

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNELLER VE TASARIM İLKELERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

**AĞUSTOS 2007
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNELLER VE TASARIM İLKELERİ

İnş. Müh. Hasan Tahsin ÖZTÜRK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30/07/2007
Tezin Savunma Tarihi : 16/08/2007**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Tüneller ve tasarım ilkeleri konusundaki bu çalışmayı bana önererek yoğun çalışma programına rağmen çalışmamı başlangıcından yazımına kadar sürekli takip edip, bu süre içinde bana araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşıl原因an, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Ing. Sayın Ahmet DURMUŞ'a minnet ve şükranlarımı sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Çalışmalarım sırasında özel ilgilerini gördüğüm İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Sayın Mahir VARDAR'a, çalışmalarım için bana kaynak temin eden UBM A.Ş. Kontrol Mühendisi Sayın Ahmet USTAOĞLU'na, püskürtme beton konusunda destek aldığım Beksa firması Teknik Müdürü Sayın Mehmet YERLİKAYA'ya, sürekli dayanışma içinde olduğum arkadaşlarım Sayın Mehmet Emin ARSLAN, Ayşegül DURMUŞ, Ender ÖZ ve Emel TÜRKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu vererek ödüllendiren ve bu suretle çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı yöneticilerine de teşekkür ederim.

Burada, öğrenim boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anarken, çalışmam süresince beni destekleyen nişanlım Nurcan HACISALİHOĞLU'na teşekkür eder, ömrünü benim yetişmeme adayan, fedakârlıklarını asla unutamayacağım anne ve babama müteşekkir olduğumu belirtir çalışmamın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.

Hasan Tahsin ÖZTÜRK
Trabzon, 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER DİZİNİ.....	XIII
1. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tanım, Tarihçe ve Sınıflandırma.....	2
1.2.1. Tanım.....	2
1.2.2. Tarihçe.....	3
1.2.3. Sınıflandırma	5
1.2.3.1. Enkesitlerine Göre Sınıflandırma.....	5
1.2.3.2. İşlevlerine Göre Sınıflandırma	6
1.2.3.3. Yapım Şekline Göre Sınıflandırma	11
1.3. Tünel İnşası İçin Gerekli İncelemeler	12
1.3.1. Jeolojik ve Geoteknik İncelemeler.....	14
1.3.1.1. İnşaat Başlamadan Önce Yapılan Çalışmalar	14
1.3.1.2. İnşaat Esnasındaki Çalışmalar.....	14
1.3.1.3. Kullanım Aşaması Çalışmaları.....	15
1.3.2. Tünel Güzergâhının Seçimi ve Boykesit Belirlenmesinde Dikkat Edilecek Hususlar.....	15
1.3.2.1. Güzergâh Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar	15
1.3.2.2. Boykesit Belirlemede Dikkat Edilecek Hususlar	17
1.4. Güzergâh Zeminine Göre Tünel İnşası	19
1.4.1. Kayaç Zeminlerde Tünel İnşası.....	20
1.4.1.1. Delme-Patlatmayla Tünel İnşası	20

1.4.1.2.	Özel Delgi Aygıtlarıyla Tünel İnşası.....	21
1.4.2.	Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası.....	24
1.4.2.1.	Kalkanla.....	26
1.4.2.2.	Boru Sürmeyle.....	27
1.4.2.3.	Açıp- Kapamayla.....	27
1.4.2.4.	Şemsiyelemeyle (Boru kemer yöntemiyle).....	28
1.4.3.	Sualtında Tünel İnşası.....	29
1.4.3.1.	Batırılmış Tünellerin İnşa Aşamaları.....	29
1.4.3.2.	Batırılmış Tünellerin Geleneksel Tünelere Göre Üstünlük Ve Sakıncaları.....	31
1.4.4.	Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi.....	32
1.5.	Tünel İnşaatlarında Karşılaşılabilen Bazı Sorunlar.....	36
1.5.1.	İnşa Esnasında Su Çıkması.....	36
1.5.2.	Kaplamalara Tabakalı Zeminlerden Aşırı Basınç Gerilmelerinin Etkimesi.....	37
1.5.3.	Kaplamalara Antiklinal ve Senklinallerde Farklı Basınç Gerilmelerinin Etkimesi.....	37
1.5.4.	Yamaç Tünellerinde Stabilitenin Bozulması.....	39
1.5.5.	Tünel Güzergah Zemininde Kırıkların Bulunması.....	39
1.5.6.	İnşaat Esnasında Kaya Patlaması.....	40
1.5.7.	Derin Tünellerde Sıcaklık Artışı.....	40
1.5.8.	Yeraltı Gazlarının Etkisi.....	40
1.5.9.	Asfalt Yol Kaplaması Nedeniyle Oluşan Sorunlar.....	41
1.5.10.	Aydınlatma Sorunları.....	41
1.5.11.	Patlatma Sorunları.....	41
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER.....	43
2.1.	Tünel Kaplamaları.....	43
2.1.1.	Kaplama Çeşitleri.....	43
2.1.1.1.	Dökme Beton Kaplamalar.....	44
2.1.1.2.	Püskürtme Beton Kaplamalar.....	46
2.1.1.3.	Prefabrike Kaplamalar.....	51
2.1.2.	Kaplamalara Etkiyen Yükler.....	52
2.1.2.1.	Zemin Yükleri.....	52
2.1.2.1.1.	Düşey Yüklerin Belirlenmesi.....	52

2.1.2.1.2.	Yatay Yüklerin Belirlenmesi	72
2.1.2.1.3.	Taban Basınçları	72
2.1.2.1.4.	Yeraltı Suyunun Bulunması Durumu	72
2.1.2.2.	Hareketli Yükler	74
2.1.2.2.1.	Tünel İçinden Etkiyenler	74
2.1.2.2.2.	Örtü Zemini Yüzeyinden Etkiyenler	75
2.2.	Kaplamaların Yapısal Çözümlemesinde Kullanılan Bazı Yöntemler	75
2.2.1.	Ampirik Yöntemler	75
2.2.1.1.	RSR Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre	77
2.2.1.2.	RMR Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre	78
2.2.1.3.	Q Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre	80
2.2.2.	Analitik Yöntemler	81
2.2.2.1.	Kesiti Elemanlara Ayırarak Çözümleme	81
2.2.2.1.1.	Tavan Kemerinin Yapısal Çözümlemesi	82
2.2.2.1.2.	Taban Kemerinin Yapısal Çözümlemesi	86
2.2.2.1.3.	Tünel Yan Duvarının Yapısal Çözümlemesi	88
2.2.2.2.	Kesiti Elemanlara Ayırmadan Çözümleme	91
2.2.2.2.1.	Düşey Yüke Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi	92
2.2.2.2.2.	Yatay Birim Yüke ($p_h=1$) Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi	96
2.2.2.2.3.	Yatay Yerdeğiştirmeler ve Yatay Yükün Belirlenmesi	99
2.2.2.3.	Birleşik Elemanlı Dairesel Kaplamaların Yapısal Çözümlemesi	102
2.2.3.	Sayısal Yöntemler Hakkında Hatırlatmalar	112
2.2.3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi	112
2.2.3.2.	Sonlu Farklar Yöntemi	114
2.2.3.3.	Sınır Elemanlar Yöntemi	114
2.2.3.4.	Karma Yöntemler	114
2.3.	Sayısal Uygulama I	115
2.3.1.	Analitik Yöntemle Tünel Kaplamasının Yapısal Çözümlemesi	115
2.3.1.1.	Düşey Yüke Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi	116
2.3.1.2.	Yatay Yüke Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi	118
2.3.1.3.	Yatay Yerdeğiştirmeler ve Yatay Yükün Belirlenmesi	118
2.3.2.	Sayısal Yöntemle Tünel Kaplamasının Yapısal Çözümlemesi	121

2.4.	Sayısal Uygulama II	123
2.4.1.	Zeminin Yatak Katsayısına Göre Eğilme Momenti Değişiminin İncelenmesi	123
2.4.2.	Tünel Çapına Göre Moment Dağılımının Değişiminin İncelenmesi.....	125
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
4.	KAYNAKLAR.....	129
5.	EKLER	133
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Bayındırlık yapılarının bir sınıfını teşkil eden tünellerin; ulaşım, savunma, sığınma ve depolama gibi birçok amaçla inşa edildiği bilinmektedir. Günümüzde şehirlerin büyümesi yol standartlarının iyileştirilmesi, savunma ve sığınak ihtiyaçlarının artması, arazinin engebeli ve/veya değerli oluşu gibi nedenlerle bu yapıların inşasına çok daha fazla gereksinim duyulmaktadır. Günümüz koşulları bundan böyle Türkiye’de yaygın olarak inşa edilen ulaşım tünelleri yanında savunma amaçlı tünellerin de yapımına önem verilmesi gerektiğinin düşündürmektedir.

Bu yapıların tasarımları, yapısı çok karmaşık olan zeminle özel etkileşimlerinden dolayı diğer yapılara göre daha fazla disiplin mensubu teknik elemanların teknik literatürde mevcut tasarım yöntemlerinden, ülke ekonomisiyle bağdaşan bir emniyeti sağlama yönünden en uygun olanını seçerek birlikte çalışmalarını gerektirmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı tüneller konusunda bir sentez çalışması yardımıyla bu yapıların tasarımlarında kullanılan teknik literatürde mevcut, tanınmış bazı analitik yöntemleri aynı simgeler altında tasarımlarda kullanımlarını kolaylaştıracak şekilde sistematik olarak açıklamaktır. Böylece tünelcilikte çalışan mühendislere zemin yapısına göre uygun yöntemi seçme kolaylığı tanıyabileceği düşünülmektedir.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma üç asıl bölüm ve bir ekler bölümünden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup burada tünellerin tarihçesi, sınıflandırılması, yapım için gerekli incelemeler, zemine göre yöntem seçimi ve yapım esnasında karşılaşılabilecek sorunlar üzerinde durulmaktadır. İkinci bölümde tünel kaplamaları, bunların yapısal çözümlenmesinde kullanılan tanınmış bazı ampirik ve analitik yöntemler aynı simgeler altında kullanımını kolaylaştıracak şekilde açıklanmakta, sonlu elemanlar yöntemi hakkında bazı hatırlatmalar ile yöntemlerden birine ilişkin geliştirilen bilgisayar programıyla gerçekleştirilen sayısal uygulama da burada verilmektedir.

Üçüncü bölüm sonuç ve önerilere ayrılmış olup bu son bölümü kaynaklar listesi ile bir nal enkesitli tünelin yapısal çözümlenmesi için geliştirilen bilgisayar programını ve ampirik yöntemlerin kullanımına ilişkin bazı çizelgelerin verildiği bir ekler bölümü izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Tüneller, Kaplamalar, Tasarım, Yöntem, Analitik, Sayısal

SUMMARY

Tunnels and Design Principles

It is known that tunnels, a kind of public works, are built for transportation, defending and storing. Nowadays, it is required much more construction of these structures because of broadening of cities, stabilization of road standards, increasing of defence and shelter needs, being uneven or/and valuable of land. In Türkiye, transportation tunnels are built widely. In addition, present conditions are required construction of defence tunnels.

The design of tunnels requires a cooperative study of engineers from different branches more than other types of structures because of a special interaction between the tunnel and the ground.

The principle goal of this study is to make synthesis study concerning subject of tunnels and explain systematically known analytical methods used design of this structures by easing their usage with same symbols by means of this study. Thus, it is thought that engineers working subject on tunnel are provided for choosing suitable method compatible with ground.

The study performed for this purpose includes three main chapters and one appendix. In the first chapter short history and classification of tunnels, essential investigations for construction, choosing method compatible with ground and encountered problems during construction are emphasized. In the second chapter, information about tunnel lining is given and some known analytical and empirical methods used in their structural analysis are explained by using same symbols. Furthermore, some reminding about finite element methods is presented and numerical applications for one of the analytical methods are made by developed computer program in this chapter.

The main results and suggestions are summarised in the third chapter and this last chapter is followed by the list of references and an appendix including source code of program developed for structural analysis of a tunnel lining and charts for empirical methods.

Key Words: Tunnels, Linings, Design, Method, Analytical, Numerical

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri	6
Şekil 1.2. Karayolu tünellerine ilişkin tipik bir enkesit şekli.....	7
Şekil 1.3. Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli	7
Şekil 1.4. Metro ve kanal tünellerinden örnek birer görünüm.....	8
Şekil 1.5. Maden galerilerine ilişkin örnek bir görünüm	8
Şekil 1.6. Su iletim tüneli enkesit örnekleri.....	9
Şekil 1.7. Kanalizasyon ve bazı hizmet tünellerine ilişkin enkesit örnekleri	9
Şekil 1.8. Stokaj amaçlı tünel türü bir otopark görünümü.....	10
Şekil 1.9. Bir yer altı hidroelektrik santrali kesiti.....	11
Şekil 1.10. Tünel tasarım akış şeması.....	13
Şekil 1.11. Tünel güzergâhının faylara göre önerilen ve önerilmeyen konumları.....	16
Şekil 1.12. Vadiye yakın geçecek olan uzun tünel durumunda güzergâh saptırılarak yolun bir kısmının açık havadan geçmesinin tünelde süreksizlik oluşturmak suretiyle sağlanmasına ilişkin şematik bir gösterim	17
Şekil 1.13. Bir yönde ve iki yönde eğimli şematik boykesit örnekleri.....	18
Şekil 1.14. Metro tünellerinin boykesidinde uygun istasyonların yerleştirilmesine ilişkin şematik bir örnek	19
Şekil 1.15. Büyük açıklıklı tünellerin Tepe-Çekirdek yöntemiyle açılmasına ilişkin şematik gösterimler	20
Şekil 1.16. Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılış anından bir görünüm.....	21
Şekil 1.17. Tam kesitte tünel açma aygıtından bir görünüm	22
Şekil 1.18. Kazı yapan kollu tünel açma makinesinden bir görünüm	24
Şekil 1.19. Boru sürme yöntemiyle açılan bir tünel örneği	27
Şekil 1.20. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen bir metro tüneli görünümü	28
Şekil 1.21. Şemsiyeleme yönteminde zemin çivilerinin görünümü	28
Şekil 1.22. Bir suyolunun geçmek için çeşitli seçenekler.....	29
Şekil 1.23. Batırılmış çelik tünel kesitlerine ilişkin örnekler	30
Şekil 1.24. Batırılmış betonarme tünel kesitlerine ilişkin örnekler	30
Şekil 1.25. Batırılmış yüzen tünellerin çeşitli bağlantı türleri	32

Şekil 1.26. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerine göre açılan tünel çevresinde oluşan gevşeme örnekleri	33
Şekil 1.27. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerinde kullanılan iksa örnekleri.....	34
Şekil 1.28. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerinde gerçekleştirilen iksa durumlarına ilişkin şematik örnekler	35
Şekil 1.29. Zemin basıncının tünel yan duvarlarında ve tünel tavanında yoğunlaştığı zemine ilişkin tabakalanma durumları.....	37
Şekil 1.30. Antiklinal ve senklinal eksenini dik olarak kesen bir tünel boykesiti	38
Şekil 1.31. Senklinal ve antiklinal eksenini boyunca açılan tünel enkesiti örnekleri	38
Şekil 1.32. Yamaç eğimini zemin tabakalanmasıyla aynı doğrultuda olduğu, kıvrımlı tabakalanma ve çatlaklı zemin örtüsü durumlarında yamaç stabilitesinin bozulmasına ilişkin şematik örnekler	39
Şekil 2.1. Kesme taş kaplamalı 1893'de inşa edilen Totkey Tünelinden bir görünüm	43
Şekil 2.2. Tuğla kaplamalı Kitasui Demiryolu Tüneli'nden bir görünüm.....	44
Şekil 2.3. Örnek bir tünel taban kalıbı	45
Şekil 2.4. Tüm kesitin bir defada beton dökümüne imkân veren kalıp şeması	46
Şekil 2.5. Kuru karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi.....	47
Şekil 2.6. Islak karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi	47
Şekil 2.7. Lifli ve liffsiz püskürtme betonların enerji tüketme kapasiteleri.....	49
Şekil 2.8. Tabakaları birlikte çalışan örnek bir kaplama	51
Şekil 2.9. Bierbaumer teorisine göre tünel kaplamalarına etiyen yüklerin belirlenmesinde dikkate alınan zemin kütlesi.....	52
Şekil 2.10. Tünel üzerindeki zemin kütlesine etkiyen kuvvetler	53
Şekil 2.11. Eszto teorisine ilişkin model.....	56
Şekil 2.12. Balla teorisine göre zemin yükünün hesabı için dikkate alınan model	62
Şekil 2.13. Tünel tasarımında kullanılan F_H , F_B ve F_C katsayılarının içsel sürtünme açısıyla değişimi	63
Şekil 2.14. Suquet teorisine göre tünel kaplamasına etkiyen düşey yükün belirlenmesinde dikkate alınan zemin	64
Şekil 2.15. Tünel tavanına etkiyen düşey zemin basıncını sınırlayan parabol	65
Şekil 2.16. Ritter teorisine göre tünel tavanına etkiyen zemin kütlesinden doğan düşey basıncın belirlenmesinde kullanılan model	68
Şekil 2.17. Tünel kaplamasına gelen zemin yükünü sınırlayan parabol.....	69
Şekil 2.18. Tünelere gelen basınçların hesabı için Engesser tarafından dikkate alınan şematik model.....	71
Şekil 2.19. Tünelere etkiyen düşey ve yatay zemin basınçlarının şematik gösterilimi	73
Şekil 2.20. Drenajlı ve drenajsız kaplamadan etkiyen su basınçları.....	74

Şekil 2.21. Tünel zemininin stabilitesini etkileyen bazı etmenler	77
Şekil 2.22. Elemanlara ayrılmış nal kesitli tünele etkileyen yükler	82
Şekil 2.23. Tünel tavan kemerine etkileyen yükler	82
Şekil 2.24. Tünel tavan kemerinde kesit etkilerinin hesaplandığı kesitlerin gösterilimi	84
Şekil 2.25. Taban kemerine etkileyen yükler	86
Şekil 2.26. Tünel yan duvarına etkileyen yükler	88
Şekil 2.27. Tünel enkesiti ve bu kesite etkileyen yükler	91
Şekil 2.28. Tünel kaplamasına etkileyen düşey yükler, izostatik esas sistem ve bu sistemin yüklemeleri.....	93
Şekil 2.29. Tünel Kaplamasının kubbe çapı düzeyinde uygulanan $p_h=1$ yatay yüklemesi	96
Şekil 2.30. Tünelin daire yayı şeklindeki duvarına etkileyen yatay zemin basıncı.....	97
Şekil 2.31. Dairesel kubbe çapı düzeyinden $H=1$ yüklemesi	100
Şekil 2.32. Birleşik elemanlı dairesel bir tünel kaplaması ve buna etkileyen yükler	103
Şekil 2.33. İzostatik esas sistem.....	104
Şekil 2.34. Kaplamanın yan duvarında ve tepe noktasındaki yerdeğiştirmelerin hesabı için birim yüklemeler.....	109
Şekil 2.35. Tüneller için tipik bir sonlu elemanlar ağı.....	113
Şekil 2.36. Kullanılan tünel kesiti ve yüklemeler	116
Şekil 2.37. Düşey yüklemeden dolayı oluşan moment dağılımı.....	117
Şekil 2.38. Yatay+düşey yüklemeden oluşan moment dağılımı.....	120
Şekil 2.39 Yapısal çözümleme programında uygulanan düşey yükleme	121
Şekil 2.40. Yapısal çözümleme programında uygulanan yatay yükleme	121
Şekil 2.41 Düşey yüklemeden elde edilen moment dağılımı.....	122
Şekil 2.42. Düşey+yatay yüklemeden elde edilen moment dağılımı.....	122
Şekil 2.43. Kaplamanın çeşitli noktalarındaki momentlerin zeminin yatak katsayısına göre değişimi	125
Şekil 2.44. Tünel çapına göre çeşitli kesitlerdeki eğilme momentlerinin değişimi	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1.	Kuru ve ıslak yolla üretilen püskürtme betonların karşılaştırılması	48
Çizelge 2.2.	Farklı zeminler için etkili zemin yükseklikleri	58
Çizelge 2.3	Farklı zemin ve tünel yarıçapına göre etkili zemin örtü kalınlığı.....	59
Çizelge 2.4.	Terzaghi'ye göre tünel tavanına etkileyen zemin yükseklikleri	60
Çizelge 2.5.	Farklı tünel yarıçapları için etkili örtü zemini kalınlıkları	60
Çizelge 2.6.	Farklı zemin sınıflarında hesaplanan $\tan\phi/\beta$ değerleri.....	61
Çizelge 2.7.	Seçilen $\tan\phi/\beta$ değerleri ve H/R 'nin değerlerine göre hesaplanan α değerleri	62
Çizelge 2.8.	İçsel sürtünme açısına bağlı F_H , F_B ve F_C katsayılarının değerleri	63
Çizelge 2.9.	Bazı zeminlerin yaklaşık gevşeme katsayıları	66
Çizelge 2.10.	RQD değerine göre zemin kalitesi	77
Çizelge 2.11.	RMR ölçütüne göre zemin sınıfları ve bunların yorumu	79
Çizelge 2.12.	RMR ölçütüne göre gereken tünel iksaları	79
Çizelge 2.13.	Zeminin Q değeri ve sınıfları	80
Çizelge 2.14.	Kazı tipine göre kazı destek oranı.....	81
Çizelge 2.15.	Kemer yüksekliğinin açıklığına oranına bağlı olarak kemerin çeşitli kesitlerindeki α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları.....	84
Çizelge 2.16.	Dış yüklemelerden dolayı oluşan kesit etkilerinin dağılımları	106
Çizelge 2.17.	Açıklığı 3-11 m arasında değişen tüneller için çeşitli zeminlerdeki yatak katsayıları	123
Çizelge 2.18.	Çözüm yapılan durumlarda yatak katsayılarının değerleri	124
Çizelge 2.19.	Çeşitli yatak katsayılarına ilişkin bazı kesitlerdeki moment değerleri	124
Çizelge 2.20.	Çeşitli tünel çaplarına ilişkin bazı kesitlerdeki moment değerleri.....	126

SİMGELER DİZİNİ

B	: Tünel üzerine etkiyen düşey basıncın genişliği
b	: Tünel genişliği
c	: Zemin kohezyonu
E	: Elastisite modülü
f	: Zemin sürtünme katsayısı
H	: Tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığı
h	: Tünel üzerindeki etkili zemin örtü kalınlığı
R	: Tünel yarıçapı
t	: Kaplama kalınlığı
c_f	: Tünele ilişkin elastik merkezin anahtar kesitine uzaklığı
f_r	: Kayaç basınç dayanımı
f_l	: Kaplama dayanımı
G_k	: Tünel kemerinin ağırlığı
H_H	: Yatay yükten oluşan yatay kuvvet
H_T	: Toplam yatay kuvvet
H_V	: Düşey yükten oluşan yatay kuvvet
h_t	: Tünel yüksekliği
J_a	: Eklem ayrışma katsayısı
J_n	: Eklem takımı katsayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük katsayısı
J_w	: Eklem suyu indirgeme katsayısı
K_a	: Aktif zemin yatay basınç katsayısı
k_s	: Zemin yatak katsayısı

- K_{θ} : Mafsal rijitlikleri
- M_H : Yatay yükten oluşan moment
- M_h^I : Yatay yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmında moment dağılımı
- M_h^{II} : Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
- M_T : Toplam moment
- M_V : Düşey yükten oluşan moment
- M_V^I : Düşey yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
- M_V^{II} : Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
- M_0^{VI} : Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
- M_0^{VII} : Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
- M_0^{hI} : Yatay ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
- M_0^{hII} : Yatay ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
- M_1 : $X_1=1$ yüklemesi için moment dağılımı
- M_2 : $X_2=1$ yüklemesi için moment dağılımı
- P_f : Sürtünme kuvveti
- P_g : Gevşeyen zemin kütlelerinin ağırlığı
- p_h : Yatay zemin basıncı
- P_h : Yatay zemin itkisi
- P_{ha} : Aktif zemin yatay basınçlarının bileşkesi
- P_{hp} : Pasif zemin yatay basınçlarının bileşkesi
- p_v : Düşey zemin basıncı
- P_v : Düşey zemin basınçlarının bileşkesi
- V_H : Yatay yükten oluşan düşey kuvvet
- V_T : Toplam düşey kuvvet
- V_V : Düşey yükten oluşan düşey kuvvet
- X_1, X_2 : Hiperstatik bilinmeyenler

- α_M, α_H : Düşey yükler altında tünel kaplamasında oluşan kesit etkilerine ilişkin katsayılar
- β_M, β_H : Yatay yükler altında tünel kaplamasında oluşan kesit etkilerine ilişkin katsayılar
- γ_c : Betonun birim ağırlığı
- σ_{r0} : Zeminin dairesel kesitli tünele radyal doğrultuda uyguladığı basınç gerilmesi

Not: Simgeler dizisinde verilmeyen simgeler metnin içinde geçtikleri yerde tanımlanmıştır.

1. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bayındırlık yapılarının bir sınıfını teşkil eden tünellerin; ulaşım, savunma, sığınma, su iletimi ve depolama gibi birçok amaçla inşa edildiği bilinmektedir. Günümüzde şehirlerin büyümesi yol standartlarının iyileştirilmesi, savunma ve sığınak ihtiyaçlarının giderek artması, arazinin engebeli ve/veya değerli oluşu gibi nedenlerle bu yapıların inşasına çok daha fazla gereksinim duyulmaktadır. Özellikle dağlık bölgelerde planlanan çeşitli karayolu projelerinde, yüksek standartlı yolların yapılması için, tünellerin sıkça başvurulmuş bayındırlık yapıları olduğu da bir gerçektir. Günümüz koşulları bundan böyle özellikle Türkiye’de yaygın olarak inşa edilen ulaşım tünelleri yanında savunma amaçlı tünellerin yapımına da daha çok önem verilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Bu yapıların tasarımları, yapısı çok karmaşık olan zeminle özel etkileşimlerinden dolayı diğer yapılara göre daha fazla disiplin mensubu teknik elemanların, teknik literatürde mevcut tasarım yöntemlerinden ülke ekonomisiyle bağdaşan bir emniyeti sağlama yönünden en uygun olanını seçerek birlikte çalışmalarını gerektirmektedir. Zira tünel inşasında karşılaşılabilecek birtakım sorunlara ancak bu şekilde uygun çözümler bulunabilecektir.

Bu çalışmanın temel amacı tüneller konusunda bir sentez çalışması yardımıyla bu yapıların tasarımlarında kullanılan teknik literatürde mevcut, tanınmış bazı analitik yöntemleri aynı simgeler altında tasarımlarda kullanımlarını kolaylaştıracak şekilde sistematik olarak açıklamaktır. Böylece tünellerde çalışan mühendisler zemin yapısına göre uygun yöntemi seçme kolaylığını tanıyabileceği düşünülmektedir.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma üç asıl bölüm ve bir ekler bölümünden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup burada tünellerin tarihçesi, enkesitlerine, işlevlerine ve yapım şekline göre sınıflandırılması, tünel inşası için gerekli jeolojik ve geoteknik incelemeler, tünel güzergahının seçimi ve boykesit belirlenmesinde dikkat edilecek hususlar, güzergah zeminine göre kayaçta, yumuşak zeminde ve sualtında tünel inşa yöntemleri, Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi ve yapım ve kullanım aşamasında karşılaşılabilecek sorunlar üzerinde durulmaktadır. İkinci bölümde geçmişte kullanılmış bazı tünel kaplamaları hakkında bilgi verildikten sonra, günümüzde sıkça

kullanılan dökme beton, püskürtme beton ve prefabrikte kaplamalar tanıtılmaktadır. Bu tanımın ardından tünel kaplamalarına etkiyen yüklerin belirlenmesinde kullanılan teoriler, bunların yapısal çözümlemesinde kullanılan tanınmış bazı ampirik ve analitik yöntemler daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi, aynı simgeler altında kullanımını kolaylaştıracak şekilde açıklandıktan sonra, sayısal yöntemler hakkında bazı hatırlatmalar ile analitik yöntemlerden birine ilişkin geliştirilen bir bilgisayar programıyla gerçekleştirilen sayısal uygulama da burada verilmektedir.

Üçüncü bölüm sonuç ve önerilere ayrılmış olup bu son bölümü kaynaklar listesi ile bir nal enkesitli tünelin yapısal çözümlemesi için geliştirilen bir bilgisayar programının listesi ile ampirik yöntemlerden RSR, RMR ve Q sınıflandırma ölçütünün kullanımına ilişkin bazı çizelgelerin verildiği ekler bölümü izlemektedir.

1.2. Tanım, Tarihçe ve Sınıflandırma

1.2.1. Tanım

Demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal gibi bir ulaşım yada taşın yolunun bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan mümkün olmadığı yada ekonomik açıdan uygun bulunmadığı durumlarda bu yolların bir kısmının yeraltından geçirilmesine imkan tanıyan yer altı yapılarının tümüne tünel adı verilmektedir (Bozkurt, 1970).

Tüneller, bilimin gelişmemiş olduğu çağlardan beri, insanoğlunun çok ilgi duyduğu bir yapı türüdür. Bu nedenle uzun zaman bu yapılar mühendislerin önsözleri ve usta marifetiyle inşa edilmişlerdir. Ancak bu yapıların emniyetlerinin uygun bir masrafla sağlanıp sağlanmadığı belli olmadığından bu tür çözümler hiçbir zaman memnuniyet verici olmamıştır. Mühendislik biliminin özellikle kaya mekaniğinin 1950'lerden sonra hızla gelişmesi ve buna bağlı olarak geliştirilen analitik yöntemler tünel tasarımına bilimsellik getirmiş ve hatta ikinci dünya savaşından sonra meydana gelen gelişme diğer inşaat mühendisliği alanlarındakini oldukça geride bırakmıştır. Bununla beraber bugün de bir tünel ya da yer altı yapısının yerüstü yapıları kadar sağlıklı bir şekilde tasarlanması imkansız denecek kadar zor olmaktadır (Önalp, 1982).

Tünel inşasını gerektiren başlıca nedenleri:

- 1) Yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi eğimi sınırlandırılmış olan güzergâhlarda (geçkilerde) öngörülen eğimle dağlık arazide aşılamayan sırt ve tepelerin geçilebilmesi,
 - 2) Ekonomik yönden uygun olacaksa tünel inşası ile güzergâhı kısaltmak,
 - 3) Güzergahın önemli bir kısmının toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları yada çığlardan korunmak,
 - 4) Demiryollarında olduğu gibi, büyük yarıçaplı dönemeçlerin (virajların) uygulandığı güzergâhlarda dar bir vadinin yada sırtın dönülmesi sırasında büyük dolgu, yarma, köprü yada viyadüklerin çıkmasının uygun görülmemesi,
 - 5) Demiryollarında dağlık arazide helisel bir tünelle yükseklik kazanmak,
 - 6) Üzerindeki ulaşımı aksatmamak için akarsuların yada boğaz teşkil eden derin suların altından geçilmek istenmesi,
 - 7) İnşası ve bakımı masraflı olan kendini tutamayan zeminlerdeki büyük yarmalardan kurtulmaya çalışmak,
 - 8) Atık ve temiz suların isalesi, elektrik ve telefon kabloları ile gaz boruları gibi çeşitli tesisatlar için galeri ihtiyacı,
 - 9) Kamulaştırılması pahalı olan arazilerde bulunan yolların genişletilmesi yada yeni yolların açılmasının mümkün olmaması,
 - 10) Toplu taşımacılığın metro ile yapılma ihtiyacı,
- şeklinde sıralanabilir.

1.2.2. Tarihçe

Tüneller ve diğer yeraltı yapılarının tarihsel gelişim sırası: 1) Barınak, 2) Tapınak, 3) Maden galerileri, 4) Su temini ve suyla taşımacılık, 5) Savaş tünelleri, 6) Ulaşım tünelleri, 7) Kanalizasyon yapıları, 8) Koruma, 9) Hidroelektrik enerji üretim elemanları, 10) Artık madde stokaj yapıları, 11) Petrol ve gaz stokaj yapıları şeklinde özetlenebilmektedir.

İnsanoğlu barınak için kullandığı mağaralardan sonra ilk yeraltı yapısını tapınak amacıyla gerçekleştirmiştir. Mısır'daki Ebu Simbel (M.Ö. 1200), Hindistan'daki Bhaja tapınakları bu düşünceyi desteklemektedir. Burada Göreme'de diğer ihtiyaçlara ilaveten korunma amacıyla da yeraltında bir şehir oluşturulduğunu belirtmek uygun olmaktadır (Sandström, 1963).

Maden çıkartma amacıyla tünel ve galeri açma çalışmalarının da uygarlık tarihi kadar eski olduğu kabul edilmektedir. Günümüzde üstü açık maden işletmelere yeniden dönüş eğilimi bulunmakla birlikte 3000 m derinliğe inen altın madeni galerilerinin varlığı tünellerin maden mühendisliğinde de önemli olduğuna işaret etmektedir. Ancak maden mühendisliğinin tünel türü yeraltı yapılarına bakışının inşaat mühendisliğinkinden çok farklı olduğu da bir gerçektir. Zira maden mühendisliğinde güvenlik, cevherin alındığı sürece ve minimum düzeyde tutulan bir kavramdır. Oysa inşaat mühendisliğinde tüm yapılarda olduğu gibi tünellerde de emniyetten katıyetle taviz verilmemektedir.

Su temini ve iletiminin toplum hayatı için kaçınılmaz olduğu da bilinmektedir. İlk çağların yoğun yerleşim merkezlerinden biri olan Mezapotamya'da suyun toplanması ve korunması için inşa edilmiş yeraltı yapılarının varlığı da o tarihlerde bile bu hususun önemini kavranmış olduğunu göstermektedir. İlk su iletim tüneli M.Ö. 6. yüzyılda Ege adalarından Samos'ta Eupalinus tarafından inşa edilmiştir. 1 km uzunluğunda olan bu tünelin en kesiti 2,5 m²'dir. Su temininin tünellerle yapılmasına diğer bir ilginç örnek ise Newyork'ta 1930'lu yıllarda çevresindeki su haznelerinden bu kente su getirmek için çapları 3–5 m olan 100–170 km uzunluğunda inşa edilen tünellerdir (Beaver, 1972).

Savaş tünellerinin yapımı ilk defa Roma ordusunda geliştirilmiştir. Bu teknik sonradan Osmanlı ordusunda önemli gelişmeler göstererek lağımcılık adı altında bir uzmanlık alanı haline gelmiştir. Kıtalararası füzelerin kayada oyulmuş tünel sistemlerinde korunması da bu uygulamaların bu günün örneklerini teşkil etmektedir (Önalp, 1982).

İlk ulaşım tüneli M.Ö. XXII. yüzyılda Babil'de Fırat nehri altında açılmıştır. Bu tünel sarayla tapınak arasında açılan 900 m uzunluğunda bir yaya tünelidir. Endüstri devrimi ile başlayan ve günümüze kadar hızla artan demiryolu ve karayolu taşımacılığı tünelcilik tekniğinde önemli gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Bir taraftan yolun kısaltılması diğer taraftan güzergâhının belirli eğimin üzerinde yapılamaması tünel inşaatını gerektirmiştir. Bu nedenle XIX. Yüzyılda tünelcilik maden mühendisliğinin tekelinden çıkmıştır. 1900'lü yıllarda otomobil devrinin başlamasıyla karayolu tünel inşaatları da gelişmiştir (Önalp, 1982).

Yerleşim merkezlerinde nüfusun hızla artışı nedeniyle deniz ve akarsularda kirliliğin artmasından dolayı atıkların da arıtma merkezlerine tünellerle taşınmasını gerektirmiş ve yağış sularının da mevcut kanalizasyon sistemlerine bağlanmasıyla atık suların büyük debilere ulaşması büyük tünellerin yapılmasını gerektirmiştir.

Hava kuvvetlerinin ve nükleer silahların gelişmesiyle savunma amacıyla yapılan yeraltı yapıları daha çok önem kazanmıştır. Özellikle ikinci dünya savaşında elde edilen tecrübelerden sonra sivil savunma sığınaklarının yapımına ağırlık verildiği de bilinmektedir (Pequignot,1963).

Hidroelektrik enerji barajlarına ilişkin tüneller, bu yapılardan ayrı düşünülemez. Zira baraj temelleri için akarsu yatakları derivasyon tünelleri ile kurutulmaktadır. Diğer taraftan tünellerin suyun türbinlere verilmesi için de kullanılması gerekmektedir. Bunun yanında yeraltı santralleri için tünel inşa tekniklerinin bilinmesi de zorunludur.

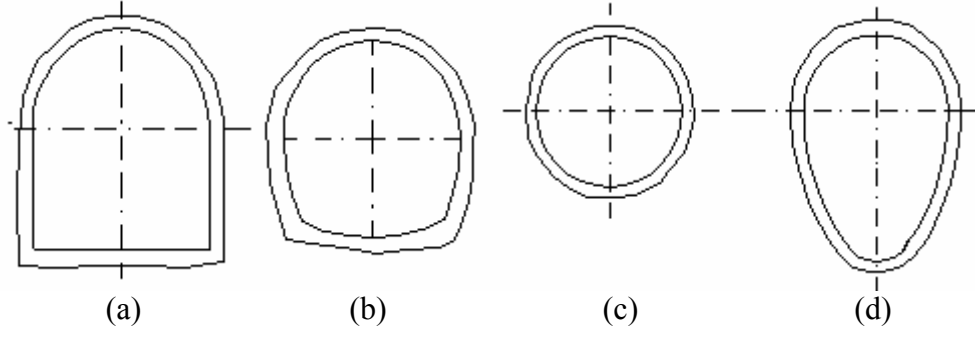
Teknolojinin önemli sorunlarından biri de endüstri atıklarının saklanacağı mekanların bulunmasıdır. Suyun ve toprağın kirletilmesi birçok ülkede yasaklandığından zehirli maddeler ve nükleer atıkların, gerekli yalıtımların yapılması koşuluyla, genellikle tünellerde depolanması günümüzde yeraltında depolanması zorunlu hale gelmiştir (Önalp, 1982).

1.2.3. Sınıflandırma

1.2.3.1. Enkesitlerine Göre Sınıflandırma

Tünellere ilişkin enkesit tipleri bunların üzerinde buldukları ulaşım yolunun cinsine ve bu yol zemininden gelecek etkilere göre değişmektedir.

Tüneller kaya zeminlerde genellikle enkesitleri bir dairesel kemer ve iki düşey yan duvardan oluşacak şekilde inşa edilmektedir (Şekil 1a). Yumuşak zeminlerde açılan tünellerin ise yatay basınçları karşılayacak en kesitlere sahip olması gerekmektedir (Şekil 1b ve 1c). Bu tür zeminlerde açılan tünel enkesitlerinin tam daire ya da nal şeklinde olması tercih edilmektedir (Beykont,1951).



Şekil 1.1. Zemin türü ve kullanım amacına göre tünellerde kullanılan başlıca enkesit tipleri

Dairesel enkesitli tüneller teorik olarak iç ve dış kuvvetleri en iyi karşılayan tünellerdir. Diğer taraftan bunlar en küçük çevreyle en büyük enkesite de sahip olmaktadır. Ancak bu üstünlükleri yanında bazı sakıncaları da mevcuttur. Bunlardan biri döşemelerinin yuvarlak olması nedeniyle ulaşım yolu için fazlaca dolgu gerektirmeleri, diğeri ise beton kaplamasının yapım zorluğudur.

Bugün nal şeklindeki enkesitin (bkz. Şekil 1b), kemerli ve dairesel enkesit şekilleri (bkz Şekil 1a ve 1c) arasında olup hem tasarım mühendisi, hem de yüklenici tarafından diğerlerine göre daha fazla tercih edilmektedir. Böyle bir tünelin döşemesi ulaşım yolu için yeteri kadar düz olduğu gibi eğrisel kenarları ve tabanı da kemer gibi çalıştığından dış kuvvetleri daha iyi karşılamaktadır.

Yumurta şeklindeki enkesitler (Şekil 1d) şehir atık sularıyla taşkın debilerini geçiren birleşik kanalizasyon tünellerinde kullanılan enkesitlerdir. Ancak tabanları dar olduğundan karayolu, demiryolu tünelleri için uygun değildirler.

Burada dikdörtgen enkesitli tünellerin, aç- kapa yöntemiyle yapılanlar ve su altı tünelleri hariç, kaplamalarının zor olmasından dolayı pek tercih edilmediklerini belirtmek uygun olmaktadır (Beykont,1951).

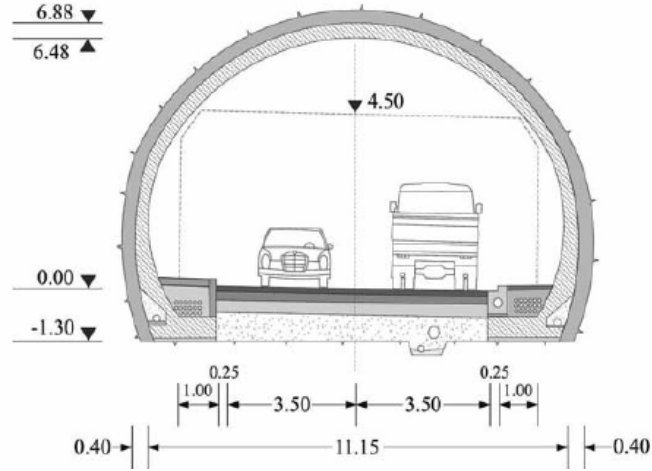
1.2.3.2. İşlevlerine Göre Sınıflandırma

Tünellerin işlevine göre sınıflandırılması aşağıda verilmektedir:

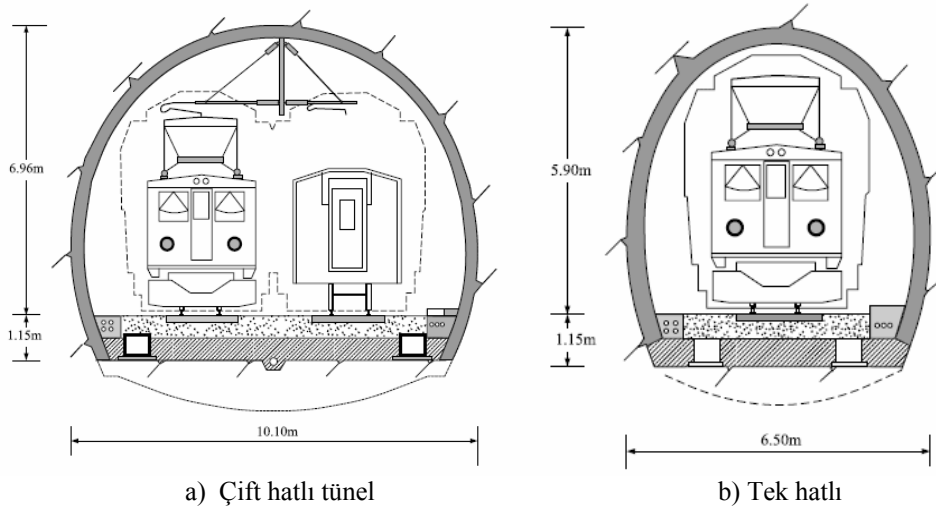
- a) Barınak ve tapınak tünelleri

b) Karayolu, demiryolu, metro ve su yolu gibi ulaşım tünelleri:

Bunlardan karayolu ve demiryolu tünelleri ilişkin enkesit örnekleri Şekil 1.2. ve 1.3'de metro ve kanal tünellerine ilişkin olanlar ise Şekil 1.4.'de görülmektedir.



Şekil 1.2. Karayolu tünellerine ilişkin tipik bir enkesit şekli (Kolymbas,2005)



Şekil 1.3. Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli (Kolymbas, 2005)



Şekil 1.4. Metro ve kanal tünellerinden örnek birer görünüm (URL-1,2007;URL-2,2007)

c) Maden galerileri:

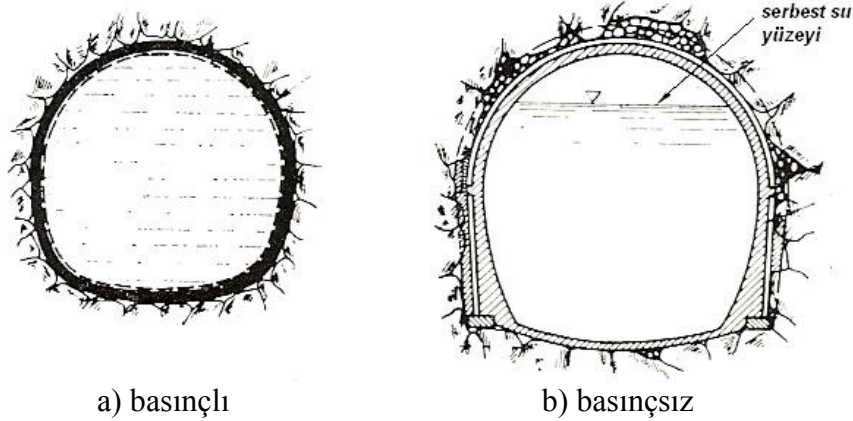
Bu galeri yeraltındaki maden cevherini yeryüzüne çıkarmak amacıyla açılmaktadır. Bunlara ilişkin örnek bir görünüm Şekil 1.5.'de verilmektedir.



Şekil 1.5. Maden galerilerine ilişkin örnek bir görünüm (URL-3,2007)

d) Su iletim tünelleri:

Bu tüneller herhangi bir kaynaktan alınan suyun büyük şehirlere ulaştırılması için inşa edilmektedir. Hidroelektrik santrallerdeki cebri borular ve derivasyon tünelleri de bu sınıfa girmektedir. Bu tip tünellerde sular basınçlı yada basınçsız olarak iletilebilmektedir. Bu nedenle bu tür tünel kaplamalarının etkiyen diğer yüklere ilaveten iç basınçları da karşılaması gerekmektedir.

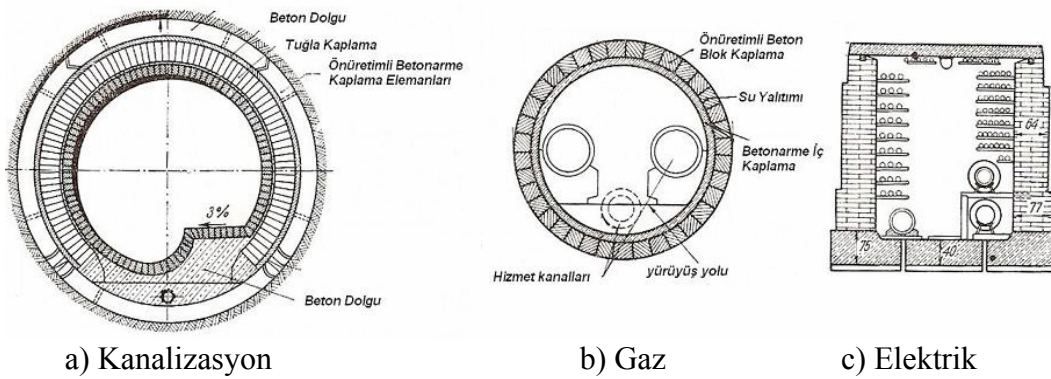


Şekil 1.6. Su iletim tüneli enkesit örnekleri (Szechy,1970)

e) Kanalizasyon ve kamu hizmet tünelleri:

Kanalizasyon tünelleri su iletim tünellerine benzemekle birlikte bunlarda genellikle cazibeli akış söz konusudur. Kaplamalarının tasarımı buna göre yapılmakta ancak dayanıklılıkları için kanalizasyon sularının tahrip edici etkilerine karşı gereken önlemlerin alınması kaçınılmaz olmaktadır.

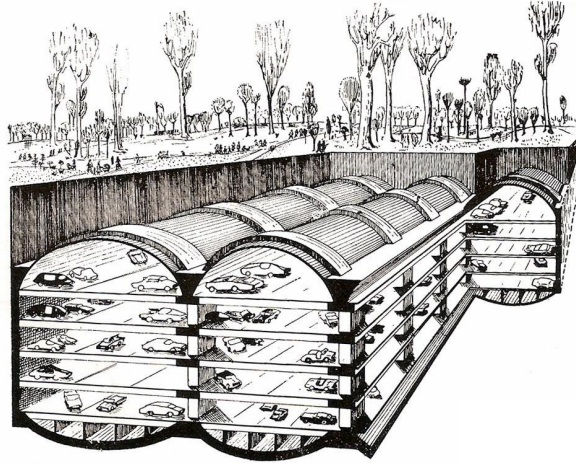
Elektrik, gaz, telefon ve diğer iletim borularını barındıran, herhangi bir arıza çıkması durumunda arızaya ulaşmayı kolaylaştırmak için inşa edilen hizmet tünelleri adıyla anılmaktadır. Bunların enkesitlerine ilişkin örnekler Şekil 1.7.'de verilmektedir.



Şekil 1.7. Kanalizasyon ve bazı hizmet tünellerine ilişkin enkesit örnekleri (Szechy,1970)

f) Stokaj tünelleri:

Yeraltı yapıları çeşitli malzemelerin, atıkların, radyoaktif maddelerin stok edilmesi için kullanılmaktadır. Burada en önemli konu stok maddesinin özelliklerine göre gerekli önlemlerin alınmasıdır. Şekil 1.8.'de stokaj amaçlı tünel tipi bir otopark görülmektedir.



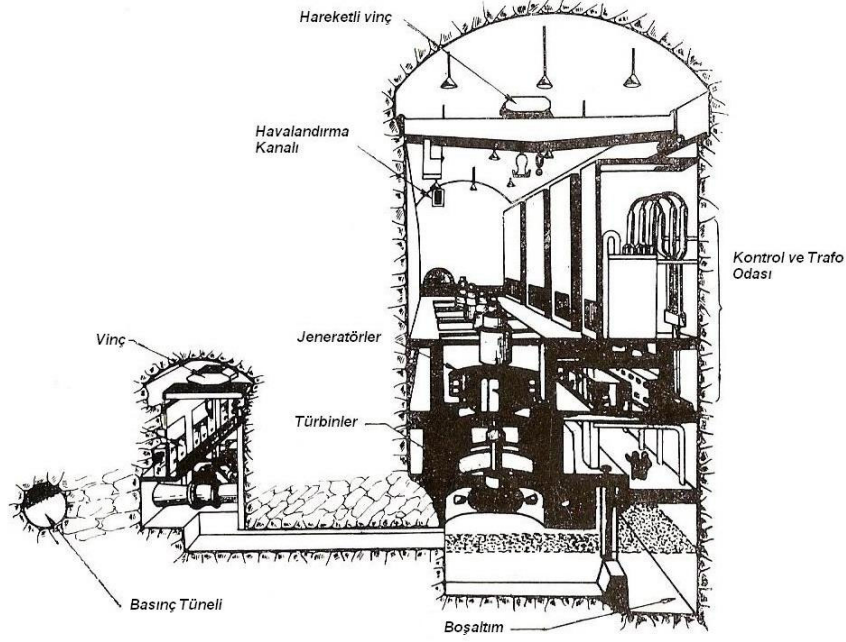
Şekil 1.8. Stokaj amaçlı tünel tipi bir otopark görünümü

g) Korunma amaçlı tüneller:

Korunma amaçlı tüneller, savaş tehlikesine karşı sivil halkı korumak için yapılan sığınaklar olarak kullanılmakla birlikte bu tip tünellerden önemli askeri üslerin korunması için de faydalanılmaktadır.

h) Özel tüneller:

Yukarıda belirtilen amaçlar dışında yeraltı fabrikaları, istasyonları, santralleri gibi yapılar olarak da inşa edilen tüneller özel tüneller adıyla anılmaktadır. Aşağıdaki Şekil 1.9.'da bunlardan santral amacıyla inşa edilen bir tünel enkesiti verilmektedir.



Şekil 1.9. Bir yeraltı hidroelektrik santrali kesiti

1.2.3.3. Yapım Şekline Göre Sınıflandırma

Yapım şekline göre tüneller:

- Kaya zemin tünelleri
- Yumuşak zemin tünelleri
- Su altı tünelleri şeklinde sınıflandırılabilir.

Kaya zeminlerde inşa edilen tünellerde genellikle delme-patlatma yöntemi yada değişik tipteki delgi aygıtları kullanılmaktadır. Kaya zeminlerin kendini taşıyabilir özellikte olması nedeniyle bu tip zeminlerde inşa edilen tünellerde genellikle stabilite sorunlarıyla karşılaşmamaktadır. Yumuşak zeminlerde inşa edilecek olan tünellerde ise koşulların kayaç zeminlere göre çok daha zor olduğu açıktır. Bu nedenle bu tür zeminler iyileştirme yöntemlerinden biriyle iyileştirilse bile bunlar tünel kazısının daha dikkatlice yapılmasını gerektirmektedir. Durum böyle olunca bu tünellerin inşasında kalkan, boru sürme, şemsiyeleme ve aç-kapa gibi yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Diğer taraftan yumuşak zeminlerde inşa edilecek tünel enkesit şekillerinin olabildiğince finiküler forma yakın seçilmesi kaplamalara gelecek çekme gerilmelerini asgari düzeye inmesini sağlamaktadır.

Su altı tünelleri ise şantiyede üretilen tünel elemanlarının suya batırılıp tabana oturtulduktan sonra üzerleri örtülmek suretiyle yada suda tabana oturtulmadan yüzer durumda inşa edilmektedir.

Yapım şekline göre tünellerin sınıflandırmasına ilişkin bilgiler madde 1.4.'de "Güzergah Zeminine Göre Tünel İnşası" başlığı altında daha ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

1.3. Tünel İnşası İçin Gerekli İncelemeler

Şehirlerin büyümesi, nüfus artışı, yol standartlarındaki artışlar nedeniyle karayolu, demiryolu, metro gibi ulaşım tünelleri ile su iletim, kanalizasyon tünelleri gibi tüneller günümüzün en önemli mühendislik yapılarından biri olmuştur. Diğer önemli mühendislik yapılarında olduğu gibi bu yapıların da dayanım ve dayanıklılıkların yeterli düzeyde olması için azami dikkatin gösterilmesi zorunludur.

Bayındırlık yapılarından biri olan tünellerin zemindeki farklı konumları nedeniyle tasarımları diğer yapılara göre daha fazla disipline mensup uzmanların birlikte çalışmasını gerektirmektedir. Her bir bilim dalına mensup uzmanlar kendi alanlarındaki bilgilerini yapılan ortak çalışmalarla yapının tasarımında ve uygulanmasında birleştirir. Tünellerin tasarımında birlikte çalışmayı gerektiren disiplinlerden ilk akla gelenleri;

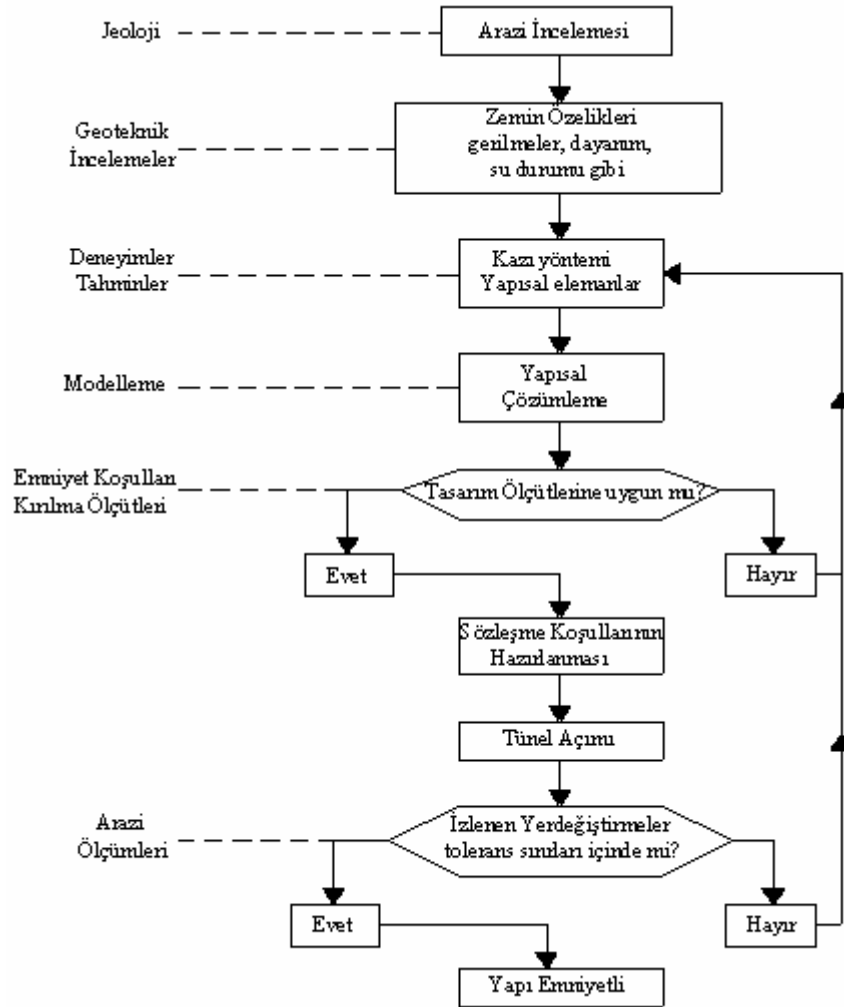
- 1) Yapı mühendisliği
- 2) Geoteknik mühendisliği
- 3) Jeoloji mühendisliği
- 4) Maden mühendisliği
- 5) Kazı teknolojisi mühendisliği

disiplinleri şeklinde sıralamak mümkün olmaktadır. Tünel tasarımı ve yapımında başlıca aşağıda sayılan temel çalışmaları gerçekleştirmek gerekmektedir. Bunlar:

- a) Jeolojik ve jeofizik incelemeler
- b) Hidrojeolojik incelemeler
- c) Geoteknik incelemeler
- d) Güzergâh, enkesit ve boykesit tasarımları
- e) Kazı yönteminin belirlenmesi ve uygulanacak iksa tasarımı
- f) Arazi ölçüleriyle tünelin yerinde izlenmesi için program geliştirme

- g) Kaplamalı ve kaplamasız gerilme ve şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenmesi, tünel kaplamasının (iksasının) boyutlandırılması
- h) Su yalıtımı ve drenajına ilişkin tasarımlar
- i) Kazı esnasında ve kazıdan sonra tünelin yapısal güvenliğinin sağlanması ve zemin etkileri ile ilgili arazi ölçümleri
- j) Karşılaşılan problemleri açıklayan belgelerin hazırlanmasıdır.

Tünel tasarımına ilişkin bazı aşamalar aşağıdaki akış diyagramında verilmektedir.



Şekil 1.10. Tünel tasarım akış şeması

1.3.1. Jeolojik ve Geoteknik İncelemeler

Bina, yol, köprü, tünel gibi mühendislik yapıları içinde tünellerin diğerlerine oranla zeminle olan ilişkisinin çok daha önemli olduğu açıktır. Dolayısıyla tünel inşaatları için zemin özelliklerinin çok daha hassas olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Tünel inşası için kazıya başlanmasıyla kazılan zeminin doğal dengesi bozulmakta dolayısıyla yeni bir denge durumu oluşabilmesi için ortamdaki gerilme dağılımı değişmektedir. Bu yeni gerilme dağılımında zeminin jeolojik geçmiş ve geoteknik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle tünel tasarımına başlanmadan önce jeolojik ve geoteknik incelemeler gerçekleştirilmekte ve bu incelemeler inşaat esnasında ve inşaattan sonra da devam ettirilmektedir.

1.3.1.1. İnşaat Başlamadan Önce Yapılan Çalışmalar

Tünel inşasına başlanmadan önce zeminin özelliklerinin ve davranışlarının belirlenmesine ilişkin birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Hava fotoğrafı çalışmaları, yüzey jeolojisi incelemeleri, jeofizik araştırmalar, yerinde deneyler ve laboratuvar çalışmaları bunlara birer örnek teşkil etmektedir. Bu çalışma ve incelemelerin başlıca amaçları aşağıda verilmektedir:

- 1) Mümkün olan güzergâhlardan en uygununu seçmek,
- 2) Tünel eksenini boyunca zemin- kayaç sınırı, yeraltı suyu, faylar, farklı zemin ve kayaç tipleri, tabakaların durumu, deprensellik, gaz ve ısı durumu gibi özelliklerin belirtildiği jeolojik harita çıkartmak,
- 3) Tünel güzergâhındaki zeminin geoteknik özelliklerini belirlemektir.

1.3.1.2. İnşaat Esnasındaki Çalışmalar

Tünel inşası esnasındaki gözlem ve ölçümlere ilişkin çalışmalar, stabilitenin ve geçirimsizliğin korunması amacıyla gerçekleştirilmektedir.

Kazı başladıktan sonra sürdürülen incelemeler sayesinde; zemin özelliklerinin yerinde belirlenmesi, çatlak diyagramlarının çizilmesi ve böylece kazı devam ettikçe ilerideki kesitlerde karşılaşılabilecek sorunlu ortamların kestirilmesi sağlanmaktadır. Böylece ilave

destekleme, kazı yönteminde değişiklik gereksinimleri, kazıdan etkilenebilecek yapılarda meydana gelen oturmalar, yüksek ısı, gaz, zemin suyu akışı gibi sorunlara karşı önlem alınabilmektedir.

Burada yeraltında inşa edilmelerinden dolayı tünellerin diğer yapılara göre daha az jeolojik ve geoteknik bilgilerle inşa edilmeye başlandıklarını belirtmek uygun olmaktadır.

1.3.1.3. Kullanım Aşaması Çalışmaları

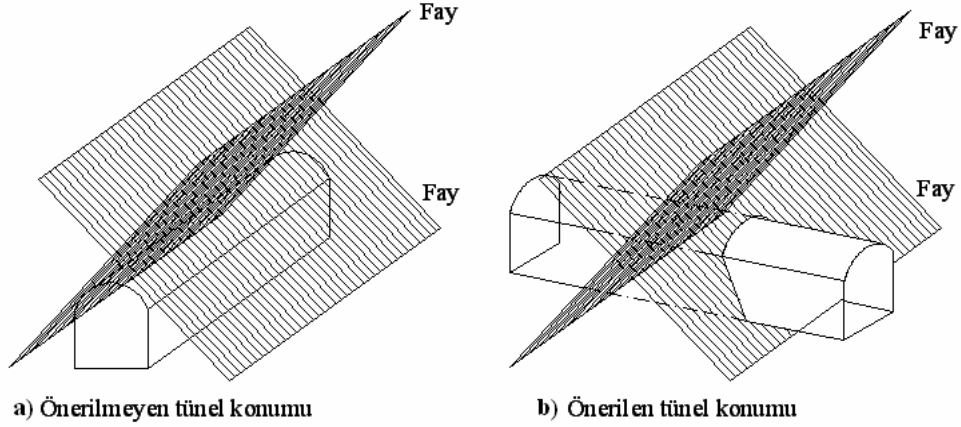
Kullanım (işletme) aşamasında yapılan geoteknik incelemeler tünellerin emniyetlerinin ve işlevselliklerinin denetimi için yapılmaktadır. Bu denetimlerle söz konusu yapıların geçirimsizliklerinin ve yerdeğiştirmelerinin tolerans sınırları dâhilinde kalması, ekonomik ömürleri boyunca gerekli emniyete sahip olmaları ve onarımlarının zamanında yapılması sağlanmaktadır.

1.3.2. Tünel Güzergâhının Seçimi ve Boykesit Belirlenmesinde Dikkat Edilecek Hususlar

1.3.2.1. Güzergâh Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar

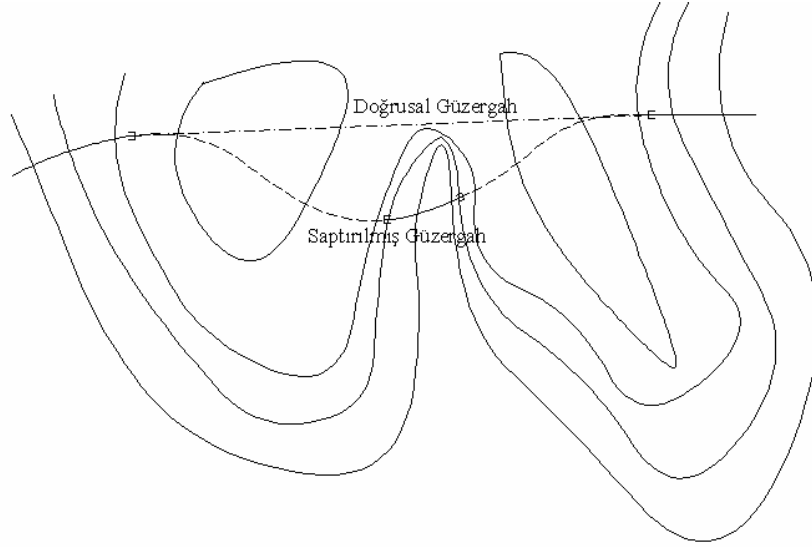
Tünel güzergâhının seçiminde dikkat edilecek en önemli husus bir engel yoksa tünel ekseninin doğrusal ve tek eğimli olmasını sağlamaya çalışmaktır. Ancak bu durum genellikle kısa tünellerde sağlanabilmektedir. Tünel güzergâhının seçiminde dikkat edilecek başlıca hususlar aşağıda özetlenmektedir (Bozkurt,1970):

- 1) Jeolojik ve geoteknik incelemenin sonuçlarına göre, olabildiğince çalışma süresini, maliyeti arttıran ve iksa gerektiren zeminlerden kaçınılmalıdır.
- 2) Zorunlu olmadıkça tünel giriş ve çıkış ağızlarının sağlam kayaya rastlaması için gereken eksen değişiklikleri yapılmalıdır. Zayıf zeminlere rastlamasından kaçınılamadığında stabilite için gerekli önlemler alınmalıdır.
- 3) Yaygın çatlak, kırık ve faylı bölgelerde olabildiğince tünel ekseninin kırıklara dik doğrultuda olması sağlanmalıdır (Natm,1995).



Şekil 1.11. Tünel güzergâhının faylara göre önerilen ve önerilmeyen konumları (Natm, 1995)

- 4) Debisi, basıncı ve sıcaklığı fazla olabilecek suların çıkması ihtimali yüksek zeminlerden olabildiğince kaçınmalı aksi halde gerekli önlemlerle söz konusu sular tahliye edilmelidir.
- 5) Özellikle şantiye sayısını arttırmak suretiyle uzun tünellerin inşa süresini kısaltmak için bölgenin topografik durumuna göre, tünel inşası için gerekli kuyuların ekonomiyi de dikkate alarak uygun yerlerde açılmalı ve güzergâh bu kuyuların yakınından geçmelidir.
- 6) Tüneli kesintiye uğratan vadilerin geçilmesi söz konusu olduğunda köprü ve viyadükler bakımından bu vadilerin dik olarak geçilmesine çalışılmalıdır.
- 7) Tünel doğrusal olmadığında mümkün olduğunca büyük yarıçaplı daire yayları kullanılmalıdır.
- 8) Uzun tüneller, bir vadiye yakın olarak geçecekse diğer koşullar da elverişliyse, güzergâhında bir sapma yapmak suretiyle yolun açık havadan geçmesi sağlamalıdır (Şekil 1.12.). Bu suretle tünel inşası ve havalandırılması kolaylaştırıldığı gibi belirli bir ekonomi de sağlanmış olmaktadır.



Şekil 1.12. Vadiye yakın geçecek olan uzun tünel durumunda güzergâh saptırılarak yolun bir kısmının açık havadan geçmesinin tünelde süreksizlik oluşturmak suretiyle sağlanmasına ilişkin şematik bir gösterim

- 9) Şehir içi tünelleri, istimlâklerin pahalı olması yada mümkün olmaması, tünelin yüzeye yakın açılması durumunda yapıların zarar görme ihtimalinin yüksek olması hallerinde, olabildiğince cadde ve yolların altından geçirilmelidir.
- 10) Nehir, boğaz gibi suyollarının altından geçişte gemi gabarilerini de dikkate alarak güzergâh gerektiğinde yatağın derinleştirilmesine imkân verecek şekilde geçirilmelidir.

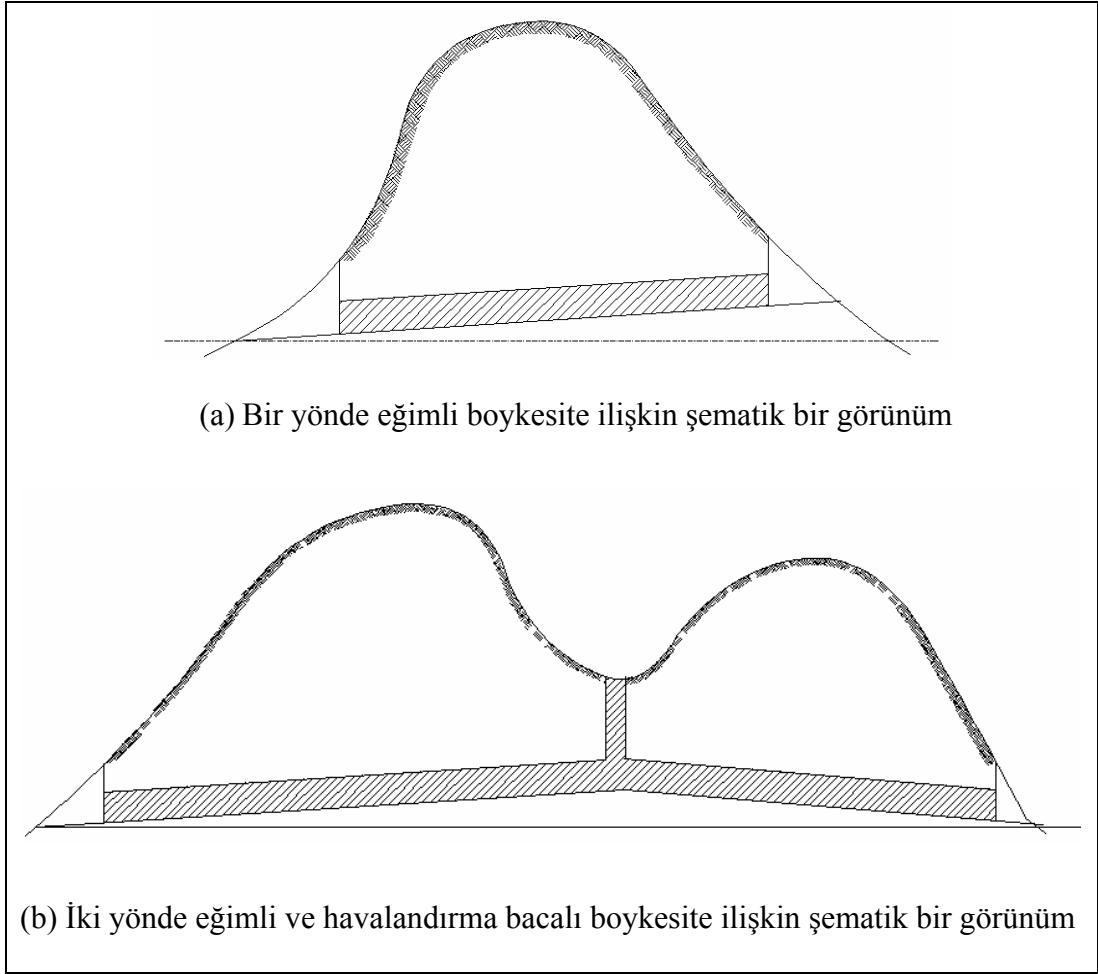
1.3.2.2. Boykesit Belirlemede Dikkat Edilecek Hususlar

Tünel boykesitlerinin belirlenmesinde dikkat edilecek başlıca hususlar aşağıda verilmektedir (Bozkurt,1970):

- 1) Tünel açılırken yada işletme sırasında meydana gelen sular tahliye edilmelidir. Tahliye işleminin mümkünse boykesite yeterli eğim verilerek cazibeyle gerçekleştirilmesi tercih edilmelidir. Bunun için binde 2'lik eğimin yeterli olduğu bilinmektedir.
- 2) Özellikle demiryolu tünellerinde Mümkün olabildiğince işletme bakımından sabit direnimli bir yönlü eğimler kullanılmalıdır (Şekil. 1.13a). Ancak uzun tünel inşaatlarında kolaylık sağlamak ve ekonomi elde etmek için kazının iki baştan

yürütülmesi uygun olmaktadır. Bu durumda suların her iki baştan da dışarı atılabilmesi için boykesidin sırt şeklinde olması sağlanmalıdır (Şekil. 1.13b).

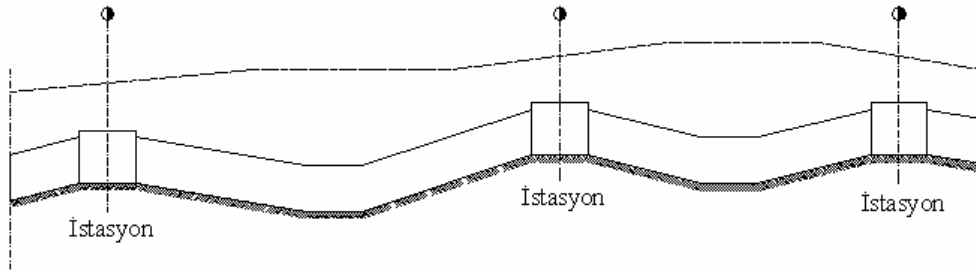
Burada özellikle buharlı demiryolu tünellerinde sırt bölgesinde birikecek dumanların boşaltılması bakımından, bir havalandırma sorununun ortaya çıktığı ve bu sorunun sırtın tepe noktasından bir kuyu açılmasıyla çözülebileceğini belirtmek uygun olmaktadır.



Şekil 1.13. Bir yönde (a) ve iki yönde (b) eğimli şematik boykesit örnekleri

- 3) Akarsuların altından geçilmesi halinde her iki baştan ters eğim uygulanmasıyla talveg altında yeterli derinliğe inilmesi sağlanmalı ve mevcut sızıntı suları uygun çukur yanında açılacak bir kuyuya toplanıp buradan terfiyle tahliye edilmelidir.

- 4) Yolun tünel içinde kalan kısmının eğimi açık havadaki kısmının en büyük eğiminden tünel içindeki nem ile hava direncindeki artış nedeniyle %20 civarında daha az olması sağlanmalıdır.
- 5) Şehir içi tünellerinde, ana cadde ve yolların altından geçildiğinde mevcut atık suların alınabilmesi için tünele yeterli eğim verilmelidir.
- 6) Eğer bir sakınca yoksa metro tünellerinde, boykesit birbirini izleyen iki istasyon arasında çukur olarak geçilmelidir (Şekil 1.14.). Böylece metro katarlarını istasyondan çıkışı inişte olduğundan hızlanma kolaylaşmakta, istasyona girişi ise çıkışta olduğundan durma kolaylaşmaktadır. Arazinin eğimi istasyonların bu şekilde yapılmasına imkân tanımadığı takdirde anılan istasyonlar oluşturulan sahanlık şeklindeki düzlüklerde yapılmalıdır.

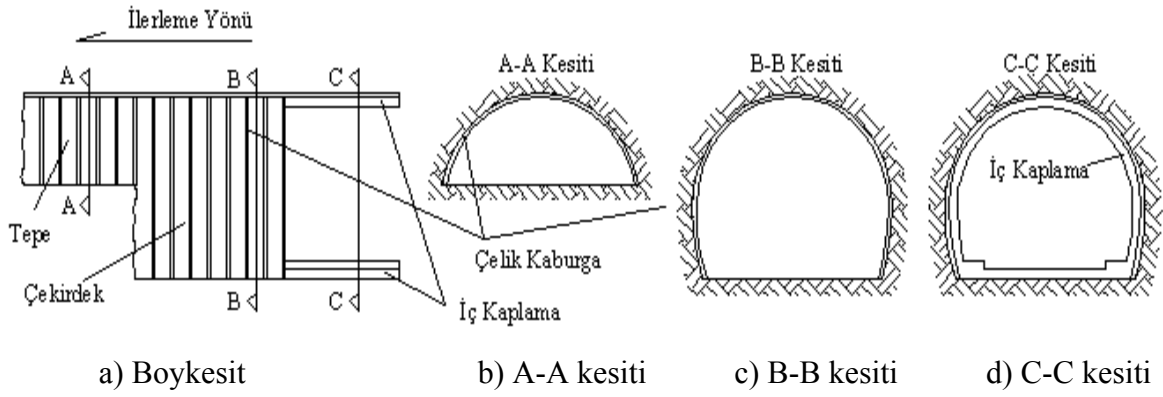


Şekil 1.14. Metro tünellerinin boykesidinde uygun istasyonların yerleştirilmesine ilişkin şematik bir örnek

1.4. Güzergâh Zeminine Göre Tünel İnşası

Tünel inşasının kazı, iksa, kazılan malzemenin taşınması, kaplama, drenaj, yalıtım ve havalandırma işlemlerinin birlikte ve uyum içinde yürütüldüğü çok yönlü bir çalışma olduğu bilinmektedir.

Kazı yapıldıktan sonra zeminin kendini tutma süresi, iksanın yapımına kadar havalandırmaya ve kazı malzemesinin taşınmasına imkan veriyorsa tünelin, ekonomik olduğu bilinen, tam kesit olarak açılması tercih edilmektedir. Bu koşulların sağlanmaması durumunda yada sağlansa bile tam kesitte kazı için gerekli araç-gereçlere sahip olunmaması yada bunların temin edilmesinin ekonomik olmadığı büyük açıklıklı tünellerin kazı işlemlerinde tepe-çekirdek yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Büyük açıklıklı tünellerin Tepe-Çekirdek yöntemiyle açılmasına ilişkin şematik gösterimler (Taşlıca, 1983)

Yumuşak zeminlerde açılan büyük açıklıklı tünellerde uygulanan yandan galeri açma yönteminde, tünel açıklığının iki yanında açılan galeriler yardımıyla yan duvarlar desteklendikten sonra orta kısmı kazılmak suretiyle iksa tamamlanmaktadır.

Daha önce “Yapım şekline göre sınıflandırma” başlığı altında da belirtilmeye çalışıldığı gibi güzergâhın geçeceği ortama göre tünel inşası; kayaç zeminlerde, yumuşak zeminlerde ve su altında olmak üzere üç grupta toplanabilmektedir.

1.4.1. Kayaç Zeminlerde Tünel İnşası

Kayaç zeminlerde tünel inşası kazının şekline göre delme-patlatma yada özel delgi aygıtlarıyla inşa olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır.

1.4.1.1. Delme-Patlatmayla Tünel İnşası

Klasik yöntem adıyla anılmakta olan delme-patlatmayla tünel inşası yüz yılı aşkın süredir önemli bir değişiklik yapılmadan hemen her türlü kayaç koşullarında kullanılmaktadır.

Bu yöntemle tünel inşasında aşağıdaki sıra izlenmektedir;

1. Kararlaştırılmış bir plana göre önceden aynada patlayıcıların yerleştirileceği lağım delikleri açılmaktadır. Eğer jumbo adlı delgi aygıtı lağım deliklerinin açımında kullanılacaksa aynaya yaklaştırılmakta ve kazı için hazırlanmaktadır (Şekil 1.16.).



Şekil 1.16. Jumbo aygıtıyla patlayıcıların yerleştirileceği lağım deliklerinin açılış anında bir görünüm

2. Açılan deliklere daha önceden hesaplanmış miktarda patlayıcılar yerleştirilmektedir.
3. Deliklerde bulunan patlayıcılar ateşlenmekte ve patlatmadan meydana gelen gazların giderilmesi için havalandırma yapılmaktadır.
4. Düşme ihtimali olan kayaç parçaları düşürülmekte, gerekli durumlarda yeni açılan kısma iksa yapıldıktan sonra çıkan kazı malzemesi taşınmaktadır.

Burada emniyetli ve verimli ilerlemenin sağlanması için patlayıcı maddenin cinsinin ve miktarının, lağım deliklerinin düzen ve derinliklerinin önemli olduğu belirtilmelidir. Diğer taraftan ilk malzeme ve teçhizatın ucuzluğu, her türlü kayaç koşullarında kullanılabilirliği gibi üstünlükleri yanında ilerlemenin yavaş olması, aşırı sökülmenin önüne geçilememesi dolayısıyla da tünel enkesitinin aynen açılmasının mümkün olmaması, çevredeki kayaçları yumuşatması gibi sakıncaların bulunduğunu ve bu konuda ayrıntılı bilginin kaynaklarda (Kaya, 1983) bulunabileceğini belirtmek de uygun olmaktadır.

1.4.1.2. Özel Delgi Aygıtlarıyla Tünel İnşası

Bundan yaklaşık 50 yıl önce diğer bir deyişle 1950'li yıllardan sonra tünel açma aygıtlarının geliştirilmesiyle tünel açımında yeni bir devir başlamış, bu aygıtlar sayesinde kazı hızı geleneksel yöntemlere göre artmıştır. Bu özel delgi aygıtlarıyla tünel açımını tam kesitte ve yarım kesitte açım olmak üzere iki kısımda incelemek uygun olmaktadır.

Bu aygıtlardan en önemlisi tam kesitte tünel açma aygıtıdır. Bu aygıt (Şekil 1.17.), ön yüzüne çeşitli cins ve sayıda kesiciler yerleştirilmiş dönen bir kafa ile içinde gerekli parçaların ve kumanda bölümünün bulunduğu silindirik bir gövdeden ibarettir (Taşlıca, 1983).



Şekil 1.17. Tam kesitte tünel açma aygıtından bir görünüm

Bu tam kesitte tünel açma aygıtı 2-12 m arasındaki çaplarda kazı yapabilmekte ve uzunlukları 12- 25 m arasında değişmektedir. Bu araç yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi kuyruk, gövde ve yüz kısmı olmak üzere başlıca üç esas bölümden oluşmaktadır. Kuyruk bölümü, kaplama, otomatik taşıyıcı band için gerekli kaldırma kollarını içermektedir. Gövde bölümü; operatör kabini, hidrolik ve elektrikli sistemleri, motorları, jeneratörleri, çalışma platformu gibi üniteleri içermektedir. Yüz kısmında ise aygıtın dönen ve kesici elemanlar, gerekli durumlarda ise kalkan bulunmaktadır. Dönen kafanın yüzünde bulunan kesiciler zemin türüne göre seçilmekte, yumuşak zeminlerde kesici uçlar ve dişler, kayaç zeminlerde ise disk şeklinde kesiciler kullanılmaktadır (Çakan,2000). Aygıt dönen kafadaki kesiciler sayesinde kayacı öğütmekte ve kazdığı malzemeyi içine alarak bunu sahip olduğu dönen bantlar sayesinde arkaya doğru iletmektedir. Gerekli durumlarda aygıtın dışında bulunan kalkan sistemi kayaç düşmesine karşı aygıtı korumakta ve iksa esnasında gerekli güvenliği sağlamaktadır. Çatlak ve kırıklı kayaçlarda kazı yapıldığı durumlarda iksa bu kalkanın hemen arkasına kadar yaklaştırılmaktadır.

Tünel açma aygıtının başlıca üstünlükleri ve sakıncaları aşağıda verilmektedir. (Kırbaş, 1995)

a) Üstünlükleri

- 1) Sürekli çalışma yapabilme özeliğinden dolayı ilerleme hızı fazladır.
- 2) Kazının tam otomatik olarak yapılmasına imkân vermektedir.
- 3) Delme-patlatma yönteminden çok daha düşük seviyede titreşimler üretmektedir. Bu özeliğinden dolayı nüfus yoğunluğu yüksek sanayi bölgelerindeki tünel açmaları için tercih edilmektedir.
- 4) Delme-patlatma yöntemindeki kadar tahribat oluşturmadığından kaplama masrafları azalmaktadır.
- 5) Kazı yüzeyleri düzgün olduğundan kesit stabilitesinin yüksek olması sağlandığı gibi gerilmelerin de düzgün dağılması sağlanmaktadır.
- 6) İksa elemanlarının prefabrike olarak üretilmesine imkân vermektedir.
- 7) Kazı malzemesi agrega olarak kullanılabilir.
- 8) Az sayıda işçi ile daha güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktadır.

b) Sakıncaları

- 1) Yatırım maliyeti yüksektir.
- 2) Arızalanma durumunda zaman kaybı fazladır.
- 3) Dairesel kesit dışında kullanılmadığından kollu kazı aygıtlarının kullanılmasını gerektirmektedir.
- 4) Küçük çaplı dönemeçlerin yapılmasına imkân vermemektedir.
- 5) Kısa tünellerde ve kazı çapının değişken olması durumlarında ekonomik olmadığı gibi sert ve aşındırıcı kayalarda kesici maliyetleri artmaktadır.
- 6) Zayıf ve ileri derecede eklemlili kaya kütleleri ile faylanma bölgelerinde gelişebilecek blok düşmesi ve/veya kayması şeklindeki stabilite sorunlarının beklendiği tünellerde de ekonomik olmamaktadır (Ulusay ve Aydan, 1997).

Diğer bir tünel açma aygıtı da kollu tünel açma aygıtıdır (Şekil 1.18). Bu aygıt kayacı, bir kol üzerinde dönen küçük bir kafaya yerleştirilmiş kesiciler yardımıyla yontmaktadır. Tam kesitte tünel açma aygıtına göre daha az enerjiye ihtiyaç duymakta ve maliyetleri de daha düşük olmaktadır. Tam kesitte tünel açma aygıtından farklı olarak bu aygıt dairesel olmayan kesitlerde de kullanılmaktadır.



Şekil 1.18. Kazı yapan kollu tünel açma makinesinden bir görünüm

Burada bu aygıtlara benzer daha başka tünel açma aygıtlarının da mevcut olduğunu ve bunlara ilişkin ayrıntılı bilgilerin teknik literatürde bulunabileceğini belirlemek uygun olmaktadır (Kırbaş,1995).

1.4.2. Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası

Alt geçitler, gömme depolar, yeraltı otoparkları, içme suyu ve kanalizasyon tünelleri gibi yer altı yapıları genellikle sığ derinliklerde ve yumuşak zeminlerde açılmaktadırlar. Bu zeminler düşük taşıma güçlü ve genellikle suya doymun zeminlerdir. Bu nedenle bu tür zeminlerde tünel açımı için özel tekniklerin geliştirilmesini ve genellikle zeminlerin iyileştirilmesini gerektirmektedir (Bahar,1994).

Bazı durumlarda ise karşılaşılan zemin özellikleri ve yeraltı suyunun durumu tünel aynasında ve çevresinde stabiliteyi etkilemektedir. Durum böyle olunca zemin iyileştirme yöntemleriyle tünel çevresi stabilitesinin sağlanması ve yeraltı su seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Stabiliteyi sağlamak ve suyu önlemek için enjeksiyon, zemini dondurma, denetimli drenajla zemin suyu seviyesinin düşürülmesi ve basınçlı hava yardımıyla suyun denetim altına alınması gibi işlemler yapılmaktadır (West ve O'Reilly,1978).

Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi: Bu işlemin amacı tünel inşasını kolaylaştırmak için yeraltı su seviyesini tünel taban düzeyi altına aşağıya düşürmektir. Bu amaçla tünel güzergâhında yeteri kadar kuyu kazılmakta ve bu suretle yeraltı su seviyesinin istenen düzeye inmesi sağlanmaktadır. Bu işlem esnasında dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, ince taneleri tutarak topraktan çekilmesini önleyecek filtre malzemesinin kuyulara uygun şekilde yerleştirilmesidir. Filtrenin uygun olmaması durumunda suyla birlikte çekilen malzemedan dolayı zeminde önemli oturmalar meydana gelmektedir. Yumuşak killi ve siltli zeminlerde uygun olmayan bu yöntem yerine elektro-osmoz adı verilen başka bir yöntem kullanılmaktadır (Bahar,1994).

Enjeksiyon Yöntemi: Enjeksiyon yöntemiyle zemindeki boşluklara bir çözelti verilme suretiyle zeminin mevcut geçirimsizliği, dayanımı ve stabilitesi iyileştirilmektedir. Enjeksiyon işleminde kullanılan en eski malzeme portland çimentosu olmakla birlikte bugün bu işlem için ekonomi ve sağlık yönünden uygun çeşitli kimyasal maddeler de kullanılmaktadır.

Burada teknik literatürde konsolidasyon, kompaksiyon ve jet-grouting adlı üç çeşit enjeksiyon yönteminden söz edildiğini belirtmek uygun olmaktadır (Bahar, 1994).

Basınçlı Hava Kullanımı: Basınçlı hava 19. yüzyıl sonlarından beri kullanılan oldukça eski bir yöntemdir. Suya doymuş zeminlerde kullanılabilen bu yöntemin temel amacı tünel içindeki hava basıncını hidrostatik basınca eşitleyerek suyun tünel içine girmesini engellemektir. Sistemin kurulması oldukça zaman alıcı ve pahalı olduğu gibi, basınç altında çalışan işçilerde sağlık sorunlarına yol açabilen bu yöntemin kullanımı giderek azalmaktadır.

Zeminin Dondurulması: Zemin dondurma yöntemi enjeksiyonla ve basınçlı havayla çalışmanın mümkün olmadığı suya doymuş zeminlerde kullanılan özel ve pahalı bir yöntemdir.

Dondurma işleminde stabilitesinin sağlanması gereken alan etrafındaki zemine soğutma borularının yerleştirilmesi suretiyle bunların çevresinde donmuş bir bölge oluşturulmaktadır. Bu işlem yüzeyden düşey sürülmüş borularla ve/veya aynadan yatay borularla gerçekleştirilmektedir.

Aşağıda kısaca yumuşak zeminlerde tünel açma yöntemlerinden bazıları üzerinde durulmaktadır.

1.4.2.1. Kalkanla

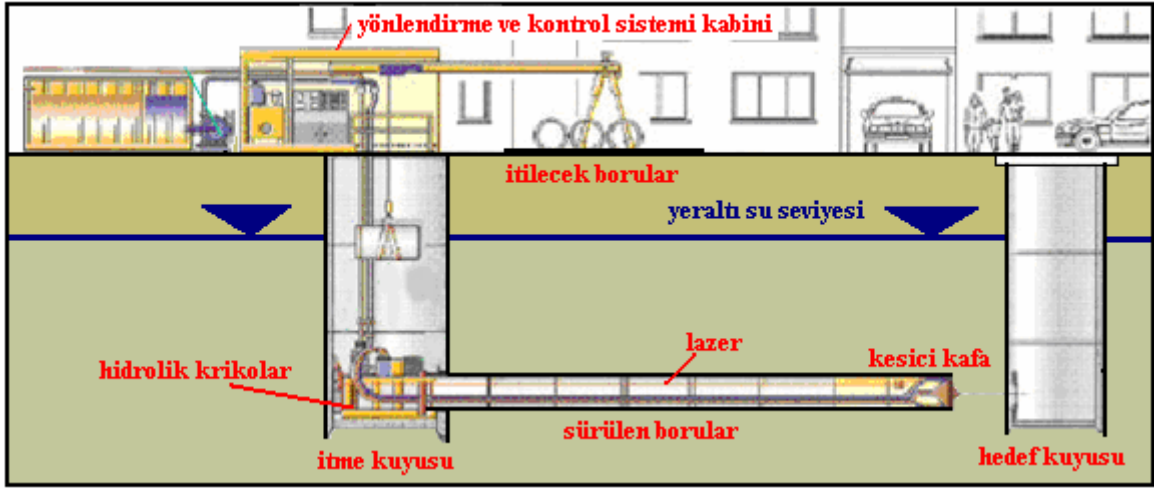
Kalkan (bukliye) esas olarak çelik bir silindir şeklindedir. Bu aygıt tünel boşluğunu çevreleyerek, zemine destek sağlamak suretiyle kaplamanın yapımına iksa gerektirmeden izin vermektedir. Kalkan kesici uç, gövde ve kuyruk kısımlarından oluşmaktadır. Kalkan kesici ucu sayesinde zeminde ilerlemekte, gövde kısmında gerekli itici krikolar ve pompalar, kuyruk kısmında ise kaplama yapımını kolaylaştıracak elemanlar bulunmaktadır (Taşlıca,1983).

Tünel kazısında tam kesit halinde ilerlemeyi sağlayan bu aygıt, yapılmış olan son kaplama kenarından destek alarak ileri doğru solucan hareketine benzer bir hareketle itilmekte ve keskin ucu sayesinde zemine gömülerek ayna kazısının yapılmasını sağlamaktadır.

Tasarlanmış çeşitli otomatik kalkanlar mevcut olmakla birlikte bunlardan dönen tamburlu otomatik kalkanlar yumuşak zeminlerde en yaygın kullanılanıdır. Bentonitli otomatik kalkan ise daha çok suya doygun ayrık taneli zeminlerde kullanılmaktadır. Bu aygıtın özeliği önyüzünden basınçlı bentonit eriyiğini püskürterek bu eriyiği aynadaki zemine bunun nüfuz ettirip bu suretle stabiliteyi sağlamasıdır. Basınçlı hava kullanan kalkanlarda ise stabilite basınçlı hava ile sağlanmaktadır.

1.4.2.2. Boru Sürmeyle

Bu yöntemde dışarıda imal edilmiş borular, krikolar yardımıyla arka arkaya zemine sürülmektedir. Bu yöntem Kanalizasyon ve su şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemde öncelikle boru döşenecek yerde giriş ve çıkışa iki adet kuyu açılmakta, giriş kuyusuna yan duvarlardan destek alacak şekilde yerleştirilen krikolar yardımıyla, kuyuya indirilen borular zemine itilmektedir. Kazı işi itme işleminden önce yada sonra çeşitli araçlarla yapılabilir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Boru sürme yöntemiyle açılan bir tünel örneği (Yavuz ve Ersoy, 2005)

Yeni gelişen teknolojilerle ölçme sistemleri elektronik lazer sistemine bağlı olarak yapıldığından yönlendirme işlemleri daha hassas ve hızlı yapılmaktadır. Lazer sistemleri sayesinde tünel içinde yapılan ölçme işlemlerine gerek kalmadığından hatalara neden olan olumsuzluklar da ortadan kalmaktadır.

1.4.2.3. Açıp- Kapamayla

Açıp-kapama yöntemi genellikle örtü kalınlığı 10 m'den az olan kanalizasyon, içme suyu ve altgeçit tünellerinin inşasında kullanılmaktadır. Bu yöntemde zemin, büyük bir hendek şeklinde kazılmakta, tünelin kaplaması yapıldıktan sonra üzeri tekrar örtülmektedir (Şekil 1.20.).

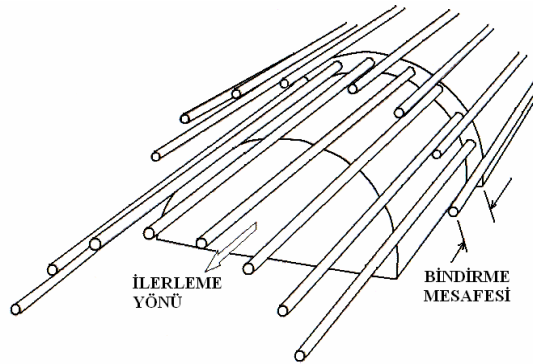


Şekil 1.20. Aç-kapa yöntemiyle inşa edilen bir metro tüneli görünümü

Bu yöntem, ekonomik ve kolay uygulanabilir olmasına karşılık, yüzeydeki trafiği etkileyebilmektedir. Bu nedenle yapım aşamasında trafiği en az etkileyecek önlemlerin alınmasını gerektirmektedir.

1.4.2.4. Şemsiyelemeyle (Boru kemer yöntemiyle)

Bu yöntemde tünel aynasının stabilitesini sağlamak amacıyla zemin çivisi adıyla anılan destekleme elemanları, tünel aynasında önceden belirlenen çapta ve uzunlukta delikler delinerek zemine uygulanmaktadır (Şekil 1.21.). Delinen deliklere uygun kalınlıkta ve uzunlukta çelik donatı yada yeterli çekme dayanımına sahip fibreglaslar yerleştirilmekte ve etrafı uygun kıvamda çimento enjeksiyonuyla doldurulmaktadır. Bu sayede oluşturulan ön kemer altından kazı yapılarak tünel inşası gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.21. Şemsiyeleme yönteminde zemin çivilerinin görünümü (Denek, 2006)

1.4.3. Sualtında Tünel İnşası

Tüp tünel yada batırılmış tünel adıyla anılan bu tüneller bir su yolu engelini aşmak için köprü ve derinden geçen geleneksel tünellere bir seçenek olmakla birlikte karakteristik olarak kanalların ve kanal tarzındaki doğal engelleri alttan geçmede en kısa yol olarak göze çarpmaktadır (Şekil 1.22.).



Şekil 1.22. Bir su yolunu geçmek için çeşitli seçenekler

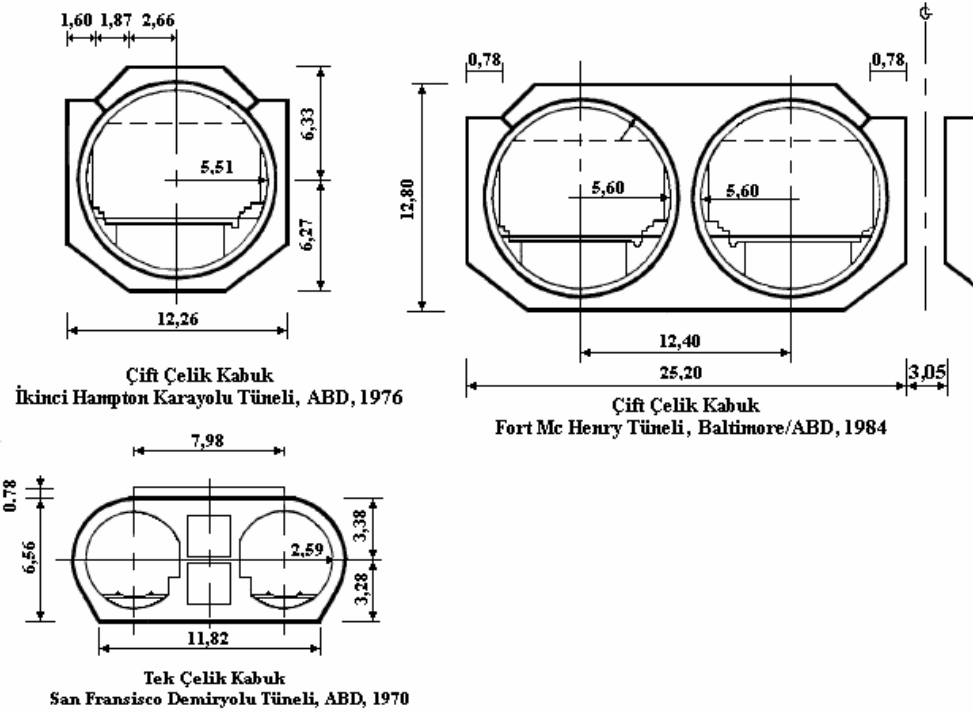
Batırılmış tünellerin yeni bir yapım tekniği olmayıp kullanımları yaklaşık 100 yıldan beri devam etmektedir. Dünya çapında tanınan 150'nin üstünde batırılmış tünel mevcut olup bunların yaklaşık 100 adedi karayolu ve demiryolu geçişi için tasarlanmıştır. Geri kalanlar ise su temini ve elektrik hattı tünelleri olarak kullanılmaktadır.

Bunlara ilişkin dünya çapında kullanılmış bazı kesit örnekleri Şekil 1.23. ve Şekil 1.24.'de verilmektedir (Saveur ve Grantz,1997).

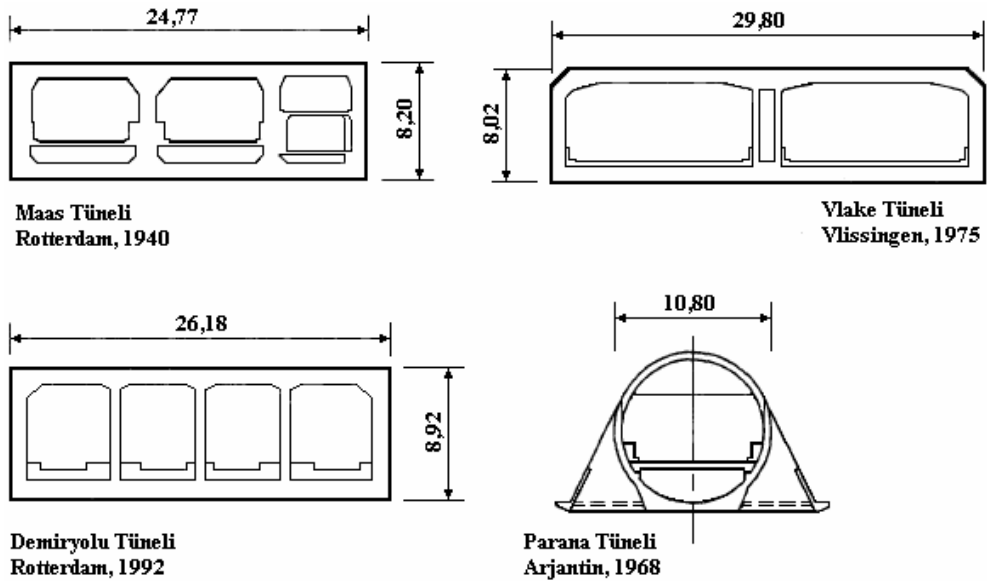
1.4.3.1. Batırılmış Tünellerin İnşa Aşamaları

Batırılmış tüneller yapım şekli bakımından diğerlerinden tamamen farklı olmakla birlikte tamamlandığında kullanım açısından diğerlerinden bir farkı bulunmamaktadır. Batırılmış tüneller, esasen kontrol edilebilir uzunluklarda prefabrike olarak üretilen bir dizi tünel elemanından oluşmakta ve bu elemanların her biri, genellikle yaklaşık 100 m uzunluğunda imal edilmektedir. Örneğin ülkemizin İstanbul boğazından raylı geçişi sağlayacak önemli bir projesi olan Marmaray projesinde kullanılan tünel elemanları Tuzla Tersanesinde üretilmektedir. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra elemanlar bir gemi gibi

denize indirilerek yüzdürülmektedir. Yüzdürülen elemanlar birleşimin yapılacağı inşa sahasına getirilerek batırılmakta ve sızdırmazlıkları sağlanacak şekilde su altında birleşimleri yapılan elemanların içindeki su pompalarla boşaltılarak imalat tamamlanmaktadır (URL-4,2007).



Şekil 1.23. Batırılmış çelik tünel kesitlerine ilişkin örnekler (Saveur ve Grantz,1997)



Şekil 1.24. Batırılmış betonarme tünel kesitlerine ilişkin örnekler (Saveur ve Grantz,1997)

1.4.3.2. Batırılmış Tünellerin Geleneksel Tünelere Göre Üstünlük Ve Sakıncaları

Suyollarının altından geçişler için kullanılan batırma tünellerin geleneksel tünellere göre çeşitli üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır (Bozkurt, 1997). Bunlar aşağıda sıralanmaktadır;

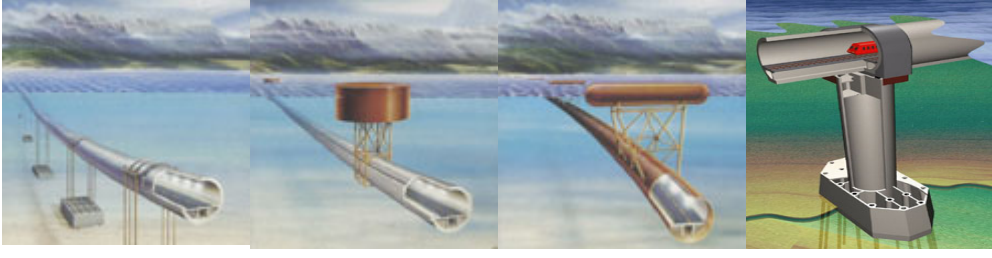
Bazı üstünlükleri:

- 1) Derinlikleri daha az olduğundan su yolunu aşmada en kısa uzunluktaki güzergâhı oluşturmaktadırlar. Ayrıca delme tünellere göre daha sığda oldukları için giriş ve çıkış eğimleri daha az olmakta, bu özeliğiyle az eğimlerin istendiği demiryolları için oldukça uygun olmaktadır.
- 2) İnşa aşamalarının çoğunun yeryüzünde normal şartlarda gerçekleştirilmesi nedeniyle inşaat kalitesi yüksek ve sızıntıların denetlenmesi kolay olmaktadır.
- 3) Batırılmış tünellerde, ayna stabilitesinin denetlenmesi amacıyla sürekli ölçümlerin yapılması ve su gelmesinin önlemesi için yüksek basınç altında bir çalışma ortamının oluşturulması gibi, zamana bağlı kısıtlamalar bulunmamaktadır.
- 4) Üretimlerin tekrarlanması verimliliğin daha fazla artmasını sağlamaktadır.

Bazı sakıncaları:

- 1) Yoğun trafik akışının olduğu suyollarında batırılmış tünel (Immersed Tunnel) yapımı bazen deniz taşımacılığını engellemesi bakımından pek de uygun sayılmayabilmektedir. Ancak bu gibi bir çok tünelde yapımın hiçbir problemle karşılaşmaksızın başarıyla tamamlandığı örnekler bulunmaktadır.
- 2) Temel kazısı, tünel elemanlarının gereken konumlara göre yerleştirilmesi ve birleştirilmeleri için özel aygıtlar gerektirmektedir.
- 3) Çevresel olarak duyarlı bölgelerde uygun hendek kazısı ve inşa tekniğinin seçilmesi gerekmektedir.
- 4) Beton tüp tünellerin üretimi için uygun alanların seçilmesi gerekmektedir.
- 5) Hendek kazısından çıkan malzemenin depolanacağı alanların önceden belirlenmesi gerekmektedir.

Deniz altı geçişinde kullanılan diğer bir tip de daldırılmış yüzen tünellerdir. Suyun kaldırma kuvvetinden faydalanılarak yapı uygun bir derinlikte desteklenmektedir. Tüpe benzer yapı çelik yada betonarme olarak üretilmekte ve üretilen parçalar kolonlar, halatlar yada dubalar sayesinde belirli seviyede yüzer halde tutulmaktadır.



Şekil 1.25. Batırılmış yüzen tünellerin çeşitli bağlantı türleri (URL-5,2007)

Yıllardır uygulanan batırılmış tünellerin kullanımı, elde edilecek tecrübeler ve tünel teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak, gelecekte de artarak devam edeceği savunulmaktadır. Yeni bir sistem olan daldırılmış yüzen tünellerin kullanımının ise, şu an çok fazla kullanılmamasına rağmen gerekli güzergah eğimlerinin elde edilemediği durumlarda, batırılmış tünellerin uygulanmadığı özellikle aşırı derin ve dar yerlerde, yaygınlaşacağı düşünülmektedir (URL-5,2007).

1.4.4. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin (YATİY) A. Brunner tarafından 1958 yılında patenti alınmış ve L. Müler ile L. V. Rabcewicz tarafından 1959 yılında dünyaya tanıtılmıştır.

Bu yöntem sanıldığı gibi sadece bir tünel kazı yöntemi ya da bir iksa yöntemi olmayıp aksine tünel inşasının her safhasında dikkate alınması gereken bir anlayış ve tünelciliğe bir yaklaşım şeklidir.

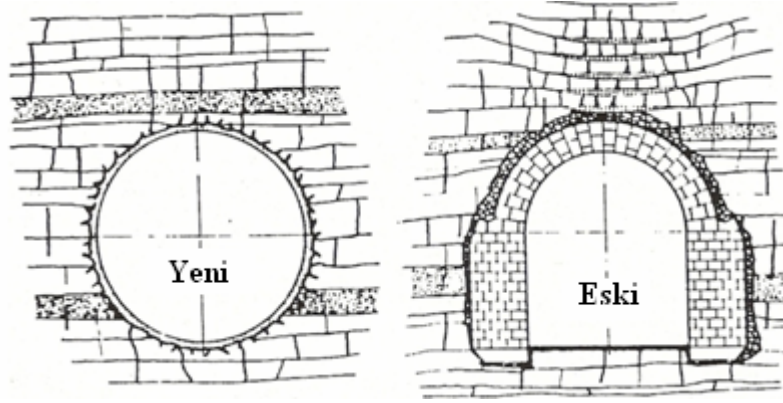
Rabcewicz'e göre bu yöntemde ince ve geçici bir iksa kullanılarak şekildeğiştirmelere izin verilmekte, böylece tünel içine doğru gelişen kaya basıncı azaltılmak ve yükler kazı çevresindeki sağlam kayalara aktarılmaktadır. Bu suretle kaplama daha az yüklenmektedir.

Geleneksel yöntemlerde gevşeme ve bel verme nedeniyle taşıyıcı sistemin farklı bölümlerinde boşluklar oluşmaktaydı. YATİY'in temel ilkesi, kazı işlemi esnasında kayaç yüzeyine uygulanan bulonlar ve ince bir tabaka püskürtme beton ile bu gevşemenin tamamen durdurulması ve kayaçların içinde kendi kendine oluşturulan bir kemerleşmeyle çevre kayalara yük aktarılması sağlanmaktadır. Oluşan kemerleşme iksa sisteminin bir

parçası olduğundan iksa elemanlarını oluşturan püskürtme beton, ankraj, çelik hasır ile zeminin birleşik bir yapı olarak tasarlanması gerekmektedir.

YATİY'in Müller tarafından 1978 yılında yayınlanan temel ilkeleri 1979 yılında Vardar tarafından Türkçeye çevrilmiştir (Ergin,1992). Yöntemin temel ilkelerinin başlıcaları aşağıda verilmektedir:

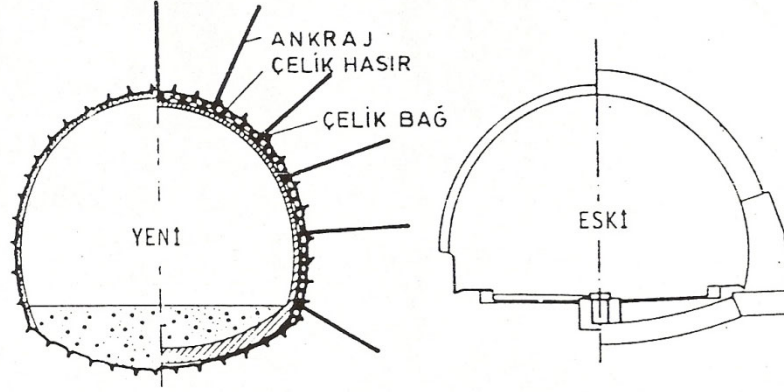
- 1) Tünel iksasının temel elemanı tüneli çevreleyen zemin kütesinin kendisi olduğu kabul edilmektedir. Kullanılan yapay iksa elemanlarının temel işlevi tünel çevresinde bulunan zeminin kendini desteklemesine yardımcı olmak ve zeminin başlangıçtaki dayanımını korumaktır.
- 2) Tüneli çevreleyen zeminin dayanımının azalmasına ve sabit yüklerin artmasına neden olan gevşemelerin önlenmesi gerekmektedir (Şekil 1.26.).



Şekil 1.26. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerine göre açılan tünel çevresinde oluşan gevşeme örnekleri (Ergin,1992)

- 3) İksa işlemlerine uygun zamanda başlanmasına, iksa sistemini oluşturan yapının yeterli rijitliğe sahip olmasına azami özen gösterilmesi gerekmektedir.
- 4) Kazı sonrasında iksanın, özellikle büyük şekildeğiştirmelerin ve gevşemelerin beklendiği durumlarda, boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olması gerekmektedir. Bunu sağlayan en başarılı yolunun kısa sürede sertleşen "püskürtme beton" kullanımını olduğu bilinmektedir.
- 5) İksa, çelik hasır, bulon, püskürtme beton ve çelik bağlarla yapılmak suretiyle gerekli dayanım kaplamanın kalınlaştırılmasıyla değil, kaplamaya gerekli esnekliği kazandıracak şekilde yapılmalıdır. Zemin kendine taşıtmak için gevşediğinden

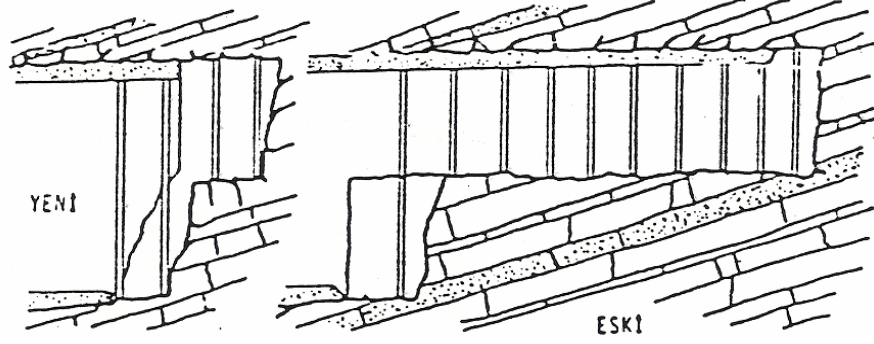
dolayı kaplamaya yük olacak kütlenin ankrajlarla kaya kütesine aktarılması gerekmektedir (Şekil 1.27).



Şekil 1.27. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerinde kullanılan iksa örnekleri (Ergin,1992)

- 6) Tünel çevresindeki ve onu çevreleyen zeminler içindeki şekildeğiştirme ve gerilmelerin ölçülmesi, zeminin uygulama sırasındaki davranışını göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Önvarsayımlara göre yapılan tasarım ile zemin kütesinin içine girildikten sonra uygulanması gereken tasarım çoğunlukla beklenmedik etmenlerin ortaya çıkması nedeniyle birbirinden farklı olabilmektedir. Bu nedenle tünel tasarımında, sürekli değişikliği zorunlu kılmaktadır. Tünel mühendisliğinde bir tasarımdan değil adım adım ve yer yer değişen bir tasarım sisteminden söz edilmektedir. Bu sistemin kendi arasındaki uyumun ve zemin ortamına uygunluğunun başarılabilmesi için ise gözlem, ölçme, irdeleme ve arşivleme gibi çalışmaların eksiksiz yapılması zorunlu olmaktadır.
- 7) Bir açıklığın taşıyabilir duruma gelebilmesi için taşıyıcı halkanın kapanması gerekmektedir. Yay ve derzli halka stabilitesi daireye oranla daha azdır. Bu bakımdan bu koşul ancak tam kesit kazıları izleyen dairesel kaplamalar ile elde edilebilmektedir. Ancak taban zeminin taşıma gücünün iyi olduğu durumlarında tabanın sağlamlaştırılması için sağlamlaştırma yayının bir halkaya tamamlanması gerekmeyebilmektedir.
- 8) İksadan fazlaca uzaklaşmış üst yarı kazılarında, tavanın sağlamlaştırılması ile oluşturulan yay şeklindeki kaplama tünelin eksen doğrultusunda bir eğilme momenti meydana getirmektedir. Durum böyle olunca eğilmeye zorlanan tünelin uç

kısımındaki üst yarı kaplamasının yan ayaklarında çok büyük gerilmeler oluşmaktadır. Dolayısıyla üst yarı kazısının iksadan fazla uzaklaşmaması ve tünel kaplamasının en kısa zamanda tamamlanması gerekmektedir (Şekil 1.28.).



Şekil 1.28. Avusturya'nın yeni ve eski yöntemlerinde gerçekleştirilen iksa durumlarına ilişkin şematik örnekler (Ergin,1992)

- 9) Tünelin kazılması zeminin başlangıçtaki gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Tünel boşluğunun biçimini ve boyutunu değiştirmeye yönelik her yeni kazı, gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine neden olabilmekte ve böylece zeminin dokusunun giderek gevşemesi sonucunda zeminin dayanımı azalmaktadır. Gerilmelerin boşalması sırasında oluşan şekildeğişmeler süreksizlik yüzeylerini açmakta, düzgün olmayan ötelenmelerle zeminin dokusu örselenmektedir. Bu durum su gelişinin artması ve çatlakların mekanik davranışlarının değişmesi bakımından da önem taşımaktadır. Zeminin en sağlam olduğu konumun ise kazı öncesindeki ilk durum olduğu bilinmektedir. Bu durumunun korunabilmesi için kazı sonrası gerilmelerin bir defada oluşturulması gerektiği bilinmektedir. Zira kısmi kazılar, çalışmalarını karmaşıktığı gibi doğal yapının da giderek bozulmasına neden olmaktadır. Bunu önlemek için kazının tam kesit olarak yapılması zorunlu olmaktadır.
- 10) Yeraltı boşluğunun, en kesiti daire yada elips şeklinde olmalı ve bu boşluklarda çıkıntı ile köşelerin bulunmaması gerekmektedir. Zira tünel çevresinde bulunan keskin çıkıntı ve köşeler, tünel duvarında ve zeminin içinde gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Durum böyle olunca bu bölgelerde kesit boyutlarının büyümesi gerekmekte, yapının stabilitesi ve güvenliği tehlikeye düşebilmektedir.

- 11) Öniksa işleriyle yapının stabilitesi sağlanarak iç kaplamanın inşasından önce şekildeğiştirmeler durmuş, yani ikincil gerilme durumu dengeli son şeklini almış olması istenmektedir. İç kaplamanın görevi emniyeti sağlamak ve estetik açıdan düzgün bir yüzey elde etmektir.
- 12) Zemin-kaplama sisteminin yapım süresi içindeki karşılıklı etkileşimlerinin bilinmesi, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmelerin sönümlenip sönümlenmediğinin belirlenmesi ve gerilmelerin yer, büyüklük ve türlerinin hesaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu etkileşimi incelemek amacıyla zemin ve beton içine yerleştirilen ölçme araç ve gereçleri, yapının tamamlanmasından sonra da denetim amacıyla kullanılmaktadır.
- 13) Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda yeraltında açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi çalışmakta ve suyu kendine çekmektedir. Bu nedenle su akışı, süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi ve çalışma ortamını güç koşullar altına sokması bakımından istenmemektedir. Su boşaltan ağızların beton ile tıkanması kaplama arkasında su basınçlarının büyük değerlere ulaşmasına neden olmaktadır. Bu su basıncının sisteme zarar vermemesi için suyun drene edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla boşluk çevresine genellikle drenaj borularının yerleştirilmesi uygun bir çözüm olmaktadır (Ergin,1992).

1.5. Tünel İnşaatlarında Karşılaşılabilen Bazı Sorunlar

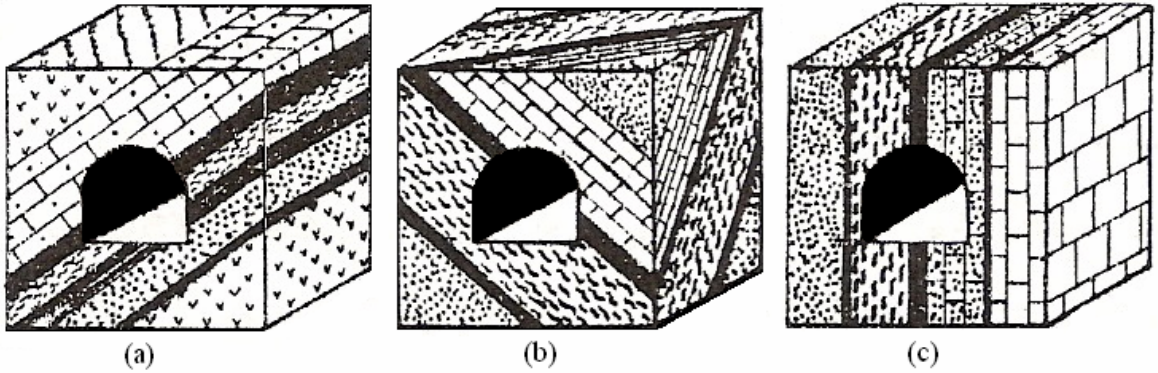
1.5.1. İnşa Esnasında Su Çıkması

Tünel açımı ile yeraltı suları; duvar ve tavandan sızıntı şeklinde, bazen sürekli bir akıntı, bazen de yüksek basınç altında fişkirarak tünel içine doğru akmakta ve bu sular tünel açma işlemlerinin zorlaşmasına, zeminde ise şişme, kabarma ve akmaya neden olmaktadır. Su gelişinin öngörülenden fazla olduğu yada su patlaması beklenen tünellerde en önemli sorunun eğim yönünde çalışmanın olduğu bilinmektedir. Bu durum özel ve pahalı pompalama çalışmalarını gerektirmektedir. Ayna önünde sürekli biriken su özellikle zayıf kesimde ve faylı bölgelerde tünel stabilitesini bozabilecek ölçüde ayak temellerini yumuşatmaktadır. Gerçekten bu gibi ortamlarda su, zemin basıncıyla birleşince beklenmedik göçüklere neden olabilmektedir. Ayrıca yeraltı suları, yapılacak olan beton kaplama üzerinde kemirici etkileri olan, Kalsiyum Sülfat (CaSO_4), Sodyum Sülfat

(Na_2SO_4), Magnezyum Sülfat (MgSO_4) gibi kükürt tuzları ya da Hidrojen Sülfür gibi asitleri bünyelerinde taşıyabilmektedirler (Yalçın ve Vardar,2006;Genç,1983).

1.5.2. Kaplamalara Tabakalı Zeminlerden Aşırı Basınç Gerilmelerinin Etkimesi

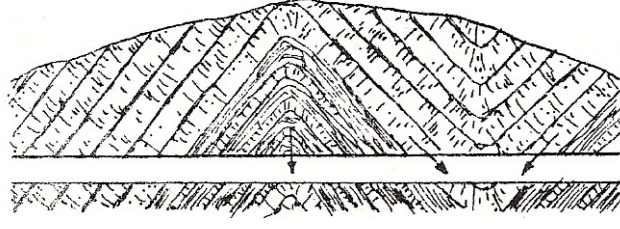
Tünel inşa edilecek zeminin tabakalanma şekli, tünel kaplamasına etkiyen basınç gerilmelerini arttırmaktadır. Eğer tünel üzerindeki tabakalanma Şekil 1.29a ve Şekil 1.29b'deki gibi ise zemin basıncı yan duvarlarda Şekil 1.29c'dekinde ise tünel tavanında yoğunlaşmaktadır.



Şekil 1.29. Zemin basıncının tünel yan duvarlarında (a,b) ve tünel tavanında (c) yoğunlaştığı zemine ilişkin tabakalanma durumları (Genç,1983)

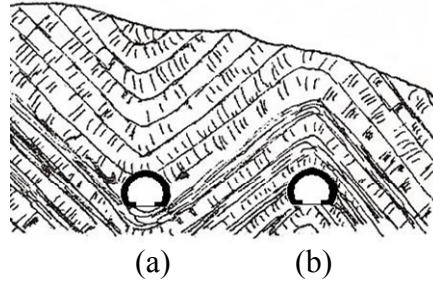
1.5.3. Kaplamalara Antiklinal ve Senklinallerde Farklı Basınç Gerilmelerinin Etkimesi

Kıvrımlı bir sahada tünel açımı esnasında karşılaşılan antiklinal yada senklinaller tünel kaplaması üzerine farklı basınçların gelmesine neden olmaktadır. Şekil 1.30.'da antiklinal ve senklinal eksenlerini dik olarak kesen bir tünel görülmektedir. Böyle bir sahada açılan bir tünelde tabaka eğimlerinin tünelin ilerleme yönünde olduğu durum emniyet bakımından en uygun olmakta, tabaka eğimlerinin tünelin giriş kısmına doğru olduğu kesimlerde ise patlatmayla ilerleme daha kolay olmaktadır. Ancak bu kesimlerde tabaka düzlemleri boyunca tünel içine doğru blok kaymaları beklenebilmektedir.



Şekil 1.30. Antiklinal ve senklinal eksenini dik olarak kesen bir tünel boykesiti (Szechy,1970)

Antiklinal eksenini dik olarak kestiği yerde tünelin üzerine gelen düşey basınç daha az, buna karşılık tünel giriş ve çıkışlarında ise yatay basınç daha fazladır. Diğer önemli bir sorun da, antiklinalin ekseninde tabakaların aşağıya doğru genişleyen yukarı doğru daralan kamalanmaları aşırı sökülmelere yada kaya bloklarının düşmesine neden olması ve kazıyı engellemesidir. Bu tür kaya düşmelerinin kayadaki mevcut kırık yoğunluğuna bağlı olarak artacağı açıktır. Senklinal eksenini dik doğrultuda kesen bir tünelde ise koşullar diğerinin tam tersi olduğu bilinmektedir.

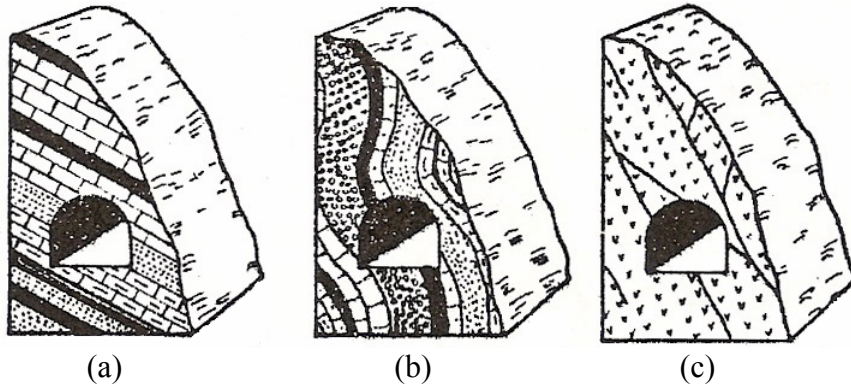


Şekil 1.31. Senklinal (a) ve antiklinal (b) eksenini boyunca açılan tünel enkesiti örnekleri (Szechy,1970)

Senklinal ekseni boyunca açılan bir tünelde, bloklar tabaka düzlemleri boyunca tünel içine doğru kayma, yer altı suları da tünel içine toplanma eğilimindedir (Şekil 1.31a). Tünelin antiklinal eksenine paralel olması durumunda (Şekil 1.31b) kemerleşmeden dolayı, hafif eğimli tabakalar kaya basıncını önlemekte ancak bu durumda kazı kolay olmamaktadır.

1.5.4. Yamaç Tünellerinde Stabilitenin Bozulması

Yamaçlara yakın açılan tünellerde yamaca göre tabaka yönelimi stabilitenin bozulmasına neden olan en önemli etkidir. Tabaka doğrultusu, yamaç eğimiyle aynı doğrultuda olması durumunda (Şekil 1.32a) yamaç stabilitesi tehlikeye düşebilmektedir. Tabakalarda kıvrımlar olursa (Şekil 1.32b) kayma dayanımı bir miktar artmaktadır. Yamaçtaki zemin örtüsün çatlaklı ve kırıklı olması durumunda (Şekil 1.32c) boşluk suyu basıncı üzerindeki örtüyü kaldırarak bu sayede boşalmaya çalışmaktadır (Genç,1983).



Şekil 1.32. Yamaç eğimini zemin tabakalanmasıyla aynı doğrultuda olduğu (a), kıvrımlı tabakalanma (b) ve çatlaklı zemin örtüsü (c) durumlarında yamaç stabilitesinin bozulmasına ilişkin şematik örnekler (Genç,1983)

1.5.5. Tünel Güzergah Zemininde Kırıkların Bulunması

Yerkabuğundaki kırıkların (fayların) kayaç davranışını oldukça etkileyeceği açıktır. Bu nedenle kırıklar tünel inşasından önce ayrıntılı olarak araştırılmalı, bunların aktif olup olmadığı, eğim ve doğrultusu, açılacak tünele etkisi, genişliği ve dolgu malzemesinin cinsi gibi özellikleri belirlenmelidir. Kırık aktif olsun yada olmasın, kırık bölgesindeki malzeme örselenmiş olması nedeniyle, davranışı kayaçtan çok yumuşak zemine benzemektedir ve açımı esnasında tünel içine akarak tünel stabilitesini bozulabilmektedir. Diğer taraftan kırıklar kil ile de dolu olabilmekte, bu durumda kil su alarak şişmekte ve daha yapım esnasında tünel iksasının yer değiştirmesine yada göçmesine bile neden olabilmektedir. Tünel aktif bir fayı kesmesi durumunda ya güzergah değiştirilmeli, yada tünel yapımı terk edilerek mümkün ise bölge açık yarma ile geçilmelidir (Arioğlu ve Yılmaz, 2006).

1.5.6. İnşaat Esnasında Kaya Patlaması

Doğada özellikle derinde bulunan kayaların bünyesinde, hem kendi ağırlıkları hem de üzerindeki kütlelerin ağırlıklarının etkisinde bulunması nedeniyle, doğal gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler, kaya hareketinin sınırlanmamış olması durumunda yerdeğiştirmelere ve şekildeğiştirmelere neden olabilmektedir. Hareketi sınırlanmış kayada söz konusu gerilmeler artmakta ve böylece basınç dayanımı yüksek gevrek kayalarda açılan tünellerin tavan ve duvarlarında patlamayla ani kırılmalar meydana gelebilmektedir (Genç,1983).

1.5.7. Derin Tünellerde Sıcaklık Artışı

Sıcaklık artışı 150m'den daha az derinlikte açılan tünellerde pek önemli olmasa da derin tünellerin kazısı sırasında karşılaşılan önemli sorunlardan birisidir.

Bilindiği gibi yeryüzünden derinlere inildikçe her 33m'de bir sıcaklık yaklaşık olarak 1°C artmaktadır. Öyle ki bu artış volkanik sahalarda 10-15m.de 1°C'ye kadar yükselebilmekte, bu da derin tünellerde önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır (Genç,1983).

1.5.8. Yeraltı Gazlarının Etkisi

Tünel açımı esnasında özellikle çalışanların hayatını tehlikeye sokabilecek gazlarla karşılaşılabilir. Volkanik saha, sıcak kaynak bölgeleri, petrol bölgeleri civarındaki tünellerde sıklıkla patlayıcı özeliği olan CH₄, çok zehirli olan CO ve betona etki eden H₂S ile SO₂ gibi gazlara rastlanmaktadır (Genç,1983).

Gaz akımının düzenli olması durumunda gaz giriş yerini betonla kapatmak uygun olabilmektedir. Ayrıca gazların ve kazı sırasında oluşan tozun dışarı atılması için, gerekli olan temiz hava miktarı hesaplanmak suretiyle, bir havalandırma sistemi oluşturulması, böylelikle tünel içinde gaz ve toz yoğunluğunun insan sağlığına zarar vermeyecek düzeye indirilmesi sağlanabileceği açıktır (Kolymbas,2005).

1.5.9. Asfalt Yol Kaplaması Nedeniyle Oluşan Sorunlar

Ülkemizde uzun tüneller de dâhil olmak üzere birçok tünelde asfalt yol kaplaması kullanılmaktadır. Asfalt yol kaplaması tünellerde meydana gelen kazalar neticesinde çıkabilecek yangınlardan etkilenmektedir. Yangın sonucu tünel içinde sıcaklık 1000 °C üzerine çıkabilmekte oysa asfalt kaplamalar 500 °C sıcaklıkta kolaylıkla alev alabilmektedir. Yanan kaplama sonucu tünel içindeki sıcaklık çok daha fazla artmakta ve duman nedeniyle büyük facialara neden olabilmektedir. Nitekim Fransa- İtalya arasındaki Mont-Blanc karayolu tüneline yaşanan kaza sonucu çıkan yangında 39 kişi hayatını kaybetmiştir (Karakule,2006).

Bu faciaların önüne geçmek için burada, asfalt tünel kaplaması yerine tünellerde çok daha güvenli olan beton kaplamaları kullanılmasının uygun olacağı belirtilmelidir.

1.5.10. Aydınlatma Sorunları

Bölgemizdeki birçok tünelde eksik aydınlatılmış yada tamamen karanlık tünellere rastlanmaktadır. Zira Gümüşhane-Trabzon arası birçok tünelde yeterli aydınlatmanın olmadığı ve özellikle kış aylarında tünel içini bilmeyen sürücülerin karanlık ortamdaki buzlanmayı fark edememeleri nedeniyle birçok kazanın yaşandığı basınıımızda çıkan haberler arasında yer aldığı bir gerçektir.

Burada tünellerin aydınlatmasıyla ilgili ayrıntılı bilgi için (İzbek, 2006; Akbulut,2006) kaynaklarına başvurulabileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

1.5.11. Patlatma Sorunları

Patlatma ile açılan tünellerde karşılaşılan en önemli sorun aşırı sökülmedir. Aşırı sökülme; kayacın cinsine, ayrışma derecesine, süreksizliklere, çatlak, kırık, tabakalanma durumlarını, tünel çapına, patlayıcıya, iksa şekline, iksa ile patlayıcı arasındaki mesafe gibi etkenlere bağlı olduğu bilinmektedir. Aşırı sökülmeyi engellemek amacıyla en verimli şekilde 1m³ kayacı sökmek için gerekli olan patlayıcı madde miktarının belirlenmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu patlayıcı miktarının patlayıcı madde cinsine, galeri kesitine,

zemin özelliklerine bağlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu konuda ayrıntılı bilgi kaynak (Natm,1997;Kaya,1983)'da mevcuttur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER

2.1. Tünel Kaplamaları

2.1.1. Kaplama Çeşitleri

Sağlam kayaç zeminlerde inşa edilen dâhil tüm zeminlerde inşa edilen tünellere genellikle başta yeterli stabilite olmak üzere, dayanım, dayanıklılık, süneklik ve rijitlik özelliklerinin kazandırılması açısından kaplama yapılmaktadır. Yumuşak zeminlerde ise sadece dayanım yönünden kaplama yapılması kaçınılmaz olmaktadır.

Tünellerde günümüzde çok farklı kaplama türü kullanılmakla birlikte geçmişte en çok tercih edilen kaplamaların kesme taş olduğu bilinmektedir. Kemer şeklinde örülen bu taş kaplamalar, oldukça zahmetli ve pahalı olduklarından, günümüzde çok kullanılmamaktadır.



Şekil 2.1. Kesme taş kaplamalı 1893’de inşa edilen Totkey Tünelinden bir görünüm (URL-6,2007)

Kaplamalarda kullanılmış bir diğer malzeme de tuğladır. İşçiliği kesme taşa göre daha kolay olmakla birlikte yeteri kadar dayanımlı olmadıkları gibi geçirimsizlikleri de yüksektir. Bu kaplamaların hasar görmelerinin en önemli nedeni kemerin dış yüzü ile zemin arasında sıkı bir dolgu temin etme zorluğu olarak gösterilmektedir. Zira bu boşlukların

önlenememesi durumunda farklı yüklemeler altında bu tür kaplamalar genellikle hasar görmektedir.



Şekil 2.2. Tuğla kaplamalı Kitasui Demiryolu Tüneli'nden bir görünüm (URL-7,2007)

Günümüzde genellikle 1) Dökme beton kaplamalar, 2) Püskürtme beton kaplamalar ve 3) Prefabrike kaplamalar kullanıldığından kesme taş kaplamalar gibi tuğla kaplamaların kullanımı da son derece azalmıştır.

2.1.1.1. Dökme Beton Kaplamalar

Dökme beton kaplamalar, gerek kaya ve gerekse yumuşak zeminlerde inşa edilen tünellerde sıklıkla kullanılan bir kaplama türüdür. Plastikliği sayesinde kalıpla zemin arasına yerleştirmeye imkan vermekte ve düz bir satıh oluşturulabilmektedir.

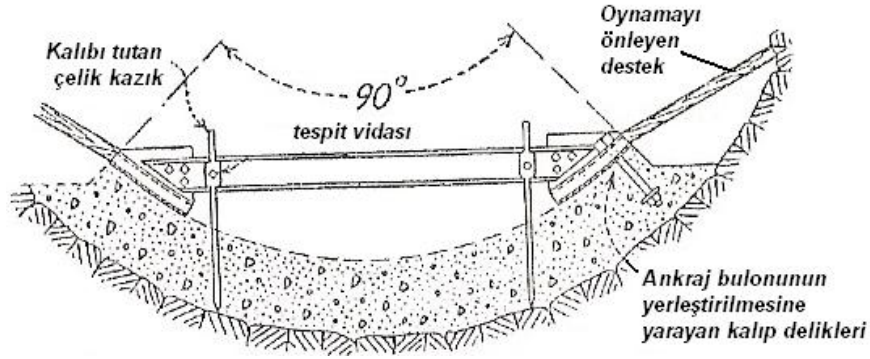
Günümüzde, geliştirilmiş araç ve gereçler sayesinde kolay olduğundan, kullanımları da artmıştır. Özellikle günümüzde püskürtme betondan yapılan geçici iksa üzerine genellikle son kaplama olarak dökme beton kullanılmaktadır. Alt geçitlerde olduğu gibi aç-kapa yöntemiyle inşa edilen tünel kaplamaları ve sualtı tünel kaplamalarında, koşullar rahatlıkla kalıp yapmaya ve betonun kalıba yerleştirilmesine imkân tanıdığından dökme betonla yapılmaktadır. Yumuşak zeminlerde kaplama dökme betonla yapılması durumunda iş çok

yavaş ilerlenmekte, işçilik çok artmaktadır. Bu nedenle günümüzde genellikle tünel kaplamalarında püskürtme beton kullanılmaktadır.

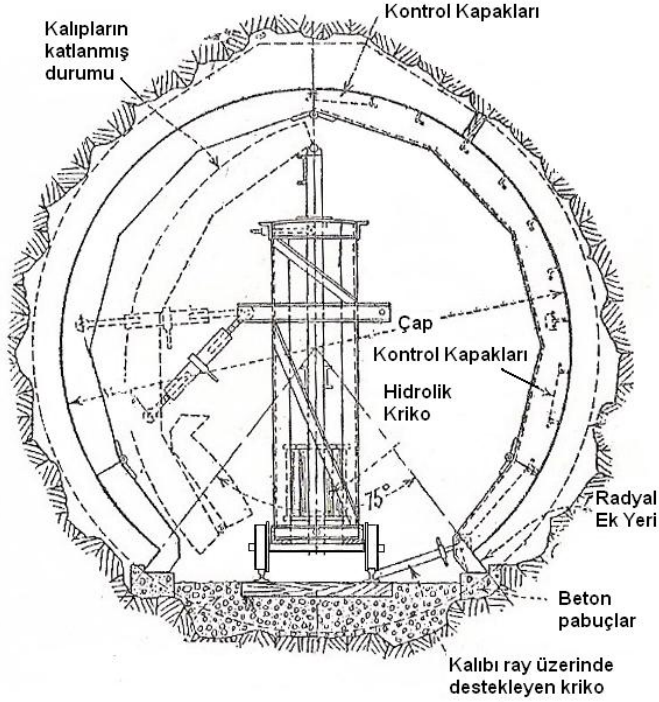
Kayaç zeminde inşa edilen tünellerde dökme beton kaplamalar;

- 1) Önce tabanın sonra kenar ayaklarla kemerin dökümü,
- 2) Önce kenar ayaklarla kemerin daha sonra tabanın dökümü ve
- 3) Tüm kesitin bir defada dökümü seçeneklerinden biriyle gerçekleştirilmektedir.

Bir engel yoksa bugüne kadar tünel kaplamalarında genellikle taban betonunun önce döküldüğü birinci seçenekteki kullanılmaktadır. Zira bu seçenekte önce dökülen taban betonu daha sonra dökülecek olan kenar ayak ve kemere iyi bir mesnet teşkil etmektedir. İkinci seçenekte kenar ayaklara bir mesnet oluşturulamaması ve kesitin kapatılmamış olmasından dolayı bu seçeneğin, üzerine aşırı yük gelen tünellerde, kullanılması mümkün olmamaktadır. Üçüncü seçenek ise dairesel yada daireye yakın kesitli tünellerde kullanılabilir. Birinci seçenek için örnek bir taban kalıp şeması Şekil 2.3.'de, bunlardan üçüncü seçenek olan tüm kesitin bir defada dökümünü için örnek bir kalıp şeması ise Şekil 2.4.'de verilmektedir.



Şekil 2.3. Örnek bir tünel taban kalıbı (Beykont,1951)

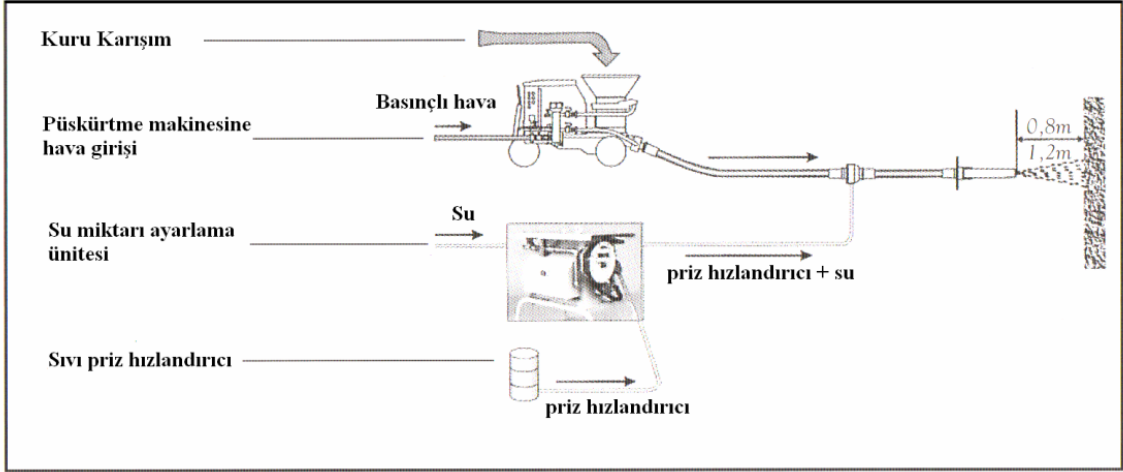


Şekil 2.4. Tüm kesitin bir defada beton dökümüne imkân veren bir kalıp şeması (Beykont,1951)

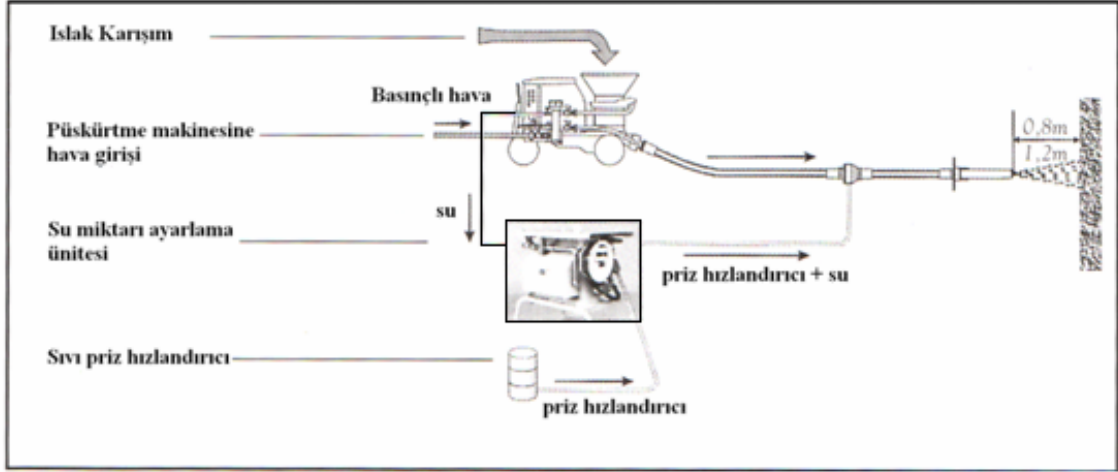
2.1.1.2. Püskürtme Beton Kaplamalar

Püskürtme beton, onarım yada yapım amacıyla önceden kuru yada ıslak yolla hazırlanarak hava basıncı kullanarak yüksek hızla yapının uygulama yüzeyi yada uygulama alanına püskürtülebilen betondur (TS 11747,1995). Bu beton ilk olarak 1907'de Carl Ethan Akeley tarafından hayvan modelleri yapmak için kullanılmıştır. İlk defa 1950'lerde iri agrega kuru karışımda kullanılmış ve bu suretle elde edilen beton püskürtme beton anlamına gelen "shotcrete" olarak adlandırılmıştır. Daha sonra bu terim ıslak karışımla üretilen betonlar için de kullanılmıştır.

Kuru karışımda karma suyu betona püskürtme başlığında ilave edilmektedir (Şekil 2.5.). ıslak karışımda ise, priz hızlandırıcı katkı maddeler hariç, beton bileşimi püskürtme başlığına gelmeden önce karıştırılmaktadır (Şekil 2.6.).



Şekil 2.5. Kuru karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005)



Şekil 2.6. Islak karışım yoluyla püskürtme betonun üretimi (Vanderwalle, 2005)

Bu iki yolla üretilen püskürtme betonların birbirine göre üstünlük ve sakıncaları çizelge 2.1.'de özetlenmektedir.

Burada püskürtme betonların üretim, uygulama ve bakım kuralları konusunda TS11747, TS EN 14487 ve ACI 506R-90 standartlarına başvurulabileceği belirtilmelidir.

Çizelge 2.1. Kuru ve ıslak yolla üretilen püskürtme betonların karşılaştırılması (Vanderwalle, 2005).

Karşılaştırma Ölçütü	Kuru karışım	Islak karışım
Araç-Gereç	<ul style="list-style-type: none"> - Toplam yatırım maliyet düşüktür. - Basit olan bakımı uzun ömürlüdür. - Çalışma alanında çok sayıda araç gerektirdiğinden çalışmayı zorlaştırmaktadır. - Kuru karışım nedeniyle pompa, hortum ve başlıklarda daha fazla aşınma meydana gelir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Toplam yatırım maliyeti daha yüksektir. - Bakımları zahmetli olması yanında daha kısa ömürlüdür. - Çalışma alanında daha az sayıda araç gerekmektedir. - Pompa, hortum ve püskürtme başlığında daha az aşınma sağlar.
Karışım	<ul style="list-style-type: none"> - Çalışma alanında mikser gerektirmektedir. - Arzulanan karışım oranını tutturmak oldukça zordur. -Nemden korunmak koşuluyla önceden hazırlanmış kuru karışımlar kullanılabilir. - Islak kum kullanılması durumunda başarımlar düşmektedir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mikser çalışma alanından uzakta olabilmektedir. - Arzulanan karışım oranını tutturmak daha kolaydır. - Islak karışım üretmek yerine hazır beton da kullanılabilir. - Islak kum kullanılabilir.
Ürün	<ul style="list-style-type: none"> - Saatte 5 m³ civarında beton üretilip yerine konabilmektedir. - Islak karışımdan daha uzak mesafeye taşınabilir. - Su/ çimento oranının düşüklüğüne bağlı olarak yüksek dayanım elde edilebilir, ancak su girişinin operatör tarafından uygulama esnasında ayarlanması kalitenin değişken olmasına neden olmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> - Üretilerek yerine konan beton saatte 20 m³'e kadar ulaşabilmektedir. - Taşınma süresi ve mesafesi sınırlıdır. - Su/ çimento oranının iyi ayarlanmasıyla yüksek dayanım elde edilebilmekte ve kalite daha homojen olmaktadır.
Geri Sıçrayıp Dökülen Malzeme	<ul style="list-style-type: none"> - Düşey duvarlarda %15-40 oranında, tavanda ise %20-50 oranında bir geri sıçrama olmaktadır. - Kayıp malzeme yığınları oluşur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uygun bir karışım sayesinde geri sıçrama oranı %10'dan daha az olmaktadır. - Kayıp malzeme yığınları oluşmaz.
Toz oluşumu	<ul style="list-style-type: none"> - Fazla miktarda toz oluşmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> - Çok daha az toz olduğundan daha iyi bir çalışma ortamı sağlamaktadır.
Katkılar	<ul style="list-style-type: none"> - Toz katkıları mikserde, sıvı katkıları ise püskürtme başlığında ilave edilerek kullanılabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> - Genellikle sıvı katkıları kullanılmaktadır.

Püskürtme beton bir kaya üzerine uygulandığında öncelikle çatlak, eklem gibi boşlukları doldurmakta, ayrık parçaları bir araya getirmekte ve daha fazla bozulmaya engel olmaktadır.

Püskürtme betonun tünel kaplamalarında kullanımının tercih edilme nedenleri aşağıda özetlenmektedir:

- 1) Tünel açılan zeminde oluşacak gevşeme nedeniyle meydana gelen yerdeğiştirmeleri, kaya kütlelerinin boşluklarını (çatlak, eklem vb.) doldurarak rijitliklerini ve dayanımlarını arttırmak, kaya kütlelerinin yüklerini, bitişik stabil kayalara aktarmak ve bir kabuk gibi davranarak, durdurması yada olabildiğince azaltması.

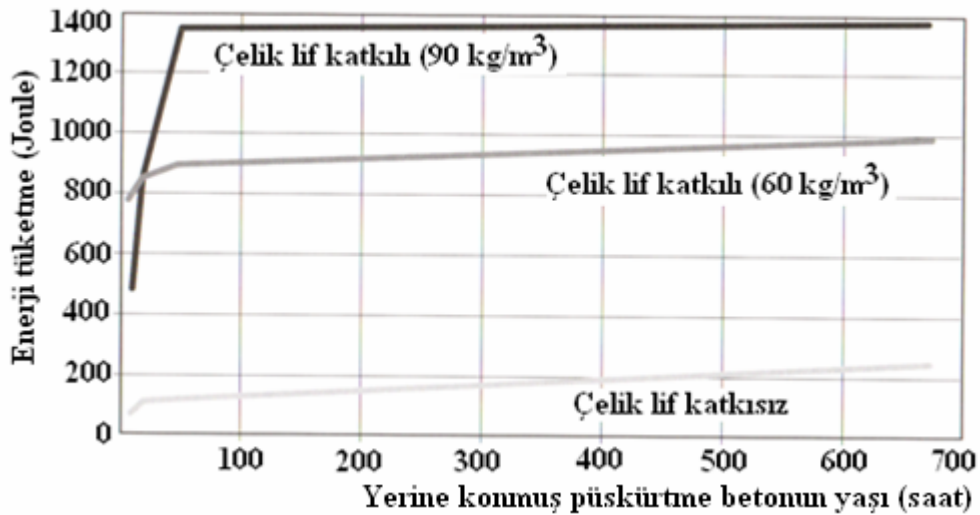
2) Kazı yüzeyini su ve havanın bağıl nemine karşı yalıtkan hale getirmek suretiyle bozulmaya karşı koruması.

3) Hızlı ve kolay uygulanabilir oluşu.

Tünellerin püskürtme betonla kaplanmaları ano halinde yapılan kazılar sırasında başlatılmaktadır. Kazıdan sonra kaplamasız zemine, çelik kemer, kaya bulonları, kafes donatılar vb. iksa elemanları yerleştirildikten sonra uygulanmaktadır. Söz konusu iksaların kullanım şekli Bayındırlık Bakanlığının ilgili şartnamesinde mevcuttur (Natm, 1997). İksa elemanları sayesinde bu betonun yüksek basınç dayanımına karşı düşük olan kesme ve çekme dayanımı arttırılmış olmaktadır.

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi günümüz tünelciliğinde mümkün olduğunca yükü zeminin kendisine taşıtırılması istenmektedir. Bu amaçla zeminin belirli bir miktar hareketine izin veren ve bu suretle yeni bir dengenin oluşturulması için zeminde kemerlenmeye imkan veren iksaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iksa yukarıda belirtilen elemanlarla oluşturulabilmekle beraber bu iş için en uygun çözümü hasır yada lif donatılı püskürtme beton sağlamaktadır.

Püskürtme betona katılan çelik liflerin özellikleri TS 10513'e uygun olmalı, betona karıştırılması ve denetimleri ise TS 10514'e göre yapılmalıdır. Burada çelik lifli püskürtme betonların lifsiz püskürtme betonlara göre çok daha fazla enerji tükettikleri belirtilmelidir. Aşağıda Şekil 2.7.'de verilen eğriler de bu düşünceyi desteklemektedir.



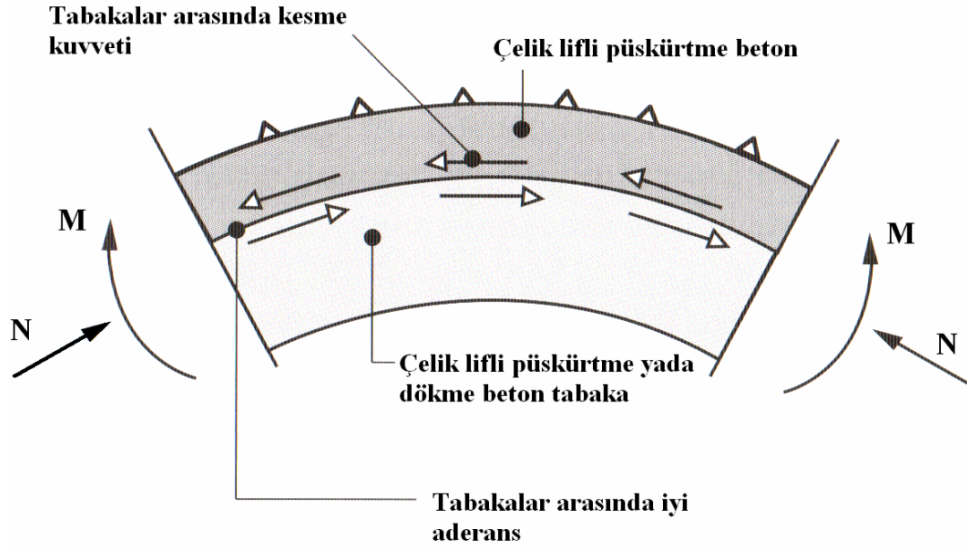
Şekil 2.7 Lifli ve lifsiz püskürtme betonların enerji tüketme kapasiteleri (Vanderwalle, 2005).

Çelik lifli püskürtme betonlarda lifler her doğrultuda dağılmış olduğundan anizotrop olan betonarme elemanlara oranla izotropiye çok yakın bir beton elde edilmekte böylece bu betonların taşıma güçleri artmaktadır. Diğer taraftan bu betonların rötreten ve farklı sıcaklıklarından doğan kaçınılmaz çatlakların açılmasını daha iyi önledikleri de savunulmaktadır.

Teknik literatürde çelik lifli püskürtme betondan inşa edilen kaplamalar ile hasır çelik kullanılan kaplamalar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalara göre çelik lifli püskürtme beton kaplamaların kesme dayanımının daha yüksek olduğunu, eğilme dayanımının ise hasır çelik donatı kullanılan beton kaplamalarinkine ulaştığı belirtilmektedir. Burada bu sonuçların betona katılan çelik liflerin yüksek çekme dayanımına sahip olmaları durumunda geçerli olduğunu, püskürtme betonun elastik sonrası davranışının tellerin betondan sıyrılma özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirtilmelidir. (URL-8,2006)

Püskürtme beton kaplamalar tek ve çift tabaka olarak inşa edilmektedir. Çift tabakalı kaplamalarda genellikle, kısa ve orta vadedeki yükler altında, tünelin kazı sonrasında stabilitesini korumak için önce püskürtme betondan birinci tabaka adı verilen bir iç kaplama, stabilite sağlandıktan sonra da genellikle yerinde dökme betondan ikinci tabaka adı verilen bir son kaplama yapılmaktadır. Böylece dış yükler altında yeterli dayanım sağlanabildiği gibi, iki kaplama arasına yerleştirilen yalıtım malzemeleri sayesinde su yalıtımı sağlanmaktadır.

Beton kalitesinin artmasıyla püskürtme betonda birinci ve dökme betondan ikinci kaplamanın birlikte kullanıldığı çift tabakalı kaplama yerine tek tabaka olarak çalışan kaplamalar da bir seçenek olarak uygulanmaktadır. Yekpare çalışan bu kaplama çift tabakalı birlikte çalışmayan kaplamalardan inşaat süresi ve maliyet bakımından daha uygundur. Bu kaplamalar inşa süresindeki yükleri ve tünelin ekonomik ömürleri boyunca maruz kalacakları tüm yükleri karşılayabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Yekpare çalışması istenen kaplamalar, tabakaların birlikte çalışmasını sağlayacak önlemlerin alınması koşuluyla, çok tabakalı olarak inşa edilebilmektedirler (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Tabakaları birlikte çalışan örnek bir kaplama

2.1.1.3. Prefabrike Kaplamalar

Bu kaplamalar için prefabrike elemanlar kazı aygıtının ardından, kapalı formu verecek şekilde, kısa sürede yerleştirilip bağlantıları yapılmaktadır. Bu tür kaplama özellikle yerleşim yerlerinde tünel üzerinde zemin kütlelerinde oluşan oturmaları önemli derecede azaltmaktadır. Bugün çeşitli prefabrike kaplama elemanları mevcut olmakla birlikte bunlardan en çok kullanılanları prefabrike betonarme ve lifli betondan üretilenlerdir. Seyrek de olsa bu amaçla yumuşak dökme demir ve çelik kaplamalar da kullanılmıştır.

Prefabrike elemanların donatısı alt ve üst hasırlar ile bunlara kaynaklanan etriyelerden oluşmaktadır. Burada üretimleri özel aygıt ve vasıflı işçi gerektiren bu elemanların beton örtüsünün montaj ve taşıma sırasında hasar görebileceğini oysa çelik lifli prefabrike beton elemanlarda böyle bir sorunun olmayacağını belirtmek uygun olmaktadır. Teknik açıdan betonda çelik liflerin homojen dağılımı sayesinde prefabrike elemanların birleşim yerleri de güçlendirilmiş olmaktadır (URL-9,2006).

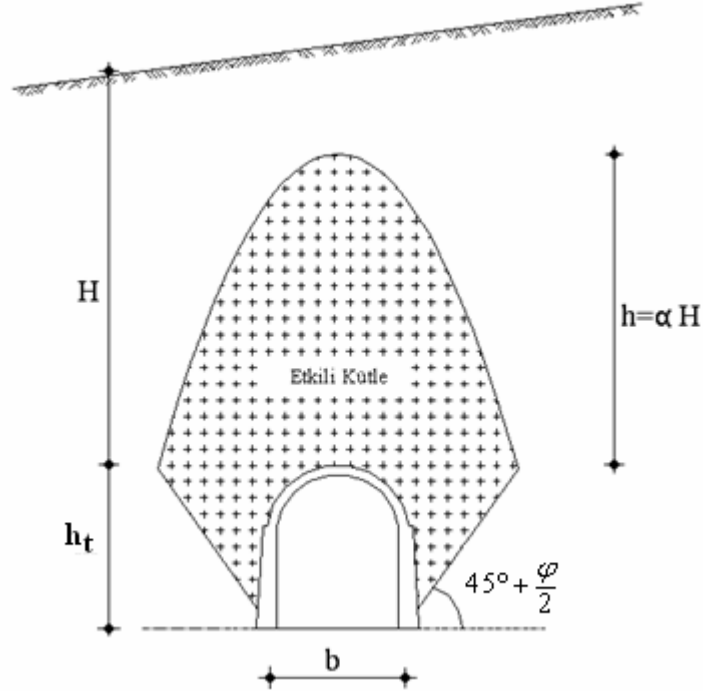
2.1.2. Kaplamalara Etkiyen Yükler

2.1.2.1. Zemin Yükleri

2.1.2.1.1. Düşey Yüklerin Belirlenmesi

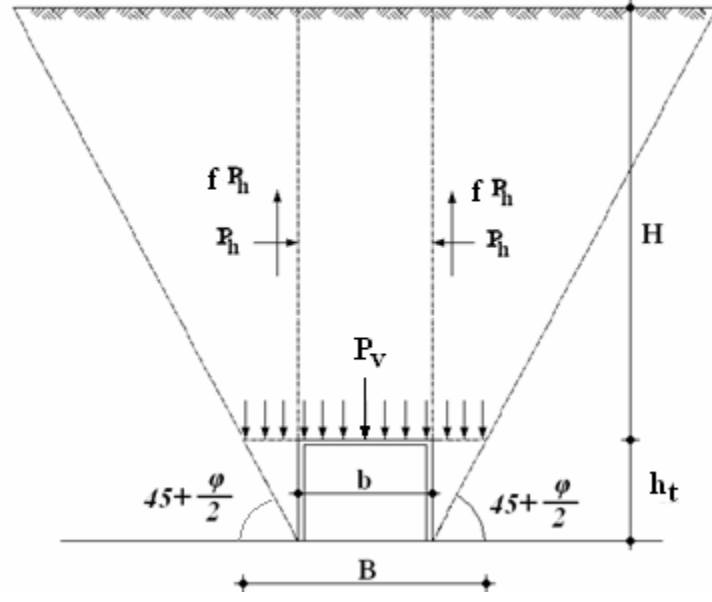
Bierbaumer Teorisi

Bu teoriye göre tünel kaplamasına etkiyen düşey yük, H tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığını, α bir katsayıyı göstermek üzere yüksekliği $h = \alpha \cdot H$ olan bir parabolle sınırlanmış zeminin kütlesinin ağırlığı olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Bierbaumer teorisine göre tünel kaplamalarına etkiyen yüklerin belirlenmesinde dikkate alınan zemin kütlesi (Szechy,1970)

α katsayısının belirlenmesinde tünele etkiyen zemin kütlesi düşey yükünün bu yüke ters yönde olan sürtünme kuvvetiyle azaldığı varsayılmıştır (Şekil 2.10). Buna göre ϕ içsel sürtünme açısını, $f = \tan \phi$ sürtünme katsayısını, P_h yatay zemin itkisini göstermek üzere, sürtünme kuvveti:



Şekil 2.10. Tünel üzerindeki zemin kütesine etkiyen kuvvetler

$$P_f = 2f \cdot P_h \rightarrow P_f = 2 \cdot \tan \varphi \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{H^2 \gamma}{2} \quad (2.1)$$

bağıntısıyla, b ve h_t sırasıyla tünel genişliğini ve yüksekliğini göstermek üzere bu P_v yükünün etkidiği genişlik:

$$B = b + 2 \cdot h_t \cdot \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.2)$$

ifadesiyle, düşey yük ise:

$$P_v = \gamma H B - P_f \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu son bağıntıda B ve P_f 'nin değeri yerine yazılırsa düşey yük ifadesi;

$$P_v = H \gamma \left[b + 2 h_t \cdot \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] - \tan \varphi \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) H^2 \gamma \quad (2.4)$$

şeklini almaktadır. α katsayısı ise $P_v = \alpha \cdot H \cdot \gamma \cdot B$ eşitliğinden;

$$\alpha = \frac{P_v}{H \cdot \gamma \cdot B} \quad (2.5)$$

olarak elde edilmektedir. Bu ifadede B'nin (2.2) ve P_v 'nin (2.4) deki değeri yerine konursa (2.5) ifadesi:

$$\alpha = 1 - \frac{\tan \varphi \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) H}{b + 2h_t \cdot \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (2.6)$$

şeklini almaktadır.

Burada yöntemin uygulanmasında $H \leq B$ için $\alpha = 1,00$ ve $H \geq 5B$ için ise $\alpha = \text{tg}^4 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$ alınacağı belirtilmelidir. Diğer taraftan doğruluğu tam olarak denenmemiş olsa da büyük derinliklerde ve içsel sürtünme açısının büyük olduğu yerlerde daha iyi sonuç verdiği ifade edilmektedir (Szechy,1970).

Mailart Teorisi

Mailart tarafından geliştirilen bu teoriye göre, büyük dağ kütlesi içinde açılan tüneller nedeniyle, zeminde başlangıçtaki gerilme dağılımının tamamen değişmediği kabul edilmektedir. Zira buna gerekçe olarak da açılan tünel hacminin dağ hacmine oranının genellikle çok küçük olduğu gösterilmektedir.

Bu teoriye göre zeminin dairesel kesitli tünele radyal doğrultuda uyguladığı basınç gerilmesi (σ_{ro}); f_r tünel açılan kaya basınç dayanımı, k kaya cinsine bağlı olarak deneylerle belirlenmesi gereken bir katsayı, R tünel çapı, f_1 kaplamanın dayanımı olmak üzere:

$$\sigma_{ro} = \frac{(H\gamma)^2 - (f_r)^2}{k(10 + f_r)^2} \quad \begin{array}{l} H \rightarrow \text{cm}, \gamma \rightarrow \text{kN/cm}^3 \\ k \rightarrow \text{kN/cm}, f_r \rightarrow \text{kN/cm}^2 \end{array} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilmiştir. Mailart'a göre önboyutlandırma için kaplama kalınlığı:

$$t = R \frac{p_v}{f_1} \quad (\text{cm}) \quad \begin{array}{l} R \rightarrow \text{cm} \\ f_1 \rightarrow \text{kN/cm}^2 \end{array} \quad (2.8)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Örneğin tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığının 2000 m, bu zeminin basınç dayanımı 50 MPa ve birim ağırlığı 28 kN/m³ olması durumunda bu kayada 5 m yarıçaplı bir tünel açıldığında, k=0,3 kN/cm ve kaplama emniyet gerilmesi 10 MPa kabul edildiğinde, zeminin (2.7) bağıntısına göre dairesel kesitli tünele radyal doğrultuda uyguladığı basınç gerilmesi:

$$\sigma_{ro} = \frac{(200000 \cdot 28 \cdot 10^{-6})^2 - (5)^2}{0,3 \cdot (10+5)^2} = 0,09 \text{ kN/cm}^2$$

değerini almaktadır. Bu durumda (2.8) bağıntısına göre kaplama kalınlığı:

$$t = 500 \cdot \frac{0,09}{1} \rightarrow t = 45 \text{ cm}$$

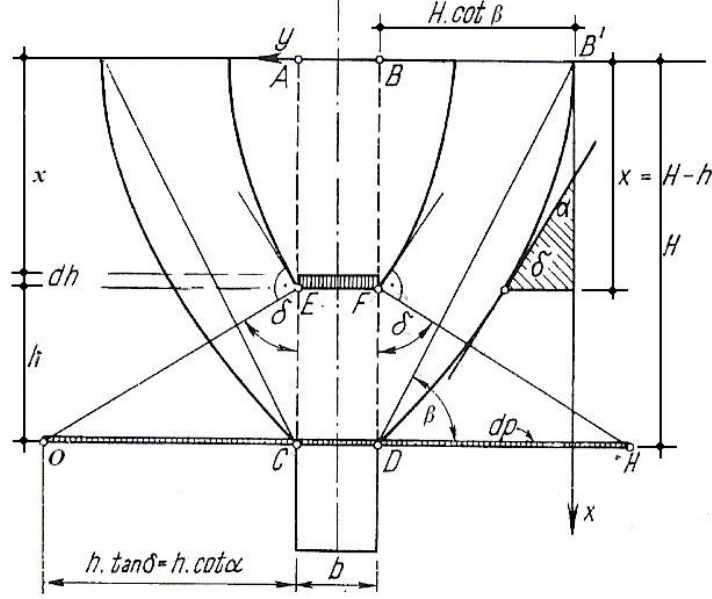
olarak hesaplanmaktadır (Szechy,1970).

Eszto Teorisi

Eszto tünel kazısından sonra kırılma yüzeylerinin yeryüzüne kadar ulaştığını gözlemiş ve buna göre tünel genişliğini de dikkate alan bir kaya basınç teorisi geliştirmiştir. Bu teoride kırılma yüzeylerini düzlem değil ikinci derece parabol olduğunu kabul etmiştir. Bu kabule göre kırılma açısı β , tünel tavanının köşesini örtü zemini yüzeyine birleştiren doğrunun eğim açısı olarak ifade edilmektedir. Kesin olarak belirlenmesi güç olmakla birlikte zor olan bu açının pratik değeri $\beta = 45 + \frac{\phi}{2}$ olarak alınmaktadır.

Bu teoriye göre, H derinliğinde CD=b genişliğinde bir tünel inşa edildiğinde bu tünelin CDAB prizmasıyla sınırlı zemin ağırlığını taşımadığını, bunun bir kısmının sürtünme ve kohezyon dolayısıyla bitişik kütlelere aktarıldığını kabul etmektedir. Buna göre örtü zemininden alınan dh kalınlığındaki bir EF tabakasının ağırlığı $dh \cdot \gamma \cdot b$ olur. Bu ağırlık h

derinliğinde CD alanına değil OH alanına yayılmaktadır. Diğer taraftan FH doğrusunun F noktasından geçen kırılma parabolünün normali olduğu ve düşeyle δ açısı yaptığı kabul edilmektedir. Kalınlığı dh olan bir tabakanın h derinliği için oluşturduğu dp gerilmesi, tünel tavanına etkimekte ve $b+2h \cdot \tan \delta$ genişliğindeki düzleme yayılmaktadır. Buradan bir denge yazılırsa;



Şekil 2.11 Eszto teorisine ilişkin model

$$\gamma \cdot b \cdot dh = (b + 2h \cdot \tan \delta) dp \quad (2.9)$$

olarak ifade edilmektedir. Buradan dp ;

$$dp = \frac{\gamma \cdot b \cdot dh}{b + 2h \cdot \tan \delta} \quad (2.10)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Buna göre tünel tavanına gelen toplam yükü (2.10) ifadesinin tünel anahtarı ile örtü zemini üst yüzeyi arasında;

$$P_v = \int_0^H \frac{b \cdot \gamma \cdot dh}{b + 2h \cdot \tan \delta} \quad (2.11)$$

entegresinden $b' = b \cdot \cot \beta$ olmak üzere;

$$p_v = \gamma \frac{b'}{\left(1 - \frac{b'}{H}\right)^2} \left[\ln \frac{H}{b'} - 1 - \frac{b'}{H} \right] \quad (2.12)$$

olarak elde edilmektedir. Benzer işlemler açıklığın dairesel kemer şeklinde olması durumu için yapılırsa:

$$p_v = \frac{R \cdot \cot \beta}{\left(1 - \frac{R}{H \cdot \tan \beta}\right)^3} \left[1 - \frac{R}{H \cdot \tan \beta} - \frac{R}{H \cdot \tan \beta} \ln \frac{H}{R} \tan \beta \right] \quad (2.13)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Bu teori pratik olmamakla birlikte tünel problemlerinin açıklanmasında sıkça kullanılmaktadır (Szechy,1970).

Terzaghi Teorisi

Terzaghi geliştirdiği teoriye göre R tünel kesitinin yarıçapını, H tünel üzerindeki zemin örtüsü kalınlığını, c zeminin kohezyonunu göstermek ve

$$B_1 = R \left\{ \cos \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \left[1 + \sin \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right\} \text{ olmak üzere tünele etkiyen düşey}$$

basıncın:

$$p_v = \frac{\gamma B_1 - c}{\tan \varphi} \left[1 - \exp \left(- \frac{H}{B_1} \tan \varphi \right) \right] \quad (2.14)$$

bağıntısıyla, yatay basıncın,

$$p_h = \gamma R \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \left(1 + \frac{H}{R} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.15)$$

bağıntısıyla, tünele düşey basınç uygulayan etkili zemin yüksekliğinin ($h=p_v/\gamma$) ise;

$$h = \frac{\gamma B_1 - c}{\gamma \tan \varphi} \left[1 - \exp \left(-\frac{H}{B_1} \tan \varphi \right) \right] \quad (2.16)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceğini önermektedir. Tünel üzerindeki zemin örtüsü kalınlığının (H) çok büyük olması durumunda ise:

$$\beta = \left\{ \cos \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \left[2R \cdot \sin \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \right\} \quad (2.17)$$

olmak üzere (2.16) bağıntısının:

$$h = \frac{\gamma B_1 - c}{\gamma \tan \varphi} = \frac{\gamma R \beta - c}{\gamma \tan \varphi} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabileceği açıktır. Aşağıdaki Çizelge 2.2'de h değerleri tünel boyutuna bağlı olarak verilmektedir.

Çizelge 2.2. Farklı zeminler için etkili zemin yükseklikleri

Zemin No	Zemin Türü	γ (kN/m ³)	φ (°)	c (MPa)	β	h (m)
1	Sıkı zemin	16,50	33	0,4	1,706	2,63R-0,37
2	Kumlu zemin	18,50	25	0,3	1,775	3,81R-0,35
3	Killi kum	18,50	22	0,7	1,801	4,46R-0,94
4	Marn	16,00	42	1,0	1,623	1,80R-0,69
5	Kuru kil	18,00	45	1,0	1,594	1,59R-0,56
6	Islak kil	20,00	18	3,0	1,835	5,65R-4,62
7	Şist	21,00	33	4,0	1,706	2,63R-2,93
8	Kalker	27,00	47	3,5	1,574	1,47R-1,21
9	Gre	23,00	50	3,5	1,543	1,29R-1,28
10	Gnays	27,00	35	4,0	1,688	2,41R-2,12
11	Granit	29,00	40	5,0	1,642	1,96R-2,05

Bu çizelgeden görüldüğü gibi h ifadesindeki (-) işaretli terimler çok küçük olduğundan ihmal edilebilirler. Bu durumda $h=\alpha H$ şeklini alır. Çizelgede de görüldüğü gibi h ifadesindeki α zemin türüne göre değişmektedir. Buna göre yukarıdaki Çizelge 2.2’de belirtilen 11 farklı zemine ve 10 farklı tünel yarıçapına göre hesaplanan h değerleri Çizelge 2.3’de verilmektedir.

Çizelge 2.3 Farklı zemin ve tünel yarıçapına göre etkili zemin örtü kalınlığı

R (m)	Zemin Cinsi										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,63	3,81	4,46	1,80	1,59	5,65	2,63	1,47	1,29	2,41	1,96
2	5,26	7,62	8,92	3,60	3,18	11,30	5,26	2,94	2,58	4,82	3,92
3	7,89	11,43	13,38	5,40	4,77	16,95	7,89	4,41	3,87	7,23	5,88
4	10,52	15,24	17,84	7,20	6,36	22,60	10,52	5,88	5,16	9,64	7,84
5	13,15	19,05	22,30	9,00	7,95	28,25	13,15	7,35	6,45	12,05	9,80
6	15,78	22,86	26,76	10,80	9,54	33,90	15,78	8,82	7,74	14,46	11,76
7	18,41	26,67	31,22	12,60	11,13	39,55	18,41	10,29	9,03	16,87	13,72
8	21,04	30,48	35,68	14,40	12,72	45,20	21,04	11,76	10,32	19,28	15,68
9	23,67	34,29	40,14	16,20	14,31	50,85	23,67	13,23	11,61	21,69	17,64
10	26,30	38,10	44,60	18,00	15,90	56,50	26,30	14,70	12,90	24,10	19,60

Burada zemin örtüsü kalınlığının tünel yarıçapına oranının (H/R) 1,00’den çok büyük olması durumunda ikinci terimin de birinci terime göre ihmal edilebileceğinden bağıntı:

$$p_h = \gamma H \tan^2 \left(\frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.19)$$

şeklini almaktadır. Bu bağıntının klasik Rankine teorisinden elde edilen itki ifadesi olduğu açıktır. Ancak bu ifadenin kullanılabilmesi için tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığının (H) tünel çapına oranının çok büyük olmaması gerekmektedir.

Terzaghi etkili zemin yüksekliğini kayaç türüne bağlı olarak Çizelge 2.4’de vermek suretiyle teorisine ilişkin sonuçları basit bir şekilde ifade etmiştir.

Diğer bir deyişle Terzaghi’ye göre tünel çapına bağlı olarak 8 sınıf zemin için etkili zemin örtü kalınlığı aşağıdaki Çizelge 2.5’deki değerleri almaktadır.

Çizelge 2.4. Terzaghi'ye göre tünel tavanına etkiyen zemin yükseklikleri

Grup	Kayanın Özellikleri	Etkili zemin yüksekliği	Uyarılar
1	Sağlam ve dayanıklı	-	Taş düşmesi varsa hafif iksa gerektirebilir.
2	Sağlam tabakalı ve şistisel	0 – 0,5 (b)	Hafif kaplama gerekir.
3	Eklemlili	0 – 0,25 (b)	Yük noktadan noktaya ani olarak değişebilir.
4	Orta hasarlı	0,25– 0,35(b/2+h _t)	Yanal basınç olmaz
5	Çokça hasarlı	(0,35 – 1,1) (b/2+ h _t)	Yanal basınç az olur yada hiç olmaz
6	Tamamen ufalanmış ve kimyasal olarak parçalanmamış	1,1 (b/2+ h _t)	Önemli yan basınçlar oluşur. Sızan suların yumuşatıcı etkisi tabanda önemli önlemlerin alınmasını gerektirir.
7	Orta derinlikte sıkışan	(1,1 – 2,1) (b/2+ h _t)	Enine elemanlı radyeler gerektiren büyük yanal basınçlar meydana gelir.
8	Çok derinlikte sıkışan	(2,1 – 4,5) (b/2+ h _t)	

Çizelge 2.5. Farklı tünel yarıçapları için etkili örtü zemini kalınlıkları (h)

R (m)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0-1,00	0-0,50	1,00-1,40	1,40-4,40	4,40	4,40-8,40	8,40-18,00
2	0	0-2,00	0-1,00	2,00-2,80	2,80-8,80	8,80	8,80-16,80	16,80-36,00
3	0	0-3,00	0-1,50	3,00-4,20	4,20-13,20	13,20	13,20-25,20	25,20-54,00
4	0	0-4,00	0-2,00	4,00-5,60	5,60-17,60	17,60	17,60-33,60	33,60-72,00
5	0	0-5,00	0-2,50	5,00-7,00	7,00-22,00	22,00	22,00-42,00	42,00-90,00
6	0	0-6,00	0-3,00	6,00-8,40	8,40-26,40	26,40	26,40-50,40	50,40-108,00
7	0	0-7,00	0-3,50	7,00-9,80	9,80-30,80	30,80	30,80-58,80	58,80-126,00
8	0	0-8,00	0-4,00	8,00-11,20	11,20-35,20	35,20	35,20-67,20	67,20-144,00
9	0	0-9,00	0-4,50	9,00-12,60	12,60-39,60	39,60	39,60-75,60	75,60-162,00
10	0	0-10,00	0-5,00	10,00-14,00	14,00-44,00	44,00	44,00-84,00	84,00-180,00

Burada Çizelge 2.5'deki h değerlerinin genel teoriye göre belirlenen Çizelge 2.3'dekilerden çok büyük yada çok küçük olduğu görülmektedir.

Terzaghi teorisine göre geliştirilen yöntemin bu konuda geliştirilen diğer teorilerin hepsinden kapsamlıdır. Zira bu yöntem tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığını dikkate almaktadır. Bu yöntem (2.14) bağıntısındaki $\gamma B_1 - c/\tan\phi$ ifadesi yerine kayaç zeminler

için $\Delta=2,5$ diğer zeminler için ise $\Delta=4$ olmak üzere $2\Delta\gamma R$ yazılırsa anılan bağıntı

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{H}{B_1} \tan \varphi\right) \text{ olmak üzere:}$$

$$p_v = 2\Delta\gamma R\alpha \quad (2.20)$$

şeklindedir. Buna göre $H \rightarrow \infty$ için $\alpha = 1,00$ olduğundan düşey basınç ifadesi:

$$p_v = 2\Delta\gamma R \quad (2.21)$$

değerini almaktadır. α azaltma katsayısı H 'nin küçük değerleri için dikkate alınmakta ve:

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{H \tan \varphi}{R \beta}\right) \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Buna göre çeşitli zemin sınıfları için hesaplanan $\tan \varphi/\beta$ değeri Çizelge 2.6'da verilmektedir. Bu çizelgedeki $\tan \varphi/\beta$ değerleri ve H/R 'nin seçilen değerlerine göre hesaplanan α değerleri Çizelge 2.7'de verilmektedir (Guerrin,1969).

Çizelge 2.6. Farklı zemin sınıflarında hesaplanan $\tan \varphi/\beta$ değerleri

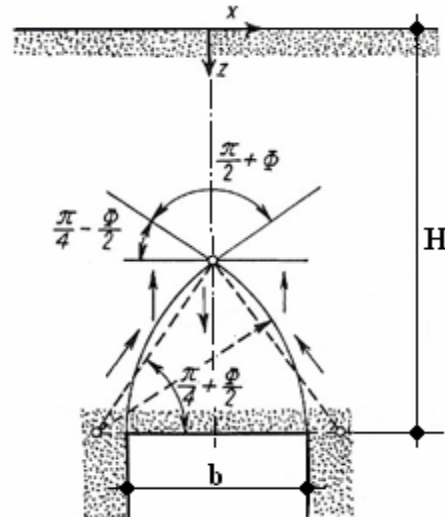
Zemin cinsi	φ (°)	$\tan \varphi$	β	$\tan \varphi/\beta$
1	33	0,649	1,706	0,380
2	25	0,466	1,775	0,263
3	22	0,404	1,801	0,224
4	42	0,900	1,623	0,555
5	45	1,000	1,594	0,627
6	18	0,325	1,835	0,177
7	33	0,649	1,706	0,380
8	47	1,072	1,574	0,681
9	50	1,192	1,543	0,773
10	33	0,700	1,688	0,415
11	40	0,839	1,642	0,511

Çizelge 2.7. Seçilen $\tan \phi/\beta$ değerleri ve H/R 'nin değerlerine göre hesaplanan α değerleri

H/R	Zemin Cinsi										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,316	0,231	0,200	0,425	0,465	0,162	0,316	0,493	0,538	0,339	0,400
2	0,532	0,409	0,361	0,670	0,714	0,298	0,532	0,743	0,786	0,564	0,640
4	0,680	0,545	0,489	0,810	0,847	0,412	0,680	0,870	0,901	0,712	0,784
5	0,781	0,650	0,591	0,891	0,918	0,507	0,781	0,934	0,954	0,809	0,870
6	0,850	0,731	0,673	0,937	0,956	0,587	0,850	0,966	0,979	0,874	0,922
10	0,897	0,793	0,739	0,964	0,976	0,654	0,897	0,983	0,990	0,917	0,953
100	0,977	0,927	0,893	0,996	0,998	0,829	0,977	0,998	0,999	0,984	0,994
∞	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Balla Teorisi

Balla kazıdan sonra tünel üzerindeki zeminin gevşeyip dökülmeye başlamasıyla zeminde düşey bir hareketin meydana geldiğini kabul etmektedir. Bu kabule göre kayma, dairesel düzlemler boyunca meydana gelmektedir. Bu kayma düzlemleri tünelin üst köşesinden geçmekte ve iki düzlem tünelin düşey simetri ekseninde kesişmektedir (Şekil 2.12).

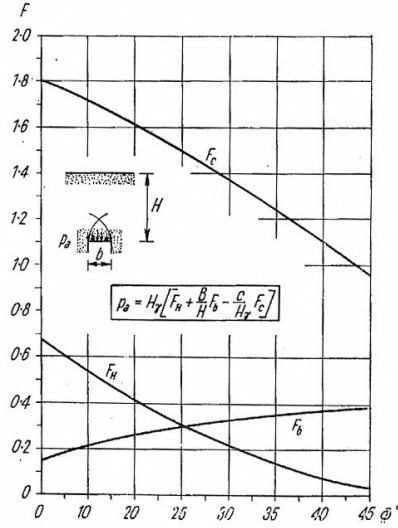


Şekil 2.12. Balla teorisine göre zemin yükünün hesabı için dikkate alınan model

Kayan zemin kütlesine etkileyen kuvvetlerin dengesinden, tünel tavanındaki üniform düşey yük, F_H , F_B ve F_C zeminin içsel sürtünme açısına bağlı birer katsayıyı göstermek üzere:

$$p_v = \gamma H \left[F_H + \frac{b}{H} F_B - \frac{c}{H\gamma} F_C \right] \quad (2.23)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki katsayılar Şekil 2.13'de ve Çizelge 2.8.'de verilmektedir.



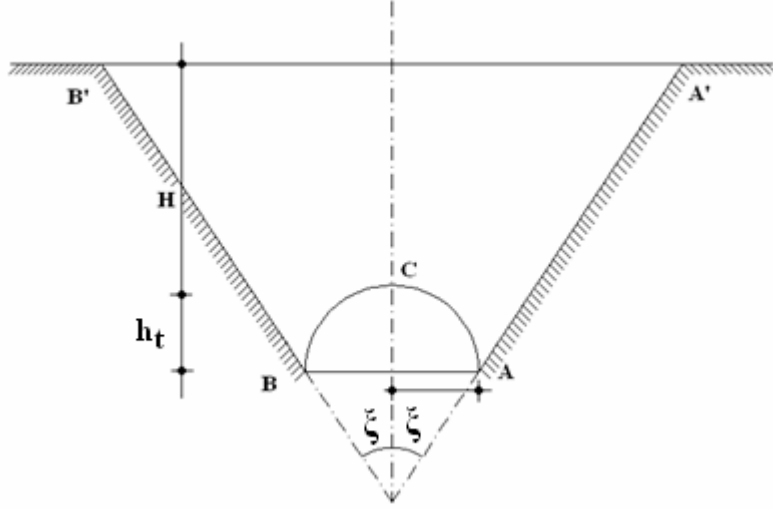
Şekil 2.13. Tünel tasarımında kullanılan F_H , F_B ve F_C katsayılarının içsel sürtünme açısıyla değişimi (Szechy,1970)

Çizelge 2.8. İçsel sürtünme açısına bağlı F_H , F_B ve F_C katsayılarının değerleri

φ	F_H	F_B	F_C
10°	0,6814	0,1502	1,8066
20°	0,4145	0,2577	1,6084
30°	0,2109	0,3277	1,3667
40°	0,0757	0,3671	1,1016
45°	0,0333	0,3774	0,9667

Suquet Teorisi

Suquet bu teoriyi Paris metrosunun inşası sırasında geliştirmiştir. Buna göre şekil 2.14'da görülen açılan tünel etrafında AA' ve BB' kayma düzlemleri oluşmakta ve böylece meydana gelen zemin kaması tünel üzerine doğru kaymaktadır.



Şekil 2.14. Suquet teorisine göre tünel kaplamasına etkiyen düşey yükün belirlenmesinde dikkate alınan zemin

Bu teoriye göre tünel üzerine etkiyen toplam düşey basınç;

$$p_v = \frac{2\gamma}{H} \left[\frac{\frac{b}{2} \left(H + \frac{h_t}{3} \right)}{\tan \xi} + \frac{(H + h_t)^2}{2} \right] \quad (2.24)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Bu bağıntıdaki h_t , H 'ya göre ihmal edilebilecek kadar küçük ise, toplam düşey basınç ifadesi:

$$p_v = 2\gamma \left(\frac{b}{2 \tan \xi} + \frac{H}{2} \right) \quad (2.25)$$

şeklini almaktadır. Diğer taraftan bu araştırmacı f_r tünel açılan kayacın bir eksenli merkezi basınç dayanımını, b tünel açıklığını göstermek ve $\gamma' = \frac{f_r}{\frac{b}{\tan \varphi} + H}$ olmak üzere ön

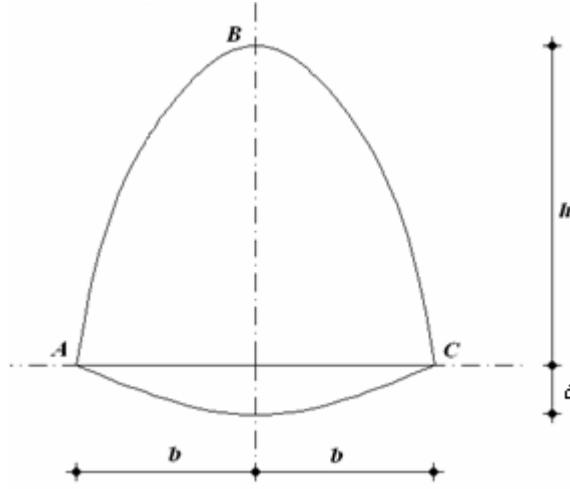
boyutlandırmalar için tünel tavanına etkiyen basıncın;

$$p_v = H(\gamma - \gamma') \quad (2.26)$$

bağıntısıyla belirlenebileceğini savunmaktadır (Szechy,1970).

Kommerell Teorisi

Kommerell teorisi en eski ve en çok bilinen teorilerden biridir. Kaplamaya yük olan zemin yüksekliği, iksanın yerdeğiştirmesine bağlı olarak belirlenmektedir.



Şekil 2.15. Tünel tavanına etkiyen düşey zemin basıncını sınırlayan parabol

Bu teoride tünel kaplamasına yukarıda verilen Şekil 2.15.'deki ABC parabolü ile sınırlı zemin kütesinden doğan yükün etkidiği kabul edilmektedir. Buna göre θ tünel üzerine etkiyen zemin kütesinin gevşeme katsayısını göstermek üzere bu zeminin gevşemesinden dolayı tünel tavanına etkiyen yük altında anahtar kesitinin yerdeğiştirmesi $\delta = h \cdot \theta$ ifadesiyle belirlenmektedir. Bu ifadedeki θ katsayısının değeri bazı zeminler için Çizelge 2.9.'de verilmektedir.

Çizelge 2.9. Bazı zeminlerin yaklaşık gevşeme katsayıları (Dursun, 1971)

Zemin	Gevşeme (θ)
Gevşek taneli (kum)	%1-3
Orta Derecede kohezyonlu (kuru kil)	%3-5
Kohezyonlu (marn, çakıllı kil)	%5-8
Yumuşak kayalar (kum taşı, kireç taşı)	%8-12
Sert kayalar	%10-15

Buna göre tünel tavanına etkiyen toplam düşey yük:

$$p_v = \frac{\pi}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2} \cdot h = \frac{\pi}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{\delta}{\theta} \quad (2.27)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Tünelin yumuşak zeminlerde inşa edilmesi durumunda kaplamaların tasarımında düşey basınçlara ilaveten yatay basınçların da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle iksaya yük olarak etkiyen gevşemiş kütleyi sınırlayan parabolü tünel tavanından geçen yatay doğrunun tünelin alt köşelerinden geçen $45 + \frac{\phi}{2}$ eğim açılı doğruların kesim noktalarıyla sınırlandırmak gerekmektedir.

Burada bu teorinin, kayalarda gevşemenin olmaması yada çok küçük mertebede kalması, zeminin dolayısıyla da anahtar kesiti yerdeğiştirmesi (δ) ile etkili zemin yüksekliği (h) arasındaki $\delta = h \cdot \theta$ ifadesinin deneylerle doğrulanamadığı belirtilmelidir.

Forchheimer Teorisi

Forchheimer bir bidonun tabanında açılan bir boşluğa ayrık taneli malzemelerin yaptığı basınçları incelemiştir. Bu incelemelerden elde edilen bulguları değerlendirerek boşluğu açıp kapayan hareketli bir plakaya etkiyen basınçların, bu plaka üstündeki kum yüksekliğine bağlı olmadığı görerek, b açıklığındaki bir tünelin tavanına etkiyen basıncın:

$$p_v = \frac{1}{4} \gamma \cdot b \frac{1 + 2 \tan^2 \phi}{\tan \phi} \quad (2.28)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği belirtilmektedir.

Burada teknik literatürde bu bağıntının daha çok tünel ağızları civarındaki kesitler için uygun olduğu belirtilmektedir (Szechy,1970).

Ritter Teorisi

Ritter teorisinde tünel üzerine etkiyen örtü zemini kütlelerini sınırlayan eğri boyunca bir sürtünme kuvvetinin de etkidiği düşünülür ve tünel tavanına etkiyen yük zemin kütlelerinin ağırlığından (P_g), sürtünme kuvvetinin (P_f) çıkartılmasıyla belirlenmektedir (Şekil 2.16). Bu şekle göre sürtünme kuvveti:

$$P_f = \gamma z \int_0^b \frac{ds}{\cos \alpha} \quad (2.29)$$

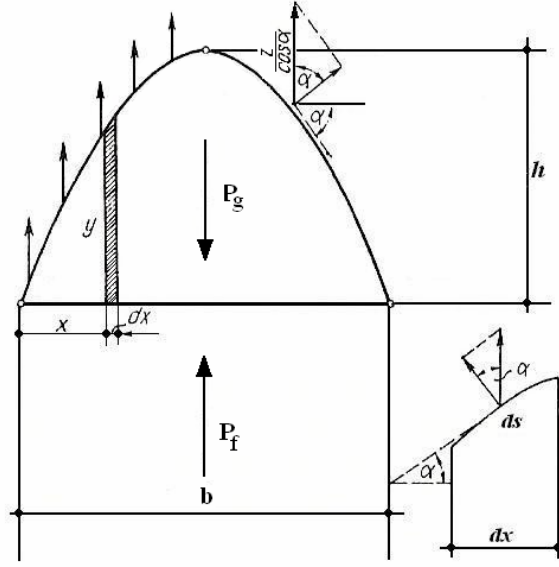
ifadesiyle gevşeyen zemin kütlelerinin ağırlığı ise:

$$P_g = \gamma \int_0^b y \, dx \quad (2.30)$$

ifadesiyle belirtilmektedir. Bu durumda düşey yük $P_v = P_g - P_f$ bağıntısında eşitliğin sağ tarafındaki terimler yerine yukarıdaki değerleri konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa düşey yük ifadesi:

$$P_v = \gamma \cdot b \left(\frac{b^2}{48z} - z \right) \quad (2.31)$$

şeklindedir (Szechy,1970).



Şekil 2.16. Ritter teorisine göre tünel tavanına etkiyen zemin kütlelerinden doğan düşey basıncın belirlenmesinde kullanılan model

Protodyakonov Teorisi

Rusya'da inşa edilmiş tüneller bu teoriye göre tasarlanmıştır. Protodtakonov tünel üzerine etkiyen zemin yükünün Şekil 2.17'deki AOB parabol eğrisiyle sınırlandırılmış olduğunu kabul etmektedir. Burada herhangi bir DOC zemin elemanına O noktasının sağındaki eşdeğer elemandan gelen tepkinin yatay bileşeni olan T'nin, $p_v \cdot x$ düşey basıncı kuvvetinin ve DO yayına etkiyen zemin tepkilerinin teğetsel bileşeni olan R'nin etkidiği düşünülmektedir.

Buna göre tünel kaplamasına örtü zemininden dolayı gelen yükü sınırlayan parabolün alanı:

$$A = \frac{2}{3} b \cdot h \quad (2.32)$$

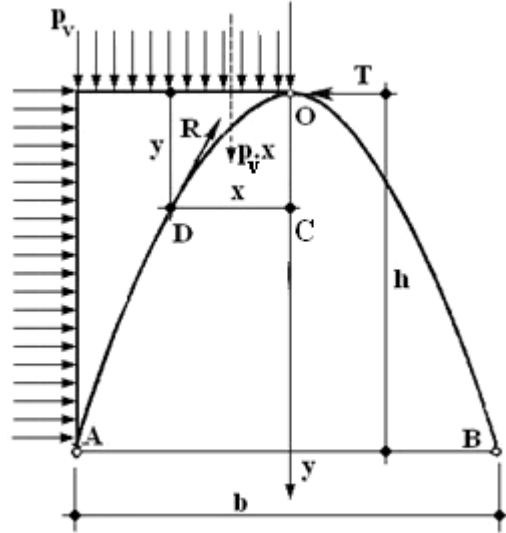
bağıntısıyla tünel kaplamasına etkiyen düşey yük ise:

$$p_v = A \cdot \gamma = \frac{2}{3} b \cdot h \cdot \gamma \quad (2.33a)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu (2.33a) bağıntısında $h = b/2 \cdot \tan \varphi$ değeri yerine konursa p_v ifadesi:

$$p_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{b^2}{\tan \varphi} \cdot \gamma \quad (2.33b)$$

şeklini almaktadır. Yapılan deneysel çalışmalara göre bağıntıda kullanılan f sürtünme katsayısı, f_z zeminin serbest basınç dayanımını ve f_r kayacın küp basınç dayanımını göstermek üzere; kohezyonlu zeminlerde $\tan \varphi + \frac{c}{f_z}$, kayada $\frac{f_r}{100}$ alınabileceği önerilmektedir (Szechy,1970; Dursun, 1971).



Şekil 2.17. Tünel kaplamasına gelen zemin yükünü sınırlayan parabol

Rusya'daki uygulamalarda bu teorinin $\frac{b}{2 \cdot \tan \varphi} - \frac{b}{\tan \varphi}$ aralığında iyi sonuç verdiği

belirlenmektedir (Szechy,1970). Bu teorinin başlıca zayıf yanları;

- 1) Aslında çok karmaşık olan zemin gevşemesine ilişkin kemer yüksekliğinin genişliğe göre değişiminin doğrusal olarak alınması
- 2) Deneysel olarak belirleme yerine yük hesabında kullanılan zeminle ilgili katsayıların çizelgeden alınmasını gerektirmiş olması teşkil etmektedir.

Burada tünelin gevşek kaya içinde ($\varphi < 40^\circ$) açılması ve tünel derinliğinin;

$$H < 2,5 \left[b + 2h_t \cdot \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (2.34)$$

ifadesini sağlaması durumunda yük hesabında üzerindeki zemin örtü kalınlığının tümünün dikkate alınması gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır.

Engesser Teorisi

Engesser tarafından zemin basınçlarının belirlenmesi için geliştirilen teorinin esası kargir temellerdeki kemerleşme hareketine dayanmaktadır. Buna göre tünel üzerine dairesel bir zemin kütesinin yük olarak etki ettiği kabul edilmektedir. Bu teoriye göre h etkili örtü zemini kalınlığını, b tünel genişliğini, φ zeminin içsel sürtünme açısını ve γ birim hacim ağırlığını göstermek üzere tünele etkiyen düşey basınç:

$$p_v = 4b^2 \cdot \gamma \left[\frac{h \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)}{2h \cdot \tan \varphi + b \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)} + \frac{\tan \varphi}{6} \right] \quad (2.35)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği önerilmektedir. İçsel sürtünme açısının çok küçük olmaması yanında tünel genişliğinin de çok büyük olmaması durumunda düşey basınç bağıntısı derinlikten bağımsız olarak:

$$p_v = 4b^2 \cdot \gamma \left[\tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{\cot \varphi}{2} + \frac{\tan \varphi}{6} \right] \quad (2.36)$$

şeklinde verilmektedir.

Bu araştırmacı yaptığı deneysel çalışmalara göre derinliğin genişliğin 1,5 katından büyük olduğu durumlarda teorik sonuçların deney sonuçlarına yaklaştığını, küçük derinliklerde ise anılan sonuçların birbirinden uzaklaştığını göstermiştir.

Kazının patlayıcı madde kullanılarak yapılması durumunda ateşlemeden dolayı bir gevşeme bölgesi oluşmakta ve bu bölgedeki zemin kütlelerinin ağırlığı tünel kaplamasına etkimektedir. Bu durumda gevşeme bölgesi yüksekliğinin (x):

$$x = \frac{2h}{\tan \varphi} - \frac{b}{2} \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) - h_t \quad (2.37)$$

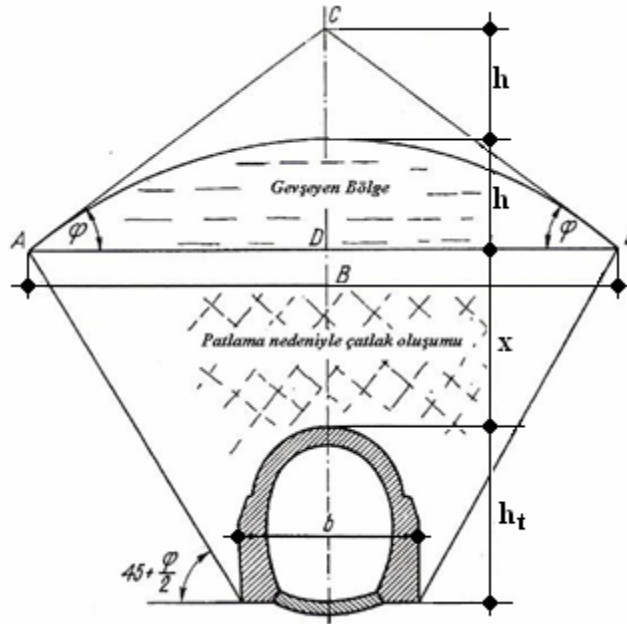
bağıntısıyla, genişliği (B):

$$B = 2(h_t + 2) \cdot \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + b \quad (2.38)$$

bağıntısıyla, kaplamaya gelen düşey basıncın ise:

$$p_v = x\gamma + B\gamma \left[\tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \frac{\cot \varphi}{2} + \frac{\tan \varphi}{6} \right] \quad (2.39)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği belirtilmektedir (Szechy,1970).



Şekil 2.18. Tünelere gelen basınçların hesabı için Engesser tarafından dikkate alınan şematik model

2.1.2.1.2. Yatay Yüklerin Belirlenmesi

Tünellerin tasarımında düşey yüklerle beraber yatay yüklerin de dikkate alınması gerekmektedir. Tünele gelen yatay basınçlar; tünelin enkesit şekline, boyutlarına, açıldığı zeminin mekanik özelliklerine ve iksanın yatay kuvvetlere karşı dayanımına bağlı olmakta ve bu nedenle bunların hesabı düşey basınçlara göre daha karmaşık olmaktadır.

Teknik literatürde yatay basınçların tünel tavanına etkiyen düşey basınçların 1/4'ü ile 1/3'ü arasında değiştiği ancak bazı özel durumlarda bunun düşey basıncın birkaç katına çıkabileceği belirtilmektedir (Szechy,1970; Dursun, 1971).

Daha önce de belirtmeye çalışıldığı gibi Terzaghi teorisiyle geliştirilen yöntemle göre tünellere gelen yatay basıncın:

$$p_h = \gamma R \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \left(1 + \frac{H}{R} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.40)$$

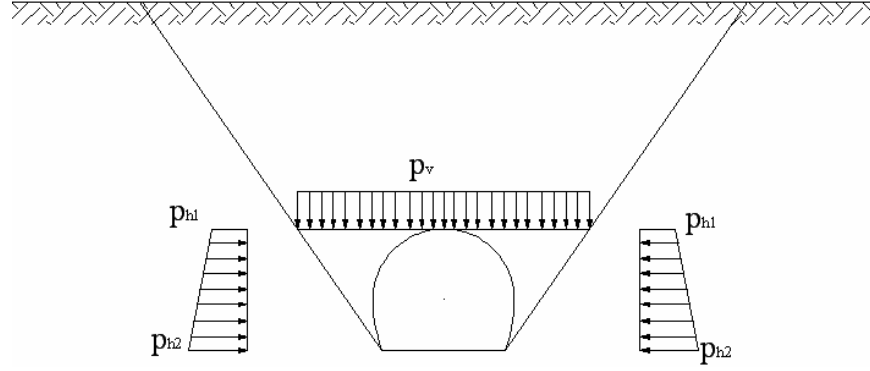
bağıntısıyla hesaplanması gerekmektedir. Burada zemin örtüsü kalınlığının tünel yarıçapına oranının (H/R) 1,00'den çok büyük olmasına ilaveten bağıntıdaki ikinci terim de birinci terime göre ihmal edilebileceğinden bağıntı:

$$p_h = \gamma \cdot H \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.41)$$

şeklini almaktadır. Bu bağıntının klasik Rankine teorisinden elde edilen itki ifadesi olduğu açıktır. Ancak bu ifadenin kullanılabilmesi için tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığının tünel çapına oranının çok büyük olmaması gerekmektedir (Guerrin, 1969; Szechy,1970). Aynı kaynakta yatay basıncın kayalık türü sağlam zeminlerde açılan tünellerde:

$$p_h = \frac{\nu}{1-\nu} p_v \quad (2.42)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği belirtilmektedir.



Şekil 2.19. Tünelere etkiyen düşey ve yatay zemin basınçlarının şematik gösterilimi

Rankine teorisine göre kohezyonlu zeminlerde tünel tavan seviyesindeki yatay basıncın:

$$p_{h1} = H \cdot \gamma \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \sqrt{\tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)} \quad (2.43)$$

bağıntısıyla, taban seviyesinde ise:

$$p_{h2} = (H + h_t) \cdot \gamma \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \sqrt{\tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)} \quad (2.44)$$

bağıntısıyla hesaplanması gerekmektedir.

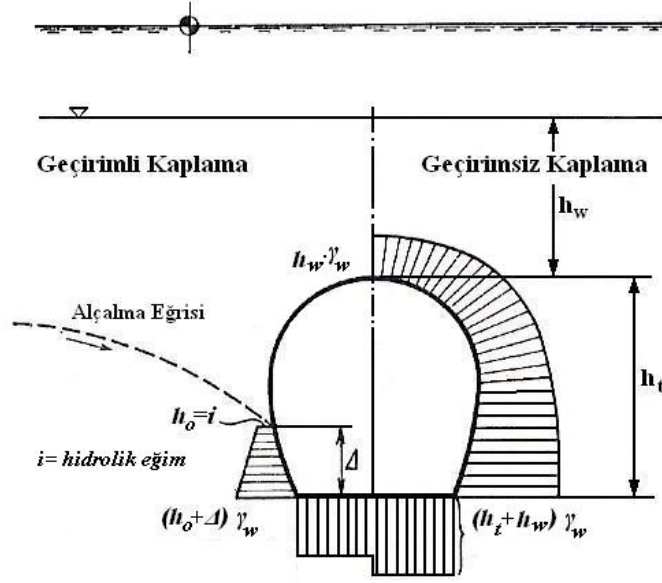
2.1.2.1.3. Taban Basınçları

Taban basınçları genel olarak tavadaki yüklerin karşıtı olduğu ifade edilmektedir. Bunun yanında tavana gelen yüklerin bir kısmı yan duvarlara aktarıldığından taban basınçları, tavadaki basınçlara göre nispeten küçük olmaktadır (Szechy, 1970).

2.1.2.1.4. Yeraltı Suyunun Bulunması Durumu

Bazı durumlarda tünel, yeraltı su seviyesinin altında bulunabilmektedir. Bu gibi durumlarda zemin basınçları yanında su basıncının da dikkate alınması gerektiği açıktır.

Ancak tünel kaplamasının drenajlı olması durumunda su seviyesindeki düşüşün dikkate alınması uygun olmaktadır. Zira bu durumda gelen su miktarı kaplamadan sızan su miktarından az ise hidrolik düzey alçalmaktadır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Drenajlı ve drenajsız kaplamadan etkilenen su basınçları (Szechy,1970)

2.1.2.2. Hareketli Yükler

2.1.2.2.1. Tünel İçinden Etkiyenler

Tünel içinde seyreden taşıtlardan ya da nakledilen malzemeden dolayı tünele etkileyen hareketli yükler, dıştan etkileyen zemin ve su basıncına göre daha küçük mertebede kalmaktadır. Tünel içinden etkileyen bu yükler ters yönde olduklarından dış yükleri azaltmaktadırlar. Durum böyle olunca tünelde iç yük olmaması durumu genellikle elverişsiz olmaktadır. Ancak bazı durumlarda tünele içten etkileyen hareketli yüklerin dikkate alınması daha elverişsiz olabilmektedir (Szechy,1970). Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir.

- 1) Dikdörtgen kesitli betonarme tünellerde tabanın düz olması nedeniyle iç yüklerin meydana getirdiği kesit tesirleri dış basınçların etkisinden daha büyük olabilmektedir.

- 2) Hidroelektrik santrallerin basınçlı iletim ve kanalizasyon tünellerindeki iç basınçlar dış basınçları aşabilmektir. Bu durumda tünelin iç basınçlı olması ve olmaması durumlarından her ikisinin de dikkate alınıp boyutlandırılarak donatılması gerekmektedir.
- 3) Çok yumuşak ve gevşek zeminlerde inşa edilen tünellerde asimetrik yüklemelerde dolayı yerel momentler oluşabileceğinden iç yüklerin kesinlikle dikkate alınması gerekir.

2.1.2.2.2. Örtü Zemini Yüzeyinden Etkiyenler

Sığ tünellere zemin örtüsü üzerindeki yapılar ve/veya taşıtlar ek yük olarak etkimektedir. Teknik literatürde örtü zemini kalınlığının 8 m'den fazla olması durumunda ek yüklerin ihmal edilebileceği belirtilmelidir (Szechy,1970).

2.2. Kaplamaların Yapısal Çözümlemesinde Kullanılan Bazı Yöntemler

2.2.1. Ampirik Yöntemler

Ampirik yöntemler, özellikle hızla değişen zemin koşullarında çabuk hesap yapılması gerektiğinde yararlı olmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanmasıyla elde edilen bulgular mühendislik önsezisiyle birleştirildiğinde yeterli sonuçlar vermektedir.

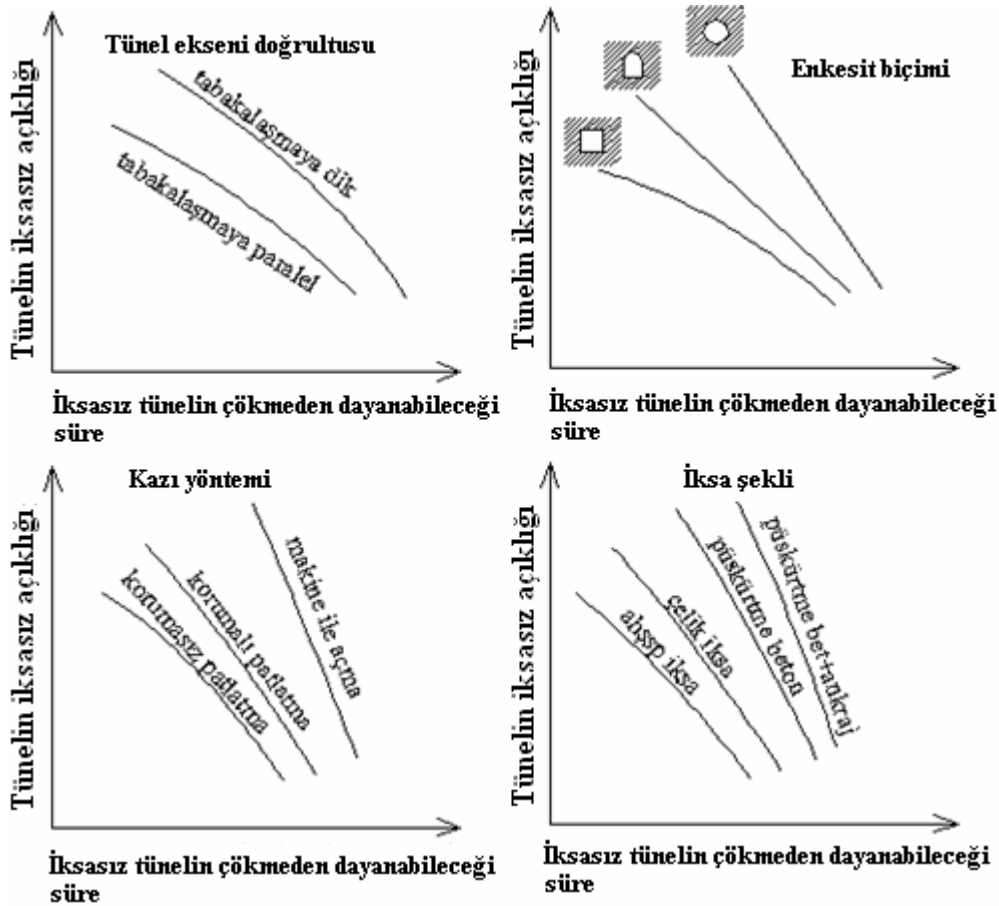
Bu yöntemlerde tünel açılan zemin sınıfının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Zira söz konusu zemin hakkında bir mühendislik kararı vermekte yardımcı olacak bir deney yapılması her zaman mümkün olmamaktadır. Zemin sınıfı ile ilgili tasarımlarda karar aşamasında ortaya çıkan problemlere cevap bulmada çoğu zaman deneyim ve kanaatin sınırları zorlanmaktadır. Örneğin tünelin püskürtme beton kaplama kalınlığının belirlenmesi gibi zemine ilişkin nicel değerlerin sıkça kullanıldığı işlemlerde geleneksel indeks testleri kullanılmaktadır. Bu nedenle kaplamaların yapısal çözümlemesinde mühendislik yargısını kullanmaya yardımcı olmak amacıyla, standartlaştırılmış birtakım işlemleri ve tanımlamaları içeren pek çok yöntem geliştirilmiştir (Goodman,2003).

Tünel iksası için zeminlerin sınıflandırılması ilk olarak Terzaghi (1946) tarafından gerçekleştirilmekle birlikte bu sınıflandırmanın günümüzde sıkça püskürtme beton ve kaya bulonlarının kullanıldığı iksa sistemlerinden çok çelik iksaya uygun olduğu bilinmektedir.

Terzaghi'ye göre zemin sınıflandırması ve kabul edilen etkili zemin örtü kalınlıkları Çizelge 2.4'de verilmektedir (Guerrin,1969)

Stini (1950) yaptığı sınıflandırmada zeminlerin yapısal kusurlarını, Rabcewicz (1958) ise kimyasal bakımdan ayrışma durumuna bağlı olarak, kayanın kendini tutma süresi ve gerekli iksa türünü belirleyen bir başka sınıflandırma yapmıştır (Ertunç, 1983).

Tünellerde zemin stabilitesinin birçok etmene bağlı olduğu bilinmektedir. Gerçekten iksa şekli, kazı yöntemi, tünel ekseninin konumu ve enkesitin şekli zemin stabilitesi üzerinde etkili olmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Tünel zemininin stabilitesini etkileyen bazı etmenler (Ertunç, 1983)

Zemin sınıflandırmasında kullanılan diğer ölçüt de RQD ölçütüdür. Zeminin kalite katsayısı olarak da anılan bu ölçüt karot derinliğinin her bir metresinde 10 cm'den uzun

çatlaksız kısımların uzunlukları toplamının karot derinliğine oranı olarak tanımlanmaktadır. Böylece RQD değeri kısmen zemin kütleindeki çatlak durumu, zemin sağlamlığı ve ayrışma durumunu yansıtmaktadır. Zemin kalitesi ile RQD değeri arasındaki ilişki aşağıdaki Çizelge 2.10'de verilmektedir.

Çizelge 2.10. RQD değerine göre zemin kalitesi

RQD değeri (%)	Zemin Kalitesi
25	Çok kötü
25 – 50	Kötü
50 – 75	Orta
75 – 90	İyi
90 – 100	Pekiyi

Burada RQD değerinin kolay belirlenebilir olmasına rağmen, eklem yönelimi, doluluk oranı, eklem pürüzlülüğü ve dolgusu gibi niteliklerin tanımlanması için yeterli olmadığını belirlemek uygun olmaktadır (Hoek ve Brown,1990).

2.2.1.1. RSR Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre

Wickham, Tiedemann ve Skinner tarafından 1972 yılında geliştirilen bu RSR sınıflandırma ölçütü, zeminin kalitesini ve uygun iksa gereksinimini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma ölçütü A, B ve C birer değişken olmak üzere:

$$RSR = A + B + C \quad (2.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Hudson ve Harrison, 1997). Bu değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

A: Kayacın kökeni (magmatik, metamorfik, sedimenter), kayanın sertliği (sert, orta, yumuşak, ayrışmış), jeolojik yapısı (yekpare, az faylı ve kıvrımlı, orta derecede faylı veya kıvrımlı, çok faylı veya kıvrımlı) hakkında bilinenleri,

B: Tünel açım yönündeki süreksizlikler (eklem aralığı, eklem yönelimi) konusundaki bilgileri,

C: Su. akımı miktarı (yaklaşık 30 cm uzunluğundaki tünelde dakikada litre olarak), eklem durumu (iyi, orta, zayıf), A ve B değişkenlerinin birlikte değerlendirilmesinden elde edilen bilgileri ifade etmektedir.

RSR ölçütünün belirlenmesinde kullanılan A,B ve C değişkenlerinin değerleri Ek-1'deki çizelgelerde verilmektedir. Teknik literatürde RSR değeri 19'dan küçük olan zeminlerin kuvvetli iksa, RSR değeri 80 yada daha fazla olan zeminlerin ise iksa gerektirmediği belirtilmektedir. RSR değeri yardımıyla, çeşitli çaplardaki tüneller için, gereken iksayı belirlemek amacıyla birtakım çizelgeler mevcuttur (Ertunç, 1983).

Burada RSR ölçütünün, kayaç zeminlerde açılan tünellerde çelik iksanın tasarımı için çok uygun bir yöntem olduğu ancak kaya bulonu ve püskürtme beton kaplamalar için kullanımının önerilmediği belirtilmelidir.

2.2.1.2. RMR Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre

Bu RMR ölçütü zeminin kalitesini belirlemeye yarayan, bu sayede tüneller, büyük yapı temelleri, şev yamaçları ve yeraltı inşaatında uygun iksanın seçiminde kullanılmaktadır. RMR ölçütünün değeri, zemin dayanımı, zemin kalitesi (RQD), yeraltı suyu durumu, çatlak aralığı ve çatlak özellikleri gibi başlıca beş parametrenin dikkate alınması suretiyle belirlenmektedir. Gerekli durumlarda özel bir parametre olan süreksizlik doğrultusu da tünelticilik, madencilik ve temel mühendisliğinde kullanılmaktadır. RMR değeri her bir değişkene karşılık gelen değerlendirme puanlarının toplamından ibaret olan:

$$RMR = \sum(\text{sınıflandırma değişkenleri}) + (\text{süreksizlik yönelimi}) \quad (2.46)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu RMR ölçütünün değeri RSR ölçütündekine benzer olarak Ek-2'deki çizelgelerde verilmektedir (Hudson ve Harrison, 1997; Ertunç, 1983).

Çizelge 2.11. RMR ölçütüne göre zemin sınıfları ve bunların yorumu

Toplam puana göre tanımlanan zemin sınıfları					
Puanı	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf numarası	I	II	III	IV	V
Tanımı	Çok iyi	İyi	Orta	Kötü	Çok kötü
Zemin sınıflarının yorumu					
Ortalama kemerlenme süresi	15 m çap için 20 yıl	10 m çap için 1 yıl	5 m çap için 1 hafta	2,5 m çap için 10 saat	1 m çap için 30 dak.
Zeminin kohezyonu (KPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Zeminin sürtünme açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Değişik özellikteki tünellerde iksa gereksinimi RMR sınıflarına göre de, bu konuda hazırlanmış çizelgeler yardımıyla belirlenebilmektedir. Örneğin enkesitli şekilde, genişliği 5-12 m arasında ve 30 MPa düşey basınç etkisindeki delme ve patlatma yöntemiyle inşa edilen bir tünelin iksa gereksinimini aşağıdaki Çizelge 2.12’de verilmektedir (Hoek ve Brown, 1997).

Çizelge 2.12. RMR ölçütüne göre gereken tünel iksaları

Zemin Sınıfı	Kazı-İksa Özelliği	İKSA		
		ANKRAJ	PÜSKÜRTME BETON	ÇELİK KEMER
I. Çok İyi (RMR=81-100)	Tam kesitte kazı, 3 m ilerleme	Birkaç yerel ankrajın dışında genellikle destek gerekli değil		
II. İyi (RMR=61-80)	Tam kesitte kazı, 1-1,5 m ilerleme. Aynadan 20 m geride tam iksa	Tavanda 2,5 m aralıklı 3 m lik yerel, gerektiğinde kafes telli	Gerektiğinde tavanda 50 mm	Gerekmez
III. Orta (RMR=41-60)	Yarım kesitte kazı, üst galeride 1,5-3 m ilerleme. Aynadan 10 m geride tam destek	4 m uzunluğunda 1,5-2 m aralıklı sistematik ankraj, tavanda hasır çelikli	Tavanda 50- 100 mm duvarlarda 30 mm	Gerekmez
IV. Zayıf (RMR=21-40)	Yarım kesitte kazı, üst galeride 1-1,5 m ilerleme. Destekler kazıyla birlikte	4- 5 m uzunlukta, 1-1,5 m aralıklı, tavanda ve duvarlarda hasır çelikli	Tavanda 100-150 mm duvarlarda 100 mm	Gereken bölgelerde 1,5 m aralıklı, hafif profilli
V. Çok Zayıf (RMR<20)	Üst ve yan galerilerle kazı, üst galeride 0,5-1,5 m ilerleme. Destek kazıyla birlikte, patlatmadan hemen sonra beton püskürtme	5-6 m uzunlukta, 1,5 m aralıktaki tavan, duvar ve tabanda hasır çelikli	Tavanda 150-200 mm duvarlarda 150 mm aynada 50 mm	0,75 m aralıklı orta ağır profil, yanal destek

2.2.1.2. Q Zemin Sınıflandırma Ölçütüne Göre

Barton ve arkadaşları tarafından 1974 yılında geliştirilen bu ölçüt, NGI sınıflandırma ölçütü olarak da anılmaktadır. RQD zeminin kalite katsayısını, J_n eklem takımı katsayısını, J_r eklem pürüzlülük katsayısını, J_a eklem ayrışma katsayısını, J_w eklem suyu indirgeme katsayısını, SRF gerilme indirgeme katsayısını göstermek üzere zemin kalitesi:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.47)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Bu zemin sınıflandırma ölçütü belirlenmesinde kullanılan parametrelerin değeri Ek-3'deki çizelgelerde verilmektedir. Aşağıdaki çizelge bu ölçütü zemin kalitesinin belirlenmesine bir örnek teşkil etmektedir (Hudson ve Harrison, 1997). Q zemin sınıflandırma ölçütü hesaplandıktan sonra iksanın gerekli olup olmadığı kaynak (Ertunç, 1983)'de verilmiş olan birtakım abak ve çizelgeler yardımıyla kararlaştırılabilmektedir.

Çizelge 2.13. Zeminin Q değeri ve sınıfları

Q Değeri	Zeminin Sınıfı
1000-400	Son derece iyi
400-100	Pek çok iyi
100-40	Çok iyi
40-10	İyi
10-4	Orta
4-1	Zayıf
1-0,1	Çok zayıf
0,1-0,01	Çok fazla zayıf
0,01-0,001	Son derece zayıf

Teknik literatürde tünel tavanına etkiyen iksa basıncının:

$$p_v = \frac{2\sqrt{J_n} Q^{\frac{1}{3}}}{3J_r} \quad (2.48)$$

bağıntısıyla tahmin edilebileceğini belirtmektedir. Diğer taraftan ESR iksa oranını göstermek üzere, iksa istemeyen en büyük açıklığın:

$$\text{Açıklık} = 2 \cdot \text{ESR} \cdot Q^{0,4} \quad (2.49)$$

ifadesiyle bulunabileceği önerilmektedir. Bu ifadedeki ESR değerleri aşağıdaki Çizelge 2.14’de verilmektedir (Hoek ve Brown, 1997).

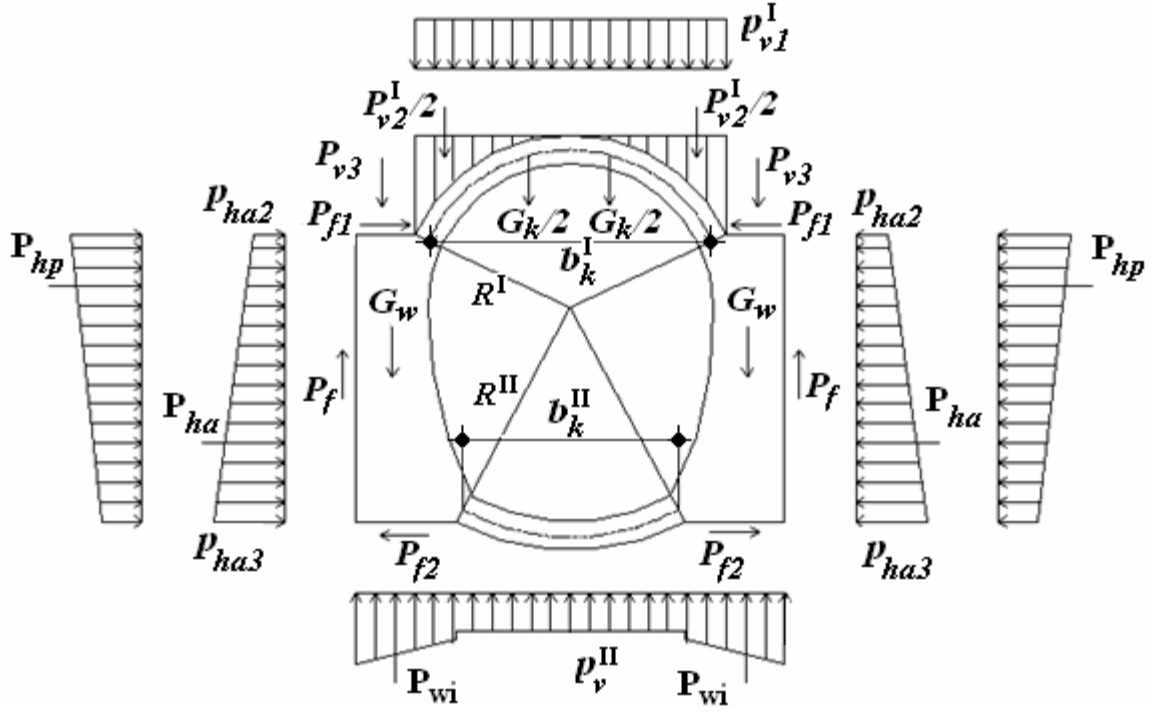
Çizelge 2.14. Kazı tipine göre kazı destek oranı

Kazı tipi	ESR
Geçici maden kazıları	3-5
Kalıcı maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar gibi.	1,6
Depolar, su arıtma tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri gibi.	1,3
Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
Yer altı nükleer santralleri, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar	0,8

2.2.2. Analitik Yöntemler

2.2.2.1. Kesiti Elemanlara Ayırarak Çözümleme

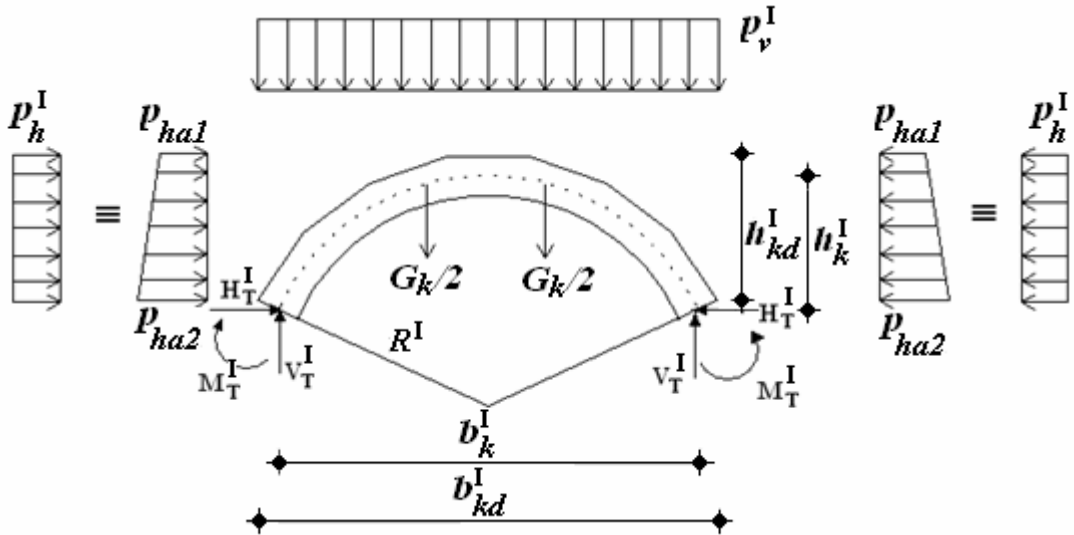
Bu tür çözümlemede tünel enkesiti dış yükler altında; duvar, tavan ve taban kemeri olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Elemanlara ayrılmış nal kesitli tünele etkiyen yükler

2.2.2.1.1. Tavan Kemerinin Yapısal Çözümlemesi

Tünel tavan kemeri ve bu kemere etkiyen yükler Şekil 2.23’de verilmektedir.



Şekil 2.23. Tünel tavan kemerine etkiyen yükler

Tavan kemerine etkiyen toplam düşey basınç (p_V^I); G_k kemerin kendi ağırlığını, p_{V1}^I düşey zemin basıncını, b_{kd}^I ve b_k^I kemerin Şekil 2.23'de görülen açıklıklarını, P_{V2}^I değişken zemin basınçlarının bileşkesini göstermek üzere;

$$p_V^I = \frac{G_k + p_{V1}^I \cdot b_{kd}^I + P_{V2}^I}{b_k^I} \quad (2.50)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerin yatay zemin basınçları (p_{ha1} ve p_{ha2}); K_a aktif zemin basınç katsayısını, γ zeminin birim ağırlığını, h_1 ve h_2 etkili zemin örtü kalınlıklarını, c zeminin kohezyonunu göstermek üzere:

$$p_{ha1} = K_a \gamma h_1 \quad (2.51)$$

$$p_{ha2} = K_a \gamma h_2 \quad (2.52)$$

bağıntılarıyla, kohezyonlu zeminlerde ise:

$$p_{ha1} = K_a \gamma h_1 - 2c\sqrt{K_a} \quad (2.53)$$

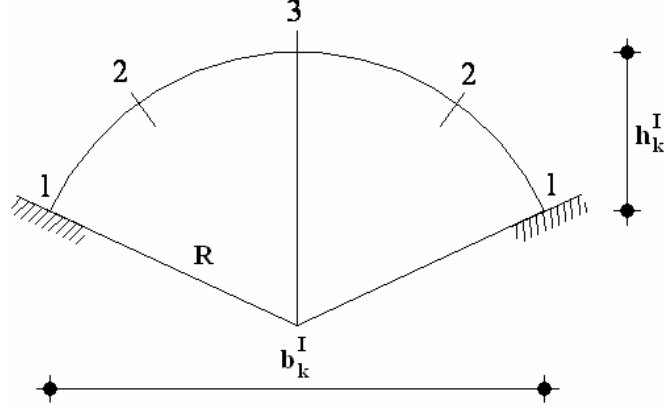
$$p_{ha2} = K_a \gamma h_2 - 2c\sqrt{K_a} \quad (2.54)$$

bağıntılarıyla belirlenmektedir. Böylece tavan kemerine etkiyen toplam yatay basınç (p_h^I), h_{kd}^I ve h_k^I tünel kemerinin Şekil 2.23'de görülen yüksekliklerini göstermek üzere;

$$p_h^I = \left(\frac{p_{ha1} + p_{ha2}}{2} \right) \frac{h_{kd}^I}{h_k^I} \quad (2.55)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Kemer yüksekliğinin açıklığa oranına (h_k^I/b_k^I) bağlı olarak aşağıdaki Çizelge 2.15'den Şekil 2.24'deki 1,2 ve 3 kesitleri için α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları alınmaktadır.



Şekil 2.24. Tünel tavan kemerinde kesit etkilerinin hesaplandığı kesitlerin gösterilimi.

Çizelge 2.15. Kemer yüksekliğinin açıklığına oranına bağlı olarak kemerin çeşitli kesitlerindeki α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları

(h_k/b_k)	Moment					Kesme ve normal kuvvet	
	$\times p_v b_k^2$					$\times p_v b_k$	
	1 Kesiti		2 Kesiti	3 Kesiti		1 Kesiti	
	α_M	β_M	α_M	α_M	β_M	α_H	β_H
0,10	0,00120	-0,00120	-0,00042	0,00040	-0,00040	1,2750	0,0750
0,12	0,00167	-0,00167	-0,00047	0,00058	-0,00058	1,0390	0,0574
0,14	0,00224	-0,00224	-0,00066	0,00080	-0,00080	0,9045	0,0816
0,16	0,00292	-0,00292	-0,00087	0,00110	-0,00110	0,7950	0,0938
0,18	0,00296	-0,00366	-0,00111	0,00140	-0,00140	0,7075	0,1031
0,20	0,00452	-0,00452	-0,00138	0,00176	-0,00176	0,6335	0,1085
0,22	0,00550	-0,00550	-0,00168	0,00214	-0,00214	0,5800	0,1218
0,24	0,00653	-0,00653	-0,00200	0,00256	-0,00256	0,5335	0,1341
0,26	0,00765	-0,00765	-0,00239	0,00300	-0,00300	0,4995	0,1487
0,28	0,00885	-0,00885	-0,00280	0,00346	-0,00346	0,4685	0,1621
0,30	0,01010	-0,01010	-0,00324	0,00400	-0,00400	0,4415	0,1749
0,32	0,01145	-0,01145	-0,00372	0,00458	-0,00458	0,4135	0,1829
0,34	0,01285	-0,01285	-0,00424	0,00520	-0,00520	0,3920	0,1944
0,36	0,01434	-0,01434	-0,00479	0,00585	-0,00585	0,3725	0,2053
0,38	0,01589	-0,01589	-0,00540	0,00648	-0,00648	0,3540	0,2151
0,40	0,01748	-0,01748	-0,00603	0,00721	-0,00721	0,3385	0,2260
0,42	0,01920	-0,01920	-0,00672	0,00797	-0,00797	0,3247	0,2371
0,44	0,02105	-0,02105	-0,00744	0,00881	-0,00881	0,3120	0,2479
0,46	0,02296	-0,02296	-0,00821	0,00971	-0,00971	0,3000	0,2583
0,48	0,02478	-0,02478	-0,00902	0,01064	-0,01064	0,2895	0,2690
0,50	0,02668	-0,02668	-0,00987	0,01161	-0,01161	0,2801	0,2801

Bu çizelgeden alınan katsayılar yardımıyla kaplamanın çeşitli noktalarında düşey yükler altında oluşan kesit etkileri:

$$M_V^I = \alpha_M \cdot p_V^I \cdot b_k^{I2} \quad (2.56)$$

$$H_V^I = \alpha_H \cdot p_V^I \cdot b_k^I \quad (2.57)$$

$$V_V^I = p_V^I \frac{b_k^I}{2} \quad (2.58)$$

bağıntılarıyla, yatay yükler etkisiyle oluşan kesit etkileri;

$$M_H^I = \beta_M \cdot p_h^I \cdot b_k^{I2} \quad (2.59)$$

$$H_H^I = \beta_H \cdot p_h^I \cdot b_k^I \quad (2.60)$$

$$V_H^I = 0 \quad (2.61)$$

bağıntılarıyla belirlenmektedir. Buna göre toplam kesit etkileri:

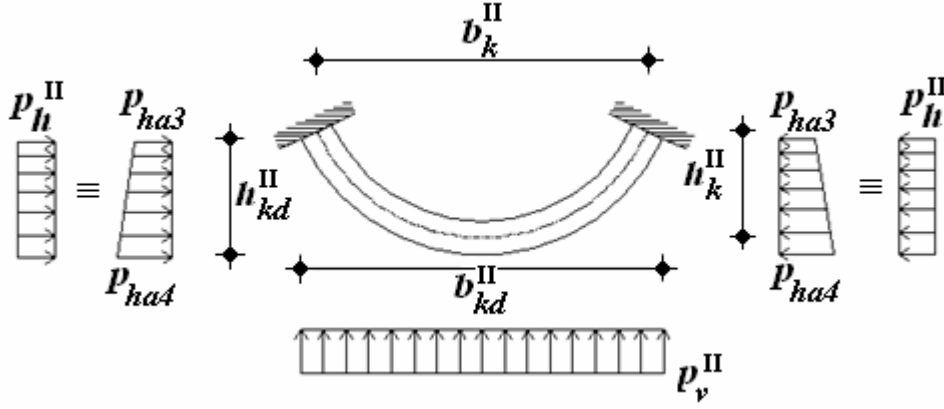
$$M_T^I = M_V^I + M_H^I \quad (2.62)$$

$$H_T^I = H_V^I + H_H^I \quad (2.63)$$

$$V_T^I = V_V^I + V_H^I \quad (2.64)$$

bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir. Bu kesit etkilerine göre tasarlanan kesit boyutlarının denetlenmesi gerekmektedir. Kesitin yetersiz olması durumunda hesap gereken düzeltme yapılarak tekrarlanmalıdır.

2.2.2.1.2. Taban Kemerinin Yapısal Çözümlemesi



Şekil 2.25. Taban Kemerine Etkiyen Yükler

Bu yüklere göre toplam düşey taban basıncı p_v^{II} ; P_{V3} Şekil 2.22’de verilen duvar üzerine etkiyen zemin ağırlığını, P_f duvar arka yüzü ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetini, b_k^{II} Şekil 2.25’de görülen taban kemeri açıklığını göstermek üzere:

$$p_v^{II} = p_{v1}^I + \frac{P_{V2}^I + 2P_{V3} - 2P_f}{b_k^{II}} \quad (2.65)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Burada duvar üzerine etkiyen zemin ağırlığı (P_{V3}), d_w^I Şekil 2.26’da verilen duvar üst yüzeyinin genişliğini göstermek üzere:

$$P_{V3} = d_w^I \cdot h_{kd}^I \cdot \gamma \quad (2.66)$$

olarak hesaplanmaktadır. Duvar arkasındaki sürtünme kuvveti (P_f) ise, P_{hp} zeminin pasif yatay basıncının bileşkesini, P_{ha} zeminin aktif yatay basıncının bileşkesini ve φ zeminin içsel sürtünme açısını göstermek üzere;

$$P_f = (P_{ha} + P_{hp}) \tan \varphi \quad (2.67)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Taban kemerine etkiyen toplam yatay basınç (p_h^{II}) ise, p_{ha3} ve p_{ha4} taban kemerine etkiyen yatay zemin basınçlarını (bkz. Şekil 2.25), h_{kd}^{II} ve h_k^{II} Şekil 2.25'deki taban kemerine ilişkin yükseklikleri göstermek üzere:

$$p_h^{\text{II}} = \frac{p_{ha3} + p_{ha4}}{2} \cdot \frac{h_{kd}^{\text{II}}}{h_k^{\text{II}}} \quad (2.68)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Tavan kemerinde olduğu gibi ($h_k^{\text{II}}/b_k^{\text{II}}$) oranına bağlı olarak Çizelge 2.14'den α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları alınarak kemerin 1,2 ve 3 kesitlerinde düşey yüklerden dolayı oluşan kesit tesirleri;

$$M_V^{\text{II}} = \alpha_m \cdot p_V^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}2} \quad (2.69)$$

$$H_V^{\text{II}} = \alpha_H \cdot p_V^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}} \quad (2.70)$$

$$V_V^{\text{II}} = \frac{p_V^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}}}{2} \quad (2.71)$$

bağıntılarıyla, yatay yüklerden oluşan kesit etkileri ise:

$$M_H^{\text{II}} = \beta_m \cdot p_H^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}2} \quad (2.72)$$

$$H_H^{\text{II}} = \beta_H \cdot p_H^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}} \quad (2.73)$$

$$V_V^{\text{II}} = 0 \quad (2.74)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Durum böyle olunca taban kemerinin anılan kesitlerindeki toplam kesit etkileri;

$$M_T^{\text{II}} = M_V^{\text{II}} + M_H^{\text{II}} \quad (2.75)$$

$$H_T^{\text{II}} = H_V^{\text{II}} + H_H^{\text{II}} \quad (2.76)$$

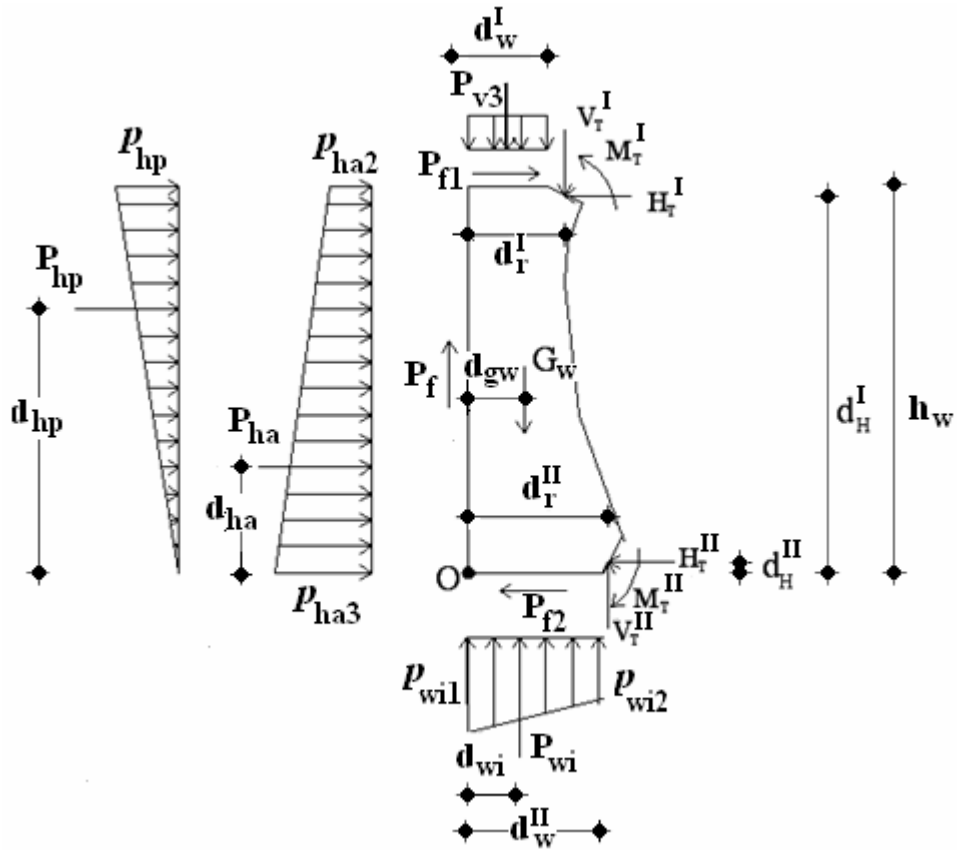
$$V_T^{\text{II}} = V_V^{\text{II}} + V_H^{\text{II}} \quad (2.77)$$

olarak elde edilmektedir.

Burada taban kemeri için yapılan kesit denetiminin taban kemeri ön boyutları için de yapılması gerektiği belirtilmelidir.

2.2.2.1.3. Tünel Yan Duvarının Yapısal Çözümlemesi

Tünel yan duvarlarına etkiyen yükler Şekil 2.26'da verilmektedir.



Şekil 2.26. Tünel Yan Duvarına Etkiyen Yükler

Bu yüklere göre duvara etkiyen toplam zemin yükü (P_{V3}):

$$P_{V3} = b_w^I (h_1 + h_{kd}^I) \gamma \quad (2.78)$$

bağıntısıyla, d_r^I , d_r^{II} ve h_w Şekil 2.26'daki boyutları, γ_c betonun birim ağırlığını göstermek üzere, duvarın ağırlığı (G_w):

$$G_w = \frac{d_r^I + d_r^{II}}{2} \cdot h_w \cdot \gamma_c \quad (2.79)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradan duvar tabanına etkiyen bileşke kuvvet (P_{wi}):

$$P_{wi} = V_T^I + P_{V3}^I + G_w - P_f - V_T^{II} \quad (2.80)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Burada sürtünme kuvvetinin (P_f), duvar arkasındaki aktif ve pasif yatay zemin etkisinden dolayı $P_f = (P_{ha} + P_{hp}) \tan \phi$ olarak meydana geldiği ve bilinmeyen P_f 'nin tahmin edilerek daha sonra denetlenmesinin zorunlu olduğu belirtilmelidir:

Aktif yatay zemin etkisi:

$$P_{ha} = \frac{p_{ha2} + p_{ha3}}{2} \cdot h_w \quad (2.81)$$

bağıntısıyla ve bunun tatbik noktasının yüksekliği ise:

$$d_{ha} = \frac{2p_{ha2} + p_{ha3}}{p_{ha2} + p_{ha3}} \cdot \frac{h_w}{3} \quad (2.82)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Denge gereği tünel yan duvarlarına etkiyen kuvvetlerin O noktasına göre momentlerinin toplamı:

$$\begin{aligned}
& P_{V3}^I \frac{b_w^I}{2} + P_{f1} \cdot h_w + V_T^I \cdot d_H^I - M_T^I - H_T^I \cdot d_H^I + G_w \cdot d_{gw} - H_T^{II} \cdot d_H^{II} - V_T^{II} \cdot d_H^{II} \\
& + M_T^{II} - P_{ha} \cdot d_{ha} + P_{hp} \cdot d_{hp} - P_{wi} \cdot d_{wi} = 0
\end{aligned} \tag{2.83}$$

olmalıdır. Bu denklem M_0 bilinmeyen terimlerin O noktasına göre momentlerinin toplamını göstermek üzere $M_0 + P_{hp} \cdot d_{hp} - P_{wi} \cdot d_{wi} = 0$ şeklinde yazılabilmektedir. Bu ifadede bilinmeyenlerden zeminin pasif yatay itkisinin:

$$P_{hp} = \frac{P_{wi} \cdot b_w^{II} - 2M_0}{\frac{4}{3} h_w + \frac{b_w^{II3}}{3h_w^2}} \tag{2.84}$$

bağıntısıyla hesaplanması yeterli bulunmaktadır. Hesaplanan P_{hp} ile P_f sürtünme kuvveti hesaplanarak daha önce tahmin edilen değere yakın olup olmadığı denetlenmektedir.

Zeminin pasif yatay basıncının duvar üst seviyesindeki değeri:

$$p_{hp} = \frac{2P_{hp}}{h_w} \tag{2.85}$$

ifadesiyle, taban uç basınçlarının farkı:

$$\Delta P_{wi} = p_{wi1} - p_{wi2} = P_{hp} \frac{b_w^{II}}{h_w} \tag{2.86}$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Buradan taban basınçları:

$$p_{wi1} = \frac{P_{wi}}{b_w^{II}} + \frac{\Delta P_{wi}}{2} \tag{2.87}$$

$$p_{wi2} = \frac{P_{wi}}{b_w^{II}} - \frac{\Delta P_{wi}}{2} \tag{2.88}$$

bağıntılarıyla, taban gerilmeleri bileşkesinin O noktasına uzaklığı ise:

$$d_{wi} = \frac{2p_{wi2} + p_{wi1}}{p_{wi1} + p_{wi2}} \cdot \frac{b_w^{II}}{3} \quad (2.89)$$

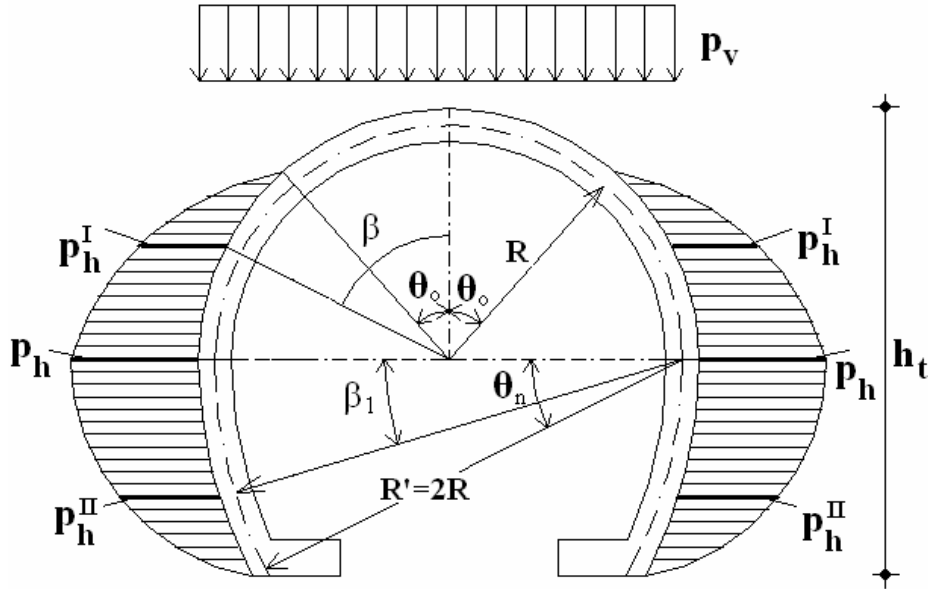
bağıntısıyla belirlenmektedir. Yatay kuvvetlerin dengesinden duvar tabanındaki sürtünme kuvveti de:

$$P_{f2} = H_T^I + H_T^{II} - P_{f1} - P_{hp} - P_{ha} \quad (2.90)$$

şeklinde belirlenmektedir. Bu bulgulara göre tünelin kayma emniyeti için $P_{f2} = P_{wi} \cdot \tan \varphi$ bağıntısı yardımıyla hesaplanan φ içsel sürtünme açısının zeminin gerçek sürtünme açısından daha küçük olduğu gösterilmelidir (Szechy,1970).

2.2.2.2. Kesiti Elemanlara Ayırmadan Çözümleme

Zurabov ve Bougayeva tarafından geliştirilen yöntem, bir taraftan kesiti yekpare olarak dikkate alması diğer taraftan tünel kaplamasını çevreleyen zemini de hesaba katmasından dolayı, kesiti elemanlara ayırarak yapılan çözümlemeden daha iyi sonuç verdiği savunulmaktadır (Szechy,1970).



Şekil 2.27. Tünel enkesiti ve bu kesite etkiyen yükler

Bu tür bir çözümlemede R tünel yarıçapını göstermek ve θ_n Şekil 2.27'deki anma açısı olmak üzere öncelikle grup yüklemeleri için sistemin elastik merkezinin

$$y_g = \frac{\int y ds}{\int ds} \rightarrow y_g = \frac{R^2 \left(\frac{\pi}{2} + 3 + 2\theta_n - 4 \cdot \cos\theta_n \right)}{R \frac{\pi}{2} + 2R\theta_n} \quad (2.91)$$

bağıntısıyla belirlenmesi gerekmektedir.

2.2.2.2.1. Düşey Yüke Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi

Bu yöntemle tünel kaplamasının yapısal çözümlemesi kuvvet yöntemiyle yapıldığından sistemin elastik merkezi (2.91) bağıntısıyla bulunduktan sonra üçüncü dereceden hiperstatik olan bu sistem izostatik esas sistemini seçerek, elastik merkeze X_1 , X_2 ve X_3 birim yüklemeleri yapılmaktadır. Bunlardan X_1 birim momenti, X_2 birim yatay yükü ve X_3 birim düşey yükü göstermektedir. Ancak kesit simetrik ve düşey yük de simetrik olduğundan $X_3=0$ olarak alınabilmektedir (Şekil 2.28).

Buna göre birim yerdeğiştirme sabitlerine (δ_{11} , δ_{12} , δ_{21} , δ_{22} , δ_{10} , δ_{20}) göre süreklilik denklemleri yazılabilmektedir.

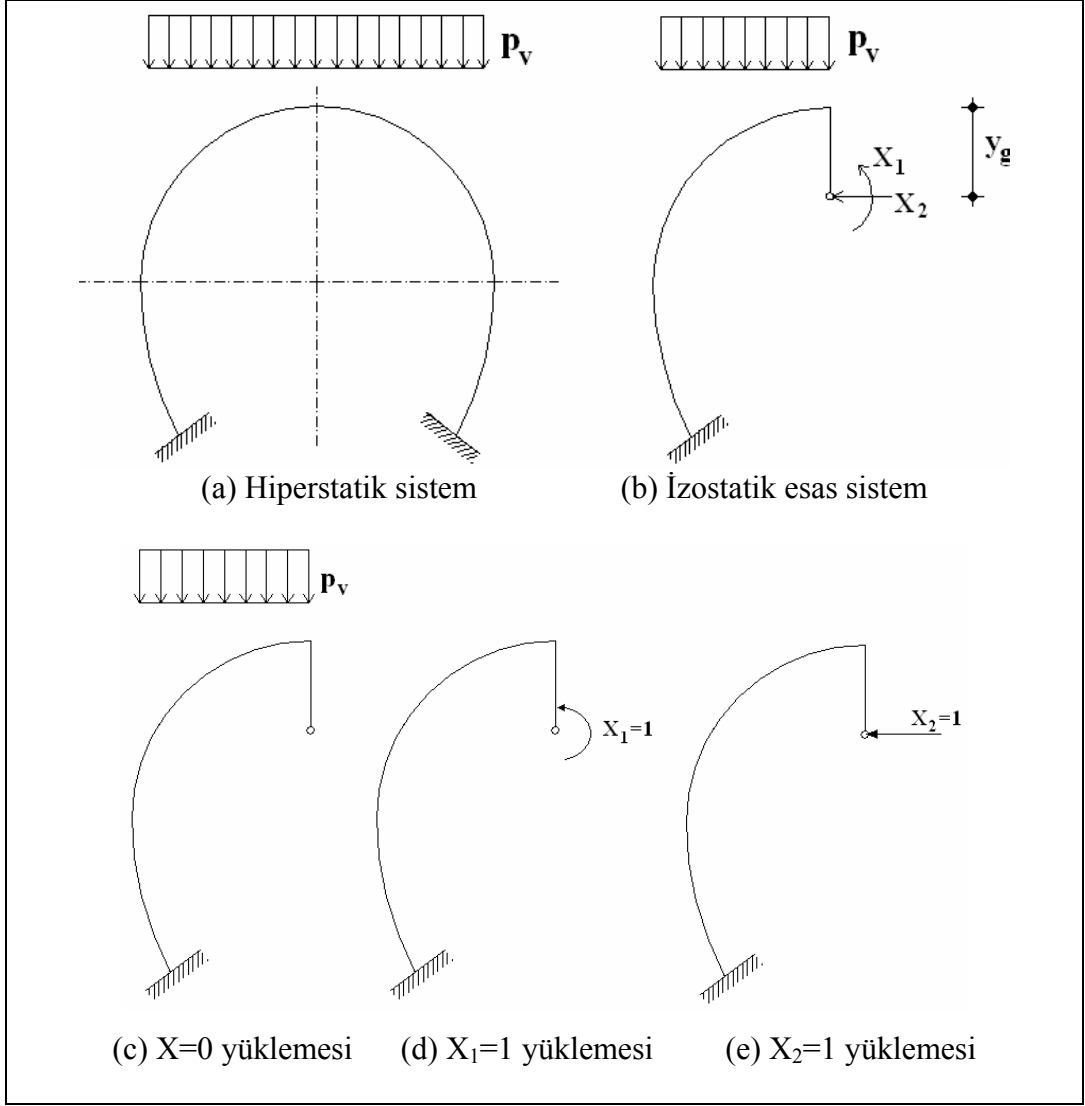
$$\delta_{10} + \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 = 0 \quad (2.92)$$

$$\delta_{20} + \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 = 0 \quad (2.93)$$

Grup yüklemelerinden dolayı $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$ olduğundan yukarıdaki denklemler:

$$\delta_{10} + \delta_{11} X_1 = 0 \quad (2.94)$$

$$\delta_{20} + \delta_{22} X_2 = 0 \quad (2.95)$$



Şekil 2.28. Tünel kaplamasına etkiyen düşey yükler (a), izostatik esas sistem (b) ve bu sistemin yüklemeleri (c,d,e)

şeklini almaktadır. Bu denklemlerden X_1 ve X_2 :

$$X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \quad (2.96)$$

$$X_2 = -\frac{\delta_{20}}{\delta_{22}} \quad (2.97)$$

bağıntılarıyla elde edilmektedir. Bu bağıntılardaki birim yerdeğiştirme sabitlerinin belirlenmesi için $X=0$, $X_1=1$ ve $X_2=1$ yüklemeleri altında izostatik sistemde oluşan

moment diyagramlarının bilinmesi gerekmektedir. $X=0$ için β açısına bağlı moment dağılım ifadesi:

$$M_0^{VI} = -p_v \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \quad (2.98)$$

şeklinde, β_1 'e bağlı olanı ise:

$$M_0^{VII} = -p_v \frac{R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \quad (2.99)$$

şeklinde belirlenmektedir. $X_1=1$ yüklemesiyle kesitin her yerinde 1 birimlik moment oluşmaktadır. $X_2=1$ yüklemesinde β açısına bağlı moment dağılımı:

$$M_2^I = R - y_g - R \cdot \cos \beta \quad (2.100)$$

şeklinde, β_1 açısına bağlı moment dağılımı ise:

$$M_2^{II} = R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1 \quad (2.101)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre birim yerdeğiştirme sabitleri:

$$\begin{aligned} \delta_{10}^v &= \int \frac{M_0 \cdot M_1}{EI} ds \rightarrow \delta_{10}^v = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\pi/2} M_0^{VI} R d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{VII} 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \\ \delta_{10}^v &= \frac{1}{EI} \left\{ - \int_0^{\pi/2} \frac{p_v R^2 \cdot \sin^2 \beta}{2} R d\beta + \int_0^{\theta_n} \left(- \frac{p_v R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \right) 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \\ \delta_{10}^v &= \frac{1}{EI} \left\{ - \frac{1}{8} p_v R^3 \left[-2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) + \pi \right] - R^3 p_v \left[-3\theta_n + 4 \cdot \sin(\theta_n) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.102)$$

bağıntısıyla,

$$\delta_{20}^v = \int \frac{M_0^v \cdot M_2}{EI} ds \quad \rightarrow \quad \delta_{20}^v = \int_0^{\pi/2} M_0^{vI} \cdot M_2^I \cdot R \, d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{vII} \cdot M_2^{II} \cdot 2R \, d\beta_1 \quad \rightarrow$$

$$\delta_{20}^v = \int_0^{\pi/2} \left(-p_v \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \right) (R - y_g - R \cdot \cos \beta) R \, d\beta$$

$$+ \int_0^{\theta_n} \left[-p_v \frac{R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \right] (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1) 2R \, d\beta_1 \quad \rightarrow$$

$$\delta_{20}^v = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{1}{24} p_v R^3 \left[6R \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) - 3R\pi - 6y_g \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \right. \right.$$

$$+ 3y_g \pi + 4R \cdot \sin^3 \left(\frac{\pi}{2} \right) \left. \right] + \left[2p_v R^4 + 3p_v R^4 \theta_n - 3p_v R^3 y_g \theta_n - 6p_v R^4 \cdot \cos(\theta_n) \right.$$

$$\left. - 4p_v R^4 \sin(\theta_n) + 4p_v R^3 y_g \cdot \sin(\theta_n) + 4p_v R^4 \cdot \cos^2(\theta_n) \right] \left. \right\} \quad (2.103)$$

bağıntısıyla,

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI} ds \quad \rightarrow \quad \delta_{11} = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\pi/2} R \, d\beta + \int_0^{\theta_n} 2R \, d\beta_1 \right\} \quad \rightarrow \quad \delta_{11} = \frac{\pi}{2} R + 2R\theta_n \quad (2.104)$$

bağıntısıyla ve

$$\delta_{22} = \int \frac{M_2^2}{EI} ds \quad \rightarrow \quad \delta_{22} = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\pi/2} (R - y_g - R \cdot \cos \beta)^2 R \cdot d\beta + \int_0^{\theta_n} (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1)^2 2R \, d\beta_1 \right\} \quad \rightarrow$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{1}{4} R \left[+2y_g^2 \pi - 4R\pi y_g + 8R y_g \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) + 3R^2 \pi - 8R^2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \right. \right.$$

$$+ 2R^2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \left. \right] + \left[-8R^3 + 8R^2 y_g - 6R^3 \theta_n - 4R^2 y_g \theta_n \right.$$

$$\left. + 8R^3 \cdot \cos(\theta_n) + 2R y_g^2 \theta_n + 8R^2 y_g \cdot \cos(\theta_n) - 4R^3 \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) \right] \left. \right\} \quad (2.105)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu birim yerdeğiştirmeler (2.96) ve (2.97) bağıntılarında yerine konarak X_1^v ve X_2^v hiperstatik bilinmeyenleri bulunmaktadır. Dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı:

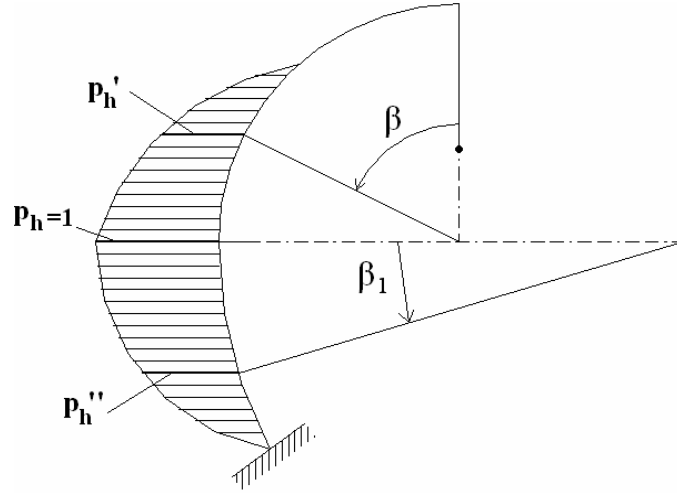
$$M_V^I = M_0^{vI} + X_1^v M_1^I + X_2^v M_2^I \quad (2.106)$$

bağıntısıyla, daire yayı şeklinde olan duvardaki moment dağılımı ise:

$$M_V^{II} = M_0^{vII} + X_1^v M_1^{II} + X_2^v M_2^{II} \quad (2.107)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

2.2.2.2. Yatay Birim Yüke ($p_h=1$) Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi



Şekil 2.29. Tünel kaplamasının kubbe çapı düzeyinde uygulanan $p_h=1$ yatay yüklemesi

Bu yükler için daireSEL kubbe kısmında kaplamadaki yük dağılımı:

$$p_h^I = 1 - 2 \cdot \cos^2 \beta \quad (2.108)$$

ifadesinin tünelin daire yayı şeklinde olan duvarında ise:

$$p_h^{\text{II}} = 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \theta_n} \quad (2.109)$$

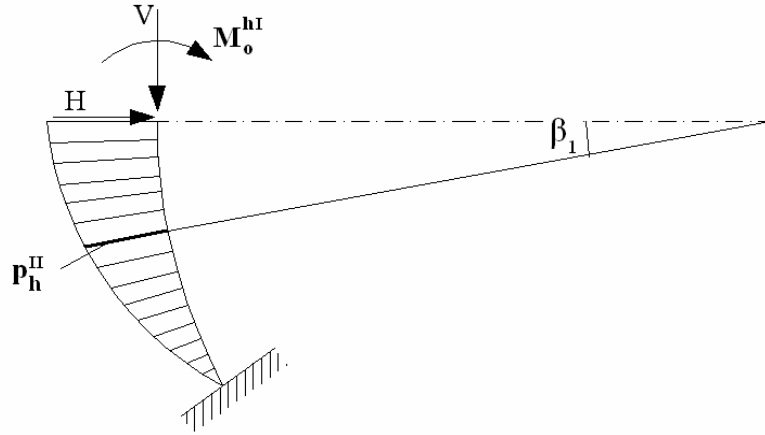
ifadesini sağlamaktadır.

Bu durumda $X=0$ için bu yük etkisinde izostatik esas sistemin dairesel kubbe kısmındaki moment:

$$M_0^{\text{hI}} = - \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\beta} p_h^{\text{I}} \cdot R \cdot R \cdot \sin(\beta-\alpha) d\alpha \rightarrow M_0^{\text{hI}} = -R^2 \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\beta} (1-2 \cdot \cos^2 \alpha) \sin(\beta-\alpha) d\alpha$$

$$\rightarrow M_0^{\text{hI}} = -\frac{R^2}{6} \cdot \cos\left(\beta - \frac{3\pi}{4}\right) + \frac{R^2}{2} \cdot \cos\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{R^2}{3} \cdot \cos(2\beta) \quad (2.110)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.30. Tünelin daire yayı şeklindeki duvarına etkiyen yatay zemin basıncı

Tünelin daire yayı şeklinde olan duvarındaki moment dağılımı ise:

$$H = \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\pi/2} p_h^{\text{I}} \cdot \sin \alpha \cdot ds \rightarrow H = \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\pi/2} (1-2 \cdot \cos^2 \alpha) R \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \rightarrow H = 0,4714R \quad (2.111)$$

$$V = \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\pi/2} p_h^I \cdot \cos\alpha \cdot ds \rightarrow V = \int_{\alpha=\pi/4}^{\alpha=\pi/2} (1-2 \cdot \cos^2\alpha) R \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha \rightarrow V=0,1381R \quad (2.112)$$

ve momentin değeri ise $\beta = \pi/2$ için $M_0^{hl} = -0,1381R^2$ olmak üzere bu değerler (2.113) bağıntısında yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$M_0^{hII} = - \int_{\alpha=0}^{\alpha=\beta_1} p_h^{II} \cdot 4R^2 \cdot \sin(\beta_1 - \alpha) d\alpha + M_0^{hl} - H \cdot 2R \cdot \sin\beta_1 + V \cdot 2R \cdot (1 - \cos\beta_1) \quad (2.113)$$

$$M_0^{hII} = \frac{4R^2 (3 \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos^2\theta_n - \cos\beta_1 - 3 \cdot \cos^2\theta_n + 2 - \cos^2\beta_1)}{3(-1 + \cos^2\theta_n)} + R^2 (-0,1381 - 0,9428 \cdot \sin\beta_1 + 0,2762(1 - \cos\beta_1)) \quad (2.114)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu yükleme için δ_{10}^h ve δ_{20}^h birim yerdeğiştirme sabitleri sırasıyla:

$$\begin{aligned} \delta_{10}^h &= \int \frac{M_0^h \cdot M_1}{EI} ds \rightarrow \delta_{10}^h = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\pi/2} M_0^{hl} R d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{hII} 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \\ \delta_{10}^h &= \frac{1}{EI} \left[-\frac{R^3}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{R^3}{6} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{R^3}{2} \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) - \frac{R^3}{6} \cdot \sin(\pi) \right] \\ &+ \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{1}{\sin^2(\theta_n)} \left[0,000067R^3 (28284 - 28284\cos^2(\theta_n)) \right. \right. \\ &+ 1,11714 \cdot 10^5 \cdot \cos^2(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) - 1,15857 \cdot 10^5 \cdot \cos^2(\theta_n) \cdot \theta_n \\ &- 31714 \cdot \sin(\theta_n) + 55857 \cdot \theta_n - 20000 \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) - 28284 \cdot \cos(\theta_n) \\ &\left. \left. + 28284 \cdot \cos^3(\theta_n) \right] \right\} \quad (2.115) \end{aligned}$$

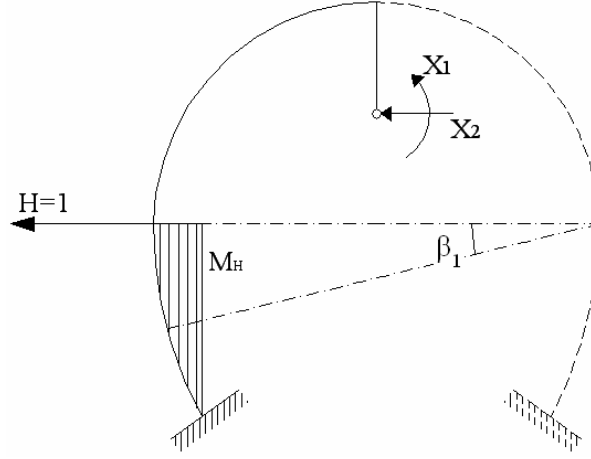
bağıntısı ve

$$\begin{aligned}
\delta_{20}^h &= \int \frac{M_0^h \cdot M_2}{EI} ds \quad \rightarrow \quad \delta_{20}^h = \int_0^{\pi/2} M_0^h \cdot M_2^I \cdot R d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{hII} \cdot M_2^II \cdot 2R d\beta_1 \quad \rightarrow \\
\delta_{20}^h &= \frac{1}{EI} \left[-\frac{1}{3} R^4 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} R^3 y_g \sin\left(\frac{\pi}{20}\right) + \frac{1}{12} R^4 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{1}{48} R^4 \pi \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) \right. \\
&\quad - \frac{1}{16} R^4 \pi \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{41}{72} R^4 \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) - \frac{1}{6} R^3 y_g \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{2} R^3 y_g \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \\
&\quad - \frac{1}{6} R^4 \sin(\pi) + \frac{1}{6} R^3 y_g \sin(\pi) - \frac{1}{8} R^4 \sin\left(\frac{5\pi}{4}\right) + \left. \frac{1}{18} R^4 \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) \right] \\
&\quad + \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{0,000022}{\sin^2 \theta_n} R^3 [364852 R - 349710 R \cos^2(\theta_n) - 84852 \cdot y_g \right. \\
&\quad + 84852 \cdot y_g \cos^2(\theta_n) + 252420 R \theta_n - 167570 y_g \theta_n - 335142 y_g \sin \theta_n \cdot \cos^2(\theta_n) \\
&\quad + 84852 y_g \cos \theta_n - 84852 y_g \cos^3(\theta_n) - 432423 R \theta_n \cos^2 \theta_n \\
&\quad - 144852 R \cos \theta_n \cdot \sin \theta_n + 335142 R \cos^2(\theta_n) \cdot \sin \theta_n + 60000 \cdot y_g \cos \theta_n \cdot \sin \theta_n \\
&\quad + 84857 R \cos^3 \theta_n \sin \theta_n - 335142 R \cos^4(\theta_n) - 95142 R \sin \theta_n + 95142 y_g \sin \theta_n \\
&\quad \left. + 859994 R \cos^3(\theta_n) + 347571 y_g \theta_n \cos^2(\theta_n) - 539994 R \cos \theta_n \right\} \quad (2.116)
\end{aligned}$$

bağıntısıyla belirlenebilmektedir. Bu birim yerdeğiştirme sabitleri için (δ_{10}^h ve δ_{20}^h) için hiperstatik bilinmeyenler (X_1^h ve X_2^h) 2.96 ve 2.97 bağıntıları yardımıyla belirlenebilmektedir.

2.2.2.2.3. Yatay Yerdeğiştirmeler ve Yatay Yükün Belirlenmesi

Düşey yükten dolayı oluşan yatay yerdeğiştirmenin (δ_n^v) bulunması için δ_0^v , δ_1 ve δ_2 sırasıyla p_v düşey yükünden, $X_1=1$ ve $X_2=1$ yüklemelerinde oluşan yerdeğiştirmelerin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için $H=1$ rölatif yükü için tünel enkesitinde moment dağılımının belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Dairesel kubbe çapı düzeyindeki $H=1$ birim yüklemesi

Bu yüklemeye göre $M_H = 2R \cdot \sin\beta_1$ olmaktadır. Buna göre:

$$\delta_1 = \int \frac{M_H \cdot M_1}{EI} ds \rightarrow \delta_1 = \frac{1}{EI} (4R^2 - 4R^2 \cos\theta_n) \quad (2.117)$$

şeklinde,

$$\delta_2 = \int \frac{M_H \cdot M_2}{EI} ds \rightarrow \delta_2 = \frac{1}{EI} (4R^3 - 4R^2 y_g - 4R^3 \cos\theta_n + 4R^2 y_g \cos\theta_n \sin\theta_n + 4R^3 \theta_n) \quad (2.118)$$

şeklinde,

$$\delta_0^v = \int \frac{M_H \cdot M_0^{vII}}{EI} ds \rightarrow \delta_0^v = \frac{1}{EI} (2p_v R^4 - 6p_v R^4 \cos\theta_n + 4p_v R^4 \cos^2\theta_n) \quad (2.119)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Durum böyle olunca düşey yük altında meydana gelen yatay yerdeğiştirme:

$$\delta_h^v = \delta_0^v + \delta_1 \cdot X_1^v + \delta_2 \cdot X_2^v \quad (2.120)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Benzer şekilde yatay yükten meydana gelen yatay yerdeğiştirme (δ_h^h) yukarıdaki (2.119) bağıntısında M_0^{VII} yerine M_0^{hII} yazmak ve gerekli düzenlemeleri yapmak suretiyle:

$$\delta_0^h = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{R^4}{22500 \sin^2 \theta_n} \left[1,32429 \cdot 10^5 \cos^2 \theta_n - 1,4 \cdot 10^5 + 1,67571 \cdot 10^5 \cos^4 \theta_n - 42426 \cos^3 \theta_n \sin \theta_n - 3,87571 \cdot 10^5 \cos^3 \theta_n - 42426 \theta_n + 2,27571 \cdot 10^5 \cos \theta_n + 42426 \theta_n \cos^2 \theta_n + 42426 \cos \theta_n \sin \theta_n \right] \right\} \quad (2.121)$$

olarak belirlendikten sonra yatay yük altında meydana gelen yatay yerdeğiştirme:

$$\delta_h^h = \delta_0^h + \delta_1 \cdot X_1^h + \delta_2 \cdot X_2^h \quad (2.122)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda k_s zeminin yatak katsayısını göstermek üzere yatay yük:

$$p_h = \frac{\delta_h^v}{\frac{1}{k_s} - \delta_h^h} \quad (2.123)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Son olarak toplam yükten (düşey+yatay) meydana gelen hiperstatik bilinmeyenler:

$$X_1 = X_1^v + p_h \cdot X_1^h \quad (2.124)$$

$$X_2 = X_2^v + p_h \cdot X_2^h \quad (2.125)$$

ifadeleriyle belirlenmesinin ardından $M_0 = M_0^v + M_0^h$ olmak üzere tünel enkesitinde moment dağılım ifadesi:

$$M = M_0 + M_1 X_1 + M_2 X_2 \quad (2.126)$$

bağıntısından dairesel kubbe kısmında:

$$M^I = \left\{ \left(-p_v^I \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \right) + p_h^I \left[-\frac{R^2}{6} \cdot \cos \left(\beta - \frac{3\pi}{4} \right) + \frac{R^2}{2} \cdot \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{R^2}{3} \cdot \cos(2\beta) \right] \right\} + X_1 + X_2 (R - y_g - R \cdot \cos \beta) \quad (2.127)$$

ifadesiyle, daire yayı şeklindeki duvarlar kısmında ise:

$$M^{II} = \left\{ p_h^I \left[\frac{4R^2 (3 \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos^2 \theta_n - \cos \beta_1 - 3 \cdot \cos^2 \theta_n + 2 - \cos^2 \beta_1)}{3(-1 + \cos^2 \theta_n)} + R^2 (-0,1381 - 0,9428 \cdot \sin \beta_1 + 0,2762(1 - \cos \beta_1)) \right] + \left[-p_v^I \frac{R^2}{2} + 2p_v^I R^2 (1 - \cos \beta_1) \right] \right\} + X_1 + X_2 (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1) \quad (2.128)$$

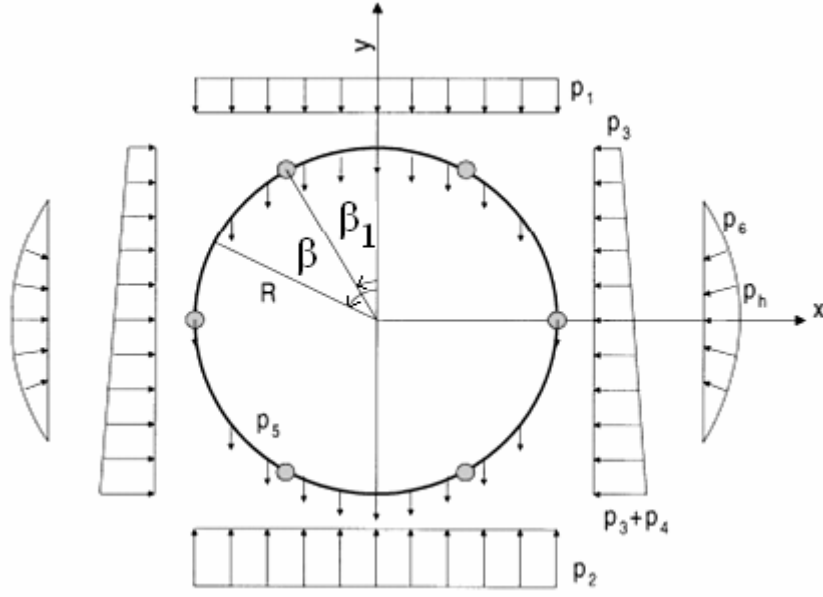
ifadesiyle belirlenmektedir.

2.2.2.3. Birleşik Elemanlı Dairesel Kaplamaların Yapısal Çözümlemesi

Birleşik elemanlı dairesel bir tünel kaplaması ve bu kaplamaya etkileyen yükler aşağıdaki Şekil 2.32. verilmektedir. Bu yüklerden p_h ; k_s zeminin yatak katsayısı, δ_h kaplama çapı düzeyindeki yatay yerdeğiştirmeyi göstermek üzere:

$$p_h = k_s \cdot \delta_h \quad (2.129)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. p_1 düşey zemin basıncını, p_2 taban basıncını, p_3 kemer tepe düzeyindeki yatay basıncı, p_4 tabanda p_3 'e eklenen yatay zemin basıncını, p_5 tünel kaplamasının kendi ağırlığını, p_6 $45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$ olmak üzere $p_6 = p_h (1 - 2 \cos^2 \beta)$ fonksiyonuyla değişen zemin basıncını göstermektedir (Lee ve diğ.,2001).



Şekil 2.32. Birleşik elemanlı dairesel bir tünel kaplaması ve buna etkiyen yükler

Bu kesitin tepesi ve tabanında yatay yerdeğiştirme ve dönme olmadığı kabulüyle δ_{ij} birim yerdeğiştirme sabitlerini göstermek üzere ikinci dereceden hiperstatik sistemin süreklilik denklemleri:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{10} = 0 \quad (2.130)$$

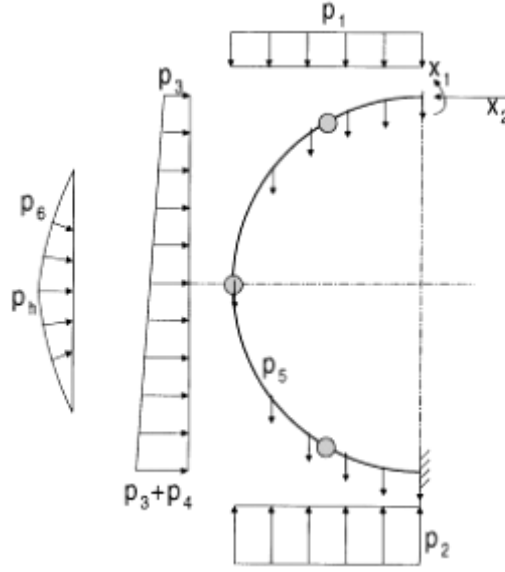
$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{20} = 0 \quad (2.131)$$

olarak yazılabilmektedir. Burada hiperstatik bilinmeyenler:

$$X_1 = \frac{\delta_{12}\delta_{20} - \delta_{22}\delta_{10}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}} \quad (2.132)$$

$$X_2 = \frac{\delta_{21}\delta_{10} - \delta_{11}\delta_{20}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}} \quad (2.133)$$

olarak elde edilmektedir.



Şekil 2.33. İzostatik esas sistem

$X_1=1$ ve $X_2=1$ yüklemeleri için kesit etkileri, moment(M), normal kuvvet(N), kesme kuvveti(V):

$$M_1 = 1 \quad N_1 = 0 \quad V_1 = 0 \quad (2.134)$$

$$M_2 = R(1 - \cos \beta) \quad N_2 = \cos \beta \quad V_2 = -\sin \beta \quad (2.135)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Buna göre i kaplamadaki i 'inci bileşeni ve n düşey çapa göre kaplamanın yarısındaki birleşim sayısını göstermek üzere, küçük olan normal kuvvet ve kesme kuvveti ihmal edilerek, birim yerdeğiştirme sabitleri:

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} M_1^{(i)} = \frac{R\pi}{EI} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \quad (2.136)$$

$$\delta_{12} = \int \frac{M_1 M_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} M_2^{(i)} = \frac{R^2 \pi}{EI} + R \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) \quad (2.137)$$

$$\delta_{22} = \int \frac{M_2^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_2^{(i)} M_2^{(i)} = \frac{3R^3\pi}{2EI} + R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \quad (2.138)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. $X=0$ yüklemesi için altı farklı yükleme altındaki kesit etkileri Çizelge 2.16'da verilmektedir. Bu çizelgedeki kesit etkilerinin birleştirilmesiyle toplam kesit etkileri:

$$M_0 = \sum_{j=1}^6 M_0^j, \quad N_0 = \sum_{j=1}^6 N_0^j, \quad V_0 = \sum_{j=1}^6 V_0^j \quad (2.139)$$

ifadeleriyle birim yerdeğiştirme sahipleri ise:

$$\begin{aligned} \delta_{10} &= \int \frac{M_1 M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} M_0^{(i)} \\ &\rightarrow \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_1 M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} \bar{M}_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \delta_{10}^j \end{aligned} \quad (2.140)$$

$$\begin{aligned} \delta_{20} &= \int \frac{M_2 M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_2^{(i)} M_0^{(i)} \\ &\rightarrow \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_2 M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_2^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \delta_{20}^j \end{aligned} \quad (2.141)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Çizelge 2.16. Dış yüklemelerden dolayı oluşan kesit etkilerinin dağılımları

Yüklemeler	Kesit Etkilerinin Dağılımları
1 yüklemesi (p_1)	$M_0^1 = -\frac{1}{2} p_1 R^2 \sin^2 \beta$ $N_0^1 = p_1 R \sin^2 \beta$ $V_0^1 = p_1 R \sin \beta \cos \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
2 yüklenmesi (p_2)	$M_0^2 = -\frac{1}{2} (p_2 - p_1) R^2 (1 - \sin \beta)^2$ $N_0^2 = -(p_2 - p_1) R (1 - \sin \beta) \sin \beta$ $V_0^2 = -(p_2 - p_1) R (1 - \sin \beta) \cos \beta$ $\left(\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \pi \right)$
3 yüklemesi (p_3)	$M_0^3 = -\frac{1}{2} p_3 R^2 (1 - \cos \beta)^2$ $N_0^3 = -p_3 R (1 - \cos \beta) \cos \beta$ $V_0^3 = p_3 R (1 - \cos \beta) \sin \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
4 yüklemesi (p_4)	$M_0^4 = -\frac{1}{12} p_4 R^2 (1 - \cos \beta)^3$ $N_0^4 = -\frac{1}{4} p_4 R (1 - \cos \beta)^2 \cos \beta$ $V_0^4 = \frac{1}{4} p_4 R (1 - \cos \beta)^2 \sin \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
5 yüklemesi (p_5)	$M_0^5 = -p_5 R^2 (\cos \beta + \beta \sin \beta - 1)$ $N_0^5 = p_5 R \beta \sin \beta$ $V_0^5 = p_5 R \beta \cos \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
6 yüklemesi (p_6)	$M_0^6 = -\frac{p_h R^2}{3} \left[\cos 2\beta - 2 \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $N_0^6 = \frac{p_h R}{3} \left[\cos 2\beta - 2 \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $V_0^6 = -\frac{2p_h R}{3} \left[\sin 2\beta - 2 \sin \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $M_0^6 = \frac{2\sqrt{2}p_h R^2}{3} \cos \beta$ $N_0^6 = -\frac{2\sqrt{2}p_h R}{3} \cos \beta$ $V_0^6 = \frac{2\sqrt{2}p_h R}{3} \sin \beta$ $\left(\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{3\pi}{4} \right)$ $\left(\frac{3\pi}{4} \leq \beta \leq \pi \right)$

n_1 ($0 \leq \beta \leq 45^\circ$) bölgesindeki, n_2 ($45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$) bölgesindeki, n_3 ($90^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$) bölgesindeki ve n_4 ($135^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$) bölgesindeki birleşim sayılarını göstermek üzere $X=0$ yüklemesi için altı farklı yükleme altında (bkz. Çizelge 2.16) δ_{i0} ($i=1,2$):

$$\delta_{10}^1 = -\frac{\pi p_1 R^3}{4EI} - \frac{1}{2} p_1 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin^2 \beta_i \quad (2.142)$$

$$\delta_{10}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^3}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^2}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (2.143)$$

$$\delta_{10}^3 = -\frac{3\pi p_3 R^3}{4EI} - \frac{p_3 R^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \quad (2.144)$$

$$\delta_{10}^4 = -\frac{5\pi p_4 R^3}{24EI} - \frac{p_4 R^2}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \quad (2.145)$$

$$\delta_{10}^5 = -p_5 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \quad (2.146)$$

$$\begin{aligned} \delta_{10}^6 = & -\frac{p_h R^3}{EI} - \frac{p_h R^2}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ & + \frac{2\sqrt{2} p_h R^2}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \end{aligned} \quad (2.147)$$

ve,

$$\delta_{20}^1 = -\frac{\pi p_1 R^4}{4EI} - \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) \sin^2 \beta_i \quad (2.148)$$

$$\delta_{20}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^4}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{5}{3} \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (2.149)$$

$$\delta_{20}^3 = -\frac{5\pi p_3 R^4}{4EI} - \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \quad (2.150)$$

$$\delta_{20}^4 = -\frac{35\pi p_4 R^4}{96EI} - \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^4 \quad (2.151)$$

$$\delta_{20}^5 = \frac{\pi p_5 R^4}{4EI} - p_5 R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \quad (2.152)$$

$$\begin{aligned} \delta_{20}^6 = & -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(3 + \frac{\pi\sqrt{2}}{2} \right) - \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] (1 - \cos \beta_i) \\ & + \frac{2\sqrt{2} p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \cos \beta_i) \end{aligned} \quad (2.153)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buna göre (2.132) ve (2.133) bağıntılarından belirlenen hiperstatik bilinmeyenler kullanılarak kesit etkilerinin dağılımları:

$$M = M_1 X_1 + M_2 X_2 + M_0 \quad (2.154)$$

$$N = N_1 X_1 + N_2 X_2 + N_0 \quad (2.155)$$

$$V = V_1 X_1 + V_2 X_2 + V_0 \quad (2.156)$$

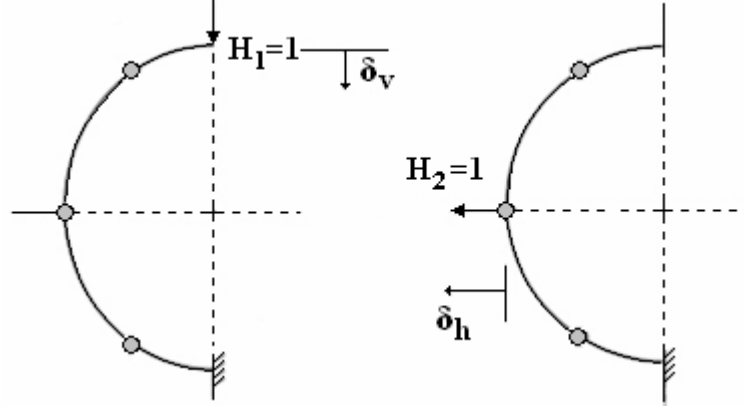
bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Kaplamanın tepe noktasındaki düşey yerdeğiştirme (δ_v) ve yan duvarlardaki yatay yerdeğiştirmenin (δ_h) belirlenmesi için sisteme $H_1=1$ ve $H_2=1$ birim yüklemeleri yapılmaktadır (Şekil 2.34). Bu yüklemelerden oluşan eğilme momentleri M_{H1} ve M_{H2} :

$$M_{H1} = -R \sin \beta \quad (0 \leq \beta \leq \pi) \quad (2.157)$$

$$M_{H2} = -R \cos \beta \quad \left(\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \pi \right) \quad (2.158)$$

ifadeleriyle belirlenebilmektedir.



Şekil 2.34. Kaplamanın yan duvarında ve tepe noktasındaki yerdeğişirmelerin hesabı için birim yüklemeler

$$\begin{aligned} \delta_{v1} &= \int \frac{M_{H1} M_1 X_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_1^{(i)} X_1 \rightarrow \\ &= -\frac{2R^2 X_1}{EI} - R X_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin \beta_i \end{aligned} \quad (2.159)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v2} &= \int \frac{M_{H1} M_2 X_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_2^{(i)} X_2 \rightarrow \\ &= -\frac{2R^3 X_2}{EI} - R^2 X_2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin \beta_i (1 - \cos \beta_i) \end{aligned} \quad (2.160)$$

δ_{v3} ise altı yükleme durumu için ($\delta_{v3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{v3}^j$):

$$\delta_{v3}^1 = \frac{2p_1 R^4}{3EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin^3 \beta_i \quad (2.161)$$

$$\delta_{V_3}^2 = \frac{(p_2 - p_1)R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{(p_2 - p_1)R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin \beta_i (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (2.162)$$

$$\delta_{V_3}^3 = \frac{4p_3R^4}{3EI} + \frac{p_3R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \sin \beta_i \quad (2.163)$$

$$\delta_{V_3}^4 = \frac{p_4R^4}{3EI} + \frac{p_4R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \sin \beta_i \quad (2.164)$$

$$\delta_{V_3}^5 = \frac{p_5R^4}{EI} \left(\frac{\pi^2}{4} - 2 \right) + p_5R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \sin \beta_i \quad (2.165)$$

$$\begin{aligned} \delta_{V_3}^6 = & \frac{\sqrt{2}p_hR^4}{3EI} \left(\frac{1}{3} + \frac{\pi}{4} \right) + \frac{p_hR^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \sin \beta_i \\ & - \frac{2\sqrt{2}p_hR_3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \sin \beta_i \end{aligned} \quad (2.166)$$

olmak üzere;

$$\begin{aligned} \delta_{V_3} &= \int \frac{M_{H1}M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_0^{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_{H1}M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \left(\delta_{V_3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{V_3}^j \right) \end{aligned} \quad (2.167)$$

şeklinde ifade edilirse, kaplamanın tepe noktasındaki düşey yerdeğiştirme;

$$\delta_v = \int \frac{M_{H1}M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M^{(i)} = \delta_{v_1} + \delta_{v_2} + \delta_{v_3} \quad (2.168)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Benzer olarak;

$$\delta_{h1} = \int \frac{M_{H2} M_1 X_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_1^{(i)} X_1 = \frac{R^2 X_1}{EI} - R X_1 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \quad (2.169)$$

$$\delta_{h2} = \int \frac{M_{H2} M_2 X_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_2^{(i)} X_2 = \frac{R^3 X_2}{EI} \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) - R^2 X_2 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) \cos \beta_i \quad (2.170)$$

δ_{h3} altı yükleme durumu için ($\delta_{h3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{h3}^j$):

$$\delta_{h3}^1 = -\frac{p_1 R^4}{6EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin^2 \beta_i \cos \beta_i \quad (2.171)$$

$$\delta_{h3}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^4}{6EI} + \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \sin \beta_i)^2$$

(2.172)

$$\delta_{h3}^3 = -\frac{p_3 R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \cos \beta_i)^2 \quad (2.173)$$

$$\delta_{h3}^4 = -\frac{p_4 R^4}{4EI} \left(1 + \frac{5\pi}{16}\right) + \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \cos \beta_i)^3 \quad (2.174)$$

$$\delta_{h3}^5 = -\frac{p_5 R^4}{6EI} \left(\frac{\pi}{8} - 1\right) + p_5 R^3 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \quad (2.175)$$

$$\delta_{h3}^6 = -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(\frac{\sqrt{2}}{6} + \frac{3\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{3}\right) + \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4}\right) \right] - \frac{2\sqrt{2} p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos^2 \beta_i \quad (2.176)$$

olmak üzere:

$$\begin{aligned}\delta_{h3} &= \int \frac{M_{H2}M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_0^{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_{H2}M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \left(\delta_{h3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{h3}^j \right)\end{aligned}\quad (2.177)$$

şeklinde ifade edilirse, yan duvardaki yatay yerdeğiştirme:

$$\delta_h = \int \frac{M_{H2}M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M^{(i)} = \delta_{h1} + \delta_{h2} + \delta_{h3}\quad (2.178)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

2.2.3. Sayısal Yöntemler Hakkında Hatırlatmalar

2.2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

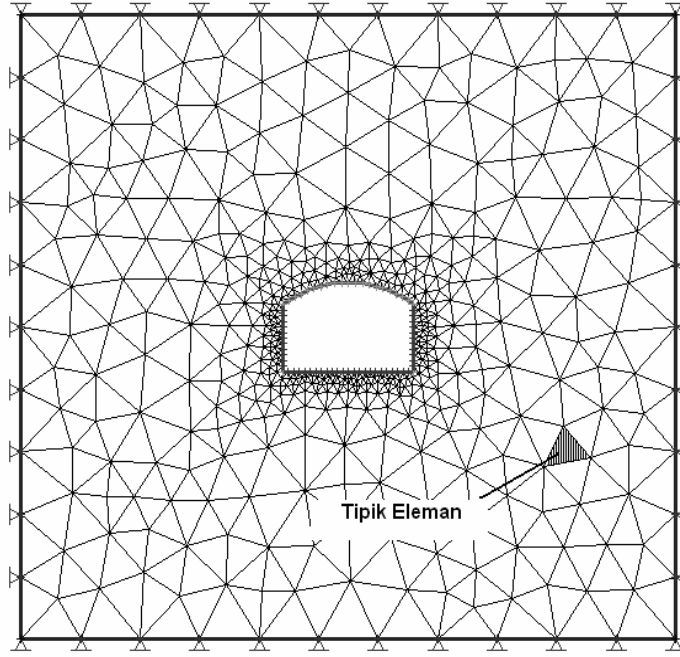
Sonlu elemanlar yönteminin bilgisayarların gelişmesine paralel olarak diğer mühendislik problemlerinde olduğu gibi tünellerin yapısal çözümünde de kullanımı artmaktadır.

Bu yöntemde bilindiği gibi ortam sonlu elemanlara bölünmekte ve bu elemanların birbirine sadece düğüm noktalarından bağlandığı kabul edilmektedir (Şekil 2.35.). Elemanların her biri geometrik olarak tanımlıdır yani sonludur. Eleman içindeki herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme belirlenen fonksiyonlar yardımıyla elemanın düğüm noktasındaki değerler kullanılarak hesaplanmaktadır.

Zemin bu yöntemde genellikle sürekli ortam olarak modellenmekte, süreksizlikler ise ayrıca eklenmektedir. Zeminin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi uygun yapısal denklemlerle tanımlanmaktadır. Belirlenecek gerilme, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmeler tünel kazısıyla meydana gelmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin üstün tarafı karmaşık yeraltı koşullarını ve tünel problemlerini çözümlenebilmesidir. Bu yöntemle karmaşık yapısal özellikler, heterojen

zemin yapısı modellenmektedir. Özellikle tünel mühendisliğinde ilerleme hızı ve zamana bağlı özeliklerin etkisi, çeşitli inşa aşamaları, değişken ve sürekli zemin yapısı, zeminin elasto-plastik özelikleri, zemin-kaplama ilişkileri gibi durumlar hesaba katılabilmektedir. Buna karşılık zayıf tarafı ise karmaşık matematiksel işlemlerin bilgisayarda büyük işlemci, bellek kapasiteleri gerektirmesi ve diğer yöntemlerden daha fazla bilgisayar ve program bilgisi gerektirmesidir.



şekil 2.35. Tüneller için tipik bir sonlu elemanlar ağı

Yeraltının modellenmesinde sonlu elemanlar açının seçilmesi, çözümlenin doğruluğunu ve yakınsaklığını sağlamak için önemlidir. zmn yakınsaklığını en iyi sağlayacak sonlu eleman tipi ve boyutlarının seçilmesi gerekmektedir.

Yeraltının bilinmeyen parametreleri, yeraltı ve tünel davranışının karmaşıklığı ve zeminin yapısal denklemlerinin belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle gerçek koşulları modellemek zor olmaktadır. Bütün bu zorluklar ve maliyetler nedeniyle basitleştirilmiş bir hesap modelinin tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla üç boyutlu durumların iki boyutta modellenmesi, Simetrinin kullanılması, zeminin ve tünel inşa aşamalarının basitleştirilerek modellenmesi gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır (Ergin,1992; akan,2000; Zienkiewicz,1971).

2.2.3.2. Sonlu Farklar Yöntemi

Bu yöntemde de sonlu elemanlarda olduğu gibi sistem elemanlara ayrılmaktadır. Aralarındaki en önemli fark yöntemlerin çözüm yaklaşımlarıdır. Sonlu elemanlar yönteminde benimsenen kapalı yaklaşım yerine sonlu farklarda açık yaklaşım kullanılır. Yöntem, bilinmeyen parametrelerin çözülmesi yerine eleman ağında belli bir düğüm noktasındaki bir etkinin sadece komşu elemanları etkileyeceği esasına dayanmaktadır. Yöntemde rijitlik matrisinin kurulmasına gerek kalmamakta, dolayısıyla kullanılan bilgisayar kapasitesi sonlu elemanlar sistemine göre azalmaktadır. Dinamik hesaplar için uygun olmasına karşılık bu yöntem statik problemlerin çözülmesi durumunda diğerlerinden daha fazla zaman alabilmektedir (Ergin,1992).

2.2.3.3. Sınır Elemanlar Yöntemi

Bu yöntemde, sonlu elemanlar ve sınır elemanlarda olduğu gibi ortam sürekli olarak modellenmektedir. Diğerlerinden farkı ise bu yöntemlerin aksine problemin kısmi diferansiyel denklemlerin iterasyonu yoluyla çözülmesi olduğu bilinmektedir.

Bu yöntemde denklem sistemi daha küçük olmakta, dolayısıyla bellek ihtiyacı azalmaktadır. Ancak sınır eleman programları doğrusal zemin davranışıyla sınırlı kalmakta, karmaşık inşa aşamalarının ve zamana bağlı davranışların modellenmesi zor olmaktadır (Ergin,1992).

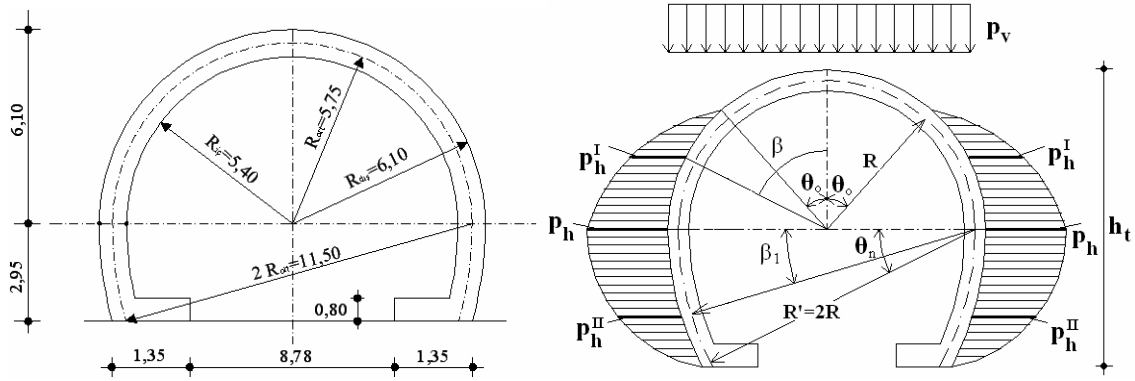
2.2.3.4. Karma Yöntemler

Birkaç yöntemin bir arada kullanıldığı yöntemdir. Amaç yöntemlerden bir kombinasyon seçerek bunların birbirine göre eksikliklerini tamamlamak ve böylece en iyi modele dolayısıyla yönteme ulaşılmaktır (Ergin,1992).

2.3. Sayısal Uygulama I

2.3.1. Analitik Yöntemle Tünel Kaplamasının Yapısal Çözülmesi

Aşağıda özellikleri verilen nal kesitli tünelin, kesiti elemanlara ayırmadan, analitik yöntemle çözümü yapılacaktır.



Şekil 2.36. Kullanılan tünel kesiti ve yüklemeler.

Tünelin kaplama kalınlığı 0,70m, $\theta_0=45^\circ$, $\theta_n=14,864^\circ$, kaplamada kullanılan beton C30 ($E=32000$ MPa), kesitin atalet momenti $I=0,02858$ m⁴, zeminin yatak katsayısı $k_s=460000$ kN/m³ olarak alınmıştır. Tünel üzerine etkiyen düşey basınç 631 kN/m² olarak alınmıştır.

Bu verilerle öncelikle sistemin elastik merkezi bulunacaktır. Bunun için (2.91) bağıntısı kullanılarak;

$$y_g = \frac{R^2 \left(\frac{\pi}{2} + 3 + 2\theta_n - 4 \cdot \cos \theta_n \right)}{R \cdot \frac{\pi}{2} + 2R \cdot \theta_n} \rightarrow \frac{5,75^2 \left(\frac{\pi}{2} + 3 + 2 \cdot 0,2594 - 4 \cdot \cos(0,2594) \right)}{5,75 \cdot \frac{\pi}{2} + 2 \cdot 5,75 \cdot 0,2594}$$

$$= 3,366\text{m}$$

olarak hesaplanmaktadır.

2.3.1.1. Düşey Yüke Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi

Düşey yükten dolayı moment dağılımının belirlenmesi için süreklilik denklemlerindeki birim yerdeğiştirme sabitleri bulunacaktır. δ_{10} (2.102) bağıntısından, δ_{20} (2.103) bağıntısından, δ_{11} (2.104) bağıntısından ve δ_{22} (2.105) bağıntısından hesaplanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

$$\delta_{10} = \frac{-76836,6361}{EI} \quad \delta_{20} = \frac{-111290,9317}{EI}$$

$$\delta_{11} = \frac{12,0155}{EI} \quad \delta_{22} = \frac{89,7924}{EI}$$

Buradan düşey yüklemde hiperstatik bilinmeyenler:

$$X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \rightarrow X_1^V = -\frac{-76836,6361}{12,0155} = 6394,8064$$

$$X_2 = -\frac{\delta_{20}}{\delta_{22}} \rightarrow X_2^V = -\frac{-111290,9317}{89,7924} = 1239,4249$$

olarak belirlenmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi kaplamanın dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı (2.106) bağıntısıyla belirlenmekteydi. Bu bağıntıda M_0^{VI} (2.98) bağıntısından, M_2^I (2.100) bağıntısından yerine yazılırsa:

$$M_V^I = \left(-p_v \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \right) + X_1^V + X_2^V (R - y_g - R \cdot \cos \beta)$$

şeklinde, veriler yerine konursa kaplamanın dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı:

$$M_V^I = \left(-10431,2188 \cdot \sin^2 \beta \right) + 6394,8064 + 1239,4249 (2,384 - 5,75 \cdot \cos \beta)$$

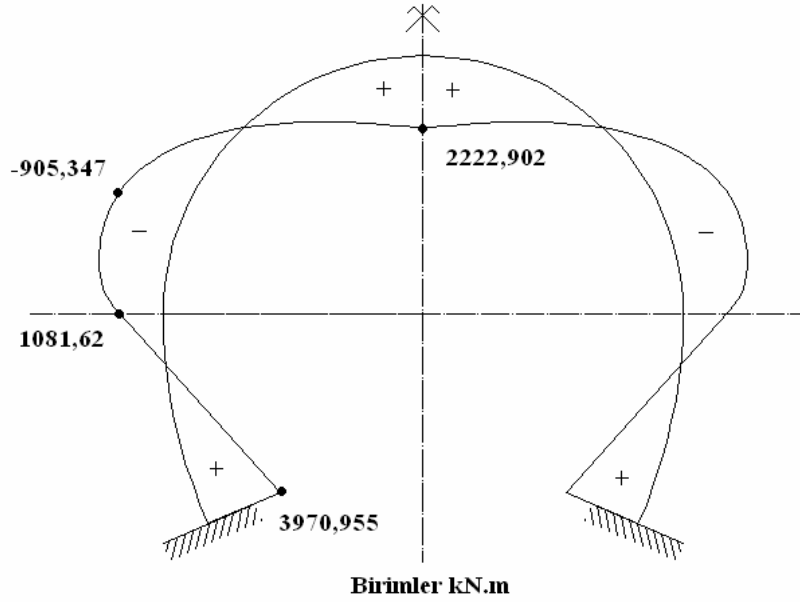
olarak belirlenmektedir. Aynı işlemleri daire yayı şeklindeki duvarlara uygulanırsa M_0^{VII} (2.99) bağıntısından, M_2^{II} (2.101) bağıntısından alınarak (2.107) bağıntısında yerine konursa moment dağılım ifadesi:

$$M_V^{II} = \left[-p_v \frac{R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \right] + X_1^y + X_2^y (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1)$$

şeklinde veriler yerine konursa kaplamanın daire yayı şeklindeki duvarlardaki moment dağılımı:

$$M_V^{II} = \left[-10431,2188 + 41724,875(1 - \cos \beta_1) \right] + 6394,8064 + 1239,4249(2,384 - 11,50 \cdot \sin \beta_1)$$

olarak belirlenmektedir. Belirlenen dağılımlarından faydalanılarak çizilen düşey yüklemenden oluşan moment diyagramı aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Şekil 2.37. Düşey yüklemenden dolayı oluşan moment dağılımı

2.3.1.2. Birim Yatay Yüke ($p_h=1$) Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi

Yatay yükten dolayı moment dağılımının belirlenmesi için süreklilik denklemlerindeki birim yerdeğiştirme sabitlerinden δ_{10}^h (2.115) bağıntısından, δ_{20}^h (2.116) bağıntısından

$$\delta_{10}^h = -\frac{34,7108}{EI} \quad \delta_{20}^h = -\frac{129,6545}{EI}$$

olarak, hiperstatik bilinmeyenler ise:

$$X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \rightarrow X_1^h = -\frac{-34,7108}{12,0155} = 2,8888$$

$$X_2 = -\frac{\delta_{20}}{\delta_{22}} \rightarrow X_2^h = -\frac{-129,6545}{89,7924} = 1,4439$$

olarak hesaplanmaktadır.

2.3.1.3. Yatay Yerdeğiştirmeler ve Yatay Yükün Belirlenmesi

Düşey yükten dolayı oluşan yatay yerdeğiştirmenin (δ_h^v) bulunması için δ_0^v , δ_1 ve δ_2 yerdeğiştirmeleri hesaplanması gerekmektedir.

δ_1 yerdeğiştirmesi (2.117) bağıntısından:

$$\delta_1 = \frac{1}{EI} (4R^2 - 4R^2 \cos \theta_n) \rightarrow \delta_1 = 4,8388 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

δ_2 yerdeğiştirmesi (2.118) bağıntısından:

$$\delta_2 = \frac{1}{EI} (4R^3 - 4R^2 y_g - 4R^3 \cos \theta_n + 4R^2 y_g \cos \theta_n \sin \theta_n + 4R^3 \theta_n)$$

$$\rightarrow \delta_2 = 2,1085 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

δ_0^V yerdeğiştirmesi ise (2.119) bağıntısından:

$$\delta_0^V = \frac{1}{EI} (2p_v R^4 - 6p_v R^4 \cos \theta_n + 4p_v R^4 \cos^2 \theta_n) \rightarrow \delta_0^V = -0,0471 \text{ m}$$

olarak belirlenmektedir. Buradan dűşey yükten dolayı oluřan yatay yerdeğiřtirme

$$\delta_h^V = \delta_0^V + \delta_1 \cdot X_1^V + \delta_2 \cdot X_2^V \rightarrow \delta_h^V = 0,01 \text{ m}$$

şeklinde bulunmaktadır.

Yatay yükten dolayı oluşan yatay yerdeğiştirmenin (δ_h^h) belirlenmesi için δ_0^h yerdeğiştirmesi (2.121) bağıntısından:

$$\delta_0^h = -5,6734 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

olarak hesaplanmaktadır. Buradan yatay yükten dolayı oluşan yatay yerdeğiştirme:

$$\delta_h^h = \delta_0^h + \delta_1 \cdot X_1^h + \delta_2 \cdot X_2^h \rightarrow \delta_h^h = -1,2311 \cdot 10^{-5}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Yatay yerdeğiştirme değerleri kullanılarak yatay yükün değeri (2.123) bağıntısından:

$$p_h = \frac{\delta_h^V}{\frac{1}{k_s} - \delta_h^h} \rightarrow p_h = 690,37 \text{ kN/m}$$

olarak, dűşey ve yatay yükün birlikte etkimesi durumunda X_1 ve X_2 hiperstatik bilinmeyenler ise:

$$X_1 = X_1^V + p_h \cdot X_1^h \rightarrow X_1 = 6394,8064 + 690,37 \cdot 2,8888 \rightarrow X_1 = 8389,1472$$

$$X_2 = X_2^V + p_h \cdot X_2^h \rightarrow X_2 = 1239,4249 + 690,37 \cdot 1,4439 \rightarrow X_2 = 2236,2501$$

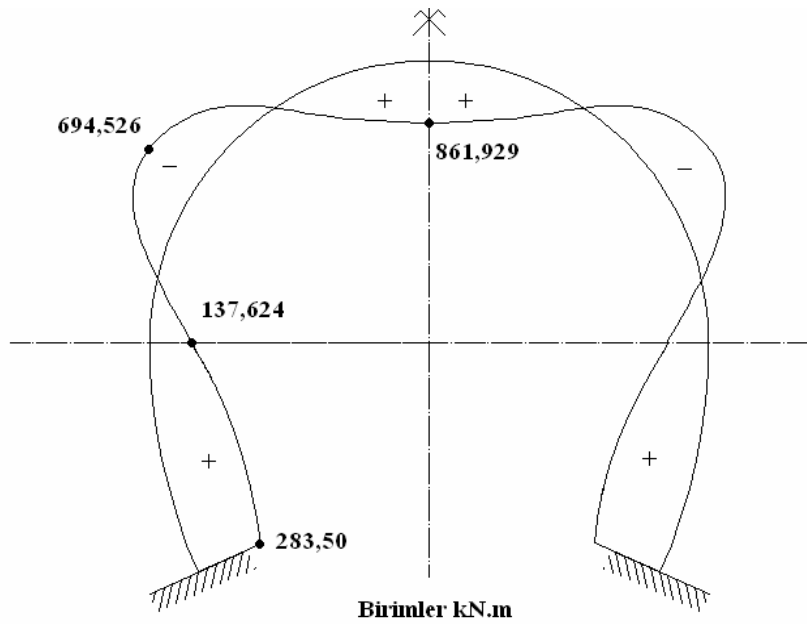
olarak hesaplanmakta bu sayede dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı (2.127) bağıntısından:

$$M^I = \left\{ -10431,2187 \sin^2 \beta + 3804,226 \left[-\cos \left(\beta + \frac{3\pi}{4} \right) + 3 \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) - 2 \cos(2\beta) \right] \right. \\ \left. + 8389,1472 + 2236,2501(2,384 - 5,75 \cos \beta) \right\}$$

ifadesiyle, daire yayı şeklindeki duvarlardaki moment dağılımı ise (2.128) bağıntısından:

$$M^{II} = \left\{ 690,37 \left[\frac{44,08(3 \cdot \cos \beta_1 \cdot \cos^2 \theta_n - \cos \beta_1 - 3 \cdot \cos^2 \theta_n + 2 - \cos^2 \beta_1)}{(-1 + \cos^2 \theta_n)} + 33,06(-0,1381 \right. \right. \\ \left. \left. - 0,9428 \cdot \sin \beta_1 + 0,2762(1 - \cos \beta_1)) \right] \left[-10431,22 + 41724,88(1 - \cos \beta_1) \right] \right\} \\ + 8389,15 + 2236,25(2,384 + 11,5 \sin \beta_1)$$

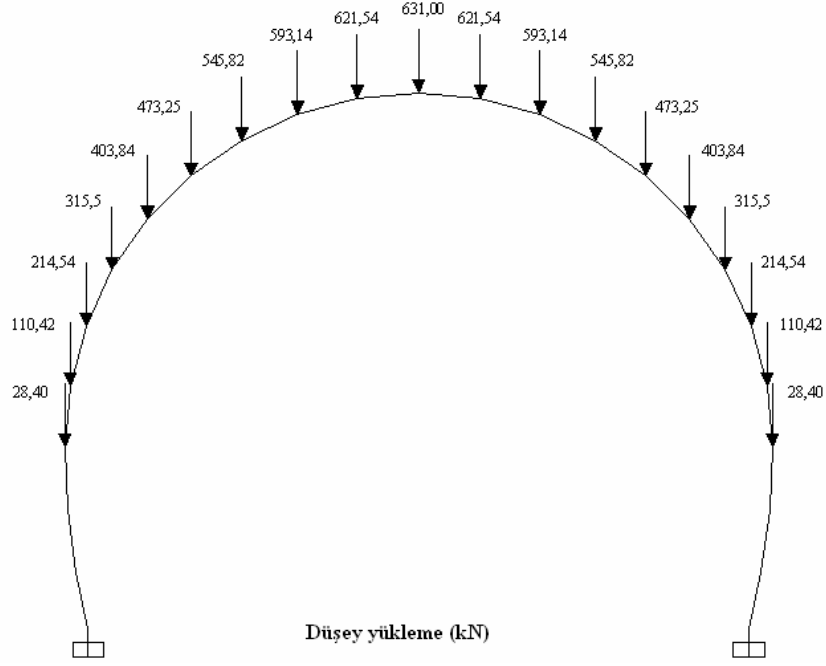
ifadesiyle belirlenmektedir. Belirlenen dağılımlardan faydalanılarak çizilen düşey+yatay yüklemelerden oluşan moment diyagramı aşağıdaki şekilde verilmektedir.



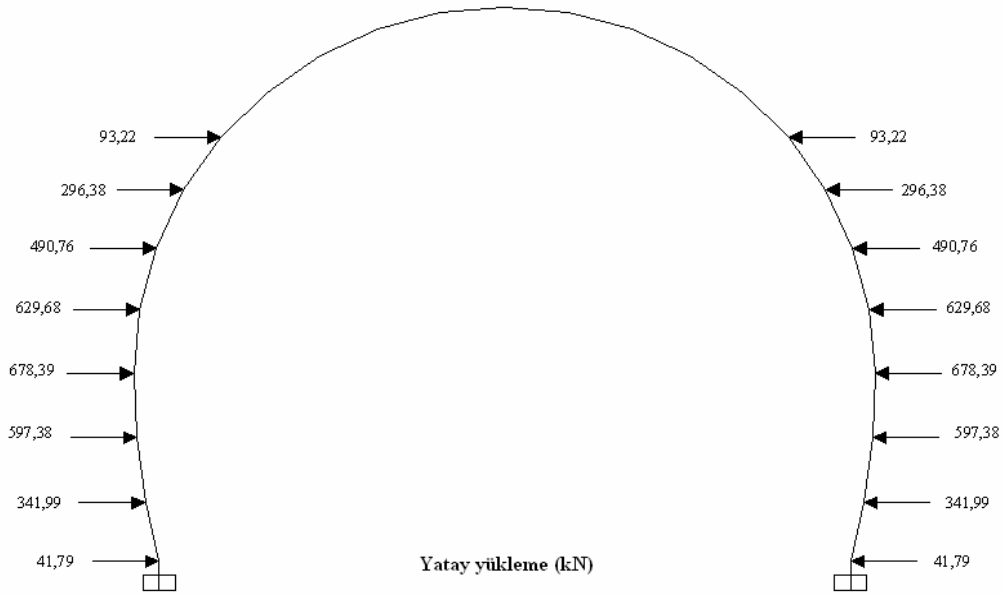
Şekil 2.38. Yatay+düşey yüklemelerden oluşan moment dağılımı

2.3.2. Sayısal Yöntemle Tünel Kaplamasının Yapısal Çözümlemesi

Bu sayısal uygulamaya konu olan tünel kesitinin yapısal çözümlemesi aynı yükler altında bir kez de yapısal çözümleme programıyla (SAP 2000) gerçekleştirilmiştir. Kullanılan model ve yüklemeler aşağıdaki şekillerde verilmektedir.

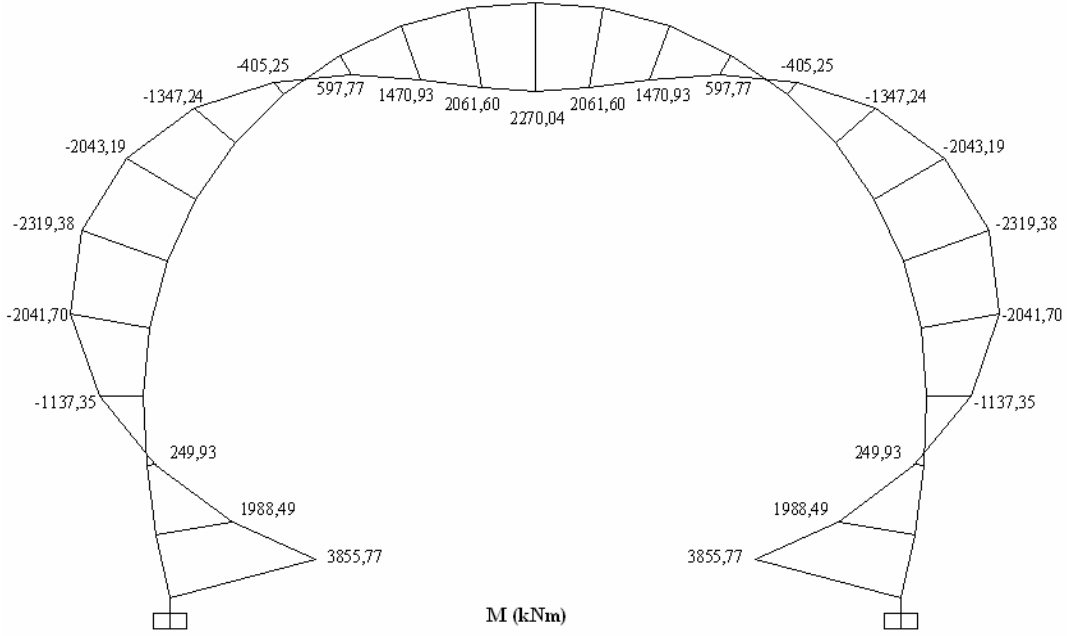


Şekil 2.39 Yapısal çözümleme programında uygulanan düşey yükleme

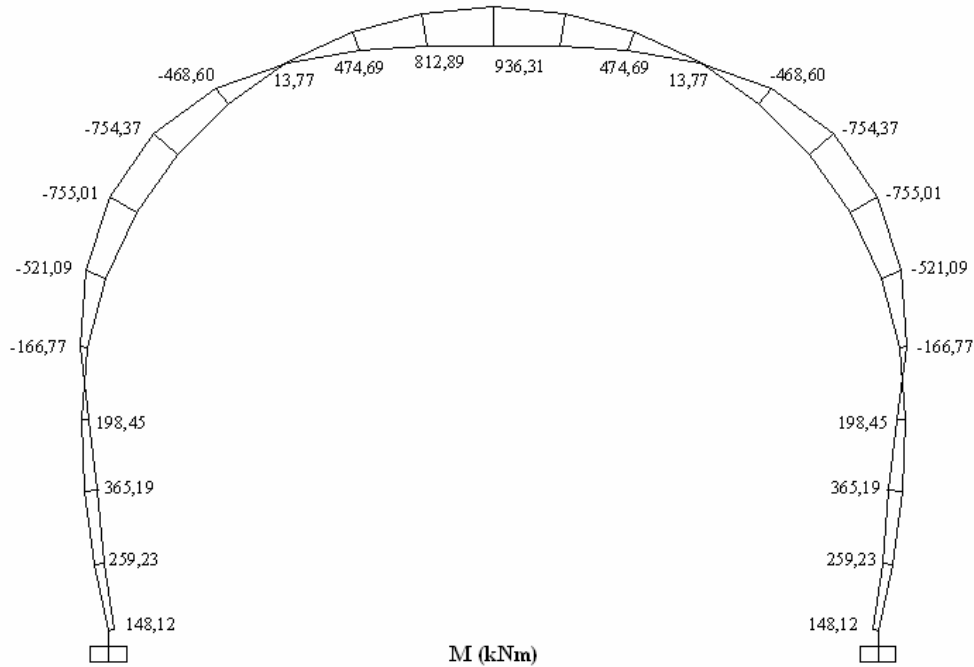


Şekil 2.40. Yapısal çözümleme programında uygulanan yatay yükleme

Bu yüklemelere göre sadece düşey yük altında elde edilen moment dağılımı Şekil 2.41.'de ve her iki yükleme altındaki moment dağılımı Şekil 2.42.'de verilmektedir.



Şekil 2.41 Düşey yüklemeye göre elde edilen moment dağılımı



Şekil 2.42. Düşey+yatay yüklemeye göre elde edilen moment dağılımı

Buradan anlaşılacağı üzere düşey yük dağılımı analitik yöntemle yapılan yapısal çözümleme ile sayısal olarak yapılan çözümleme arasında büyük oranda benzerlik bulunmaktadır. Oysa her iki yükleme altında tepede bir miktar ve mesnetlere doğru artan düzeyde farklılığın olduğu görülmektedir. Analitik yapısal çözümleme ile tepe noktasında elde edilen moment sayısal yapısal çözümleme ile elde edilenin yaklaşık olarak %92'si iken bu oran çap düzeyinde %69 olmaktadır. Mesnette ise analitik çözümleme ile elde edilen moment diğerinin yaklaşık 2 katına kadar çıkmaktadır. Yatay yükler için aradaki bu farkı sayısal yöntemde dikkate alınan tünel kaplama modelinin doğru seçilmemiş olmasına atfedilebilmektedir. Bu kanının doğruluğunun belirlenmesi bu çalışmanın bundan sonraki kısmını oluşturacaktır.

2.4. Sayısal Uygulama II

Bu sayısal uygulamada nal enkesit şekline sahip tünellerin analitik çözümü için kısım 2.2.2.2'de verilen analitik yöntem için hazırlanmış bilgisayar programıyla çeşitli uygulamalar yapılacaktır. Bu analitik yöntem için hazırlanmış bilgisayar programının kodları Ek 4'de verilmektedir. Tünelin kesit özellikleri sayısal uygulama I' deki gibi alınmıştır.

2.4.1. Zeminin Yatak Katsayısına Göre Eğilme Momenti Değişiminin İncelenmesi

Aşağıdaki çizelgede çapları 3-11 m arasında değişen tüneller için çeşitli zeminlerdeki yatak katsayıları verilmektedir (Lee ve diğ.,2001).

Çizelge 2.17. Açıklığı 3-11 m arasında değişen tüneller için çeşitli zeminlerdeki yatak katsayıları

Zemin durumu	Killi ve siltli zemin				Kumlu zemin			
	Kötü	Yumuşak	Orta	İyi	Çok Gevşek	Gevşek	Orta	Sıkı
k_s (10^4 kN/m ³)	0,3-1,5	1,5-3,0	3,0-15,0	>15,0	0,3-1,5	1,5-3,0	3,0-10,0	>10,0

Tünel açılan zeminin yatak katsayısının tünel enkesitindeki moment dağılımına etkisini araştırmak için aşağıdaki durumlarda yapısal çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 2.18. Çözüm yapılan durumlarda yatak katsayılarının değerleri

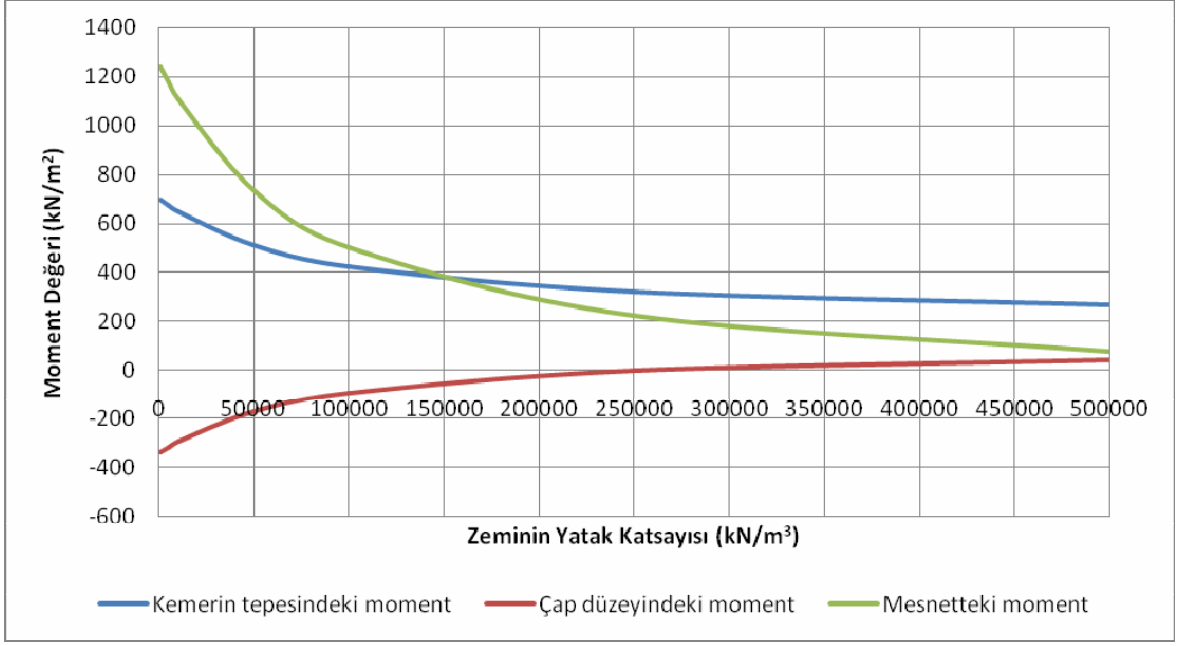
	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6	Durum 7
Düşey zemin basıncı (kN/m ²)	200	200	200	200	200	200	200
k _s (kN/m ³)	1000	5000	10000	50000	100000	200000	500000

Bu yedi durum için yapılan yapısal çözümlerden elde edilen moment değerleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 2.19. Çeşitli yatak katsayılarına ilişkin bazı kesitlerdeki moment değerleri

Zeminler için k _s (kN/m ³)	Kemerin tepesindeki moment (kNm)	Çap düzeyindeki moment (kNm)	Mesnetteki moment (kNm)
1000	698,753	-337,999	1240,759
5000	675,5813	-317,259	1177,958
10000	649,4754	-293,892	1107,205
50000	512,2743	-171,088	735,3603
100000	425,9679	-93,8371	501,4512
250000	323,4131	-2,0432	223,0432
500000	270,1294	45,6495	79,0949

Bu çizelgedeki değerlere göre momentlerin değişimi aşağıdaki eğrilerle ifade edilmektedir.



Şekil 2.43. Kaplamanın çeşitli noktalarındaki momentlerin zeminin yatak katsayısına göre değişimi

Bu yapılan uygulamadan anlaşılacağı üzere yapılan uygulama için zeminin yatak katsayısı arttıkça kesitlerde oluşan momentlerin mutlak değerce azaldığı belirlenmiştir.

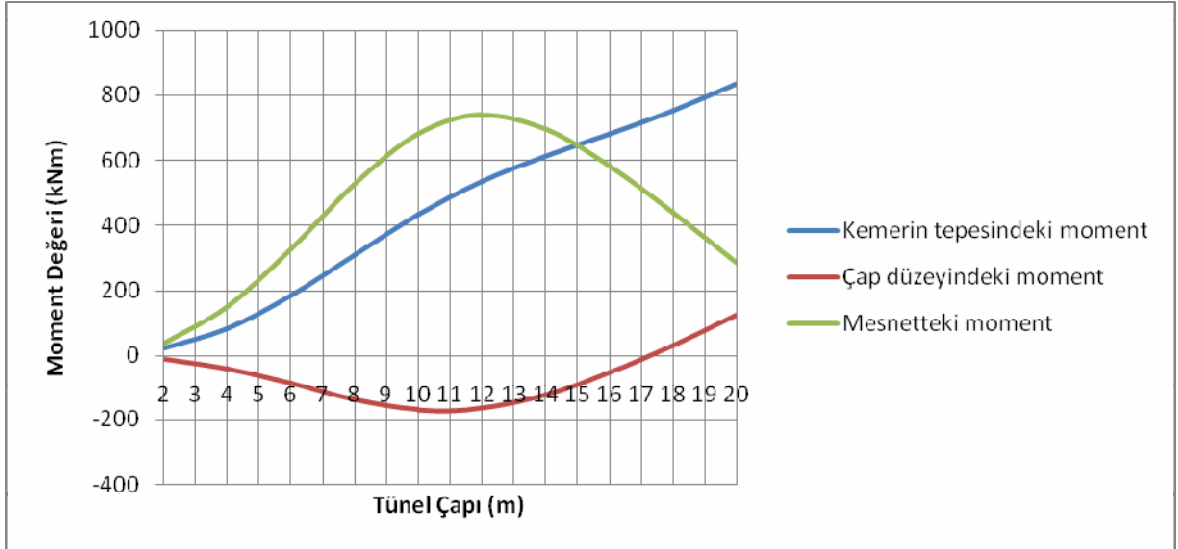
2.4.2. Tünel Çapına Göre Moment Dağılımının Değişiminin İncelenmesi

Bu uygulamada zemin yatak katsayısı 50000 kN/m^3 alınarak tünel çapı 2m'den 20m'ye kadar değiştirilmiştir. Yapısal çözümleme yapılan çap değerleri için belirli kesitlerdeki moment değerleri aşağıdaki çizelgede görülmektedir.

Çizelge 2.20. Çeşitli tünel çaplarına ilişkin bazı kesitlerdeki moment değerleri

Tünel Çapı (m)	Kemerin tepesindeki moment (kNm)	Çap düzeyindeki moment (kNm)	Mesnetteki moment (kNm)
2	21,312	-10,382	38,008
4	84,735	-41,069	150,647
6	185,878	-88,131	326,012
8	310,294	-138,637	524,951
10	433,483	-170,637	681,061
12	535,291	-166,152	739,723
14	614,045	-123,624	696,401
16	681,98	-54,026	584,256
18	752,454	30,687	439,491
20	833,912	122,957	284,991

Bu çizelgedeki değerlere göre momentlerin tünel çapına göre değişimi aşağıdaki eğrilerle ifade edilmektedir



Şekil 2.44. Tünel çapına göre çeşitli kesitlerdeki eğilme momentlerinin değişimi

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı tüneller konusunda bir sentez çalışmasının ardından bunların tasarımlarında sıkça kullanılan, teknik literatürde mevcut, tanınmış bazı analitik yöntemleri aynı simgeler kullanıp homojen hale getirerek sistematik olarak açıkladıktan sonra bunlardan biri için bir bilgisayar programı geliştirmek ve bununla sayısal uygulamalar yapmaktır.

Bu amaçla çalışmanın birinci bölümünde bir girişten sonra tünellerin tarihçe ve sınıflandırılması konusunda birtakım bilgiler verilmiş ve inşaları için gerekli incelemeler, güzergâh ve boykesit seçiminde dikkat edilecek hususlar üzerinde durulmuştur. Bu bilgiler ışığında tünel tasarımının zeminle özel etkileşimleri nedeniyle diğer yapılara göre daha fazla disiplin mensubu teknik elemanın birlikte çalışması gerektiği ve tünel tasarımının sürekli değişen bir tasarım sisteminden oluştuğu, bunun için de tasarım, yapım ve kullanım aşamalarında gözlem ve ölçümlerin kaçınılmaz olduğu belirtilmiş ve güzergah zeminine göre birçok inşa yöntemi tanıtılmıştır.

İkinci bölümde tünel kaplamaları, bunların yapısal çözümlemesinde kullanılan tanınmış bazı ampirik ve analitik yöntemler, yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, aynı simgeler altında kullanımlarını kolaylaştıracak şekilde açıklanmış, sonlu elemanlar yöntemi hakkında bazı hatırlatmalar ile yöntemlerden birine ilişkin geliştirilen bilgisayar programıyla gerçekleştirilen sayısal uygulama da burada verilmiştir.

Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- 1) Tünel kaplamalarının yapımında diğer tekniklere göre püskürtme beton daha çok tercih edilmektedir.
- 2) Püskürtme beton kaplamalarda hasır donatı yerine çelik liflerin kullanılması gittikçe artmaktadır. Bu uygulamanın doğruluğunun daha geniş kapsamlı çalışmalarla teyit edilmesi gerekmektedir.
- 3) Tünel kaplamasına etkiyen zemin yüklerinin belirlenmesinde kullanılan bu çalışmaya konu olan teoriler aynı simgeler kullanılarak açıklanmış ve mümkün oldukça kullanım koşulları belirtilmiştir.
- 4) Tünel yüklerinin belirlenmesinde kullanılan analitik ve ampirik yöntemlerle aynı tünel için hesaplanan yükler birbirinden ihmal edilemeyecek kadar farklı olmaktadır.

Bu bakımdan tünel tasarımından zemin türü, tünel sınıfı ve kesit şekline göre mevcut analitik ve sayısal yöntemler arasından seçilen uygun yöntemin kullanılması için azami özenin gösterilmesi gerekmektedir. Sayısal yöntemlerle uygun modelin seçimi bu çalışmanın bundan sonraki kısmının devamını sağlayacaktır.

- 5) Çalışmada bir bilgisayar programı geliştirilmiş ve bunun doğruluğu sayısal uygulamalarla gösterilmiştir.
- 6) Analitik bir yöntemle belirlenen yükler yapısal çözümleme programında hazırlanan modele yüklenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre düşey yüklemeye oluşan eğilme momentlerinin iki çözümde benzer olduğu, ancak yatay+düşey yüklemeye oluşanların bazı bölgelerde farklılık gösterdiği görülmüştür.
- 7) Zeminin yatak katsayısı arttırılarak yapılan uygulamalarda artan yatak katsayısıyla kesitlerde meydana gelen eğilme momentlerinin mutlak değerce azaldığı belirlenmiştir.
- 8) Bu çalışmada tünel çapı arttıkça anahtar kesitindeki eğilme momentinin arttığı, tünel kemer çapının kestiği kesitler ile mesnet kesitlerinde ise eğilme momentlerindeki değişimin aynı kurala uymadığı gösterilmiştir.

Özetle bu çalışmada tüneller konusunda bir sentez çalışması sunulmuş ve bu sentezin ışığı altında teknik literatürde tanınmış bazı tasarım yöntemleri aynı simgelerle sistematik olarak açıklanmış ve bir bilgisayar programı geliştirilerek doğru çalıştığı sayısal uygulamayla gösterilmiştir. Bu çalışmaya konu olan bazı tanınmış yöntemler tünel yüklerinin belirlenmesinde birbirinden farklı değerler vermektedir. Durum böyle olunca zemin yapısı ve tünel özelliklerine göre mevcut yöntemlerden en uygununun kullanılması gerekmektedir. Bu husus ve tünellerin zeminle etkileşimli olarak deprem davranışlarının incelenmesi çalışmamızın bundan sonraki kısmının devamını sağlayabilecektir.

4. KAYNAKLAR

- ACI 506R-90 Guide to Shotcrete, American Concrete Institute, USA., October 1995, 41 p.
- Akbulut, A., 2006. Tünel Aydınlatması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Arioğlu, E.ve Yılmaz A.O., 2006, Tünel/Galerilerin Sismik Analizi, Maden Mühendisleri Odası Yayını No:111, İstanbul,312 s.
- Bahar, M.A., 1994. Tünellerde Ön Araştırma Zemin İyileştirmesi Ve Stabilitate Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Beaver, P., 1972. A History Of Tunnels, P. Davies, London, 155 p.
- Beykont, A.Z., 1951. Pratik Tünel Açma, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 463 s.
- Bozkurt, A., 1997. Analysis, Design And Construction Criteria Of Submerged Tunnels, Yüksek Lisans. ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bozkurt, M., 1970. Tüneller Ders Notları, İTÜ Talebe Cemiyeti Yayını, No:5, İstanbul, 160 s.
- Çakan, A.G., 2000. Analysis Of Tunnel Advance In Soft Ground Using Finite Element Method, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Denek, H., Özçelik Y. ve Bayram F., 2006. Dalaman- Göcek Karayolu Tünelinde Boru Kemer Yöntemi Uygulamaları Ve Sonuçları, 8. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 127-132
- Dursun, C., 1971. Tünel kaplamalarına gelen yüklerin hesap metodları, Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayın No:192, Ankara, 87 s.
- Ergin, K., 1992. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tünel Kaplaması Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Ertunç, A., 1983. Tünellerde Yapılan Kaya Sınıflamaları, Tünelcilik Semineri, Ankara, Bildiriler Kitabı, 143-163
- Genç, D., 1983. Tünel Açımı Esnasında Karşılaşılan Jeolojik Sorunlar, Tünelcilik Semineri, Ankara, Bildiriler Kitabı, 143-163
- Goodman, R. E., 2003. Kaya mekaniğine giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 586 s.

- Guerrin, A., 1969. Traite de Beton Armé Construction Diverses, Dunode, Paris, 411 p.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1990. Underground Excavation in Rock, Institution Of Mining And Metalurgy, London, 532 p.
- Hudson, J. A. ve Harrison, J. P., 1997. Engineering Rock Mechanics, Elsevier Science Ltd. Oxford, 444 p.
- İzбек, K.K., Tünel Aydınlatma Tekniği, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, 273 s.
- Kaya, H., 1983. Patlayıcı Maddelerin Tanımlanması Ve Tünelde Patlayıcı Maddelerin Optimumda Kullanılması, Tünelcilik Semineri, Ankara, Bildiriler Kitabı, 85-142
- Karakule, F., 2006. Tünelde Beton Yol kaplaması Tercih edilmeli, Dünya inşaat dergisi, Mayıs, 30
- Kırbaş, T., 1995. Tünel Açma İşlemleri, Karşılaşılan Sorunlar Ve Uygulanan Çözüm Yolları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kolybas, D., 2005. Tunnelling and Tunnel Mechanics, Springer, Germany, 437 p.
- Lee, M. K., Hou X. Y., Ge X. W. ve Tang Y., 2001. An Analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining, International Journal For Numerical and Analytical Methods In Geomechanics, 25, 365-390
- Natm, 1995. New Austrian Tunneling Method Summer Course, University of Technology, Vienne, 90 p.
- Natm 1997. NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara,
- Pequignot, C. A., 1963. Tunnels and Tunnelling, Hutchinson Scientific and Technical, London, 555 p.
- Sandström, G. E., 1963. The History of Tunnelling, Barrie and Rockliff, London, 427 p.
- Önalp, A., 1982. İnşaat Mühendisliğinde Geoteknik Bilgisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayını, No: 187, Trabzon, 1225 s.
- Saveur, J. ve Grantz, W., 1997. Structural Design Of Immersed Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 12, 2, 93-109
- Szechy, K., 1970. The Art Of Tunnelling, Akademiai Kiado, Budapest, 891 p.
- Taşlıca, A.H., 1983. Tünel Açma Yöntemleri, Tünelcilik Semineri, Ankara, Bildiriler Kitabı, 266-311
- TS 10513 Çelik Teller - Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Aralık 1992, 13 s.

- TS 10514 Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Aralık 1992, 7 s.
- TS 10515 Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Aralık 1992, 7 s.
- TS 11747 Püskürtme Beton (Shotcrete) Yapım, Uygulama ve Bakım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 1995, 34 s.
- TS EN 14487-1 Sprayed concrete-Definitions, specifications and conformity, European Standardization Committee, Brussels, May 2005, 36 p.
- Ulusay, R. ve Aydan, Ö., 1997. Tünel Açma Makineleriyle Yapılan Kazı İşlemlerinin Olumlu Ve Olumsuz Yönlerinin Değerlendirilmesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 51, 51-61
- URL-1 <http://www.urbanrail.net/eu/kob/metro-tunnel1.jpg>. Metro Tunnelsi 10.02.2007
- URL-2 <http://en.structurae.de/structures/data/indexcfm?ID=S0010963>, Rove Canal Tunnel. 24.04.2007
- URL-3 <http://www.custard.org>, porland mine. 24.07.2007
- URL-4 <http://www.marmaray.com.tr/>, Batırma Tüp Tünel. 20 Ocak 2007
- URL-5 www.nsft.no/the_floating_tunnel.html, Submerged Floating Tunnel. 20 Mart 2007
- URL-6 <http://www.wishful-thinking.org.uk/genuki/DBY/Grindleford/TotleyTunnel.html> Totkey Tüneli. 5 Nisan 2007
- URL-7 <http://echoo.yubitoma.or.jp/weblog/tttabata/ym/20050623> Kitasui Demiryolu Tüneli. 5 Nisan 2007
- URL-8 <http://www.beksa.com.tr/celiktell1.pdf>, Dramix Çelik Tel Donatılı Püskürtme Beton. 4 Ekim 2006
- URL-9 <http://www.beksa.com.tr/KATALOGLAR/TÜNEL.pdf> Tünel kaplamalarında çelik tel donatılı püskürtme beton. 4 Ekim 2006
- Vanderwalle, M., 2005. Tunneling Is An Art, NV Bekaert SA, Belgium, 400 p.
- Yalçın, T. ve Vardar M., 2006. DSİ Zamantı Tünelinde Karşılaşılan Aşırı Su Geliri Ve Çözüm Önerileri, , 8. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 409-414

- Yavuz., E. ve Ersoy, N., 2005. Pipe Jacking Yöntemi İle Açılan Mikro Tünel Projelerinde Jeodezik Çalışmalar, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 133-140
- Wang, W.L., Wang T.T., Su, J.J., Lin C.H., Seng C.R. ve Huang T.H., 2001, Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake, Tunnelling and Underground Space Technology, 16, 133-150.
- West. G. ve O'Reilly, P., 1978. Methods of treating the ground, Tunnels and Tunneling,10,7,25-29
- Zienkeiwicz, O.C., 1971. The finite element method in engineering science, Mcgraw Hill, London 521 p.

5. EKLER

Ek-1 RSR ölçütünün belirlenmesinde kullanılan A, B ve C değişkenlerinin değerleri

Ek Çizelge 1. A Parametresi

Ana Kaya Tipi				
	Sert	Orta	Yumuşak	Ayrışmış
Magmatik	1	2	3	4
Metamorfik	1	2	3	4
Tortul	2	3	4	4
Jeolojik yapı				
	Masif	Az faylı veya kıvrımlı	Orta derecede faylı veya kıvrımlı	Çok faylı veya kıvrımlı
Tip 1	30	22	15	9
Tip 2	27	20	13	8
Tip 3	24	18	12	7
Tip 4	19	15	10	6

Ek Çizelge 2. B Parametresi

	Eksene dik					Eksene paralel		
	Açma yönü							
	Her ikisi	Eğim yönünde		Eğimin tersi yönde		Her ikisi		
	Önemli eklemlerin eğimi					Önemli eklemlerin eğimi		
	0°-20°	20°-50°	Düşey (50°-90°)	20°-50°	Düşey (50°-90°)	0°-20°	20°-50°	Düşey (50°-90°)
Çok sık eklemliler	9	11	13	10	12	9	9	7
Sık eklemliler	13	16	19	15	17	14	14	11
Orta derecede eklemliler	23	24	28	19	22	23	23	19
Orta – Bloklu	30	32	36	25	28	30	28	24
Bloklu-Masif	36	38	40	33	35	36	34	28
Masif	40	43	45	37	40	40	38	34

Ek-1'in devamı

Ek Çizelge 3. C Parametresi

Beklenen su akımı dakikada litre (1000 ⁸)	A ve B Parametreleri toplamı					
	13-44			45-75		
	Eklem durumu			Eklem durumu		
	İyi	Orta	Fena	İyi	Orta	Fena
Hiç yok	22	18	12	25	22	18
Az (<756 dakikada litre)	19	15	9	23	19	14
Orta (756-3780 dakikada litre)	16	11	7	21	16	12
Çok (>3780 dakikada litre)	10	8	6	18	14	10

Ek-2 RMR ölçütünün belirlenmesinde kullanılan değişkenlerinin değerleri

Ek Çizelge 4. Sınıflama parametreleri ve puanları

Parametre		Değer Aralığı							
1	Taze kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yük dayanım indisi	>10	4-10	2-4	1-2	Bu düşük aralık için tek eksenli basınç dayanımı tercih edilir		
		Tek eksenli basınç dayanımı	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
		Puanı	15	12	7	4	2	1	0
2	Karot kalitesi RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
		Puanı	20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik açıklığı		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
		Puanı	20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu		Çok pürüzlü yüzeyler Devamlı değil Kapalı yarıklar Bozmuş duvar kayası	Az pürüzlü yüzeyler Yarıklar genişliği <1 mm Az bozmuş duvar kayası	Az pürüzlü yüzeyler Yarıklar genişliği <1 mm Çok bozmuş duvar kayası	Çizikli yüzeyler veya Dolgu kalınlığı <5 mm veya Yarıklar genişliği 1-5 mm Sürekli	Yumuşak dolgu, kalınlık >5 mm veya Yarıklar genişliği >5 mm Sürekli		
		Puanı	30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	10 m tünel uzunluğu için içeri akış	Yok	<10	10-25	25-125	>125		
		(eklem suyu basıncı) / (majör asal gerilme) oranı	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Genel şartlar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Akma		
		Puanı	15	10	7	4	0		

Ek-2'in devamı

Ek Çizelge 5. Süreksizlik şartlarının sınıflanması için kılavuz bilgiler

Parametre		Puanlama			
Süreksizlik uzunluğu (persistans)	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
	6	4	2	1	0
Yarı genişliği (açıklık)	Yok	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Pürüzlülük	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Çizikli
	6	5	3	1	0
Dolgu malzemesi	Sert dolgu			Yumuşak dolgu	
	Yok	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 m
	6	4	2	2	0
Bozuşma	Bozuşmamış	Az bozuşmuş	Orta bozuşmuş	Çok bozuşmuş	Tamamen bozuşmuş
	6	5	3	1	0

Ek Çizelge 6. Süreksizlik yönelimlerinin tünelcilikteki etkisi

Doğrultu tünel eksenine dik			
Eğim yönünde ilerleme		Eğimin tersi yönde ilerleme	
Eğim 45-90	Eğim 20-45	Eğim 45-90	Eğim 20-45
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil
Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultudan bağımsız	
Eğim 20-45	Eğim 45-90	Eğim 0-20	
Orta	Hiç uygun değil	Orta	

Ek Çizelge 7. Süreksizlik yönelimleri için puanlama düzeltmeleri

Süreksizliklerin Yönetimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puanlamalar	Tünel ve madenler	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

Ek-2'in devamı

Ek Çizelge 8. Toplam puanlamaya göre belirlenen kaya kütlesi sınıfı

Puanlama	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaliteli kaya	Kötü kaya	Çok kötü kaya

Ek Çizelge 9. Kaya kütlesi sınıflarının anlamı

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama kemerleme süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dak.
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya kütlesinin sürtünme açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Ek-3 Q ölçütünün belirlenmesinde değişkenlerin değerleri

Kaya Kalite Katsayısı, RQD	<ul style="list-style-type: none"> a) Çok kötü b) Kötü c) Orta d) İyi e) Mükemmel 	RQD 0-25 25-50 50-75 75-90 90-100	RQD'nin 10 olarak ölçüldüğü veya rapor edildiği durumda (sıfır dahil), Q'yu değerlendirmede 10 nominal değeri kullanılır. 5'lik RQD aralıkları (yani, 100, 95, 90 vb.) yeterince hassastır.
Eklem Takım Katsayısı, J_n	<ul style="list-style-type: none"> a) Masif, sıfır veya birkaç çatlak b) Bir eklem takımı c) Bir eklem takımı artı rastgele d) İki eklem takımı e) İki eklem takımı altı rastgele f) Üç eklem takımı g) Üç eklem takımı altı rastgele h) Dört veya daha fazla eklem takımı, rastgele, ileri derecede çatlaklı 'şeker küpü' vs. i) Topraksı, ezilmiş kaya 	J_n 0,5-1,0 2 3 4 6 9 12 15 20	Arakesitler için (3,0 x J _n) kullanınız. Portallar için (2,0 x J _n) kullanınız.
Eklem Pürüzlülük Katsayısı, J_r	<ul style="list-style-type: none"> (i) Kaya duvarı teması ve (ii) 10 cm makaslamadan önce duvarı teması a) Süreksiz eklem b) Pürüzlü veya düzensiz, dalgalanmalı c) Pürüzsüz, dalgalanmalı d) Çizikli, dalgalanmalı e) Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel f) Pürüzsüz, düzlemsel g) Çizikli, düzlemsel (iii) Makaslandığında kaya duvar teması yok h) Kaya duvarı temasını önlemeye yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon i) Kaya duvarı temasını önleyecek kadar kalın, kumlu, çakıllı veya ezilmiş kaya 	J_r 4 3 2,0 1,5 1,5 1,0 0,5 1,0 1,0	İlgili eklem takımının ortalama açıklığının 3 m'den büyük olduğu durumda 1,0 ekle. Lineasyonlar uygun şekilde yönlendirilmiş olmak koşuluyla lineasyonlu, düzlemsel, çizikli eklem için J _r = 0,5 kullanılabilir. b ve g şıklarındaki açıklamalar küçük ölçekli ve orta ölçekli özelliklere işaret eder.

Ek-3'in devamı

Eklem Ayrışma Katsayısı, J_a		J_a	Φ_r (yaklaşık)	Φ_r değerleri ayrışma ürünlerinin minerolojik özelliklerine yaklaşık bir kılavuz bilgi sağlamak amacıyla verilir.
		<p>(i) Kaya duvarı teması</p> <p>a) Sıkıca kapanmış, sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu; örnek: kuvars veya epidot</p> <p>b) Bozuşmamış eklem duvarları; sadece yüzeyde lekeler</p> <p>c) Hafifçe ayrılmış eklem duvarları. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kumlu partiküller, kil içermeyen kaya vb.</p> <p>d) Siltli veya kumlu kil şeklinde kaplamalar, küçük kil fraksiyonu (yumuşamayan)</p> <p>e) Yumuşayan veya düşük sürtünmeli kil minerali kaplamaları; örnek: kaolinit, mika. Ayrıca, klorit, talk, jips, grafit vb. ile az miktarda şişebilir killer (süreksiz giysiler; kalınlık 1-2 mm'den az).</p> <p>(ii) 10 cm makaslamadan önce kaya duvarı teması</p> <p>f) Kumlu partiküller, kil içermeyen parçalanmış kaya vb.</p> <p>g) Kuvvetlice aşırı konsolide, yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli; kalınlık < 5 mm)</p> <p>h) Aşırı konsolidasyon orta ve düşük derecede, yumuşayan, kil mineral dolguları (sürekli; kalınlık < 5 mm)</p> <p>i) Şişebilen kil dolgular; örnek: montmorillonit (sürekli; kalınlık < 5 mm). J_a değeri, kil boyu partiküllerin yüzdesine, suyun girişine vs. bağlıdır.</p> <p>(iii) Makaslandığında kaya duvarı teması yok</p> <p>j) Parçalanmış kaya ve kil zonları veya bantları (kil şartlarının tanımı için bkz. g, h, i şıkları)</p> <p>k) Siltli kil zonları veya bantları, az kil fraksiyonu (yumuşamayan)</p> <p>l) Kalın, sürekli kil zonları veya bantları (kil şartlarının tanımı için bkz. g, h ve i şıkları)</p>	<p>0,75</p> <p>1,0</p> <p>2,0</p> <p>3,0</p> <p>4,0</p> <p>4,0</p> <p>6,0</p> <p>8,0</p> <p>8,0-12</p> <p>6, 8 veya 8-12</p> <p>5,0</p> <p>10,13 veya 13-20</p>	<p>25°-35°</p> <p>25°- 30°</p> <p>20°-25°</p> <p>8°-16°</p> <p>25°-30°</p> <p>16°-24°</p> <p>12°-16°</p> <p>6°-12°</p> <p>6°-24°</p>

Ek-3'in devamı

Gerilme Azalma Katsayısı, SRF	SRF	İlgili makaslama zonunun kazı yüzeyini sadece etkidiği fakat kesemediği durumda SRF değerlerini %25-50 oranında azaltınız.		
		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	Tacın yüzeyden derinliğin tavan genişliğinden küçük olduğu çok az sayıda kayıt vardır. Böyle durumlarda SRF'de 2,5 ile 5 arasında bir artış öneririz.
i) Tünel kazısında kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek; kazı yüzeyini kesen zayıflık zonları				
a) Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren çok sayıda zayıflık zonu, çok gevşek komşu kaya (herhangi derinlikte)	10			
b) Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği < 50 m)	5,0			
c) Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren tek zayıflık zonu(kazı derinliği > 50 m)	2,5			
d) Sağlam kayada (kil içermeyen) çoklu makaslama zonları, gevşek komşu kaya (herhangi derinlikte)	7,5			
e) Sağlam kayada (kil içermeyen) tek makaslama zonu, gevşek komşu kaya (kazı derinliği < 50 m)	5,0			
f) Sağlam kayada (kil içermeyen) tek makaslama zonu, gevşek komşu kaya (kazı derinliği > 50 m)	2,5			
g) Gevşek, açık çatlaklar, aşırı derecede çatlaklı veya 'şeker küpü' vs. (herhangi derinlikte)	5,0			
ii) Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri	2,5	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	
h) Düşük gerilme, yüzeye yakın	1,0	>200	>13	
i) Orta düzey gerilme		200-10	13-0,66	
j) Yüksek gerilme, çok sıkı yapı (genellikle stabilite için uygun, duvar stabilitesi için uygun olmayabilir)	0,5-2,0			
k) Vasat düzeyde kaya patlaması (masif kaya)	5-10	10-5	0,66-0,33	
l) İleri düzeyde kaya patlaması (masif kaya)	10-20	5-2,5	0,33-0,16	
iii) Sıkışan kaya; sağlam olmayan kayanın yüksek kaya basıncı etkisi altında plastik akması		< 2,5	< 0,16	
m) Orta derecede sıkışan kaya basıncı	5-10			
n) İleri derecede sıkışan kaya basıncı	10-20			
iv) Şişebilen kaya; suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme aktivitesi				
o) Vasat derecede şişebilen kaya basıncı	5-10			
p) İleri derecede şişebilen kaya basıncı	10-15			

Ek-3'in devamı

Eklem Suyu Azalım Katsayısı, J_w	J_w	Yaklaşık su basıncı(kg /cm ²)	
		J_w	Yaklaşık su basıncı(kg /cm ²)
a) Kuru kazılar veya kazı içine minör akış; örnek: yerel olarak 5 l/dak b) Orta derecede içine akış veya basınç, arada bir eklem dolgularının yıkanması c) Dolgusuz eklemli sağlam kayada çok miktarda içeri akış veya yüksek basınç d) Çok miktarda akış veya yüksek basınç, eklem dolgularının önemli miktarda yıkanması e) Patlatma sırasında son derece yüksek içeri akış veya su basıncı; zamanla azalan türde f) Kayda değer bir azalım göstermeksizin, son derece yüksek içeri akış veya su basıncı	1,0	< 1	
	0,66	1,0-2,5	
	0,5	2,5-10	c ve f kaba tahminlerdir.
	0,33	2,5-10	Drenaj önlemlerinin alındığı durumda J_w 'yi arttırınız.
	0,2-0,1	> 10	Buz oluşumu ile ilgili özel problemler göz önüne alınmaz.
	0,1-0,05	> 10	

Kaya Kütlesi Kalitesi'ni (Q) hesaplarken, yukarıdaki tabloda verilenlere ek olarak aşağıdaki kılavuz bilgileri kullanılmalıdır:

- 1) Sondaj karotu mevcut olmadığı zaman, kil içermeyen kaya kütleleri için RQD değeri $RQD = 115 - 3,3J_v$ 'den (yaklaşık olarak) hesaplanabilir. Buradaki J_v , bir m³'deki toplam eklem sayısıdır ($J_v < 4,5$ için $RQD = 100$). J_v , her bir eklem takımının bir metre uzunluk içindeki eklem sayısının toplamı olarak değerlendirilir.
- 2) Eklem takım sayısını temsil eden J_n genellikle folyasyon, şistozite, sleytsi klivaj veya tabakalanma vb. özelliklerden çoğu zaman etkilenir. Bu özelliklerin kuvvetlice geliştiği durumda, J_n 'yi değerlendirirken 'rastgele eklem'ler olarak hesaba katılmalıdır.
- 3) Kayma dayanımını temsil eden J_r ve J_a parametreleri normalde, belirli bir zondaki önemli en zayıf eklem takımı veya kil dolgulu süreksizlik ile ilişkili olmalıdır, fakat J_r / J_a değeri yenilmeyi başlatma ihtimali en yüksek yüzey ile ilişkili olmalıdır. O nedenle, minimum J_r / J_a değerine sahip eklem takımı veya süreksizliğin stabilite için uygun şekilde yönlendiği durumda, daha az uygun yönelimli bir eklem takımı veya süreksizlik bazen daha önemli olabilir ve bu halde Q'nun hesaplanmasında daha yüksek olan J_r / J_a değeri kullanılmalıdır.
- 4) Bir kaya kütlesi kil içerdiği zaman, 'gevşeyen yükler' için uygun olan SRF faktörü değerlendirilmelidir. Böyle durumlarda taze kaya dayanımının fazla önemi yoktur. Ancak, eklemlemenin minimum ve kilin de olmadığı bir durumda, taze kayanın dayanımı en zayıf bağ olabilir ve stabilite o zaman 'kaya gerilmesi / kaya dayanımı' oranına bağlı olur. Kuvvetli bir anizotrop gerilme alanı stabilite için uygun değildir ve SRF değerlendirilmesiyle ilgili tabloda görüldüğü gibi, kabaca hesaba katılır.
- 5) Taze kayanın basınç ve çekme dayanımları (σ_c ve σ_t), mevcut veya gelecekteki arazi şartlarının da elverişli olması halinde, doymuş şartlarda değerlendirilmelidir. Nem veya doymuş şartlara maruz kalındığında kötüleşen kayalar için dayanım konusunda geleneksel hesaplama yapılmalıdır.

Ek-4 Nal Enkesitli Tünellerin Yapısal Çözümlemesinde Kullanılan Analitik Yönteme İlişkin Bilgisayar Programı

```

clc
disp('_____');
disp('Zurabov-Boguyeva Analitik Yöntemiyle Tünel Kaplamasının Yapısal Çözümlemesi');
disp('_____');
disp('--veri giriş dosyası olarak veriler.m kullanılmaktadır--');
[h gama icsur tungun tunyuk]=textread('Veriler.m','%f %f %f %f %f',1,'headerlines',2);
alfa=1-((tan(icsur/180*pi)*(tan(pi/4-icsur/180*pi/2))^2*h)/(tungun+2*tunyuk*tan(pi/4-icsur/180*pi/2)));
bier=input('Düşey yük hesaplanmasında bierbaumer teorisini kullanmak istiyorsanız 1 giriniz = ');
if bier==1
    p=h*gama*alfa;
else
    p=h*gama;
end
[r fio fin I ks E] =textread('Veriler.m','%f %f %f %f %f %f',1,'headerlines',4);
cf=(r^2*(pi/2+3+2*fin/180*pi-4*cos(fin/180*pi)))/(r*pi/2+2*r*fin/180*pi);
ap(1,1)=-1/8*p*r^3*(-2*cos(1/2*pi)*sin(1/2*pi)+pi)+-r^3*p*(-3*fin/180*pi+4*sin(fin/180*pi));
ap(2,1)=1/24*p*r^3*(6*r*cos(1/2*pi)*sin(1/2*pi)-3*r*pi-6*cf*cos(1/2*pi)*sin(1/2*pi)+3*cf*pi+4*r*sin(1/2*pi)^3)+2*r^4*p+3*p*r^4*(fin/180*pi)-3*p*r^3*cf*(fin/180*pi)-6*p*r^4*cos((fin/180*pi))-4*p*r^4*sin((fin/180*pi))+4*p*r^3*cf*sin((fin/180*pi))+4*p*r^4*cos((fin/180*pi))^2;
ap(1,2)=1/2*r*pi+2*r*(fin/180*pi);
ap(2,3)=1/4*r*(2*cf^2*pi-4*cf*r*pi+8*cf*r*sin(1/2*pi)+3*r^2*pi-8*r^2*sin(1/2*pi)+2*r^2*cos(1/2*pi)*sin(1/2*pi))+8*r^3-8*r^2*cf+6*r^3*(fin/180*pi)-4*r^2*cf*(fin/180*pi)-8*r^3*cos((fin/180*pi))+2*r*cf^2*(fin/180*pi)+8*r^2*cf*cos((fin/180*pi))-4*r^3*cos((fin/180*pi))*sin((fin/180*pi));

```

Ek-4'ün devamı

```

Xp(1)=-ap(1,1)/ap(1,2);
Xp(2)=-ap(2,1)/ap(2,3);

figure(1),subplot(2,1,1)
ksi=0:1:90;
Mpust=(-1*p*r.^2*(sin(ksi/180*pi)).^2/2)+Xp(1)+(r-
r*cos(ksi/180*pi)-cf)*Xp(2);
plot(ksi,Mpust)
title('Kaplamanin üst kisminde düsey yüklere göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(2,1,2)
ksil=0:1:fin;
Mpalt=(-1*p*r^2/2+2*r^2*p*(1-cos(ksil/180*pi)))+Xp(1)+(r-
cf+2*r*sin(ksil/180*pi))*Xp(2);
plot(ksil,Mpalt)
title('Kaplamanin alt kisminde düsey yüklere göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi_{1} (derece)')
grid on

aq(1,1)=-
1/2*r^3*sin(1/2*pi)+1/6*r^3*sin(1/4*pi)+1/2*r^3*sin(3/4*pi)-
1/6*r^3*sin(pi)-0.66666666667e-4*r^3*(28284.-
28284.*cos(fin/180*pi)^2+111714.*cos(fin/180*pi)^2*sin(fin/18
0*pi)-115857.*cos(fin/180*pi)^2*fin/180*pi-
31714.*sin(fin/180*pi)+55857.*fin/180*pi-
20000.*cos(fin/180*pi)*sin(fin/180*pi)-
28284.*cos(fin/180*pi)+28284.*cos(fin/180*pi)^3)/sin(fin/180*
pi)^2;
aq(2,1)=1/48*r^4*cos(3/4*pi)*pi+1/12*r^4*sin(1/4*pi)-
1/16*r^4*cos(1/4*pi)*pi+41/72*r^4*sin(3/4*pi)-
1/3*r^4*sin(1/2*pi)+1/2*r^3*sin(1/2*pi)*cf-
1/8*r^4*sin(5/4*pi)+1/18*r^4*sin(3/2*pi)-
1/6*r^4*sin(pi)+1/6*r^3*cf*sin(pi)-1/6*r^3*cf*sin(1/4*pi)-
1/2*r^3*cf*sin(3/4*pi)+0.2222222222e-4*r^3*(-
364852.*r+84852.*cf+349710.*r*cos((fin/180*pi))^2-
84852.*cos((fin/180*pi))^2*cf-
84852.*cos((fin/180*pi))*cf+335142.*cos((fin/180*pi))^2*sin((
fin/180*pi))*cf+144852.*r*cos((fin/180*pi))*sin((fin/180*pi))

```

Ek-4'ün devamı

```

+84852.*cos((fin/180*pi))^3*cf-
60000.*cos((fin/180*pi))*cf*sin((fin/180*pi))-
84852.*r*cos((fin/180*pi))^3*sin((fin/180*pi))+432423.*r*cos(
(fin/180*pi))^2*(fin/180*pi)-
335142.*r*cos((fin/180*pi))^2*sin((fin/180*pi))-
252423.*r*(fin/180*pi)+335142.*r*cos((fin/180*pi))^4+95142.*r
*sin((fin/180*pi))-
859994.*r*cos((fin/180*pi))^3+539994.*r*cos((fin/180*pi))-
95142.*sin((fin/180*pi))*cf-
347571.*cos((fin/180*pi))^2*cf*(fin/180*pi)+167571.*cf*(fin/1
80*pi)/sin((fin/180*pi))^2;
Xq1(1)=-aq(1,1)/ap(1,2);
Xq1(2)=-aq(2,1)/ap(2,3);

del0p=(2*r^4*p-
6*r^4*p*cos(fin/180*pi)+4*r^4*p*cos(fin/180*pi)^2)/(E*I);
del1p=(4*r^2-4*r^2*cos(fin/180*pi))/(E*I);
del2p=(4*r^3-4*r^2*cf-
4*r^3*cos(fin/180*pi)+4*r^2*cf*cos(fin/180*pi)-
4*r^3*cos(fin/180*pi)*sin(fin/180*pi)+4*r^3*fin/180*pi)/(E*I)
;
delhp= del0p+ del1p*Xp(1)+del2p*Xp(2);
del0q=(0.44444444444e-4*r^4*(132429.*cos(fin/180*pi)^2-
140000.+167571.*cos(fin/180*pi)^4-
42426.*cos(fin/180*pi)^3*sin(fin/180*pi)-
387571.*cos(fin/180*pi)^3-
42426.*fin/180*pi+227571.*cos(fin/180*pi)+42426.*cos(fin/180*
pi)^2*fin/180*pi+42426.*cos(fin/180*pi)*sin(fin/180*pi))/sin(
fin/180*pi)^2)/(E*I);
del1q=del1p;
del2q=del2p;
delhq= del0q+ del1q*Xq1(1)+del2q*Xq1(2);
q=delhp/(1/ks-delhq);
Xq(1)=q*Xq1(1);
Xq(2)=q*Xq1(2);

figure(2),subplot(3,1,1)
ksi=0:0.1:45;
Must=Xq1(1)+(r-r*cos(ksi/180*pi)-cf)*Xq1(2);
plot(ksi,Must)

```


Ek-4'ün devamı

```

title('Kaplamanın üst kısmında birim yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,2)
ksi=45:0.1:90;
    Must=(-1/6*r^2*cos(ksi/180*pi-
3/4*pi)+1/2*r^2*cos(ksi/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*ksi/180*pi))+Xq1(1)+(r-r*cos(ksi/180*pi)-
cf)*Xq1(2);
plot(ksi,Must)
title('Kaplamanın üst kısmında birim yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,3)
ksil=0:0.1:fin;
Malt=(4/3*r.^2*(3*cos(ksil/180*pi)*cos(fin/180*pi).^2-
cos(ksil/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2-
cos(ksil/180*pi).^2)/(-1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-
0.9428*sin(ksil/180*pi)-0.2762*cos(ksil/180*pi)))+Xq1(1)+(r-
cf+2*r*sin(ksil/180*pi))*Xq1(2);
plot(ksil,Malt)
title('Kaplamanın alt kısmında birim yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi_{1} (derece)')
grid on

X(1)=Xp(1)+Xq(1);
X(2)=Xp(2)+Xq(2);

figure(3),subplot(3,1,1)
ksi=0:0.1:45;
Must=Xq(1)+(r-r*cos(ksi/180*pi)-cf)*Xq(2);
plot(ksi,Must)
title('Kaplamanın üst kısmında yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,2)
ksi=45:0.1:90;

```

Ek-4'ün devamı

```

Must=q*(-1/6*r^2*cos(ksi/180*pi-
3/4*pi)+1/2*r^2*cos(ksi/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*ksi/180*pi))+Xq(1)+(r-r*cos(ksi/180*pi)-
cf)*Xq(2);
plot(ksi,Must)
title('Kaplamanin üst kısmında yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,3)
ksi1=0:1:fin;
Malt=q*(4/3*r.^2*(3*cos(ksi1/180*pi)*cos(fin/180*pi).^2-
cos(ksi1/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2-
cos(ksi1/180*pi).^2)/(-1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-
0.9428*sin(ksi1/180*pi)-0.2762*cos(ksi1/180*pi)))+Xq(1)+(r-
cf+2*r*sin(ksi1/180*pi))*Xq(2);
plot(ksi1,Malt)
title('Kaplamanin alt kısmında yatay yüke göre moment
dagilimi')
xlabel('\xi_{1} (derece)')
grid on

figure(4),subplot(3,1,1)
ksi=0:0.1:45;
Must=(-1*p*r.^2*(sin(ksi/180*pi)).^2/2)+X(1)+(r-
r*cos(ksi/180*pi)-cf)*X(2);
plot(ksi,Must)
title('Kaplamanin üst kısmında yatay ve düşey yüke göre
moment dagilimi')
xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,2)
ksi=45:0.1:90;
Must=q*(-1/6*r^2*cos(ksi/180*pi-
3/4*pi)+1/2*r^2*cos(ksi/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*ksi/180*pi))+(-
1*p*r.^2*(sin(ksi/180*pi)).^2/2)+X(1)+(r-r*cos(ksi/180*pi)-
cf)*X(2);
plot(ksi,Must)
title('Kaplamanin üst kısmında yatay ve düşey yüke göre
moment dagilimi')

```

Ek-4'ün devamı

```

xlabel('\xi (derece)')
grid on
subplot(3,1,3)
ksil=0:0.1:fin;
Malt=q*(4/3*r.^2*(3*cos(ksil/180*pi)*cos(fin/180*pi).^2-
cos(ksil/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2-
cos(ksil/180*pi).^2)/(-1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-
0.9428*sin(ksil/180*pi)-0.2762*cos(ksil/180*pi)))+(-
1*p*r^2/2+2*r^2*p*(1-cos(ksil/180*pi)))+X(1)+(r-
cf+2*r*sin(ksil/180*pi))*X(2);
plot(ksil,Malt)
title('Kaplamanin alt kisminde yatay ve düşey yüke göre
moment dagilimi')
xlabel('\xi_{1} (derece)')
grid on

format long g
disp('-----');
disp('*****SONUÇLAR *****');
disp('-----');
disp(['Kemerin Elastik Merkezi = ',num2str(cf)]);
disp('-----');
disp('DÜŞEY YÜK OLMASI HALİNDE');
disp('-----');
disp(['Düşey yükten dolayı oluşan katsayılar']);
disp(['a(1,0) = ',num2str(ap(1,1)), ' a(1,1) = ',
',num2str(ap(1,2))]);
disp(['a(2,0) = ',num2str(ap(2,1)), ' a(2,2) = ',
',num2str(ap(2,3))]);
disp('-----');
disp(['Düşey yükten dolayı oluşan X1 ve X2 katsayıları']);
disp(['X(1) = ',num2str(Xp(1)), ' X(2) = ',
',num2str(Xp(2))]);
disp('-----');
disp(['Düşey yükten dolayı oluşan bazı kesitlerdeki
momentler']);
disp(['Tepe noktasındaki moment = ',num2str((-
1*p*r.^2*(sin(0)).^2/2)+Xp(1)+(r-r*cos(0)-cf)*Xp(2))]);
disp(['En geniş noktadaki moment = ',num2str((-
1*p*r.^2*(sin(pi/2)).^2/2)+Xp(1)+(r-r*cos(pi/2)-cf)*Xp(2))]);

```

Ek-4'ün devamı

```

disp(['Mesnetteki moment = ', num2str((-1*p*r^2/2+2*r^2*p*(1-
cos(fin/180*pi)))+Xp(1)+(r-cf+2*r*sin(fin/180*pi))*Xp(2))]);
disp('-----');
disp('BİRİM YATAY YÜK OLMASI HALİNDE');
disp('-----');
disp(['Birim yatay yükten dolayı (q=1) oluşan X1 ve X2
katsayıları']);
disp(['X(1) = ', num2str(Xq1(1)), '                X(2) =
', num2str(Xq1(2))]);
disp('-----');
disp(['Birim yatay dolaylı oluşan bazı kesitlerdeki
momentler']);
disp(['Tepe noktasındaki moment = ', num2str(Xq1(1)+(r-
r*cos(0/180*pi)-cf)*Xq1(2))]);
disp(['En geniş noktadaki moment = ', num2str((-
1/6*r^2*cos(90/180*pi-3/4*pi)+1/2*r^2*cos(90/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*90/180*pi))+Xq1(1)+(r-r*cos(90/180*pi)-
cf)*Xq1(2))]);
disp(['Mesnetteki moment =
', num2str((4/3*r.^2*(3*cos(fin/180*pi)*cos(fin/180*pi).^2-
cos(fin/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2-cos(fin/180*pi).^2)/(-
1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-0.9428*sin(fin/180*pi)-
0.2762*cos(fin/180*pi))+Xq1(1)+(r-
cf+2*r*sin(fin/180*pi))*Xq1(2))]);
disp('-----');
disp('YATAY YÜK OLMASI HALİNDE');
disp('-----');
disp(['Yatay yükten dolayı (q) oluşan X1 ve X2
katsayıları']);
disp(['X(1) = ', num2str(Xq(1)), '                X(2) =
', num2str(Xq(2))]);
disp('-----');
disp(['Yatay dolaylı oluşan bazı kesitlerdeki momentler']);
disp(['Tepe noktasındaki moment = ', num2str(Xq(1)+(r-
r*cos(0)-cf)*Xq(2))]);
disp(['En geniş noktadaki moment = ', num2str((-
1/6*r^2*cos(90/180*pi-3/4*pi)+1/2*r^2*cos(90/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*90/180*pi))*q+Xq(1)+(r-r*cos(90/180*pi)-
cf)*Xq(2))]);
disp(['Mesnetteki moment =
', num2str((4/3*r.^2*(3*cos(fin/180*pi)*cos(fin/180*pi).^2-

```

Ek-4'ün devamı

```

cos(fin/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2*cos(fin/180*pi).^2)/(-
1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-0.9428*sin(fin/180*pi)-
0.2762*cos(fin/180*pi))*q+Xq(1)+(r-
cf+2*r*sin(fin/180*pi))*Xq(2));
disp('-----');
disp(['Yatay ve düşey yükten dolayı oluşan bazı kesitlerdeki
momentler']);
disp(['Tepe noktasındaki moment = ',num2str((-
1*p*r.^2*(sin(0/180*pi)).^2/2))+X(1)+(r-r*cos(0)-cf)*X(2))]);
disp(['En geniş noktadaki moment = ',num2str((-
1*p*r.^2*(sin(90/180*pi)).^2/2))+q*(-1/6*r^2*cos(90/180*pi-
3/4*pi)+1/2*r^2*cos(90/180*pi+1/4*pi)-
1/3*r^2*cos(2*90/180*pi))+X(1)+(r-r*cos(90/180*pi)-
cf)*X(2))]);
disp(['Mesnetteki moment = ',num2str((-1*p*r^2/2+2*r^2*p*(1-
cos(fin/180*pi))+q*(4/3*r.^2*(3*cos(fin/180*pi)*cos(fin/180*
pi).^2-cos(fin/180*pi)-3*cos(fin/180*pi).^2+2-
cos(fin/180*pi).^2)/(-1+cos(fin/180*pi).^2)+r.^2*(0.1381-
0.9428*sin(fin/180*pi)-0.2762*cos(fin/180*pi)))+X(1)+(r-
cf+2*r*sin(fin/180*pi))*X(2))]);
disp('-----');

```

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Tahsin ÖZTÜRK 1983 yılında Trabzon'da doğdu. İlk öğrenimini 1989-1994 yılları arasında bu ildeki İskenderpaşa ilkokulunda, orta ve lise öğrenimini ise 1994-2001 yılları arasında Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. Yüksek öğrenimine 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başlayarak, bu bölümü her dönem yüksek onur derecesi almak suretiyle 2004-2005 Eğitim-Öğretim yılı Haziran döneminde Fakülte ve Bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. Girdiği muafiyet sınavında İngilizceden muaf olduğundan mezun olduğu yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi boyunca Tübitak Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen Yurt İçi Yüksek Lisans bursunu almaya hak kazandı. Kasım 2005'te mezun olduğu üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. Bekar olan Hasan Tahsin ÖZTÜRK İngilizce bilmekte ve halen araştırma görevliliğine ve Lisanüstü Eğitim-Öğrenimine devam etmektedir.