

İSTANBUL METROSU TAKSİM - 4. LEVENT GÜZERGAHI TEMEL KAYAÇLARININ JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ VE DURAYLIK SORUNLARI

(*) İsmail Eriş
(*) Mahir Vardar

ÖZET

Yeraltı kazı çalışmaları sırasında oluşan stabilite bozulmaları, büyük ölçüde kaya ortamın litolojik yapısal, dokusal ve geometrik özellikleri ile mevcut gerilme durumundan kaynaklanmaktadır. Yeraltı suyunun varlığı, ortamın stabilitesini olumsuz yönde etkileyen önemli diğer bir faktördür. Çatlaklı kaya ortamlarındaki suyun, ortamdaki gerilme durumunu değiştirdiği, kil dolgulu birim kaya elemanları arasındaki sürtünme direncini büyük ölçüde azalttığı, kısa süreli ve etkin stabilite bozulmalarına neden olduğu bilinmektedir. Ancak benzer stabilite problemlerini, kazı ve destekleme sistemleri ile zamanı dikkate almaksızın salt jeolojik unsurlara bağlı açıklamaya çalışmak her zaman doğru olmamaktadır.

Kaya ortamı gereğinden fazla örseleyen **kazı yöntemleri, sağlamlaştırma**

ve/vey iyileştirme önlemlerinin gecikmesi gibi **nedenlerle artan deformasyonlar**, kaya düşmesi, blok kayması, akma veya göçük şeklinde sonuçlanmaktadır

Çatlaklı kaya ortamlarında açılan sığ tünellerde daha çok blok düşmesi ve kaya kayması şeklindeki hareketler, mevcut süreksizliklerle denetlenmekte ve yönlendirilmektedir. Bildiride, İstanbul Metrosu tünel düzeyi kayaçlarının jeomekanik özellikleri özetlenmekte, çatlaklı kaya ortamlarından açılan sağ tünellerde beklenen stabilite bozulmalarının nedenleri üzerinde durulmaktadır

1. GİRİŞ

Kaya ortamı mühendislik girişimleri açısından incelendiğinde çatlaklı kayanın bazan yüzeyde bazan da ayrık parça ve tanelerden oluşan ve ya zemin olarak nitelendirilen, farklı kalınlıklardaki örtü altında bulunmak-

() Yük Muh 1 TU Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, Maslak - İST
(-"*) Prof Di Muh 1 TU Mailen Fakuln-sı Usatlamah Jeoloji Anabilim D Maslak -İST

tadır. Temel mühendisliğinin uygulama çalışmaları, ya zeminler, ya da farklı derecelerde atlaklanmış kaya ortamları veya bu ortamların birlikte bulunduğu geçiş zonları olmaktadır. Jeolojik zellikleri, yenilme koşullan, gerilme deformasyon (Jeomekanik) ilişkileri bakımından önemli farklılıkların görüldüğü bu tür ortamlarda temel mühendislik disiplinlerinin (Jeoloji, maden, jeofizik, inşaat) birlikte düşünmesi ve çalışması gereği ortaya çıkmaktadır. İstanbul Metrosu tünelleri, yukarıda sözü edilen ve geçiş ka- yacı niteliği taşıyan ortamlarda açılmaktadır

2. GÜZERGAHIN MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÖZELLİKLERİ

İstanbul Metrosu'nun 1. etabını oluşturan Taksim-4.Levent kesiminde farklı oranlarda kumtaşı, çamurtaşı, yer yer kiltatı, silttaşı ara katmanlardan oluşan Karbonifer'e ait kayaç birimleri yer almaktadır. Bu istifin, yer yer andezit ve diyabaz dayk ve silleri ile kesildiği görülmektedir. Güzergah boyunca formasyon, 0.5-4 m kalınlıktaki dolgu altında ve ileri derecede ayrışmış durumda bulunmaktadır. Tabaka kalınlıkları değişken olmakla birlikte, genelde 5 cm ile 65-70 cm arasında değişmektedir. Farklı zamanlarda ve doğrultularda gerçekleşen tektonik aktiviteler sonucu, tabakaların sık kıvamlandığı ve aşara kırıklandığı görülmektedir. Bu nedenle en az 2-3 farklı doğrultuda gelişmiş sistematik eklem takımlarının yanısıra, düzensiz çatlak sistemleri de bulunmaktadır. Çatlak araları 5-6 cm ile 50-60 cm arasında yoğunlaşmaktadır. Çatlak yüzeylerinde gelişmiş alterasyonun kaya dokusunu da etkilemesi sonucu, kaya malzemesi hava ve su ile temas ettiğinde hızla ayrışarak zemine dönüşmektedir. Çatlak yüzeylerinin genellikle düzlemsel ve kil sıvalı olması nedeniyle de birim kaya elemanları arasındaki sürtünme direnci çok düşük olmaktadır.

Tnnellerde ve sondaj karotlarında hesaplanan **RQD** değerleri **0-40** arasında yoğunlaşmakta, nadiren **60-70** değerlerine kadar ulaşmaktadır. Bu değerlerin, kötü kaya koşullarını tanımladığı, kazı çalışmaları sırasında gerekli sağlamlaştırma işlemlerinin anında uygulanması gereğini vurguladığı açıktır.

Güzergah boyunca, gerçek anlamda yeraltı su seviyesi yerine, çatlaklar arasındaki yeraltı suyundan söz etmek daha doğru olur. zira, sondajlarda ortalama 3-12 m dolayında ölçülen yeraltı su seviyesinin 25-30 m derinlikteki tünellerde sızıntı ve damlama şeklinde kendini belli etmesi, bunun bir kanıtıdır. Ortamın perméabilité değerlerinin 10^{-6} , 10^{-7} cm/sn arasında değişmesi ortamda su bulunmadığına ilişkin diğer bir kanıttır.

3. JEOMEKANİK ÖZELLİKLER

Metro güzergahı sondajlarından ve tünellerden alınan örnekler zerin-

orta dayanım değerleri elde edilmiştir. Çizelge 1 incelendiğinde kum taşlarının basınç dayanımlarının, kilitaşı ve çamurtaşlarına oranla oldukça yüksek değerlere sahip oldukları görülmektedir. Kilitaşı ve çamurtaşlarının basınç dayanımlarında taşın ayrışma ve tabakalanma durumuna göre,

Çizelge 1. istanbul Metrosu kayaçlanmn lahoratuvar deney sonuçları ()*

Litoloji	Basınç Direnci (Mpa)	E. Modülü (Gpa)	Deney sayısı
Kumtaşı	42 - 67	8.62 - 9.00	27
Çamurtaşı	15-36	2.85 - 4.60	23
Kilitaşı	21 - 54.5	4.37 - 6.25	18

(*) *Deney sonuçları Metro güzergahında yapılmış lahoratuvar kaya mekaniği deney raporlarından derlenmiştir.*

önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Laminasyonun iyi geliştiği deney örneklerinde normal gerilme ile tabakalar arasındaki açı 30-55 derece arasında olduğunda, en düşük dayanım değerleri elde edilmektedir. Bu durumda kırılma, tabaka yüzeyleri boyunca gerçekleşmektedir.

*Çizelge 2 Taksim araştırma galerisinde elde edilen in-situ deney sonuçları (**)*

Deney No	Litoloji	Derbrmasyon Modülü (Mpa)	Max. Basınç (Mpa)
1	Kumtaşı	639.6- 14.49	30
2	Kumtaşı	2416.9-2630	30
3	Kilitaşı	2535.7 - 3787.2	30
4	Kumtaşı	627.6- 1275.7	30
5	Kilitaşı Kumtaşı	513.7-1594.6	30
6	Kumtaşı	623.1 - 1022.3	30
7	Kumtaşı	367.5 - 606.7	35
8	Kilitaşı Kumtaşı	1926.7-2548.9	21

** *Sonuçla istanbul Metrosu Taksim araştırma gatei ist Taksim - Levent yeti altı kava mekaniği raporu undan alınmıştır*

Tünel düzeyi kayaçlarının jeomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, Taksim parkında 20 m derinlikte açılan 40 m uzunluğundaki araştırma galerisinde ve galeri üzerinde kalan örtü kayacında yapılan yerinde (in - situ) deneylerde ortamın deformasyon modülü, pressimetrik modülü araştırılmış, sonuçlar, çizelge 2 ve çizelge 3 de bir araya getirilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde, farklı litolojilere ait kayaçların deformasyon modülü değerlerinde önemli farkların bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu durum projelendirme aşamasında kaya ortamının davranışının mode ilenme s indeki güçlükleri ortaya koymaktadır

Çizelge 3 de bir araya getirilmiş olan pressimetrik modül değerlerinde de önemli farklılıklar görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, çizelge 2 deki deformasyon modülü değişimleri ile kıyaslandığında benzer heterojeni için, örtü kayacı içinde geçerli olduğu sonucuna varılmaktadır

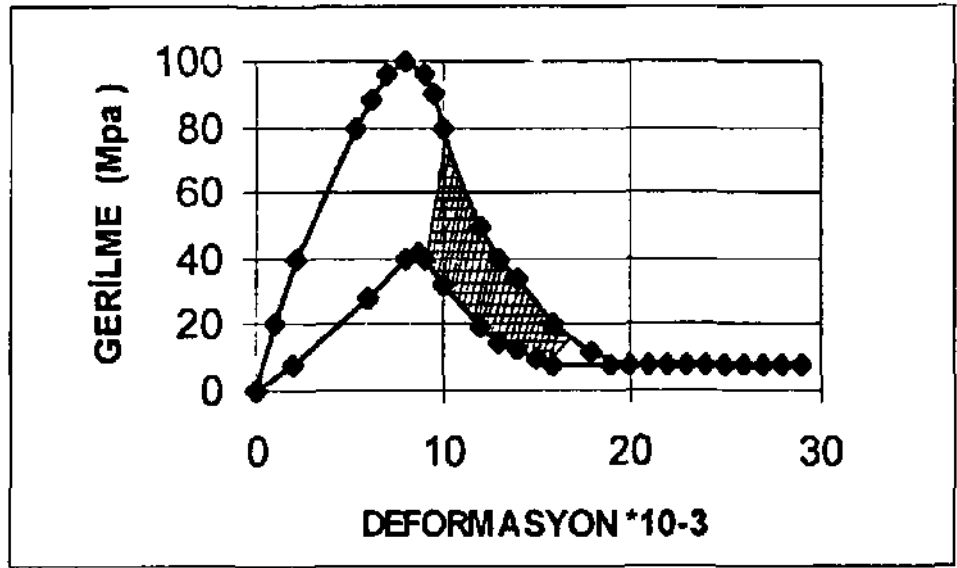
*Çizelge 3 A1 aştırma galerisi sondajlarında yapılan pwssiometw deney sonuçları ****

Sondaj No	Derinlik (m)	Presslometnk mod.(Mpa)	Limit Basınc (Mpa)
S-10	20	26.3- 182.6	2.41-5.74
S -11	20	17.4- 198.2	4.81 - 1.42
S -12	18.5	113.9-219.9	5.05-3.52
S -13	28.5	60.2 - 246.0	5.85-2.62

Sonuçlar İstanbul Metrosu Taksim Araştırma Galerisi Taksim - Levent güzergahı yeraltı kaya mekaniği raporundan alınmıştır

İn- situ Dayanım ile İlgili düşünceler : İçinde çalışılacak olan ortamın davranışının modellenmesi, ya da kayaçların kaya mekaniği açısından sınıflanması, metro mühendisliğinin ana hedeflerinden biri olmalıdır. Uygun değerlendirme yapabilmek ve yorumda bulunabilmek için, kayacın örselenmemiş durumundan günümüze kadar geçirmiş olduğu kıvamlanma, kınklanma ve çatlaklanma, ezilme faylanma, ayrışma gibi fiziksel görünümlerinin yer aldığı kırılma öncesi (pre - failure) ve kırılma sonrası (post failure) davranışlarının tanımlanması gereklidir. Tünel düzeyindeki kayaçların zamana bağlı gerilme deformasyon ilişkileri (O, ϵ , t) incelendiğinde yapılan deney sayısına ve elde edilen veri yoğunluğuna bağlı olarak farklı kayaç türleri için farklı olabilen alattan ve üstten sınırlanmış davranış bölgeleri oluşturmaktadırlar.

Şekil 1. deki taralı alan, İstanbul grovacklarının jeomekanik davranış aralığını tanımlamaktadır. Burada kayacın litolojik, dokusal ve yapısal özelliklerine asal gerilme yönleri ile süreksizlik yönelimlerine bağlı olası anizotropi özellikleri de değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde metro güzergahı temel kayaçlarının primer dayanımlarını % 85 - 95 oranında yitirdikleri görülmektedir. Buna göre, metro düzeyi temel kayaçları ayrı, düzenli, çatlaklı, parçalanmış ve ufalanmış, ezilmiş çok cisim ortamı olarak tanımlanabilmektedir. Genel anlamda, yeraltı kazılarında karşılaşılan

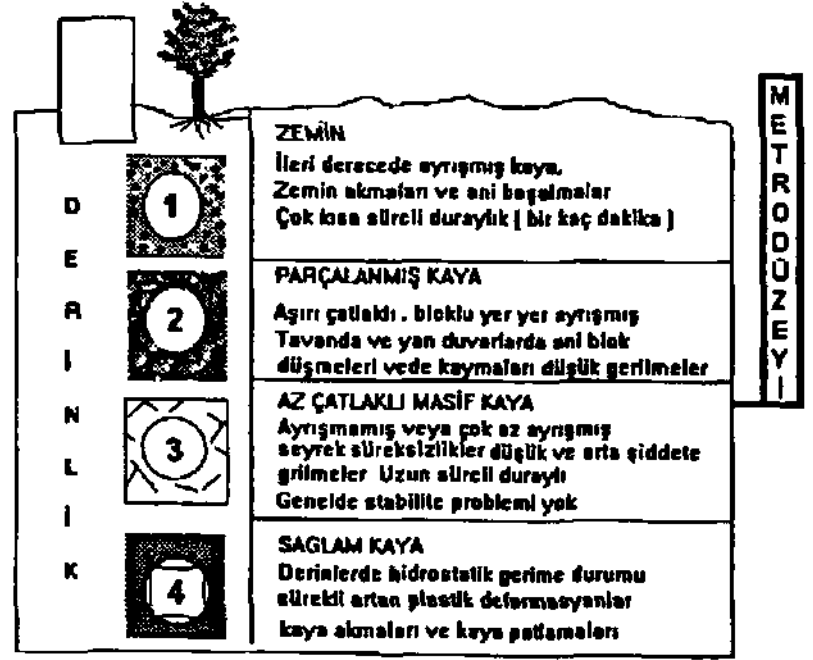


Şekil 1. İstanbul grovacklarının gerilme - deformasyon ilişkileri ve kırılma kabuNen

stabilite bozulmalarının önemli nedenleri arasında, ortam nitelikleri, gerilme durumu, ve yeraltı suyunun varlığı söylenebilir. Bilindiği üzere, derinlik arttıkça ortamdaki gerilmeler de artarak değişir. 1500 m gibi derinliklerden sonra yatay ve düşey gerilme büyüklükleri eşitlenerek hidrostatik gerilme durumu oluşmaya başlar. Bu durumda oluşan deformasyonlar süreksizliklerden çok, ortamdaki mevcut gerilmelerin kontrolü altındadır. Kötü kaya koşullarında kaya patlaması ve sürekli akma şeklinde, önlenmesi güç deformasyonlar gerçekleşir

Düşük ve orta şiddetteki gerilmelerin etkili olduğu çatlaklı kaya ortamlarında önemli duraylık problemleri görülmez. Ancak kötü kaya koşullarında blok kaymaları, lokal fakat anı kaya akmaları beklenir. Yüze yakın yeraltı kazılarında görülen, blok kayması ve blok düşmesi şeklinde

gerçekleşen kaya boşalmalarında, ortamdaki gerilmelerin fazla etkisi yoktur. Burada süreksizliklerin konumu ve yoğunluğu, kayaların ayrışma derecesi, kazının geometrisi ve boyutları hareketleri denetlemekte ve yönlendirmektedir. Ortamda sızıntı şeklinde olsa dahi yeraltı suyunun varlığı,



Şekil 2. Kaya ortamının niteliklerine ve derinliğe bağlı beklenen davranışı

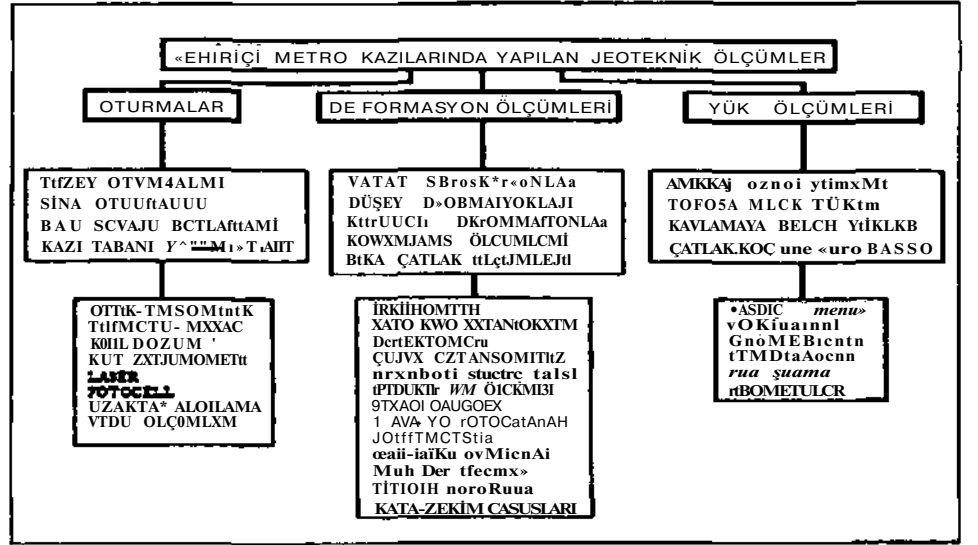
benzer hareketleri hızlandırmakta ve artmasına neden olmaktadır. Şekil 2 de yeraltı kazılarında kaya ortamının niteliklerine ve derinliğine bağlı, olası duraylık sorunları tanımlanmaktadır

Yüze yakın olan (yaklaşık 30 m) metro tünelleri, Şekil 2 de tanımlanan 1 ve 2 nolu bölgelerde kalmaktadır. Bu derinliklerdeki istanbul grovaklarının genel karakterleri, atmosferik koşullarda hızla ayrışabilen düşük kaliteli, kısa sürelerde (1-2 gün) duraylı olabilen, ana kırık ve ezilme zonları ile çatlaklı bloklara ayrılmış kaya ortamı şeklinde tanımlanabilir. Bu bağlamda tünellerdeki kaya boşalmaları, geometrisi ve boyutları ana süreksizliklerle sınırlanmış serbest blok düşmesi ve ani blok kayması ile yer yer akma şeklinde gerçekleşmektedir

Jeoteknik Ölçüm Programı

Şehirçi metro tüplerinin (tünellerinin) ve açık kazıların inşaatı sırasında yüzeyde oluşabilecek oturmalar ve benzer deformasyonlar

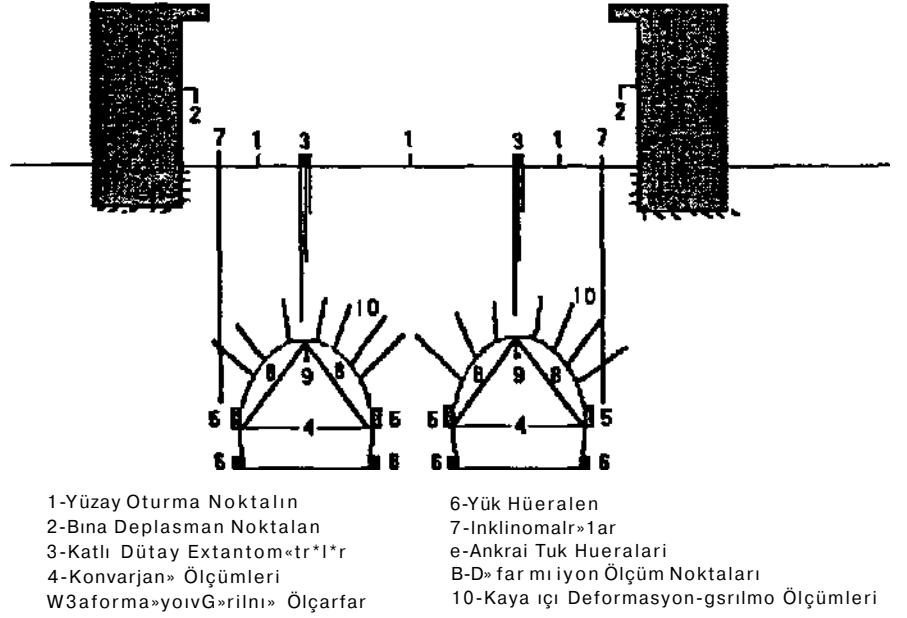
dan dolayı yapıların hasar görmelerini önlemeye, denetim amaçlı, ve ya sağlamlaştırma yöntemini belirlemeye yönelik deformasyon, gerilme ve yük ölçümleri yapılmaktadır. Ölçüm sonuçlarına göre, kazı ve destekleme aşamalarında stabilizeyi sağlamaya yönelik gerekli mühendislik işlem ve yöntemlerinin uygulaması büyük önem taşımaktadır. Jeoteknik ölçümler, oturmalar, deformasyon ölçümleri, yük ve gerilme ölçümleri olmak üzere 3 grupta, toplanabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Şehir içi metro kazılarında yapılması gereken jeoteknik amaçlı ölçümler

Oturmalar ile ilgili ölçümler genel olarak takeometrik ve opto trigonometrik yöntemlerle yapılmakta, eğik düzlem, sarkaç şerit ekstansometre gibi basit aletlerin yanı sıra, lazer, fotosel, ve uydu ölçümlerinden de yararlanılmaktadır. Bu tür sistemler ile yüzey ve bina oturmaları, kazı duvarı deplasmanları ve kazı tabanı kabarmaları hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Deformasyonlar, yatay, düşey ve rotasyonel deformasyon ölçümleri şeklinde gruplandırılabilir. Konverjans ve bina çatlak ölçümleri de benzer şekilde mekanik ve / veya elektriksel ölçme sistemleri ile denetlenebilmektedir. Yatay de formasyon lan ölçmek amacıyla, inklinometrelerden, çubuk estansometrelerden indüktif boy ölçerlerden, hava ve yer fotoğraflarından yararlanılmaktadır. Düşey deformasyon ölçümlerinde katlı kuyu ekstansometreler, indüktif boy ölçerler, basit deformasyon ölçerler tercih edilmektedir. Rotasyonel hareket ölçümleri için sesli ve ışıklı uyarı sistemleri ile donatılmış defiektometre ler, basit deformasyon ölçerler, kaya ve zemin casusları, elektriksel direnç şeridi gibi ölçüm sistemleri kullanılmaktadır

Tünellerde ve açık kazılarda yük-gerilme ölçümleri, basınç hücreleri, yük hücreleri, gerilme ölçerler, strain gaugeler, flat jack'lar ve piezo metrelere yardımı ile yapılmaktadır. Bu yolla ankraj gergi yükleri, topuklara gelen yükler, kaplamaya binen yükler, kaya ortamı içinde oluşan sekonder gerilme büyüklükleri, çatlak ve boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir.



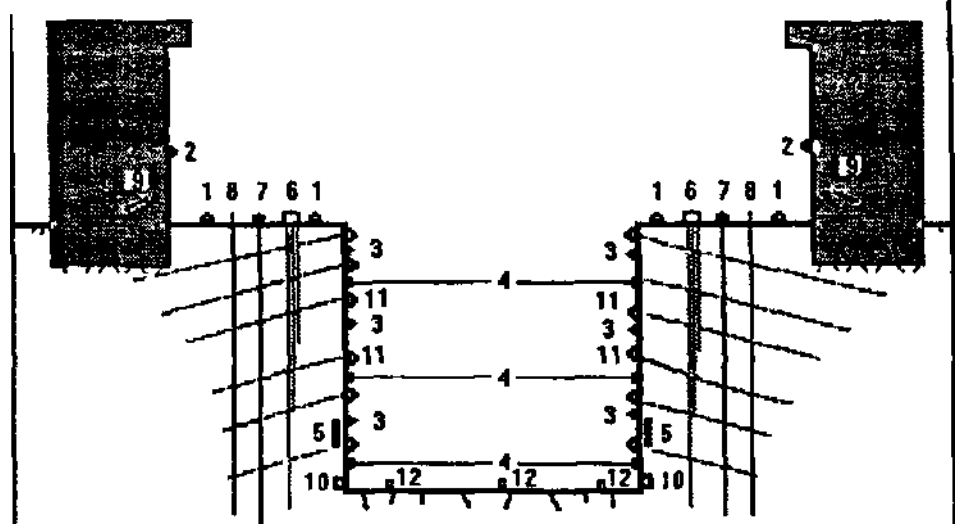
Şekil 4. Tünellerde yapılması gereken jeoteknik amaçlı ölçümler.

Şekil 4 ve Şekil 5 te tünellerde ve açık kazılarda yapılması gereken jeoteknik ölçümlerin tümü bir arada gösterilmeye çalışılmıştır. Kuşkusuz burada sözü edilen ölçümlerin tümünün yapılması gerekmez. Uygun ölçüm sistemlerinin seçimi, beklenen harekete ve deformasyon türüne, ortamın jeolojik yapısına, kaya ve / veya zemin ortamının deformasyon özelliklerine, (E, V) olası kayma geometrisine (dairesel, düzlemsel, kama, vs) çevre parametrelerine (C, 0) göre değişir. Doğal olarak etkilenme bölgesi dışında kalan noktalarda kazıya bağlı stabilite bozulmaları gerçekleşmeyeceğinden bu alanlara alet yerleştirmenin ve Ölçüm yapmanın bir anlamı yoktur.

İstanbul metrosu güzergahında yapılan jeoteknik amaçlı ölçümler:

- Yüzey oturma ölçümleri (takeometrik ve optotrigonometrik)
- İstasyonlarda yatay hareketleri (inclinometre ölçümleri)

- c) Katlı ekstansometre ölçümleri (tünel eksenleri üzerinde)
- d) Ankraj gergi yükü ölçümleri (istasyonlarda)
- e) Tünel içi konverjans ölçümleri (şerit ekstansometre ve optotrigonometrik)
- 0 Tünel içi basınç ölçümleri şeklinde gruplandırılabilir



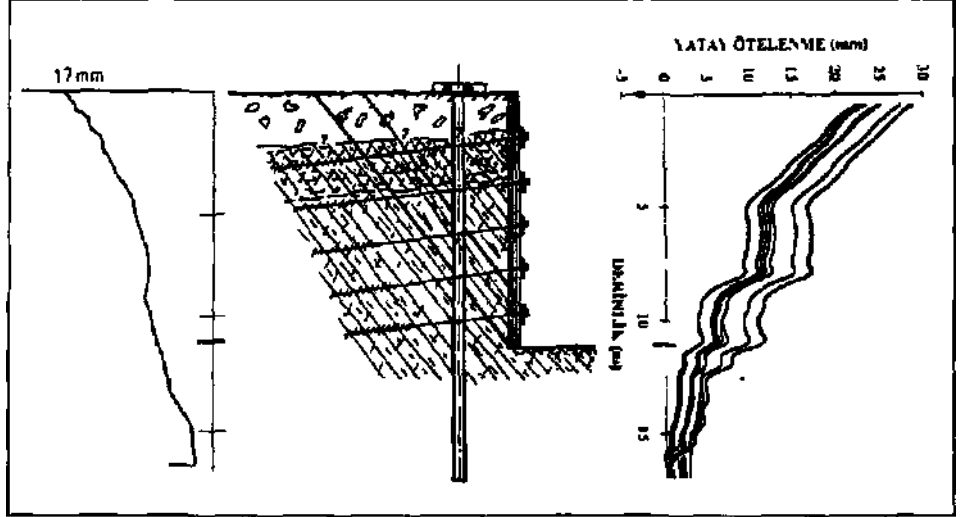
- | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1-Yüzey Oturm* Noktalan | 5-Genlme-D*form»syon ölçerler | 9-Bina Çatlak Ölçümleri |
| 2-Bina Deplasman Noktalan | 6-K atıı Däjey Extmsometral« | 10-Yüüt Hüerelen |
| 3-Duvu Deplasman Noktalan | 7-Inklinometreler | 11-Ankraj Yük Hüereleri |
| 4-Konverjens Ölçümleri | 8-Pı«ometre Kuyulan | 12-TıUn Kabam» Noktalan |

Şekil 5. İstasyon kazılarında yapılması gereken jeoteknik amaçlı ölçümler

4. ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YORUMU

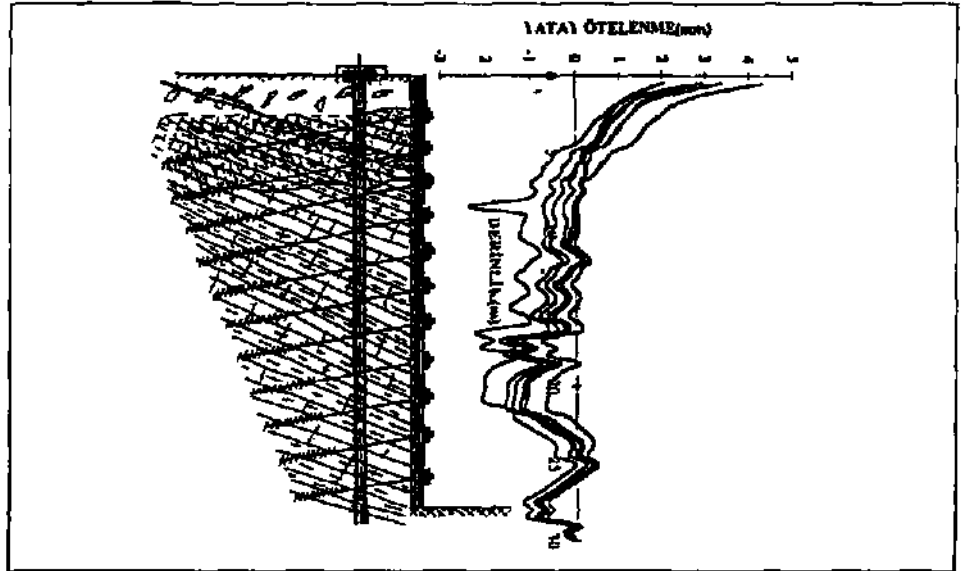
Yatay Deformasyonlar

İstasyon kazılarında kazı duvarının stabilitesini denetlemek amacıyla kritik noktalara yerleştirilen inklinometreler yardımı ile kazı yüzeyine dik ve paralel doğrultularda oluşan yatay ötelenmeler ölçülmüştür. Ötelenmenin zamana ve derinliğe bağlı değişimleri bilgisayarlarda değerlendirilerek deformasyon hızları kısa zamanda belirlenebilmiştir. İstasyon kazılarında yüzeyde oluşan maksimum yatay ötelenme miktarı 90 mm'dir. (Levent İstasyonu). Şekil 6'da kazı derinliği ortalama 11 m olan Osmanbey istasyonunda meydana gelen, kazı yüzeyine dik ve paralel yatay deformasyonların derinliğe ve zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Yüzeyde kazı duvarına dik yöndeki toplam deformasyon miktarı 30 mm dolayında iken, 5 m derinlikte 17 mm. kazı tabanında ise 13 mm'ye kadar düşmektedir.



Şekil 6. Osmanbey istasyonu mikrometre ölçümleri ve kazı duvarının jeolojik durumu

Burada kazıya paralel yatay ötelenmelerin (Ağustos 1994) 17 mm ye kadar ulaşmış olması, asıl hareket yönünün kazı duvarına dik olmadığını, gerçek hareketin, fayla kesilmiş olan kaya bloğunun tabakalarla fay yüzeyinin arakesiti boyunca meydana geldiğini göstermektedir



Şekil 7. Gavıvtepe istasyonu mikrometre ölçümleri ve kazı duvarının jeolojik durumu

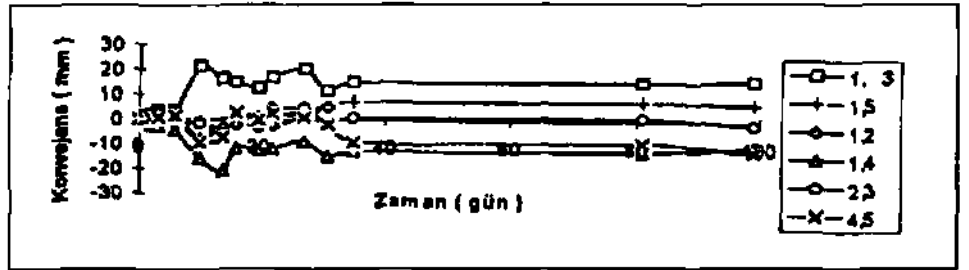
Gayrettepe istasyonlarındaki ölçümlerden birine ait sonuçlar Şekil T de verilmiştir. Burada kazı derinliği 28 m olmasına rağmen, ortamın kaya kalitesinin iyi ve tabakaların 15° gibi düşük eğimli olması nedeniyle önemli deformasyonlar gerçekleşmemiştir. Ancak inklinometre ölçümleri, ilk 5 m'lik dolgulu ve ayrılmış kaya kesiminde kazı duvarının 5 mm kadar dışa doğru hareket ettiğini, buna karşılık 5 ile 22.5 m ler arasında ankraj gergilerinin fazla olması nedeniyle az da olsa ters yönlü deformasyonların meydana geldiğini göstermektedir

Yüzey Oturmaları

Yeraltı kazılarında bağlı oluşabilecek yüzey oturma değerlerini belirlemek amacıyla tünel eksenlerine dik doğrultularda belirli aralıklarla noktalar belirlenmiş optotrigonometrik yöntemlerle oturma ölçümleri yapılmıştır. Oturmanın kaya niteliklerine, örtü kalınlığına ve tünel çapına bağlı gelişen psödoplastik zon, destekleme işlemlerinin bitiş süresi içerisinde yüzeye ulaşmadığından çok küçük oturmalar (3-4 mm) meydana gelmiştir. Ancak bazı ölçüm kesitlerinin tünel eksenine üzerindeki noktalarında maksimum 11 mm'lik oturmalar ölçülmüştür. Bu oturma değerleri, kötü kaya kesimlerinde, fay- ezilme zonlarında ve yakın çevresinde elde edilmiştir

Tünel İçi Konverjans Ölçümleri

Tünellerde 20 m aralıklarla oluşturulan konverjans ölçüm kesitlerinde optotrigonometrik yöntemle ve şerit ekstansometrelerle ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerin zamana ve mevcut jeolojik yapıya bağlı değişimleri incelendiğinde de deformasyonların 8 ile 20 günlük süreler arasında durduğu görülmektedir. Metro tünellerinde ortalama ilerleme 0.8-1.5 m/gün arasında olduğundan, yaklaşık 10 ile 20 günden sonra kazı aynasının 10-17.5 m gerisinde kalan ölçüm kesitinde deformasyonlar sona ermektedir. Gerçekleşen maksimum deformasyonlar, aşırı kırılanmış ve parçalanmış kaya kesimlerinde 25 mm'ye kadar çık-



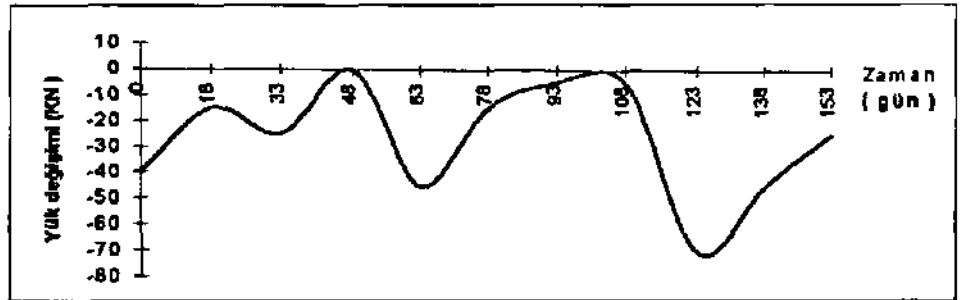
Şekil 8. Tünel içi konverjans değerlerinin zamanla değişimi

mistir. Kısmen sağlam kaya kesimlerinde ölçülen konverjans değerleri ise 6-10 mm arasında yoğunlaşmaktadır (Şekil 8).

Tünellerde iki paralel tüpün aynı anda kazılmaya başlanması halinde tünel aynalarından birinin, diğerine göre etkilenme bölgesinin çapı kadar önde götürülmesi gerekir. Bu aralık kaya gerilmelerinin normal dağılımını sağlar. Kaya ortamı önemli ölçüde zayıflatan, daha fazla destekleme işlemi gerektiren ve maliyeti arttıran "Over Lapping" basınçlarını önler. Aynı zamanda tünellerden önde gidene klavuz görevini üstlenerek jeolojik kökenli problemlerin belirlenmesine yardımcı olur

Ankraj Yükü Ölçümleri

İstasyon kazılarında kazı duvarının desteklenmesi amacıyla boyları 33 m'ye kadar ulaşan ankrajlara yerleştirilen yük hücreleri (Load cell) ile ankraj gergi yüklerinin zamana bağlı değişimleri ölçülmüştür. Dört ayrı istasyon kazısına ait (Taksim-Osmanbey-Gayrettepe-Levent) ölçüm sonuçları incelendiğinde başlangıçta bir miktar yük değişimi gözlenmekte (3-10 ton) daha sonra 1-3 ton'luk oynamalarla sabit kalmaktadır. Bu durum 40-70 tona gerilerek bırakılan ankarajların işlevlerini yerine getirdiklerini göstermektedir. Ani yük artışları sonrası gözlenen yük kayıpları desteklenen kütlelerin hareket halinde olduğuna ve muhtemelen ankarajın fonksiyonunu yitireceğine işarettir (Şekil 9).



Şekil 9. Osmanbey istasyonu AD duvarı ikinci kademe yük hitavısı ölçüm sonucu

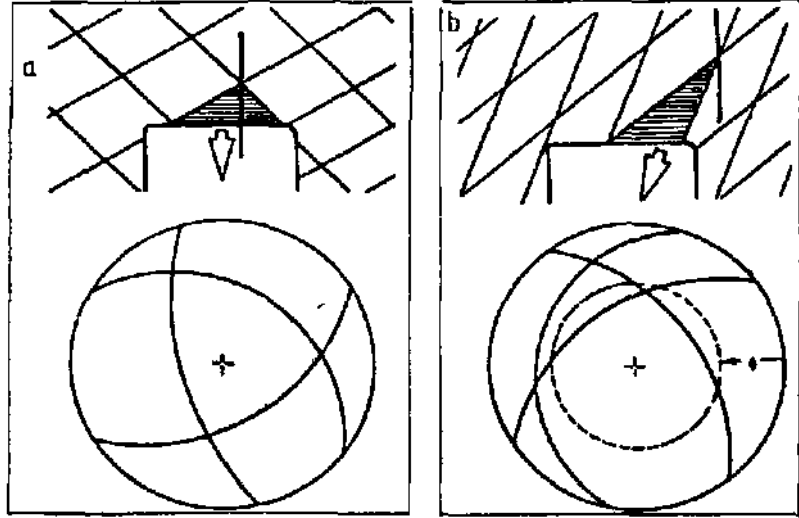
Ankraj gergi yüklerinin yüksek tutulması sonucu oluşan ters yönlü deşormasyonlar daha çok açık kazıların üst kesimlerinde meydana gelmiştir. Bazı hallerde özellikle kazıların üst kesimlerinde ankraj bağlanma ucu ile ankraj kafası arasında, gergi yükünün fazlalığından kaynaklanan plastik deşormasyonlar sonucu, bir sıkışma zonu, bağlama ucunun gerisinde ise bir gevşeme zonu oluşmaktadır. Gevşeme sonucu meydana gelen farklı oturmalarından dolayı üstteki binalarda eğilmeler ve çatlama-

lar meydana gelmektedir. Dolgu ve ayrılmış kaya kesimlerinde gözlenen oturmalar ise mevcut yeraltı suyunun drenajına bağlı olarak gerçekleşmiştir. Özellikle istasyon kazılarının etkilenme bölgesi içinde kalan ve temelleri dolgu içinde bulunan tek katlı binalardaki oturmaların kazı sırasında ortamdaki suyun drene olması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.

5. TÜNEL İÇİ HAREKETLER

Serbest Kaya Düşmeleri

Kaya düşmeleri, daha çok sığ derinliklerde açılan tünellerin tavan kısımlarında süreksizliklerle sınırlanmış sürtünmesiz kaya parçalarının, gravite etkisi ile şerbet olarak düşmesi şeklinde tanımlanabilir. Pratik olarak kaya bloğunun serbest olarak düşebilmesi için, en az üç ana süreksizlikle sıralanmış kaya elemanının tepe noktasından geçen düşey doğrunun kaya bloğunun içinden geçmesi ve ağırlık merkezinin tünel boşluğu içinde kalması gerekir. Yapısal kontrollü düşüş olarak tanımlanan bu tür hareketler, stereografik projeksiyon tekniği ile analiz edilebilmektedir Şekil (10-).



Şekil 10-a) Tünellerde kaya düşmelerinin kinematik modeli

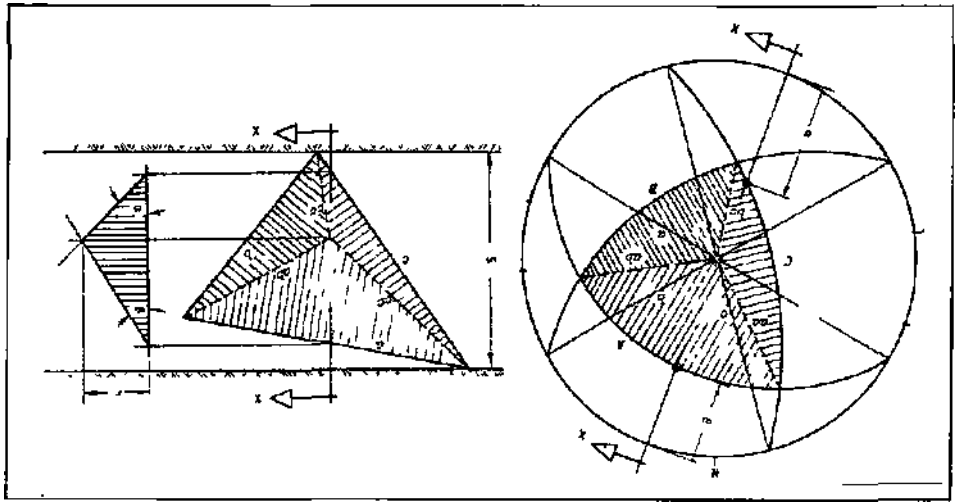
b) Tünellerde kaya kaymalarının kinematik modeli (Hoek. Brown 1980)

Bu tür bir kinematik kontrol sistemi, yeraltı kazı çalışmaları öncesinde elde edilen jeolojik ve yapısal bilgilerin, tünel güzergahı boyunca olası kaya düşmelerinin yerlerini ve boyutlarını belirleme bakımından faydalı

olmaktadır. Metod, aynı zamanda duyarlı olmayan blokların hacim ve şeklinin ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine de olanak sağlar (Hoek, Brown 1980).

Şekil (10-a) da farklı konumlarda gelişmiş üç ayrı süreksizlik takımının oluşturduğu kaya bloğu görülmektedir. Stereografik planda bloğun tepe noktasından geçen düşey çizgi, stereografik izdüşüm ağının merkez noktası olarak gösterilmiştir.

Şekil (10-a) da görüldüğü gibi, süreksizlik düzlemlerinin büyük dairelerinin kesişmesi ile oluşan kapalı alan stereonetin merkezini içine alıyor ise, tipik düşme olayı gerçekleşebilir. Metro tünellerinde görülen bu tür hareketler, kazı tekniğinden kaynaklanan aşırı sökümler olarak değerlendirilmektedir. Hacımları 3-5 m³ ü geçmemektedir.



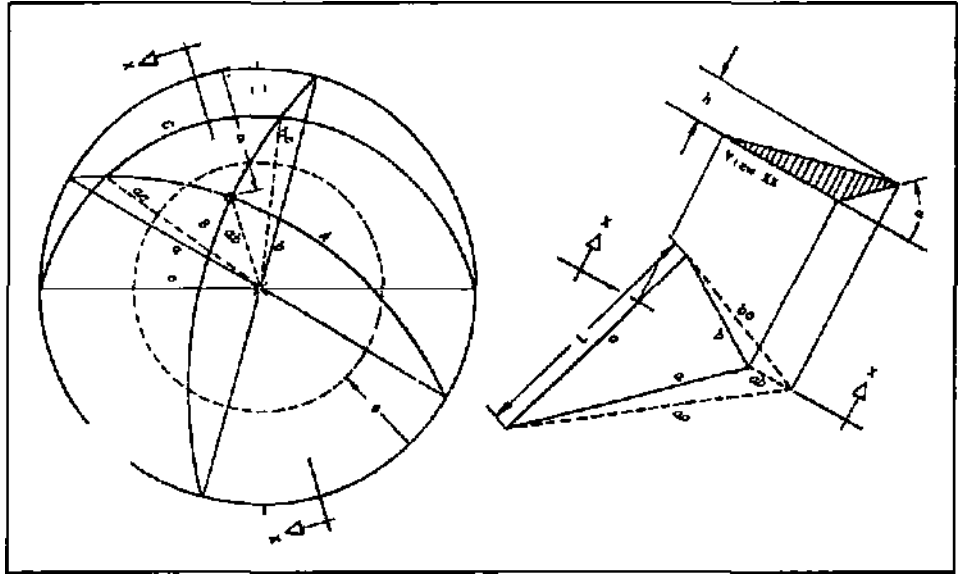
Şekil 11. Tünellerle blok düşmesinin stereografik izdüşüm yöntemleri ile analizi (Hoek 1980) (Açıklama metinde)

Şekil 11'de örnek olarak verilen N60W, 40 NE- N15W, 70SW ve N 60 E, 60SE konumlu üç ayrı süreksizliğin büyük daireleri görülmektedir. Tünelin yan duvarları arasındaki mesafesi S ile gösterilen tünelin, N70W doğrultusunda devam ettiği varsayılmıştır. Bloğun tepe noktası ab ac, be çizgilerinin (arakesit) kesişme noktası ile tanımlanmıştır. Tepe noktası ile tanımlanmıştır. Tepe noktası ile bloğun tabanı arasındaki yükseklik olan h, tünel eksenini ile tepe noktasından geçen kesit yardımı ile bulunur. Bu kesit, a ve c izlerini üç geninin tepe noktasında keser. A ve C düzlemlerinin eğim açıları (α , β) olarak verilmiştir. Bu açılar ağın merkezinden geçen kesit boyunca (θ) Stereografik projeksiyon üzerinde ölçülerek bloğun doğrultusundaki kesiti belirlenmiş olur. Bloğun hacmi

$$V = (A \cdot h) / 3 \quad (A: \text{kayan bloğun taban alanı, } h \text{ yüksekliğidir})$$

Kaya Kaymaları

Üç ayrı eklem takımının oluşturduğu kaya bloğunun, tünele göre tepe noktasından geçen düşey doğru, kaya bloğunun içinde kalmıyor ise blok sadece bir süreksizlik yüzeyi boyunca yada iki süreksizliğin arakesiti boyunca kayarak hareket eder (Şekil 10,b). Bu durum stereografik projeksiyonda gösterildiğinde, süreksizliklerin oluşturduğu kapalı alan stereonetin merkezinin dışında bir yerde oluşur. Başka bir ifadeyle, stereonetin merkez noktası kapalı alanın içinde yer almaz. Blok kaymasının oluşabilmesi için gerekli olan ikinci koşul, kaya şevi analizlerinde olduğu gibi kayma düzleminin eğim açısının bu düzleme ait içsel sürtünme açısından büyük olması gerekir. Bu tür analiz yönteminde, hareket anında kohezyonun yenildiği kabul edilmektedir. Stereonette süreksizliklerin oluşturduğu kapalı alan sürtünme dairesinin dışında bir yerde oluşuyor ise blok stabil demektir. Aynı şekilde, alanın bir kısmı



Şekil 12. Tüneldeki blok kaymasının stereografik izdüşüm yöntemi ile analizi (Hoek 1980) (Açıklama metinde)

veya tamamı sürtünme dairesi içinde kalmış ise bu durumda blok duraysızdır. Şekil 12'de verilen örnekle üç ayrı süreksizliğin konumları sırasıyla N30W/70SW - N45E, 20 NW ve N73E, 65 NW tünel gidişi N60W, olası kayma düzleminin sürtünme açısı da 35 derece olsun. Bu durumda süreksizliklere ait ana daireler ve sürtünme açısı çizildiğinde oluşan kapalı alanın bir kısmının sürtünme dairesi içinde kaldığı görüle-

çektir. C Düzleminin c ile gösterilen izinin uzunluğu (L) dir. Aynı şekilde ab doğrusu boyunca alınan kesitinde bloğun yüksekliği (h) bulunur. A ve B dairelerinin ara kesitinin yatay düzlem ile yaptığı açı (θ) olarak gösterilmiştir. Oluşan kamanın hacmi Şekil 11 deki gibi hesaplanır.

6. SONUÇLAR

- İstanbul Metrosu temel kayaları tektonik etkilerle aşırı kırılanmış ve
- Ortalama 30 m derinliklerdeki ana kaya orta ve ileri derecede ayrışmış, ufalanmıştır.
- İn situ deney sonuçlarının geniş aralıklarda değişmesi, ortamın modellenmesini güçleştirmektedir.
- Tünellerde ve istasyon kazılarında oluşan deformasyonlar ;
Jeolojik yapıya, süreksizlik konumlarına, ortamın kaya kalitesine, ayrışma durumuna,
Kazı, geometrisine ve boyutlarına, kazı yöntemine,
Ortamdaki sekonder gerilme durumuna
Yeraltı suyu durumuna ve bazı uygulama hatalarına bağlı gelişmiştir.

KAYNAKLAR

BIENIAWSKI, Z. T, (1984), Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. Boston England

HANNA, TH., (1985) Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. First Edition, University of Sheffield. England.

HOEK, E. BROWN, E. T (1980), Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy London,

HUNT, R. E., (1984), Geotechnical Investigation Manual. Mc Graw Hill Book Company. USA.

JHONSON, R. B., DE GRAFIK (1988), Principles of Engineering Geology Jhon Wiley and Sons. Newyork, USA.

LEGGEXR. E., (1973), Cities and Geology. Mc Graw Hill Book Company USA

WYLLIE, D C, (1992), Foundations on Rock. Vancouver Canada.