

İNCİRLİ - M.İNÖNÜ TÜNELİNDE UYGULANAN GEOTEKNİK ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRMESİ

İnş.Yük.Müh. Başar ARIOĞLU (*)
Mad.Yük.Müh. Ali YÜKSEL (*)
Hrt.Yük.Müh. Ahmet ÜNLÜTEPE (*)
Prof.Dr.Müh. Ergin ARIOĞLU(**)

1. GİRİŞ

Yerleşim alanları hızla büyüyen İstanbul kentinin ulaşım sorunu mevcut ulaşım sistemleri ile çözülemez duruma gelmektedir. Diğer kelimelerle, mevcut ulaşım sistemi (karayolu) gerek kapasite, gerekse konfor açısından taşıdığı olumsuzluklar ve son olarak yarattığı çevre problemleri raylı toplu taşıma sistemlerinin (Metro, Hafif Raylı Sistem, Tramvay) mutlaka uygulamaya geçirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Ancak bunun yanısıra yoğun yapılaşma, mevcut altyapılar ve hassas sanat yapıları (karayolları, köprülü geçişler) bulunması dolayısıyla raylı sistem güzergahlarının "aç-kapa tünel veya "sığ delme tünel" ile geçilmesi söz konusu olmaktadır. Bu durumda proje maliyetinin optimize edilmesi açısından yüksek ilerleme ile tünel kısa sürede tamamlanmalı bunun yanısıra, yapılacak geoteknik ölçümlerle, yüzeyde bulunan yapılar, oluşacak deformasyonların kontrol altında tutulması ile minimum hasarla geçilmelidir.

Bu çalışmada, İstanbul Hafif Raylı Sistemi 2.Aşama İnşaatı kapsamında yer alan M.İnönü Tünelinde gerçekleştirilen geoteknik ölçme çalışmaları ele alınmıştır. Uygulanan ölçme metodları açıklanmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. İNCİRLİ - M.İNÖNÜ TÜNELİ VE YAPIM ÇALIŞMALARI

İstanbul Hafif Raylı Sistemi 2.Aşama İnşaatı kapsamında yer alan M.İnönü Tüneli, güzergahın 6+108 km'si ile 7+585 km'leri arasında bulunmaktadır. Bu bölümde yoğun yapılaşmanın bulunması, karayolu-köprülü geçişlerinin yer alması, topoğrafik koşullar ve hat geometrisi dolayısıyla, bu bölümün "Derin Tünel" ile geçilmesi gerekmektedir.

Tünel, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu ile açılmış, ön sağlamlaştırma işlemi 20 - 25 cm kalınlığında (P.Beton+Çelik Kafes İksa+Çift Kat Çelik Hasır+Kaya Bulonu)'ndan oluşan iksa sistemi ile gerçekleştirilmiş, son kaplaması ise çift kat çelik hasır donatılı BS30 betonu (t=40 cm) ile yapılmıştır. Tünel kazı çalışmasına 5 Mayıs 1993'te başlanmış ve toplam 293 işgününde, 6 Mayıs 1994'de tamamlanmıştır [1].

(*) Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş., Çamlıca-İSTANBUL

(**) İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Maslak-İSTANBUL

3. JEOLJİK DURUM

Tünel geçkisi genel olarak "siltli kil-kil" tabakalarından oluşan "Güngören" formasyonları ve "kil ara tabakalı kireçtaşı-marn" tabakalarından oluşan "Bakırköy" formasyonları içerisinde bulunmaktadır. Üst Miyosen yaşlı Güngören formasyonları genellikle gri-mavimsi renklerde sert-çok sert kıvamlı ($q_u = 3-5 \text{ kg/cm}^2$) yer yer çatlaklı, kiltası litolojisinde ve marn aratabakalıdır. Bakırköy formasyonları ise sık-çok sık çatlaklı, ince-çok ince tabakalı yapıya sahip, kil aratabakalı, orta - zayıf dayanımlıdır. Tabakalar hemen hemen yatay tabakalı ve yer yer "antiklinal-senklinel" yapılara benzeyen yapıda, ondülasyonlu ve yer yer 1-3 m atımlı faylarla kırıklıdır [1],[2]. Güzergahın Mühendislik Jeolojisi ile ilgili ayrıntılı bilgiler [1] referansında verilmiştir.

4. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU VE GEOTEKNİK ÖLÇMELER

Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu olarak bilinen tünel açma yönteminin dayandığı ilkeler çeşitli referanslarda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır [3],[4],[5].

Kısaca açıklamak gerekirse ;

- Kazı bölgesi civarında, üç boyutta gerilme dağılımını kontrol altına almak ve,
- Kazı sırasında ve kazı sonrasında oluşan “gevşeme ve deformasyonların minimize” edilmesi, “kayaç - zemin dayanımının korunması”olarak açıklanabilir.

Belirtilen koşulların yerine getirilebilmesi için kazıdan hemen sonra erken taşıyıcılık sağlayabilecek (P.Beton+Çelik Hasır+Çelik Kafes İksa+Kaya Bulonu) ve çevre ortamı ile birlikte çalışacak taşıyıcı iksa sistemi oluşturmak, kazı faaliyetleri sırasında ve sonrasında oluşan tünel içi deformasyonların ve yüzey hareketlerinin devamlı ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekli olmaktadır. Diğer yandan varsa, yüzeyde bina, karayolu ve köprü gibi hassas yapılarda oluşacak deformasyonların ve oluşabilecek yapı hasarlarının ölçülmesi ve izlenmesi gereklidir[3].

Bu amaçla, yüzeyde ve tünel içinde aşağıdaki geoteknik ölçmeler yapılmaktadır;

- Yüzey oturması (tasman) ölçümleri
- Tünel içi deformasyon (konverjans) ölçümleri
- Ekstansometre ve inclinometre ölçümleri
- Tünel içinde radyal ve tegetsel basınç hücreleri, yerleştirme ve ölçme
- Ayna jeolojik haritası ve jeomekanik büyüklerin tesbiti

Gerçekleştirilen ölçümler jeomekanik koşullar ile birlikte değerlendirilir ve iksa parametreleri (P.Beton kalınlığı, iksa aralığı, bulon yoğunluğu vb.) ve üretim parametreleri üzerinde gerekli değişiklikler yapıma yoluna gidilir [3].

5. M.İNÖNÜ TÜNELİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN GEOTEKNİK ÖLÇÜMLER

M.İNönü Tüneli'nde, güzergahın jeolojik yapısı, yerleşim alanları, yüzeyde bulunan hassas sanat yapılarının durumu, topoğrafik yapıya göre güzergah boyunca toplam 46 kesit ölçme istasyonu olarak projelendirilmiştir (Şekil-1). Kazı faaliyetleri sırasında yapılan bu ölçümlerin tipik bir genel kesiti Şekil-2'de, şematize edilmiş, sözü edilen ölçümlerin ölçüm programı ise Şekil-3'de gösterilmiştir. Ölçüm programından görüleceği üzere yüzeyde yapılan ölçümler, tünel aynası ölçüm istasyonuna ~3D (¹) kadar geride iken başlatılmakta ve yine tünel aynası istasyonu ~3D kadar geçtikten sonra deformasyonların sönümlenme durumuna göre; deformasyon artış hızı 1 mm/gün seviyesinin altına düşünceye kadar devam edilmektedir. Bunun yanısıra, ölçüm programından açıkça izlendiği gibi tünel içi ölçüm araçları üst yarı (²) istasyonu ~1 m geçtikten sonra yerleştirilmekte ve okumalara başlanılmaktadır. Aynı durum altyarı (²) için de geçerlidir. Ancak zaman zaman, tünel içi çalışmalarının yoğunluğu, vardiya-ilerleme hızına bağlı olarak, tünel içindeki ölçüm araçlarının yerleştirme ve ilk okumalarında kaçınılmaz gecikmeler ve ölçülemeyen deformasyonlar söz konusu olmuştur.

Tünel kazı çalışmaları sırasında yapılan geoteknik ölçümlerde ve değerlendirilmesinde kullanılan araçlar, yerleştirilen cihazlar ve bununla ilgili karakteristik bilgiler Tablo-1'de özetlenmeye çalışılmıştır.

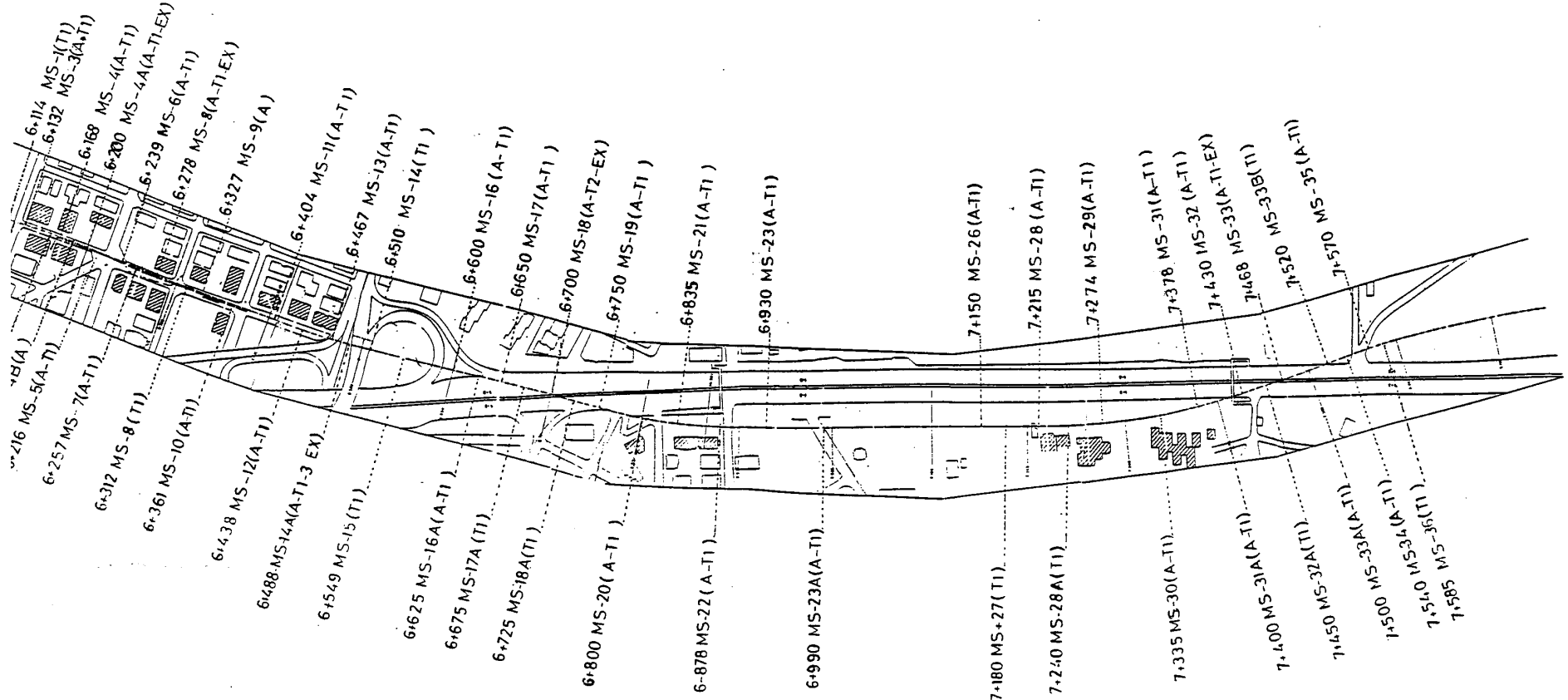
5.1. YÜZEY TASMANI

Tünel kazı çalışmalarından dolayı oluşan yüzey oturması (tasman)'ın belirlenmesi amacıyla Şekil-2'de belirtilen ölçme istasyonlarında geçilen kesitin karakteristiğine göre üç değişik tipte (beton zemin, asfalt zemin ve bina) ve her kesitte 3 - 8 adet arasında tasman bulonu tesis edilmiş (Şekil-2) ve Şekil-3'deki ölçme programı çerçevesinde yüzey tasmanı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler Tablo-1'de belirtilen "Zeiss Ni 2 nivo + hassas ölçme aparatı " ve iki "invar mira" kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Etki sahası dışında bulunan bir röper noktası ile ölçüme başlanmış, tasman bulonları da ölçüldükten sonra okumalar arazide "Psion Organiser" cihazı ile kontrol edildikten sonra tekrar röper noktasında tamamlanmıştır. Her ölçme işleminde hata kapanma limiti $\pm 0.4 \times 10^{-3}$ m kabul edilmiştir.

Toplam 38 ölçme kesitinde gerçekleştirilen ölçümlerle ilgili istatistiksel bilgiler aşağıda özetlenmiştir: [6].

(¹) D: Eşdeğer tünel çapı Ø 9.5 m

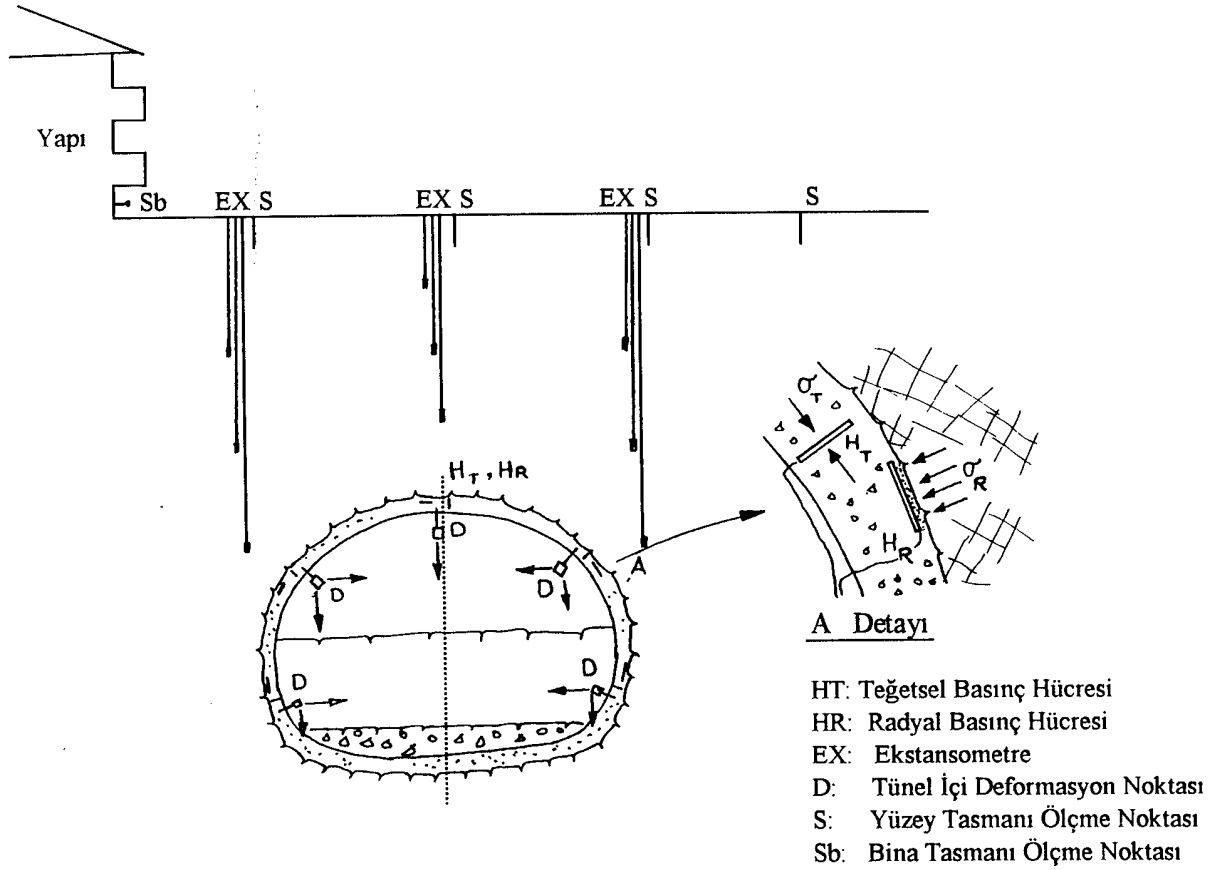
(²) Stros. Kalot ve Radye için sırasıyla Üstyarı, Altyarı ve Taban deyimleri kullanılacaktır



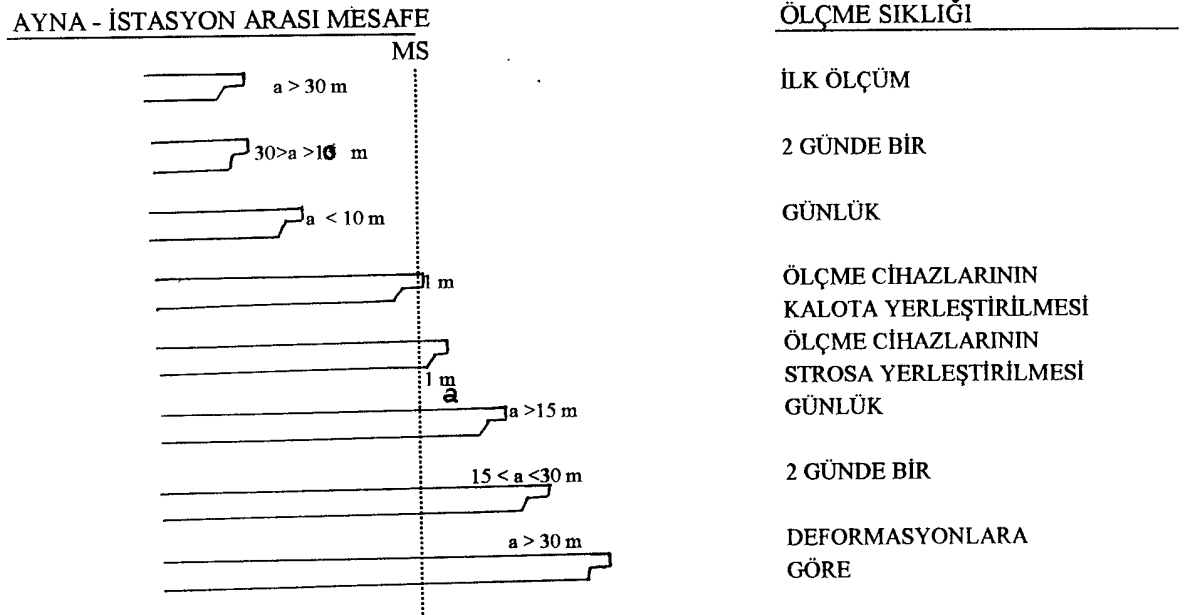
Şekil 1 Güzergahta Geoteknik Ölçme İstasyonları

Tablo-1: M.İnönü Tünelinde Kullanılan Geoteknik Ölçme - Değerlendirme Araçları

Geoteknik Ölçüm	İstasyon Sayısı	İstasyona Yerleştirilen Nokta-Cihaz Cinsi	Yerleştirilen Nokta, Cihaz Sayısı		Ölçme Yöntemi Presizyonu	Ölçme-Değerlendirme Araçları
			ad/istasyon	Toplam		
1. Yüzey Tasmanı	38	Oturma Bulonu (Zemin, Asfalt ve Bina Tipi)	3 - 8 Ortal : 5.3	200	Jeodezik (Hassas Nivelman Her ölçme kapanması için = 0.0004 m)	<ul style="list-style-type: none"> • Ölçme : Zeiss Ni2 Niva + Hassas Ölçme Aparatı + İnvar mira (2 ad) + Psion organiser cihazı • Değerlendirme : HP-86 B Personel + Computer, HP 82905 B Printer + HP 747 SA Plotter + Data transfer Donanımı + Özel yazılım (Software)
2. Tünel İçi Deformasyon	43	Özel Bulon Ucuna Monteli Okuma Hedef Levhası	5	215	Jeodezik (Elektro-optik) Açığı: 0.2 m gon/0.6” Mesafe 2 mm + 2 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Ölçme : Zeiss Rec-Elta 2 Ölçme Seti + Sehpa + Tribrah + Reflektör + Poligon noktaları vasıtasıyla • Değerlendirme : Yukarıdaki gibi
3. Ekstansometre	5	Çubuklu Ekstanso-metre Cihazı Geokon Model A-6 3, 4 çubuklu	1 - 3	7	Mikrometre ile Direkt Okuma Hass : 0.01 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Ölçme : Derinlik Mikrometresi • Değerlendirme : PC (386 D x 33) Personel Computer + Microsoft Excell
4. Basınç Hücresi	1	NATM Stili Titreşen telli Basınç Hücr. Teğetsel : Model 4850-2 Max 200 kg/cm ² Radyal : Model 4850-1 Max 50 kg/cm ²	5 Radyal 5 Teğetsel Basınç Hücr.	10	Elektronik Okuma 0.7 x 10 ⁻⁶ kg/cm ² Hass.	<ul style="list-style-type: none"> • Okuma : Geokon elektronik özel okuma ünitesi • Model : GK 401 • Değerlendirme : Aynı



Şekil-2: Tipik Geoteknik Ölçme Kesiti

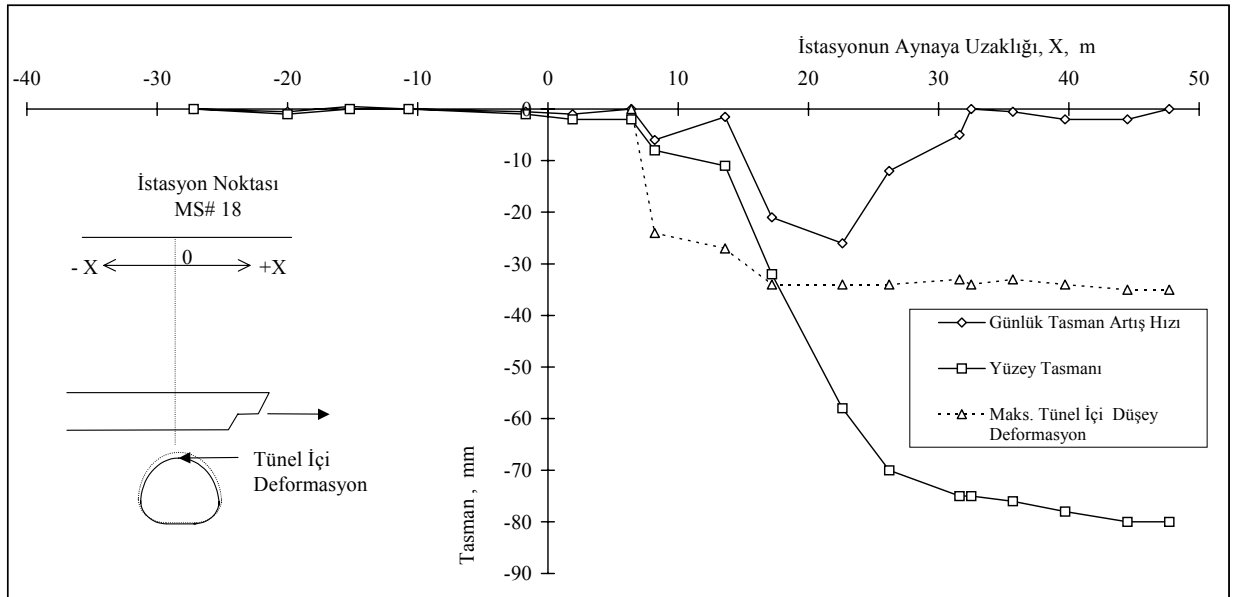


Şekil- 3: Ölçüm İstasyonunda Ölçme Programı

·	Toplam Okuma Sayısı	:4519 adet
·	Ortalama Okuma Sayısı	:22 adet/bulon
·	Ortalama Ölçme Aralığı	:35 m
·	Birim Tünel Uzunluğunda Okuma Sayısı	:3.4 ad/m
·	İstasyon Başına Ortalama Okuma Sayısı	:119 adet/istasyon

Ölçme aracı ile yapılan okuma sonuçları kişisel bilgisayar yardımıyla değerlendirilmiş, ve değerlendirme sonuçları günlük ve haftalık periyotta tablo ve grafik düzende proje yöneticisine sunulmuştur. Bu sonuçlar proje yönetimi tarafından değerlendirmeye alınarak iksa ve üretim parametreleri konusunda gerekli kararlar verilmektedir.

Tipik bir değerlendirme grafiği Şekil-4'de görülmektedir [6].



Şekil 4 : MS# 18 İstasyonunda Aynaya Uzaklık Tasman Değişimi

5.2. TÜNEL İÇİ DEFORMASYON (KONVERJANS) ÖLÇÜMLERİ

Tünel cidarında oluşan deformasyonların belirlenebilmesi için püskürtme beton işleminden sonra Şekil-2'de belirtilen planda "deformasyon (konverjans) bulonları" tesis edilmiş ve oluşan deformasyonlar ölçme programındaki sıklıkta, jeodezik (elektro-optik) yöntemle tespit edilmiştir. Ölçme işleminde kullanılan araçlar keza Tablo-1'de belirtilmiştir.

M. İnönü Tünelinde Tünel içi ölçme işlemlerinin jeodezik yöntemle belirlenmesi aşağıdaki avantajlardan dolayı tercih edilmiştir;

- Deformasyonların her noktada, hangi büyüklükte ve hangi yönde geliştiği izlenebilir.
- Ölçme işlemi tünel trafiğinden etkilenmeden gerçekleştirilebilir.
- Ölçme işlemi ve sonucu bulon sayısından etkilenmez.
- Ölçme işlemleri tünelde yapılan diğer başka ölçme işlemleri sırasında gerçekleştirilebilir, ekstra ölçme organizasyonuna gerek yoktur.
- Ölçme işlemi oldukça presizyonludur.
- Çok sayıda ölçme verileri ölçme aracının hafızasına ölçme sırasında kaydedilebilir ve ara donanımlar vasıtası ile bilgisayar ortamına doğrudan olarak aktarılabilir.

Ancak bunların yanısıra aşağıda belirtilen sakıncaları taşır :

- Ölçme-değerlendirme işleminde kullanılan donanımlar oldukça pahalıdır. Ancak tünelin yönlendirilmesi ve güzergah kontrolü için aynı araçlar kullanıldığından bu husus gözardı edilebilir.
- Ölçme işlemi karmaşıktır; önceden tesis edilmiş poligon noktalarına gerek vardır.
- Sonuçlarının bilgisayara aktarılması için ara donanımlara ve sonuçların değerlendirilmesi için bilgisayar (Hardware) ve uygun bir yazılıma (Software) gerek vardır.
- Sonuçlarının doğruluğu ve hassasiyeti ölçme araçlarının kalibrasyonundan ve personelin deneyim düzeyinden oldukça etkilenir.

Tünel içi deformasyon ölçüleri, deformasyon etki alanı dışındaki poligon noktasına bağlanılarak konverjans noktalarının mesafe, düşey, yatay açıları ölçülerek ölçme setinin hafızasına ölçme sırasında kaydedilmek suretiyle yapılmaktadır. Toplam 43 kesitte yapılan konverjans ölçüm çalışmaları ile ilgili istatistiksel bilgiler aşağıda özetlenmiştir [6].

• Toplam Okuma Sayısı	:2192 adet
• Bulon Başına Ortalama Okuma Sayısı:	:10 adet/nokta
• Ortalama Ölçme Aralığı	:31 m
• Birim Tünel Uzunluğunda Okuma Sayısı	:1.64 ad/m
• İstasyon Başına Ortalama Okuma Sayısı	:51 . adet/istasy.

Yapılan okuma sonuçları günlük olarak tasman çalışmalarına paralel olarak değerlendirilmiş ve değerlendirme sonuçları proje yönetimine sunulmuştur.Yapılan ölçümlerin değerlendirilmesine ait tipik bir değişim Şekil-4 üzerinde tasman eğrisi ile birlikte gösterilmiştir. Güzergah boyunca diğer istasyonlarda yapılan ölçüm-değerlendirme sonuçları şirketimizin arşivlerinde bulunmaktadır [6],[7].

5.3. EKSTANSOMETRE ÖLÇÜMLERİ

Tünel cidarından, yüzeye kadar yer alan kayaç-zemin ortamındaki tabakaların birbirine göre göreceli hareketlerinin belirlenebilmesi amacıyla güzergah boyunca toplam 7 kritik kesitte (bina, köprü geçişi, karayolu geçişleri) "Geokon marka, Model A-6 Çubuklu Ekstansometre" tesis edilmiş ve ölçüm sonuçları günlük olarak tablo ve grafik düzende değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına ait tipik bir değerlendirme grafiği Şekil-5'de verilmiştir.

5.4. BASINÇ HÜCRESİ ÖLÇÜMLERİ

Güzerghın E-5 karayolunu geçtiği Km 6+700'de tasarım yüklerinin kontrol edilmesi amacıyla "basınç hücreleri" yerleştirilmiştir. Bu kesitte Şekil-3'de gösterildiği biçimde 6'sı üst yanda 4'ü alt yarıda olmak üzere "Geokon" marka, "Teğetsel 4850-2" model, ve "Radyal 4850-1" model basınç hücreleri kullanılmıştır. Şekil-2'den görüleceği üzere radyal basınç hücresi iksa sistemine etkileyen "arazi" gerilmelerini, teğetsel basınç hücresi ise iksa sistemi içerisinde oluşan (P.beton) "normal" gerilmeleri ölçmektedir. Basınç hücresi ölçüm sonuçları değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar grafik formda Şekil-6'da gösterilmiştir [6],[7].

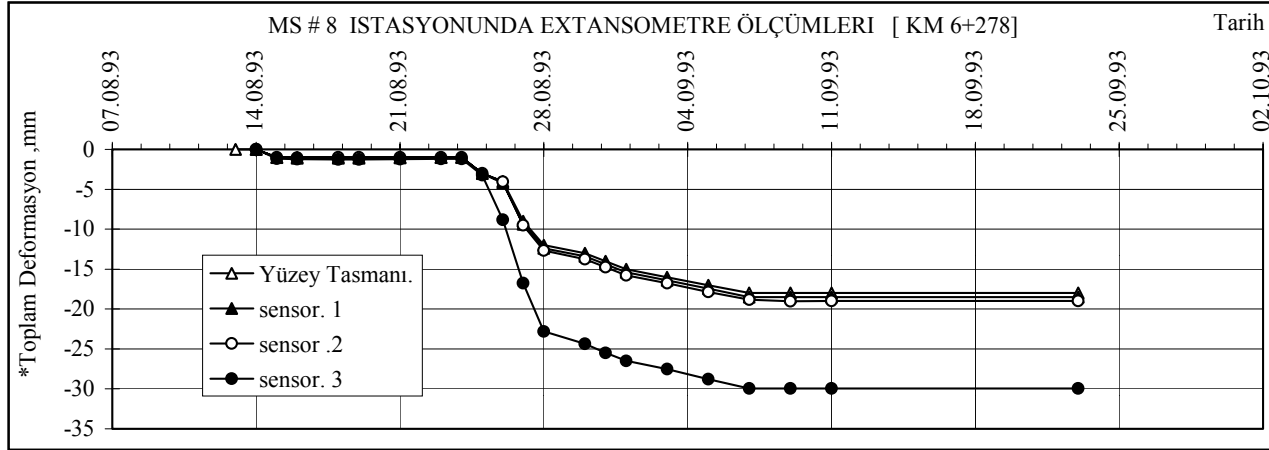
6. TOPLU SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

M.İnönü Tünelinde gerçekleştirilen yüzey tasmanı, Tünel içi deformasyon sonuçları ile birlikte ilerleme, iksa aralığı, tasman sönümlenme mesafesi gibi bilgiler de tablo-2'de topluca özetlenmiştir. Şekil-7'de ise güzergah boyunca ölçülen tasman miktarları eşdeğer derinlik ile birarada gösterilmiştir.

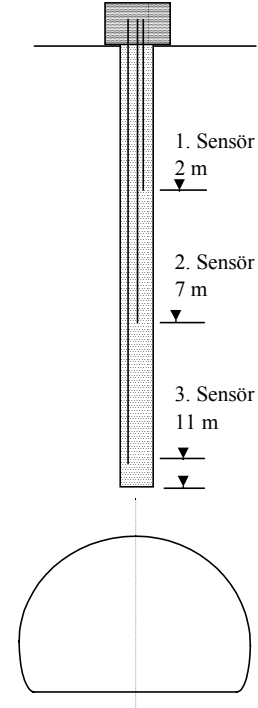
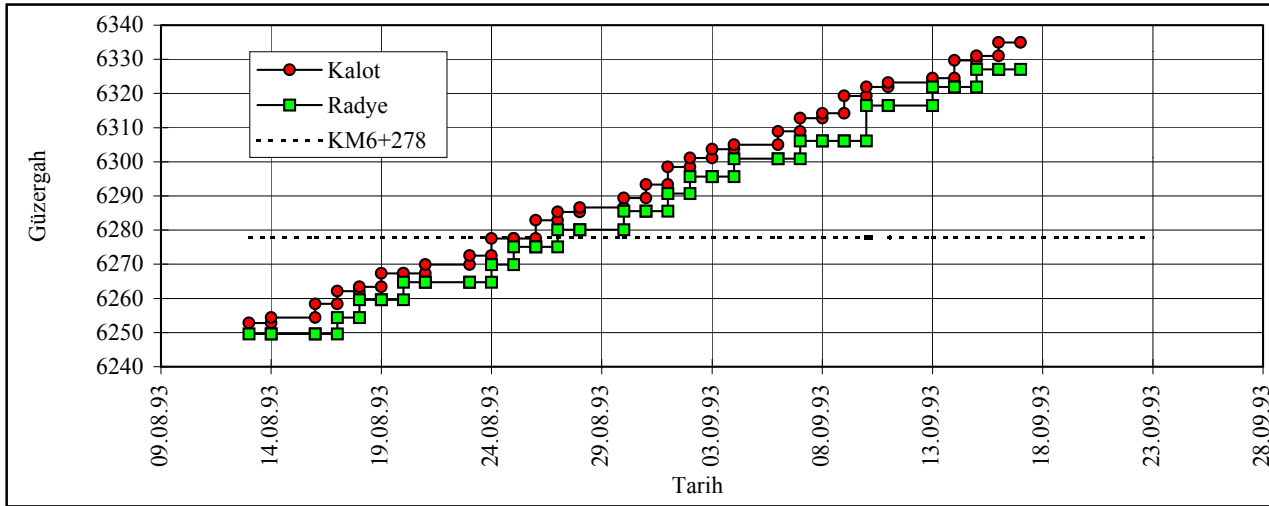
Kısaca değerlendirme yapmak gerekirse;

Ölçülen tasman değerleri, genellikle hesaplanan tasman değerlerinin altında kalmıştır. Bu durumun yerinde zemin parametrelerinin, özellikle yerinde elastik modülün tasman hesaplarında alınandan daha büyük değerlerde olmasından kaynaklanmıştır. Diğer bir deyişle tasman ön hesaplarında "konservatif" davranılarak daha emniyetli tarafta kalınmıştır.

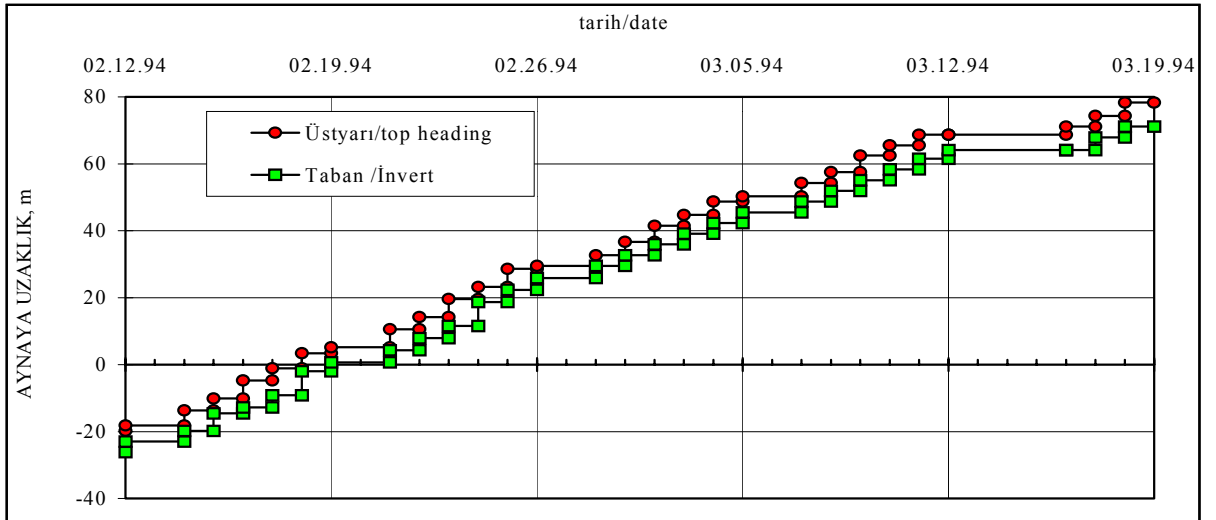
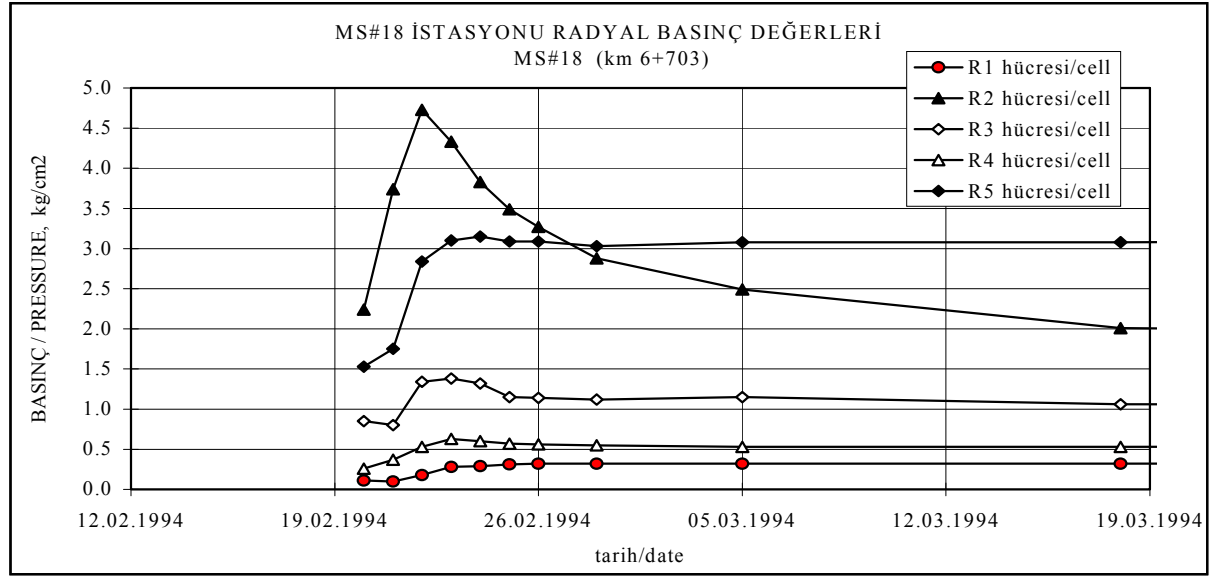
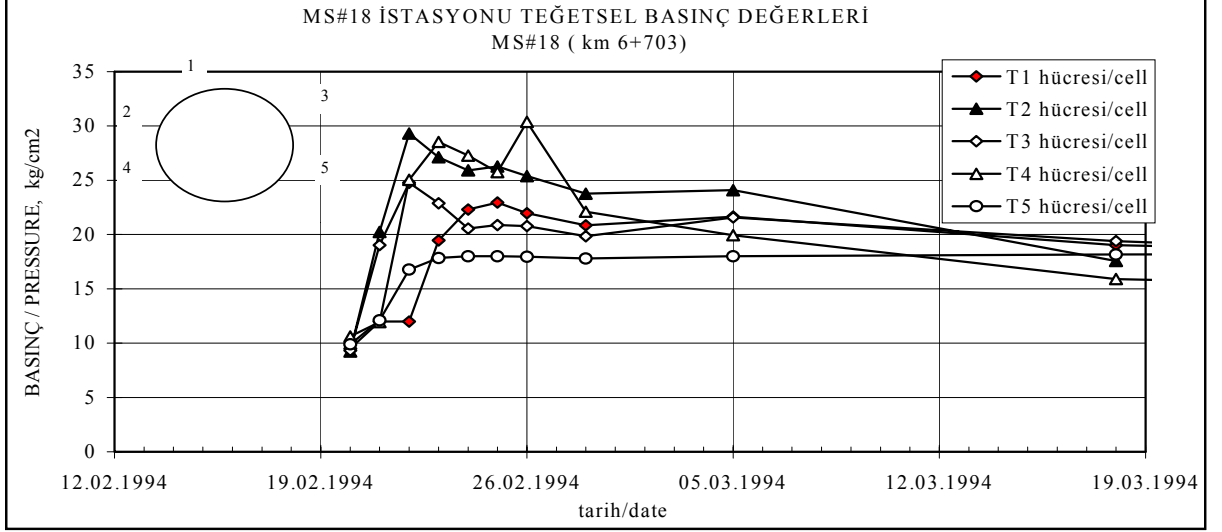
Tablo-2'den ve şekil-7'den açıkça görüldüğü gibi, maksimum yüzey tasmanı 83 mm ile MS#16 (km 6+600) istasyonunda ölçülmüştür. Bunu sırasıyla MS#18 (km 6+700) ve MS#16A (km 6+625) ölçme istasyonları izlemektedir. Burada ölçülen aşırı yüzey tasmanının burada orijinal topografyada örtü kalınlığının az olması ve E-5 karayolu geçişi nedeniyle 5-6 m'lik bir yapay dolgu yapılmış olması ile açıklanabilir. Diğer taraftan bu bölümde tünel aynası tavanında bulunan siltli-kumlu seviyeden gözlenen yer yer sızıntı-akma şeklindeki su geliri, tasmanın artmasına yol açan diğer bir neden olarak belirtilebilir.



(*) Toplam Deformasyon= Yüzey tasmanı + Ekstansometre Okuması



Şekil 5: Ekstansometre Ölçüm Sonuçları



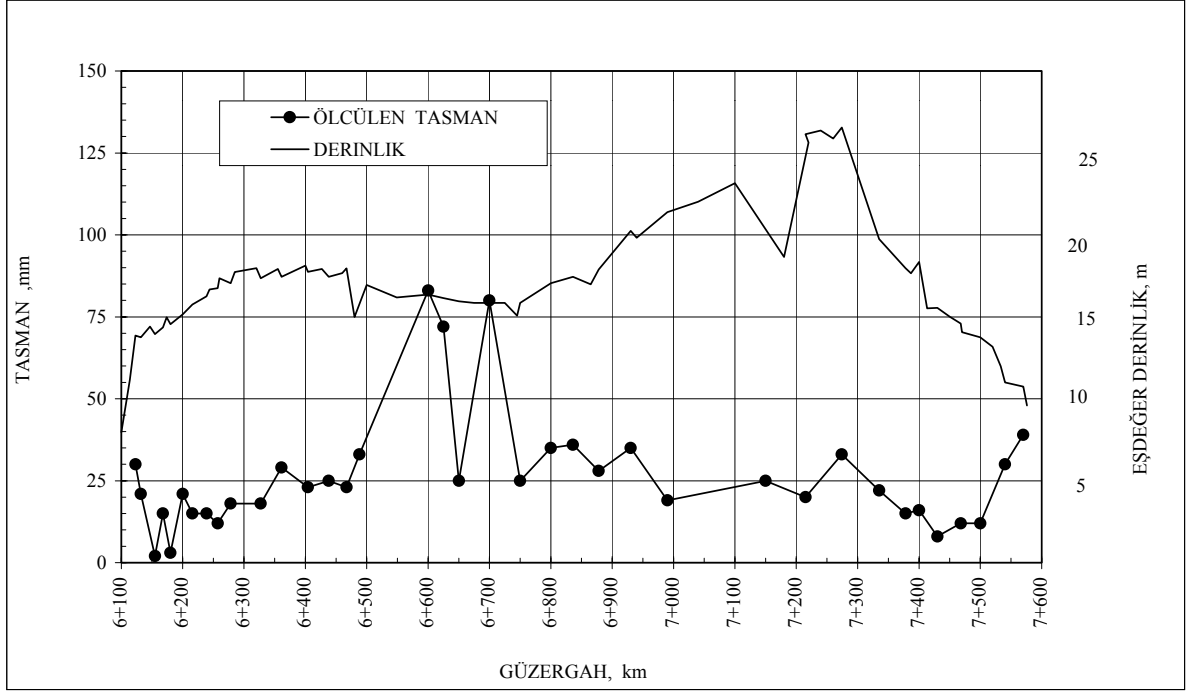
Şekil 6: Basınç Hücresi Ölçüm Sonuçları

Tablo-2: M. İnönü Tüneli Tasman Toplu Sonuçları

Sıra No	Istasyon No	Güzergah Km	Örtü Kalınlığı m	Esdeğer Derinlik m	Gerçekleşen Tasman mm	Tünel İçi Maks.Düşey deform. , mm	Maksimum Extansometre Deform. , mm	İstasyonda Üstyarı-Taban Mesafesi, m	Sönml.Tasmanda İstasyon-Ayna Arası mesafe, m	İksa Aralığı m	İllerleme Hızı m/gün
1	MS 1(T1)	6114	6.4	11.15		17					0.88
2	MS 2(A+T1)	6123	9.1	13.85	30	24		15.6	15	1.2	1.41
3	MS 3(A+T1)	6132	9	13.75	21	12		4.8	18	1.2	2.08
4	MS 3B(A)	6155	9.2	13.95	2						2.12
5	MS4(A+T1)	6168	9.6	14.35	15	15		6.5	11	1.3	2.89
6	MS4B(A)	6180	9.8	14.55	3						2.51
7	MS4A(A+T1+EX)	6200	10.4	15.15	21	7	18	7.8	17	1.3	2.47
8	MS5(A+T1)	6216	11	15.75	15	8		7.8	12	1.3	2.75
9	MS6(A+T1)	6239	11.5	16.25	15	10		5.2	14	1.3	2.98
10	MS7(A+T1)	6257	12	16.75	12	8		7.8	12	1.3	2.91
11	MS8(A+T1+EX)	6278	12.3	17.05	18	17	30	7.8	11	1.3	2.74
12	MS8A(T1)	6312	12.6	17.35		18					3.25
13	MS9(A)	6327	12.6	17.35	18	18		5.2	23	1.3	3.21
14	MS10(A+T1)	6361	12.7	17.45	29	20		5.2	30.5	1.3	3.02
15	MS11(A+T1)	6404	13	17.75	23	12		5.4	19	0.9	3.35
16	MS12(A+T1)	6438	12.7	17.45	25	17		7.2	19	0.9	2.54
17	MS13(A+T1)	6467	13.2	17.95	23	19		5.4	22	0.9	3.34
18	MS14(A+T1+EX)	6488	12.2	16.95	33	49	45	4.5		0.9	3.74
19	MS14(T1)	6510	12.2	16.95		8					3.49
20	MS15(T1)	6549	11.44	16.19		14				0.9	3.32
21	MS16(A+T1)	6600	11.6	16.35	83	30		6.3	29	0.8	3.49
22	MS16A(A+T1)	6625	11.4	16.15	72	10		4.8	21	0.9	3.25
23	MS17(A+T1)	6650	11.1	15.85	25	21			26		3.41
24	MS17A(T1)	6675	11.1	15.85		29			22.5		2.82
25	MS18(A+T2+EX)	6700	11.1	15.85	80	35	83	6.3	32	0.8	3.9
26	MS19(A+T1)	6750	11.1	15.85	25	29		4.8	22	0.8	3.47
27	MS20(A+T1)	6800	12.3	17.05	35	32		6.4	32	0.9	2.96
28	MS21(A+T1)	6836	12.7	17.45	36	30		5.4	25	0.9	4.13
29	MS22(A+T1)	6878	13.14	17.89	28	15		8.1	20	0.9	3.34
30	MS23(A+T1)	6930	15.5	20.25	35	14					2.82
31	MS23B(T1)	6936	15.55	20.3		44					2.52
32	MS23A(A+T1)	6990	15.5	20.25	19	25		8.1	22	0.9	2.26
33	MS26(A+T1)	7150	19.8	26.65	25	23		5.4	10	0.9	2.96
34	MS27(T1)	7180	13.9	26.65		6					3.18
35	MS28(A+T1)	7215	21.4	26.15	20	16		5.4	24	0.9	3.31
36	MS29(A+T1)	7274	21.8	26.55	33	17		7.2	30	0.9	3.18
37	MS30(A+T1)	7335	15	19.75	22	20		7.2	25	0.8	3.81
38	MS31(A+T1)	7378	13.22	17.97	15	15		5.6	29	0.8	2.42
39	MS31A(A+T1)	7400	13.6	18.35	16	17					2.54
40	MS32(A+T1)	7430	10.8	15.55	8	12					2.72
41	MS33(A+T1+EX)	7468	9.84	14.59	12	8	18	6.4	24	0.8	2.52
42	MS33A(A+T1)	7500	9.8	14.55	12	7					2.03
43	MS33B(A+T1)	7520	8.42	13.17		10					2.12
44	MS34(A+T1)	7540	6.24	10.99	30	7		4	25	1	1.73
45	MS35(A+T1)	7570	6	10.75	39	40		7	12		0.9
46	MS36(T1)	7585	6	10.75							0.53

Açıklama A :Yüzey Tasman Ölçümleri, T1: Tünel İçi Deformasyon Ölçümleri T2: Tünel İçi Deform + Bas. Hüc. Ölçümleri EX: Ekstansometre Ölçümleri

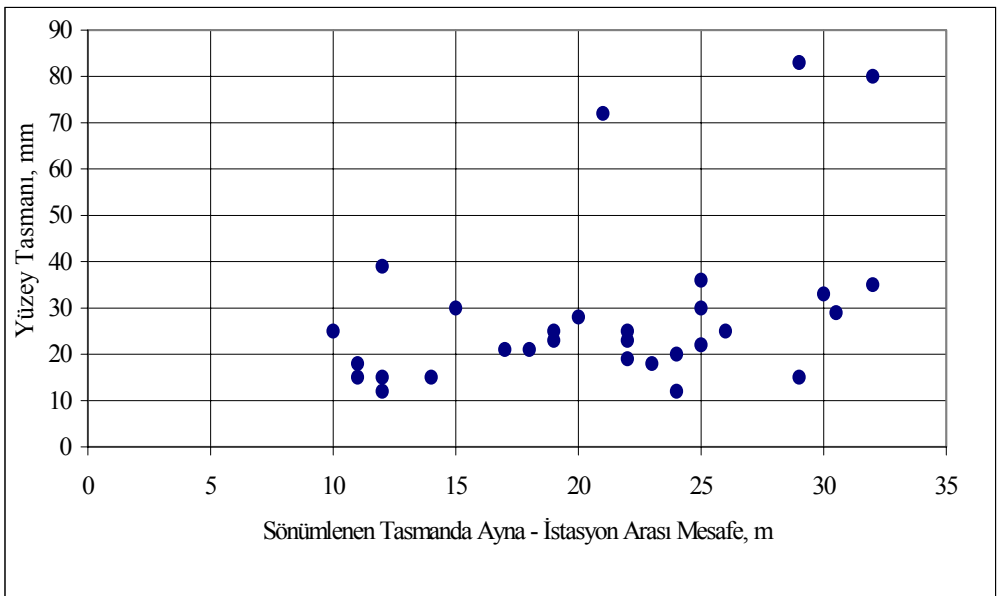
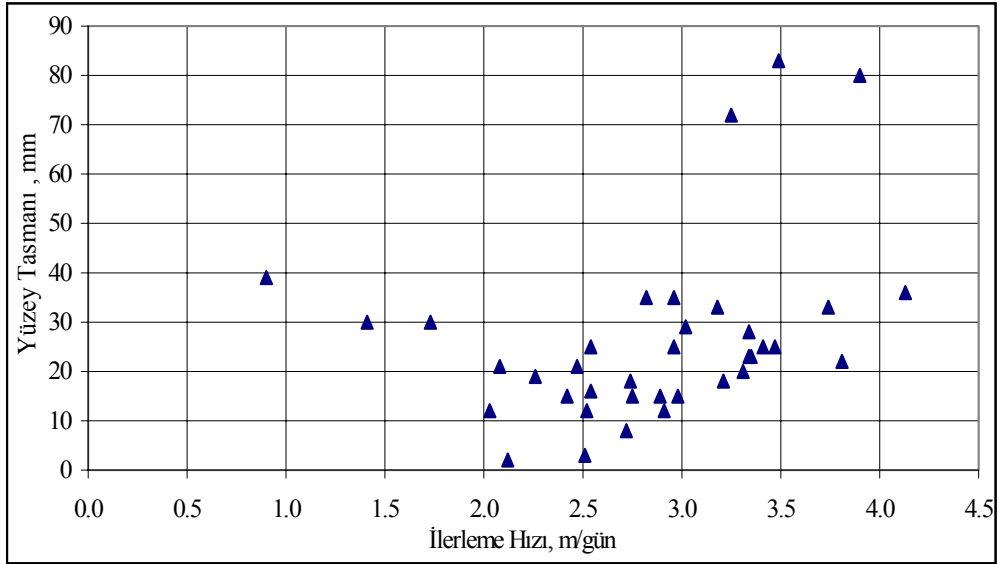
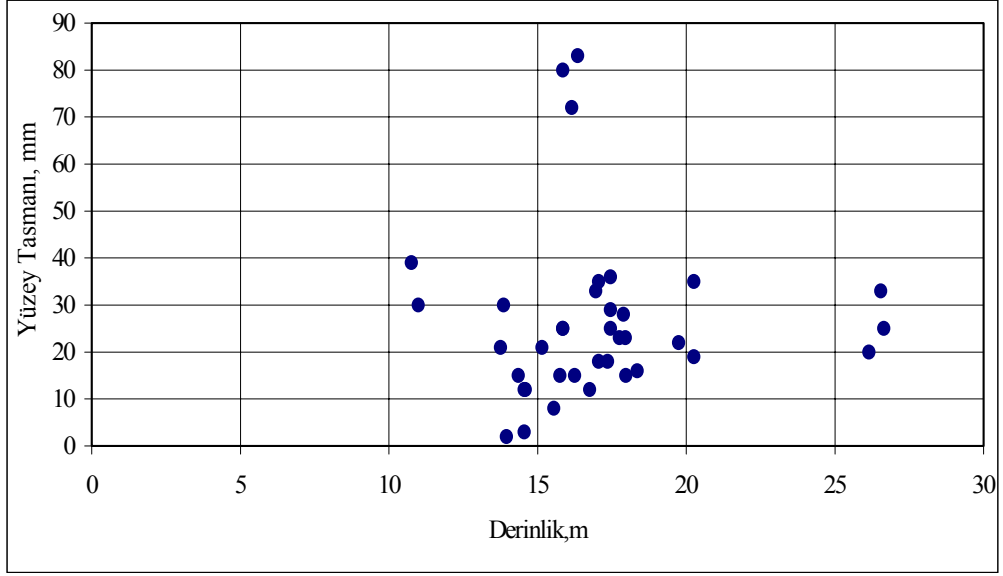




Şekil 7: Güzergah Boyunca Ölçülen Tasman Sonuçları ve Derinlik Değişimi

Tünel Mühendisliği açısından, yüzey tasmanı ile derinlik, ilerleme hızı ve sönmüş tasmanda ayna-istasyon arası mesafe gibi büyüklükler arasındaki ilişkiler irdelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil-8'de topluca gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, yüzey tasmanı ile derinlik arasında yukarıda belirtilen aşırı tasmanlar hariç tutulursa düşük bir ilişki ile artan derinlik değerlerinde gözlenen tasman miktarının azaldığı ifade edilebilir. Artan ilerleme hızı ile yüzey tasmanı büyüklüğü arasında belirgin bir ilişki saptanamamıştır. Bu durum güzergah boyunca zemin parametrelerindeki değişkenliğin daha etken olduğunu göstermektedir. Aynı husus yüzey tasmanı ile ayna-istasyon arasındaki mesafe büyüklükleri arasında da geçerli gözükmemektedir. Ancak bir genelleme yapmak gerekirse yüzeyde oluşan tasmanın sönmüş mesafesi aynanın istasyonu $\sim 1 D - 3 D$ (10-30 m) geçtikten sonra gerçekleşmektedir.

Basınç Hücresi ölçümlerinde gerek arazi basıncını ifade eden "radyal" basınç; gerekse oluşturulan iksa içerisindeki (P. beton) normal basıncı ifade eden "teğetsel" basınç değerleri aynanın istasyonu 30-35 m geçmesinden sonra dengeye ulaşmıştır. Bu durum tasmanın sönmüş mesafesi ile uyum içindedir. Maksimum arazi basıncı (radyal) tünel aksının sağ ve solundaki "omuzlarda" ölçülmüş olup $\sim 1-3 \text{ kg/cm}^2$ arasında değerler almıştır. Yine buna benzer şekilde teğetsel basınç değerlerinin maksimum değerleri az-çok aynı bölgelerde ve $20-25 \text{ kg/cm}^2$ arasında ölçülmüştür. Tünel tasarım hesaplarında, maksimum basınç yine aynı bölgelerde üst yarı açıldıktan sonra $\sim 34 \text{ kg/cm}^2$, ve ayna istasyonu geçtikten sonra diğer bir kelimeyle alt yarı ve taban iksaları yapıldıktan sonra $\sim 30 \text{ kg/cm}^2$ olarak hesaplanmıştır [8].



Şekil 8: M. İnönü Tüneli Tasman Değerlendirme Sonuçları

Tünel içi deformasyonlar yüzey tasmanları ile karşılaştırıldığında (Tablo-2) beklenilen aksine tasman değerlerinin iç deformasyon (konverjans) değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum tünel içindeki konverjans bulonlarının yerleştirilmesi ve ölçülmesindeki kaçınılmaz gecikmeden kaynaklanmaktadır. Diğer kelimelerle konverjans ölçümleri tünel içi deformasyon büyüklüğünün ölçülmesine değil deformasyonların hangi noktalarda ve hangi yönde geliştiğini ve sönümlenme olayının takibine hizmet etmiştir. Ancak ekstansometre ölçümleri tünel içi deformasyonunun mutlak büyüklüğü hakkında yaklaşık bir fikir vermektedir (Tablo-2).

7. SONUÇLAR

- M. İnönü Tünelinin açımı sırasında, gerek kazının yönlendirilmesi gerekse yüzeyde bulunan sanat yapılarında oluşacak yapı hasarlarının takibi için jeodezik (elektro-optik) yöntemlerle yüzeyde toplam 38 istasyondaki 200 noktada yaklaşık 4500 ve tünel içinde 48 istasyondaki 215 noktada ~2200 adet okuma yapılmış ve herhangi bir yapı hasarı - kaza oluşturmaksızın tünel kazısı tamamlanmıştır.
- Binalarda ölçülen maksimum oturma 5 mm'yi geçmemiş olup oluşan yapı deformasyonu hasar sınırını geçmemiş ve yapılarda-zeminde herhangi bir tasman hasarı gözlenmemiştir.
- Tünel içi maksimum deformasyon miktarı gerekse ekstansometre ölçümleri tünel içi için öngörülen deformasyon payı (10 cm)'ni geçmemiştir.
- Yüzey tasmanı ölçümleri tasman sönümlenme mesafesinin ~1 - 3 D (10 - 30 m) arasında olduğunu göstermiştir.

Teşekkür : Yazarlar çalışmanın yapılmasını ve yayınlanmasını teşvik eden Yapı Merkezi A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Dr. Y. Müh. Ersin ARIOĞLU'na teşekkür ederler. Bu çalışmada açıklanan görüşler sadece yazarlarına aittir.

8. GENEL KAYNAKLAR

- [1] **ARIOĞLU, B.**, ve Arkadaşları, İncirli M. İnönü Tüneli Yapım Çalışmaları ve Üretim Parametreleri, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şb. İstanbul, Aralık 1994
- [2] **YÜKSEL, A.**, M. İnönü Tüneli Mühendislik Jeolojisi Raporu, (Yayınlanmamış Rapor) Yapı Merkezi - İstanbul, Ağustos 1994.
- [3] **ARIOĞLU, E., ve Arkadaşları**, Metro Tünel Projelerinde Yüzey Tasman Büyüklüklerinin Yarı Teorik Yaklaşımlarla Belirlenmesi, Türkiye XIII. Madencilik Kongresi, Maden Müh. Odası, Ankara, 1993.
- [4] **RABCEWICZ, L.**, The New Austrian Tunnelling Method, Water Power, Nov. 1964.

- [5] **SAUER, G.**, NATM in Soft Ground, World Tunnelling Vol.3, No.6, Nov., 1990.
- [6] **YÜKSEL, A., ÜNLÜTEPE, A.**, M.İnönü Tüneli Geoteknik Ölçüm ve Değerlendirme Raporları, (Yayınlanmamış Raporlar), Yapı Merkezi, İstanbul, Mayıs 1994.
- [7] M.İnönü Tüneli Üretim Kayıtları, Yapı Merkezi (Yayınlanmamış Üretim Kayıtları), İstanbul-Mayıs, 1994.
- [8] **AYAYDIN, N.**, İncirli Derin Tüneli İksa Hesapları,TR.8801103 A (Yayınlanmamış Rapor), Yapı Merkezi, İstanbul, 1992.