

YENİ İTALYAN TÜNELAÇMA YÖNTEMİ'NİN GELİŞİM SÜRECİ ve İZMİR METROSU BORNOVA TÜNEL İNŞAATI ÖN DESTEK TASARIMINDA UYGULANMASI

Development Procedure of the New Italian Tunnelling Method and Its Application in Pre Support Design at İzmir Metro Bornova Tunnel Construction

Geliş (received) 09 Nisan (April) 2009; Kabul (accepted) 12 Mayıs (May) 2009

Turgay ONARGAN(*)
Mete KUN(**)
Cağatay PAMUKÇU(***)
C.Okay AKSOY(****)

ÖZET: Bu makalede, geçtiğimiz yüzyıl boyunca ve girdiğimiz 21. yüzyılın başlarında tünel duraylılığı ve tahkimatında uygulanan Yeni İtalyan Yöntemi esas alınarak, TBM (Tunnel Boring Machine) kullanılarak açılan tünellerden daha ziyade, geleneksel yöntem olarak isimlendirdiğimiz delme-patlatma veya kollu kazı makinası ile açılan tünellerin tahkimatında yaşanan yenilikler ele alınmıştır. Yeni İtalyan Yöntemi'nin gelişim süreci ve İzmir Metrosu Bornova tüneli örneği üzerinde uygulanması makalenin özünü oluşturmaktadır. İlk kısımda, yeraltı boşluklarında kayacın kendini taşıma prensibinden bahsedilmiş ve daha sonra 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başında kullanılan pasif tahkimat sürecinden bu yana Yeni İtalyan Yöntemi'ne gelinceye kadar geçilen süreç kısaca özetlenmiştir. Son kısımda ise, Yeni İtalyan Yöntemi'nin İzmir Metrosunda uygulanışı üzerinde durulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Yeni İtalyan Yöntemi, NATM, İzmir Metrosu, Sığ Tünel

ABSTRACT: In this paper, innovations encountered in the tunnel support driven by conventional methods rather than using TBM's have been discussed on the basis of the New Italian Tunnelling Method which has been applied in tunnel support during the past century and at the beginning of the 21st century. The development procedure of the New Italian Method and its application in İzmir metro-Bornova tunnel construction forms the main theme of the paper. In the first part, the self support of rocks in underground openings has been mentioned, and then the progress towards the New Italian Method since the use of passive support in the late years of the 19th century and in the early years of the 20th century has been summarized. In the final part, the application of the New Italian Method in İzmir metro has been explained profoundly.

Keywords: New Italian Tunnelling Method, NATM, İzmir Metro, Shallow Tunnel

(*) Prof.Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Müh. Bölümü 35160-Buca/İZMİR

(**) Araş.Gör. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Müh. Bölümü 35160-Buca/İZMİR, mete.kun@deu.edu.tr

(***) Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Müh. Bölümü 35160-Buca/İZMİR

(****) Doç.Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fak. Maden Müh. Bölümü 35160-Buca/İZMİR

1. GİRİŞ

Tünel açma işlemi esnasında, inşaat teknikleri daima doğal ortama uyulanmalıdır. Bu nedenle, iyi bir tahkimat yöntemi, kaya kütlelerinin değişken yapısına bağlı olmalı ve salt teoriye saptanmamalıdır. Bu çalışma, son yıllarda özellikle metro tünel açımı sırasında başvurulan Yeni İtalyan Yöntemi'nin gelişim sürecini ve İzmir Metrosu Bornova hattında uygulanabilirliğini araştırmaktadır.

20. yüzyıl boyunca tünel duraylılığı ve tahkimatı hakkındaki fikirler 3 ana teknik farklılıkla ifade edilmektedir;

- 1920' ler de, ahşap ve taş kullanılan "pasif tahkimat" hüküm sürmüş, daha sonra çıkan ağır çelik tahkimat ve yerinde dökülen beton ile de, daha geniş tünel boşluklarına imkan tanınmış ve tünel açımında daha yüksek ilerleme hızları elde edilmiştir.
- 1960' lar da, inşaat ve maden mühendisliğinde püskürtme beton ve kaya saptamalarının icadı Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin doğmasına sebep olmuştur. Bu yöntem hem derin hem de sık tünellerde gelişmeler göstermiştir.
- 1990' lar da ve 2000' li yılların başında ise, arının ilerisinde uygulanan yeni geliştirilmiş ön tahkimat sistemleri kullanılmış ve bu da zayıf zemin şartlarında Yeni İtalyan Yöntemi'nin kullanılmasına yol açmıştır (Duffaut, 1996a).

Tünelciğin ilk yıllarından beri, yeraltı açıklıkları ve boşluklarının kendi kendini desteklemesi, hiçbir ilave destek elemanına gerek duyulmadan yapılmıştır. Kemerlenme olarak da isimlendirilen bu temel prensip, tarih öncesinde insanoğluna düşük dayanımlı kayalar içinde bile, çok fazla süreksizlik içermemesi koşuluyla, duraylı boşluklarda barınma imkanı vermiştir.

Geçmişte kendi kendini destekleme prensibi, köprüler ve kiliseler için, çatı kemerleri inşasında kullanılmıştır. Bu tür kemerler, kendisini oluşturan bloklar tam oturtulduğu takdirde, çimentoya gerek duymadan ayakta kalabilmişlerdir. Burada kemerler; yerçekimi kuvvetlerini, kendini oluşturan elemanlarının ilerlemeli sıkıştırma etkisi ile karşılarlar. Yeraltında bu tip 3 boyutlu kemerlenmeler ve meydana gelen yükler doğa tarafından karşılanmaktadır. İnşa edilen kemerler için doğru kabul edilen her şey doğal

olarak oluşmuş veya insan eliyle açılmış tüneller ve yeraltı boşlukları için de geçerlidir (Duffaut, 1996b).

- Şayet kayaç, tünel etrafındaki (dairesele bir boşluğun çevresinde yaklaşık olarak $R_c > 3 \cdot \sigma_v$) teğetsel gerilmeleri karşılayacak kadar dayanımlı ise ve eğer kötü şekilde yönlendirilmiş eklem yüzeyleri içermiyorsa, boşluk herhangi bir tahkimata gerek duymadan ayakta kalacaktır. Genişliği 50 metre kadar büyük olan doğal boşluklar günümüzde oldukça yaygındır ve bugüne kadar bilinen ve kendi kendine dayanan en büyük boşluğun genişliği 400 metredir (Good Luck Yeraltı Boşluğu, Malezya).
- Kayacın dayanımı boşluğun çevresi boyunca aşıldığı zaman ve kaya kütlelerinin oldukça homojen olması durumunda, boşluğun etrafında fazla gerilmeyi barındıran "plastik bir halka" oluşmaktadır. Plastik deformasyon tarafından kaya kütlelerine verilecek yüksek hasar, düşük kalınlıktaki bir tahkimatla yani ince bir püskürtme beton kaplamasıyla önlenemez.
- Son olarak, şayet kayaç kütlesi çok fazla çatlaklı ve hatta zemin malzemesi şeklindeyse, kendi kendini taşıma olayı artık geçerli değildir ve kaya kütlelerini bir bütün olarak tutmak, kuvvetlendirmek için çimentolamaya veya kaya saptamalarına ihtiyaç vardır.

2. PASİF (EDİLGEN) TAHKİMAT SÜRECİ

Tünelciliğin ilk yıllarında, tüm tünel kesiti daha küçük kesitlere bölünüyor ve birinin ardından diğeri açılarak, boşluklar yoğun ahşap tahkimatla kapatılıyordu. O yıllarda tünel inşaatının İngiliz, Belçika, Fransız, Alman, Avusturya ve İtalyan tünelcilik yöntemleri gibi birçok "ulusal" yöntemlerle anılması bir sürpriz sayılmazdı.

Bu yöntemlerde, kendi kendini desteklemenin yeri "iyi zemin" şartlarıyla veya ahşap üniteler arasındaki ufak boşluklarla kısıtlanmıştı. Kullanılan ahşap tahkimat geçici olup, uzun süre dayanabilecek taş veya tuğla kemerler ile yer değiştirmesi gerekiyordu. Bu tür yapıların başlıca dezavantajı, çevre kayaç ile dokanaklarının hem geç olması (örneğin kemerin inşası haftalar gerektiriyordu) hem de süreksiz olmasıydı. Yani

düz bir yüzeye sahip kemer, pürüzlü kayaç yüzeyine tam oturmuyordu. Bu gecikme, kaya kütlelerinin aşınmasına ve gevşemesine olanak tanımış oluyor ve yavaş yavaş kemer üzerine artan yükler gelmeye başlıyordu. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, tünelcilik konusunda iki yenilik ortaya atıldı;

- Geçici tahkimat olarak çelik tahkimatlar ahşap tahkimatın yerini aldı ve sonuçta daha büyük boşlukların desteklenmesi sağlandı. Terzaghi tarafından 1949'da standardize edilen bu yöntem daha sonra, Amerikan Çelik Tahkimat Metodu olarak isimlendirildi. (AÇTM) (Terzaghi ve Peck, 1949).
- Nihai kaplama olarak taşın yerini, yerinde dökülen beton aldı ve bu sayede biraz geç olsa da, kaya kütleleri ve kemer arasında homojen bir dokanak sağlandı.

Söz konusu 2 yenilik, tünelcilikte endüstrileşmeye yol açtı. Daha az insan gücüyle daha hızlı ilerleme mümkün oldu. Ancak, uzun süre boyunca bu ilerleme, pasif tahkimatın şu iki temel dezavantajını gizledi;

- Oldukça uzun süren operasyon gecikmesi,
- Betonun dökülmesinden önce tahkimat ile çevre kayaç arasındaki süresiz temas.

Sonuç olarak, bu süreçte nihai kaplama dayanımlı bir yapı olarak tasarlanmış ve bilinmeyen dış yüklerle karşı güçlendirilmiştir. Bu yüzden, yapısal hesaplamalar, daha çok net olmayan ve sonucu önceden kestirilemeyen hipotezlere dayandırılmıştır.

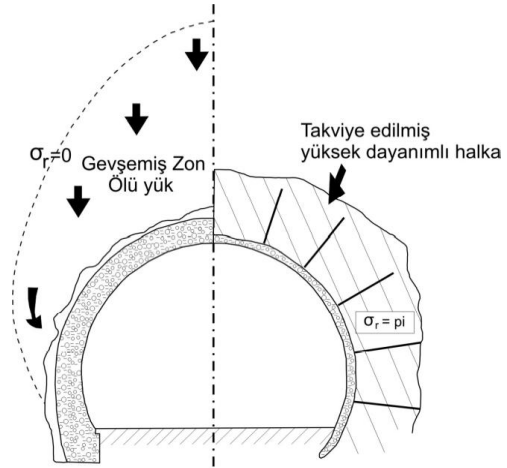
Pasif tahkimatlara özgü bu dezavantajlar, sığ tünellerin bir çoğu için göz ardı edilebilir düzeyde olmuştur. Aynı tolerans, sert kayaçlarda açılan derin tüneller için de geçerlidir (1875'deki Gothard demiryolu tüneli gibi). Ancak, bu dezavantajlar 1900 yılında Simplon tüneli yüksek derinlikte ufalanmış kayaç geçmek zorunda kaldığında engelleyici olmuştur. Kalınlığı ne olursa olsun, hiç bir kemer 2000 metrelik bir dağın baskısını kaldıramaz. Burada anlaşılması gereken olgu, kömür madencilerinin yaptığı gibi kayacın akmasına izin vermektir. Bu süreçte, yüksek derinliklerdeki kayaçların davranışına alışılarak, kömür gibi ufalanmış ve yumuşak kayaçların nasıl ele alınacağı öğrenilmiştir. Alp'lerdeki bu deneyim, İsviçre'li mühendisler Maillart

ve Andrea için bir dayanak oluşturmuştur. Bu sayede püskürtme betonun verimliliği on yıllar öncesinde kanıtlanmıştır. Bu doğrultuda Maillart ve Andrea isimli araştırmacılar aşağıdaki yorumları yapmışlardır.

- "taş tahkimat kaya kütle konturunu sıkıca tutmalıdır" (Maillart, 1922).
- "hızlı monte edilen hafif bir tahkimat, kaya basıncına karşı en etkin yoldur" (Andrea, 1949).

3. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİNİN (NATM) GELİŞTİRİLMESİ ve KULLANIMI

1960'lar da İsviçre'li mühendislerce ortaya konmuş yukarıdaki prensipleri, Avusturyalı mühendis Von Rabcewicz pratiğe dökmüş ve uygulanabilen iki yeni teknoloji ortaya koymuştur. Kömür madencilerinden kaya saplamalarını, Amerika'dan püskürtme betonu örnek olarak yöntemin hedefini net olarak belirlemiştir. Buna göre temel prensip, kaya basıncını bir sürü ağır elemanlar yardımıyla tahkim etmeye çalışmak yerine (Şekil 1) "kaya kütlelerinin kendisini desteklemesine yardım etmektir." (Karakuş ve Fowel, 2004).



σ_r : Radyal Gerilme
Pi : Plastik zonda tahkimata etki eden tavan basıncı

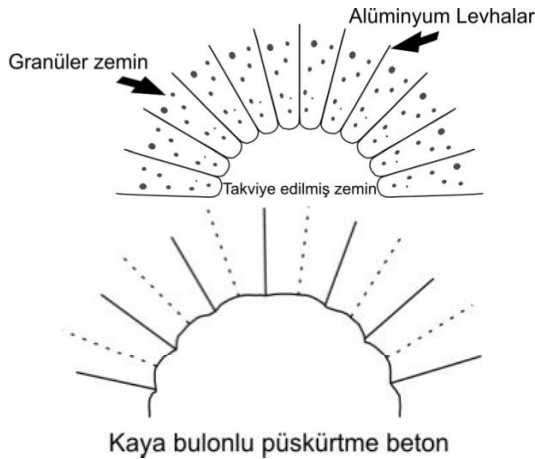
Şekil 1. Kalın, pasif (edilgen) bir tahkimatla (soldaki NATM'nin "takviye edilmiş halkasının" (sağdaki) karşılaştırılması.

Avusturyalı mühendisler, aynı zamanda tünel kesitinin, şeklinin ve kazı yönteminin, çevre

zemine vereceği zarardan mümkün olduğunca kaçınılması gerekliliğinin önemli olduğunu anlamışlardır. Aynı zamanda tıpkı baraj mühendisleri gibi, zamana bağlı olarak zeminin vereceği reaksiyonların da ölçülmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kaya kütlesi + kaya saplamaları + püskürtme beton ile oluşan kompleks, örneğin taneli zemin kütlesi + metal çubuklar + panellerle takviye edilmiş zemin ile (Şekil 2) karşılaştırılabilir. Her iki durumda da, ana mekanik rol takviye edilmiş kaya veya zemin kütlesi tarafından üstlenilmektedir; püskürtme beton sadece bir yüzey kaplaması gibi etki göstermektedir ve asıl rolü korunması, açıktaki taze kaya kütlelerini korumaktır.

Sonuç olarak, NATM yöntemi 20. yüzyılın ikinci yarısını kontrol eden bir tünelcilik sanatı olarak görünmektedir. Bu yöntemin temelinde, zeminin zayıflığını bazı yapay ve pahalı yapılarla bertaraf etmek yerine, zeminin yerindeki özelliklerinin iyileştirilmesi yatmaktadır. Arapça'dan gelen "tahkimat" sözcüğü burada biraz yanıltıcı olmaktadır, püskürtme beton ve kaya saplamalarının etkisi zemini tutmaktır. Fakat asla zemini tahkim etmek değildir.



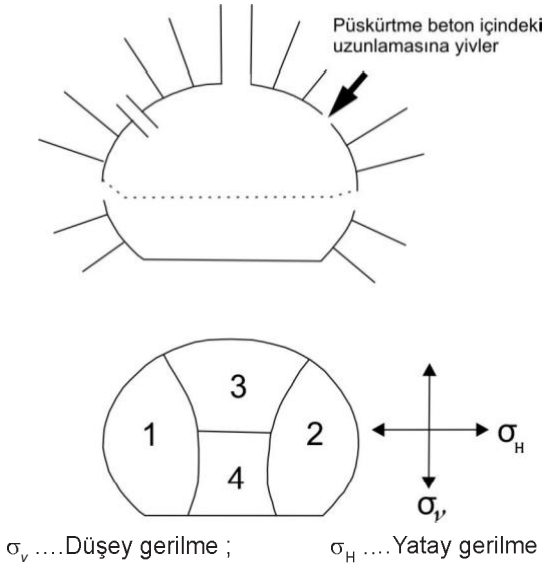
Şekil 2. Püskürtme beton ve kaya saplamasından oluşan bir tünel tahkimatı ile (aşağıdaki) takviye edilmiş zemin kemeri (yukarıdaki) arasındaki benzerlik.

Bu yöntemdeki tek şüphe, uygulamasının çok çabuk sürede yapılmasının gerekliliği, özenli bir iş organizasyonunun sağlanması ile gerçek ve eş zamanlı izleme işlemlerinin yapılmasıdır. 1970'li ve 1980'li yıllarda, çoğu Almanya'da, İtalya'da ve Japonya'da olmak üzere NATM

yöntemi ile yüzlerce kilometre uzunluğunda tünel açılmıştır. Ancak, bazı başarısızlıklar da bildirilmiştir. En bilinen başarısızlık örnekleri 1994 yılındaki Münih tüneli ve yine 1994 yılındaki İngiltere'deki Heathrow hava alanı altındaki tünellerdir. İlk olayda alüvyonlu çakıltaşının beklenmedik şekilde derinleşmesiyle tünelin taç kısmı göçmüştür. İkinci olayda ise; çok karamsar bir tasarım ile üç paralel tünel açılmaya çalışılmıştır. Kireçtaşı içinde açılan kanal tüneline geçerli olan bu yöntem, Londra kilinde başarısız olmuştur.

1970'ler ve 1980'ler boyunca, "güçlendirilmiş kayaç halkası" kavramı birçok ülkedeki geleneksel tünel inşasında vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Günümüzde de hala, örtü tabakasının kalınlığına bağlı olarak uygulamaları farklılık göstermektedir:

- Derin tüneller için,** kayacın alt üst olmasını önleyerek, elastik veya elasto-plastik gerilme ferahlamasına eşlik etmek gerekmektedir. Tahmin edilen kapanma, püskürtme beton kabuğu kıracak kadar güçlü ise, kayaç kapanıma başlar başlamaz kapanacak uzunlamasına yivler yaratmak gerekmektedir (Şekil 3). Bu tür yivler, kaya saplamaları vasıtasıyla kayaç külesinden tam anlamıyla aşağıya doğru sarkmış kemerin bağımsız parçalarının sınırlarını belirlemektedir. Tauern, Karwendel, Arlberg ve Inntal tünelleri Alp dağları içinde bu yolla açılan en zor tüneller arasında sayılabilir.
- Sığ tüneller için,** çoğunlukla da zeminde veya yumuşak kayalarda sürülen sığ tüneller için, zemindeki geri dönülmez makaslama kuvvetini önlemek ve yüzey oturmalarını sınırlamak için her tür deformasyon önlenmelidir. 1980'li yıllarda, Avusturyalı mühendisler, üst kılavuz kazı yerine yanlarda sürülen iki sivri kemer şekilli galeri ile yer değiştirmeyi düşünmüşlerdir. Bu şekil, zemin yüzeyinde hakim olan düşük yatay gerilmelere daha uygundur (Şekil 3). Viyana'nın ve bir çok Alman şehrinin metro tünelleri, ve aynı zamanda Almanya'da inşa edilen 150 km. lik hızlı tren yolu tünelleri gerektiğinde çimentolamadan veya yeraltı su seviyesinin düşürülmesinden sonra, bu tarzda inşa edilmiştir. Bununla birlikte, Avusturyalılara bir ihracat primi ödemek istemeyen Almanlar, metodu "püskürtülmüş beton kaplama metodu" olarak isimlendirmişlerdir.



Şekil 3. NATM'nin değişkenleri: (yukarıda) uzunlamasına yivler içeren derin tünel, (aşağıda) sivri kemer şekilli yan galeriler.

Almanya'nın dışında, ana tünelciler, yani İtalyanlar ve Japonlar, NATM uygulamalarını kendilerine 1970'li yıllarda uyarlamışlardır ve bunları Çin 1980'li yıllarda izlemiştir. O zamandan itibaren, bu ülkeler sadece iki tünel açma yöntemini kullanmışlardır: TBM (Tunnel Boring Machine) veya NATM.

3. FRANSTZ YÖNTEMİ

NATM' nin Fransa'ya ilk gelişi 1970'lerde özellikle Elektrik İşleri tarafından olmuştur. Aynı süreç içinde, Fransız mühendisler Panet' in (1995), rehberliğinde tünel dizaynına ilginç bir katkıda bulunarak "konverjans-sınırlama" yöntemini geliştirmişlerdir . Bu teori, bir tünel etrafındaki halkanın davranışını ifade etmek için matematiksel terimler kullanmaktadır. Tahkimat üzerine gelen gerilmeler, bu halkanın giderek kapanmasıyla azalmaktadır. Yöntem iki boyutlu hesaplamalar kullansa da, üstü kapalı olarak tünel arını tarafından üstlenilen üç boyutlu rolü hesaba katmaktadır ve bunu yaparken "yükü boşaltma faktörünü - λ" yı kullanmaktadır.

Pratikte, birçok Fransız şirketi NATM' yi görmezden gelmeye devam etmiş ve bu terimi Fransız terminolojisinden çıkarmışlardır. Bunu yaparken, zayıf taban koşullarında daha kazançlı sonuçlar veren eski iyi "pasif/edilgen tahkimat"

sistemini kullanmışlardır. Bu kalıplara sıkı sıkıya bağlı kalma, 1985 yılından sonra Fransız iştirakçilerin TBM ve kalkan kullanmasıyla gelişmektedir.

Aslında, o yıllarda bu metodun (NATM) varlığı ve tam tanımı konusunda bilimsel ortamlarda tartışmalar yaşanmıştır. Bu yöntemin uygulama değişkenlerinin bazı teorisyenleri endişelendirdiği doğrudur ancak uygulamada NATM ile açılmış bir tünel, ortak ve net birtakım ölçütlerle tanınmaktadır:

- Kayacın kendini desteklemesine duyulan güven ve yuvarlak şekil,
- Püskürtme beton ve kaya saplamalarının hemen kullanılması,
- Kesitin hızlı kapanımı ve deformasyonun dikkatli bir şekilde izlenmesi.

Fransız mühendisler, NATM uygulamalarını uluslararası projelerle mükemmel şekilde bütünleştirmişlerdir. Bunun dikkat çekici bir örneği Cenevre yakınlarındaki CERN yeraltı boşluklarıdır. 20 metre açıklığa sahip bu boşlukların ayırıcı karakteristiği, ilk defa olarak duraylılık hesaplarında püskürtme beton kabuğun göz ardı edilmesidir. Bu kabuğun, hiçbir rolü yok anlamına gelmemelidir, tam tersine, bu kaplama sayesinde tüneli çevreleyen kayaç gevşememekte ve orijinal özelliklerini korumaktadır.

4. YENİ İTALYAN YÖNTEMİ ve GELİŞİMİ

Yumuşak veya zayıf zeminlerde, ya da örtü tabakasının çok ince olduğu yerlerde tecrübeler göstermiştir ki sadece tünelin duvarları değil, aynı zamanda aynası da tahkim edilmelidir. Bu çeşitli yollarla yapılabilir:

- Arının ortasında kısa bir basamak kütleli bırakarak,
- Tünel aynasına beton püskürterek,
- Aynayı fiberglass saplamalarla takviye ederek,
- Gelecekteki tünel duvarları boyunca, çelik borularla ön sürenler yerleştirerek (şemsiye kemer),
- Mekanik ön-kesme ve çimento şerbeti enjeksiyonu yolu ile tünel duvarları etrafında dayanıklı kemerler yaratarak,

Tüm bu “ön tahkimat” lı yöntemlerin amacı tünel arınının çökmesini önlemektir.

Fransa’da Lyon kentinin güneyindeki Galaure TGV tüneli, 1991-1993 yılları arasında bu tarzda açılmış bir tüneldir. Her ne kadar kesiti 150 m² olsa da, tam kesit olarak kazılmış ve tünel aynası Perforex ön sürenler ve 18 metrelik kaya saplamları ile duraylı halde tutulmuştur.

Bu konudaki yenilik İtalya’dan gelmiştir ve burada genelde tünelcilik yapılan zemin zayıf ya da yumuşak kayalardan oluşmakta ve sık sık kıvrımlara ve faylara rastlanmaktadır. Bu şartlar doğal olarak ön tahkimatlı yöntemlere yönelmeyi kaçınılmaz kılmıştır. Lunardi (2000), bu teknikleri bir tünel-duraylılık teorisi altında birleştirmiştir. Bu teori, “ilerleme çekirdeği” denge şartlarına dayanmaktadır (Şekil 4). Bu teori, enlemesinden çok aksel simetriyi esas almaktadır ve duraylılıktaki etkin parametre, ilerleme çekirdeğinin aksel deformasyonudur (dışarıya itilip çıkmasıdır). Bu olay, tünel duvarlarının kapanımına sebep olmaktadır.

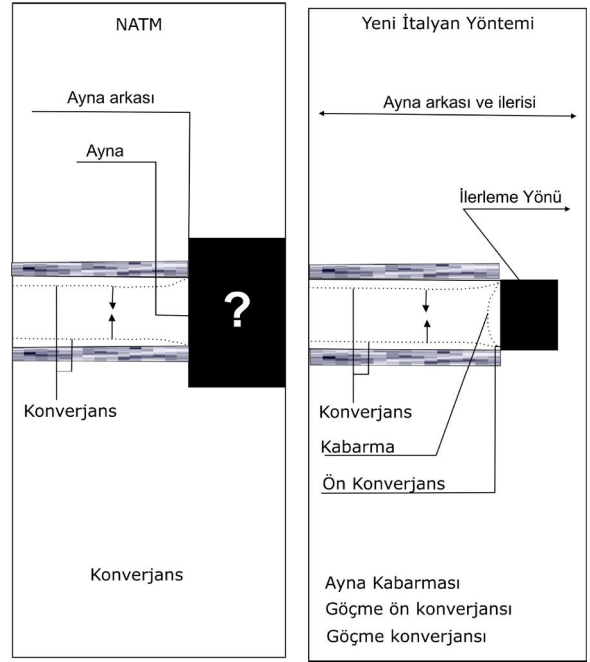
Bu teori, ADECO-RS olarak bilinmektedir. 30 yıl önce NATM de olduğu gibi tünelcilikte bazı devrimler getirmektedir. Bunlar:

- Her şey tünel aynası etrafında dönmektedir. Duraysız bir aynaya sahip tünel, duvarları tahkim edilmiş olsa bile çökecektir.
- Diğer adım ise halkayı mümkün olduğunca çabuk kapatmaktır. Tünel kesiti, özellikle zayıf zemin koşullarında alt parçalara ayrılmamalıdır.

NATM yöntemi, kazılan kesitin etrafında takviye edilmiş bir kaya halkası yaratmayı planlarken; Yeni İtalyan Yöntemi, aynanın ilerisinde ve ilerideki duvarların etrafında iyi bir zemin yaratmayı tasarlamaktadır.

Bu yeni yöntem bu yüzden, NATM prensiplerinin üç boyutlu uygulaması olarak düşünülebilir ve özellikle yumuşak ve duraysız zemin şartlarında uygulanır. Uygulamada yöntem şu şekilde kullanılmaktadır.

- Zemin kalitesine bakılmaksızın tünel, tam kesit olarak açılacaktır; düzeltmenin ana değişkeni ön tahkimatlı yöntemlerin türü ve şiddetidir ve bunlar, tünelin ilerlemesini engellemeyecek şekilde kolaylıkla ayarlanabilir.



Şekil 4. Kaya kütlelerinin deformasyonunun NATM’de ve Yeni İtalyan Yöntemi’nde karşılaştırılması.

- Tahkimatın tamamına yakını uzunlamasına ve her 15 - 20 metrede bir yerleştirilir.
- Duvarların tahkimatı, püskürtme beton kemerlerle bağlı çelik tahkimattan oluşur. Bu durum nispeten rijit bir sistem olup, NATM nin sığ tünellerdeki uygulamasına benzemektedir.
- Nihai tünel kaplaması sadece iki aşamada dökülmektedir (önce taban daha sonra üst kemer). Bu kaplama, aynadan, çapının birkaç katından daha az mesafede ve kazıdan sadece bir kaç gün sonra yapılmalıdır, beton halka neredeyse tabanda tamamen kapatılır.

Yeni İtalyan Yöntemi’ nin düşük ve orta derinlikteki ve duraysız özellikteki kayaç birimlerinde açılan tünellerde evrensel boyutta kabul göreceği açıktır.

Yukarıda kısaca tünel açımında ve desteklenmesinde sıkça kullanılan yöntemler ve bu yöntemler arasında Yeni İtalyan Yöntemi’nin öne çıkma nedenleri, gerekçeleri ile açıklanmıştır. Yeni İtalyan Yöntemi tünel ilerleme yönündeki getirdiği avantajlar, tünel duraylılığını arttıran yönleri ve ekonomik parametrelerdeki olumlu gelişmeler nedeni ile İzmir Metrosu Bornova Tüneli ön destek tasarımında tercih edilmiştir.

5. SİĞ DERİNLİKTE AÇILACAK OLAN İZMİR METROSU BORNOVA TÜNELİNDE YENİ İTALYAN YÖNTEMİ UYGULAMASI

İzmir Metrosu Bornova Tüneli'nin sahip olduğu jeolojik ve jeoteknik koşullar, düşük gerilme koşullarına uyan sığ derinlikli süreksizlik içeren zemin ve yumuşak kaya ortamı koşullarını taşımaktadır. Ortalama 20 metre derinlikte açılacak olan Bornova tüneline sığ derinlik tünel açımı parametreleri geçerlidir. Tünel güzergahı genellikle ayrıışmış killi kireçtaşı, killi kumlu çakıl, kilitaşı- killi kireçtaşı ve bu birimlerin aralanmalarından oluşmaktadır. Geçilecek olan kayaç birimlerine ait jeoteknik parametreler Çizelge 1 de verilmektedir.

Çizelge 1. Bornova Tüneli'nde Geçilecek Kayaç Birimlerinin Jeoteknik Özellikleri

	Killi Kireçtaşı	Killi Kumlu Çakıl	Kilitaşı- Killi Kireçtaşı
Elastisite Modülü (MPa)	9430	3187	14039
Poisson Oranı	0,34	0,36	0,29
İçsel Sürt. Açısı (°)	24	22	29
Kohezyon (MPa)	0,790	0,410	0,940
B. Hacim Ağırlığı (MN/m ³)	0,026	0,020	0,023

5.1 Sığ Derinlikte Açılacak Bornova Tüneli İçin Öngörülen Birincil Gerilme Durumu

Sığ derinlikte meydana gelen birincil gerilme alanının yeraltı açıklıklarının duraylılığı üzerindeki önemli rolü çok iyi bilinmektedir. Bir yeraltı açıklığı çevresinde oluşan ikincil gerilme alanının neden olabileceği aşırı gerilme ya da yenilme bölgesi; birincil gerilme alanına, açıklık geometrisine ve çevre kayacın mekanik özelliklerine bağlıdır. Tasarımcı, seçenekleri arasında olan değişkenlerde olanaklar çerçevesinde düzenlemeler yaparak mevcut koşullardaki en uygun tasarımı gerçekleştirmek zorundadır. Bu bağlamda, açıklık şekli ve konumu tasarım sınırlamaları arasında olmadığı zaman, mevcut birincil gerilme alanına en uygun seçenekleri belirlemek hem kuramcılar hem de uygulayıcıları meşgul eden konular arasındadır.

Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan birincil gerilme ölçümü sonuçlarına göre, birincil gerilmelerin asal bileşenlerinin;

- düşey ve yatay konumlarda olması,
- birbirinden farklı değerler alması ve
- büyüklük sıralarının değişiklikler göstermesi

oldukça yaygın karşılaşılan bir olgudur. Birincil gerilme alanının yönlerine bağlı (anizotropik) özellikte olması durumunda düşey birincil gerilme bazen en büyük, bazen ortanca bazen de en küçük asal birincil gerilme olabilmektedir. Genelde düşey birincil gerilmenin en küçük asal birincil gerilme olduğu (İngiltere, Avustralya vb.) bazı bölgelerde yeraltı açıklığının uzun ekseninin en büyük yatay birincil gerilmeye paralel olacak şekilde konumlandırılmasının duraylılık açısından daha olumlu olacağı kuramsal çalışmalarla olduğu kadar, arazi gözlem ve deneyleriyle de ortaya konmuştur. Ayrıca, Hoek ve Brown (1980), da bir yeraltı açıklığının şeklinin (eksenler oranının) seçiminde birincil gerilmelerin oranının göz önünde bulundurulması gerektiğini tartışmıştır.

Özetle, bir yeraltı açıklığının şekli ve konumunun, mühendislik sınırlamaları çerçevesinde, mevcut birincil gerilme alanına göre en uygun olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. (Geniş ve Gerçek, 1995; Gerçek ve Geniş, 1998)

Sığ derinlikte meydana gelen birincil gerilmeler genellikle karmaşık olup gerilme büyüklükleri hakkında bilgi yok denecek kadar azdır. Literatürdeki bilgiler genelde 50 metreden daha derin mesafeler için verilmiş değerler olup, sığ derinlikler için genelde bu değerler içkestirim yoluyla belirlenmeye çalışılmaktadır.

Sığ derinliklerde, herhangi bir derinlikte meydana gelen birincil gerilme genellikle aşağıdaki parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır. Bunlar; ayrışma, düzensiz topografya, kalıcı gerilmeler, erozyon-buzulların erimesi vb.

Yukarıda sayılan parametrelerden ayrışma genellikle gerilme düzeyini düşürürken, düzensiz topografya gerilme yönlerinin doğrultularını etkileyebilmektedir. Kalıcı gerilmeler ise genelde gerilme dağılımında anomalilerin oluşmasına neden olabilmektedir.

Oluşacak olan yatay ve düşey gerilmelerin oranı sığ derinlikte, derin olan yerlere göre daha fazla olabilmektedir. Bunun bir nedeni tektonik

gerilmelerin sığ derinliklerde yerçekimsel gerilmelere göre daha fazla olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle erozyon, buzulların erimesi v.b. dış etkenlerde yatay ve düşey gerilme oranının artmasına katkıda bulunabilmektedir.

Kaya kütlesi içerisinde oluşan gerilmeler, örtü tabakasının ağırlığına ve jeolojik tarihçeye bağlı olarak meydana gelmektedir. Kaya kütlesi içerisinde meydana gelen birincil gerilmelerin büyüklüğü derinlikle artmaktadır. Yeraltı açıklıklarında da gerilmeye bağlı problemler (yenilme gibi) de derinliğin artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte sığ derinlikte açılan açıklıklarda düşey gerilmelere karşı yüksek değerli yatay gerilmeler meydana gelebilmektedir.

Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler normal olarak bir düşey gerilme (σ_v) iki adet de yatay gerilme (σ_h , σ_H) ile ifade edilmektedir.

σ_v Düşey gerilme
 σ_h En küçük yatay gerilme
 σ_H En büyük yatay gerilme

$$\sigma_v = \rho * g * z \quad (1)$$

z = derinlik (m) ,
 ρ = kaya kütle yoğunluğu (MN/m³),
 g = yer çekim ivmesi (N/sn²)

Eğer malzeme lineer- elastik ve izotropik ve tek boyutlu gerilme şartları taşıyorsa yatay gerilme ile düşey gerilme arasında aşağıdaki ilişki dikkate alınmaktadır.

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v \quad (2)$$

ν = poisson oranı (0,15-0,40)

Yeraltı açıklıklarının açıldığı kaya/zemin kütlelerinde şistozite düzlemleri eklem ve eklem takımları, dizilim nedeniyle yönser durum arz etmektedir. Planlanan Bornova Tünel güzergahındaki jeolojik yapı içerisindeki kaya/ zemin kütleleri de yönser bir yapı sunmaktadır.

Sığ derinliklerde meydana gelen birincil gerilmeler hakkında son yıllarda hidrolik çatlatma ve laboratuvar testlerine dayalı yapılan çalışmalar sonucu elde edilen bağıntılar sonucunda oluşan düşey gerilmelere karşılık meydana gelen en

küçük ve en büyük yatay gerilmeler derinliğe bağlı fonksiyonlarla değişik araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. İsveç'te dört değişik bölgede sığ derinliklerde (10-50 m.) yapılan deneysel çalışmalar, yatay gerilmelerin birincil düşey gerilmelere göre daha fazla olduğunu göstermiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Derinliğe Bağlı Yatay Gerilmelerin Değişimi

Derinliğe(m) bağlı σ_H ve σ_h (MPa) değişimi	Ölçüm yöntemi ve derinlik aralığı
(3) $\sigma_H = 10,4 + 0,046 * z$ $\sigma_h = 5 + 0,0286 * z$	Leeman-Hiltscher lab test (0-700)
(4) $\sigma_H = 6,7 + 0,0444 * z$ $\sigma_h = 0,8 + 0,0399 * z$	Leeman-tip lab test (0 – 1000)
(5) $\sigma_H = 2,8 + 0,04 * z$ $\sigma_h = 2,2 + 0,024 * z$	Hidrolik çatlatma (0-1000)

Tünel etrafında gerilme konsantrasyonunun artmasına neden olan düzensiz topografya gibi etkenler sonucunda, gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir. Düşük gerilme durumlarında, süreksizlik içeren ve gevrek kaya ortamlarında, kama ve blok düşmeleri tipinde yenilmeler meydana gelebilirken, zemin ve yumuşak kaya ortamlarında, ayna akmaları ve dökülmeler düşük gerilme şartlarında meydana gelebilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. İzmir Metrosu Üçyol-Üçkuyular hattı istasyon tüneli kazısında meydana gelen ayna akması.

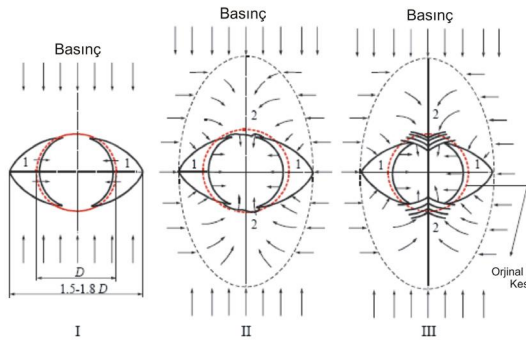
Yüksek gerilmelerin meydana geldiği daha derin, gevrek ve süreksizlik içeren kaya ortamlarında ise kaya patlaması, dökülme ve gerilmeye bağlı yenilmeler meydana gelebilmektedir. Planlanan Bornova Tüneli'nin sahip olduğu jeolojik ve jeoteknik koşullar düşük gerilme koşullarına uyan sığ derinlikli süreksizlik içeren zemin ve yumuşak kaya ortamı koşullarını taşımaktadır.

Çizelge 3' te verilen işlevsel ifadelerden, 8 no'lu eşitliğin kullanılmasının yerel şartlara daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Ortalama 20 metre derinlikte açılacak olan Bornova Tüneli' nde meydana gelecek düşey ve yatay gerilmeler aşağıda hesaplanmıştır. Yapılan hesap ve değerlendirmelerde sahadaki yatay gerilmelerin, hesaplanan değerlerin daha altında olması beklenmektedir ($\sigma_h = 0,92 - 1,34$ MPa).

Çizelge 3. Bornova Metro Tüneli'nde Düşey ve Yatay Gerilmelerin Değişimi

Gerilme Türü (MPa)	Eşitlik	Derinlik Değişimi	Değer (MPa)	
			En Küçük	En Büyük
σ_V (6)	$\sigma_V = \rho \cdot g \cdot z$	14 - 21	0,33	0,46
σ_H (7)	$\sigma_H = 2,8 + 0,04 \cdot z$	14 - 21	3,36	3,64
σ_h (8)	$\sigma_h = 2,2 + 0,024 \cdot z$	14 - 21	2,54	2,70

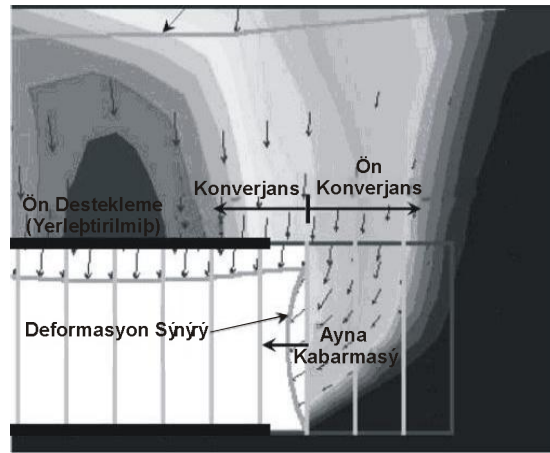


Şekil 6. Tünel açıklığı etrafında yenilme aşamaları ve mekanik davranış (Rabcewicz, 1964).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda sığ tünellerde kazı yönünde bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözlemlendiğinde, sağlam kaya kütlesi koşullarına yaklaşıldığı, kazı yönüne karşı bir yer değiştirme vektör yönelimi değeri gözlemlendiğinde, daha zayıf bir kaya kütlesi koşuluna yaklaşıldığı şeklinde bir ön tahminde bulunulabilmektedir. Yer değiştirme vektör yönlenmelerinin göz önünde bulundurulması ile, tünel kazı aynasının ilerisindeki kaya koşulları tahmin edilebilmekte, yerinde ve zamanında destek elemanlarının seçimi ile de, tünel inşası sırasında zaman ve para kaybının en aza indirilmesi mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte kaya kütlesinin

düşük dayanımı, yüksek deformasyona uğrama özelliği ve heterojenliği, tünel performansının tahminini de zorlaştırmaktadır.

Tünel inşasında sıralı kazı adımları (üst yarı, alt yarı ve taban kemeri) yapılırken, tünel üzerine etkiyen gerilmeler, oluşan yeni şartlara uygun olarak yeniden bir dağılım gösterecektir. Oluşan yeni gerilme koşullarında tünel içerisinde oluşacak deformasyonların (Şekil 6) hızlı ve doğru bir şekilde izlenmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesiyle tünel üzerine etkiyen deformasyon miktarı ile tünel kazısı ilerisindeki kaya koşullarının tahminini sağlanabilmektedir.

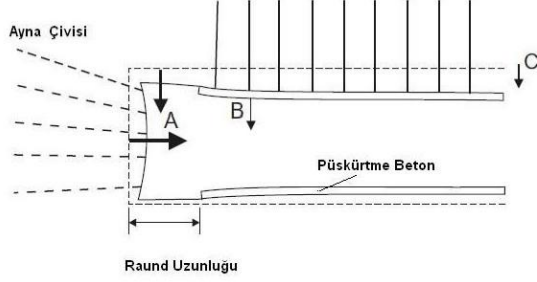


Şekil 7. Sığ tünellerde meydana gelen ön kapanma (konverjans) ve ayna kabarması.

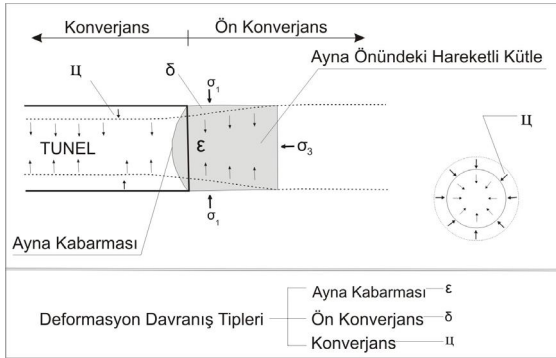
Sığ tünel koşullarında son yıllarda yapılan çalışmalarda, açılan boşluğun hızla ön destekleme elemanları ile desteklenmesine kadar ve sonraki dönemde ayna önündeki kütlenin ilerleme yönüne ters yönde belirli bir oranda kabarak yönelmesi sonucu, ön kapanmaların meydana geldiğini ve bu sürede yeryüzünde de toplam çökme miktarının % 70'inin oluştuğu ileri sürülmektedir (Şekil 7). Yapılan saha gözlemleri de bu fikri destekler niteliktedir.

Klasik yöntem olarak bilinen NATM' nin ana prensibi olan, açıklığın açıldığı jeolojik ortamın kendi kendisini geçmeden tutabilir hale getirme düşüncesi ön destekleme elemanlarının kazıdan hemen sonra uygulanmasını gerektirmektedir. Özellikle şehir tünelleri niteliğindeki metro tünellerinde yapılan ön desteklemenin, yerüstü yapılarında ve tünel üzerindeki tabakalarda deformasyona izin vermeden ilerleme yapma zorunluluğu nedeniyle, yeterli olmadığı da İtalyan tünelleri tarafından ifade edilmektedir (Şekil 4).

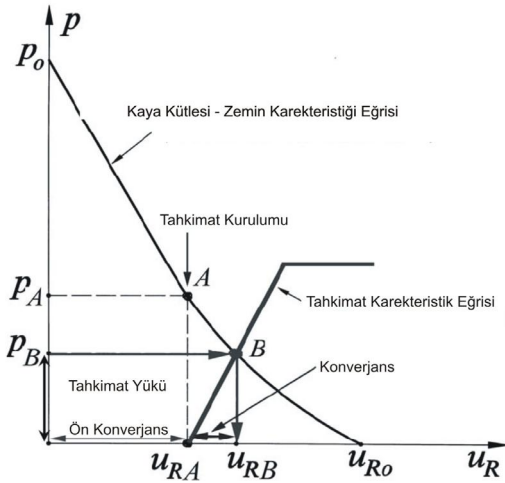
Bu nedenle deformasyon önleyici tünel açma yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ayna önündeki kütle için içsel parametrelerini arttırmak içinde, ayna içerisine zemin çivisi çakma uygulaması yapılmaktadır. Bu durum Şekil 8, 9 ve 10 da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8. Sığ tünellerde ayna kabarmasına karşı ayna çivisi uygulaması.



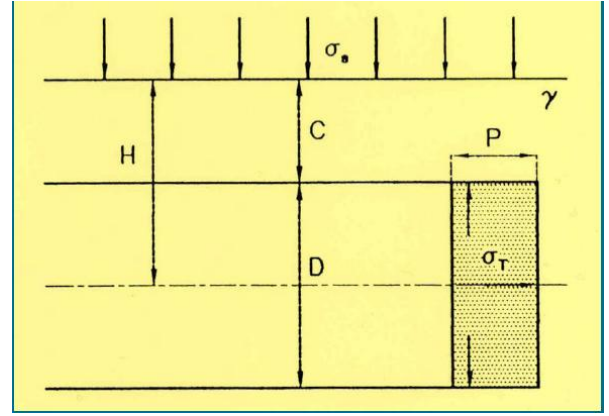
Şekil 9. Sığ tünellerde oluşan gerilmelere bağlı deformasyon türleri ve oluşma yerleri (Lunardi, 2000).



Şekil 10. Sığ tünel şartlarında kaya-tahkimat etkileşimi ve ön konverjans (kapanma) durumu.

Tünellerde, tünel üst cidarının yeryüzüne olan mesafesi (C) nin (Şekil 11) tünel yüksekliği (D) ne oranı 2 ve altında olması durumunda, ayna duraylılığı (stabilitesi) analizinin zorunlu olduğu durum ortaya çıkmaktadır. Bornova Metro Tüneli'nde de yaklaşık olarak durum $(C/D) < 2$ şeklindedir. Bu durumda ;

$$\frac{\rho * H}{C_u} > 4 \quad (9)$$



Şekil 11. Tünel derinliği ile tünel yüksekliği arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterimi.

lokal olarak ayna yenilmeleri ve duraylılık problemleri yaşanması kaçınılmaz olmaktadır. Burada ρ ortalama kayaç yoğunluğu, H tünel aksının yeryüzüne olan düşey mesafesi, C_u ise killi formasyonlarda drenajsız kesme dayanımı değeri olmaktadır. Tünel içi ve üzerinde bulunan tabakaların deformasyonu sonucunda yüzeyde çökme ve kaymalar sonucu oturmalar meydana gelebilmektedir. Yeraltı açıklığının açıldığı bölgelerde tüm çökme parametrelerini (tünel geometrik boyutları, dönüm noktası apsisi, i_x , stabilite sayısı, N, hacimsel zemin kaybı yüzdesi, V_L , yüzeyde gözlenen maksimum çökme (tasman) miktarı, S_{max}) tümünün kestiriminin zorluğu nedeniyle bazı ampirik eşitlikler türetilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan en büyük çökme (S_{max}) ile N stabilite sayısı (N) arasındaki ilişkidir.

$$S_{max} = 4,9 \cdot N^{1,29} \quad (10)$$

S_{max} : Maksimum çökme (mm) ;
N : Stabilite Sayısı

Bu eşitlikte kullanılan stabilite sayısı bir çok

literatürde farklı ifadelerle tanımlansa da en yaygın olarak kullanılanı üst örtü basıncı, tahkimat basıncı ve drenajsız kesme dayanımına bağlı hesaplanan eşitliklerdir. Buna göre;

$$N = \sigma_z / C_u \quad (11)$$

Burada;

σ_z = Tünel aksı üzerindeki üst örtü basıncı (MPa)

C_u = Kilin drenajsız kesme dayanımı (MPa) dir.

Bornova metrotüneli için yapılan değerlendirmeler sonucunda stabilite sayısının en az 5 alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. N stabilite sayısı büyüklüğü ile beklenen tünel stabilite durumları da aşağıda Çizelge 4' te verilmiştir.

Çizelge 4. N Stabilite Sayısı İle Tünel Stabilite Durumu Arasındaki İlişki

Stabilite Sayısı: N	Beklenen Duraylılık (Stabilite) Durumu ve Problemler
$N \leq 3$	Tüm stabilite hakkında belirsizlik
$3 < N < 6$	Düşük oranlı sübidans ve tünel içinde sınırlı akma problemi
$N \geq 5$	Ayna önünde birçok göçme ve akma problemi, aşırı plastikleşme
$N \geq 6$	Tümüyle stabil olmayan durum ve aynada çok ciddi stabilite problemleri

Kayacın yerindeki basınç dayanımının kestirilmesi tünel mühendisliğinde kritik bir konudur. Bu parametre büyük ölçüde kayacın çatlaklılığı ve ayrışma derecesi ile yakından ilgilidir. Bu konuda çeşitli araştırmacılar tarafından ampirik, yarı ampirik bağıntılar verilmiştir. (Palmstrom, 1996; Hoek, 1999)

Laboratuvar basınç dayanımı- yerinde dayanım ve Stabilite faktörü - basınç dayanımı arasındaki analitik ilintiler nomogram düzeninde Arıoğlu vd. (1993), tarafından geliştirildiği biçimde Şekil 11'de gösterilmiştir. Yazarlar bu çalışmada nomogramda yerinde dayanımın kestiriminde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'ni dikkate alan bağıntı (Hoek, 1999) kullanıldığını ifade etmektedirler. Aynı grafik üzerine stabilite

sayısı değerlerine karşı gelen davranış biçimleri ve beklenen deformasyon miktarları da işaretlenmiştir. Bornova tünel güzergahında yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvar testleri sonucu belirlenmiş olan tek eksenli sıkışma dayanımlarından karakteristik olanları bu nomograma işlenmiştir. Burada da görüleceği üzere, karşılaşılan kayaç birimleri yüksek sıkışma özelliği taşımaktadır. (% 5 in üzerinde).

Bornova tünel inşasında karşılaşılabilecek olan kumlu kil özelliğindeki görsel tortul ve ayrışmış kaya oluşumları, yüksek sıkışma özelliğine sahip olup tünel aynası önünde birçok göçme ve akma problemi ile aşırı plastikleşme gibi olumsuzlukların meydana gelmesini olası hale getirmektedir. Bu durum karşısında tahkimat sistemine paralel ek önlemlerin alınma zorunluluğu bulunmaktadır.

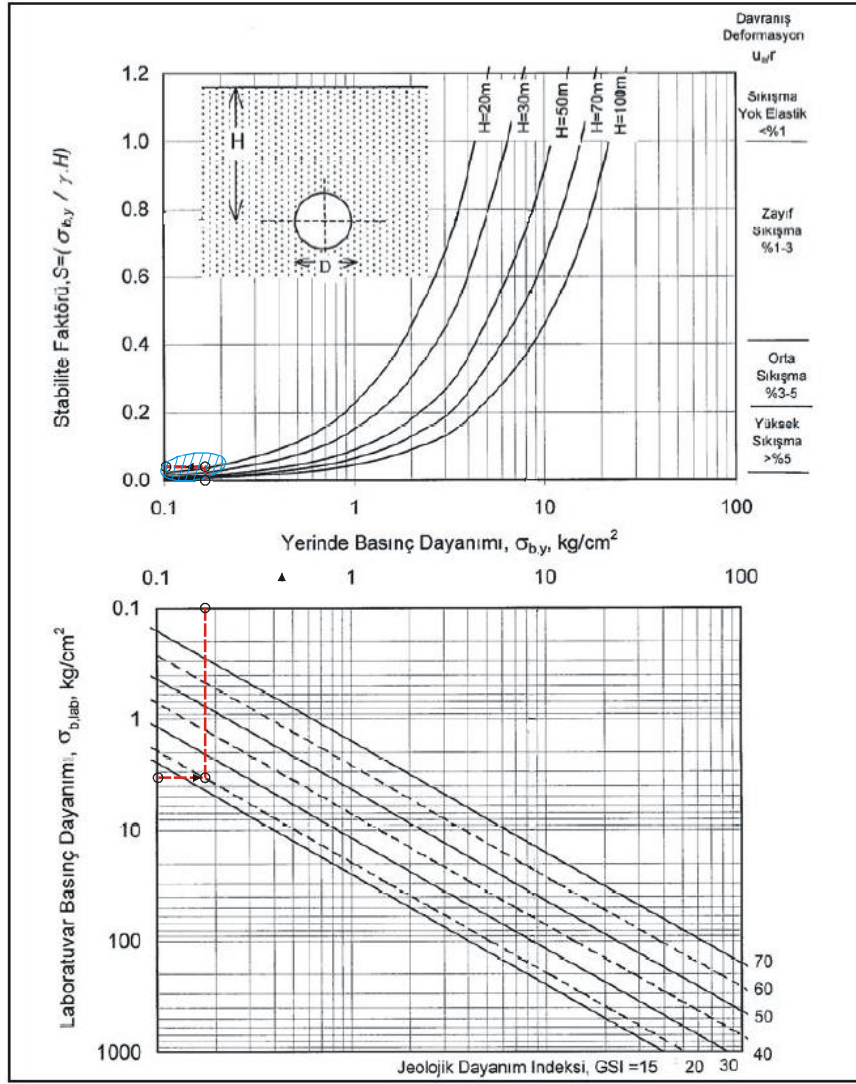
5.2. İzmir Metrosu Bornova Tünelinde Ayna Duraylılığının (Stabilitesinin) Arttırılmasına Yönelik Ayna Zemininin Güçlendirilmesi Uygulaması

Killi ve zayıf kayaç birimlerinde ve sığ tünellerde yüzey oturmalarının yarısına yakını tünel daha yüzeydeki ölçüm istasyonuna gelmeden önce oluşmaktadır. Gelen yükler nedeniyle aynada plastikleşen ve dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır. Bunların önlenmesi için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde arttırmak gerekmektedir.

Yeni İtalyan Yöntemin'de, boru kemeryönteminde bu amaca yönelik kullanılan zemin çivileri, kazı öncesi yüzey oturmalarını denetleyen destek elemanlarıdır. Bazı uygulamalarda zemin çivisi yerine yukarıda değinildiği gibi fiberglas boru ve jet-grout kolon uygulamaları da yapılabilmektedir.

Bu bölümde, Bornova Metro Tüneli yapımında aynada uygulanması öngörülen destek sisteminin, ayna zemin duraylılığı açısından güçlendirmesine gerek olup olmadığı *Tunren V 1x* programı yardımıyla araştırılmaya çalışılmıştır (Tunren-Terrasol, 2002).

Bu program, Mohr-Coulomb yenilme ölçütü esasına dayalı ampirik eşitliklerle oluşturulmuş olan yazılım yardımıyla, ayna güçlendirmesi



Not: Bu nomogram Yapı-Merkezi yayınından alınmıştır.

Şekil 12. Basınç dayanımı- Stabilite Sayısı(Faktörü) Nomogramı (Arıoğlu vd, 1993)

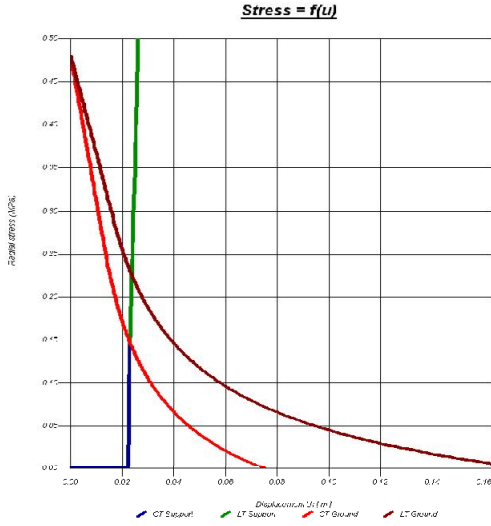
olduğu durumda ve ayna güçlendirmesi olmadığı durumda tünel-zemin davranışı çözümlenmesi yapılarak ayna deformasyonu ve güvenlik faktörleri hakkında değerlendirme yapma olanağı vermektedir. Burada yazılım çıktılarında elde edilen değerlerin sadece sonuçlarına değinilecektir.

Analiz kısa ve uzun vadeli tünel ve zemin duraylılığının belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Ayna çivisi kullanılmadığı durumda yapılan analiz sonucunda, kısa dönem de meydana gelecek ayna kapanımı 22,9 mm uzun dönemde de 23,6 mm olmak üzere, tahkimat öncesi ve tahkimat kurulduktan sonra oluşacak toplam kapanım miktarı 46,5 mm olarak belirlenmiştir.

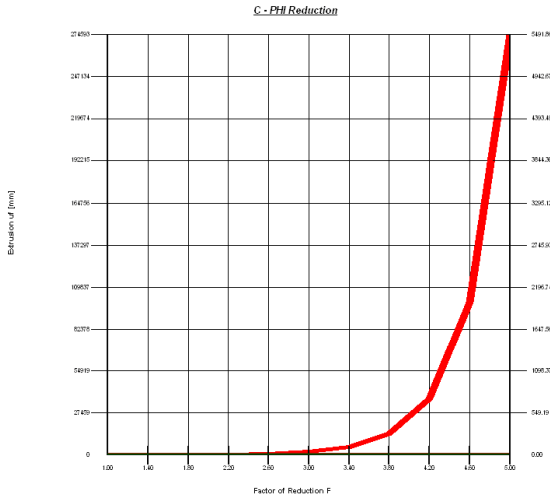
Kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi içsel parametrelerdeki indirgemelere göre güvenlik aralıklarının analizinde, güvenlik sabiti 1,8 ila 2.1 olarak belirlenmiştir. Bu gibi zemin projelerinde güvenlik sabitinin en az 3 olması gerektiği düşüncesi ile aynanın mutlaka güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Onargan vd.,2007).

Ayna çivisinin kullanıldığı durumda yapılan analizde ise aynadaki çiviye gelen eksenel kuvvet yaklaşık 103,72 kN buna karşılık oluşacak olan ayna kapanım miktarı ise 18,8 mm olmaktadır. Görüldüğü üzere aynada meydana gelecek deformasyon ayna çivisi sayesinde % 60 seviyesinde azaltılabilmektedir. Aynada

kullanılan güçlendirme elemanının taşıyabileceği maksimum aksel kuvvetinin 350 kN olarak seçilmiş olup, bu durumda güvenlik katsayısı $350/103,72 = 3,37$ olmaktadır.



Şekil 13. Zemin – Tahkimat Konverjans Eğrileri



Şekil 14. İçsel parametrelerin düşmesine bağlı deformasyon artışı grafiği

Yukarıdaki analiz değerlerinden de görüldüğü gibi, Bornova Metro Tüneli'nde klasik ön destekleme elemanlarının yanı sıra, ayna zemininde içsel parametreleri artırıcı yönde güçlendirmenin yapılması gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

20. yüzyılın başlarında ahşap ve taş tahkimatın kullanıldığı tahkimat süreci hüküm sürerken, imal edilen çelik bağlar ve yerinde dökme beton ile daha geniş tünel boşluklarına imkan tanınmış ve daha yüksek ilerleme hızları elde edilmiştir. 1960'lı yılların başlarında ise Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin (NATM) icadı tünelticilikte yeni bir çığır açmıştır. Yöntem, temel olarak kaya ortamına kendi kendini taşıma ilkesine dayanır. Hem sığ hem de derin tünellerde yaygın olarak kullanılan bu yöntemin prensibi; en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemleri kullanılarak, kazı sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaların orijinal sağlamlığının korunarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmasıdır (Köse vd, 2007).

NATM' nin ardından akıcı, duraylı olmayan ve fazla su içeren kayaç birimlerinde kullanılmak üzere tam kesitte kazının yapıldığı, Yeni İtalyan Yöntemi ortaya çıkmıştır. Yumuşak veya zayıf zeminlerde, ya da örtü tabakasının çok ince olduğu yerlerde sadece tünelin duvarlarının değil, aynı zamanda aynasının da tahkim edilmesi gerekliliği elde edilen deneyimlerle kanıtlanmıştır. Tüm bu "ön tahkimat" lı yöntemlerin amacı, tünel arınının çökmesini önlemektir (Bell, 1994).

NATM yöntemi, kazılan kesitin etrafında takviye edilmiş bir kaya halkası yaratmayı planlarken; Yeni İtalyan Yöntemi, aynanın ilerisinde ve ilerideki duvarların etrafında iyi bir zemin yaratmayı tasarlamaktadır. Bu yeni yöntem bu yüzden, NATM prensiplerinin üç boyutlu uygulaması olarak düşünülebilir ve özellikle yumuşak ve duraysız zemin şartlarında başarıyla uygulanır (Rabcewicz, 1964).

Çalışmada, Yeni İtalyan Yöntemi uygulanarak açılması planlanan tünel güzergahı için analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Ayna çivisi kullanılmadığı durumda yapılan analiz sonucunda, kısa dönem de meydana gelecek ayna kapanımı 22,9 mm, uzun dönemde de 23,6 mm olmak üzere, tahkimat öncesi ve tahkimat kurulduktan sonra oluşacak toplam kapanım miktarı 46,5 mm olarak belirlenmiştir. Ayna çivisinin kullanıldığı durumda yapılan analizde ise, ayna kapanım miktarı 18,8 mm olmaktadır.

Buna göre; klasik NATM ilkelerinin Bornova Metro Tüneli'nde tek başına yeterli olmayacağı sonucuna varılmıştır. Açılacak tünelde, akıcı özellikteki ayna etrafının tahkim edilmesi ve özellikle ilerleme yönündeki belirsizliklerin giderilerek, gerek ayna çivileri gerekse şemsiye boruları ile zeminde içsel parametreleri artırıcı önlemlerin alınmasının zorunlu olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışma kapsamındaki tarihsel sürecin hazırlanmasında yayın desteği veren Sn. Pierre DUFFAUT'a, ayrıca katkılarından dolayı Sn. Erhan TİMUR'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Andrea, C., 1949; "Les grands souterrains transalpins" Ed. Lehman, Zurich.

Arioğlu, B., Yüksel, A., Arioğlu, E., 1993; "İzmir Metro Projesi Nenehatun Tünelindeki Geoteknik Çalışmalar ve Değerlendirilmesi" Yapı Merkezi Yayınları

Bell, F.G.,1994; "Engineering in rock masses", İngiltere.

Duffaut, P.,1996a; "Creuser et soutenir, servitudes et certitudes des travaux souterrains", Travaux, **270**.

Duffaut, P.,1996b; "About some erroneous concepts in rock tunnelling", Galerie , **48**, 16-22.

Geniş, M., Gerçek, H., 1995; "Kavisli Rijit Çelik Galeri Bağlarının Boyutlandırılmasında Önemli Hususlar" 14. Madencilik Kongresi, Ankara, 1-5.

Gerçek, H., Geniş, M., 1998; "Yönlere Bağlı Birincil Gerilme Alanının Yeraltı Açıklıklarının Duraylılığına Etkisi" 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Zonguldak, 235-246.

Hoek, E., and Brown, E.T., 1980; " Underground Excavations in Rock" Instn.Min. Metal., London, England.

Hoek, E.,1999; Support for very weak rock

associated with faults and shear zones. Proc. International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia.

Karakuş, M., Fowel, R.J.,2004; "An insight into the New Austrian Tunnelling Method", Kayamek'2004 – VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas.

Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C.O., 2007; "Tünel ve kuyu açma-Geliştirilmiş 3. Baskı",70-72.

Louis, C.,1972; "Construction des tunnels par la nouvelle methode autrichienne", Revue de l'Industrie Minerale.

Lunardi, P.,2000; "Design and construction tunnels; ADESCO-RS approach", Tunnels and Tunnelling, May issue.

Maillart, R.,1922; "De la construction des tunnel sous pression interieure", Bulletin Technique de la Suisse Romande.

Onargan, T., Aksoy, C.O., Küçük, K., Kun, M., 2007; "İzmir Hafif Raylı Sistem 3 üncü Aşama Bornova Metro Tünel İnşası Ön ve Nihai Destekleme Projesi", D.E.Ü. Müh.Fak., Döner Sermaye Projesi, DEU-TPAG, İzmir.

Palmstrom, A., 1996; "Rmi – A System For characterizing Rock Mass Strength for Use in Rock Engineering", Jr. Rock Mech. Tunneling Technology, India, **1(2)**, 69-108

Panet, M.,1995; "Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement", Presses des Ponts et Chaussees, Paris, 188.

Rabcewicz, L.1964; "The New Austrian Tunnelling Method-part 1", Water Power, 19-24.

Terzaghi, K., Peck, B.R.,1949; "Soil mechanics in engineering practice", John Wiley & Sons Inc.

Tunren-Terrasol 2002 Vx1, Fine Ltd., Zaverka 12, 16900 Praque6, Czech Republic.