

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METRO TÜNELLERİNİN İSTANBUL ÖRNEĞİNDE ÇOK YÖNLÜ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ÖZTÜRK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METRO TÜNELLERİNİN İSTANBUL ÖRNEĞİNDE ÇOK YÖNLÜ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur ÖZTÜRK
(501121417)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Öğr. Gör. Dr. Adem Faik İyınam

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121417 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Onur ÖZTÜRK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**METRO TÜNELLERİNİN İSTANBUL ÖRNEĞİNDE ÇOK YÖNLÜ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Öğr. Gör. Dr. Adem Faik İyınam**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Pelin Alpkökin**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. A. Çoşkun Sönmez
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2014**

Aileme ve Hocalarıma,

ÖNSÖZ

Bitirme ödevim sırasında Kadıköy-Kartal Metrosu istasyon kazı çalışmalarını kısmen izlemiş olmam ve Jeolojik etüdlerle ilgili çalışmış olmam nedeniyle Yüksek Lisans Tez çalışmamı da metro ile ilgili yapmak istedim. Danışman Hocam'ın da kabul ve önerisi ile metro tünellerinin çok yönlü incelenmesini ve tünele gelen itkilerin ele alınmasını kapsayan bir tez çalışması yaptım. Bu tez çalışması sırasında bana yardımcı ve destek olan başta tez danışmanım Öğr. Gör. Dr. A. Faik İyınam olmak üzere, benden ilgi ve yardımını esirgemeyen Aileme ve Ulaştırma Birimindeki tüm Hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Onur ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez	6
2. BAZI ŞEHİRLERDE VE İSTANBULDAKİ METRO HATLARI	7
2.1 Metronun Diğer Raylı Sistemlerle Karşılaştırılması	7
2.2 İstanbul Metrosunun Bazı Metrolarla Karşılaştırılması	8
2.3 Metroların Kullanım Oranları	10
3. İSTANBUL’UN METRO TÜNELLERİNİN JEOLojİK YAPISI	15
3.1 Stratigrafi.....	15
3.2 İstanbul-Kocaeli Yarımadası Paleozoyik İstifi.....	15
3.3 İstanbul’da Karşılaşılan Önemli Formasyonlar, [12]	19
3.3.1 Kurtköy formasyonu	19
3.3.2 Aydos formasyonu	20
3.3.3 Gözdağ formasyonu	20
3.3.4 Dolayoba formasyonu	20
3.3.5 Kartal formasyonu	21
3.3.6 Denizliköy formasyonu.....	22
3.3.7 Trakya formasyonu	23
3.3.8 Belgrad formasyonu.....	24
3.3.9 Alüvyon	25
3.4 Değerlendirme ve Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları	25
3.4.1 Jeolojik yapının değerlendirilmesi	25
3.4.2 Mühendislik jeolojisi çalışmaları	27
4. METROLARDA KULLANILAN TUNEL AÇMA YÖNTEMLERİ	31
4.1 Delme Tünel Yöntemi (Tünel açma makinesi ile)	32
4.1.1 Yeni avusturya tünel metodu (NATM).....	33
4.2 Aç-Kapa Yöntemi.....	36
4.3 Yukarıdan Aşağıya Yöntemi	37
5. TUNEL ÇALIŞMASINDA ÖNLEMLER	41
5.1 Kuvvetler Dengesini Oluşturan Önlemler	41
5.2 Gerilme Durumunu Değiştiren Önlemler	41
5.3 Ortam Koşullarını İyileştirici Önlemler	42
5.4 Deformasyon Durumunu Denetleyici Önlemler	42
5.5 İstanbul Metrosu’nun Zemin ve Destek Tiplerini Değerlendirme	44
5.6 Destekleme Elemanları.....	47

5.6.1 Kafes çelik iksa	47
5.6.2 Çelik hasır	48
5.6.3 Püskürtme beton.....	49
5.6.4 Enjeksiyonlu kaya bulonu	49
5.6.5 Süren	50
5.6.6 Zemin çivisi.....	51
5.6.7 Şemsiye boruları.....	52
5.6.8 Jet grouting uygulamaları.....	53
5.7 Malzeme ve Maliyet Açısından Karşılaştırma	54
5.8 İksalama Derecesini Belirleme	57
6. TÜNELE GELEN İTKİLERİN TEORİK ve PARAMETRİK OLARAK	
İRDELENMESİ ve KARŞILAŞTIRMA	61
6.1 Tünellerde Duraylık (Stabilite) Sorunu	61
6.2 Gerilme Durumları	62
6.3 Tünele Gelen Etkilerin Belirlenmesi	63
6.4 Geliştirilen Teorik Yaklaşımlara Göre Parametrik İrdelemeler	65
6.4.1 Kommerell teorisi.....	67
6.4.1.1 Çok sulu, kaya vb. veya içsel sürtünme açısı çok büyük zeminlerde düşey ve yatay itkinin hesabı	68
6.4.1.2 Kommerell'e göre zeminin tam sıkı olmadığı durumlarda düşey ve yanal itkilerin hesabı	72
6.4.2 Ritter teorisi.....	75
6.4.3 Terzaghi teorisi.....	77
6.4.4 Bierbaumer teorisi.....	81
6.4.4.1 Bierbaumer diyagramları	84
6.5 Kaya Zeminde Kırılma	86
6.5.1 Kaya kütlesi/ kohezif zemin içinde açılan tünellerde tavan basıncı ...	88
6.6 Derinliğin Tünel Stabilitesine Etkisi	89
6.7 Kenar Ayaklara Gelen İtkiler	90
6.8 Plaxis Yöntemi	90
6.8.1 Tünel yapı etkileşiminde kullanımı.....	90
6.8.1.1 Mohr-Coulomb (MC) modeli.....	91
6.8.1.2 Hardening Soil (HS) modeli	91
6.8.2 Analizler.....	91
6.8.2.1 Tünel stabilite analizinde kullanımı	92
6.9 İncelenen Teorilerin Değerlendirilmesi	94
SONUÇLAR	97
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ	105

KISALTMALAR

İETT	: İstanbul Elektrik Tramvay Tünel
NATM	: New Austrian Tunneling Method
TAM	: Tünel Açma Makinesi
TBM	: Tunnel Boring Machine
YATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tramvay hafif metro ve metronun karşılaştırılması.....	9
Çizelge 2.2 : Metrolara ait bazı bilgiler	10
Çizelge 2.3 : Metro sistemlerine ait veriler.....	11
Çizelge 2.4 : Metro trenlerinin kapasite ve hızları.....	11
Çizelge 2.5 : Bazı Metroların toplu ulaşımındaki yüzdeleri.....	11
Çizelge 2.6 : Oturanların İstanbul metrosunu kullanım yüzdesi.....	12
Çizelge 5.1 : İstanbul Metrosu tünellerinde donatılar ve uygulama tipleri.....	40
Çizelge 5.2 : Metro tüneli kesit alanları ve gabarileri.....	42
Çizelge 5.3 : Kazı destekleme sistemleri ve destekleme elemanları.....	43
Çizelge 5.4 : Destekleme elemanlarının karşılaştırılması.....	52
Çizelge 5.5 : İmalat sürelerinin karşılaştırılması.....	53
Çizelge 5.6 : A3 tipi desteklemenin maliyetleri.....	53
Çizelge 5.7 : A5 tipi desteklemenin maliyetleri.....	54
Çizelge 5.8 : Birim tünel uzunluğu için malzeme tüketimleri.....	55
Çizelge 5.9: Birim kısaltmaya bağlı stabilite durumu ve iksa türleri.....	56
Çizelge 6.1: Demiryolu tünellerinin kaplama kalınlıkları.....	64
Çizelge 6.2 : Zemin sınıfına bağlı parabolik ve elipstik basınç değerleri.....	68
Çizelge 6.3 : Zemin cinsine bağlı düşey basınç değerleri.....	71
Çizelge 6.4 : Zemin cinsine bağlı yatay itki değerleri.....	72
Çizelge 6.5 : Ritter'e göre düşeydeki P yükü değerleri (ton).....	74
Çizelge 6.6 : Terzaghi'ye göre (h_d) etkili zemin yüksekliği değerleri.....	75
Çizelge 6.7 : Hesapla bulunan h_d değerleri (m).....	76
Çizelge 6.8 : h_d ye göre hesaplanan P düşey basınç değerleri (ton).....	77
Çizelge 6.9 : h_d ye göre hesaplanan P_h yatay basınç değerleri (kg/m^2).....	77
Çizelge 6.10 : Tek hatlı tünellerde ($b=7m$, $m=8m$) Bierbaumer α azalma değ.....	78
Çizelge 6.11 : Çift hatlı tünellerde ($b=10m$, $m=8m$) Birbaumer α azalma değ.....	79
Çizelge 6.12: Tek hatlı tünellerde ($b=7m$, $m=8m$) α değerlerine bağlı P yükleri.....	79
Çizelge 6.13 : Çift hatlı tünellerde ($b=10m$, $m=8m$) α değerlerine bağlı P yükleri...80	
Çizelge 6.14 : Hoek, Marinos ve Shorey'e göre derinlik (Z) değerleri.....	85
Çizelge : 6.15 Kullanılan yaklaşımlar ve çözüm şekli.....	92
Çizelge : 6.16 İstanbul Metro'su A tünel tipi için hesap sonuçları.....	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Derinliğe göre gerilme değişimleri.....	6
Şekil 2.1 : İstanbul'daki metro hatları.....	10
Şekil 3.1 : İstanbul'un genelleştirilmiş stratigrafi kesiti.....	18
Şekil 3.2 : Kurtköy Formasyonunun ayrışmamış kesimleri.....	19
Şekil 3.3 : Aydos Formasyonu kuvarsitlerinin E-5 Karayolunda görünümü.....	20
Şekil 3.4 : Dolayoba Formasyonunun Soğanlık İstasyonu kazısı görünümü.....	21
Şekil 3.5 : Kartal Formasyonunun Yenisahra E-5 Karayolunda görünümü.....	21
Şekil 3.6 : Trakya Formasyonunda orta-kalın tabakalı grovakların görünümü.....	23
Şekil 3.7 : Göztepe Kavşağı yakınında Belgrad Formasyonu mostra görüntüsü.....	24
Şekil 4.1 : Tünel açma makinesi (TBM/TAM).....	31
Şekil 4.2 : Natm yük etki diyagramı.....	33
Şekil 4.3 : NATM ile tünel açılması.....	34
Şekil 4.4 : Kirazlı ve İkitelli İstasyonları aç-kapa tünel çalışması.....	35
Şekil 4.5 : Aç-Kapa tünel çalışmasında tavanın kaplanması.....	36
Şekil 4.6 : Otogar-Bağcılar-İkitelli metrosunda yukardan aşağıya yöntemi.....	37
Şekil 4.7 : Dünyadaki farklı tüp uygulamaları.....	38
Şekil 5.1 : A Tipi tünel, A3 destekleme enkesiti.....	44
Şekil 5.2 : A Tipi tünel, A5 destekleme enkesiti.....	45
Şekil 5.3 : İksa profili ölçüleri.....	46
Şekil 5.4 : Bulon ve taşıma levhası.....	48
Şekil 5.5 : Süren boykesiti.....	49
Şekil 5.6 : Zemin çivisi enkesit paftası.....	49
Şekil 5.7 : Şemsiye boruları boykesiti.....	50
Şekil 5.8: Destekleme elemanlarının işlem süreleri.....	55
Şekil 5.9: Tünel stabilite abağı.....	57
Şekil 6.1a,b : Homojen zemin, homojen olmayan zemin.....	61
Şekil 6.2: Tabaka şekilleri.....	63
Şekil 6.3: Hacim artış şekli.....	65
Şekil 6.4: Sıkı olmayan zeminde yanal itkiler.....	66
Şekil:6.5 : Sıkı olmayan zeminde itkiler.....	69
Şekil 6.6 : Ritter kemerleşme eğrisi.....	73
Şekil 6.7 : Terzaghi'ye göre kesit.....	74
Şekil 6.8 : Bierbaumer'e göre etkili büyüklükler.....	78
Şekil 6.9 : Tek hatlı tünelde yük yükseklikleri.....	82
Şekil 6.10 : Çift hatlı tünelde yük yükseklikleri.....	83
Şekil 6.11 :Kaya zeminde gerilmeler.....	84

METRO TÜNELLERİNİN İSTANBUL ÖRNEĞİNDE ÇOK YÖNLÜ İNCELENMESİ

ÖZET

Tünel uygulamaları oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Ulaştırma yapılarında birçok nedenle tünel uygulaması gerekmektedir. Kentiçinde metro hatları ve istasyonları için de farklı tekniklerde tünel açma uygulamaları yapılmaktadır. Tez çalışmasında, İstanbul'daki metro hatlarının gelişmiş metro ağlarına göre durumu, İstanbul Metrosu'nda bazı kazı ve destek tipleri incelendikten sonra, tünele gelen itkilerin ve tünel stabilitesinin birçok teoriye göre parametrik irdelenmesi ve yorumlanması yapılmaktadır. İstanbul'da raylı sistemler uzun yıllar iyi bir gelişme gösterememiştir, metro hatları oldukça yeni ve kısadır. Bu nedenle talep, taşıt uzunluğu, taşıt doluluğu, sefer sıklığı azdır. Ancak metro ağı ve entegrasyon geliştikçe hatlarda bu açılardan iyileşme beklenmektedir.

İstanbul metro tünellerinin geçtiği alanın bazı kısımlarında, mevcut formasyonlarda bölgesel sıkışmadan kaynaklanan düzensizlikler nedeniyle metro çalışmasının kazı işlerinde ve formasyonun taşıma gücünde sorun oluşmakta, taşıma gücü düşmektedir. Yer yer hat üzerinde asidik yüzey sularının oluşturduğu karstik boşluklar sızıntıya ve hat üzerinde kalan yolda küçük çapta çökmeye neden olmaktadır. Belirtilen jeolojik yapı ve açıklanan sorunlar nedeniyle kazı çalışmaları aksamakta ve bitirme süresi uzayabilmektedir.

Delme tünel, aç-kapa tünel ve yukardan aşağıya yöntemleri ile metro ve istasyon kazıları yapılmakla birlikte en yaygın kullanılanı delme tünel versiyonu olan Yeni Avusturya Yöntemi'dir. Tezde bu yöntemlerin yanı sıra İstanbul Metrosu'nda anahat tünellerindeki destekleme sistemlerinden olan A5 ve A3 de kısaca incelenmektedir. Tezde, kazı çalışması sırasında tünel stabilitesine etki eden kuvvetleri belirlemek için geliştirilen birçok teorinin esası ve değişik zemin cinsleri için ortaya çıkabilecek sayısal değerler incelenmektedir. Bunun için tünele gelen itkilerin belirlenmesi açısından farklı teori ve yaklaşımlar zemin cinsine bağlı şekilde parametrik olarak irdelenip, birbirleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeye göre;

Kommerell Teorisi, teorilerin en eskisi olmakla birlikte biraz yaklaşıktır. Kohezyon dikkate alınmamakta, sadece yük hesaplanmaktadır. Bu teoriye göre zemin sıkılaştıkça ve kendini tutabilme yeteneği arttıkça tünele etki eden zemin yüksekliği azalmakta, alan küçülmekte, yük de buna paralel olarak önemli azalma göstermektedir. Tünelin her iki yanında bulunan ve tünele etki eden zemin kütlelerinin oluşturduğu yatay itki kuvveti de, benzer şekilde zemin iyileştikçe küçülmektedir.

Ritter Yöntemi'nde kohezyon ve zeminlerin çekim mukavemeti hesaba dahil edilmekte, kemerleşme eğrisinin altında kalan zeminin ağırlığı dikkate alınmaktadır.

Kohezyonu yüksek zeminlerde tünele etki eden zemin kütlesi ve hesapla bulunan tünel yüksekliği azalmaktadır. Ritter’de itkiler Kommerell’e göre aynı tip zeminde göreceli olarak daha küçük olmaktadır.

Terzaghi Yöntemi’nde; kum ve kaya zeminlerin değişik durumları ve yeraltı su seviyesi dikkate alınıp, tünel açısından etkili zemin yükseklikleri ve düşey itkileri belirlenmektedir. Bu şekilde Terzaghi tarafından oluşturulan çizelgeden değişik durumlar ve zeminler için yorum ve karşılaştırma yapmak mümkün olmaktadır. Yeraltı su seviyesinin altında kalan kum zeminde düşey itki büyümekte, kaya zeminde ise değişmemektedir.

Bierbaumer Teorisi’nde statik yükün, yatay toprak basıncının oluşturduğu sürtünmeler nedeniyle küçüldüğü kabul edilir. Bierbaumer’e göre hazırlanan çizelgeler incelendiğinde tünelin üzerindeki zemin yüksekliği büyüdükçe azaltma değerleri küçülmekte, buna paralel olarak da itki değerleri artmaktadır.

Tünele gelen etkileri belirlemek için kullanılan bilgisayar programlarının başında sonlu elemanlar yönteminin kullandığı Plaxis Yöntemi gelmektedir. Bu yöntemle hem tünel yapı etkileşimlerini, hem de tünel stabilitesini sağlamak için gerekli destekleme elemanlarının tahkikini yapmak mümkün olmaktadır. Metro hatları İstanbul’da da giderek artmakta olup, metro tünellerinin gabarilerinin ve destek elemanlarının belirlenmesinde kullanılan yaklaşımların pratik, doğru, kolay olması ve birçok parametreyi içermesi önemlidir.

MULTI DIMENSIONAL EXAMINATION OF SUBWAY TUNNELS IN ISTANBUL EXAMPLE

SUMMARY

Tunnel applications have a very large scale. In transportation structures tunnel application is necessary due to various reasons. In urban areas tunnel boring applications in various techniques are applied for subway lines and stations. In the thesis study, after the situations of subway lines in Istanbul was compared with the advanced subway networks, the parametric examination and interpretation of impulsions acting on the tunnel and the tunnel stability was made according to various theories.

As a result of the studies made in order to increase public transportation in Istanbul, it can be observed that the share of railway systems slightly increases. The increasing immigration and accordingly increasing population, increase in private vehicle consumption causes lack of planning in transportation. Together with the new routes that will be added to the existing railway systems, the perception in the passenger that he will reach his destination without being stuck in traffic makes the railway systems more popular. Besides, railway systems are environmental friendly which is a factor that will lead them to primary actor level in urban transportation. The most important type of urban railway systems is subway due to its capacity, safety, speed and other system properties.

As subway system is in a tunnel, new tunnel technologies have become a necessity. Changes and arrangements in tunnel support type due to changing conditions occur due to evaluation of geological situation and evaluation of structuring on surface. Geological structure faced during deep excavation is recorded to cross section reports prepared for sections and then these are combined and converted into large cross section (width and length). Geological plans and maps are prepared for the base, arrangements in work program can be made related with excavation speed. In these studies, the discontinuity properties of the environment are primarily examined.

Rapid population increase has speeded up the underground excavations made in big cities. Mechanization studies have increased in order to dig the tunnels which are planned for sewer networks, subway, etc.. rapidly, safely and economically. In a tunnel with diameter of 7-8m, if the mechanised systems are selected properly, the advance speed can be 30-40m/day.

New Australian Method (NATM) was first used in Australia and this method rapidly became widespread in the world. This method is still used in the construction of Istanbul subway tunnels. The main principle in this excavation method is selecting the most appropriate digging and reinforcement methods so as to inspect and direct the secondary tension and deformations without damaging the rock stability and maintain the initial rigidity of the rocks as much as possible in order to make the region surrounding the gap, form a static system which holds and carries itself.

In cut and cover method, initially excavation is performed in the area, in the mean time the ground is supported with various methods. After the construction of the structure, the covering is applied as a simple and economical method.

The top to bottom method is preferred in busy automobile and pedestrian traffic conditions when upper structures such as road, junction, etc. should be rebrought into service as quick as possible in the region where station is going to be built and also minimize the effect of excavation on the surrounding. In Istanbul Otogar-Bağcılar-İkitelli Subway Stations, top to bottom method was preferred.

Railway systems could not perform a proper development in Istanbul for long years. Subway lines are very new and short. Therefore the demand, vehicle length, vehicle density and trip frequency are low. However as subway network and integration is developed, melioration is expected in the lines.

At some parts of the area where the Istanbul subway tunnels pass, due to irregularities caused by regional compression in current formations, problems occur in the digging works of subway construction and the bearing capacity of the formation decreases. The carstic gaps formed by the acidic surface waters on the line cause leakage and small scaled collapses on the road located above the line. Due to mentioned geological structure and explained problems digging works are hindered and the completion period is elongated.

Subway and station diggings are performed by boring tunnel, cut and cover tunnel and from top to bottom methods. The most prevalent method is New Austria Method which is a boring tunnel version. In the thesis, apart from these methods, A5 and A3 which are supporting systems in mainline tunnels of Istanbul subway are also briefly examined.

In the thesis bases of many theories developed in order to determine the forces effecting the tunnel stability during the digging work and the numerical values that may appear for different soil types are examined. In order to achieve this, in terms of determining the impulsions acting on tunnels, different theory and approaches are parametrically examined and comparatively evaluated. According to this evaluation;

Kommerell theory is the oldest theory but is a little rough. Cohesion is not taken into consideration, only load is calculated. According to this theory as the soil becomes more tightened and the ability to hold itself increases the soil height effecting the tunnel decreases, area gets smaller and in parallel to those the load decreases significantly. The horizontal impulsion force effecting the tunnel by the soil mass located at both sides of the tunnel also decreases as soil is meliorated.

In Ritter method, cohesion and tensile strength of soils are taken into consideration and the weight of the soil located beneath the arching curve is also taken into account. In soils with high cohesion, the soil mass acting the tunnel and the tunnel height found by calculation, decrease. The impulsions in Ritter, are smaller compared to Kommerell for the same type of soil.

In Terzaghi method the different situations of sand and rock soils and underground water level is taken into consideration and accordingly effective soil heights for the tunnel and vertical impulsions are determined. From the chart formed by Terzaghi this way, comment and comparison can be made for various situations and soils. The vertical impulsion increases in the sand soil located beneath the underwater level while it does not change in rock soil.

In Bierbaumer Theory, it is assumed that the static load decreases due to frictions created by horizontal soil pressure. When the charts prepared according to Bierbaumer are examined it can be observed that the load shedding values decreases as the soil height above the tunnel increases and in parallel to this the impulsion values increase.

The most common computer program used for determination of the impulsions acting on the tunnel is Plaxis method where finite elements method is used. By using this method the investigation of tunnel structure interactions and also necessary supporting elements for achieving tunnel stability is possible. Subway lines increase day by day in Istanbul so the approaches used in determination of clearance heights and supporting elements of subway tunnels should be practical, accurate, easy and should include various parameters.

1. GİRİŞ

Metro tünellerinin açılması sırasında içinde çalışılan ortam ve koşullar değişmekte olup, bu değişimin derecesi kuvvetler dengesinin veya moment dengesinin ya da gerilme durumunun teknik girişim sonucunda ne kadar bozulmuş olduğuna bağlıdır.

Doğa, içinde çalışılan ortam bu yeni koşullara uyumlanırken kendi özellik ve niteliklerine göre tepki gösterir. Yani değişim olarak karşımıza çıkan ölçülebilir büyüklükler, zorlayan etmenlerle bunlara direnen ortam arasındaki etkileşimin sonucudur. Tepki veya direnme önce enerjiyi dengelemek, sonra türünü değiştirmek ve nihayet düzeyini düşürmek şeklinde olmaktadır. Bir başka deyişle zamana bağlı gerilme-deformasyon ilişkisi, denge durumu ile etkileşimin ölçütü ve nedeni olmaktadır. Bu etkileşim miktarının teknik girişim için öngörülen sınırı aşması durumunda ise duraylık sorunu başlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Metro tünel açma yöntemleri genel olarak özetlendikten ve İstanbul Metrosu ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra tünele gelen itkilerin farklı teorilere göre incelenip, parametrik olarak irdelenmesidir.

Çalışmanın kapsamında; İstanbul'daki metro hatlarının ve tünellerinin durumu, bazı şehirlerdeki metrolarla karşılaştırma, tünel açmada kullanılan başlıca yöntemler, İstanbul metro tünellerinde karşılaşılan jeolojik yapı, stabiliteyi sağlamak için alınan önlemler incelenmekte ve tünele gelen itkilerin farklı teorilere göre parametrik irdelenmesi yapılarak temel farklılıklar yorumlanmaktadır.

Tünel konusunda daha önce yapılan tezlerde iksa sistemleri, Plaxis Programı'nın karayolu tüneline uygulama aşamaları, tünel güvenliği gibi konular incelenmiş olup, bu çalışmada yukarıda sayılan başlıklar altında inceleme ve değerlendirme hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Bir tünelde hiçbir olumsuzluk görülmemesine karşın yüzeydeki oturmaların veya örtü kayacı içindeki yer değiştirmelerin zararlı boyutlara ulaşması duraysızlık kabulü için yeterlidir. Bu deformasyonların nedeni yeraltı suyunun drenajı veya ikincil gerilme durumunun oluşumu sırasındaki vektörel değişimler gibi tünel içinden algılanamayan etmenler olabilmektedir. Duraysızlığın önlenmesi ya da giderilmesi için önlemler; sağlamlaştırma, destekleme, iyileştirme, korunma olarak gruplandırılabilir.

Tünel uygulamaları oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Ulaştırma yapılarında birçok nedenle tünel uygulaması gerekebilir, bunları özet olarak aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür, [1];

- Eğimi sınırlı olan geçkilerde geçkinin bir kısmının eğimi sağlamak amacıyla yeraltından geçirilmesi gerekirse,
- Tünel uygulanmasıyla geçkide kısalma meydana geliyorsa ekonomi sağlamak amacıyla tünele başvurulur,
- Geçkilerin bir kısmında toprak kaymaları olabilir, bunu önlemek için de tünel yapılabilir. Yüksek yarmaların uygulanması gerekiyorsa ve zemin kendini tutamıyorsa bakım masraflarından kurtulmak için yine tünel uygulanır,
- Hızlı hatlarda büyük yarıçapları uygulayabilmek için de tünel yapılır,
- Arazi yapısına göre firkete şeklinde veya helis şeklinde uygulamalar vardır,
- Boğaz teşkil eden deniz veya nehirlerin altından geçmek için yapılan tüneller bulunmaktadır.

Tünellerde farklı enkesit tipleri uygulanmaktadır, bunlar;

1. Sepet kulbu; hertürlü zeminde ve çürük zeminlerde kullanılır (tek hatlı demiryolu, 1, 2 şeritli karayolu, yaya yolu, kanal tünellerinde),
2. Tam kemer; hertürlü zeminde (çift hatlı demiryolu, 2-3 şeritli karayolu, yaya yolu tünellerinde),
3. Sivri kemer (yarım elips); çürük zeminlerde (kanal tünelde),

4. Yassı kemer; çok sağlam zeminlerde (çok hatlı demiryolu, çok şeritli karayolu, metro istasyonlarında),
5. Tam daire; çürük zeminlerde bukliye yönteminde (metro tüneline),
6. Dikdörtgen; Yüzeye yakın tünelde (metro istasyonlarında, çok katlı irtibatlı demiryolunda),
7. Özel tipler; tabakalar oluşturan kaya zeminde kullanılır.

Bu çalışmada ise kentiçi toplu taşıma grubuna giren metro hatlarında kullanılan tünel tipleri ve buna ilişkin inceleme ve değerlendirmelere ağırlık verilmektedir.

Tünel inşasından önce etüdünün yapılması gerekir, inşaatın yapılmasına karar verildiği günden işletmeye açılıncaya kadar yapılan her türlü iş etüd kapsamına girer. Önce tünel inşasıyla ilgili zemin özelliklerini ortaya koyan, zemin cinslerini ve sökme zorluğunu belirlemeye yarayan bir jeolojik etüd yapılır. 1m³ zeminin 1 aletle sökülebilmesi için gerekli işçi-saat sökme güçlüğü verir. Sökülen zeminin yerine ahşap kaplama yapılır ya da çimento püskürtülerek (shot-crete) zemin desteklenir, destekleme elemanlarına buvazaj denir.

Fay hatlarında ve suyla şişip anhidrite olan zeminlerde tünel yapılmamalıdır. Hidrojeolojik etüdlere önemlidir, heyelan açısından da yüzeysel drenaj yapılabilir. Havalandırma, pompaj ve ısklandırmaya ilişkin etüdlere yapılarak tünel geçkisi, boykesiti ve enkesitleri belirlenmelidir. Tünelin içinde direnime açık kesime göre daha fazladır, sabit direnime uygulamak için tünel direnimi kadar eğim azaltılır.

2 km'ye kadar olan kısa tünellerde direnime önemli değildir. İnşaa sırasında su dolarsa suyu pompayla dışarı atmak gerekir, bu da maliyeti etkiler, bu nedenle profilin suyu toplayıp atmaya uygun olması ve açılan çalışma kuyusundan iki tarafta ilerleme yönüne doğru iniş eğimi şeklinde verilmesi gerekir. Kısa tünellerde tünel açma çalışması tek yönde yapılır. Kuyunun derinliğinin artması maliyeti artırır, bir galeri ile yandan girmek de yaygın uygulanır. Açılan kuyular daha sonra havalandırma bacası olarak kullanılır. Boğaz teşkil eden nehir ve denizlerin altından geçişte eğim yanlara doğru çıkış eğimi şeklinde uygulanır, toplanan su pompajla atılır.

Tünelin araziye uygulanması (aplikasyonu) yeryüzü ve yeraltı olmak üzere iki şekildedir. Önce tünel başlarının bulunduğu yerler tesbit edilir, iki yöntem

uygulanarak bir yöntem diğeri ile kontrol edilir. Ortalama olarak 2 km’de 1 sondaj deliği açılır ve düşeyde kontrol yapılır, doğrusal tünellerde lazer ışınlarından faydalanılır. Tünel inşa edilirken birtakım etkiler gelir. Kaplamanın cins ve kalınlığının tesbiti, buvazaj elemanlarının belirlenmesi için bu etkilerin bilinmesi gerekir ki, bunların en önemlisi toprak itkisidir. Bu etkilerin belirlenmesinde zemin 3 gruba ayrılır, bunlar; çok çürük zeminde hidrostatik basınçlar aynen geçerlidir, daneli zeminler kumlu kil vb. kaya zeminlerdir, [3, 4].

Son 70 yılda dünya nüfusunun beklenenden çok daha hızlı bir şekilde artması büyük şehirlerde yapılan yeraltı kazılarını hızlandırmıştır. Kanalizasyon şebekeleri metro vb. için planlanan tünellerin emniyetli, ekonomik ve hızlı açılabilmesi ise mekanizasyonu gündeme getirmiş ve bu konudaki çalışmalar artmıştır. Bugün artık 7-8m çaplı bir tünelde eğer mekanize sistemler gereği gibi seçilmişse günde 30-40m’lik ilerlemeler olağan karşılanmaktadır. Birçok durumda şehirleşmenin getirdiği problemlerin çözümünde yeraltı yapılarının hızlı kazısı ve biran evvel devreye sokulmaları esas alınmaktadır. Çok özel koşulların dışında, şehirlerin altında delme patlatma kazı yöntemine müsaade edilmemesi roadheader veya tam cephe tünel açma makinelerinin (TBM) kullanılmalarını ön plana çıkartmaktadır. Bu tür kazı makinelerinin kazılacak formasyona uygun seçilmemeleri ise kazı maliyetini beklenenin çok ötesinde arttırmakta bazan da proje bitim sürelerini kabul edilemeyecek sürelere çıkarmaktadır.

Yeraltındaki raylı sistemler için hat yapıları genellikle delme tünel veya aç-kapa bazan da yukardan aşağı yöntemi ile yapılmaktadır. Son zamanlarda tünel açma makinesi (TAM) ile hat tünellerinin açılması daha yaygın bir uygulamadır. Genellikle Yeni Avusturya Tünel açma Metodu (YATM/NATM) ile istasyon, yolcu geçiş ve makas tünelleri açılmaktadır. Bu metodun amacı teknik açıdan sağlam ve ekonomik bir tasarım elde etmektir. NATM, tünel kazısını çevreleyen jeolojik formasyonu hem yük hem de yük taşıyıcı kemer olarak ele alır. Jeoteknik ölçümler kazı öncesi, kazı, kaplama öncesi ve sonrası aşamalarda titizlikle yapılır. Bu ölçümler seçilecek tünel kesiti, iksasız kazılacak mesafe, iksa elemanlarının boyutları ve sıklığı hakkında fikir verir.

NATM’nin tipik uygulaması iki ayrı iksa işleminden ibarettir. Bunlardan birincisi püskürtme betonu, kaya bulonları, çelik hasır ve ikinci kat püskürtme betondur. Zeminin durumuna göre bulonlara ve püskürtme betona yardımcı olarak sürekli veya

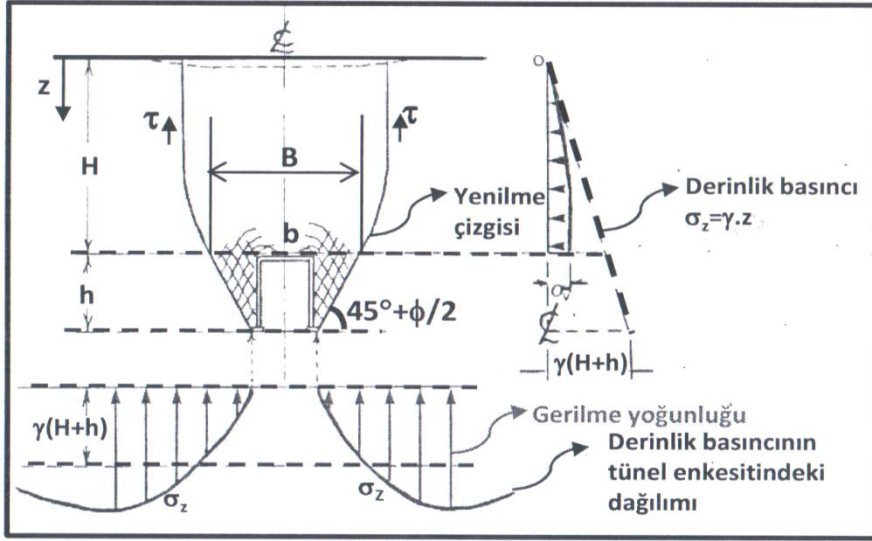
yerine göre elik putrel kemer konur. İkinci iksa olan son (i) kaplama tünel emniyet katsayısını arttırır, düzgün bir iyzey sağlar ve tünel kaplamasının su izolasyonunu arttırır.

Tünel inşa edilirken birtakım etkiler gelir. Kaplamanın cins ve kalınlığının tesbiti, buvazaj elemanlarının belirlenmesi için bu etkilerin bilinmesi gerekir ki, bunların en önemlisi toprak itkisidir.

Bu etkilerin belirlenmesinde zemin 3 gruba ayrılır, bunlar; çok çürük zeminde hidrostatik basınçlar aynen geçerlidir, daneli zeminler kumlu kil vb. kaya zeminlerdir. Daneli zeminler için en eski yöntemlerden biri Kommerell Teorisidir, burada kemerleşme eğrisi bir parabol olarak alınmıştır, itki kuvvetinde kohezyon dikkate alınmaz. Kirişlerden gelen yük hesaplanmakta, fakat kiriş cinsi ve aralığı belirsiz olduğu için Macar Harosy tarafından bağıntı değiştirilmiştir.

Maden ve inşaat mühendisliğinde açılan galeri/tünellerden gözlemlenen fiziksel bir gerçeğe göre, Tünel iksasına etki eden basıncın ‘ P_i ’ büyüklüğü derinlik basıncı olarak tanımlanan $\sigma_z = \gamma H$ ’dan daima küçüktür, daha açık deyişle $\frac{P_1}{\sigma_z} = \frac{P_1}{\gamma H} < 1$ dir. Bu olgu göçme mekanizması ile tanımlanan hacmin cidarlarında oluşan kayma gerilmelerinin varlığından kaynaklanır, **şekil 1.1**. Bu olaya kemerlenme denilir. Kemerlenme olgusunu sağlam fiziksel esaslara oturarak statik model ile ilk defa açıklayan Rus maden mühendisi Prof. Protodiakonov 1925’dir. Batı literatüründe ise Prof. Terzaghi 1943’dr. Dünya leğinde en kapsamlı tünel kitabının yazarı Prof. Szechy 1967 iki yaklaşım arasındaki kuvvetli benzerliği işaret etmiştir. Kemerlenme sonucunda tünel tavanında ‘basıncı ferahlaması’ oluşurken, yan cidarlarda ise ‘gerilme yoğunlukları’ gözlenir. Gerilme yoğunluğunun büyüklüğü daima derinlik basıncından σ_z daha büyüktür, [2]. Zemin cinsi önemlidir, anhidrit, serpantin ve bazı tür killerde zemin şişerek büyük hacim artışı olur. Çok kuvvetli elik kaplama ile biraz karşı konabilir.

Kaya zemine belli bir derinlikten sonra mutlaka rastlanır, kayada kohezyon çok büyüktür, itkilerin büyük kısmını karşılar. Hangi derinlikte ne zaman itkilerin kohezyonu aştığını hesaplamak gerekir. Genelde 1800-2000m derinden geçen bir tünel kaya tünel de olsa yıkılma tehlikesi vardır.



Şekil 1.1 : Derinliğe göre gerilme değişimleri.

Tehlikeli kısımlarda kaplama daha kalın yapılır, tünele dik gelen tabakalardan gelen itkiler büyüktür, birer kemer oluşturan tabakalardan gelen itkiler ise küçüktür. Kaya cinslerinin özellikleri de önemlidir. Kalkerlerin sökülmesi kolaydır, kaplamaya fazla itki vermez. Grelerin sökülmeleri kolaydır, yeraltı boşluklarına rastlanmaz. Şistler kaya tabakası halindedir ve tabaka aralarında kömür bulunabilir. Granitik kayaların sökülmesi zordur, kaplama önemli değildir, patlayıcı madde sarfiyatı normal grelerinkinin iki katını geçer.

1.3 Hipotez

Çalışmada; İstanbul'daki metro hatlarının ve tünellerin durumu, bazı şehirlerdeki metrolarla karşılaştırma, tünel açmada kullanılan başlıca yöntemler, İstanbul metro tünellerinde karşılaşılan jeolojik yapı, stabiliteyi sağlamak için alınan önlemler incelendikten sonra genel geçerliliği olan bazı yaklaşımlar ele alınarak farklı zemin cinsleri için meydana gelebilecek düşey ve yanal itkiler hesaplanıp, elde edilen sonuçlar çizelgelere taşınıp, karşılaştırılarak yorumlanmaktadır.

2. BAZI ŞEHİRLERDE VE İSTANBUL'DAKİ METRO HATLARI

Toplu taşımayı arttırmak için yapılan çalışmalar sonucunda raylı sistemlerin payının az da olsa arttığı görülmektedir. İş potansiyelinin etkisiyle göç oranının yüksek olması ile yoğunlaşan kent nüfusuyla birlikte şahsi araç kullanımındaki büyüme, ulaşımında plansızlığa yol açmaktadır. Meydana gelen plansızlık çok boyutlu olup, bunların başında kayıtlı araç sayısına kıyasla yaşanan otopark yetersizliği, yolların altyapı yetersizlikleri, trafik yoğunluğu, denetimin zorlaşması ve en son olarak da yaya-sürücü hatalarından kaynaklanan kazalar sonucu meydana gelen can ve mal kayıpları gelmektedir. Tüm bu olumsuzluklarla birlikte, lastik tekerlekleri taşıtlar, taşıma kapasiteleri bakımından raylı sistemlerden daha düşük kapasiteye sahip olmalarına rağmen, yatırım maliyetleri açısından büyük bir üstünlüğe sahiptirler. Bu üstünlük nedeniyle tercih edilen lastik tekerlekli toplu taşıma türleri, işletildikleri hatlarda talebi karşılayamaz duruma gelmeleri halinde yerlerini kaçınılmaz olarak raylı sistemlere bırakmalıdırlar. Var olan raylı sistemlere eklenecek yeni güzergâhlar ile birlikte yolcularda oluşacak, hedeflenen yere trafiğe takılmadan ulaşabilme algısı raylı sistemlerin daha cazip hale gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca raylı sistemlerin çevre dostu olmaları, onların kentsel ulaşımında baş aktör olmalarına imkân tanıyacak bir diğer önemli faktördür.

2.1 Metronun Diğer Raylı Sistemlerle Karşılaştırılması

Metro kentiçinde kullanılan diğer raylı sistemlere göre önemli farklılıklara sahiptir. Metronun diğer raylı sistemlerden temel farklılıkları;

Hafif metro-tramvay hatlarında maksimum eğim %6, ekstrem durumda %9'u geçmemelidir.

Minimum kurp yarıçapı tramvay-hafif metro için yapılan uygulamalarda 20-25 metre olanı vardır, ama yeni hatlarda en az 25 metre olmalıdır.

Metro araçlarının yolcu boşaltma kapasitesi hafif metro aracına göre 3-5 kat, otobüse göre 10-20 kat fazladır.

Dünyada yaklaşık 110 şehirde metro sistemi vardır. En fazla yolculuk Hong Kong Şehrinde 8’li trenlerle 120 saniye sefer aralıkları ile bir saatte 64000 yolcu, Sao Paulo şehrinde 6’lı dizi ile 90 saniye sefer aralıkları ile 60000 yolcu taşınmaktadır.

Tramvay–hafif metro aracının bir otobüse göre 2,5 kat, metro aracının ise 7 kat yolcu taşıma kapasitesi vardır. **Çizelge 2.1**’de tramvay, hafif metro ile metronun karşılaştırılması verilmiştir, [3].

Çizelge 2.1 : Tramvay hafif metro ve metronun karşılaştırılması.

Tür	Tramvay	Hafif Metro	Metro
Araç Kapasitesi (yolcu)	100-250	110-250	140-280
Araç Boyu (m)	14-35	14-54	15-23
Araç Genişliği (m)	2.2-2,7	2.2-3,0	2.5-3,2
Araç Sayısı	1-3	1-4	1-10
Tren Kapasitesi (yolcu/araç)	100-500	100-750	140-2400
Hat Kapasitesi (bin yolcu/saat)	4-15	6-20	10-70
Maksimum Hız (km/sa)	60-70	60-100	80-100
İşletme hızı (km/sa)	12-20	20-45	45-60
Acil Fren İvmesi (m/sn ²)	2-3,7	2-3	1,1-2,1
Maksimum İvme (m/sn ²)	1-1,9	1-1,7	1-1,4
Tek Hat Genişliği (m)	3-3,35	3,4-3,6	3,7-4,3
İstasyon Aralığı (m)	300-500	500-1000	500-2000
Yatırım Maliyeti (milyondolar/km)	5-10	10-50	40-100
Tam korumalı hat yüzdesi	0-40	40-90	100
Araç kontrolü	Manuel/görsel	Manuel/sinyal	Sinyal/otomatik
Elverişlilik	Düşük-orta	Yüksek	Çok yüksek

2.2 İstanbul Metrosu’nun Bazı Metrolarla Karşılaştırılması

Günümüzde yeraltı toplu taşıma sistemi olan kentler arasında Kuzey ve Güney Amerika’da New York, Boston, Chicago, San Francisco, Washington, Montreal, Toronto, Rio de Janeiro, Sao Paulo ve Santiago; Avrupa’da Londra, Atina, Barselona, Brüksel, Budapeşte, Kopenhag, Hamburg, Helsinki, Lizbon, Madrid, Milano, Münih, Napoli, Oslo, Paris, Prag, Roma, Sofya, Stockholm, Viyana ve Varşova; Rusya’da Moskova, Kiev, Leningrad; Ortadoğu’da İskenderiye, Bağdat ve Kahire; Hindistan’da Kalküta; Çin’de Pekin; Japonya’da Tokyo, Osaka ve Nagoya; Güneydoğu Asya’da Bangkok ve Singapur sayılabilir.

Çizelge 2.3'de ise metro sistemlerine ait açılış yılı, hat sayısı, toplam hat uzunluğu, istasyon sayısı ve iki istasyon arasındaki ortalama mesafeler verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler incelendiğinde metro anlamında İstanbul'da çalışmaların geç başladığı ve şu anki durumun çok yetersiz olduğu görülmektedir, [6].

Çizelge 2.3 : Metro sistemlerine ait veriler.

Şehir	Açılış Yılı	Hat Sayısı	Toplam Uzunluk	İstasyon Sayısı	Ortalama İstasyon Mes.
Londra	1863	11	408 km	275	1,48 km
Berlin	1902	10	146,3 km	173	0,85 km
Moskova	1935	12	305,7 km	185	1,65 km
Madrid	1919	13	282 km	272	1,03 km
New York	1904	9	713km	277	2,57 km
Tokyo	1927	13	304.5km	205	1.1km

Tren kapasiteleri ve hızlarıyla ilgili veriler ise **Çizelge 2.4**'de verilmiştir, [7].

Çizelge 2.4 : Metro trenlerinin kapasite ve hızları.

Şehir	Ort. Tren Kapasiteleri	Max. Hız	Ort. Hız
Londra	1260	70 km/h	33 km/h
Berlin	1350	72 km/h	30,7 km/h
Moskova	1600	72km/h	41,55 km/h
Madrid	1100	-	-
New York	1200-2400	89km/h	40km/h
Tokyo	1540	100/80km/h	-

2.3 Metroların Kullanım Oranları

Bu metropollerin kent merkez nüfusları, yıllık taşıdıkları toplam yolcu sayıları ve kent içindeki toplam toplu taşımada sahip oldukları pay incelendiğinde verilen sayıları değerlendirmek daha anlamlı olmaktadır, **Çizelge 2.5**, [8].

Çizelge 2.5 : Bazı metroların toplu ulaşımındaki yüzdeleri.

Şehir	Kent Merkezinin Nüfusu	Yıllık Yolcu	Toplu Taşımadaki %si
Londra	7,5 milyon	1,107 milyar	60
Berlin	3,5 milyon	508,9 milyon	-
Moskova	10,5 milyon	2,348 milyar	56
Madrid	3,2 milyon	642 milyon	64
New York	8,9 milyon	1,788 milyar	-
Tokyo	13,1 milyon	2,810 milyar	-

Londra, Madrid, Berlin ve Moskova Metroları'nın güzergâhlarında dikkat çeken en önemli unsur metronun ulaşım vasıtası olarak diğer ulaşım vasıtalarına büyük ölçüde ihtiyaç duymamasıdır. Bunun temel sebebi de metro ağının çok geniş alana yayılmasının yanı sıra, istasyonlar arasındaki mesafelerin yürüme mesafesinde olmasıdır, [9].

Hat üzerindeki istasyonlar arasındaki mesafeler dikkate alındığında 2 istasyon arası ortalama uzaklık 1 km'dir. İstanbul metrosundaki uzaklıklar da buna yakındır. Ancak gelişmiş metro ağlarının haritaları incelendiğinde bir hatta paralel veya dik olan diğer bir hattın üzerinde bulunan istasyon bu mesafeyi kısaltmakta ve bu durum metronun kullanım kolaylığını ve kalitesini arttırmaktadır.

İstanbul Metrosu'nu genişletme çalışmalarına bakıldığında bu hattın ihtiyaç doğrultusunda tek geçki üzerinde uzatıldığı görülmektedir. Bu durum metronun sadece o geçkiyi kullanan yolculara hitap etmesiyle sonuçlanmaktadır. Metro ağının tıpkı bir su şebekesi gibi farklı hatların kesişmesiyle dallanarak, genişletilmesinin sonucunda metronun diğer ulaşım vasıtalarına olan ihtiyacında azalma meydana gelecektir.

Gelişmiş metroların sefer sıklığı incelendiğinde 2 tren arasındaki sürenin yeni sinyalizasyon yöntemleriyle 1 dakikaya kadar indiği görülmektedir. İstanbul'da ise doruk saatlerde bu süre 4 dakikadır. Ancak bu durumun sebebi sinyalizasyonun yetersiz kalmasından ziyade İstanbul metrosunun diğer ulaşım vasıtalarına göre cazibesinin yeterli olmaması ve dolayısıyla talebin düşük olmasıdır.

Gelişmiş metroların araç kapasiteleri incelendiğinde ise 1 vagon kapasitesi 200-350 arasında değişmektedir. Ancak çoğunlukla 6, 7 ve 8 vagonlu trenler olduğu için kapasiteleri ortalama 1300 kişi olup oldukça yüksektir. İstanbul metrosu'nda ise 4

vagonlu trenler kullanılmaktadır. İleriki yıllarda metronun kullanım oranı arttıkça sefer sıklığı yerine vagon sayısını arttırmak kapasiteyi arttırmak için bir süre yeterli olacaktır.

Gelişmiş metroların bulunduğu metropollere kıyasla topografik yapısı çok daha engebeli olan İstanbul'da en derin istasyon 35m ile Taksim İstasyonu iken, Londra'da en derin istasyon 62m, Moskova'da 84m derine kadar inmektedir. İstasyon derinliğinin artması ise maliyeti arttırmakta ve kullanışlılığı azaltmaktadır. Yeni yapılan Kadıköy-Kartal hattında ise daha derin bir istasyon yer almaktadır.

İstasyon yoğunluğunu önlemek amacıyla alınan önlem ise istasyonun kapasitesini arttırmak yerine, yakın bölgelere yeni istasyonlar yapmak olmuştur. Bu amaçla Londra'da en az istasyon aralığı 260m, Moskova'da 502 m ve Madrid'de 546m mesafe bırakılarak istasyon inşa edilmiştir. İstanbul'da metro hatları yeni ve azdır, bunlar;

1. Tünel'den sonra şehirde yapılan ilk raylı sistem 1989 Eylül'ünde tamamlanan 8 km'lik Aksaray - Esenler arasındaki hafif metrodur. 1995 yılında tamamlanarak bu hatta eklenen Otogar-Yenibosna metrosu, 2000 yılında tamamlanan Taksim-4. Levent metrosu, 4. Levent-Hacıosman metrosu, 4. Levent-Taksim-Kabataş füniküler hattı ile Kartal-Kadıköy metrosu İstanbul'un bu anlamdaki raylı sistemleridir.

2. İstanbul Metrosunun halen yapımı devam eden Taksim-Yenikapı arasındaki kısmının uzunluğu 5,2km'dir. Bu projenin inşaat kısmı bitmek üzere olup, Haliç Köprü geçişinde Anıtlar Kurulu ile problemler nedeniyle aksamıştır.

3. Marmaray Projesinin ise İstanbul'un her iki yakasındaki mevcut banliyö hatlarını birbirine bağlamak, diğer geçişlere de imkân sağlamak amacıyla yapımı sürmektedir. İstanbul'un tarihi merkezindeki ana yerleşim ve ticari merkezlerinin daha güneydeki bir boğaz geçişi ile Asya yakasına bağlanması yolculara ve ekonomiye büyük avantajlar sağlayacaktır. Marmaray projesi bu amaçla önerilmiştir. Temelde proje, demiryolu tesislerini içeren bir boğaz geçiş projesi olup, Yenikapı'yı Sirkeci ve Üsküdar yolu ile Söğütluçeşmeye bağlamaktadır. Mevcut 2 hattın 3 hatta çıkartılarak, sistemin yüzeysel metroya dönüştürülmesi sistemin amaçlarındandır. Bu geçiş boğaz tabanına açılan bir hendek içine yerleştirilen demiryolu tüp tüneli ile gerçekleştirilecektir. Boğaz demiryolu geçişi yaklaşık olarak 13,3 km uzunluğundadır; 8,6 km'si karada delme tünel şeklinde, 1,8 km'si İstanbul Boğaz'ı altında batırma tüp tünel ve geri kalan 2,3 km'si ise iki uçta alıymanın mevcut

demiryolu hatlarıyla birleştiği yerde hemzemin olarak yapılacaktır. Marmaray Projesi 75.000 yolcu/saat/yön değerinde bir kapasite sağlarken, hattın 37 istasyonu olacak ve boğaz geçiş bağlantısına imkân sağlayacaktır, [4, 5].

4. Kadıköy-Kartal raylı toplu taşıma sistemi İstanbul'un Anadolu yakasında yapılmıştır. 22 kilometrelik güzergâh Kadıköy meydanında başlamakta ve D100 (E5) karayolu koridorunda orta refüjü takip ederek Kartal'a ulaşmaktadır. Sistem; boğazı gerek iyileştirilmiş bir vapur servisi ile gerekse Marmaray hattı ile geçen yolculara hizmet verecektir. Bu entegrasyon sayesinde, Avrupa Yakasına güvenli ve hızlı bir ulaşım sağlanacaktır.

Kadıköy-Kartal Raylı Sistem hattının iki yönde saatte toplam 70.000 yolcuya hizmet vereceği öngörülmektedir. Yolculuk sürelerinde kazanılan zaman, günde 100.000 yolcu saati geçmektedir. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi, 100 otobüs ve 4300 minibüs eř değerini doruk saatte D100 karayolundan çıkaracaktır. Bu, diğer karayolu araçlarına yaklaşık olarak %30 oranında daha fazla kapasite sağlayacaktır. İşletmeye açılan Kadıköy-Kartal hattında büyük hacimli istasyonlarda yolcu transferini kolaylaştırmak amacıyla, otobüs transfer kolaylıkları da dâhil edilecektir.

3. İSTANBUL'UN METRO TÜNELLERİNİN JEOLJİK YAPISI

Bu bölümde mevcut metro hatları kazı çalışmaları için yapılan etüdler sırasında karşılaşılan zeminlerin jeolojik yapısı ve problemleri üzerinde kısaca durulacaktır.

3.1 Stratigrafi

İstanbul Gurubu bölge çökel istifinin en alt kesimini oluşturmaktadır. Geneli Ordovisiyen-Karbonifer zaman aralığında gelişmiş pasif kıta kenarı çökelleri ile gelişen okyanusun kapanma evresinde depolanmış filiş istifinden oluşur. Daha yaşlı ünitelerle alt sınırı bölgede gözlenmez, [10].

Üstten Triyas, Üst Kretase-Alt Eosen, Orta Eosen-Alt Oligosen, Oligosen-Alt Miyosen, Üst Miyosen ve Kuvaterner çökel devreleriyle yerel olarak örtülüdür. Gurubun yaşlı kesimi yaygın olarak İstanbul Boğazı'nın doğu yakasında yüzeyler. Batıya doğru gurubun göreceli olarak daha genç kesimi yüzeyler. İstanbul Gurubu kendi içerisinde formasyon mertebesinde birçok litostratigrafik birime ayrılmıştır.

3.2 İstanbul-Kocaeli Yarımadası Paleozoyik İstifi

Doğu'da Gebze'den batıda Göller Bölgesi'ne kadar olan alanda Paleozoyik yaşlı oluşumlar oldukça yaygın görülürler ve temeli oluştururlar. İleri derecede kıvrımlı-kırıklı ve bindirmeli olarak görülen bu istif doğu alanda (Gebze çevresi) Triyas ve Üst Kretase yaşlı oluşumlar ile açılı uyumsuzlukla örtülmektedir. Batı alanda (Göller Bölgesi) ise kuzey kesimde Triyas, güneye doğru Eosen ve Oligosen-Alt Miyosen yaşlı istifler yine Paleozoyik yaşlı istif üzerine açılı uyumsuzlukla gelmektedir. Kuzeyde Karadeniz kıyı çizgisine koşut, Zekeriyaköy-Sarıyer-Şile çizgisi boyunca Paleozoyik yaşlı oluşuklar ve üstünde açılı uyumsuz bulunan Triyas yaşlı birimler, Üst Kretase yaşlı istif üzerine bindirmeli olarak gelmektedir.

Paleozoyik yaşlı sedimenter istif (İstanbul Grubu) en altta mor-kızıl rengi ile karakteristik yaklaşık 2000 m kalınlığındaki karasal ortamlarda depolanmış Alt Ordovisiyen yaşlı Kurtköy Formasyonu ile başlamaktadır. Üste doğru uyumlu olarak,

kıyı-plaj ortamında depolanmış Aydos Formasyonu'nun 20-100 m kalınlıklı Ordovisyen yaşlı kuvarsitleri gelmektedir. Transgresyon ile birlikte istif üste doğru uyumlu olarak, lagün-sığ denizel koşullarda depolanmış kuvarsit (kuvarslı feldspat arenit) aradüzey ve mercekli, gri-yeşil renkli lamine çamurtaşlarından kurulu Üst Ordovisyen-Alt Silüriyen yaşlı Gözdağ Formasyonu'na geçmektedir. Gözdağ Formasyonu'nun ince kırıntıları üzerine, yanal düşey geçişli olarak resif ortamında depolanmış Halysites fosilli, masif-tabakalı kireçtaşlarından kurulu Üst Silüriyen-Alt Devoniyen yaşlı Dolayoba Formasyonu gelmektedir. İstif üste doğru kırıntılı-fosilli lamine çamurtaşlarına geçmektedir, [11].

Devoniyen yaşlı Kartal formasyonu fosilli lamine çamurtaşları ile başlar üste doğru kırıntılı-fosilli kireçtaşı (kalsitüridit) ara düzey ve mercekleri baskın hale geçer. Çamurtaşı katmanlarının görülmemeye başlaması ile üste doğru şelf ortamında depolanmış Üst Devoniyen yaşlı Tuzla Formasyonu'nun masif-kırıntılı kireçtaşları ile başlayan (kalsitüridit) yumrulu kireçtaşlarına (kireçtaşı-çamurtaşı aralanması) geçmektedir. Bu birim üste doğru uyumlu olarak açık denizel koşullarda depolanmış Alt Karbonifer (Viziyen) yaşlı Baltalimanı Formasyonu'nun fosfat yumrulu radyolaritli çörtlerine geçmektedir.

İstif üste doğru tedrici ve uyumlu olarak benzer şekilde açık denizel koşullarda depolanmış ince-kaba kırıntılıların egemen olduğu kırıntılı kireçtaşı ara düzey ve merceklerinden kurulu Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu ile son bulmaktadır.

İstanbul Grubu olarak tanımlanan transgresif Paleozoyik yaşlı istif, kıvrımlanmış kıvrım geometrisi kırıklı-ezikli (normal-ters-doğrultu-bindirme fayları, sistem çatlak takımlı, budinajlanma vd.) yapısı ve diğer sedimanter özellikleri ile zaman içinde tektonik etkinliğin kesintili devamlılık gösterdiği ortamı yansıtmaktadır.

İstanbul Grubu günümüzdeki yapısal öğeleri ve üzerine açılı uyumsuzlukla gelen Mesozoyik-Senozoyik yaşlı istiflerin stratigrafik özellikleri ile en az iki kez sıkışma ve en az gerilme tektonik rejimleri etkisi altında kalmıştır. İstanbul ve çevresi için temel niteliğindeki Paleozoyik yaşlı istif alttan Silüriyen-Devoniyen'e kadar olan bölümü Çavuşbaşı-Balçık granodiyoritleri ve Tavşan Tepe kuvarslı diyoriti gibi sığ-derin magmatikler tarafından kesilmektedir.

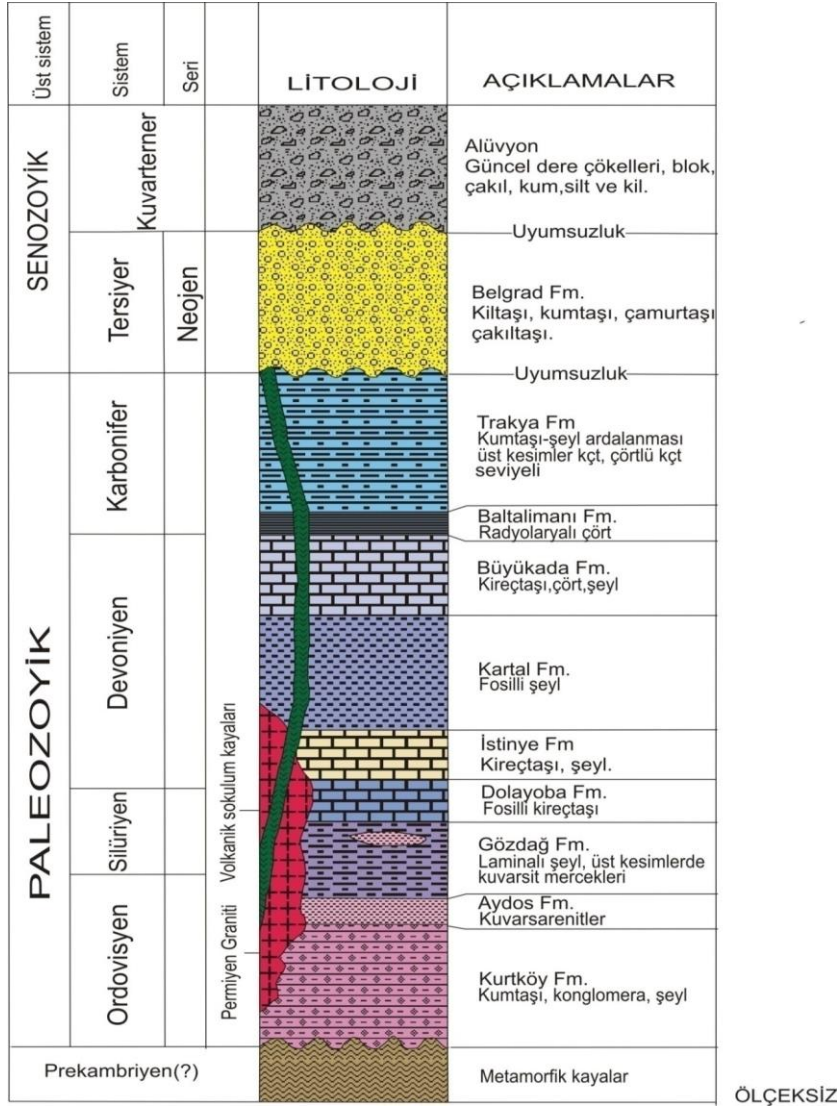
Bu oluşukluktan türeyen volkanik dayk ve sillerin paleozoyik yaşlı istifi çok yaygın bir şekilde kestikleri de bilinmektedir. İstanbul çevresinde bilinmeyen ve

günümüze kadar literatüre geçmemiş, diyabaz türü volkanik daykların türediğı, bazik sığ derinlikli kayaçlara da (mikrogabro) rastlanılmıştır. Paleozoyik birimler Karbonifer ve Kretasede magmatik sokulumlar ile kesilmiştir.

Bu magmatizma olayları sırasında kaya birimleri içine yaygın olarak andezit ve diyabaz daykları yerleşmiştir. **Şekil 3.1**'de İstanbul ve dolayının genelleştirilmiş stratigrafi kesiti verilmektedir.

İstanbul metrosunun 4. Levent-Şişli arasındaki bölümü yaklaşık 350 milyon yıl önce oluşmuş bir kaya ortamı içindedir. Bu kayaların %95i çökel, %5i magmatiktir. Çökel kayalar Trakya Formasyonu adı altında tanımlanırlar ve alt karboniferde oluşmuşlardır. Serinin tamamının güzergahta görülmemesi ile birlikte kalınlığın 2000m civarında olduğu önceki çalışmalarda belirtilmiştir.

Formasyon gelişigüzel sıklıkla diabaz ve andezit sokulumlarıtarafından kesilir. Çökel birimler fiş karakterinde olup, Hersinian ve Alpin dağ oluşumu dönemlerinde farklı yönlerde tektonik etkiler altında kalmıştır, [12].



Şekil 3.1 : İstanbul'un genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Akyüz, S).

Trakya Serisi'nin Alt Karbonifer yaşlı kesimi, fosfat yumruları içeren çört (radiolarit) tabakalarıyla başlamakta, bunun üzerine ardalanmalı olarak sıralanmış shale, kiltaş, grovak, turbiditik kumtaş, siltaş ve çamurtaş gibi klasik bir istif gelmekte ve bu anlamda asıl Trakya Formasyonunu oluşturmaktadır. İki km kalınlığındaki bu kırıntılı seri üzerinde yer yer onunla yanal geçişli olarak Cebeciköy Kireçtaş yer almakta bunun da üzerine çört-radiolarit, kumtaş, shale, grovak ve diabaz yatağından oluşan Gümüşdere formasyonu gelmektedir.

İri taneli kumtaşından başlayarak siltaş, çamurtaş, kiltaş ve bunların birbirleriyle çok farklı kombinasyonlarla ardalanmaları ile değişik varyasyonlarda ana çökel birim içinde arakatkılar halinde bulunmaları çökelme süreçlerinin farklılığının ve belkide dengesizliğinin sonucudur. Karakteristik çökelme yapılarından birçoğu kazılar

sırasında zaman zaman gözlenmiş olup, turbiditik ortam kanıtlarının büyük boyutlarda olanlarına rastlanmıştır.

Tabaka kalınlıkları en fazla 1.2m enaz ince laminalı olarak gözlenmişse de 5-25cm arası kalınlıklar %85 civarında paya sahiptir. Bazı bölgelerde litoloji değişikliği neredeyse her metrede farklı birim, sıklık ve çeşitlilikte oluşmuştur.

Çeşitli kırıntılı kayaç topluluğundan oluşan bu topluluğun çok yönlü olarak gelişen kırılma ve kayma düzlemleriyle düzenli dilimlenmiş, parçalanmış ve ezilmiş olduğu saptanmıştır. Formasyon düzensiz olarak magmatik sokulumlar tarafından kesilmiş olup, diabaz ve andezit en çok görülenidir. Diabaz ve andezitler dyke ve sill içiminde yerleşmişlerdir. Bunların kalınlıkları birkaç cmden onlarca metreye kadar değişmekteyse de 5m ortalama kalınlığın %75’lik bir payı vardır.

3.3 İstanbul’da Karşılaşılan Önemli Formasyonlar

3.3.1 Kurtköy Formasyonu

İstanbul Grubu Stratigrafik İstifi’nin temelini oluşturan Kurtköy Formasyonu genellikle mor ve alacalı renklerde arkozik konglomeralar, feldispatik litarenitler ile başlayıp üste doğru kumtaşı-şeyl ardalanması ve alacalı çakıltası sıralamasıyla istiflenmiştir. Kalınlığının 1000m. den fazla olduğu düşünülen bu çökellerin tabanı bugüne kadar herhangi bir yerde görülmemiştir, bu nedenle üyelere ayırmak mümkün değildir. Formasyon; Maltepe kuzeyi, Ümraniye doğusu, Alemdağ ve Kurtköy çevrelerinde geniş mostralara vermektedir, (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Kurtköy Formasyonu’nun ayrışmamış kesimleri (E-5 Karayolu kenarı).

3.3.2 Aydos Formasyonu

Ardalanan istiflerden oluşan Kurtköy formasyonu üzerine transgresif olarak yerleşmiş olan Aydos formasyonu kuvarsarenitler ile temsil edilmektedir. Aşınmaya karşı dayanımlı olması nedeniyle sözkonusu kuvarsarenitler, Kocaeli Yarımadası ve İstanbul çevresindeki Çamlıca, Kayışdağı, Aydos, Alemdağ ve Göztepe gibi tepelerin çoğunluğunu oluşturmaktadır, (Şekil 3.3). Farklı kuvarsarenit fasiyeslerinden oluşan Aydos formasyonu da 4 üyeye ayrılmıştır.



Şekil 3.3 : Aydos Formasyonu kuvarsitlerinin E-5 Karayolunda görünümü.

3.3.3 Gözdağ Formasyonu

Gözdağ formasyonu genellikle bozumsu ve yeşilimsi kahve renkli, şeyl-grovak ile temsil edilmekte olup bazı kesimlerde iyi çimentolanmış oldukça sert, bazı kesimlerde ise daha gevşek tutturulmuştur. Bol kuvars kırıntılı şeyl, feldispatlı vake, demirli arenit, Oolitik şamosit, kireç vaketaşlar gibi yer yer değişik fasiyeslerden oluşmuştur. Genel olarak tüm bunlar kirli, iyi boyplanmamış, az olgun kayaçlardır. Ordovisiyen çökelleri ile yanal ve düşey yönde geçişli olan Gözdağ formasyonunun kalınlığı ise bölgeden bölgeye değişkenlik arz etmektedir.

3.3.4 Dolayoba Formasyonu

Dolayoba formasyonu Üst Silüriyen'de çökelmiş olup, tümüyle kireçtaşıdan oluşmaktadır. Birim mavi-siyah, bozumsu, kahve renkli, sıkı tutturulmuş, sert, kalın tabakalı, ince kristal tanelidir. Genellikle alt seviyelerde Oolitik demir ile

bol crinoid kırıntılı ve yer yer ikincil olarak dolomitleşmiş bazen limonitli kireç vaketaşı ve çok az dolomitli kireç çamurtaşı fasiyesleri yer alır. Formasyon Dolayoba çevrelerinde, Soğanlık, Beykoz, İstinye, Ömerli, Tuzla ve Gebze Çevrelerinde oldukça geniş yayılımlıdır. Üst Silüriyen yaşlı Dolayoba formasyonunu Alt Devoniyen yaşlı Sedef formasyonu uyumlu olarak örtmektedir, (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Dolayoba Formasyonunun Soğanlık İstasyonu kazısındaki görünümü.

3.3.5 Kartal Formasyonu

Pendik, Kartal ve civarında geniş bir yayılımı sahip olan Kartal formasyonu litolojik olarak şeyl, grovak ve biyoklastik kireçtaşlarından oluşur ve bu litolojiler birbiri ile ardalanır. Şeyler sarımsı kahve renkli, düzensiz kırıklı, ince-orta tabakalı, sert, seyrek karbonatlı, ayrışma renkleri yeşilimsi sarıdır. Kireçtaşları koyu gri, açık mavi, sert, sıkı çimentolu, kristalleşmiş ve kalsitleşmiş damarlıdır. Grovaklar, yeşilimsi kahve renkli, sert, gözenekli, kırıklı ve orta tabakalıdır. Altta Kaynarca formasyonu ile yer yer geçişli ve konkordan, üstte ise Tuzla formasyonu ile konkordan ilişkilidir, (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Kartal Formasyonunun Yenisahra E-5 Karayolunda görünümü.

3.3.6 Denizliköy Formasyonu

İnce şeyl arakatkılı kireçtaşı, killi kireçtaşı, lidit ve yumrulu kireçtaşından oluşur. Haas (1968)'ın Tuzla Serisine karşılık gelir. Kaya (1973), birimi Büyükada formasyonu adı altında incelemiştir. Önalın (1981) Büyükada Formasyonu adını Tuzla Formasyonu olarak değiştirmesine karşın, Kaya (1973)'nın tanımladığı üyelerden ilk üçünü, adlarını değiştirmeden korumuştur. Haas (1968)'ın Tuzla Serisi Gebze ve Denizli formasyonlarını (Gebze schichten, Denizli schichten) kapsar. Gebze Formasyonu adıyla tanımlamış olduğu ince kumlu, killi, kırıntılı düzeyin, alttaki Kartal Formasyonu'nun kırıntılılarından çıplak gözle ayırtedilmesi oldukça güç olduğundan, Kartal Formasyonu kapsamında incelenmesi daha uygun görülmüştür. Tuzla yöresinde istifin üst kesimleri yüzeylenmemiştir.

Buna karşılık Denizli Köyü dolay, istifin bütününün yüzeylediği pek az yerden biri olan Denizli Köyü'nün adının, Özgöl (2005) tarafından istifin bütününü içerecek şekilde formasyon adı olarak kullanılması önerilmiştir. Denizli Köyü dolayında ve Şile'nin güneyinde yer alan Korucu Köyü'nün güneyinde Darlık Barajı' nın sağ yakasında istifin incelemeye elverişli yüzeylemeleri yer alır.

Rumelihisarı dolaylarında, Beylerbeyi-Üsküdar arasında ve Büyükada'nın güney kesimlerinde formasyonun çeşitli düzeyleri yüzeylenmektedir. Başlıca şeyl arakatkılı kireçtaşı, killi kireçtaşı, lidit ve yumrulu kireçtaşından oluşan formasyon, alttan üste doğru "Tuzla Üyesi", "Yörükali Üyesi", "Ayineburnu Üyesi" ve "Baltalimanı Üyesi" olmak üzere 4 üyeden oluşur.

Alttan üste doğru ardalanmış çörtlü kireçtaşı, çört-şeyl ve yumrulu kireçtaşından oluşan Büyükada Formasyonu ile fosfatik yumrulu radyolaritlerden oluşan

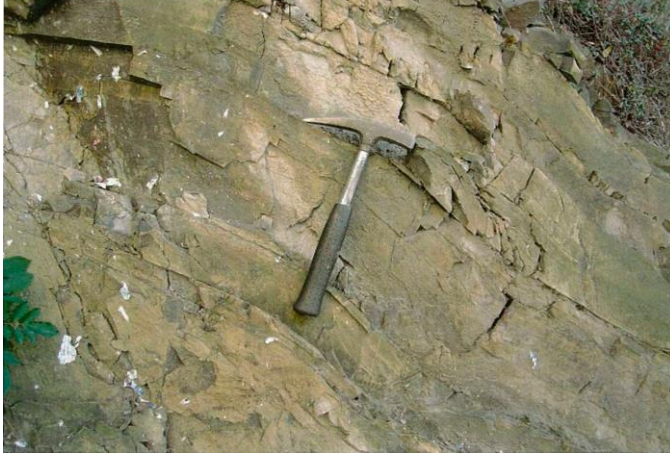
Baltalimanı Formasyonu, ortak özellik olarak çört-radyolarit kapsamları ve her yerde kolay ayırtlanamamaları nedeniyle “Denizliköy Grubu” olarak değerlendirilmişlerdir. Birim, adını aldığı Denizliköy (Gebze kuzeydoğusu) dolayında yaygın olarak yüzeyler. Denizliköy Grubu’ nu oluşturan birimlerin yaş aralığı geç Eyfeliyen’ den başlayıp Turneziyen’de sona ermektedir.

3.3.7 Trakya Formasyonu

Trakya formasyonu, İstanbul Paleoziyik arazisinin üst birimini oluşturmakta ve genellikle İstanbul Boğazı’nın batı yakasında yer almaktadır. Boğazın doğu yakasında, Üsküdar, Kadıköy, Maltepe kıyı bölgesinde ve Beykoz kuzeyinde de gözlenmektedir; ayrıca Kocaeli yarımadasında, Darıca, Gebze, Denizliköy dolaylarında mostralar vermektedir. Genelde boz-sarımsı kahverenkli, grovak-kiltaşı-silttaşı ardalı ile temsil edilen Trakya formasyonu olarak adlandırılmıştır.

Trakya serisinin alt seviyeleri, fosfat yumruları içeren radiolerit tabakalarıyla başlamakta, bunun üzerine menavebeli olarak sıralanmış şeyl, kiltası, kumtaşı, grovak, türbiditik kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı gibi klasik bir istif gelmekte ve bu istif dar anlamda asıl ‘Trakya Formasyonu’ nu oluşturmaktadır. Yaklaşık 2000ö. Kalınlığındaki bu klasik seriyi meydana getiren çeşitli tortul kayaç tabakalarının kalınlıkları genel olarak 5 cm ile 50 cm arasında değişmekte, bazı kısımlarda ise, özellikler kumtaşlarında tabaka kalınlığı 50 ila 100 cm’yi bulmaktadır.

Ayrıca bu tortul istif içerisine yer yer andezit ve diyabaz damarları veya silleri de sokulmuştur. Fliş veya molaz niteliğindeki Trakya formasyonu önce Hersiniyen orojenez döneminde ve daha sonra Alpin dönemde şiddetle deforme olmuş, kıvrılmış, kırılmış, farklı doğrultularda çatlak sistemleri ve kayma düzlemleriyle parçalanmıştır. Trakya formasyonu, Devoniyen yaşlı yumrulu kireçtaşları üzerinde uyumlu olarak görülür. Birim üstten yer yer Belgrat formasyonu ile diskordans olarak örtülmektedir, (**Şekil 3.6**).



Şekil 3.6 : Trakya Formasyonunda orta-kalın tabakalı grovakların görünümü.

3.3.8 Belgrad Formasyonu

İstanbul ve çevresinde özellikle geniş mostralar sunan birim kırmızı renkli kum ve çakıllarla temsil edilir. Kırmızı renkli kum ve çakıllarla temsil edilen birim tabanda çoğun konglomeratik bir seviye ile başlar. Yer yer 5-10 cm. çaplı iyi yuvarlaklaşmış çakılla içermekte olup polijenik karakterlidir. Kötü boylanmalı, az çimentolu bu nedenle dağınıktır. Konglomeralar yer yer tümüyle kuvars tanelerinden oluşan kumtaşı içermekte bunlar belirgin çeşitli türde çapraz tabaklanma örnekleri sunmaktadır. Egemen litoloji olarak kil, kum ve çakıl vardır.

Killer açık yeşilimsi, sarı renkleri ile dikkat çekmekte, çakıllı seviyeler arkoz, kuvarearent, kireçtaşı ve grovaka ilave olarak kuzeyde volkanik çakıllardan oluşmaktadır. Birim içinde yer yer ince kömür seviyeleri vardır. Belgrad formasyonu alt sınırında bütün birimleri diskordans olarak örten birim niteliğindedir, (**Şekil 3.7**).



Şekil 3.7 : Göztepe Kavşağı yakınında Belgrad Formasyonu'nun mostra görüntüsü.

3.3.9 Alüvyon

Alüvyon çökelleri yaklaşık olarak 50 m.'lik bir kalınlığa sahip çakıl, kum ve killerden oluşan sediment yığılması niteliğindedir. İstanbul bölgesinde tüm kıyılar boyunca özellikle kıyıya ulaşan vadilerde, akarsu yatakları çevresinde yaygın olarak izlenir.

3.4 Değerlendirme ve Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

3.4.1 Jeolojik yapının değerlendirilmesi

İstanbul'un jeolojik yapısı meydana gelen bir çok olaydan ötürü oldukça karmaşıktır. Bunun başlıca sebebi stratigrafik istifte birbirine çok benzeyen birimlerin tekrarlanması, kılavuz düzeylerinin seyrek ve kolay tanınır olmaması, üstlenen orojenik hareketler, interferans kıvrımları, çok sayıda faylar ile andezit veya diyabaz dayklarının sokulması olarak sıralanabilir. Ayrıca yerleşim bölgelerindeki örtü veya dolgular da yapısal unsurların izlenmesini güçleştirir. Farklı doğrultulardaki kıvrımlar veya interferans kıvrımlarıyla yatay ve düşey kesitte, oluşan geometri oldukça karmaşıktır. İstanbul ve çevresinde görülen paleozoyik yaşlı kayalar oluşumundan sonra çeşitli dönemler tektonik deformasyonlara uğramıştır. Tektonik açıdan; birinci zaman içinde önce Kaledonien Orojenezi ile kıvrılmış, sonra Karbonifer'e kadar süren bir kara safhasını takiben yeni bir tortullaşma ve ardından Hersiniyen Orojenezine maruz kalmıştır.

Daha sonra yine uzun süren bir kara (aşınma) safhası mevcut olup, Üst Kretase'de tektonik hareketler, bu devir denizleri içinde geniş bir denizaltı volkanizma faaliyetlerine sahne olmuştur. Yer yer görülen andezit filonları bu faaliyetlerin sonucudur. Daha sonra da Alp Orojenezi etkisini göstermiştir. Bu etki Üst Kretase yaşında bir şaryaj şeklinde görülür. Şaryaj hattı Ömerli köyü kuzeyinden itibaren doğu-batı doğrultusunda uzanan bir şerit halinde İstanbul Boğazını keserek Zekeriyaköyün batısına kadar uzanır. Şaryaj düzlemi genel olarak güneye eğimli olup, Boğaz suları altından Marmara'ya doğru "V" şeklinde dalmaktadır. Bu nedenle kayalar grupları bindirme ve faylanmalarla taşınmıştır. Formasyonların çoğunun sınırları tektoniktir. İstanbul ve Kocaeli yarımadası ile Marmara Denizi çevresini etkileyen ve Kuzey Anadolu Fay Zonu bölgede çeşitli deformasyonların oluşumuna neden olmuştur.

Marmara Denizi'nin açılımına bağılı olarak İnceleme alanı ve çevresinde kuzey-güney yönlü kompres başlamıştır. Halen güncel olan bu tektonik rejim küçük göl ve akarsu havzaları oluşturmuştur. Sultanbeyli formasyonu bu şekilde oluşmuştur. İstanbul ve çevresinde görülen paleyozoyik yaşlı kayaçlar oluşumundan sonra çeşitli dönemler tektonik deformasyonlara uğramıştır.

Tektonik açıdan; 1. zaman içinde, önce Kaledonien Orojenezi ile kıvrılmış, sonra Karbonifer'e kadar süren bir kara safhasını takiben yeni bir tortullaşma ve ardından Hersiniyen Orojenezine maruz kalmıştır. Daha sonra yine uzun süren bir kara (aşınma) safhası mevcut olup, Üst Kretase'de tektonik hareketler, bu devir denizleri içinde geniş bir denizaltı volkanizma faaliyetlerine sahne olmuştur. Yer yer görülen andezit filonları bu faaliyetlerin sonucudur. Daha sonra da Alp Orojenezi etkisini göstermiştir. Bu etki Üst Kretase yaşında bir şaryaj şeklinde görülür, [13].

Şaryaj hattı Ömerli köyü kuzeyinden itibaren doğu-batı doğrultusunda uzanan bir şerit halinde İstanbul Boğazını keserek Zekeriyaköyü batısına kadar uzanır. Şaryaj düzlemi genel olarak güneye eğimli olup, Boğaz suları altından Marmara'ya doğru "V" şeklinde dalmaktadır. Bu nedenle kayaç grupları bindirme ve faylanmalarla taşınmıştır. Formasyonların çoğunun sınırları tektoniktir.

İstanbul ve Kocaeli yarımadası ile Marmara Denizi çevresini etkileyen ve Kuzey Anadolu Fay Zonu bölgede çeşitli deformasyonların oluşumuna neden olmuştur. Marmara denizinin açılımına bağılı olarak İnceleme alanı ve çevresinde kuzey-güney yönlü kompres başlamıştır. Halen güncel olan bu tektonik rejim küçük göl ve akarsu havzaları oluşturmuştur. Sultanbeyli formasyonu bu şekilde oluşmuştur.

Tünele gelen etkileri açıklayabilmek için önce kayaç türlerinin tünel açılması sırasındaki davranışlarına ve yapılması gereken ilk jeolojik incelemelere kısaca değinmek gerekir, [1].

-Kalkerler: Tünel açımında eğer kalker ile karşılaşılırsa bu tür kayalarda paylayıcı cinsi daha fazla tüketilmemektedir. Fakat yeraltında sulu bölgelerde oluşan boşluklar tünel açısından sorun yaratabilir.

-Greler: Bu tür kayaların sökülmesi kolaydır. Yeraltında boşluk oluşumlarına fazla rastlanmaz. Çatlaklı olmadığı zaman büyük basınç oluşturmaz.

-Şistler: Bu tür kayaların en büyük sakıncası sudan etkilenip şişme yapmasıdır. Böylece yeni basınç değerlerinin oluşmasına neden olur. Ayrıca bu tür kayalarda gaz birikintisi oluşabilir.

-Granit Kayalar: Tünel açma çalışmalarında en uygun kayaçların başında gelir. Fakat bu kayaçlarda patlayıcı tüketimi fazladır.

-Volkanik Kayaçlar: Bu tip kayalarda da patlayıcı madde kullanımı oldukça fazladır. Kayalar içinde ayrılmış tuf tabakaları ve su kaynaklarına rastlanabilir.

3.4.2 Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

Mühendislik jeolojisi çalışmalarında genelde ortamın litoloji, süreksizlik özellikleriyle, su durumu incelenmektedir. Tünel kazıları sırasında karşılaşılan jeoloji, ilerlenen yaklaşık her iki metrede bir 1/50 ölçekli enkesit raporlarına geçirilmekte ve bunu takiben 1/200'lük açılım ve boykesit ile 1/500'lük haritalara dönüştürülmekte, kaya sınıflamaları yapılmakta olup, birçok verinin bir anda görülebildiği grafik ve projeksiyon yöntemlerinden de yararlanılmaktadır.

Tünel ilerlemesine yönelik öngörmeler ve kazı yöntemi seçimi ile ilgili öneriler de konu kapsamında yer alır. Değişen koşullarda tünel destekleme tipinde değişiklik ve düzenlemeler, jeolojik durum ve kazı ilerleme ile yüzeydeki yapılaşma değerlendirmesi sonucunda ortaya çıkmakta olup, bu değişiklikler yeryer çok kısa aralıklarla çoğu zaman da oldukça duyarlı bir düzende sürdürülmektedir, [10]. Derin kazılar sırasında karşılaşılan jeolojik, anolar için hazırlanmış enkesit raporlarına kaydedilmekte, daha sonra bunlar birleştirilerek her duvar için büyük kesit (en ve boy) haline dönüştürülmektedir. Taban için jeolojik plan ve haritalar hazırlanmakta, kazı hızı ile ilgili olarak iş programında düzenlemeler yapılabilmektedir. Bu çalışmalarda ortamın süreksizlik özellikleri öncelikli olarak incelenmektedir. İstanbul Metrosunda yapılan ölçümler [14];

- Tünel içinde yapılanlar: Şerit extensometre, opto trigonometrik,
- İstasyon ve civarında yapılanlar: İnklinometre, yük hücresi, optik,
- Yüzeyde yapılanlar: Yüzey ve bina oturmaları, çok katlı çubuk extensometre ve çatlak ölçümleri yapılmıştır.

Tünellerde zemin sert kayadan sulu ince kuma kadar değişik cinsten bulunabilir, sert kaya tünel inşası en kolay olanıdır, zemin kendini tutar ve esaslı iksaya gerek olmaz. Islak kil, şist, killi şist, su ile doymuş kompakt olmayan kum ve ince çakıl, balçık vb. zeminler çalışmayı ve ilerlemeyi zorlaştırır. Bu nedenle önce jeolojik etüdlerin yapılması gerekir.

Yeraltına veya yerüstüne yapılacak herhangi bir yapının inşa edileceği zemin araştırılmalıdır. Özellikle yeraltı yapıları için yapılan ilk çalışmalar aşağıda özetlenmiştir, [15].

- Et de önce bölgenin topografik ve jeolojik haritaları üzerinde başlanır.
- G zerg h arazi üzerinde tespit edilir ve incelemeye geçilir.
- Bölgenin yeraltı suyu araştırmaları, su kaynakları, yüzey tespiti mümkün zemin türleri vb. araştırılır.
- Sondaj yerleri ve derinlikleri tespit edilir.
- Civarı daha önceden açılmış olan tünel, galeri, kuyu gibi yapılara ait dosyalar temin edilerek incelenir.
- Tünel giriş-çıkışı ve buralara gelen yükler, olması muhtemel kaymalar, örtü kalınlığı, hidrojeolojik şartlar, ısı, gaz problemleri ayrı ayrı ele alınır.
- Kazılacak malzemenin fiziko - mekanik özellikleri saptanır.
- Kullanılması uygun kazı yöntemleri ve makineler kararlaştırılır.
- Destek türleri ayrıntılarıyla araştırılır ve belirlenir.
- Gerekli sondajlar yapılarak numuneler alınır ve analizleri yapılır.

 n jeolojik çalışmalar planlanmaya paralel olarak her yönde derinleştirilir, ayrıntılı jeolojik çalışmalara geçilir.

- Tünel içinde bulunması olası olan kayaçların derinlikleri tespit edilir.
- Kayaçların litolojik ve yapısal karakterleri belirlenir.
- Mekanik  zellikleri, ayrışma ve kazılabilme nitelikleri saptanır.
- Kayaçların yeraltı sularının etkisi ile erime, oyulma özellikleri incelenir.
- Kayaçların şişme-kabarma özellikleri saptanır.
- Tünel güzergâhı üzerindeki binalarda çatlama oluşabilme durumu incelenir.
- Kazılabilme dereceleri, kazı makinesi türleri ve destek türleri saptanır.
- Yapılan ayrıntılı çalışmaların sonunda, önce harita üzerinde saptanan tünel güzergâhı gerektiğinde değiştirilir ve yeni güzergâh belirlenir.

- Kazılabilme dereceleri belirlenerek uygun kazı makinesi türlerini ve destek üniteleri seçilir.

Bu çalışmalar ve deneylerin ışığında, tünelin şekli ve çapı tayin edilir. Planlar hazırlanır, daha kesin maliyet hesapları yapılır.

Çalışmalar, mühendisin güzergâh araştırmalarına yetecek genişlikte bir alanı kapsamalı ve daha sonra ilave etütlere ihtiyaç duyulmayacak şekilde yapılmış olmalıdır. Ekonomik çalışmalarda tünelin maliyet analizi yapılır ve 1 m tünelin maliyetinin ne olacağı hesaplanır. Tünelcilikte maliyeti etkileyen temel etkenler [16];

- Tünel güzergâhının jeolojik ve hidrojeolojik durumu,
- Tünel desteklemesi ve destek türü,
- Tünelin yüzeyden derinliği,
- Tünelin uzunluğu, çapı ve şekli,
- İşçilik,
- Çalışılan günler ve makine arızalarıdır.

4. METROLARDA KULLANILAN T ÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Madencilik ve inşaat sektöründe yeraltı yapılarının önemi, teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir, [17].

Hızlı nüfus artışı büyük şehirlerde yapılan yeraltı kazılarını hızlandırmıştır. Kanalizasyon şebekesi, metro vb. için planlanan tünellerin emniyetli hızlı ve ekonomik açılabilmesi için mekanizasyon çalışması artmıştır. 7-8m çaplı bir tünelde eğer mekanize sistemler gereği gibi seçilmişse günde 30-40mlik ilerleme olağan sayılmaktadır. Çok özel koşulların dışında şehirlerin altında delme-patlatma kazı yöntemine müsaade edilmemesi roadheader veya tam cephe tünel açma makinelerinin (TBM) kullanılmalarını ön plana çıkarmaktadır. Bu tür kazı makinelerinin kazılacak zemine uygun seçilmemeleri ise kazı maliyetini beklenenin çok ötesinde arttırmakta bazen de proje bitim süresi artmaktadır. Tüneli kazdıktan sonra, hemen prekast beton kaplamayı yerleştirmesi başka bir yararadır. Özellikle metro tünellerinde, tünel kazısı bittikten sonra ray döşenmeye başlanabilir ve hemen elektro-mekanik sistemin parçaları tünele yerleştirilebilir, [18]. Bu alanda kullanılan makinelerin çok özel yapıda olması ve ülke genelinde az sayıda bulunması vb. nedenlerle mesleğin uygulanması için özel eğitim gerekmektedir. Bu meslekte kullanılan makine ve ekipmanların ülkemizde üretimi yoktur. Ekonomik üstünlüklerinin yanı sıra tünel açılması işlerinde, patlayıcı madde ile yapılacak bir çalışmanın mümkün olmadığı yerler ile meskun mahallerin altına gelen daha az derin kısımlarda, tünel ve kanal açma işlerinde tünel açma makinelerinin kullanılması adeta bir zorunluluk haline gelmektedir. Dolayısıyla patlayıcı madde kullanılmasındaki bütün emniyet tedbirlerine de gerek kalmamaktadır. Bunun yanında galeri duvarlarını düzgün açması da önemli bir üstünlüktür. Ayrıca tünel açma makinelerinin bir diğer önemli yararı da dinamitleme yöntemindeki kaçınılmaz olan arazi çatlatılmasının meydana gelmeyişi ve galeri yüzeyinin çok daha düzgün bir şekilde açılabilmesidir. Bunların sonucunda destekleme işi hafifler ve yapımı da kolaylaşır. **Şekil 4.1**'de tünel açma makinesi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Tünel açma makinesi (TBM/TAM).

4.1 Delme Tünel Yöntemi (Tünel açma makinesi ile)

Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri (TBM/TAM) tasman gibi istenilmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Son 50 sene içinde büyük gelişim gösteren bu makineler gittikçe artan bir sayıda kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de yalnızca madencilikte değil inşaat mühendisliği alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makineler düşük dayanımlı kayaçlardan orta sert dayanıma kadar olan formasyonlarda kullanılmaktadır. Farklı ihtiyaçlara göre dizayn edilmiş TBM tipleri bulunmaktadır; “Hardrock TBM, Slurry TBM, Gripper TBM, EPB shield TBM, Double shield TBM, Single shield TBM, Mix shield TBM”. Kanalizasyon, ulaşım ve benzeri amaçlarla tünel ve kanal açılması ihtiyacı, bu işlerle uğraşan müteahhit firmalarını, bugüne kadar sadece madencilığe mahsus olan “yumuşak ve sert taşlarda tünel açma problemi” ile karşı karşıya bırakmıştır. Bunun sonucu olarak çok yakın zamanlarda da, özellikle inşaat mühendisliği açısından, gene en sert taşları bile delip geçmek için “sert kayaç makinelerinin gelişimi kaçınılmaz bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış bulunmaktadır, [19].

Ayrıca bu makinelerle galeri ilerleme randımanı artmış, tünel açma maliyeti de azalmıştır. Yine direkt makineye bağlı olmamakla birlikte bir diğer üstünlüğü de nakliye, havalandırma, su atımı vs. gibi çeşitli donanımların bir yeni kullanma alanı için daha çabuk serbest kalmaları, dolayısıyla onlara yatırılan sermayeden çok daha iyi yararlanabilme olanağının doğmuş olmasıdır.

Ekonomik üstünlüklerinin yanı sıra tünel açılması işlerinde, patlayıcı madde ile yapılacak bir çalışmanın mümkün olmadığı yerler ile meskun mahallerin altına isabet eden az derin kısımlarda, tünel ve kanal açma işlerinde tünel açma makinelerinin kullanılması adeta bir zorunluluk haline gelmektedir. Dolayısıyla patlayıcı madde kullanılmasındaki bütün emniyet tedbirlerine de gerek kalmamaktadır. Bunun yanında galeri duvarlarını düzgün açması da önemli bir üstünlüktür.

Ayrıca tünel açma makinelerinin bir diğer önemli avantajı da dinamitleme yöntemindeki kaçınılmaz olan arazi çatlatılmasının meydana gelmeyişi ve galeri yüzeyinin çok daha düzgün bir şekilde açılabilmesidir. Bunların sonucunda tahkimat işi hafifler ve yapımı da kolaylaşır.

Tüneli kazdıktan sonra, hemen prekast beton kaplamayı yerleştirmesi başka bir avantajdır. Özellikle metro tünellerinde, tünel kazısı bittikten sonra ray döşenmeye başlanabilir ve hemen elektro-mekanik sistemin parçaları tünele yerleştirilebilir.

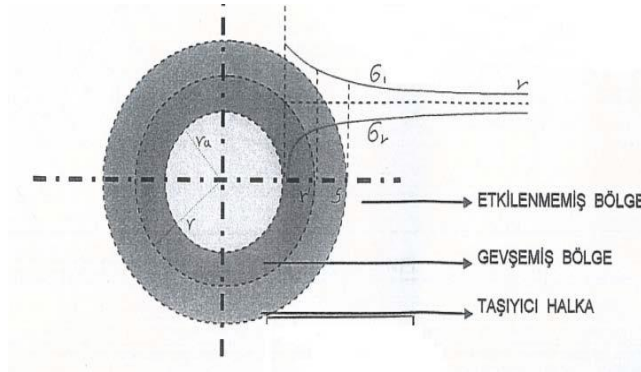
Bu alanda kullanılan makinelerin çok özel yapıda olması ve ülke genelinde az sayıda bulunması vb. nedenlerle mesleğin uygulanması için özel eğitim gerekmektedir. Bu meslekte kullanılan makine ve ekipmanların üretimi ülkemizde gerçekleştirilmemektedir.

4.1.1 Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM)

NATM önce Avusturya, Fransa, Almanya, İsviçre ve İtalya’da uygulanmaya başlanmış, bu yöntemin dünyaya yayılması hızlı olmuştur. İlk uygulamalarda biri olan Frankfurt Metrosunda tünel açımına 1969 yılında iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kum taşında başlamıştır. Bu yöntem Japonya’daki Seikan Tüneli’nde de başarı ile uygulanmıştır. Bir başka başarılı uygulama Mexico City’deki Emisor Central kanalizasyon tüneline olmuştur. İstanbul Metrosu Tünelleri yapımında da bu metod halen kullanılmaktadır, [20].

Bu tünel açma yönteminde ana ilke; en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşan ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlımlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasını sağlamaktadır.

Yöntemin amacı, kazı sonrasında oluşan dağ basıncına, mutlak rijit sistemlerin tepkime kuvvetleri ile karşı koymak değildir. Bu nedenle, rijit tahkimat elemanları ve kalın kaplamalar kullanmak gerekmez. Bunlar ancak yöntemin yeterli hız ve titizlikle uygulanamadığı ve dolayısıyla, kayanın taşıma niteliklerinin tümüyle yitirildiği veya aşırı derinliklerde, ya da yüksek tektonik gerilmelerin etkili olduğu plastik ortamlarda zorunlu olarak devreye girer. Açma alışması sırasında ikincil deformasyon ve gerilmelerin yeterli ölçüm ve gözlemlerle izlenerek aım çalışmalarının denetlenmesi ve yönlendirilmesi gerekmektedir. şekil 4.2'de Natm yk etki diyagramı gösterilmiştir, [21].



şekil 4.2 : NATM yk etki diyagramı.

NATM, yeni bir tünel açma metodu değildir. Tünel inşaatının her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir felsefedir. Diğer yöntemlere göre kazı kısmında değil, destekleme ve kabuk kısmında bir değişiklik söz konusudur [8]. Bu sistemde birincil destekleme elemanlarının inşaa edilmesinden sonra ortaya çıkabilecek zemin deformasyonları ve hareketlerinin sona ermesinden sonra ikincil destekleme sisteminin inşaasına geçilmesi öngörülmüştür.

Bu durumda zeminden gelen basıncın, birincil destekleme sistemi ile desteklendiği düşünüldüğü için, kaplama betonuna yük aktarımı olmayacağı kabul edilmektedir. NATM, tünel zeminine uygun oranlarda donatı ve kaplama malzemesi kullanılır.

Etkileşme ve kaplama basınçlarının yakından izlenmesi yöntemin önemli bir kısmını oluşturur. Uygulama yavaş olmasına karşın tünel zemini deplasmanları ve iksa miktarları minimum seviyeye indirilerek, sonuçta ekonomik bir uygulama gerçekleştirilmiş olur, **Şekil 4.3'** te örnek uygulama görülmektedir, [22].



Şekil 4.3 : NATM ile tünel açılması.

NATM’de tünel zeminine uygun oranlarda donatı ve kaplama malzemesi kullanılır. Bunda kullanılan desteğin esnek olmasının iki anlamı vardır. Mekanik olarak esnektir ve uygun bir membran rolü oynayarak kaya sıkışması esnasında deforme olur.

Bu tip iksa, çok yönlü olup, lokasyondan lokasyona değişecek iksa gereksinimlerine göre ayarlanması yapılabilir. Tek sistem alternatifi basittir ve daha az beceri, kontrol, araştırma, izleme ve test etme gerektirir. Tünel zemin koşullarının üniform ve iyi bilindiği durumlarda küçük çaplı kısa tünellerde, bu sistem iyi sonuç verir. NATM koşulların değişen olduğu ve iyi bilinmediği büyük çaplı uzun tünellerde daha iyi sonuç vermektedir.

4.2 Aç-Kapa Yöntemi

Bu yöntemle raylı sistemlerin işletme yapısı yapıldığı gibi, genellikle metro tünellerinin geçkisinin ana yolların altından geçirilebildiği yüzeye yakın kısımlarında, yer altı geçitlerinin inşası vb. gibi yerlerde de kullanılır. Önce yapı yapılacak bölgede kazı yapılır. Bu arada zemin farklı yöntemlerle desteklenir. Yapının inşasından sonra üzerinin örtülmesi basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde önce kazı boşluğunun yanları betonarme kazık veya beton duvar perdesi ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır, **Şekil 4.4**, [23].



Şekil 4.4 : Kirazlı ve İkitelli İstasyonları aç-kapa tünel çalışması.

Kenar ayakların örülmesinde hiçbir özellik yoktur. Tamamen açık havadaki duvar örme usullerine göre yapılır. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur. Bu kemer de açık havada oluşturulduğundan fazla güçlükle karşılaşılmaz. Eğer yer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir, **Şekil 4.5**.

Yeraltı suları yüzeye yakınsa yer altı su seviyesi düşürülür veya su derin kuyulara drene edilir, [21].



Şekil 4.5 : Aç-Kapa tünel çalışmasında tavanın kaplanması.

Yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi zararları nedeniyle pek tercih sebebi değildir. Trafiğin gidişatını engellemek için seyyar köprüler kullanılabilir. Aç-Kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı tavanda tasman oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan izolasyon işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir.

4.3 Yukarıdan Aşağıya Yöntemi

İstasyon yapılacak bölgenin yaya ve araç trafiğinin oldukça yoğun olan, dolayısı ile kısa zamanda yol, kavşak vb. üstyapıların bir an evvel hizmete açılması gereken koşullarda ve kazı nedeniyle çevreye olan etkisini minimuma indirmek amacıyla, "Top-Down" yani yukarıdan aşağıya inşaat yöntemi uygulanabilir.

Türkiye'deki ilk uygulamalarda Otogar-Bağcılar-İkitelli metro istasyonlarında yukarıdan aşağıya doğru inşa yöntemi tercih edilmiştir. İnşaat süresince oldukça zorlanacak olan kent içi ulaşımı ve araç trafiğinin kazıları esnasında, daha büyük problemlerle karşılaşılmasını önlemek amacıyla trafik akışının en kısa sürede sağlanmasına gerek duyulması yukarıdan aşağıya yönteminin tercih edilmesinde en büyük etkenlerden biri olmuştur.

Yukarıdan aşağıya yönteminde, klasik uygulamaların tersine yapı yukarıdan aşağıya doğru inşa edilmekte, bu nedenle analiz ve tasarım hesapları da klasik yöntemlere kıyasla oldukça farklı olmaktadır. **Şekil 4.6'da** görüldüğü gibi yapıya ait tüm düşey elemanların (duvar ve kolonların) yerlerini belirleyen kılavuz duvarlar hazırlanmaktadır.

Daha sonra bu kılavuz duvarlar esas alınarak düşey elemanlar için dikdörtgen en kesitli modüllerden oluşan düşey elemanların kazıları yapılmakta, donatıları yerleştirmekte ve beton dökülmektedir.



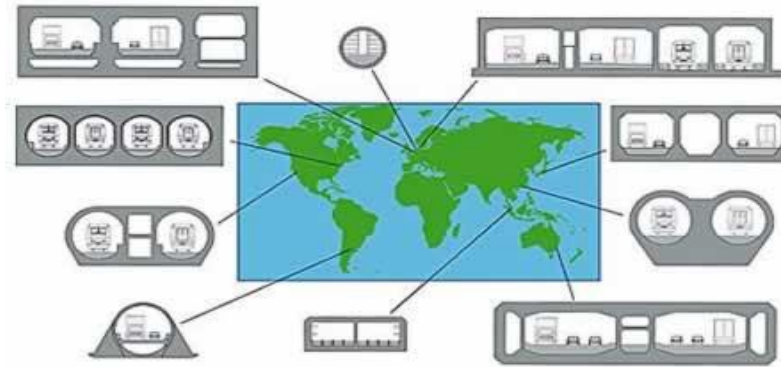
Şekil 4.6 : Otogar-Bağcılar-İkitelli metrosunda Yukardan-Aşağıya Yöntemi.

Bir yandan zemin üst döşeme betonunun döküleceği seviyeye kadar kazılarak düzeltilirken aynı anda yapının duvarları ve kolonları için gerekli donatılar hazırlanır. Bu şekilde yatayda eni sabit, boyu farklı modüllerden inşa edilecek olan kolon ve diyafram duvarlar oluşturur. Duvarı oluşturan modüllerin birbirlerine bağlantısı yalnızca döşeme plakları vasıtasıyla sağlanabilmekte, yatay donatıları süreksiz olmaktadır. Bu modüllerin, birbirlerine temas ettikleri yüzeylerindeki dişlerden oluşan kayma kamasının dışında bağımsız çalışacağı söylenebilir [22].

4.4 Batırma Tüp Tünel

Yirminci yüzyıl boyunca dünya genelinde karayolu veya demiryolu geçişleri için yüzden fazla sayıda batırma tünel inşa edilmiştir. Batırma tüneller, yüzer yapılar olarak inşa edilmiş ve daha sonra önceden taranmış bir kanalın içine batırılmış ve üzerleri örtü tabakası ile kaplanmıştır. Bu tünellerin, yerleştirme işleminden sonra tekrar yüzmelerinin engellenebilmesi için yeterli düzeyde etken ağırlığa sahip

olmaları gereklidir. Batırma tüneller, esasen kontrol edilebilir uzunluklarda prefabrike olarak üretilen bir dizi tünel elemanından oluşturulur; bu elemanların her biri, genellikle 100 m uzunluğundadır ve en sonunda bu elemanlar, tünelin son halini oluşturmak üzere, suyun altında bağlanıp birleştirilirler. Her elemanın uç taraflarında geçici olarak yerleştirilen bölme setler bulunur; bu setler, elemanların içleri kuruyken yüzmelerini sağlar. Fabrikasyon işlemi, kuru bir dok içinde tamamlanır veya elemanlar, bir gemi gibi denize indirilir ve daha sonra son montaj yerine yakın bir yerde yüzer parça halinde üretimleri tamamlanır. Çoğunlukla tamamlanan tünel elemanları, destek kullanılmadan nadiren yüzer durumda kalabilmektedir. Eleman yatay olarak ankraj ve kablay sistemleri ile kontrol edilir ve batırma mavnaları üzerindeki vinçler, eleman aşağıya indirilene kadar ve temel üzerine tam olarak yerleşene kadar dikey konumu kontrol ederler. Su giderme işleminin sonucunda, elemanın diğer ucundaki su basıncı, kauçuk contayı sıkıştırıp, contanın su geçirmez olmasını sağlar. Elemanların altındaki temel tamamlanırken geçici destekler elemanları yerlerinde tutar. Daha sonra kanal yeniden doldurulur ve üzerine gerekli koruma tabakası ilave edilir. Uç tünel elemanları yerleştirildikten sonra, uçlar ve kazılmış kaya arasındaki boşluk, su geçirmezliği daha çok veya az olan gereçle doldurulur. Tünel Açma Makineleri (TBM'ler) ile batırma tünellere doğru yapılan delme işlemleri, bu gereçle karşılaşılan ve batırma tünele erişilene kadar sürdürülür. Tünelin üstü, stabilitenin ve korumanın sağlanması için geri dolgu ile kapatılır.



Şekil 4.7 : Dünyadaki farklı tüp uygulamaları.

Bunun dünyada birçok uygulaması olmakla birlikte (**Şekil 4.7**) İstanbul'da tek uygulaması 'Marmaray'dır, [4, 5]. İstanbul'un her iki yakasındaki mevcut banliyö hatlarını birbirine bağlamak, diğer geçişlere de imkân sağlamak amacıyla yapılmıştır.

5. TÜNEL ÇALIŞMASINDA NLEMLER

Metro mühendisliğinde önlem adı altında ilerleme ve imalat öncesi, sırasında ve sonrasında yapıyı ve iş güvenliğini sağlamak, korumak ve geliőtirmek amacıyla yararlanılan her türlü uygulama ögesi anlaőılmaktadır. Bunların baőlıcaları; püskürtme beton, elik hasır, elik bağlar, kaya saplamaları, ankrajlar, sürenler, şemsiye kazıkları, donatı, beton ve n yapıım parçaları gibi sağlamlaştırma ve i ve dıő kaplamada yeralan destekleme elemanları veya enjeksiyon, jet grouting, dbelleme, dolgulama ve drenaj gibi iyileştirme veya n sağlamlaştırma çalıőmalarıdır. Açıkta inşa edilen istasyon yapılarında bunlara, temel mühendisliğinin kendine özgü önlemlerinin katılması da gerekir.

5.1 Kuvvetler Dengesini Oluşturan nlemler

Süreksizlikler arasında kalan lama ve bloklar, kinematik serbestlik bulduklarında ve genelde yerekimin etkisiyle evre kayacından koparak ayrılmaktadırlar. Bu parçaları yerinde tutmaya çalışan kuvvet (varsa) atlak dolgusunun kohezyonu ve süreksizlik yüzeylerindeki sürtünmedir. Normal kuvvetin arttırılması, ağırlığın azaltılması ve/veya kesme kuvvetinin karőtılanması ile tünel duvarında oluşabilecek sklme ve geveēmelerin bir bölümünü önlemek mümkündür. Boyutlandırma, kuvvetler poligonunun istenen güvenlik sayısına uygun olarak kapanmasıyla elde edilir. Askı blonları (saplamaları) ve püskürtme beton bu amaçla kullanılabilir.

5.2 Gerilme Durumunu Değiştiren nlemler

Dayanım kaybına, yenilme veya kırılmaya bağlı duraylık sorununun bulunup bulunmadığını araőtırmak için deęiőtik hipotezlerden yararlanılmaktadır. Bunların baőlıcaları; gerilme hipotezleri, deformasyon hipotezleri, enerji hipotezleri ve g hipotezleridir. Jeomekanikte yaygın olanları gerilme veya deformasyon ansrlerinin kullanıldığı hipotezlerdir. En büyük (genelleştirilmiş) kesme gerilmesi hipotezine

göre yapılan irdelemelerde Mohr yenilme koşulu zarfı ile Etkin Gerilme Farkı Çemberi diyagramında birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

Kayacın içsel parametrelerinin tanımladığı zarfa değen veya kesen gerilme çemberleri duraysızlığın bulunduğunu göstermektedir. Benzer bir irdeleme de diyagramlarında Haigh koşulu kullanılarak yapılmaktadır. Burada her kayacın içsel parametreleri tarafından tanımlanan özgün bir asal gerilme oranının bulunduğu kabul edilmekte ve etkin gerilmelerin bu oranı sağlaması durumunda stabilitenin bozulacağı kabul edilmektedir. Yani gerilme durumunun uygun şekilde değiştirilmesi ile duraysızlık önlenabilir olmalıdır.

5.3 Ortam Koşullarını İyileştirici Önlemler

Yeraltı suyunun ve süreksizliklerin denetimi için belirlenmiş olan önlemler bu kapsamdadır. Bu amaçla güzergah boyunca hidrojeolojik koşullar ve su gelişine ilişkin parametreler miktar ve nitelik belirlenmiş ve kazı aşamasında sorunlu kesimlerde suyun boşaltımı için drenaj delikleri öngörülmüştür. Sistem ankrajlama dışında birim kaya elemanlarını birbirine bağlayarak donatılı kaya oluşturmayı amaçlayan kaya saplamaları ve püskürtme beton da ayrıca kullanılmaktadır.

Meydana gelen gerilmeler ve mevcut yapılaşmalar nedeniyle etkili olan gerilme dağılımlarının incelenmesiyle A1, A2 ve A3 olarak üç uygulama tipi geliştirilmiştir, **Çizelge 5.1**, [10].

Çizelge 5.1 : İstanbul Metrosu tünellerinde donatılar ve uygulama tipleri.

Tipi	Yeri	P. beton	Ç. hasır	Ç. bağ
A1	Boş alanlar	10-15cm	Tek sıra	yok
A2	Yol altında	20cm	Tek sıra	var
A3	Bina altında	20cm	Çift sıra	var

5.4 Deformasyon Durumunu Denetleyici Önlemler

Genel olarak kazı sonrasında duvarlara uygulanması gereken destekleme basıncını düşürmek amacıyla kontrollü olarak noverjansa izin veren elemanlardır. Ön gerilmesiz ankrajlar, kayaç bağları, deformasyon yarıkları, deformasyon yastıkları ve hatta donatı ve ankraj öncesi uygulanan püskürtme beton bunlara birer örnektir.

Gerilme ve deformasyonların birlikte ele alındığı en önemli konular arasında ise özellikle üçüncü boyut etkisiyle ilerleme aynasında oluşabilecek stabilite sorunları bulunmaktadır. Kayaçların psödoplastikleşmesini ve zamana bağlı dayanım azalmasını veren post failure ve yorulmalı-yenilme davranışına ilişkin kaya mekaniği parametreleri, bu konuların üstesinden gelinmesine yardımcı olabilmektedir.

Önlem, ilerleme mesafesinin (serbest açıklığın) kısaltılması ve işlemlerin olabildiğince çabuklaştırılmasıdır. Tünellerdeki bu kendi kendini desteksiz tutma süresi, duraylık süresi olarak bilinmekte ve modern kaya sınıflamalarının vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır.

İstanbul Metrosu'nun farklı boyuttaki yeraltı açıklıkları ve farklı jeolojik ortam ve koşulları için bu süreler birkaç saatten birkaç aya kadar uzanan geniş bir aralık içinde değişmektedir. Bu nedenle; bazı kesimlerde 0.80mlik serbest açıklıkların yanısıra, enjeksiyonlu şemsiye sürenleri (matkap bulonları) da kullanılmaktadır.

Kuvvetler dengesini koruyucu veya düzenleyici önlemlerin büyük bir bölümü, özellikle tekil süreksizliklerin arasında kalan büyük kaya kamalarının veya bloklarının sürtünme kuvvetlerinin artırılması ya da kuvvet bileşenlerinin karşılanması için kullanılırlar.

Kaya askıları, kaya dübelleri süreksizlik yüzeylerine normal kuvvet aktaran germeli ankrajlar bu türden önlemler arasındadır. Ayrıca, donatılı veya donatısız iç kaplamalar ve ağır destekleme yapıları da bu sınıfa girerler.

Potansiyel riskleri azaltıcı önlemler kütleli hareketleri (heyelan, göçük, aşırı sökülme vb.) su baskını ve depremsellik gibi olası veya mevcut tehlikelere karşı alınan önlemlerdir.

Tersiyer değişim ve dönüşümleri denetleyici önlemler ise ayrışma, erime, kabarma, şişme ve korozyon gibi genellikle yapım sonrasında oluşabilecek fiziksel veya kimyasal değişimleri engelleyebilecek veya etkisiz kılacak şekilde seçilmiş önlemlerdir. Metro projelerinde bunlara ek olarak ayrıca ilerideki yapılaşma, trafik veya kazı işlerinden gelebilecek ek yüklerin dikkate alınması da yine bu kapsamda düşünülmelidir.

5.5 İstanbul Metrosu’nun Zemin ve Destek Tiplerini Değerlendirme

İstanbul Metrosu tünelleri gidiş-dönüş ve (Hat 1 ve Hat 2) iki ayrı hat olarak açılmakta olup; 6 ayrı karakterde tünel kesiti kullanılmaktadır. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır. İstanbul Metrosu III. Aşama IV. Levent-Ayazağa Kesimi, Seyrantepe Depo Sahası ve Depo Bağlantı Hatlarında aşağıda verilen kesitler kullanılmıştır. A (Ana Hat) tünelleri, P (Peron) tünelleri, T, C (Makas) tünelleri ve B1, B3 Tipi (Bağlantı) tünelleridir. **Çizelge 5.2’de** tünellerin kesit alanları ve gabarileri verilmiştir. [18].

Çizelge 5.2 : Metro tüneli kesit alanları ve gabarileri.

TÜNEL TİPİ		KAZI KESİT ALANI	YÜKSEKLİK	GENİŞLİK
ANAHAT	A	36,85	6,81	6,64
PERON	P	65,37	8,34	9,73
MAKAS	T	100,04	8,77	13,94
	C	76,87	7,85	11,72
BAĞLANTI	B1	43,21	7,14	7,41
	B3	44,6	7,26	7,53

Kazı yapılan kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapıların veya yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin özellikle yoğunlaştığı bölgeler; kazı destekleme tipinin belirlenmesindeki temel parametrelerdir. Aynayı teşkil eden kayacın yapısal özellikleri, su ve fay durumu stabiliteyi belirler. Eğer stabilite düşükse, buna bağlı olarak destekleme artırılır. Aynı şekilde örtü kalınlığı da, kazı destek oranıyla ters orantılıdır. Tünel içi gerilmelerin yoğunlaşması ve yüzey yapılaşmasının fazla olarak nitelenmesi ise kazı destekleme oranının artırılması ile doğru orantılıdır. **Çizelge 5.3’de** kazı destekleme sistemleri ve destekleme elemanları verilmiştir.

Projede, en uzun tüneller ana hat (A tipi) tünelleri olup, yapı ve yol altında genellikle A3 ve A5 kazı-destekleme tipleri uygulandığından, bu desteklemelerin karşılaştırılması yapılacaktır.

A tipi tünel için A3 kazı destek sistemi; duraylılığı düşük, zayıf kaya ortamını karakterize eder. Kazı adımı 1,00-1,20 mdir. Kazı sonrası çelik hasır ve çelik iksa

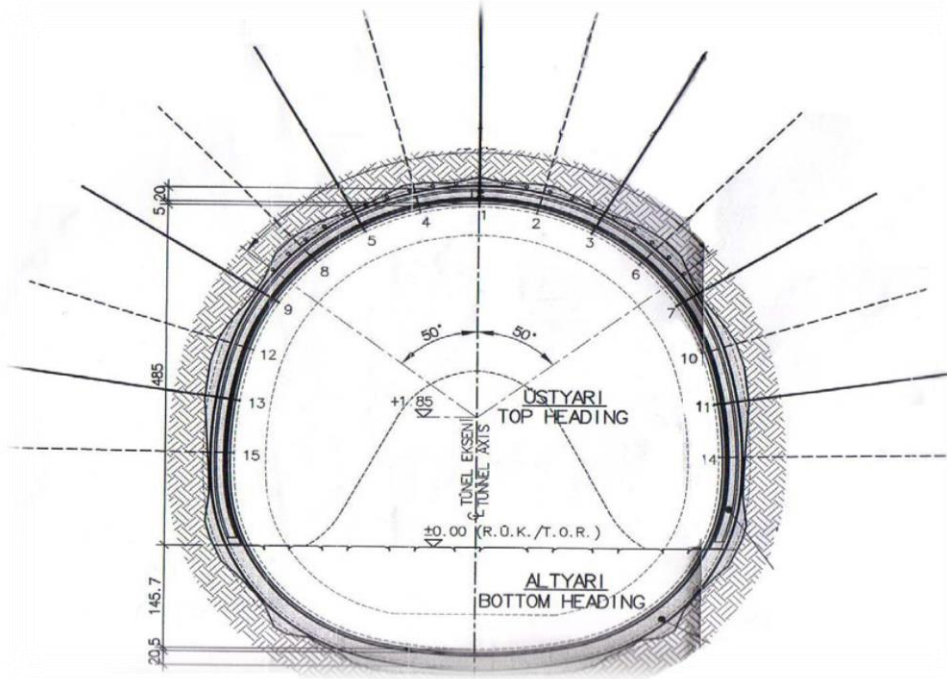
montajı yapılır, kafes kiriş yüzeyi kapanacak şekilde püskürtme beton atılır. Daha sonra tekrar kazı yapılır. Bir sonraki adımın çelik hasır ve iksa montajıyla birlikte bir önceki iksanın ikinci kat çelik hasır montajı yapılır. Tüm bu işlemlerden sonra ilk iksaya ikinci kat shotcrete atılarak gerekli kalınlık tamamlanır, [19].

Çizelge 5.3 : Kazı destekleme sistemleri ve destekleme elemanları.

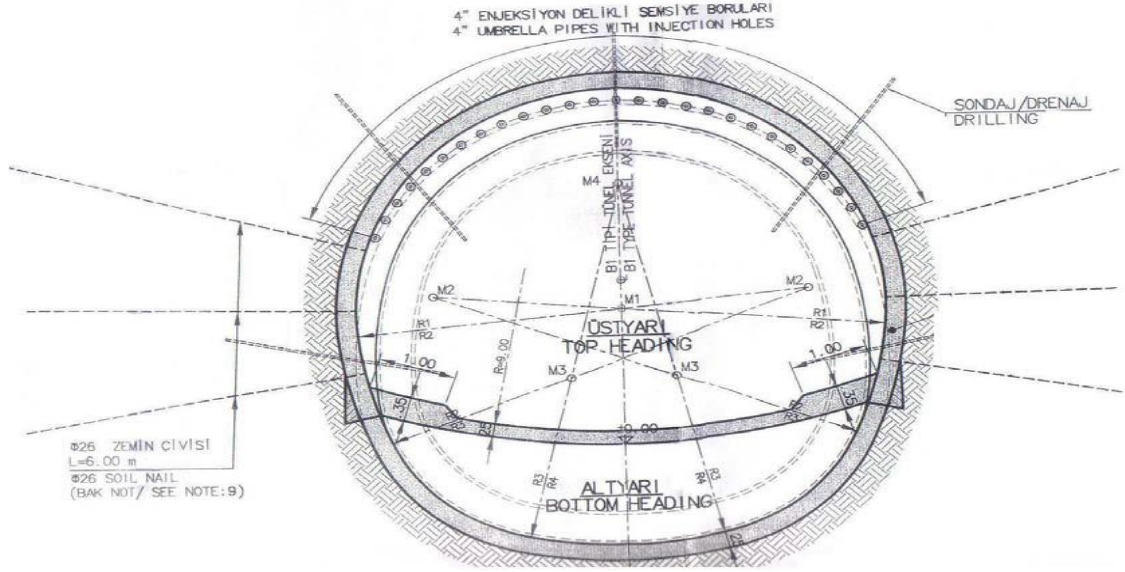
A TİPİ TÜNEL	A1	A2	A3	A5
Ortam	Sağlam Kaya	Orta -Sağlam Kaya	Zayıf Kaya	Zayıf Zemin Yerleşim Bölgesi Geçişleri
Litoloji	Kireç Taşı, Kumlu Kireç Taşı	Grovak, (Çamurtaşı kalkerli çamurtaşı) ince kireçtaşı	Grovak ince kireçtaşı, şeyll,yumrulu kireçtaşı, kumtaşı	Dolgu, Fay breşi, kaya unu, kil, çok parçalı kaya
Çelik İksa (Kafes Kiriş)		(Tip 136)	(Tip 136)	(Tip 174)
Çelik Hasır	TEK KAT (Q221/221)	TEK KAT (Q221/221)	ÇİFT KAT (Q221/221)	ÇİFT KAT (Q377/221)
Püskürtme Beton	10-15 cm	20 cm	20 cm	25 cm
Kaya Bulonu	4-5 (şaşırtmalı) (3,00 m)	6-7 (şaşırtmalı) (3,00 m)	7-8 (şaşırtmalı) (4,00 m)	6-6 (4,00 m)
Sürgü Çubuğu		(25 adet-4,00m)	(25 adet-4,00 m)	
Ayna/Yanal Zemin Çivisi				(12adet-9,00 m)
Kazı Adımı	>1,50 m	1,20-1,50 m	1,00-1,20 m	0,80 m

İkinci iksaya ise kafes kiriş yüzeyine kadar shotcrete atılır ve işlem bu tarzda devam eder. Ana hat tünellerinde (A tipi) her iki iksada bir en fazla 25 adet süren çakılmasına müsaade edilir. Kaya bulonları ise şaşırtmalı 7–8 adet olarak çakılır. Tip 136 iksa (tek tip) ve Q 221/221 çelik hasır kullanılmaktadır. Şekil 5.1de A tipi tünel A3 destekleme enkesiti verilmiştir.

A tipi tünel, A5 kazı destek sistemi; örtü kalınlığının çok az olduğu durumlarda (tünel apı D kabul edilirse, örtünün 1,5 D değerinden küçük olması), tünellere su gelmesi durumunda, fay zonu varlığında, dinamik yüklerin varlığında (yol altından geçen güzergah) ve zeminin taşıma kapasitesinin düşük olduğu, dolgu durumlarında uygulanır. Aynı şekilde yüzeydeki sanat yapıları ve binaların altından geçilirken A5 desteklemesine geçilir. Kazı adımı 0,80 mdir. Ana hat tünellerinde her altı iksada bir en fazla 27 adet şemsiye borusu akılmasına müsade edilir. Kaya bulonları ise 6 adet olarak çakılır. Tip 174 iksa (altı tip) ve Q 377/221 elik hasır kullanılmaktadır. **şekil 5.2'de** A tipi tünel A5 destekleme enkesit paftası verilmiştir, [19].



şekil 5.1 : A Tipi tünel, A3 destekleme enkesiti.



Şekil 5.2 : A Tipi tünel, A5 destekleme enkesiti.

5.6 Destekleme Elemanları

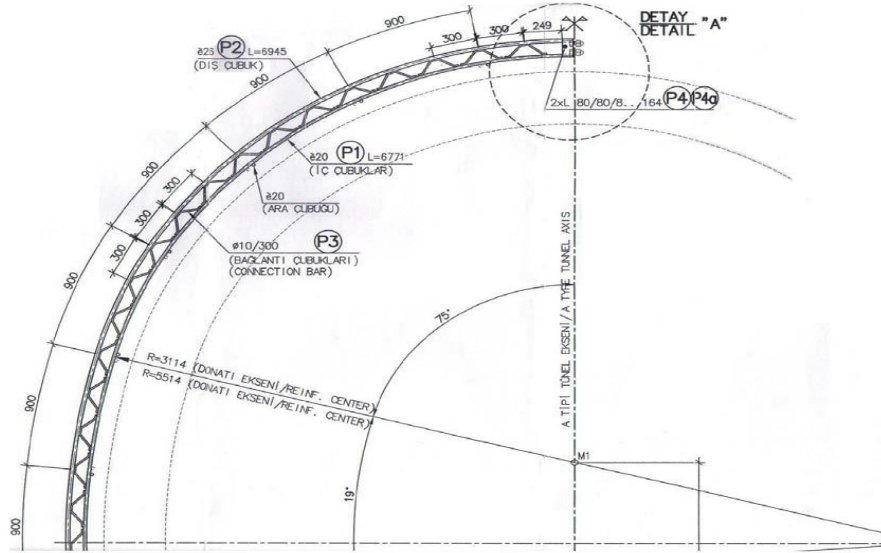
Tünel kazısından kullanılan destekleme elemanları, karşılaşılan kaya sınıfı ve jeolojik koşullara göre aşağıdaki sistemlerden ve/veya bunların çeşitli kombinasyonlarından teşkil edilmiştir.

5.6.1 Kafes çelik iksa

Çelik iksa iki adet T20'lık ve T26'lık nervürlü çelik ile bunlar arasında bağlantıyı sağlayan T10'luk elemanlardan oluşan üçgen kesitli bir destekleme elemanıdır. Bunların zemine batmasını önlemek için ayak kısımlarında papuçlar mevcuttur. İki parça halindeki flanşlarından M24 civata ve M24 somunlarla bağlanmaktadır. A1, A2, A3 desteklemede sadece üst yarı sağlamlaştırmada, A5 desteklemede üst yarı ve alt yarıda birlikte kullanılmaktadır. Projede, 3 tip iksa kullanılmış olup bunlar tip 136, 174 ve 200'dür. Bu rakamlar, iksa takımının dışındaki T26'lık çubukla, içindeki T20'lık çubuklar arasındaki mesafeyi mm cinsinden ifade etmektedir. Çelik iksanın görevleri :

- Kazıdan sonra olabilecek küçük kaya düşmelerini önleyerek çalışma emniyetini kontrol eder.
- Sürgü çubuğuna destek verir.
- Püskürtme beton prizini alana kadar, kayanın gevşemesine engel olur.
- Tünel kesitini korur.

- Kısmi bir dengeleme basıncı gerçekleştirir.
- Kırılma ve genişleme tehlikesini önler.
- İksa olarak donatıdan bükülmüş bir kafes kemer kullanılırsa, hem püskürtme betonun tatbiki kolaylaşmakta, hem de püskürtme betona ek bir donatı elde edilmektedir. **Şekil 5.3'de** iksa detayları verilmiştir, [24].



Şekil 5.3 : İksa profili ölçüleri.

5.6.2 Çelik hasır

Püskürtme beton kaplamanın statik ve konstrüktif donatısını teşkil etmek üzere beton tabakaları arasına çelik hasır uygulanmaktadır. Kaya ile püskürtme beton arasında adhezyonu sağlamak, betonun prizini alana kadar geçen sürede stabilizasyonu, kayma mukavemetinin arttırılması ve aşırı çatlakların önlenmesi amaçlanarak hasır çelik kullanılmaktadır.

İstanbul Metro Tünelleri kazısında Q221/221 ve Q377/221 tipi tel kafes kullanılmaktadır. Bu çelik hasırların çubuk çapları Q221/221'de 6,50 x 6,50 mm, Q377/221'de bir yönde (boy) çift sıra 6,00 mm, diğer yönde ise 6,50 mm olup, boyutları 5m x 2,15m ve 15 cm x 15 cm ebatlarında karelajlardan oluşmaktadır. Çelik hasırlar zemine mümkün olduğu kadar yaklaştırılmalı ve çok stabil bir şekilde monte edilmelidir.

Genellikle çelik hasırın esnek olması ve tünelin şekline kolaylıkla uyum sağlaması istenmektedir. Bunların sağlamlaştırma işlemindeki görevi, sağlamlaştırma sırasında

düşebilecek olan kaya parçalarının düşmesini önlemek ve ilk desteklemeyi arttırmaktır. A1, A2 destekleme tiplerinde tek kat, A3 ve A5 destekleme tiplerinde çift kat çelik hasır yerleştirilmektedir. Tel kafesin montajı, iki uç birbirinin üstüne düşeyde ve yatayda minimum 30 cm binecek şekilde yapılmaktadır. Tel kafesler bindirme paylarından birbirine ve eğer varsa sürenlere madeni tellerle bağlanmaktadır.

5.6.3 Püskürtme beton

Çevre kayacın gevşemesini engelleyen taşıyıcı bir eleman olarak püskürtme betonun kullanımı kaçınılmazdır. Destekleme elemanlarından en yüksek destek basıncını sağlayan eleman püskürtme betondur. İstanbul Metrosu çalışmalarında shotcrete kuru ve yaş karışım olarak kullanılmaktadır. Metro tünellerinde püskürtme beton genelde çelik hasır+iksa montajından sonra yapılmaktadır. Ancak düşük kaliteli kaya şartlarında dökülmeyi önlemek için ince bir shotcrete tabakası oluşturulabilir. Püskürtme beton uygulamalarında dikkat edilmesi gereken noktalar;

- Shotcrete uygulanacak yüzey serbest malzemelerden temizlenir ve yüzeyde su gelişi varsa, uygun yöntemlerle drene edilir.
- Çelik hasırın yüzeye iyi sabitlenmesi sağlanır ve shotcrete esnasında esneme yapması engellenir.
- Malzeme (kum+çimento+katkı) karışımının mutlaka homojen olması sağlanır.

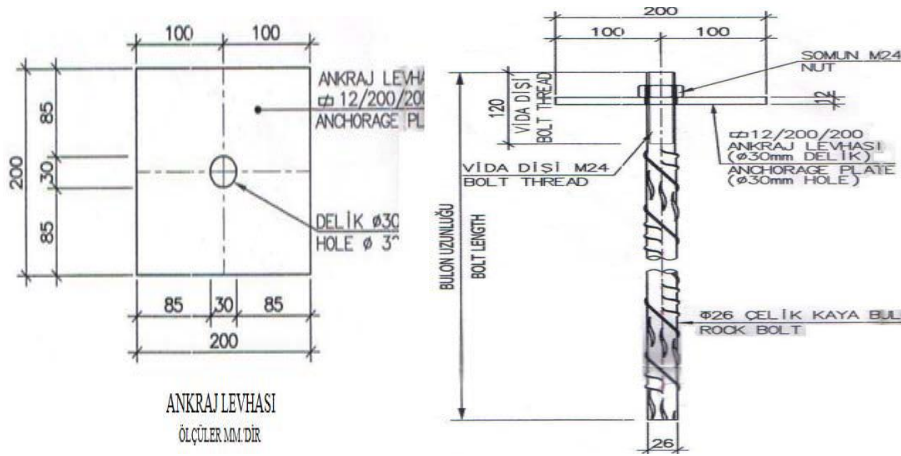
5.6.4 Enjeksiyonlu kaya bulonu

Kaya bulonları, kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek ve tünel kazısından dolayı oluşan örselenmiş kısımları tünel arkasındaki sağlam kayaya taşıtmak amacıyla uygulanan demir çubuklardır. Bulonlar aynı zamanda tünel kazısı esnasında duvar ve tavanda kopmak üzere olan kayaların kopmalarını önleyerek emniyeti artırırlar. Bulonlar; iksa, hasır çelik ve shotcrete'den oluşan desteklemenin tamamlayıcı elemanı olarak da kullanılabilir.

Taşıyıcı plakaları shotcrete kabuğunun yüzeyine gelecek şekilde uygulanan bulonlar, shotcrete kabuğunun kaya kemeri ile birlikte çalışmasını sağlamaktadır. Kaya bulonu uzunlukları, tünel etrafında oluşan plastik bölgenin ~ 2m dışına çıkacak şekilde

seçilmelidir. Enjeksiyon delik çapı, bulon çapının 1,5 katı olacaktır. Bulonlar tünel duvarlarına ııınsal olarak yerleştirilir.

Metro tünellerinde en yaygın olarak kullanılan enjeksiyonlu kaya bulonudur. Bir delici makine tarafından açılan deliğe enjeksiyon malzemesi (portland çimentosu/su=2/1–3/1) doldurulduktan sonra, bulonun elle itilerek yerleştirilmesi suretiyle kullanılır. 4,00 m boyunda, T26'lık nervürlü çelikten özel olarak imal edilir. Bir ucu 12 cm dişli ve taşıma plakaları 200/200/120 mm boyutlarında olup, metrik 24 somun kullanılır. **şekil 5.4**'te kaya bulonu detayları gösterilmiştir, [21].

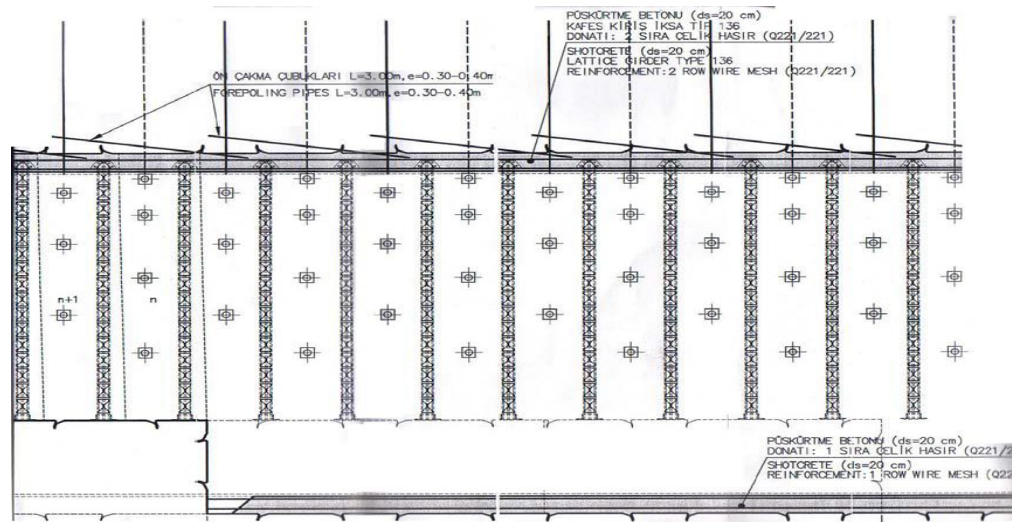


şekil 5.4 : Bulon ve taşıma levhası.

5.6.5 Süren

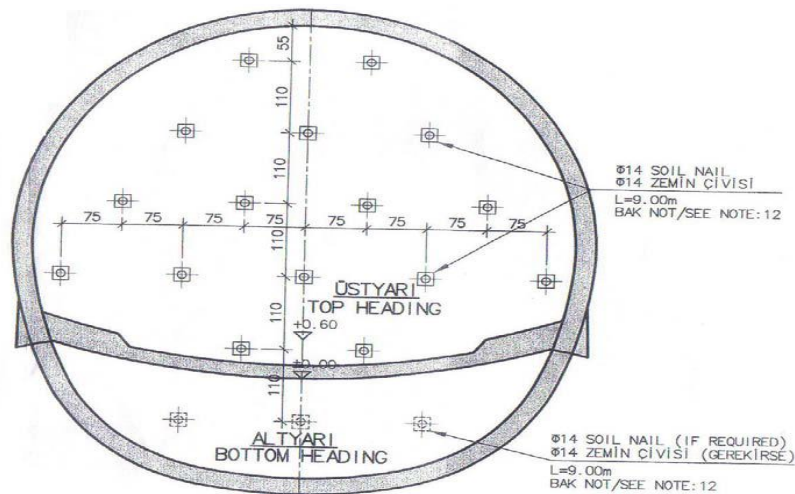
Kazı sonrası dökölmeye meyilli zayıf formasyon ortamlarında, özellikle su gelişinin olduğu bölgelerde, kazıya girmeden önce süren uygulaması yapılır. Adetleri kazı destek türlerine ve tünel tiplerine göre değişir. Çoğunlukla A3 destekleme tipinde uygulanmaktadır.

Tünel çevresindeki kayacın özelliklerine göre çevresel olarak tatbik edilen boru sürenlerin arasındaki açıklık, çevre kayacın duraylılık özelliklerine bağlı olarak 30-40 cm arasında olmaktadır. Boru sürenler, son koyulan çelik iksa ile aynadaki ana kaya arasında kiriş gibi çalışarak çevre kayacın duraylılığını arttırmaktadır. Uygulamada daha çok 1 1/2" çapında, 4.00 m'lik borulardan faydalanılmıştır. Çelik iksa üzerinden yatayla max 5-10° açı yapacak biçimde çakılırlar. Sürenlerin içerisi çimento/su oranı=2/1 olan enjeksiyon ile doldurulmaktadır. **şekil 5.5**'de süren boykesiti verilmiştir, [23].



5.6.6 Zemin çivisi

Tünelcilikte, tavanın olduğu kadar aynanın da kontrol altına alınması önemlidir. Gelen yüklerden dolayı aynada plastikleşerek dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Ayna zeminini konsalide etmenin en etkili yolunu sürtünme kolonları (zemin çivisi) oluşturmaktır. Ayna önünden 10-12° aşağı eğimli 125 mm çapında delikler açılarak içine 9 m uzunluğunda, 14 mm çapında tor çelikten imal edilmiş nervürlü çubuklar yerleştirilmektedir. Zemin çivisi olarak adlandırılan bu çubukların sayısı ortam koşullarına göre ve tünel tipine göre değişmektedir. Bu deliklerin içine 2-3 bar basınç altında çimento /su =7/5 olan karışım enjekte edilerek ayna sağlamlaştırılmaktadır. **Şekil 5.6'da** zemin çivisi enkesit paftası verilmiştir.



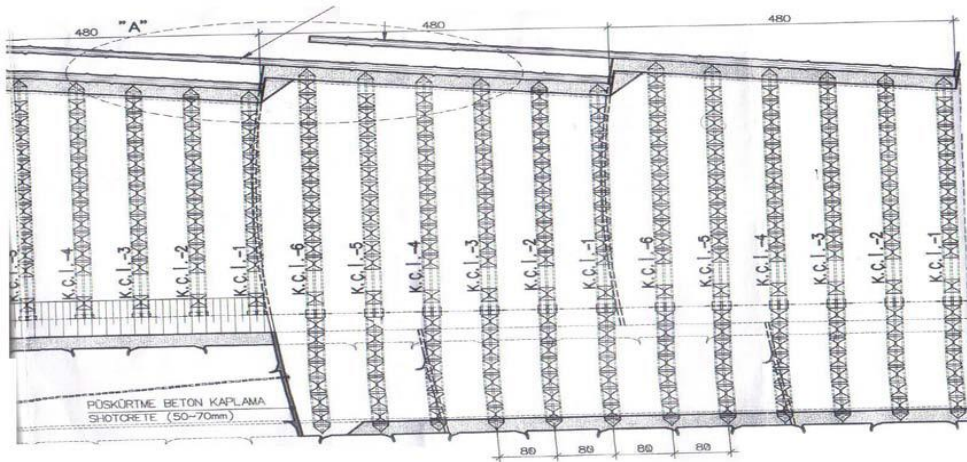
5.6.7 Şemsiye boruları

Bu yöntemde ayna üzerine gelecek basınçları karşılayabilmek amacıyla, kazı tavanına 9 m. uzunluğunda çelik borular yerleştirilmektedir. Daneli zeminlerin zayıf formasyonlarında ve akıcı zeminlerde tercih edilir. Bu boruların yerleştirilebilmesi için kazı kesiti projedekinden 50 cm. daha geniş açılmaktadır.

Daha sonra delik çapı 130 mm (5''), delik açısı yukarıya doğru 6-8° olacak şekilde delikler açılarak, içine et kalınlığı 6,3 mm ve boyu 9 m olan 114 mm. (4'') çapında çelik borular yerleştirilmektedir. Bu boruların aralığı 30-40 cm olup, sayıları tünel tipine göre değişmektedir. Boru ağzı enjeksiyon manşonu ile kapatılarak, etrafı alçı ile sıvanmakta ve boru içine enjeksiyon basıncı 2-3 bar ve çimento/su=7/5 olan enjeksiyon yapılmaktadır.

Boruların delik içerisinde kolay ilerleyebilmesi için uçları sivri hale getirilmektedir. Enjeksiyonun, kayadaki çatlakları ve borunun etrafını tam doldurabilmesi için boruların cidarında delikler açılmaktadır. Bu boruların 5 mlik kısmı kazılan kesimin üzerinde, 4 mlik kısmı ise bindirme olarak bırakılmaktadır. Şemsiye borularının altında genişleyen ve yükselen kafes çelik iksalar monte edilmektedir.

Böylece kemeri oluşturan çelik boruların bir kısmı iksaya basarak diğer ucu da ayna içinde kalarak iki ucu mesnetli kiriş gibi çalışmakta ve üzerine gelen gerilmeleri emniyetle taşıyabilmektedir. Çelik boruların montajı ve enjeksiyon tamamlanıp priz aldıktan sonra tünel kazısına geçilmektedir. **Şekil 5.7'**de şemsiye borusu boykesiti gösterilmiştir, [19].



Şekil 5.7 : Şemsiye boruları boykesiti.

İstanbul Metrosunun I. Aşaması'nda şemsiye boruların deformasyon üzerindeki etkileri şöyle belirlenmiştir, [26, 27]:

- Şemsiye boru yöntemi kohezyonu düşük ortamlarda, deformasyonun düşük olması istenilen tünel imalatlarında, bina ve yol altı tünel geçişlerinde başarı ile uygulanabilmektedir.
- Kil ortamda açılan tünelde yüzey oturması tünel içi deformasyonundan daha fazladır.
- Göbek zemin çivilerinin bindirme boylarının belirlenmesinde yüzey oturmasının başladığı nokta ile kazı aynası arasındaki mesafe dikkate alınmalıdır.
- Göbek zemin çivisi sayısı ile yüzey oturmaları ters orantılıdır.
- Tünelin yüzeydeki ölçüm istasyonunun altına gelene kadar olan oturma ile nihai oturma doğru orantılı artmakta veya azalmaktadır.
- Göbek zemin çivisi uygun sayıda olduğunda üç aşamalı kazı yapılan 36m² kesitli tünel, yüzeydeki ölçüm istasyonunun altına 1 cm yüzey oturması ile girilebilmektedir. Yetersiz ayna konsolidasyonunda bu değer 3-6cm olmaktadır.
- Killi ortamda açılan tünellerde yüklerin tahkimat kabuğuna dengeli yayılmasını sağlayacak önlemler alınmalıdır,
- Çalışılan ortamda şemsiye boruların bindirme boyları (3m) yetersiz kalmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre bindirme boyu, kazı boyu kadar olur ise, tünel içi deformasyonunun %50 azalacağı gözükmemektedir.
- Yerleşim birimi altından geçen tünellerde tünele su alınması yüzey oturmalarına neden olabilir.
- Yerleşim birimi altında açılan tünellerde imalat hızı önemlidir. Tünel kazı aynası yarım günden fazla duracak ise gelecek yüklere karşı desteklenmelidir.
- Çalışılan bölgede yapılan 3 aşamalı kazıda her kademe arasında enaz 2.40m mesafe olmalıdır.

5.6.8 Jet grouting uygulamaları

Yeni biyapının inşası ve/veya mevcut bir yapının güçlendirilmesi için önce yapının altındaki zeminin kuvvetlendirilmesi gerekir. Proje öncesi yapılan zemin etüdüleri yapının kendine ait ve diğer ekstra yüklerin taşınmasını mümkün göstermiyorsa yapının taşınması ya kazıklı temelle ya da taşıma gücü arttırılmış zeminle olur.

Bunların en güncel olanı jet grouting yöntemidir. Bunda zemin en az 300 bar basınçla püskürtülen bir stabilizerle karıştırılır.

Stabilizerler genellikle su-çimento karışımıdır (grout. yüksek basınç sevk edilen nozzle'dan geçerken yüksek bir kinetik enerji kazanmasını sağlar. Yüksek hızlı (200-250m/sn) grout zemini yırtarak zeminle bir karışım sağlar, bu karışım homojen ve sürekli bir yapı özelliğindedir. Hertür zayıf zeminde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda hızlı, kalıcı, ekonomik bir çözümdür, [28, 29].

5.7 Malzeme ve Maliyet Açısından Karşılaştırma

Değerlendirmeler bölümünde destekleme sistemleri ve kazı hızları açısından karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla çizelgeler hazırlanıp ilgili değerler verilmektedir. A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin jeoloji yönünden, destekleme elemanları ve kazı adımları açısından karşılaştırılması **Çizelge 5.4'de** verilmiştir, [24].

Çizelge 5.4 : Destekleme elemanlarının karşılaştırılması.

A Tipi Tünel	A3 Destekleme	A5 Destekleme
Jeoloji	Zayıf kaya	Zayıf zemin, dolgu
Çelik İksa	Tip 136 (1 Tip)	Tip 174 (6 Tip)
Çelik Hasır	Q 221 / 221	Q 377 / 221
Püskürtme Beton	20 cm	25 cm
Kaya Bulonu	7-8 adet (4,00 m)	6 adet (4,00 m)
Süren	25 adet (4,00 m)	
Zemin Çivisi		12 adet (9,00 m)
Kazı Adımı	1,00 - 1,20 m	0,80 m

A3 ile A5 desteklemede imalat hızı açısından karşılaştırma **Çizelge 5.5'de** verilmiştir.

Çizelge 5.5 : İmalat sürelerinin karşılaştırılması.

A Tipi Tünel	A3 Destekleme	A5 Destekleme
İksa -	2 adet / 24 saat	1,5 adet / 24 saat
İlerleme	(2,00 - 2,40 m.)	(0,80 m.)
Bulon	7 - 8 adet x 3 / 12 saat	6 – 6 adet x 3 / 12 saat
Süren	25 adet / 3 saat	
Zemin Çivisi		12 adet / 12 saat

A3 destekleme sistemi ile A5 destekleme sisteminin maliyetler açısından karşılaştırılması **Çizelge 5.6 ve 5.7’de** verilmiştir, [18, 19, 24].

Çizelge 5.6 : A3 tipi desteklemenin maliyetleri.

A Tipi Tünel (1 m ilerleme)	A3 Destekleme			Maliyet
	Birimi	Miktarı	Birim Fiyat (€)	
Kazı	m ³	36,84	68,05	2506,96
Püskürtme Beton	m ²	20,94	34,28	717,823
Hasır Çelik	ton	0,198	823,69	163,09
Çelik İksa	ton	0,267	1285,43	343,209
Bulon	adet	7	48,65	340,55
Süren*	adet	25	56,34	704,25
BÇ. I Donatı	ton	0,0173	801,7	13,869
Toplam Maliyet (€)				4789,75

Saha uygulamalarında A5 desteklemede ilerleme adımı 0,80 m olup, şemsiye borusu 6 iksada bir kullanılmaktadır. A3 desteklemesinde ise ilerleme adımı 1,00–1,20 m olup, süren 2 iksada bir kullanılmaktadır.

Çizelge 5.7 : A5 tipi desteklemenin maliyetleri.

A Tipi Tünel (1 m ilerleme)	A5 Destekleme			
	Birimi	Miktarı	Birim Fiyat (€)	Maliyet
Kazı	m ³	40,34	68,05	2745,14
Püskürtme Beton	m ²	21,76	42,9	933,504
Hasır Çelik	ton	0,277	823,69	228,162
Çelik İksa	ton	0,385	1285,43	494,89
Bulon	adet	6	48,65	291,9
Şemsiye Borusu*	m	243	52,6	2662,88
BÇ. IIIa Donatı	ton	0,0516	801,7	41,367
Toplam Maliyet (€)				7397,84

*Maliyet değerleri yaklaşık olup, şemsiye borusu ve süren gibi kazı anosu boyunca uygulanan elemanların bu hesapta 1 m'e indirgenmesiyle elde edilmiştir.

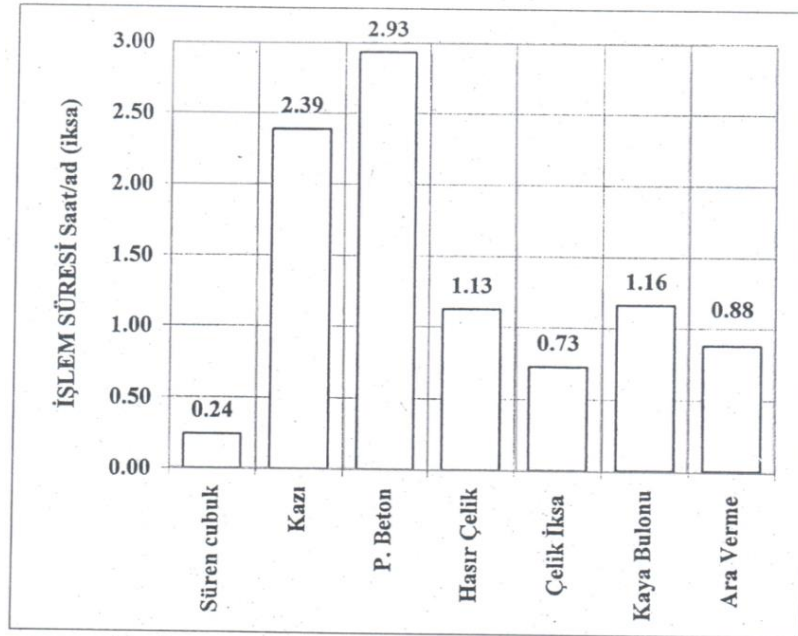
İstanbul h. metro sistemi 2. aşaması olan Esenler-Havaalanı arasındaki km 6+108-7+585 arası derin tünel ile geçilmesi planlanmıştır. Burada beklenenden fazla su geliri ile karşılaşılması ve kohezyonsuz, yer yer mercekli silt, siltli kil tabakalarına rastlanması, kayacın tabaka kalınlığı ve çatlak boyutu ile ilintili olarak püskürtme beton tüketimi, 20-60cm mertebelerindeki aşırı sökülme meydana gelmesi nedeni ile öngörülenden %4.7 fazla gerçekleşmiştir. Yeni Avusturya Metodunun esnekliğinden istifade edilerek kaya bulonu ve süren çubuk tüketimi minimize edilmiş ve idareye malzeme tasarrufu sağlanmıştır, **Çizelge 5.8.**

Karşılaşılan jeolojik zorluklar ve yüzeydeki hassas yapılar dolayısı ile adımlar idarenin mutabakatı ile kısaltılmış ve sonuç olarak çelik kafes iksa tüketimi %13 oranında artmıştır. Alınan 5000den fazla konverjans ve oturma okumaları sayesinde yüzeydeki yapılara zarar verilmeden ve herhangi bir işkaza veya ekipman hasarı ile karşılaşılma riskinin tünel tamamlanmıştır.

Çizelge 5.8 : Birim tünel uzunluğu için malzeme tüketimleri, [25].

Malzeme miktarı	Birim tünel uzunluğunda		
	Birim	Değişim Aralığı	Ortalama
Toplam çelik tüketimi	ton/m	0.515-1.733	0.876
İksa adeti	adet/m	1.25-0.77	1.09
Kaya bulonu	adet/m	5.30-16.60	9.2
Önsüren	adet/m	0.00-20.50	3.9
P. beton	m ³ /m	9.6-36.3	16.01

İstanbul Metrosu'nda destekleme elemanlarının işlem süreleri **Şekil 5.8'de** görülmektedir.



Şekil 5.8: Destekleme elemanlarının işlem süreleri.

5.8 İksalama Derecesini Belirleme

Tünel cidarının radyal yer değiştirmesi (u_i) /tünel kazı yarıçapı (r_o) oranından (ε) tünel cidarının kısılması % cinsinden belirlenir. Birim kısılmaya bağlı olarak stabilite durumu ve iksa ihtiyacı belirlenir. Hoek ve Marinos 2000 yılında yaptıkları çalışmada buna ilişkin bir çizelge hazırlamışlardır. Birim kısılma arttıkça stabilite sorunu büyümekte ve iksa türlerinde daha fazla eleman kullanmak gerekmektedir. Bu durum **Çizelge 5.9'da** verilmektedir.

Çizelge 5.9: Birim kısaltmaya bağlı stabilite durumu ve iksa türleri.

Birim kısalma	Satabilite durumu	İksa türleri
< 1	Çok az stabilite sorunu var	Az yoğunluklu tavan saplamaları ve püskürtme beton
1-1.5	Tünel kazısı etrafında plastikleşme zonu ve düşük düzeyde sıkışma var	Tavan saplamaları, püskürtme beton kaplama, az çelik bağ
2-2.5	Sıkışma daha belirgindir	İksa hızlı şekilde yerleştirilmeli, püskürtme beton içerisine ağır profilli çelik bağlar
5-10	Çok ciddi sıkışma ve alın stabilite sorunu var	Yukarıdakine ek olarak alın güçlendirme elemanı ve tavanda önsüren
>10	Sıkışma va alın stabilite sorununda artış var	Tavanda önsüren ve alında güçlendirme için iksa elemanları ile püskürtme beton kaplaması içinde esnek çelik bağ kullanımı

Ergin Arıoğlu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada Tünel Stabilite abağı yöntemi ile; önce sağlam numunenin tek eksenli basınç dayanımı belirlenip, jeolojik dayanım indisinden yararlanılarak ve bunun için geliştirilmiş amprük bağıntı kullanılarak kaya kütlelerinin dayanımı belirlenir. Tünel aksının derinliğine bağlı olarak kaya kütleleri dayanımı/derinlik basıncı oranı belirlenir. Bu orandan yararlanarak meydana gelen sıkışma derecesi ve buna bağlı olarak da gerekli iksa sistemi derecesi belirlenir, **Şekil 5.9** [30]. Buna göre;

I Bölgesinde kalınıyorsa çok az iksa gerekmektedir.

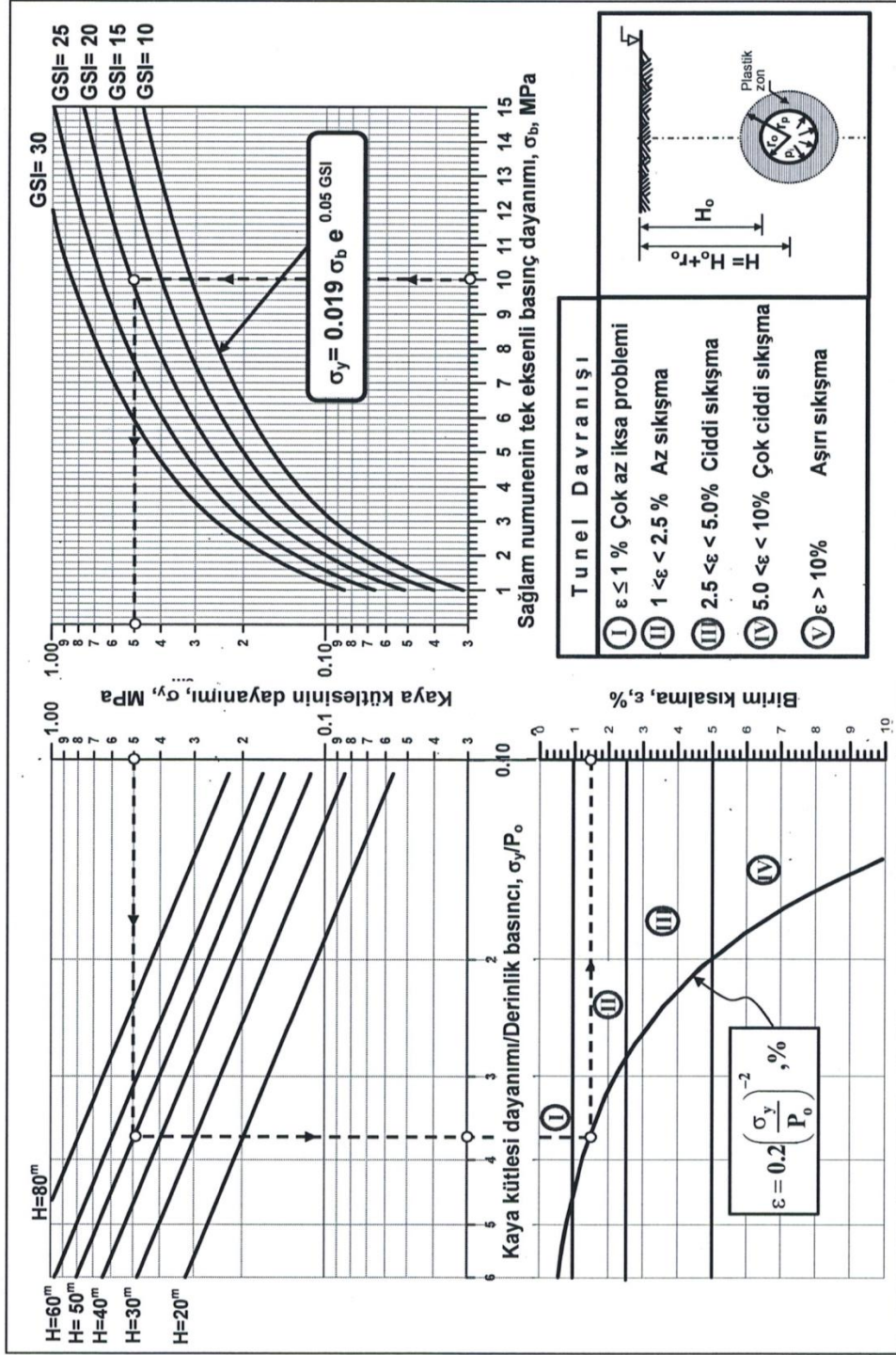
II Bölgesinde kalınıyorsa az sıkışma söz konusu olup, az iksa gerekmektedir.

III Bölgesinde kalınıyorsa ciddi sıkışma beklenip, iksa sisteminin buna göre düzenlenmesi istenir.

IV Bölgesinde kalınıyorsa çok ciddi sıkışma beklenir ve iksa sistemi bunu karşılayabilmelidir.

V Bölgesinde kalınıyorsa aşırı sıkışma bekleneceğinden çok güçlü bir iksa sistemi uygulanmalıdır. Bu abak yaklaşık olarak iksa ihtiyacı açısından fikir vermektedir.

Şekil 5.9 : Tünel stabilite abağı



(GSI= Jeolojik dayanım indisi, H= Tünel eksen derinliği, r_o = Tünel yarıçapı, r_p = Plastik zonun yarıçapı, $\varepsilon = u_p/r_o$ =(Tünel cidarının radyal yerdeğiştirmesi/tünel yarıçapı), derinlik basıncı $P_o = \gamma \cdot H$ birim hacim ağırlık $\gamma = 2.65 \text{ t/m}^3$ alınmıştır).

Kaynak: Arioğlu, Ergin, Girgin ve Yüksel, 2003

6. TÜNELE GELEN İTKİLERİN TEORİK ve PARAMETRİK OLARAK İRDELENMESİ ve KARŞILAŞTIRMA

Tünele gelen etkileri belirlemek için farklı yöntemler üzerinde durularak aşağıda bunların esasları açıklanmakta ve sayısal örnekler ve parametrik inceleme yapılmaktadır.

6.1 Tünellerde Duraylık (Stabilite) Sorunu

Metro tünellerinin açılması sırasında içinde çalışılan ortam ve koşullar değişmekte, değiştirilmektedir. Bu değişimin derecesi kuvvetler dengesinin veya moment dengesinin ya da gerilme durumunun teknik girişim sonucunda ne kadar bozulmuş olduğuna bağlıdır.

Doğa, içinde çalışılan ortam bu yeni koşullara uyumlanırken kendi özellik ve niteliklerine göre tepkimekte, direnmektedir. Dolayısıyla değişim olarak karşımıza çıkan ölçülebilir büyüklükler, zorlayan etmenlerle bunlara direnen ortam arasındaki etkileşimin sonucudur.

Direnme önce enerjiyi dengelemek, sonra türünü değiştirmek ve nihayet düzeyini düşürmek şeklinde olmaktadır. Bir başka deyişle zamana bağlı gerilme-deformasyon ilişkisi ve çevre kayacının psödo-plastikleşmesi, denge durumu ile etkileşimin ölçütü ve nedeni olmaktadır. Bu etkileşim miktarının teknik girişim için öngörülen sınırı aşması durumunda ise duraylık sorunu başlamaktadır. Duraylığın bozulmuş olması için tüneldaki konverjansın aşırı boyutlara ulaşması veya bir göçüğün oluşması gerekmemektedir.

Örneğin tünelde hiçbir olumsuzluk görülmemesine karşın yüzeydeki oturmaların veya örtü kayacı içindeki yer değiştirmelerin zararlı boyutlara ulaşması duraysızlık kabulü için yeterlidir, [10].

Bu deformasyonların nedeni yeraltı suyunun drenajı veya sekonder gerilme durumunun oluşumu sırasındaki vektörel değişimler gibi tünel içinden algılanamayan

etmenler olabilmektedir. Duraysızlığın önlenmesi ve/veya giderilmesi için önlemler; Sağlamlaştırma, destekleme, iyileştirme, korunmadır.

6.2 Gerilme Durumları

Metro gibi yeraltı yapılarının geçkilerinin seçimlerinde kentiçindeki mevcut yapılar (yoğun yerleşim bölgelerinin) altından veya onların etkilenme bölgesi içinden geçilmesi çoğu kez kaçınılamayan bir durumdur. İkinci bir durum yeraltı yapılarının üzerine veya bunların etkilenme bölgesi içine giren yapılaşmaların planlanması ve uygulanmasıdır. Bilindiği gibi mühendislik projelerinde mevcut durumun gerilme dağılımları birincil (primer) gerilme durumu olarak adlandırılmaktadır.

Kazı, imalat ve inşaat sürecinde bu gerilmelerin yer, yön ve şiddet değiştirmesiyle oluşan gerilme dağılımı ise ikincil (sekonder) gerilme durumu' olarak ele alınıp, statik ve dinamik stabilite analizlerinde kullanılmaktadır. Bulunan sonuçlara göre de önlemler belirlenmekte ve yapı elemanları boyutlandırılmasının gereği ancak böyle karşılıklı etkileşimlerin belirlenebilmesi ve sonuçta doğru işlem ve yöntemlerin seçilebilmesidir.

Bu şekilde dengeye kavuşturulmuş olan ikincil gerilme durumunun yeraltı yapılarının inşasından sonraki işletme döneminde yeniden değişime uğraması ile de üçüncül (tersiyer) gerilme durumu ortaya çıkmaktadır. Tersiyer etkiler arasında mevcut yeraltı yapılarının çevresindeki yeni kazı, yapılaşma ve değişen yük koşulları gibi yapay veya erime, kabarma, şişme, ayrışma, yeraltı suyu düzeyi ve kimyasındaki değişmeler ile depremler gibi doğal etkiler bulunmaktadır. Bu bakımdan ele alındığında her yeraltı yapısı projesinin, bilinen primer koşullardan hareketle, sekonder koşullara uygun ve tersiyer etkilenimlere hazırlıklı ve bunları tanımlayıcı şekilde projelendirilmiş olması, uyulması kaçınılmaz olan kurallardandır.

Ana hatları ile yukarda belirtilen maddelerin titizlikle ele alınarak cevaplanması sonucunda planlanan ve projelendirilen teknik yapının ikincil durum aşamasına yönelik hesap ve değerlendirmeler yapılmaktadır. Bu şekilde titiz ve güvenilir çalışmalara dayandırılan plan ve projeler, yine yeterli özen ve denetim altında uygulandığı takdirde sorunlarla karşılaşmamaktadır.

Ancak bilindiği gibi yaşayan ve değişen bir kentte zaman içinde yeni yapılaşmalar gerekmekte ve dolayısıyla mühendislik açısından bu yeni koşulların zorunlu kıldığı daha farklı etkileşimlerin incelenmesi de kaçınılmaz olmaktadır.

Bu durumları dikkate alarak genelde iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan ilki projelerin ileride de oluşabilecek olumsuz etkileşimleri de göz önünde bulunduracak şekilde aşırı emniyetli tarafta hazırlanmaları ve bunun paralelinde yapılaşmaların türüne ve yerleşimine kısmen de olsa kısıtlar getirilmesidir. İkinci yöntemde ise projelerin ikincil durum koşulları için içinde sanki ikinci durumlarımı gibi ele alınmasına izin verilmesidir.

Ancak bu durumda tüm yapılaşmaların geoteknik veri bilgi dosyalarının tutulmuş olması temel koşuldur. Günümüzde artan gereksinimlerin hakların ve beklentilerin paralelinde ve gelişen teknolojinin de etkisiyle kent planlamasında giderek daha fazla ikinci yöntemin uygulanması tercih edilmektedir.

İstanbul metro güzergahı içinde ve yakınında zaman içinde değişik yapıların planlanması kaçınılmazdır. Hangi seçeneğin daha uygun olduğu, yapılaşma, mühendislik jeolojisi, geomekanik ve geoteknik modellerinin doğruluğuna ve yeterliliğine bağlıdır.

Karar alırken; ortamın ikincil zorlanmaları (gerilmeler ve deformasyonlar açısından)

-Hiçbir önlem almaksızın karşılayabilir,

-Ancak mevcut yapılaşmaların (metro tüpleri) da birlikte çalışması halinde karşılayabilir,

-Ön sağlamlaştırma ve /veya iyileştirme almaksızın karşılayamaz

olma durumlarına göre hareket etmek, seçenek değerlendirmesinde belirleyici olacaktır.

6.3 Tünel Gelen Etkilerin Belirlenmesi

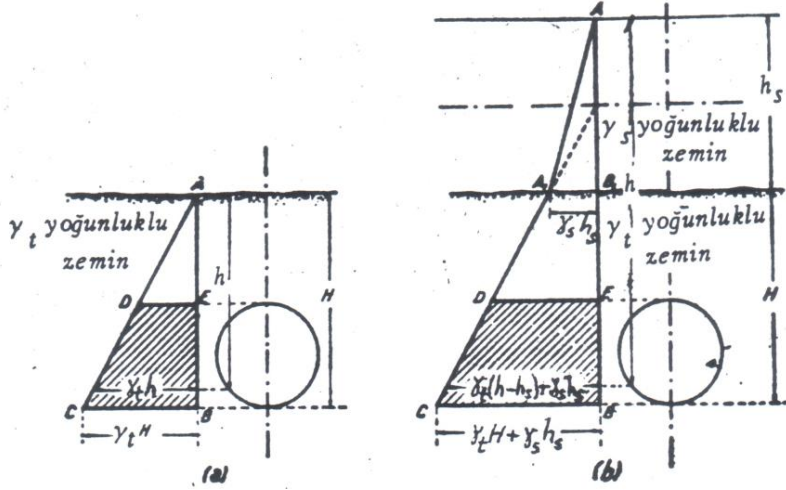
Zeminin yoğunluğu γ_t üniform ise basınç üçgen esasına göre olacağından, h yüksekliğindeki noktaya gelen kuvvet, $P = \gamma_t \times h$ olur.

Fakat yoğunluğun değişmesi halinde, örneğin bir nehir altındaki akıcı zeminde veya kumda açılan bir tünelde (h) yüksekliğindeki noktaya gelen basınç (P) bağıntı

(6.2)'deki gibi olur, Şekil 6.1a ve b. Değişik yoğunluktaki zemin yüksekliği h_s bağıntı 6.3 ile verilmektedir, [1].

$$P = \gamma_t (h - h_s) + \gamma_s \quad (6.1)$$

$$h_s = \gamma_t [h - h_s (1 - \gamma_s / \gamma_t)] \quad (6.2)$$



Şekil 6.1a : Homojen zemin. Şekil 6.1b : Homojen olmayan zemin.

Kohezyonlu zeminler: Bu zeminlerde sorun daha karışıktır. Tünele etkiyen düşey yükün belirlenmesi için en basit yol bunun tüneli açmadan önce sökülecek olan zemin prizmasına gelen yüke eşit olacağı kabulünden ibarettir. Buna göre söz konusu yük kemerin üstünde kalan zemin kısmının ağırlığından oluşur.

Bunun yüzeye yakın tüneller için doğru olduğu kabul edilebilirse de derin tüneller için doğru olmaz. Çünkü tünelin açılması sırasında kemerin üstünde kalan zemin dengesinin bozulmadığı ve zemin kütleğinde hiçbir hareket olmadan kaplamanın yapılabileceği de kabul edilebilir, bu kabul bir önceki ile uyumsuz ve bu da hatalıdır.

Akıcı balçık ve kilde tünel açılması halinde, zeminde sıvı gibi bir akış olur ve yüzeyde belirli bir deformasyon olmadığı halde bu akış bütün zemin içine yayılır. Bu cins zeminlerin bütün tünel yüzeyine basınç yaptığı ve zeminin şişerek tüneli doldurma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Kendini tutamayan sulu kum ve çakıldan oluşan zeminlerde ise tünel içine bir akış olur ve yüzeyde çukurlaşma gösteren bir koni meydana gelir.

Daha sağlam zeminlerde zeminin akması bir müddet devam eder ve bu müddet içinde pratik olarak çökmelerin tamamen durması mümkün değildir. Fakat zemindeki

yan sürtünmeler nedeniyle bu hareket yukarıya doğru gitgide önlenmiş olur, bu olaya **kemerleşme** denir. Böylece kemere gelen yük üstte kalan zeminin tamamının ağırlığı değil, fakat bir kısmının ağırlığından ibaret kalmaktadır. Bu yaklaşım da zeminin homojen olması durumunda doğrudur.

6.4 Geliştirilen Teorik Yaklaşımlara Göre Parametrik İrdelemeler

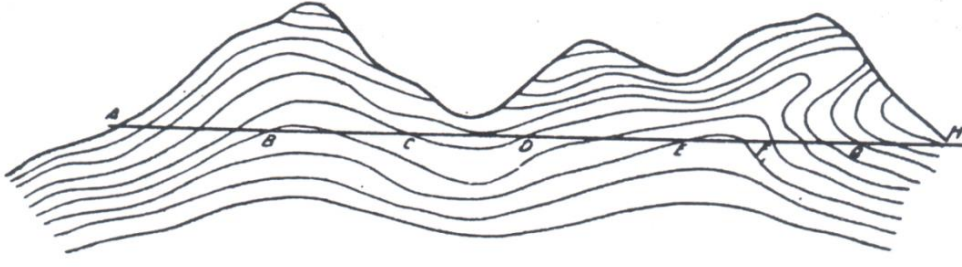
Prensip olarak sert ve orta sertlikte kuru zeminlerin radye altına itki vermedikleri kabul edilir. Fakat kemere gelen yük kenar ayaklar aracılığı ile bunların temeline de etki eder. Zeminin bu yüke mukavemet göstermesi gerekir. Eğer bu basınç zeminin mukavemet kapasitesini geçerse kenar ayakların çökmesi sözkonusu olduğundan yükü daha büyük bir alana verebilmek üzere ters kemer şeklinde çalışan bir radye yapılması yönüne gidilir.

Akıcı kil, balçık vb. sulu zeminlerde durum biraz daha farklıdır. Bu cins zeminlerde radye, zeminden gelen itkiye maruzdur. Ayrıca tünel genellikle kendi hacmi kadar akıcı zemin ağırlığına göre çoğunlukla daha hafif olduğundan Arşimed Kanunu'na göre yukarıya doğru bir itkiye maruz kalır, yani tünel yükselme eğiliminde olur.

Kil ve jips gibi zeminlerde büyük hacim artışları ve buna paralel olarak da büyük itkilerin gelmesi durumu vardır. Kilin cinsine göre şişme miktarı değişir, fazla şişen türlerde iyi önlem almak gerekir.

Sert ve sağlam kaya kitleleri de derin tünellerde tünel cidarlarına önemli itkiler verirler. Açılan tünelin etrafında kaya için bir dağılma bölgesi vardır ve kaplamaya gelen itkinin sebebi budur. Eğer zemin homojense bu bölge dairesel olarak açıldığı kabul edilen kazı boşluğu ile aynı merkezlidir. Pratikte kazı sırasında basınç deneyinde olduğu gibi cidardan mercek şeklinde küçük kaya parçalarının ayrıldığı görülür. Bu olay ancak gerilme birikmesiyle açıklanabilir.

Bunların dışında homojen zeminlerde bile tabakaların şekil ve yönüne göre tünele gelen itkiler çok değişebilir. **Şekil 6.2'deki** boyuna kesitte AB ve GH bölgelerinde tabakalar tünele dik gelmekte olup, tehlikeli bir durum meydana getirmişlerdir.



Şekil 6.2 : Tabaka şekilleri.

İtki büyüktür ve bazı tip kayalarda kayma da olabilir. Buna karşılık BC ve EF kısımlarında tabakalar birer kemer meydana getirdiklerinden tünele gelen itki oldukça az olur. CDE kısmında ise eğik itkiler oluşabilir. Yine kaya içinde sık sık rastlanan kohezyonsuz zemin bölgelerinde anormal kuvvetler de gelebilir. Örneğin pratikte kaya içlerinde su ve kum ceplerine rastlanması çok seyrek olmayan bir durumdur.

Kaplama kalınlığı, tünele dik gelen kısımlar tehlikeli olup burada itki büyüktür. Kemer oluşturan tabakalardan gelen itkiler ise küçüktür. İtkinin büyük olduğu yerlerde daha kalın tünel kaplaması yapılmalıdır.

d= Kaplama kalınlığı,

ρ =Tünel kaplamasının kalınlığını hesap ettiğimiz noktadaki tabakanın eğrilik yarıçapı,

σ_a = Tünel hacmindeki prizmanın zemin içinde olmaması halinde ezilme mukavemeti,

a= Zemin cinsine bağlı katsayı. Mermer ve beton için 3 t/cm^2 , gre için 6 t/cm^2 dir.

σ = Zeminin içinde boşluk olmaması halinde ezilmeye karşı mukavemeti,

σ_m = Tünel kaplama malzemesinin gerilmesi,

σ_s = Yan itkiler olup tünel hacmini işgal eden zeminin yan deformasyonları bu itkiyle karşılanır, [1].

$$\sigma_s = t/cm^2 = \frac{\sigma^2 - \sigma_a^2}{a(1 - \sigma_a)^2} \quad (6.3)$$

Tüneldeki koşullar dolayısıyla gözönünde tutulacak emniyet gerilmeleri aynı malzeme için açık havada alınana göre daha küçük alınır. Bu oran kemerlerde 1/10, kenar ayaklarda ise 1/6-1/7 dir. Uygulamada alınan gerilmeler şöyledir;

Adi tuğla kaplamada	5 kg/cm ²
Pres tuğla kaplamada	12 kg/cm ²
Adi taş örgü kaplamada	25-35 kg/cm ²
Suni taş blok kaplamada	15-18 kg/cm ²
Adi beton kaplamada	25-30 kg/cm ²

Demiryolu tünelleri için zemin itkisine göre verilen kalınlıklar aşağıdaki çizelgede (6.1) özetlenmiştir, [1].

Çizelge 6.1: Demiryolu tünellerinin kaplama kalınlıkları.

İtki (ton/m ²)	İnşaat Malzemesi		Kalınlık (cm)			
			Tek Hat		Çift Hat	
	Kemer	Kenar ayak	Kemer	Kenar A.	Kemer	Kenar A.
0-20	muntazam moelon	Adi moelon	35-45	40-60	50-80	80-100
20-35	kesmetaş	moelon	45-60	60-80	80	120
35-50	kesmetaş	muntazam moelon	80	120	120	180
50-120	muntazam kesmetaş	kesmetaş	80-120	120-150	120-150	180-200

6.4.1 Kommerell Teorisi

Kohezyonlu zeminlerde tünele gelen itki kuvvetleri; Tünellerde taşıyıcı elemanların (kemer, kenar ayak, radye) boyutlandırılması zeminden gelecek itkilerin değerlendirilmesi ile mümkündür. Zeminden gelen düşey itkiler için birçok kavram geliştirilmiştir. Bunların ortak yanı, zeminin bir kesiminin (örneğin parabolik, elips vb. biçimlerdeki zemin kütlesi) itkiyi oluşturmastır. Bu kuramların önde gelenleri aşağıda sıralanmıştır.

Çökme değerleri; a , c ve kabarma $\theta/100$ ise, bu durumda tünelin birim uzunluğu için dx genişliğinde bir elemanter şerit göz önüne alınırsa, tünelin birim uzunluğu için (m) bu şeritin kabarması $x'dx=z'dx'\theta/100$ olur.

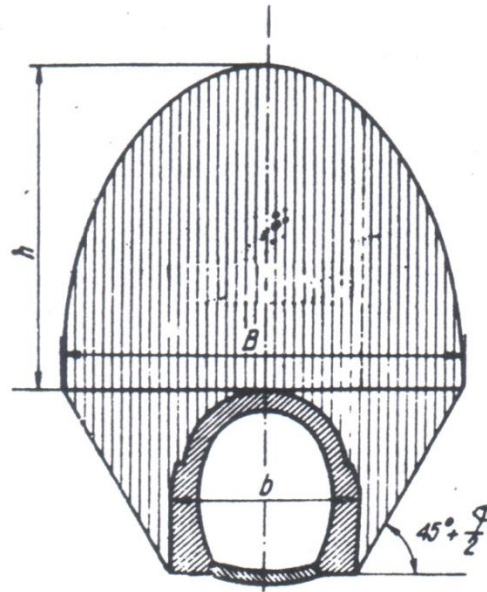
Zemin kabarması değişik zeminler için şöyle alınabilir;

Zemin cinsi	Zeminin kabarması % θ
Gevşek daneli zeminler (kum, çakıl)	1-3
Az kohezyonlu zeminler (kuru balçık)	3-5
Kohezyonlu zeminler (marn, çakıllı balçık)	5-8
Yumuşak kayalar (kumtaşı, kalker)	8-12
Sert kayalar	10-15

Zemin sıkı olmadığı zaman yan itkilerin etkisini de göz önüne almak gerekir. Bu durumda yük veren kütle eğrisinin tavan doğrultusu ile $45 + \frac{\phi}{2}$ doğrultusunun kesişme noktalarından alınması doğru olur. Bu teori şu nedenlerden dolayı biraz yaklaşıktır;

-Kabarma ancak daneli zeminlerde mümkündür. Kayalarda sadece elastik genleşme olabilir ki, bu da birkaç mm mertebesinde.

-Tavan kirişlerinin malzeme cinsi ve boyutları ile daha önemlisi tünel genişliği h yüksekliğinin belirlenmesinde hesaba girmemiştir.



Şekil 6.4 : Sıkı olmayan zeminde yanal itkiler.

Çökme değerleri; a, c ve kabarma $\theta/100$ olsun. Bu değerlere göre çökme parabolü ile zemin kütlelerini anlatan parabolün denklemleri (6.6, 6.7, 6.8, 6.9):

$$A'O'B' \text{ parabolü: } y = \frac{4(c-a)}{b^2} x^2 + a \quad (6.6)$$

$$\text{Kabarma: } \frac{y \times dx \times 1}{z \times dx \times 1} = \frac{\theta}{100} \quad z = \frac{100}{\theta} y \quad (6.7, 6.8)$$

$$\text{Yükseklik: } x=0 \quad z=h \quad h = \frac{100}{\theta} a \quad (6.9)$$

bulunur.

Toplam Düşey İtki (P): Toplam düşey itkinin belirlenmesi için izlenen yol bağıntı 6.10-6.13 ile verilmektedir.

$$\begin{aligned} S_{AO''B} &= 2 \int_0^{b/2} \frac{100}{\theta} \left(\frac{4(c-a)}{b^2} x^2 + a \right) dx = 2 \frac{100}{\theta} \left(\frac{4}{3} \times \frac{(c-a)}{b^2} x^3 + ax \right) \int_0^{b/2} = \\ &= \frac{200}{\theta} \frac{b}{8} \left(\frac{4}{3} (c-a) + 4a \right) = \frac{100}{\theta} b \left(\frac{c-a}{3} + a \right) \gamma \end{aligned} \quad (6.10)$$

Eğer (c-a) çok küçük ise, bu durumda ihmal edilebilir.

AO''B parabolü yerine,

$$\frac{x^2}{(b/2)^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \quad (6.11)$$

Elipsinin yarısı alınırsa;

$$S_{AO''B} = \frac{1}{2} \pi \times \frac{b}{2} \times h = \frac{1}{2} \pi \times \frac{b}{2} \times \frac{100}{\theta} a = \frac{25}{\theta} \pi \times a \times b \quad m^2 \quad (6.12)$$

olur. İtki kuvveti:

$$P = \frac{25}{\theta} \pi \times a \times b \times \gamma \quad (\text{ton}) \quad (6.13)$$

bulunur.

Sayısal Örnek 1:

Marnlı bir zeminde ($\theta=6$) açılacak tünelde, ortadaki çökme 60cm, yanlardaki çökme ise 10cm olarak ölçülmüştür. Tünel genişliği $b=12m$ ve yüksekliği $H=8m$ olup, zeminin çok sıkı olduğu da bilindiğinde göre kemere gelebilecek düşey itki Kommerell Kuramı'na göre hesaplanarak ve Çizelge 6.2 oluşturulmuştur. ($\gamma_z=1,8 t/m^3$ dür.)

Çözüm: İtkiyi oluşturmak zemin kütlelerinin yüksekliği h bulunmalıdır.

$$h = \frac{100}{\theta} a = \frac{100}{6} 0,6 = 10m$$

Parabole göre:

$$P_p = \gamma \frac{100}{\theta} b \left(\frac{c-a}{3} + a \right) \gamma = \frac{100}{6} \times 12 \times 1,8 \times \left(-\frac{0,50}{3} + 0,6 \right) = 156 \text{ ton}$$

Elipse göre:

$$P_e = \frac{25}{\theta} \pi a b \gamma = \frac{25}{\theta} \pi 0,6 \times 12 \times 1,8 \cong 170 \text{ ton elde edilir.}$$

Farklı zemin cinsleri için yukarda verilen bağıntılar kullanılarak, ardışık işlemler sonucunda **Çizelge 6.2'deki** h, S, P_p ve P_e değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 6.2 : Zemin sınıfına bağlı parabolik ve elipstik basınç değerleri.

Zemin Sınıfı	BHA (γ)	θ _k	θ _{kort}	h (m)	S (m ²)	P _p	P _e
Kum	1,95	1-1,5	1,25	48	452,16	811,20	881,71
Çakıl	1,95	1,5-2	1,75	34,28	322,97	579,43	629,79
Yağlı toprak	1,75	2-4	3	20	188,4	303,33	329,70
Killi toprak	1,71	4-6	5	12	113,04	177,84	193,30
Kil	1,74	6-7	6,5	0,11	86,95	139,20	151,30
Marn	1,8	7-8	7,5	8	75,36	124,80	135,65
Kil ve kompakt marn	1,78	8-15	11,5	5,22	49,15	80,49	87,48
Yumuşak kaya	2,1	8-15	11,5	5,22	49,15	94,96	103,21
Sert kaya	2,4	25-40	32,5	1,85	17,39	38,40	41,74

Çizelgede ortadaki çökme (a) 60cm, yandaki çökmeler (c) ise 10cm alınmıştır. Kurama göre zeminden gelen itki zeminin “b” tabanlı, “h” yükseklikteki yarı parabol kesiminin ağırlığına denktir. “b” tünel genişliği olup bellidir, ancak “h” yüksekliğinin hesaplanması gerekir.

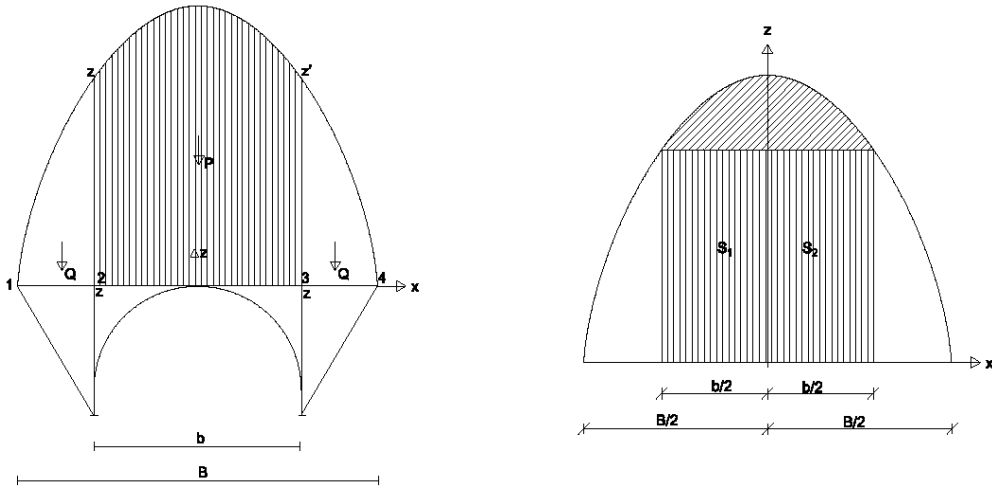
Çizelge 6.2'de “h” değeri ilgili parametrelere göre hesaplandığında kumdan sert kayaya doğru gidildikçe, yüksekliğin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. “h” nın azalması önemli avantaj sağlamaktadır, çünkü tünel üzerine etki eden zeminin yüksekliğinin azalmasıyla itki değeri de önemli ölçüde azalmaktadır.

Örneğin kum zeminde h=48m, itki uygulayan zeminin alanı 452,16m², zemini parabolik kabul ettiğimizde düşey itki kuvveti 811,20 ton iken, eliptik kabul ettiğimizde 881,71 ton olmaktadır. Oysa çizelgenin son satırını oluşturan sert kaya dikkate alındığında h=1,85m, S=17,39m² iken, tünele etki eden zemin alanının oluşturduğu itki kuvveti parabolik kabul edildiğinde P=38,40 ton ve eliptik kabul edildiğinde 41,74 ton olmaktadır.

Etkili alan eliptik kabul edildiğinde parabolik alana göre basınç bir miktar büyük bulunmaktadır. Herikisi de kullanılabilmektedir.

6.4.1.2 Kommerell'e göre zeminin tam sıkı olmadığı durumlarda düşey ve yanal itkilerin hesabı

Düşey itkinin hesabı: Bunun için bağıntılar geliştirilmiştir. φ = Zeminin içsel sürtünme açısı, $45 + \varphi/2$ = Kırılma yüzeyi doğrultusu iken, tünel genişliği alan ve yük bağıntıları 6.14-6.16 ile verilmektedir.



Şekil 6.5 : Sıkı olmayan zeminde itkiler.

$$B = b + 2H \times \cot g \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} S_{zz/4} = S_{1zz'} &= \frac{100}{\theta} \left(\frac{4}{3} \times \frac{(c-a)}{B^2} x^3 + ax \right) \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{B}{2}} = \\ &= \frac{100}{\theta} \left(\frac{4}{3} \times \frac{(c-a)}{B^2} \times \frac{B^3}{8} + a \frac{B}{2} - \frac{4}{3} \times \frac{(c-a)}{B^2} \times \frac{b^3}{8} - a \frac{b}{2} \right) = \\ &= \frac{50}{\theta} \left(\frac{c-a}{3B^2} (B^3 - b^3) + a(B - b) \right) = \\ &= \frac{50}{\theta} (B - b) \left(\frac{c-a}{3B^2} (B^2 + b \times B + b^2 + a) \right) \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$P = \frac{100b}{\theta} \gamma \left(\frac{c-a}{3B^2} b^2 + a \right) \text{ ton.} \quad (6.16)$$

Yatay itkinin hesabı: Kommerell Kuramı'nda içsel sürtünme açısı çok büyükse; zeminden gelen itki, zeminin b tabanlı, h yükseklikteki yarı parabol kesiminin ağırlığına eşittir. b, tünel genişliği olup bellidir, ancak h yüksekliğinin hesaplanması gerekmektedir. Bu bağıntılar ıslak zeminde, kayada ve içsel sürtünme açısı büyük olan zeminlerde kullanılır.

Rankine Kuramı'na göre düşey yük $tg(45 - \frac{\varphi}{2})$ ile çarpılır.

Yatay İtki **6.17-6.19** ile verilmektedir;

- Q parabolik yükünden:

$$E_Q = Q \times tg(45 - \frac{\varphi}{2}) \quad (6.17)$$

- α toprak kitlesinden:

$$E_\alpha = \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \times tg^2(45 - \frac{\varphi}{2}) \quad (6.18)$$

olup, toplam yatay itki E:

$$E = E_a + E_\alpha \text{ olur.} \quad (6.19)$$

Sayısal Örnek 2:

Marnlı bir zeminde ($\theta=6$) açılacak tünelde, ortadaki çökme 60cm, yanlardaki çökme ise 10cm olarak ölçülmüştür. Tünel genişliği $b=12m$ ve yüksekliği $H=8m$ olup, zeminin çok sıkı olduğu da bilindiğinde göre kemere gelebilecek düşey itkiyi Kommerell Kuramı'na göre hesaplanması; ($\gamma_z=1,8 t/m^3$, $\varphi=30^\circ$)

$$B = b + 2H \times cotg\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) = 12 + 2 \times 8 \times cotg(45 + 30/2) = 21m$$

$$P_2 = \frac{100b}{\theta} \gamma \left(\frac{c-a}{3B^2} b^2 + a\right) = \frac{100 \times 12}{6} 1,8 \left(\frac{-0,50}{3 \times 21^2} 12^2 + 0,60\right) = 196 \text{ ton}$$

$$P_p = \frac{100}{\theta} b \times \gamma \left(\frac{c-a}{3} + a\right) = \frac{100 \times 12}{6} 1,8 \left(\frac{-0,50}{3} + 0,60\right) = 156 \text{ ton} \quad (\text{parabol})$$

$$P_e = \frac{25}{\theta} \pi a b \gamma = \frac{25}{\theta} \pi 0,6 \times 12 \times 1,8 \cong 170 \text{ ton} \quad (\text{elips})$$

Yukarıdaki örneğe ait yatay itkilerin hesaplanması şu şekilde yapılır;

$$Z = \frac{100}{\theta} \left(\frac{4(c-a)}{B^2} x^2 + a\right) \quad (6.20)$$

$\theta = 6$, $c - a = -0,5 m$, $B=21 m$, $a=0,6m$ olmak üzere;

$$Z = \frac{100}{6} \times \frac{4(-0,5)}{21^2} x^2 + 0,6 \frac{100}{6} = -0,075x^2 + 10$$

$$Q = \gamma \int_6^{10,5} (-0,075x^2 + 10)dx = 1,8 \int_6^{10,5} -0,025x^3 + 10x \int_6^{10,5} = 38,600 \text{ ton}$$

$$E_Q = Q \times tg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) = 38,6 \times tg30 = 22,280 \text{ ton}$$

$$E_\alpha = \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \times tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 1,8 \times 8^2 \times tg^2 30 = 19,200 \text{ ton}$$

$$E = E_Q + E_\alpha = 41,480 \text{ ton bulunur.}$$

İçsel sürtünme açısının küçük olduğu durumlarda; zeminin tam sıkı olmadığı durumlarda düşey itkinin ve yatay itkinin Kommerell'e göre hesaplanması belirtilen şekilde yapılmaktadır. İlgili bağıntılardan elde edilen **Çizelge 6.3'de** birim hacim ağırlığının ve kabarmanın değişimine göre B, P_e ve P_p değerleri hesaplanarak elde edilen basınç değişimi görülmektedir.

$B = b + 2H \times \cot g(45 + \varphi/2)$ bağıntısında b=12m, a=60cm, c=10cm alınarak B ve P değerleri hesaplanırken φ ve γ değerleri değişken alınmıştır.

Çizelge 6.3 : Zemin cinsine bağlı düşey basınç değerleri.

Zemin Cinsi	φ	BHA (γ)	B	P _e	P _p
İnce Kum	30	1,95	21,23	1222,880	811,20
Çakıl	35	1,95	20,51	726,000	579,43
Kil	40	1,74	19,48	172,420	139,20
Taşla karışık yağlı toprak	45	1,78	18,78	181,673	283,43
Kırma taş	45	2,1	18,78	116,567	94,96
Yumuşak kaya	55	2,1	17,16	113,618	94,96
Sert kaya	80	2,4	14,82	43,486	38,40

Çizelgede “P_e” zemin cinsine bağlı olarak tünele etkiyen ve çökme yüzeyi oluşturduğu kabul edilen eliptik alanın oluşturduğu düşey itkiyi vermektedir. Buradaki kabule göre zemin ağırlığı nedeniyle bir çökme yüzeyi oluşturmaktadır. Bu yüzeyle birlikte oluşan itki ince kumda 1222,888 ton iken sert kayada 43,586 tona düşmektedir. Çünkü sert kayada zemin itkisi azalmaktadır. Bir önceki çizelgede olduğu gibi etkili zemini parabolik kabul ettiğimizde ise, ince kumda itki 811,20 ton iken sert kayada 38,40 ton olmaktadır. Yani zeminin içsel sürtünme açısı arttıkça düşey basınç azalmaktadır. Ayrıca bir önceki çizelgede olduğu gibi alan parabolik alındığında eliptik alınmasına göre değer bir miktar küçük bulunmaktadır.

Çizelge 6.4'de daha önce verilen bağıntılar yardımıyla yatay itkiler de hesaplanmış ve farklı zemin cinsleri için sonuçlar elde edilmiştir. Q parabolik yükünden oluşan yatay

itki ve tünelin yanındaki kütlelenen oluşan etkiler ve bunların toplamı aşağıda verilmektedir.

Çizelge 6.4 : Zemin cinsine bağlı yatay itki değerleri.

Zemin cinsi	BHA (γ)	θ_k	B (m)	Q (ton)	E_Q (ton)	E_α (ton)	E (ton)
İnce Kum	1,95	1,25	21,23	210,34	121,441	20,80	142,24
Çakıl	1,95	1,75	20,51	28,782	14,983	16,91	31,893
Kil	1,74	6,5	19,48	25,460	11,875	12,11	23,985
Taşla karışık yağlı toprak	1,78	6	18,78	26,800	11,101	9,77	20,871
Kırma taş	2,1	11,5	18,78	30,996	12,839	11,53	24,369
Yumuşak kaya	2,1	11,5	17,16	39,82	12,555	6,68	19,235
Sert kaya	2,4	32,5	14,82	2,14	0,187	0,59	0,777

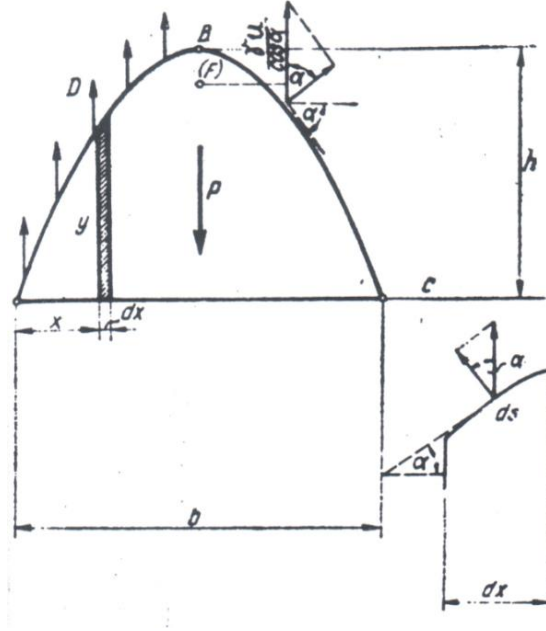
Çizelgede $H=8\text{m}$, $B=12\text{m}$ olarak alınmıştır. Burada E_Q parabolik kabul edilen ve tünele etkiyen zeminin yükünün oluşturduğu yatay itkiyi ifade etmekte olup, ince kumda bu değer 121,441 ton iken, sert kayada 0,187 tona kadar düşebilmektedir. Çünkü zemin sıkılaştıkça tünele etki eden zemin yüksekliği azalmakta, alan küçülmekte, yük de buna paralel olarak önemli azalma göstermektedir.

E_α değeri ise tünelin her iki yanındaki “H” yüksekliğinde tünele etki eden zemin kütlelerinin oluşturduğu yatay itkiyi göstermekte olup, diğerine benzer şekilde zemin sıkılaştıkça oluşan itki kuvveti küçülmektedir.

Örneğin ince kumda 20,80 ton olan değer, sert kayada 0,59 tona inebilmektedir. Toplam yatay itki kuvveti olan E’nin belirlenmesi için, yukarıda bahsedilen iki yanal itki kuvvetinin toplamı alınmakta olup, burada da zemin cinsine bağlı değişim tamamen paraleldir.

6.4.2 Ritter Teorisi

W. Ritter teorisi, düşey zemin itkisi olarak kemerleşme çizgisi altında kalan zemin ağırlığı ile bu çizgi boyunca normal yöndeki (γu) çekim mukavemeti düşey bileşkesini gözönüne almaktadır, **Şekil 6.6.**



Şekil 6.6 : Ritter kemerleşme eğrisi.

Rittere göre b açıklık, u zeminin C kohezyonu ile özgül ağırlığı arasındaki oran olmak üzere, (6.21);

$$u = C / \gamma \quad (6.21)$$

Ritter çekim mukavemetini de dikkate almıştır. Kemerleşme eğrisinin altında kalan zeminin ağırlığı bağıntı (6.25-6.28) ile hesaplanmaktadır:

$$2\gamma \int_0^{b/2} y \times dx - 1 - \gamma \int_0^{b/2} \frac{u}{\cos \alpha} = P \quad (6.22)$$

$$y = \frac{x}{4u} (b - x) \quad (6.23)$$

$$x = \frac{b}{2} \text{ için } y = h \quad (6.24)$$

$$h = \frac{b^2}{16u} \quad (6.25)$$

$$P = \gamma \times b \left(\frac{b^2}{48u} - u \right) \quad (6.26)$$

Çizelge 6.5’de b=12m, a= 0,60m alınarak, bu kabule göre elde edilen sonuçlar h ve P (ton) verilmektedir.

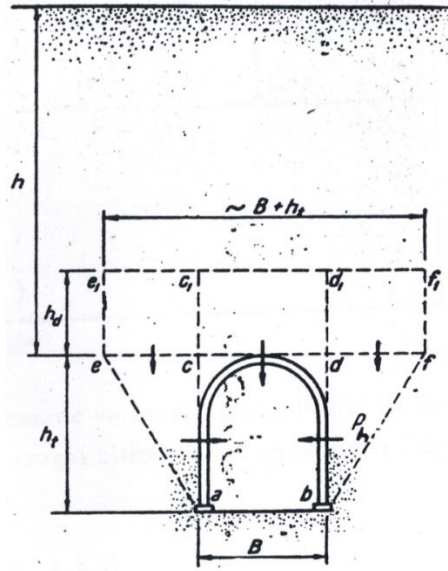
Çizelge 6.5 : Ritter'e göre düşeydeki P yükü değerleri (ton).

Zemin Cinsi	$u = C / \gamma$	Tünel Yüksekliği (h)	Yük (P)
Sıkı ve kuru bitkisel toprak	0,32	28,12	94,35
Rutubetli bitkisel toprak	0,31	29,03	104,68
Killi toprak	0,55	16,36	96,12
Normal nemli kil ve kum	0,50	18	98,28

Ritter Yöntemi'nin verdiği sonuçlarda kohezyon önem taşımaktadır. Kohezyonu yüksek zeminler yanıl destek sağlayarak kendini bir miktar tutabildiği için hesapla bulunan tünel yüksekliği daha düşüktür. Meydana gelen yükler de kohezyonlu zeminde göreceli olarak biraz daha küçük olmaktadır.

6.4.3 Terzaghi Teorisi

Kum ve kaya zeminler için yaptığı araştırmalarda Terzaghi, kaplamaya gelen itkilerin **Şekil 6.7'de** görüldüğü gibi olduğunu belirlemiş ve bununla ilgili (h_d) yüksekliklerini (tünele etkisi olan zeminin yüksekliği) **Çizelge 6.6'daki** gibi vermiştir.



Şekil 6.7 : Terzaghi'ye göre kesit.

Kaplamanın inşasından sonra kemerde ve kenar ayaklarda itki ilk değere oranla %15 kadar artmaktadır. Düşey ve yatay itkileri verecek zemin kitleleri zemin prizmalarından oluşmaktadır.

Hesaplarda gerekli olan h_d değerleri zemin türüne göre $B+h_t$ fonksiyonu olarak tablolastırılmıştır. $P = \gamma \times B \times h_d$ bağıntısından düşey yükler belirlenir. Terzaghi'nin çalışmasının sonuçları **Çizelge 6.6'da** verilmektedir.

γ : zeminin birim hacim ağırlığını, B: tünelin kaplaması dahil genişliği, h_d : tünele etkisi olan zeminin yüksekliğini göstermektedir.

Çizelge 6.6 : Terzaghi'ye göre (h_d) etkili zemin yüksekliği değerleri [1].

Zemin cinsi	Yeraltı su seviyesi üzerinde		Yeraltı su seviyesi altında	
	en az	en çok	en az	en çok
Sıkı kum ilk	0,27 ($B+h_t$)	0,60 ($B+h_t$)	0,54 ($B+h_t$)	1,20 ($B+h_t$)
Sıkı kum son	0,31($B+h_t$)	0,69 ($B+h_t$)	0,62 ($B+h_t$)	1,38 ($B+h_t$)
Gevşek kum ilk	0,47($B+h_t$)	0.60 ($B+h_t$)	0.94 ($B+h_t$)	1,20 ($B+h_t$)
Gevşek kum son	0,54 ($B+h_t$)	0.69 ($B+h_t$)	1.08 ($B+h_t$)	1,38 ($B+h_t$)
Çatlak kaya ilk	$h_d:0.00$ $h_d:0,35 (B+h_t)$			
Çatlak kaya son				
Ayrışmış kaya ilk	$h_d:0,60 (B+h_t)$ $h_d:1,10 (B+h_t)$			
Ayrışmış kaya son				

Sayısal Örnek 3:

B=12m, H=8m olan tünele gelebilecek düşey itkinin gevşek kum zeminde Terzaghi'ye göre hesaplanması aşağıdaki örnekteki gibi yapılır.

$$h_d = 0,69(B + H) = 0,69(12 + 8) = 13,8 \text{ m}$$

$$P = \gamma \times B \times h_d = 2 \times 12 \times 13,8 = 331,2 \text{ ton.}$$

Bu örnekte yukarda verilen değerler için tünele etkisi olan zemin yüksekliği 13,8m ve düşey itki 331,200ton olarak elde edilmiştir.

Farklı zemin cinsleri için elde edilen değerler **Çizelge 6.7'de** verilmektedir.

h_t : Tünel yüksekliği, $B+h_d$: Tünele etkisi olan zeminin genişliği, h_d : Tünele etkisi olan zeminin yüksekliği, B: Tünelin kaplama dahil genişliğini göstermektedir.

$h_t=8\text{m}$, $B=12\text{m}$ alınmış ve **Çizelge 6.7'deki** h_d değerleri ve **6.8'deki** P düşey itki değerleri elde edilmiştir.

$$h_d = 0,69(B + H) = 0,69(12 + 8) = 13,8 \text{ m}$$

$$P = \gamma \times B \times h_d = 2 \times 12 \times 13,8 = 331,2 \text{ ton.}$$

Çizelge 6.7’de kum ve kaya zeminlerin değişik durumları ve yeraltı su seviyesine göre durumları dikkate alınarak, hesapla bulunan tünel açısından etkili zemin yükseklikleri verilmektedir. Tüm katsayılar Terzaghi tarafından hesaplanarak ve yeraltı su seviyesi de dikkate alınarak oluşturulan **Çizelge 6.6’**dan faydalanılıp, önce **Çizelge 6.7** ve sonra **6.8** elde edilmiştir.

Çizelge 6.7 : Hesapla bulunan h_d değerleri (m).

Zemin Cinsi	Yeraltı su seviyesi üzerinde		Yeraltı su seviyesi altında	
	En az	En çok	En az	En çok
Sıkı kum ilk Sıkı kum son	0.27 (B+h _t)=5,4 0.31(B+h _t)=6,2	0.60 (B+h _t)=12 0.69 (B+h _t)=13,8	0.54 (B+h _t)=10,8 0.62 (B+h _t)=12,4	1.20 (B+h _t)=24 1.38 (B+h _t)=27,6
Gevşek kum ilk Gevşek kum son	0.47(B+h _t)=9,4 0.54 (B+h _t)=10,8	0.60 (B+h _t)=12 0.69 (B+h _t)=13,8	0.94 (B+h _t)=18,8 1.08 (B+h _t)=21,6	1.20 (B+h _t)=24 1.38 (B+h _t)=27,6
Çatlak kaya ilk Çatlak kaya son	$h_d:0.00$ $h_d:0.35$ $(B+h_t)=7$ $h_d:0.60$ $(B+h_t)=12$ $h_d:1.10$ $(B+h_t)=22$			
Ayrışmış kaya ilk Ayrışmış kaya son				

Çizelge 6.8 : h_d ’ye göre hesaplanan P düşey basınç değerleri (ton).

Zemin Cinsi	BHA kg/c m ²	Yeraltı su seviyesi üzerinde		Yeraltı su seviyesi altında	
		En az	En çok	En az	En çok
Sıkı kum ilk	1,71	$5,4 \times 12 \times 1,71 = 110,812$	$12 \times 12 \times 1,71 = 246,240$	$10,8 \times 12 \times 1,1 = 221,616$	$24 \times 12 \times 1,71 = 492,480$
Sıkı kum son	1,85	$6,2 \times 12 \times 1,85 = 137,640$	$13,8 \times 12 \times 1,8 = 306,360$	$12,4 \times 12 \times 1,85 = 275,281$	$27,6 \times 12 \times 1,8 = 612,72$
Gevşek kum ilk	1,67	$9,4 \times 12 \times 1,67 = 188,371$	$12 \times 12 \times 1,67 = 240,480$	$18,8 \times 12 \times 1,67 = 376,752$	$24 \times 12 \times 1,67 = 480,960$
Gevşek kum son	1,81	$10,8 \times 12 \times 1,81 = 234,576$	$13,8 \times 12 \times 1,8 = 299,736$	$21,6 \times 12 \times 1,81 = 469,152$	$27,6 \times 12 \times 1,8 = 599,472$
Çatlak kaya ilk	2,41	0.00			
Çatlak kaya son	2,68	$7 \times 12 \times 2,68 = 225,2$			
Ayrışmış kaya ilk	2,16	$12 \times 12 \times 2,16 = 311,0$			
Ayrışmış kaya son	2,38	$22 \times 12 \times 2,16 = 570,2$			

Çizelge 6.8’de diğer çizelge değerlerine paralel olarak tünele etkiyen zemin yüksekliği ilk satırdan son satıra doğru büyüdüğü için düşey itki değeri de büyümektedir. Yeraltı su seviyesi üzerinde sıkı kum zeminde P için ilk değer minimum 110,812 ton iken, ayrıışmış kayada 311,000 ton olmaktadır. Yeraltı su seviyesi altında ise sıkı kum zeminde P için ilk değer minimum 221,616ton iken, ayrıışmış kayada yine aynı yani 311,000 ton olmaktadır. Yeraltı su seviyesi üzerinde sıkı kum zeminde P için ilk değer maksimum 246,240 ton, yeraltı su seviyesi altında ise maksimum değer 492,480 tondur. Çizelgeden değişik durumlar ve zeminler için yorum ve karşılaştırma yapmak mümkündür.

Yatay itkiler: Terzaghi birim yüzeye gelen yatay itkileri ($p_h=kg/km^2$) aşağıdaki formüllerle **(6.27, 6.28)** vermiştir. h_d tünele etkisi olan zemin yüksekliğini ifade etmektedir. $\gamma=kg/m^3$ olarak zemini birim hacim ağırlığını göstermektedir.

$$P_h=3 \times 10^{-5} \gamma (0.5h_t + h_d) \quad (6.27)$$

$$h_d = \alpha(B + h_t) \quad (6.28)$$

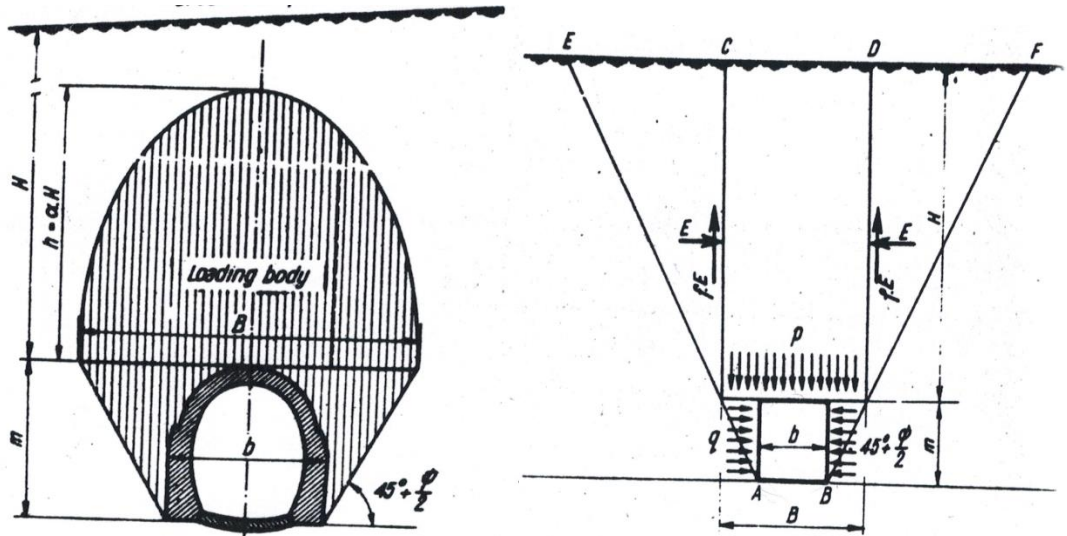
Çizelge 6.9 : h_d ye göre hesaplanan P_h yatay basınç değerleri (kg/m^2)

Zemin Cinsi	BHA kg/cm ²	Yeraltı su seviyesi üzerinde		Yeraltı su seviyesi altında	
		En az	En çok	En az	En çok
Sıkı kum ilk	1,71	210,6	820,80	759,24	1436
Sıkı kum son	1,85	523,26	987,90	910,20	1753,80
Gevşek kum ilk	1,67	671,34	801,60	1142,28	1402,80
Gevşek kum son	1,81	803,64	966,54	1390,08	1715,88
Çatlak kaya ilk	2,41	000,00			
Çatlak kaya son	2,68	884,40			
Ayrıışmış kaya ilk	2,16	1036,80			
Ayrıışmış kaya son	2,38	1856,40			

Çizelge 6.9'da diğer çizelge değerlerine paralel olarak tünele etkiyen zemin yüksekliği ilk satırdan son satıra doğru büyüdüğü için yatay itki değeri de büyümektedir. Yeraltı su seviyesi üzerinde sıkı kum zeminde P_h için ilk değer minimum $210,6(\text{kg/m}^2)$ iken, ayrıışmış kayada $1036,80 (\text{kg/m}^2)$ olmaktadır. Yeraltı su seviyesi altında ise sıkı kum zeminde P için ilk değer minimum $759,24(\text{kg/m}^2)$ iken, ayrıışmış kayada $1036,80(\text{kg/m}^2)$ olmaktadır. Çizelgeden değişik durumlar ve zeminler için yorum ve karşılaştırma yapmak mümkündür.

6.4.4 Bierbaumer Teorisi

Bu teori Alp Tünelleri'nin inşası sırasında geliştirilmiştir. Bu teoriye göre $h=\alpha H$ yüksekliğinde bir parabolle sınırlanmış zemin kütesinin yükü göz önüne alınır, $H(\text{m})$ tünel derinliğini, φ içsel sürtünme açısını, b tünelin genişliğini, m yatay itkinin etkili olduğu yüksekliği göstermektedir. Tünelin açılmasından sonra zeminin $(45+\varphi/2)$ eğimli kırılma yüzeylerine göre kayma eğiliminde olduğu kabul edilir, (**Şekil 6.8**).



Şekil 6.8 : Bierbaumer'e göre etkili büyüklükler.

Buna göre ilgili bağıntılardan $B = b + 2m \times \tan(45 - \frac{\varphi}{2})$ genişliğinde olan tünelin üst kısmına $P = \alpha \times H \times \gamma$ yükünün geldiği kabul edilir. H tünele etki eden zemin yüksekliğini, m tünelin brüt yüksekliğini (kaplama dahil), B yanal etkili zeminle birlikte tünel genişliğini, b kaplama ile birlikte tünel genişliğini göstermektedir. α

statik basıncın ECDF kamaları tarafından uygulanan E toprak basıncının oluşturduğu fE sürtünmeleri nedeniyle meydana gelen küçülmeyi ifade eder. α küçülme veya azalma sayısının değerini belirlemek için (6.29) hazırlanmış olan tek hat veya çift hat geçen tünellere ait BHA=1,8 ton/m³ iken hazırlanan **Çizelgeler 6.10 ve 6.11**'de verilmektedir.

$$P = H\gamma \left[1 - \frac{tg\varphi \times tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) H}{b + 2m \times tg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)} \right]$$

$$\alpha = 1 - [tg\varphi \times tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) H] / [b + 2m \times tg \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)] \quad (6.29)$$

Çizelge 6.10 : Tek hatlı tünellerde (b=7m ve m=8m) Bierbaumer α azalma değerleri.

$\varphi(^{\circ})$ H(m)	15	20	25	30	35	40	45
20	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,74	0,72
30	0,70	0,69	0,67	0,65	0,63	0,61	0,58
40	0,60	0,58	0,56	0,54	0,51	0,48	0,44
50	0,50	0,48	0,44	0,42	0,38	0,34	0,30
75	0,42	0,38	0,32	0,26	0,21	0,17	0,12
100	0,36	0,32	0,26	0,20	0,15	0,12	0,09
125	0,35	0,28	0,22	0,17	0,12	0,09	0,07
150	0,35	0,24	0,19	0,14	0,10	0,08	0,06
175	0,35	0,24	0,17	0,12	0,08	0,06	0,04
200	0,35	0,24	0,17	0,11	0,07	0,05	0,04

Çizelge 6.11 : Çift hatlı tünellerde (b=10m, m=8m) Birbaumer α azalma değerleri.

$\varphi(^{\circ})$ H(m)	15	20	25	30	35	40	45
20	0,86	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83
30	0,79	0,76	0,76	0,73	0,73	0,73	0,73
40	0,72	0,68	0,66	0,64	0,64	0,63	0,63
50	0,65	0,60	0,58	0,55	0,54	0,53	0,53
75	0,48	0,42	0,37	0,33	0,31	0,29	0,29
100	0,39	0,36	0,29	0,24	0,18	0,15	0,11
125	0,35	0,30	0,24	0,19	0,14	0,11	0,08
150	0,35	0,28	0,20	0,16	0,11	0,09	0,06
175	0,35	0,24	0,18	0,13	0,09	0,07	0,05
200	0,35	0,24	0,17	0,12	0,08	0,06	0,04

Tezde bunlardan yararlanılarak hesaplanan P itki değerleri (ton/m) olarak **Çizelge 6.12 ve 6.13**'de verilmektedir.

Çizelge 6.12 : Tek hatlı tünellerde (b=7m ve m=8m) α değerlerine bağlı P yükleri.

$\varphi(^{\circ})$ H(m)	15	20	25	30	35	40	45
20	28,8	28,44	28,08	27,72	27,36	26,64	25,92
30	37,8	37,26	36,18	35,1	34,02	32,94	31,32
40	43,2	41,76	40,32	38,88	36,72	34,56	31,68
50	45	43,2	39,6	37,8	34,2	30,6	27
75	56,7	51,3	43,2	35,1	28,35	22,95	16,2
100	64,8	57,6	46,8	36	27	21,6	16,2
125	78,75	63	49,5	38,25	27	20,25	15,75
150	94,50	64,8	51,3	37,8	27	21,6	16,2
175	110,25	75,6	53,55	37,8	25,2	18,9	12,6
200	126	86,4	61,2	39,6	25,2	18	14,4

Çizelge 6.13 : Çift hatlı tünellerde (b=10m ve m=8m) α değerlerine bağlı P yükleri.

$\varphi(^{\circ})$ H(m)	15	20	25	30	35	40	45
20	30,96	30,24	30,24	29,88	29,88	29,88	29,88
30	42,66	41,04	41,04	39,42	39,42	39,42	39,42
40	51,84	48,96	47,52	46,08	46,08	45,36	45,36
50	58,50	54,00	52,20	49,50	48,60	47,70	47,70
75	64,80	56,70	49,95	44,55	41,85	39,15	39,15
100	70,20	64,80	52,20	43,2	32,40	27,00	19,80
125	78,75	67,50	54,00	42,75	31,50	24,75	18,00
150	94,50	75,60	54,00	43,2	29,70	24,30	16,20
175	110,25	75,60	56,70	40,95	28,35	22,05	15,75
200	126	86,40	61,20	43,2	28,80	21,60	14,40

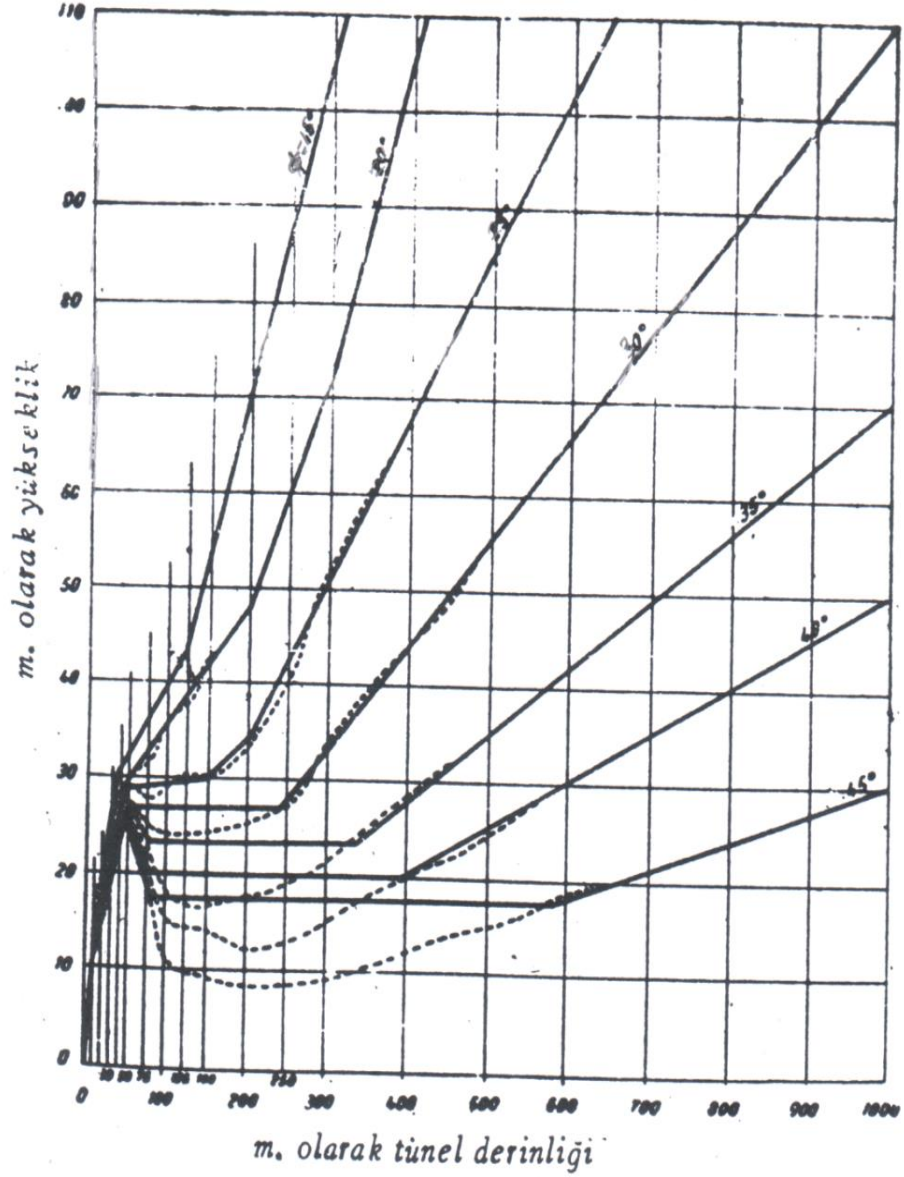
Çizelgeler incelendiğinde, H tünelin üzerindeki etkili zemin yüksekliği büyüdükçe azalma değerleri küçülmektedir, buna paralel olarak da itki değerleri artmaktadır. İçsel sürtünme açısı büyüdükçe azalma değerleri küçülmektedir. ϕ içsel sürtünme açısı çok geniş bir aralıkta değişir. Kum ve iri daneli kaba zeminler kohezyonsuz olduklarından kayma direnci yalnız sürtünme ile sağlanır.

Zeminin doğal olup olmaması ya da kuru veya suya doymuş olması içsel sürtünme açısını etkiler. Zemin tamamen su altında ise bu durumda suya doymuş zemin olarak dikkate alınır. Sadece normal hava koşullarının etkisi altında kalıyorsa, kuru zemin olarak dikkate alınmalıdır. Yarma zeminler genelde sarsıntıya uğramamış doğal zeminler olarak değerlendirilir.

6.4.4.1 Bierbaumer Diyagramları

Bierbaumer tarafından aktif zemin yüksekliği, farklı zemin cinsleri ve farklı tünel derinlikleri için hesaplanmış ve deneysel olarak tahkik edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla **Şekil 6.9 ve 6.10'daki** diyagramlar çizilmiştir, [1]. Bu diyagramlarda farklı zemin türleri için içsel sürtünme açısına ve tünel derinliğine bağlı olarak çift hatlı ve tek hatlı tünellerde etkili olan zemin yüküne ait yükseklikler (m) cinsinden okunabilmektedir.

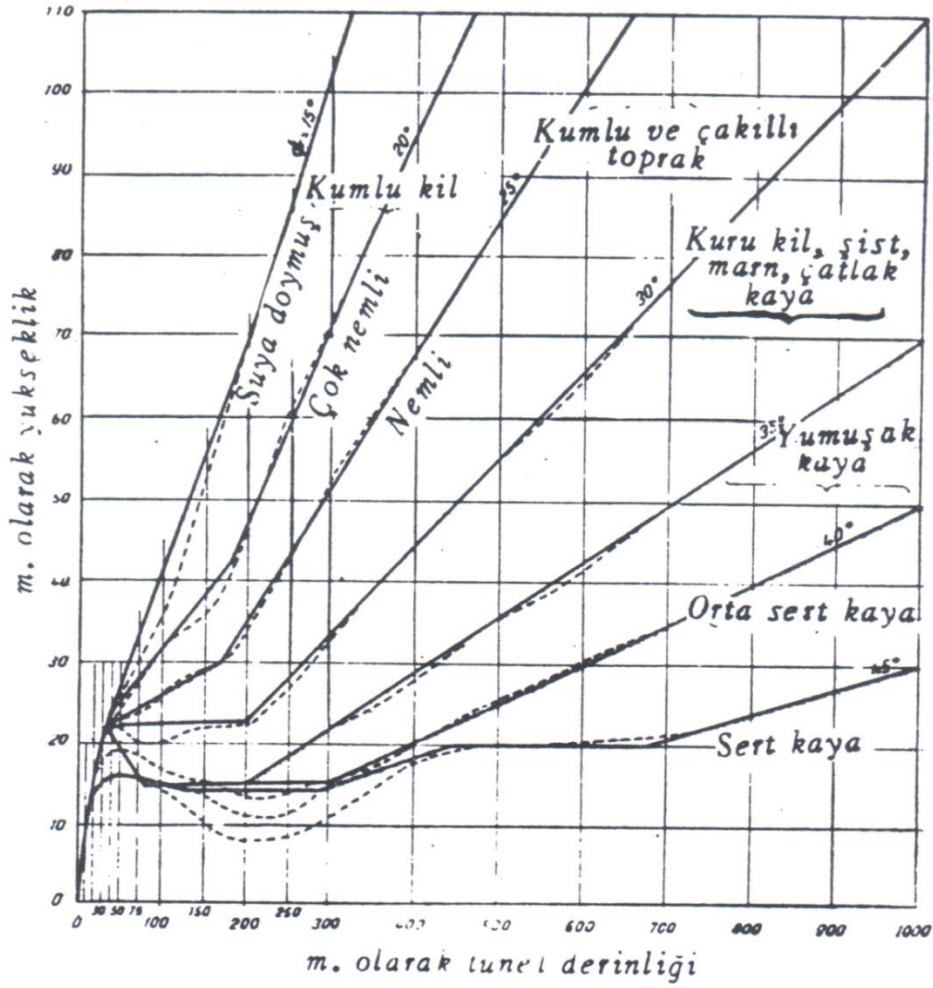
Kazı boyutlarını ifade etmek için kullanılan; $t=8m$ 'nin içinde tünel alt ve üst kaplamsı dahil tünel yüksekliği, $b=8m$ 'nin içinde ise tünelin en geniş (alt kısım) yan kaplamaları dahil tünel genişliği yer almaktadır. Kumlu kil, kumlu ve çakıllı toprak, kuru kil, şist, marn, çatlak kaya, yumuşak kaya, orta sert kaya, sert kaya zemin grupları için diyagramlar oluşturulmuştur.



Şekil 6.9 : Çift hatlı tünelde yük yükseklikleri.

$t=8m$, $b=12m$ için tünel kazı boyutları, noktalı çizgiler hesapla, düz çizgiler deneyle bulunmuştur.

Diyagramda tünel yük yüksekliğinin ve tünel derinliğinin artmasına bağlı olarak hesap ve deney sonuçlarının birbirine yaklaştığı görülmektedir. Yükseklik 40m yi, derinlik 600m'yi geçtiğinde çizgiler çakışmaktadır.



Şekil 6.10 : Tek hatlı tünelde yük yükseklikleri.

$t=8m$, $b=8m$ için tünel kazı boyutları, noktalı çizgiler hesapla, düz çizgiler deneyle bulunmuştur.

6.5 Kaya Zeminde Kırılma

Derin kesimlerde mutlaka kayaya rastlanır. Kayada kohezyon çok büyüktür, itkilerin büyük kısmını karşılar. Hangi derinlikte ve ne zaman itkilerin kohezyonu aşacağını hesaplamak gerekir. Yükseklik arttıkça zeminden gelen itki ile kaya kırılabilir. Birim tabanı kare olan prizmanın yüksekliği H , birim hacim ağırlığı γ iken birim gerilme σ_k aşağıdaki bağıntılara göre (6.30, 6.31) belirlenir.

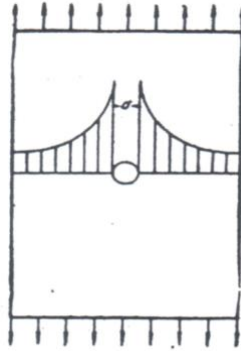
$$\sigma_k = H \times \gamma \times 1 \quad (6.30)$$

$$H = \frac{\sigma_k}{\gamma} \quad (6.31)$$

Sayısal Örnek 4:

Örnek olarak kalkerde: $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_k = 1200 \text{ kg/cm}^2$ iken $H = \frac{12 \times 10^6}{2400} 5000$ m olarak bulunur. Yani kendi ağırlığının etkisiyle kırılma olması için yüksekliğin 5000m olması gerekecektir. Fakat her yönden bu büyük basınçla sıkışan kaya viskoz bir sıvı gibi plastisite gösterir ve basınç bir cins hidrostatik basınca benzetilir.

Pratikte kayanın kırılması için gerekli teorik itkilerin yarısı, hatta üçte biri gelmediği halde, tünel açılması halinde kırılma meydana gelmektedir. Heim bunu kayadaki çatlaklarla izah etmekte ise de basit çatlakların mukavemeti bu kadar düşürmesi tartışmalıdır. Bu olay elastikiyet teorisi ile açıklanabilir. Çekim veya basınç kuvvetlerine maruz bir plak üzerinde açılan ve çapı plak boyutlarına göre çok küçük olan bir delikte **Şekil 6.11'de** görülen kuvvet dağılımı olur ve etraftaki birim basınç plakta hasıl olan ortalama basıncın üç misline kadar çıkar.



Şekil. 6.11 : Kaya zeminde gerilmeler.

d = delik çapı, σ = delikten r uzaklığındaki bir noktadaki gerilme

σ_0 = plağa gelen ortalama gerilme iken, ilgili bağıntılar “6.32-6.34”deki gibidir;

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{d^2}{4r^2} + \frac{3}{16} \times \frac{d^4}{r^4} \right) \quad (6.32)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{d^2}{4\left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{3}{16} \times \frac{d^4}{\left(\frac{d}{2}\right)^4} \right) \quad (6.33)$$

$$\left(r = \frac{d}{2} \text{ ise} \right) \quad \sigma_{max} = 3\sigma_0 \quad (6.34)$$

En büyük gerilme plağa gelen ortalama gerilmenin 3 katı olabilmekte bu da kırılmaya neden olabilmektedir. Genellikle 1800-2000m derinden geçen bir tünel kaya tünel de olsa yıkılma tehlikesi vardır.

6.5.1 Kaya Kütlesi/ kohezif zemin içinde açılan tünellerde tavan basıncı

Bu tip kaya/kohezif zeminlerde tünel tavan basıncı bağıntı 6.35 ile belirlenebilir.

$$P_i = \frac{B * (\gamma - \frac{2c}{B})}{2Ktg\varphi} \left(1 - e^{-Ktg\varphi \frac{2H}{B}} \right) + q e^{-Ktg\varphi \frac{2H}{B}} \quad (6.35)$$

Bağıntıda B= Kemerlenme genişliği (açıklığı) olup, bağıntı 6.36' dan hesaplanır.

$$B = 2(b/2 + h \operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)) \quad (6.36)$$

Bağıntılarda;

b= Tünel kazı açıklığını,

h= Tünel kazı kesitinin yüksekliğini,

γ = Kaya/zeminin yoğunluğunu,

φ = Geçilen kaya kütlelerinin/zeminin kohezyon değerini,

σ_y, σ_z =Sırasıyla yatay ve derinlik (düşey) basıncı

H= Tünel derinliğini

q= Yeryüzündeki sürşarj yüklemesini göstermektedir. (trafik, bina temelleri, diğer mühendislik girişimlerinden aktarılan basınçlar)

$K = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$, genellikle K=1 alınmalıdır,

İksa (tavan) basıncı artan açıklık boyutlarıyla artarken, azalan içsel sürtünme açısıyla da artmaktadır. Limit denge kavramına dayanan Ellstein 1986 yaklaşımına göre sığ tünellerde iksa basıncı “6.37, 6.38”deki gibidir;

$$\frac{P_i}{\gamma D} = \frac{H}{D} + \frac{2}{3} - \frac{C}{\gamma D} (4 + \sqrt{2}) \quad (6.37)$$

ile hesaplanabilir. D tünel kazı çapı, γ birim ağırlık, kohezyonsuz (c=0) zemin/kaya (ayrışmış, çok çatlaklı) kütlelerinde (6.40)daki bağıntıdan $P_i = t/m^2$ cinsinden bulunur;

$$P_i = \gamma D + \frac{2}{3} \gamma D = 1,66 \gamma D \quad (6.38)$$

6.6 Derinliğin Tünel Stabilitésine Etkisi

Derinliğin tünel stabilitésine etkisi vardır, bu konuda yapılan çalışmalarda bazı amprik bağıntılar elde edilmiştir. Örnek değerler üzerinden bir fikir oluşturmak üzere h=50m alınarak amprik bağıntılardan faydalanarak (Z) derinlik değerleri elde edilmiştir. Z yüksekliği zemin üst yüzeyi ile tünel orta aksı arasındaki kot farkını veren derinliktir. Yatay basıncın düşey basınca oranı boyutsuz bir değişken olan (k) ile gösterilir. (Bağıntı 6.39, 6.40)

$$\left[\frac{100}{Z} + 0,3 \right] < k = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} < \left[\frac{1500}{Z} + 0,5 \right] \quad (\text{Hoek, Marinos, 2000}) \quad (6.39)$$

$$k = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} = 0,25 + 7 \times E_y \times (0,001 + \frac{1}{Z}) \quad (\text{Shorey, 1994}) \quad (6.40)$$

Hoek, Marinos ve Shorey'in bağıntılarından hesapla elde edilen Z ve k değerlerinin değişimi **Çizelge 6.14'de** görölmektedir. Shorey'e göre belirlemede $E_y=10000$ ve $Mpa=10$ GPa değerleri örnek alınmıştır.

Çizelge 6.14 : Hoek, Marinos ve Shorey'e göre derinlik (Z) değerleri.

Derinlik	Hoek, Marinos, 2000'e göre		Shorey, 1994
Z (m)	k_{min}	k_{max}	k
5	20,3	300,5	14,32
10	10,3	150,5	7,95
15	7	100,5	5,62
20	5,3	75,5	4,45
25	4,3	60,5	3,75
30	3,6	50,5	3,28
35	3,16	43,36	2,95
40	2,8	38	2,7
45	2,52	33,83	2,5
50	2,3	30,5	2,35
55	2,12	27,77	2,22
60	1,96	25,5	2,11
65	1,84	23,58	2,03
70	1,73	21,93	1,95
75	1,63	20,5	1,88
80	1,28	19,25	1,82

6.7 Kenar Ayaklara Gelen İtkiler

Rankine Hipotezi' ne göre kenar ayaklara gelen yatay itki üstteki zemin yükünün bir “i” katsayısı ile çarpımına eşit olup bağıntısı “6.41” verilmektedir, [1].

$$i = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6.41)$$

Burada zeminin “ φ ” içsel sürtünme açısı olup, $i < 1$ dir. Çok akıcı zeminlerde $i=1$ alınır. Kuru zeminlerde $\varphi=30^\circ$ olup, $i=1/3$, sulu zeminlerde $\varphi=20^\circ$ ve $i=1/3$ alınır. Hennes yatay yükü düşey yükün bir kesiri olarak alır ve “i” katsayısını deneysel olarak Kum için $i=0,32-0,42$, Kil çamuru için $i= 0,67$, Plastik kil için $i=0,75$ şeklinde belirlemiştir.

6.8 Plaxis Yöntemi

Tünele gelen etkileri belirlemek için bilgisayar programları kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan Plaxis programı farklı incelemeler için kullanılır. Hem tünel yapı etkileşiminin belirlenmesinde, hem de tünel stabilite analizinde kullanılarak çift yönlü inceleme yapmaya yarar. Ayrıca tünelden sonra inşa edilen büyük yapıların tünele etkisi de bu programla belirlenebilir.

6.8.1 Tünel yapı etkileşiminde kullanımı

Özellikle tünel–yapı etkileşimi analizlerinde PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılmaktadır. Kazı zemini programdaki 15 noktalı üçgen elemanlar kullanılarak modellenmekte, bu elemanlar 9. dereceden integrasyon olanağı sağlamaktadır. Destek sistemini oluşturan püskürtme betonu, iç kaplama ve iksa perdeleri programdaki özel giriş elemanları ile modellenir. Sistem kazı aşamaları ilgili zemin elemanları kaldırılarak ve gerekli iksa elamanları aktif hale getirilerek modellenmektedir. Program yeni durumda dengeye gelene kadar iteratif olarak çalışmaktadır. Analiz sonucunda her kazı aşaması için tünelde ve iksa sisteminde oluşan deplasman, eğilme momenti, eksenel ve kesme kuvveti hesaplanabilmektedir. Ayrıca, zemin elemanlarındaki deplasman, efektif gerilmeler ve plastikleşen bölgeler görülebilmektedir.

Etkileşim analizlerinde zemin/kaya birimleri hem Mohr-Coulomb hem de Hardening Soil model ile modellenerek her 2 modele ait hesap detayları ve sonuçları görülebilir.

6.8.1.1 Mohr-Coulomb (MC) Modeli

Sıklıkla kullanılan bu modelde (doğrusal elastik–tam plastik model) programa veri olarak zeminin birim ağırlığı, içsel sürtünme açısı, kohezyonu, elastisite modülü ve poisson oranı girilmektedir. Model analizde oluşacak rijitlik farklarını dikkate almaz. Bu nedenle zemin problemlerinde ilk aşama analizler için tavsiye edilmektedir. Tanımlanan sabit rijitlik ile diğer zemin modellerine göre daha hızlı sonuç vermekte olup, analiz sonucunda sistemde oluşabilecek deformasyon mertebesi elde edilebilmektedir.

6.8.1.2 Hardening Soil (HS) Modeli

Zeminin plastik davranışını modelleyen ve sıklıkla kullanılan bu modelde programa veri olarak zeminin birim ağırlığı γ , içsel sürtünme açısı ϕ , kohezyonu c , Elastisite modülü E (E_{50} , E_{oed} , E_{ur}) ve poisson oranı ν girilmektedir. HS zemin modeli, analizlerde kazıdan ya da dolgudan oluşacak rijitlik farklarını dikkate alır, her durum için farklı elastisite modül değeri kullanır. Bu nedenle iksa ve tünel analizlerinde Hardening Soil (pekleşmiş zemin) modelinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

6.8.2 Analizler

Plaxis 10.01 ile yapılan nümerik analizlerde, metro tünellerinin tamamlanmasının ardından yapılması planlanan yapının bodrum kat ve temel kazıları sırasında ve üst yapı inşası sonrasında tünellerde oluşması beklenen deplasmanlar ve ilave kesit tesirleri irdelenir. Analizlerde modellenen inşaat aşamaları genelde aşağıdaki gibi kabul edilebilir;

- Proje sahasının sükunetteki gerilme durumu belirlenir.
- Çevre etkileri sürşarj yükü olarak (trafik yükü, mevcut bina vb.) modele yansıtılır.
- Çevre etkilerinden dolayı oluşan deplasmanlar sıfırlanıp, tünel inşa aşamaları modellenir. Tünelin 3 aşamada açıldığı kabul edilebilir. Örneğin ilk olarak sağ üst yarının açıldığı durum, sonrasında sol üst yarının açıldığı durum ve son olarak alt yarının açıldığı durum farklı aşamalar olarak tanımlanabilir.

Sonuçlar bölümünde yapıya yakınlığına göre tüneller 1, 2, ve 3 şeklinde numaralandırılır.

- Tünelde kazı aşamaları ve iç kaplama uygulama aşamaları sırasında oluşan deplasmanlar sıfırlanıp, olası iksa sistemi belirlenerek bodrum kat ve temel kazıları modellenir.
- Bu aşamaya kadar oluşan deplasmanlar sıfırlanarak, söz konusu yapıların etkileri sürşarj yükü olarak tanımlanır.
- Statik durumda oluşan deplasmanlar sıfırlandırılarak, deprem durumu incelenir.

6.8.2.1 Tünel stabilite analizinde kullanımı

Analizde kullanılacak kesitler örtü kalınlığına göre seçilir. Sığ tünel, orta derin tünel ve derin tünel diye gruplandırılabilir. Belirlenen bu 3 tip kesitin homojen veya tabakalı kaya ortamındaki davranışını incelemek için modellemeler yapılmalıdır. Tabakalı durumu belirlemek için ilgili sondaj kesitlerinden yararlanılır. Örneğin NATM ile açılan Kağıthane-Piyalepaşa Tüneli stabilite analizlerinde örtü kalınlıkları sırasıyla 15m, 45m ve 65m alınmıştır. Analizde Mohr-Coulomb Zemin Modeli kullanılmış, hesaplamalar 3 boyutta plastikleşme teorisine göre yapılmıştır.

Plaxis 3D Tünel Programı hesaplamalarını kademeli inşaat prensibine göre yapmaktadır. Bunun için bir sıralama seçilir. Örneğin hesap adımları genel olarak; birincil gerilme durumunun oluşturulması, sol tüp üstyarı kazısı, sol tüp üstyarı desteklemesi, sol tüp altyarı kazısı, sol tüp altyarı desteklemesi, sağ tüp üstyarı kazısı, sağ tüp üstyarı desteklemesi, sağ tüp altyarı kazısı ve sağ tüp altyarı desteklemesi şeklinde ifade edilebilir, [32].

Plaxis tünelde kullanılan püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme elemanlarını plate adı verilen bir eleman türü olarak kabul etmektedir. Bunların aynı kesitte yer alması durumunda ayrı ayrı tanımlanamadığı için püskürtme beton ve çelik iksanın rijitlik parametreleri ayrı ayrı hesaplanmakta ve toplamaları plate özelliği olarak programa verilmektedir. Bu elemanlar için program girdileri olarak malzemenin elastisite modülü, kalınlığı, birim uzunluk (1m), atalet momenti, ağırlığı, poisson oranı kullanılmaktadır. Destek elemanları aynı, fiziksel ve jeolojik koşulları farklı modellerin analizleri yapılarak tünel çevresindeki noktaların deformasyon

değişimleri incelenir. Tünelin değişik kesimlerini temsil eden modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda tünel çevresinde oluşması beklenen deplasman değerlerinin kazı aşamalarına ve farklı değişkenlere bağlı olarak değişimi ayrıntılı olarak incelenir. Tünel kazısının bitirilip destek elemanların konulmasının ardından tünelde ve etrafındaki kayalarda oluşması beklenen deplasmanlar belirlenir.

Tünellerin geçtiği güzergah boyunca jeolojik ve geoteknik koşullar değerlendirilerek güzergahı temsil ettiği düşünülen tipik kesitler 3 boyutlu modellenip, tünellerin yapımı sayısal olarak analiz edilir. Analiz sonuçları değerlendirilerek jeolojik ortam ve örtü kalınlığı değişkenlikleri yanında tünel açma adımlarındaki farklılıkların olası etkileri incelenir. Analiz sonuçlarına göre incelenen ortamda açılacak tünellerin neden olacağı yer değiştirmelerin izin verilebilir sınırlar içinde kalıp kalmayacağı, jeolojik ortamda yenilmelerin ortaya çıkmasının beklenip beklenmeyeceği ve öngörülen tünel iksa elemanlarının yeterliliği araştırılır. Dolayısıyla planlanan tünellerin güvenli olarak inşa edilmesinin mümkün olup olmadığı belirlenir. Arazide doğal jeolojik ortamda tünel inşası sırasında karşılaşılması olası ezik zon, faylı kesim, örselenme durumu veya daha farklı durumların sayısal modellere tam olarak yansıtılmasında zorluklar vardır. Sayısal analizler ile kullanılan modelin arazi koşulları ile benzeşimi oranında gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, jeolojik ortamın homojen olarak kabul edildiği basitleştirilmiş modeller ile oluşması beklenilebilecek yer değiştirmelerin mertebesinin gerçeğe oldukça yakın tahmin edilebileceği görülmektedir. Tünellerin ön tasarım işlemlerinde, jeolojik ortamın hakim karakterinin doğru seçilmiş geomekanik parametrelerle göz önüne alınması durumunda, homojen modeller kullanılarak yapılacak sayısal analizlerin, yer değiştirmelerin mertebesinin daha hızlı bir şekilde belirlenmesi açısından oldukça yararlı sonuçlar verebileceğine inanılmaktadır.

3D modellemede uzunluğun artışının analiz sonuçları üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir, fakat kazı aynasında stabilite sorunu beklenen bir ortamda yapılması durumunda ise üçüncü boyut önem kazanmaktadır.

İlerleme adımı boyunca hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri üzerinde çok etkili olmadığı gözlenir. Bununla birlikte şehiriçi tünellerde, boyuna doğrultuda jeolojik ortamda öngörülemez değişimler olabileceği göz önüne alınarak ilerleme mesafesine sınırlamalar getirilmiştir. Bu sınır değerler Karayolları Genel

Müdürlüğü “NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi”nde yer almaktadır.

6.9 İncelenen Teorilerin Değerlendirilmesi

Tünel inşaa edilirken tünele bir takım etkiler gelir. Yapacağımız kaplamanın cins ve kalınlığının ve destekleme elemanlarının tespiti için bu etkilerin bilinmesi gerekir ki bunların en önemlisi toprak itkisidir. Toprak itkisi belirlenirken zemin anahatlarıyla 3’e ayrılır. Çok çürük zemin (hidrostatik basınçlar aynen geçerlidir), Daneli zemin (kumlu kil vb.), Kaya zeminler, [38].

Çizelge : 6.15 Kullanılan yaklaşımlar ve çözüm şekli.

Yaklaşımlar	Etkili faktörler ve çözüm sonucu
Kommerell Teorisi	1. Sıkı zeminde; kabarma katsayısı etkili, parabol yüksekliği, parabol alanından, parabol yükü/elipsin yükü düşey itkiyi verir. 2. Gevşek zeminde; içsel sürtünme açısı, kabarma katsayısı, tünel derinliği etkili, düşey itkiyi ve yatay itkiyi verir.
Ritter Teorisi	Kohezyonlu zeminde; kohezyonun birim hacim ağırlığına oranı etkili, parabol yüksekliği, parabol yükü düşey itkiyi verir.
Terzaghi Teorisi	Kohezyonsuz zeminde; su seviyesine göre zemin kotu, tünel derinliği etkili, düşey itkiyi ve yatay itkiyi verir.
Bierbaumer Teorisi	Her tip zeminde; içsel sürtünme açısı, tünel derinliği etkili, yük yüksekliği için diyagramdan yararlanılabilir, parabol yükü düşey itkiyi verir.
Plaxis Programı	Her tip zeminde; sonlu elemanlar yöntemini kullanır, tünel yapı karşılıklı etkileşimi ve tünel elemanlarının çözümünü verir.

Çizelge : 6.16 İstanbul Metro’su A tünel tipi için hesap sonuçları.

	Kurtköy Formasyonu (İri daneli)		Trakya Formasyonu (İnce daneli)	
Yaklaşımlar	Düşey Yük (ton)	Yatay Yük	Düşey Yük (ton)	Yatay Yük
Kommerell Teorisi	53,08	-	63,14	28,98
Ritter Teorisi	56,88	-	53,67	-
Terzaghi Teorisi	148,03	867,84(kg/m ²)	-	-
Bierbaumer Teorisi	40,95		34,22	

Kommerell Teorisi kemere gelen yük hesabında en çok kullanılan ve en eski olan teoridir, daneli zeminler için uygundur. Kemerleşme çizgisinin bir parabol olduğu kabulüne göre yükün yüksekliğinin tayini esasına dayanır. Kommerell'e göre zemin itkisi ile taban deforme olarak bir parabol formunu alır. Gevşek zeminde yük veren kütle eğrisi taban doğrultusu ile $45+\varphi/2$ lik açı yapacak şekilde alınır.

Bu teori; kabarmanın sadece daneli zeminlerde mümkün olması ve tavan giriş malzemeleri, cinsi ile tünel genişliğini hesaba katmadığı için bir miktar farklı sonuç verir.

Ritter Teorisi düşey zemin itkisi olarak kemerleşme çizgisi altında kalan zeminin ağırlığı ile bu çizgi boyunca normal yönde “ γu ” çekim direnimlerinin düşey bileşkesini gözönüne almıştır. Ritter Kuramı'nın Kommerell Kuramı'ndan farkı kemerleşme eğrisi boyunca zemin daneleri arasındaki çekim kuvvetinin hesaba katılmasıdır. Burada $u=c/\gamma$ birim hacim ağırlığına karşıt olan kohezyon kuvvetinden başkası değildir. Tabiatı zemin homojen değildir, kalınlık da fazla ise “ h ”ın tayini için $h=P/\gamma$ olarak alınmıştır. Sonuç olarak düşey itki kemerleşme eğrisi altındaki zemin ağırlığı ile yüzey boyunca yayılı çekim kuvvetinin bileşkesidir.

Terzaghi Teorisi kum ve kaya zeminler için yaptığı araştırmalara göre kaplamaya gelen itkileri belirlemeye yöneliktir. Bu nedenle tüm zeminler için araştırılmamıştır. Genelde kaplamanın inşasından sonra kemerde ve kenar ayaklarda itkinin ilk değere oranla %15 kadar arttığı kabul edilir.

Bierbaumer Teorisi ‘ h ’ yüksekliğinde bir parabolle sınırlanmış zemin kütlesinin yükünü gözönüne alır. Statik basıncın yatay toprak basıncının oluşturduğu sürtünmeler nedeniyle küçüldüğü düşünülür. Küçülme katsayısı tek ve çift hatlı tüneller için ayrı ayrı belirlenmiştir. Küçülme katsayısının 2 limit değeri olup, derinliği çok az olan yerlerde $\alpha=1$ alınır. Derinlik $5B$ 'den büyük ise küçültme katsayısı çok az değişir ve $\alpha = tg^4(45 - \frac{\varphi}{2})$ olarak alınır. Bierbaumer tarafından aktif zemin yüksekliği, farklı zemin cinsleri ve farklı tünel derinlikleri için hesap yapılarak ve deneysel çalışmalarla çift hatlı ve tek hatlı tüneller için diyagramlar oluşturulmuştur. Bu diyagramlarda hesap değerlerinin deneysel değerlerle büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir.

Radyeye gelen itkilerde; genelde prensip olarak sert ve orta sertlikte kuru zeminlerin radye altına itki vermedikleri kabul edilir. Fakat kemere gelen yük kenar ayaklar aracılığıyla bunların temelini de etkiler. Dolayısıyla zeminin bu yüke mukavemet

edebilmesi gerekir. Eğer bu basınç zeminin mukavemet kapasitesini geçerse kenar ayaklar çökebilir. Bu nedenle yükü daha büyük bir alana verebilmek üzere ters kemer şeklinde çalışan radye yapılmalıdır. Zemin akıcı kil, balçık vb. gibi akıcı ve sulu ise, burada durum farklı olup bu zeminler radyeden gelen itkiye maruz kalır. Ayrıca tünel genelde kendi hacmi kadar olan akıcı zeminin ağırlığına göre daha hafif olduğundan yukarıya doğru bir itkiye maruz kalır. Üstteki zemin bu harekete karşı bir direnims gösterir. Tünel çok derin değilse, yukarıya doğru bir hareket olup olmayacağı incelenmelidir.

Kil ve jips gibi zeminlerde büyük hacim artışları ve buna paralel olarak da büyük itkilerin gelmesi ihtimali vardır. Kil kazının başlangıcında desteksiz olarak kendini tutar, sonradan kendini tutabilme kapasitesi kilin cinsine bağlıdır. Özellikle montmorillonit gibi fazla şişen killerde tünel kazısından sonra su emmesi ile bir şişme meydana gelir. Bu şişme sırasında tünel cidarlarına gelen itkiler giderek artar ve böylece ilk zamanlarda yeterli olan kaplama bozulur. Buna önlem olarak zemin ile kaplama arasında bir miktar boşluk bırakmak ve kilin şişmesine izin vermek bir önlemdir.

Tünele gelen etkileri belirlemek için Plaxis de kullanılmaktadır. Destek sistemini oluşturan püskürtme betonu, iç kaplama ve iksa perdeleri programdaki özel giriş elemanları ile modellenir. Sistem kazı aşamaları ilgili zemin elemanları kaldırılarak ve gerekli iksa elemanları aktif hale getirilerek modellenmektedir. Program yeni durumda dengeye gelene kadar iteratif olarak çalışmaktadır. Analiz sonucunda her kazı aşaması için tünelde ve iksa sisteminde oluşan deplasman, eğilme momenti, eksenel ve kesme kuvveti hesaplanabilmektedir. Ayrıca, zemin elemanlarındaki deplasman, efektif gerilmeler ve plastikleşen bölgeler görülebilmektedir.

SONUÇLAR

Çalışmada, İstanbul Metrosu ve tünel açma çalışmalarının yanısıra tünele gelen itkilere ilişkin teoriler ve yaklaşımlar incelenmiş, karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Şu sonuçlar elde edilmiştir;

Yaklaşımlar	Farklılıkları
Kommerell Teorisi	Sıkı zemin ve gevşek zemin için ayrı bağıntılar kullanılır. Sıkı zeminde, kabarma katsayısı etkilidir, parabol/elips alanından, parabol yükü/elipsin yükü ile düşey itki hesaplanırken, gevşek zeminde, içsel sürtünme açısı, kabarma katsayısı, tünel derinliği etkili olup, düşey itki ve yatay itki hesaplanır.
Ritter Teorisi	Kohezyonlu zeminde uygundur, kohezyonun zemin birim hacim ağırlığına oranından parabol yüksekliği, parabol yükünden düşey itki hesaplanır.
Terzaghi Teorisi	Kohezyonsuz zeminde uygundur, su seviyesine göre zemin kotu, tünel derinliği etkili olup, düşey itki ve yatay itki hesaplanır.
Bierbaumer Teorisi	Her tip zeminde kullanılır, içsel sürtünme açısı, tünel derinliği kullanılarak parabol yükünden düşey itki hesaplanır.
Plaxis Programı	Her tip zeminde kullanılır, sonlu elemanlar yöntemini kullanır, tünel yapı karşılıklı etkileşimi ve tünel elemanlarının çözümünü verir, deprem yükü de hesaba katılır.

İstanbul metro tünellerinin geçtiği alanın jeolojisi ve jeoteknik özelliklerine göre; metro hattının Avrupa ve Anadolu yakasında bazı kısımlarında, mevcut formasyonlarda bölgesel sıkışmadan kaynaklanan düzensizliklerin metro çalışmasının kazı işlerinde ve formasyonun taşıma gücünde sorun oluşturduğu, taşıma gücünün düştüğü izlenmektedir. Bu düzensizliklerden hat boyunca görülen andezit daykları, özellikle Kadıköy-Kartal metrosunda Maltepe, Gülsuyu İstasyonlarında kazı çalışmasında bazı zorluklar çıkarmıştır. Hattı kesen dayklar ve

Kurtköy Formasyonu'nun ayrılmış zonları problem oluşturan başlıca kesimlerdir. Yer yer hat üzerinde asidik yüzey sularının oluşturduğu karstik boşluklar sızıntıya ve hat üzerinde kalan yolda küçük çapta çökmeye neden olmuştur. Belirtilen jeolojik yapı ve açıklanan sorunlar nedeniyle kazı çalışmaları aksamış ve hattın bitirilme süresini de uzatmıştır.

İstanbul Metrosunda en yaygın tip olan anahat tünellerindeki destekleme sistemlerinden A3 ve A5 karşılaştırıldığında; A3 destekleme sistemi; Jeolojik durum uygunsa, su mevcudiyeti tüneli fazla miktarda zorlamıyorsa, fay zonu yoksa, dinamik yüklerin tesiri yoksa, örtü kalınlığı fazlaysa, geçki üzerinde yapılaşma yoksa, çevresel koşullar uygunsa tercih edilmektedir. Bunların tersi durumlarda ise A5 uygulanmakta ve bu tipte maliyetler yaklaşık olarak 2 kat artmaktadır.

Tünele gelen etkilerin belirlenmesi için farklı teori ve yaklaşımlar sözkonusu olup, bunlar farklı durumlar için incelenip, birbiriyle karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmaktadır;

- Teorilerin en eskisi Kommerell Teorisi olmakla birlikte, biraz yaklaşıktır. Bunda kohezyon dikkate alınmamakta, sadece yük hesaplanmaktadır. Zemin sıkılaştıkça ve kendini tutabilme yeteneği arttıkça tünele etki eden zemin yüksekliği azalmakta, alan küçülmekte, yük de buna paralel olarak önemli azalma göstermektedir. Tünelin her iki yanında bulunan ve tünele etki eden zemin kütlelerinin oluşturduğu yatay itki kuvveti de, benzer şekilde zemin sıkılaştıkça küçülmektedir. Etkili alan eliptik kabul edildiğinde, parabolik alana göre basınç bir miktar büyük bulunmaktadır.

- Kommerell Teorisine göre yatay itki belirlenirken; E_Q parabolik kabul edilen ve tünele etkiyen zeminin yükünün oluşturduğu yatay itkiyi ifade etmektedir. Zemin iyileştikçe tünele etki eden zemin yüksekliği azalmakta, alan küçülmekte, yük de buna paralel olarak önemli azalma göstermektedir. E_a değeri ise tünelin her iki yanındaki "H" yüksekliğinde tünele etki eden zemin kütlelerinin oluşturduğu yatay itkiyi göstermekte olup, diğerine benzer şekilde zemin sıkılaştıkça oluşan itki kuvveti küçülmektedir. Toplam yatay itki kuvveti olan E'nin belirlenmesi için, yukarıda bahsedilen iki yanal itki kuvvetinin toplamı alınmakta olup, burada da zemin cinsine bağlı değişim tamamen düşey itkiye paraleldir.

- Ritter Yöntemi'nde kohezyon ve zeminlerin çekim mukavemeti hesaba katılmakta, kemerleşme eğrisinin altında kalan zeminin ağırlığı dikkate alınmaktadır. Kohezyonu yüksek zeminlerde tünele etki eden zemin kütlesi ve hesapla bulunan tünel

yüksekliği azalmaktadır. Yükler de Kommerell'e göre aynı tip zeminde göreceli olarak küçük olmaktadır.

- Terzaghi Yöntemi'nde; kum ve kaya zeminlerin değişik durumları ve yeraltı su seviyesine göre konumları dikkate alınarak, hesapla bulunan tünel açısından etkili zemin yükseklikleri izelge şeklinde verilmektedir. Tüm katsayılar Terzaghi tarafından hesaplanarak ve yeraltı su seviyesi de dikkate alınarak oluşturulan çizelgeden yararlanarak, etkili yükseklik ve zemin itkisi belirlenmiştir. Buradan farklı durumlar ve zeminler için yorum ve karşılaştırma yapılabilir. Yeraltı su seviyesinin altında kalan kum zeminde, su seviyesinin üstündeki zemine göre düşey itki büyümekte kaya zeminde ise değişmemektedir.

- Bierbaumer Teorisi 'h' yüksekliğinde bir parabolle sınırlanmış zemin kütlesinin yükünü gözönüne almaktadır. Statik basıncın yatay toprak basıncının oluşturduğu sürtünmeler nedeniyle kldğu düşünülür ve bunu göstermek için bir katsayı tanımlanır. Küçülme katsayısı tek ve çift hatlı tüneller için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bierbaumer tarafından aktif zemin yüksekliği, farklı zemin cinsleri ve farklı tünel derinlikleri için hesap yapılarak ve deneysel çalışmalarla belirlenip, çift hatlı ve tek hatlı tüneller için diyagramlar oluşturulmuştur. Bu diyagramlarda hesap değerlerinin deneysel değerlerle büyük ölçüde rtştğu görülmektedir.

Tezde Bierbaumer için hazırlanan çizelgeler incelendiğinde, tünelin üzerindeki etkili zemin yüksekliği büyüdükçe azaltma değerleri küçülmektedir, buna paralel olarak da itki değerleri artmaktadır. İçsel sürtünme açısı da azaltma değerlerini etkilemektedir. İçsel sürtünme açısı çok geniş bir aralıkta değişir. Kum ve iri daneli kaba zeminler kohezyonsuz olduklarından kayma direnci yalnız sürtünme ile sağlanır.

Tünele gelen etkileri belirlemek için kullanılan bilgisayar programlarının başında sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı Plaxis Yöntemi gelir. Bu yeni yaklaşımla hem tünel yapı etkileşimlerini, hem de tünel stabilitesini sağlamak için gerekli destekleme elemanlarının tahkikini yapmak mümkündür. Metro hatları giderek yaygınlaşmakta olup, metro tünellerinin gabarilerinin ve destek elemanlarının belirlenmesinde kullanılan yaklaşımların pratik, doğru olması ve birçok parametreyi içermesi önemlidir.

neriler: Bu konuda daha sonra çalışma yapacak olan Araştırmacıların, İşstanbul metro hatları için yapılmış zemin etdlerinden yararlanarak ve ilgili tünel kesitlerini

kullanarak itkileri hesaplamaları önerilir. Yapılabilecek diğ er bir çalışma da tüm tünel tipleri için uygulanan destekleme elemanlarını karşılaştıran ve yorumlayan bir çalışma yapmaktır. Ya da tünel yapı etkileşimini belirlemeye yönelik olarak hat yakınındaki örnek bir bina için Plaxis programı kullanılarak inceleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Bozkurt, M.** (1987). *Tüneller Ders Notları*, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul, Türkiye.
- [2] **Arioğlu, E.** (2009). YTÜ Tünel Ders Notları 3. Bölüm, Yapı Merkezi Ar-ge Bölümü.
- [3] **Eren B, Akgün N, Yalçın T, Şahin A.** (2012). Gelişmiş Metro Sistemlerinin Araştırılması, İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma, Bitirme Ödevi.
- [4] http://www.marmaray.com/turkish/tech_immersed.html, 21.01.2014 de indirildi.
- [5] <http://www.marmaray.com.tr/BatirmaTupTunel>, 21.01.2014 de indirildi.
- [6] Terzaghi lecture: Hoek, E, 2001. Big tunnels in bad rock, 2000 Terzaghi lecture. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **127**, No. 9, Sept 2001, pages 726-740.
- [7] Rankine lecture: Hoek, E. 1983. Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture, Géotechnique. **33** (3), 187-223.
- [8] <http://mic-ro.com/metro/table.html>, 21.01.2014 de indirildi.
- [9] <http://www.ostimgazetesi.com/haber/dunyada-ve-turkiyede-metro/960> 21.01.2014 de indirildi.
- [10] http://www.istanbul.net.tr/istanbul_raylisistemler_metro.asp
- [11] **Project finance for construction & infrastructure : principles & case studies**(Oxford :Blackwell Pub, (2008).
- [12] **Vardar M.** (1994). Metro Tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması, Sağlamlaştırma-Destekleme-İyileştirme, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [13] **Babin C.** (1973). Bivalvia of the Kartal Formation of Devonian age, İstanbul (Paleozoic of İstanbul: Ed O. Kaya). Ege Üniv. Fen Fak. Kitaplar Serisi, No.40, ss. 37-89, İzmir.
- [14] **Öztürk O.** (2012). 1. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı, Kadıköy-Kartal Metro Hattının Jeolojik Yapısının İrdelenmesi, 11-13 Ekim, Karabük Üniversitesi.
- [15] **Carls, P.,** (1973). Strophomenids of the Lower Devonian Kartal Formation, İstanbul (Paleozoic of İstanbul: Ed. O. Kaya). Ege Üniv. Fen Fak. Kitaplar Serisi, no.40, sf. 89-94, İzmir.
- [16] **Çakır, Ş.** (2000). Demirciler-Sadıklar-Gündoğdu-Tütünciftlik (Kocaeli) bölgesinin jeolojisi. Kocaeli Üniv. Fen Bilimleri Ens. Anabilim Dalı: Jeoloji, doktora tezi.
- [17] **Eroskay ve Kale,** (1986). İstanbul Tüp Geçiş Güzergahında Jeoteknik Bulgular, İBB.

- [18] **Bozkurt C.** (2010). Darüşafaka-Haciosman Arası Anahat Tünellerinin (Hat1:23+100- 24-522- Hat 2:23+135-24+557) Mühendislik Jeolojisi.
- [19] **Köksal M. D.** (1994). İstanbul Metro İnşaatı 4. Levent-Şişli Güzergahında Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Ölçüm Çalışmaları, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [20] **Alkan M. S. Erbaş R.** (1994). Metro İstasyonları Kazı Çalışmaları ve Taksim İstasyonundaki Uygulama Örnekleri, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [21] **Kurt C. Yılmaz Ö. Şimşek S.** (1994). İstanbul Metrosu Tünellerinde Boru Şemsiye Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [22] **Erdinç, E.** (1993). Tünellerin Kısa Tarihçesi, *Yeni Avusturya Tünel İnşaat Metodu*, 8-14, İstanbul, Türkiye.
- [23] **Öztürk H. T, Durmuş, A.** (2008). İstanbul Bülten, Tünelere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi, sayı 96.
- [24] **Ayözen Y. E.** (2012). Metro Projelerinde Yatırım ve İşletme Maliyetine Boyuna Eğimin Etkisinin Araştırılması, İTÜ, FBE Yüksek Lisans Tezi.
- [25] **Tunç A.** (2002). Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım.
- [26] **Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P and Silva Cardoso, A.** (2004). Characterization of Granite and the Underground Construction in Metro do Porto, Portugal. *Proc. International Conference on Site Characterization*, Porto, Portugal, 19-22 September, 2004.
- [27] **Hoek, E.** (2001). Rock mass properties for underground mines. in *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. (Edited by W. A. Hustrulid and R. L. Bullock), Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME) 2001.
- [28] **Atasoy, A.** (2010). ‘‘İstanbul Metrosu III. Aşama Tünellerinde Kullanılan Destekleme Tipleri ve Maliyetlerinin İncelenmesi’’ İTÜ, FBE Yüksek Lisans Tezi.
- [29] **Arioğlu, B. Yüksel, A. Arioğlu E.** (1994). İncirli-M. İnönü Tüneli Yapım Çalışmaları ve Üretim Parametreleri, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [30] **Kurt, C. Yılmaz, Ö. Şimşek, S.** (1994). İstanbul Metrosu Tünellerinde Boru Şemsiye Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [31] **Matschke G. Deeg P. Werning S.** (2008). Effects of trong Cross Winds on High Speed Trains: A methodology for risk assesment and development of countermeasures, BBAA International Cooloqium on: Buff Bodies Aerodynamics, Milano, July 20-24.
- [32] **Cheli F.** (2008). Risk Analysis of Cross Wind on HS Rome-Naples Railway Line, BBAA International Cooloqium on: Buff Bbodies Aerodynamics, Milano, Italy, July 20-24.
- [33] **Couchard I, Cotthem A, Hick S.** (2004). The Belgian High-Speed Railway Soumagne Tunnel Project, Springer-Verlag, Verlag Berlin Heidelberg.

- [34] **Arioğlu, E.** (2009). YTÜ Tünel Ders Notları 3.4.5. Bölümler, Yapı Merkezi Ar-ge Bölümü.
- [35] **Alkan, S. Erbaş, R.** (1994). Metro İstasyonları Kazı Çalışmaları ve Taksim İstasyonundaki Uygulama Örnekleri, *Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 1-3 Aralık.
- [36] **Hoek, E., Marinos, P., Kazilis, N., Angistalis, G., Rahaniotis, N., Marinos, V.** (2006). Greece's Egnatia Highway Tunnels. *Tunnels & Tunnelling International*, September 2006, 32-35
- [37] **Aktaş, S.** (2009). Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ile İnşa Edilen bir Tünelin Sonlu Elemanlarla Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.
- [38] **Hoek, E.** (1977). Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organization. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **14**, No. 2, 93-101.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Onur Öztürk

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 01.01.1988

Adres: Uskumruköyü Arıköy Sitesi, no 80, İstanbul/Sarıyer

E-Posta: onur.ozturk@live.com

Lise: Haydarpaşa Anadolu Lisesi

Lisans: İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh Böl. 2012

Mesleki Deneyim: Yeditepe Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak 2013'te çalışmaya başladı.

Yayın ve Patent Listesi:

1)Öztürk Z., Çatalkaya U., **Öztürk O.**, (2012) Toplu Taşıma Sempozyumu ve Sergisi, Ulaşım Kaynaklı İklim Değişimi ve Azaltma Çalışmaları, 28-29 Aralık, İstanbul.

2)Öztürk Z., Ersöz E., **Öztürk O.**, (2012) Toplu Taşıma Sempozyumu ve Sergisi, Demiryolunda Enerji Tüketimine Bağlı Hava Kirliliği, 28-29 Aralık, İstanbul.

3) Atasoy A., Öztürk Z., **Öztürk O.**, (2012). 1. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı, Metro Tüneli Kazı Destek Tiplerinin Karşılaştırılması, 11-13 Ekim, Karabük Üniversitesi.

4) Öztürk O., (2012). 1. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı, Kadıköy-Kartal Metro Hattının Jeolojik Yapısının İrdelenmesi, 11-13 Ekim, Karabük Üniversitesi.

5) A. Faik İyınam, Öztürk O. (2013). 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı İstanbul'daki Metroların Avrupa Şehirlerindeki Metrolarla Karşılaştırılması, Karabük Üniversitesi.

6) Öztürk O. (2013). 2.Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı, Metro Tünellerinin Açılması Sırasındaki Etkilerin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- A. Faik İyınam, **Öztürk O.** (2013). 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı İstanbul'daki Metroların Avrupa Şehirlerindeki Metrolarla Karşılaştırılması, Karabük Üniversitesi.
- **Öztürk O.** (2013). 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı, Metro Tünellerinin Açılması Sırasındaki Etkilerin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi.