapımda stabilite problemlerinin, çözümünde önemli bir veri kaynağı oluşturan bu haritalar vasıtasıyla litolojik sınırlar, süreksizliklerin konumu ve kaya sınıflandırması değerleri belirlenmektedir. Harita verilerine ve kayaların uzanış doğrultularına göre ileride yapılacak kazı ve destek sistemleri tahmin edilir. Haritalar litolojik sınırları, fay hatlarını, süreksizlikleri, süreksizliklerin miktarını, aralığını ve açıklığını, kaya kütlelerinin karakteristiklerini, su durumunu, kazı sırasındaki sökümleri vs. parametreleri gösterir. Tünel aynasının doğru kesitte kazılması için sürekli doğrultu ölçümleri yapılır. Tünel jeolojik yapılarının haritalanması ve ayna kazı kesitlerinin çizilmesi için yine harita verilerinden yararlanılır.

7.6. Destek Tipleri

7.6.1. B2 Destek türü

Çok gevrek olarak tanımlanan bu kaya kütlelerinde desteklemenin zamanında yapılması gerekmektedir. Zamanında yapılan destek sistemi ile deformasyonlar önlenir. Destek uygulamasının zamanında yapılmaması veya yetersiz olması durumunda kalınlığı plastik zona kadar ulaşan gevşemeler ve çökmeler görülebilir. Tünel kemer kısmı ve yan ayaklarında gerekli destekler B2 zeminine uygun yapılır. Kuskunkıran tüneline giriş portalından sonra genelde “B2” destek türü kullanılmıştır. Kaya koşulları su çıkışı durumları dikkate alınarak B2 türü zemin için B2 destek sistemi yapılmıştır. Bu destek türünde aşağıdaki uygulamalar yapılmıştır. Bunlar:

- Püskürtme beton ($d_s = 15\text{cm}$)
- Çelik hasır (1 kat)
- Sistematik bulon ($L = 4.0\text{m}$ uzunluğunda, $2.0 \times 2.0\text{m}$ aralıklı SN-bulon)

7.6.2. B3 Destek türü

B3 kaya sınıfında yapılan kazılarda kaya kütlelerinde dökümler meydana gelir. Kohezyonu düşük, tünel kayasının parçalı ve zayıf olması stabilite sorunları oluşturur. Bu nedenle B2 kaya sınıfında olduğu gibi B3 kaya sınıfında da mutlaka destek sistemleri uygulanmalıdır. B2 zemininde koşulların zorlaşması ve fay zonlarıyla karşılaşılması durumunda stabilitenin korunması için daha fazla tahkimata ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle B3 türü destek sistemi bu tür bölgelerde kullanılmıştır. Ayrıca B3 zemin türünde yine B3 destek sistemi uygulanmıştır. Giriş ve çıkış portallerindeki kazılar nedeniyle zeminde gevşemeler meydana gelmektedir. Bu gevşeme ve çökmeleri kontrol altına almak için tünelin giriş çıkıştaki ilk 10m’lik kısmı için B3-P destek sistemi uygulanmıştır. B3 ve B3-P destek sınıfı aşağıdaki uygulamalar ile oluşturulmuştur. Bunlar:

- Püskürtme beton (B3’te $d_s = 20\text{cm}$ / B3-P’de $d_s = 25\text{cm}$)
- Çelik hasır (2 kat)
- Çelik kasa (M/M 1.0m)
- Sistematik bulon ($L = 4.0\text{m}$ uzunluğunda, $1.5 \times 1.0\text{m}$ aralıklı SN-bulon)
- Enjeksiyonlu süren ($L = 4.0\text{m}$, iksade bir)
- Taban kemer betonu

8. KUSKUNKIRAN TÜNELİ YAPIM AŞAMASI EK FOTOĞRAFLAR



Şekil 8.1 Kalıp aşamasında tünel portal girişi.



Şekil 8.2 Betonu dökülmüş tünel portal girişi.



Şekil 8.3 Kazı aynası ve sürenler.



Şekil 8.4 Beton kaplaması yapılmış tünel içi.

KAYNAKLAR

1. **Aktaş, S. Ş.**, (2009). Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
2. **Arioğlu, E.**, (1998). Kaya tahkimatının felsefesi ve kaya bulonlarının kritik olarak irdelenmesi.
3. **Arioğlu, E.**, (2008). Tünel Ders Notları. *Yıldız Teknik Üniversitesi*,
4. **Arioğlu, E.**, (2009). Tünel Dersi Notları.
5. **Bozkurt, M.**, (1987). Tüneller Ders Notları, *İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul.
6. **Ergin, K.**, (1992). Yeni Avusturya tünel inşa yönteminde sonlu elemanlar yöntemiyle tünel kaplaması hesabı, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.
7. **Ersoy H.**, (2021). Tüneller ve Kaya Kütle Sınıflamaları. Ders Notları KTÜ.
8. **Ertunç, A.**, (1983). Tünellerde yapılan kaya sınıflamaları. Tünelcilik Semineri, Ankara.
9. **Güz, H.**, (1985). Kayada tünel, iksa ve deformasyon hesapları, *TMMOB İMO*.
10. **Kahyaoğlu, H.**, (2008). TAG otoyolu özelinde tünel işleri ve yeni Avusturya tünel açma yöntemi, *İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara.
11. **Karagöz, S D.** (2007). Kağıthane-Piyalepaşa tünelleri mühendislik jeolojisi çalışması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
12. **Karaoğlu, H.**, (2002). Kaya zeminde tünel tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
13. **KGM Envanteri** (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü Otoyolları Dairesi Başkanlığı, “Otoyollarında Büyük Sanat Yapıları Envanteri” KGM matbaası.
14. **Polat D.**, (2010) NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*.
15. **Rapor** (2014). Bağlantı Yolları 0+000-3+612.46km Arası Jeolojik-Jeoteknik Araştırma Raporu.
16. **Rapor**, (1983). Gevaş (Van) Dolayının Jeolojisi MTA Raporu (Yayınlanmamış), Ankara.
17. **Şeker, Ö.**, (2008). Yeni Avusturya prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
18. **Şengün, M.**, (1984). Bitlis Masifi Tatvan Güneyinin Jeolojik ve Petrografik İncelemesi. *Doktora Tezi*, Ankara.
19. **Şenol ve Ark.**, (2005). Van Gölü Havzası Güney ve Doğu Kesiminde Yer Alan, Üzerlerinde.
20. **Tarakçı, M, Bulutlar, E. ve Genç, D.**, (1985). Tünelcilik ve Jeoloji, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, Ankara.
21. **Türkunal, S.**, (1980). Doğu ve Güneydoğu Anadolu’nun Jeolojisi, *Jeoloji Mühendisleri Odası yayını no.8*, Ankara.
22. **Uğurel, Ş.**, (2010). Türkiye’de Metro Projeleri Yatırımlarının Geri Dönüşüm Süresinin Belirlenmesi Ve Bu Sürenin Optimizasyonu İçin Öneriler. *Yüksek Lisans Tezi*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
23. **Ulusay, R., Sönmez, H.**, (2007). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, Ankara.
24. **Yılmaz. O.**, (1975). Cacas Bölgesi (Bitlis Masifi) Kayaçlarının petrografik ve Stratigrafik İncelemesi, Ankara.
25. **Yılmaz E. M.**, (2000-2007). Bitlis-Baykan I. Sınıf Devlet Yolu Jeolojik.
26. **Ersoy H.**, (2021). Tüneller ve Kaya Kütle Sınıflamaları. Ders Notları KTÜ.
27. **Ensari, B.**, (2008). Kuskunkıran Tünelinin Jeolojik – Jeoteknik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*. Van YÜ Fen Bilimleri Ens.