

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TBM İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLER ÇEVRESİNDE
GÖZLENEN OTURMAVE DEFORMASYONLAR**

İNŞ. MÜH. Dara HAJEBİ

FBE İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN

İstanbul, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	12
1. GİRİŞ	13
2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ	15
2.1 Giriş	15
2.2 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)	16
2.3 Tünel Açma Makineleri (TBM) İle Tünel Açma İnşası	16
2.3.1 TBM 'in olumlu yönleri	17
2.3.2 TBM'in olumsuz yönleri	18
3. TÜNEL İNŞAATINDA DEFORMASYON	19
3.1 Giriş	19
3.2 Deformasyon Sınıflandırılması	19
3.2.1 İç Geometrik Değişimler	20
3.2.1.1 Eğilme	20
3.2.1.2 Burulma	21
3.2.1.3 Burkulma	22
3.2.2 Dış Geometrik Değişimler	22
3.2.2.1 Ötelenme	22
3.2.2.2 Dönme	23
3.2.2.3 Uzama	24
3.3 Deformasyona Neden Olan Faktörler	25
3.3.1 Tektonik Hareketler	25
3.3.2 Lokal Hareketler	26
3.4 Deformasyon Modelleri	26
3.4.1 Statik Model	26
3.4.2 Dinamik Model	27
3.4.3 Kinematik Model	27
3.5 Tünelde Deformasyona Neden Olan Faktörler	27
3.6 Tünel Üzerinde Yer Alan Zemin Tabakalarının Deformasyonu	29
3.6.1 Teorik Çalışmalar	29
3.7 Deneysel Çalışmalar	37
3.8 Tünelde Beklenen Deformasyonlar	40

4.	TÜNEL İNŞAATINDA ALETSEL GÖZLEM.....	42
4.1	Giriş	42
4.2	Yüzey İzleme Noktaları (SMP) ve Bina İnceleme Prizmaları (BMP)	44
4.3	İnklinometreler (Eğilme Ölçerler)	47
4.3.1	İnklinometre Gözlemlerin Hassasiyetini Etkileyen Etkenler	49
4.3.1.1	Transdüserlerin Hassasiyeti	49
4.3.1.2	Probenin Tekerleklerinin Durumu	49
4.3.1.3	Probenin Doğrusallığı	50
4.3.1.4	İnklinometre Kuyusunun Doldurma Biçimi	50
4.3.1.5	Borunun Düzlüğü	50
4.3.1.6	Okumaların Tekrarlanabilirliği	50
4.3.1.7	Sıcaklık Etkisi	50
4.4	Ekstansometre (Genleşme Ölçer)	50
4.5	İnklinometre- Ekstansometre Borusunun Yerleştirilmesi	52
4.5.1	İnklinometre-Ekstansometre Borusu	52
4.5.2	Borunun Yerleştirilmesi	52
5.	BİR VAKA ANALİZİ: ESENLER-İKİTELLİ METRO PROJESİ 0+850 KM ve 0+950 KM ARASI ALETSEL GÖZLEMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	54
5.1	Bağcılar-İkitelli Hafif Metro Projesi Hakkında Bilgiler	54
5.1.1	Genel Bilgiler	54
5.1.2	İncelenen Kesitte Zemin Profili ve Parametreleri	54
5.1.3	Tünel Kazı Yöntemi	57
5.1.4	Segmentler	57
5.1.5	Kazı uygulaması	58
5.2	Aletsel Gözlem	58
5.2.1	Yüzey Oturma Plakaları (SMP) Ölçümleri	63
5.3	BMP ve İnklinometre okumaları ve Yanal Hareketler	79
5.4	BMP ve SMP Ölçümlerinin Değerlendirmesi (Gauss Eğrileri)	84
5.5	Alın Basınçlarının Hesaplanması	90
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
	KAYNAKLAR.....	94
	ÖZGEÇMİŞ.....	97

SİMGE LİSTESİ

S_c	Kazı Yüksekliği
H	Zemin Üst Yüksekliği
S_{max}	Yüzeydeki En Büyük Oturma
x	Eksenden İtibaren Uzaklık
B	Merkezden İtibaren Oturma Çanağının Genişliği
V_1	Zemin Yüzeyindeki Oturma Çanağının Hacmi
U_{max}	İkinci Zemin Tabakası Yüzeyindeki Maksimum Oturma Değeri
S	Tünel Ekseninden X Mesafesindeki Yüzey Oturması
i	Eğrinin Standart Sapması ve Eğrinin Dönme Noktası
S'	En Büyük Oturma Miktarı
V_s	Hacim Kaybı Parametresi

KISALTMA LİSTESİ

NATM	The New Austrian Tunnel Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi)
TBM	Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinesi)
SMP	Surface Measurement Point (Yüzey Ölçüm Noktası)
BMP	Building Measurement Point (Bina Ölçüm Noktası)
EPB	Earth Pressure Balance (Arazi Basınç Dengeleme Makinesi)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Zemin dane boyutuna göre kullanılan makine tipi.....	15
Şekil 2.2 TBM Makinesi	16
Şekil 3.1 d_i vektörü.....	19
Şekil 3.2 Eğilme diyagramı	20
Şekil 3.3 Eğilme diyagramı	21
Şekil 3.4 Burulma durumu	21
Şekil 3.5 Burkulma durumu	22
Şekil 3.6 Ötelenme x ve y yönünde.....	22
Şekil 3.7 Düşey Ötelenme durumu.....	23
Şekil 3.8 Karma Ötelenme durumu	23
Şekil 3.9 Dönme durumu.....	24
Şekil 3.10 Uzama durumu	24
Şekil 3.11 Tektonik hareketler.....	25
Şekil 3.12 Zemin yüzeyindeki maksimum oturma, (Briggs, 1929)	29
Şekil 3.13 Zemin yüzeyindeki oturma çanağının hesabı, (Beyer, 1945).....	30
Şekil 3.14 Üst yüzey oturma çanağı, (Kramer, 1974)	30
Şekil 3.15 Zemin yüzeyindeki oturmaların hesabı, (Aversin ,1954).....	31
Şekil 3.16 Tabakalı zeminlerde oturmaların hesabı, (Limanov, 1957)	31
Şekil 3.17 Üst oturma eğrisinin hesabı, (Steinfeld, 1962).....	33
Şekil 3.18 Zemin üst yüz oturma eğrisinin hesabı, (Szechy, 1969)	33
Şekil 3.19 Üst yüzey oturmalarının Gauss hata fonksiyon eğrisi ile belirlenmesi, (Schmidth , 1969)	34
Şekil 3.20 Değişik zeminlerdeki birçok tünel için oturma çanağının etkili genişlik parametresinin tünel genişliğine oranı $2i/B$ ile tünel taban derinliğinden itibaren zemin yüksekliğinin tünel genişliğine oranı $(h+B/2)/B$ arasındaki bağıntı, (Peck, 1969).....	35
Şekil 3.21 Gauss oturma eğrisi.....	37
Şekil 3.22 Düşen kapak deneyi, (Terzaghi, 1936).....	37
Şekil 3.23 Tünel tavanının oturmasına bağlı olarak zeminde meydana gelen yer değişmeler, (Loos ve Breth, 1949)	38
Şekil 3.24 Tünel etkiyen kuvvetleri.....	40
Şekil 3.25 P_1 etkisiyle tünel deformasyonu	40
Şekil 3.26 P_2 etkisiyle tünel deformasyonu	41
Şekil 4.1 Yüzey izleme noktası	45

Şekil 4.2 SMP okumalarının alınmasıyla ilgili bir uygulama	46
Şekil 4.3 Reflektör lazer ve bina ölçüm uygulaması	46
Şekil 4. 4 BMP okumalarında prizma seviyeleri	47
Şekil 4.5 İnklinometre ölçüm düzeneği	47
Şekil 4.6 İnklinometer borusu en kesiti	48
Şekil 4.7 Ekstansometre ölçüm düzeneği	51
Şekil 4.8 Ekstansometre-inklinometre borusu en kesit	52
Şekil 4.9 İnklinometre-ekstansometre borusu boy kesit.....	52
Şekil 5.1 Bağcılar-İkitelli Metro inşaatı başlangıç noktası.....	54
Şekil 5.2 İstanbul'a hakim olan formasyonlar, (Oktay ve Eren, 1994).....	55
Şekil 5.3 KM (0+850)-(0+950) arası jeolojik durum	56
KM 0+900 tünel en kesit profili ise Şekil 5.4'de gösterilmiştir.	56
Şekil 5.4 KM 0+900 tünel en kesit profili	56
Şekil 5.5 Segment parçaları	58
Şekil 5.6 SMP ve BMP oturma değerleri (m)	59
Şekil 5.7.a Ekstansometre 3 'de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri.....	60
Şekil 5.7.b Ekstansometre 4 'de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri	60
Şekil 5.7.c Ekstansometre 5 'de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri.....	61
Şekil 5.7.d İnklinometre 3 'de zamana bağlı yanal deplasman-derinlik eğrileri.....	61
Şekil 5.7.e İnklinometre 4 de zamana bağlı yanal deplasman-derinlik eğrileri	62
Şekil 5.8.a SMP 20 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	64
Şekil 5.8.b SMP 21 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	64
Şekil 5.8.c SMP 22 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	65
Şekil 5.8.d SMP 23 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	65
Şekil 5.8.e SMP 24 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	66
Şekil 5.8.f SMP 25 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi.....	66
Şekil 5.8.g SMP 26 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	67
Şekil 5.8.h SMP 27 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	67
Şekil 5.8.i SMP 28 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi.....	68
Şekil 5.8.j SMP 29 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	68
Şekil 5.8.k SMP 30 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	69
Şekil 5.8.l SMP 31 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi.....	69
Şekil 5.8.m SMP 32 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi.....	70
Şekil 5.8.n SMP 33 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	70
Şekil 5.8.o SMP 34 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	71

Şekil 5.8.p SMP 35 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	71
Şekil 5.8.q SMP 36 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	72
Şekil 5.8.r SMP 37 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	72
Şekil 5.8.s SMP 38 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	73
Şekil 5.8.t SMP 39 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	73
Şekil 5.8.u SMP 40 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	74
Şekil 5.8.v SMP 41 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	74
Şekil 5.8.w SMP 42 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	75
Şekil 5.8.x SMP 43 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	75
Şekil 5.8.y SMP 44 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	76
Şekil 5.8.z SMP 45 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi	76
Şekil 5.9 (25.09.2006) tarihinde SMP oturma değerleri	77
Şekil 5.10 (30.06.2006) tarihinde SMP oturma değerleri	77
Şekil 5.11 (31.07.2006) tarihinde SMP oturma değerleri	78
Şekil 5.12 (30.08.2006) tarihinde SMP oturma değerleri	78
Şekil 5.13 Bir doğrultudaki SMP'lerin belirli tarihlerdeki oturma değer değişimleri	79
Şekil 5.14 BMP ve inklinometre yanal deplasmanların zemin yüzeyi eşdeğerleri	80
Şekil 5.15 1. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	85
Şekil 5.16 1. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	85
Şekil 5.17 2. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	86
Şekil 5.18 2. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	86
Şekil 5.19 3. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	86
Şekil 5.20 3. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	87
Şekil 5.21 4. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	87
Şekil 5.22 4. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	87
Şekil 5.23 5. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	88
Şekil 5.24 5. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi	88
Şekil 5-25 Tek tünel için karşılaştırma	89
Şekil 5.26 İkiz tünel için karşılaştırma	89
Şekil 5.27 Tünel alın basıncı ve yüzey oturma	90
Şekil 5.28 Farklı yöntemler ile hesaplanan ve uygulanan alın basıncı değerlerinin güzergah boyunca değişimleri	92

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Geometrik değişimler	20
Çizelge 5.1 Zemin tabakaları özellikleri.....	57
Çizelge 5.2 Makine konumları	79
Çizelge 5.3 İnklinometrelerin ölçümlerinden elde edilen yer değiştirmelerin zemin yüzeyindeki x yönündeki bileşeni	80
Çizelge 5.4 inklinometre ölçümlerinden elde edilen yerdeğiştirmelerin zemin yüzeyinde y yönündeki bileşeni	81
Çizelge 5.5 İnklinometrelerden belirlenen zemin yüzeyindeki deplasman değerleri.....	81
Çizelge 5.8 BMP ölçümlerinden zemin yüzeyindeki yerdeğiştirme değerleri.....	83
Çizelge 5.9 Kesitler için bulunan hacim kaybı.....	88

ÖNSÖZ

Tezin yürütülmesi sırasında da deneyim ve bilgilerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e, arazi verilerini benimle paylaşan İnş. Müh. Tuna DOĞRUOĞLU ve Gülermak-Doğuş adi ortaklığına, tezimi okuyarak değerli katkılarda bulunan Sayın Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, tezin düzenlenmesi sırasında bana yardımcı olan Araştırma görevlisi İnş.Yük Müh. Çiğdem ÖZÇELİK'e, Araştırma görevlisi İnş.Yük. Müh. Tayfun ŞENGÜL'e, İnş. Müh. Kabil DIĞIN'a ve tezim boyunca manevi olarak hep desteklerini aldığım Halam, Babam ve Annem'e teşekkürlerimi borç bilirim.

ÖZET

Günümüzde hızla artan kentleşme toplu taşıma gereksinimi getirmekte ve bu nedenle başta metrolar olmak üzere yeraltı projeleri hayata geçirilmektedir. Büyük kentlerde bu yeraltı projeleri (tüneller, metrolar) kent içinde çoğunlukla yoğun yerleşim bölgelerinden geçmek zorunda kalmaktadır. Yoğun yerleşim yerlerinden geçerken yeraltı yapılarının inşaatı ve işletmesi sırasında civar yapılar üzerindeki etkilerinin önceden belirlenmesi olası bir felaketi önlemek açısından gerekli olup aletsel gözlemler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Kentlerde tüneller ve derin kazıların inşaatı sırasında jeolojik ortamda ve komşu yapılarda oluşan hareketlerin aletsel gözlemler ile izlenmesi ve alınan ölçümlerin irdelenerek kazı yapılan ortamın ve civar yapıların davranışının belirlenmesi, inşaat sırasında ve sonrasında ortaya çıkabilecek zarar ve felaketlerin önceden kestirilmesi ve uygun önlemler alınması açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul'da EPB (Arazi Basınç Dengeleme Makinesi)'li TBM (tünel açma makinesi) ile yapımı süren ikiz metro tünelleri inşaatı sırasında civar zemin ve yapılarda meydana gelen deformasyonların aletsel gözlemlerden alınan ölçümler değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde göz önüne alınan tünel güzergahı boyunca önemli bir geoteknik sorun ile karşılaşmadığı gözlenmiştir. Tünel inşaatı dolayısıyla meydana gelen zemin kayıpları ve yüzey oturmaları projede öngörülen sınırlar içinde kalmış olup tüm güzergah boyunca kuramsal değerlerin üzerinde alın basınçları uygulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Tünel, TBM, Oturma, Deformasyon, Aletsel Gözlem.

ABSTRACT

The modern urbanization which is under rapid expansion requires the need of mass transportation. In this case like subways several underground projects especially are launched recently. In huge cities, these underground projects i.e. tunnels, subways should usually go through the crowded settled areas. It is necessary to be aware of the effects of these projects over neighboring constructions which may appear during the construction of the underground structure so these situations make the instrumental observations obligatory in order to avoid a big catastrophe. In cities the monitoring of geological conditions and neighboring structures in tunnels and deep excavations during the construction determining of movements in accordance with monitoring results, supply important assistance to predict any unforeseen catastrophes during and after construction in according to take precaution.

In this research, it is aimed to evaluate the deformations taken from the instrumental observations which were occurred on the neighboring places during construction of the parallel twin subways in Istanbul with EBP (Earth Pressure Balance) TBM (Tunnel Boring Machine) .Volume losses and surface settlements which have been occurred because of tunnel construction have been encompassed in pre established boarderlines of the project. Face pressures have been launched based on corporation evaluations.

Key words: Tunnel, TBM, Settlement, Deformation, Instrumental Observation

1. GİRİŞ

Dünyamız her geçen gün artan oranlarda bir nüfus artışıyla karşı karşıya kalmaktadır. Buna paralel olarak insanların ihtiyaçları ve sorunları da beraberinde artmaktadır. Nüfus artışına paralel olarak şehirleşme hızla artmakta, bunun sonucunda da kentlerde yaşayan insan popülasyonu artmaktadır. Özellikle milyonlarca insanın birlikte yaşadıkları metropollerde trafik ve çevre kirliliği gibi belli başlı sorunlar nüksetmektedir. Ulaşımın hızlı olarak sağlanması özellikle büyük şehirlerde yer altı ulaşım sistemlerinin (metro) oluşturulmasıyla mümkün olmaktadır. Boş alan azlığı ve çevre sorunlarının yaşanmadığı önceki yıllarda tüneller sadece zorlu dağ engellerini aşmak için düşünülürken, günümüzde mekan yokluğu ve çevre etkisi daha kolay yöntemlerle (örneğin açık kazı) çözümlenebilecek projelerde bile tünellerin inşası tercih olunmaktadır. Ayrıca metropollerin önemli sorunlarından biri olan kanalizasyon gibi alt yapı sorunlarının çözümünde tüneller önemli katkılar sağlamaktadır.

Büyük kentlerin ulaşım sorununda en etkili çözüm yolu olan metro, günümüz toplu taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır. Ucuz ve çabuk ulaşım olanağı sağlayan metronun diğer raylı sistemlerle birlikte trafik sıkışıklığına en etkili çözümü sağlayacağı da kuşkusuzdur.

Dünyada ilk büyük metro sistemleri 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başlarında Londra, Paris, New York ve Moskova'da kurulmuştur.

Dünyadaki ilk metrolardan biri olarak kabul edilen ve Türkiye'deki ilk yeraltı raylı ulaşım sistemi olan Karaköy Tüneli, İstanbul'da Galata ile Beyoğlu arasında kurulmuştur. Fransız mühendis Henry Gavand'ın yapımını üstlendiği proje 30 Temmuz 1871'de yapılmaya başlanmış ve 17 Ocak 1875 'de işletmeye açılmıştır.

Büyük kentlerde bu yeraltı projeleri (tüneller, metrolar) kent içinde yoğunlukla yoğun yerleşim bölgelerinden geçmek zorunda kalmaktadır. Yoğun yerleşim yerlerinden geçerken yeraltı yapılarının inşaatı ve işletmesi sırasında civar yapılar üzerindeki etkilerinin önceden kestirilmesi olası bir felaketi önlemek açısından gerekli olup aletsel gözlemler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Metro tünelleri ve derin kazıların inşası sırasında jeolojik ortamda ve komşu yapılarda oluşan hareketlerin aletsel gözlemler ile izlenmesi ve alınan ölçümlerin irdelenerek kazı yapılan ortamın ve civar yapıların davranışının belirlenmesi ortaya çıkabilecek zarar ve felaketlerin önceden kestirilmesi ve uygun önlemler alınması açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul Büyükşehir demiryolu ağının yeni bir hattı olan Esenler-Bağcılar arası

hafif metro projesinin KM 0+850 - KM 0+950 arası ikiz tünellerin alın basınçlı kontrollü (EBP) tünel açma makineleri (TBM) ile açılması sırasında çevredeki yapılar üzerindeki etkisinin yapılan aletsel gözlemlere dayanarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, ikinci bölümde tünel açma yöntemleri ve bu proje de kullanılan yöntem (TBM) kısaca tanıtılmaktadır. Üçüncü bölümde yapılarda oluşan deformasyonların sınıflandırması, deformasyona neden olan faktörler, deformasyon modelleri, tüneller de deformasyona neden olan faktörler, tünel üstündeki zeminlerde oturma ve bu konuda önceden yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Dördüncü bölümde genel olarak tünel projelerinde kullanılan ölçüm aletleri ile ilgili tanıtım ve bir tünel projesinde kullanılan cihazlar hakkında bilgi sunulmaktadır. Son bölüm de ise bir vaka analizi olarak Esenler-Bağcılar metro projesinin KM 0+850 - KM 0+950 km arası aletsel gözlemler değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar geoteknik yönden irdelenmiştir.

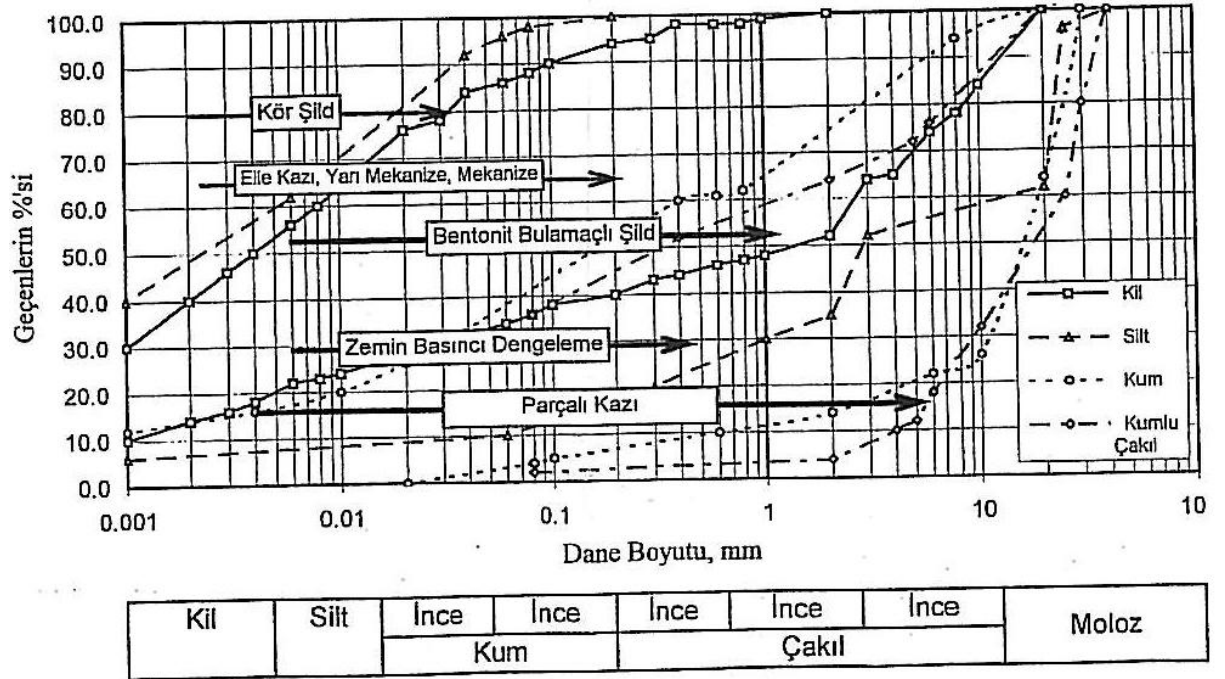
2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

Günümüzde madencilik ve yeraltı yapılarının inşasında kullanılan çeşitli tünel açma yöntemleri mevcuttur. Bir tünel inşaatı için en uygun yöntemin seçimi öncelikle tünelin açılacağı zemin özelliklerine bağlıdır. Kazı yönteminin seçiminde rol oynayan en önemli zemin parametreleri aşağıda verilmektedir (DAUB,1997 ve AFTES,2000);

- Dane boyutu dağılımı
- Kohezyon değeri-Kıvam durumu,
- Geçirimsizlik,
- Kaya/zemin mineralojik yapısı.

Bu konuda Mori vd.,1995, tarafından verilen bir sınıflama zeminin dane boyutu dağılımına dayanmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Zemin dane boyutuna göre kullanılan makine tipi

Yaklaşık 40 yıl öncesine kadar dünyada metro inşaatlarında açık kazı yöntemi tercih edilmekte iken daha sonraki yıllarda artan bir şekilde kapalı inşa yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bu yöntemlerin avantajları şehir içindeki yoğun trafiği büyük ölçüde engelleyen

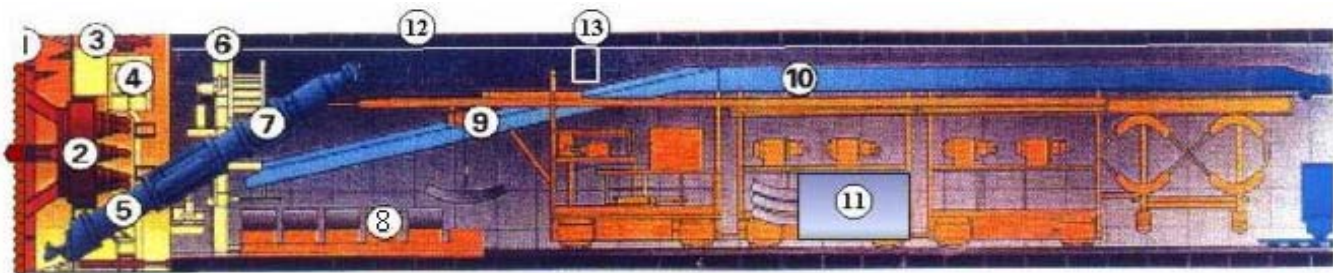
açık kazı yöntemine kıyasla çevredeki mevcut üst yapıları ve yeraltı yapıların etkilemeden geçmesi ve inşa süresinde şehir trafiğini de fazla engellememesidir. Günümüzde NATM (Yeni Avusturya Tünel yöntemi) ve özellikle TBM (Tünel Açma makinesi) yöntemleri kullanılan en yaygın kapalı tünel açma yöntemleridir.

2.2 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin amacı, zeminin mukavemetini korumak, tüneli çevreleyen zeminde kendi kendini destekleyen geniş bir zon oluşturmaktır. Diğer bir deyişle, bu yöntemde jeolojik ortamda iksasız veya ekonomik iksa kullanımı ile tünel açılmaktadır. Tünel açılımı sonucu meydana gelecek deformasyonlar dolayısıyla çatlakların en aza indirilmesi için tünel açıldıktan sonra kısa zamanda bir ön kaplama yapılması gereklidir. Bunun için pasif iksa yerine esnek iksa denilen aktif iksa sisteminin kullanılması günümüzde daha yaygındır. Bu iksa uygulamasında shotcrete (püskürtme beton) ve bulonlar kullanılmakta ve iksa ortamının mukavemetinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Vardar M.,1977).

2.3 Tünel Açma Makineleri (TBM) İle Tünel Açma İnşası

Tünel açma makinesi (Tunnel Boring Machine=TBM) ile tünel açma teknolojisi son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve buna paralel olarak TBM teknolojisi önemli gelişmeler kaydetmiştir. TBM, inşa edilmesi tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan, ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındıran bir tünel yapım makinesidir. TBM makinelerinin tasarımı, tünel iç kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 TBM Makinesi

TBM'i meydana getiren elemanlar şu şekilde sıralanabilir.

1. Kazıcı Kafa
2. İtme Ünitesi
3. Piston

4. Basınç Ünitesi
5. Burgu Konveyör
6. Ring Montaj Kolu
7. Burgu Konveyör
8. Segment Besl. Ünitesi
9. Segment Vinci
10. Çamur Nakil Bandı
11. Kontrol Kabini
12. Segment İç Yüzeyi
13. TBM Yönlendirme Lazer İstasyonu

Sistemin baş kısmında kazılması planlanan zemin koşullarına göre tasarlanmış bir kazıcı kafa ile kazılan malzemenin dışarıya taşınmasını sağlayan bir sistem mevcuttur. Makinenin silindirik bir çelik kılıfla donatılmış olması tünel kesitinin çevre duraylılığını sağlamakta ve kazıcı kafanın ilerlemesiyle çelik kılıf gerisindeki çok sayıda pistonların segmentlere basarak gerçekleşmekte ve aynı anda aynada toprak dengeleme basıncı uygulanarak ön kısmın duraylılığı sağlanmaktadır. Toprak basıncı dengelemesi (earth pressure balance=EPB) ayna duraylılığının olmadığı düşük mukavemetli zeminlerde kullanılmaktadır ve bunu uygulayan makinelere toprak basıncı dengelemeli tünel açma makineleri (EPB'li TBM) denilmektedir. Lojistik lokomotif aracılığıyla içeri taşınan segment parçaları makinenin erektör sistemi ile kazısı tamamlanan bölüme yerleştirilir. Bu arada sistemin tüm mekanik parametrelerini gösteren bir bilgisayar ile makinenin yeraltında yönlendirme ve iç kaplama yerleşiminin yönetildiği bir ölçme bilgisayarı mevcuttur.

TBM ile tünel açılması sırasında çevrede ve tünel içinde yapılan aletsel gözlem ve alın basınçlarının kontrolü ve tünel içinde kullanılacak kaplama elemanlarının denetlemesi sağlanmaktadır.

2.3.1 TBM 'in olumlu yönleri

Tünelde duraylılık sorunları olmadığı durumda TBM'in kullanılması halinde kazı, yükleme ve taşıma işlemi birlikte yapılabildiği için kazı hızı oldukça yüksektir. Dolayısıyla, çalışan işçi sayısı oldukça az olmakta ve işçiliğin pahalı olduğu ülkelerde oldukça ekonomik bir kazı işlemi gerçekleştirilmektedir. TBM kullanımıyla tünel içinde oluşması mümkün toz miktarı önemli derecede azalmakta ve dolayısıyla işçi sağlığı açısından olumlu bir çalışma ortamı

elde etmek mümkün olmaktadır. Patlatmadan kaynaklanan sonrası sarsıntı TBM kullanımında söz konusu olmayacağından TBM şehirleşmenin yaygın olduğu kaya ortamlarında kolaylıkla kullanılabilen ve çevre sorunu yaratmamaktadır. Patlatma yapılarak çalışıldığında yeraltı açıklığının çevresinde oluşan gevşeme zonu (zedelenmiş kaya kütleli zonu), TBM'in kullanılması halinde oldukça sınırlı kalmakta ve dolayısıyla tünel destek elemanlarına etkiyen yükler de azalmaktadır. Bu tür bir gelişme, kaya kütlelerinin zamana bağlı olarak deformasyonunun da en az düzeyde kalmasıyla sonuçlanmaktadır.

2.3.2 TBM'in olumsuz yönleri

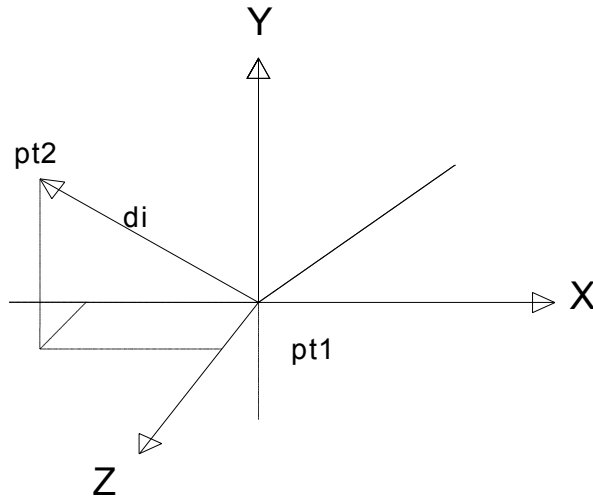
TBM kullanılarak kazı yapılmasının yaratabileceği sakınca ve sınırlamaların önemli bir bölümü genellikle zayıf kaya kütlelerinde, fay zonlarında ve sık aralıklı süreksizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinde açılan tünellerde görülmektedir. Bu tür ortamlarda kayacın zayıflığına bağlı olarak TBM'in kayacı tam olarak kavrayamamasından dolayı delme işlemi sırasında yan duvarların yeterli taşıma kapasitesinin olmaması nedeniyle, TBM 'in kazı yapılabilmesi ve ilerleyebilmesi için yeterli itme kuvveti de sağlanamamaktadır. Bu nedenle bazı ek önlemlerin alınması gerekmektedir ve bu da maliyeti artırmaktadır. Diğer yandan, eğer örtüyü oluşturan birimlerin kalınlığından kayaya aktarılan gerilmeler zayıf kayanın dayanımını aşacak değere ulaşıyorsa yenilen çevre basınçlı makineyi sıkıştırarak ağır hasarlara neden olabilmektedir (Ulusay R., Aydan Ö. 1997).

3. TÜNEL İNŞAATINDA DEFORMASYON

3.1 Giriş

Üzerinde yaşadığımız doğal ortamda veya insan eliyle inşa edilen yapay objelerde ortaya çıkabilecek geometrik değişimlerin sonuçları insan hayatının güvenliği ile doğrudan ilgilidir. Bundan dolayı, bu konuya olan duyarlılık artarak devam etmektedir. Cisimlerdeki geometrik değişimlerin izlenmesi, belirlenmesi ve tanımlanması uzun yıllardır üzerinde uğraşılan bir konudur. Gerek yerkabuğu hareketlerini gerekse mühendislik yapıları ve yakın çevresinde meydana gelebilecek geometrik değişimleri belirlemek amacıyla yapılan ölçümler deformasyon ölçümleri olarak adlandırılır.

Diğer bir deyişle, bazı kuvvetlerin etkidiği bir bölgede seçilen karakteristik noktanın t_1 ve t_2 zamanlarında konumlarının belirlendiğini varsayıldığında t_1 zamanındaki konumu p_{t1} , t_2 zamanındaki konumu p_{t2} oluyorsa ve aralarındaki d_i uzaklığının statiksel metotlarla sıfırdan farklı olduğu kanıtlanmışsa d_i uzunluk vektörüne deformasyon denir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 d_i vektörü

3.2 Deformasyon Sınıflandırılması

a)Geçici (Elastik) Deformasyonlar:

Yapıya etki eden faktörün ortadan kalkması ile yapının tekrar eski haline dönme durumudur.

b)Kalıcı (plastik) Deformasyonlar:

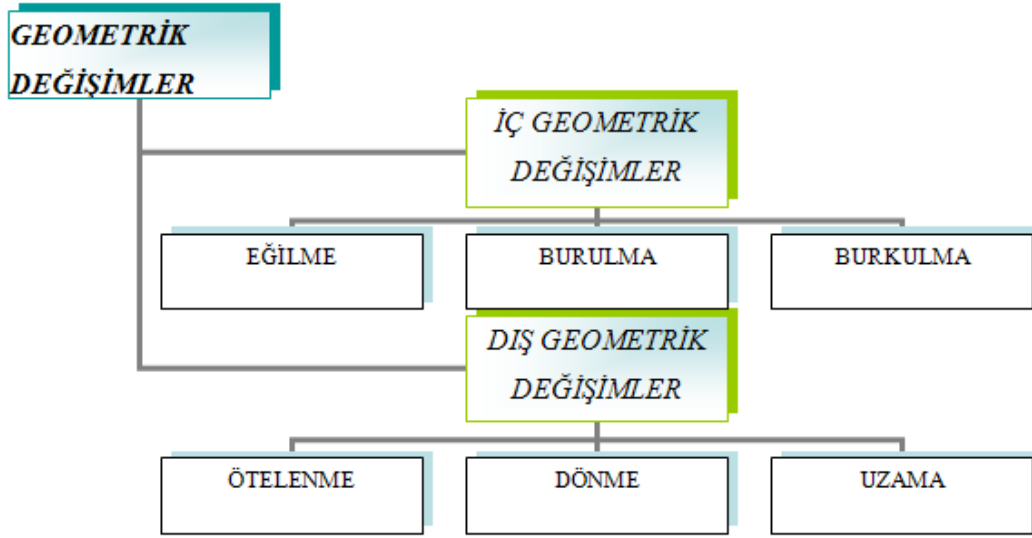
Yapıya etki eden faktörün ortadan kalksa bile yapının eski haline dönmemesidir.

c)Elasto-plastik Deformasyonlar:

Yapıya etki eden faktörün ortadan kalkması ile yapının önceki durumunu almaya çalışması ama bunu tam olarak başaramamasıdır.

Bununla birlikte, geometrik değişimin yapısına göre meydana gelen deformasyon şekilleri de vardır. Bunlar ötelenme, dönme, uzama, eğilme ve burkulma şeklinde olabilmektedir (çizelge 3.1).

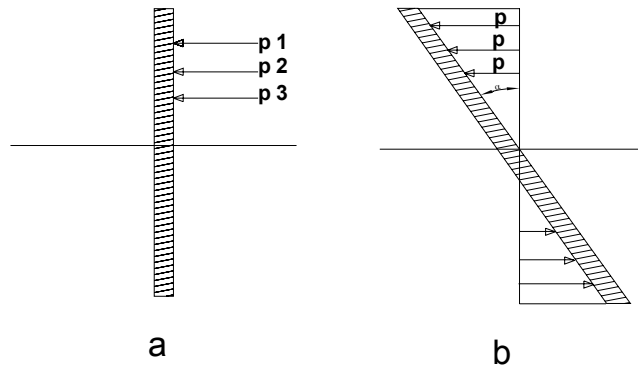
Çizelge 3.1 Geometrik değişimler



3.2.1 İç Geometrik Değişimler

3.2.1.1 Eğilme

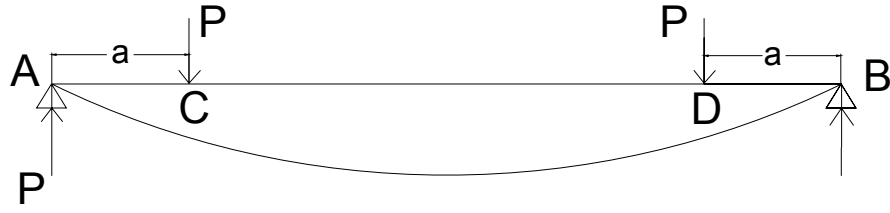
Eğer bir kesite yalnız eğilme momenti kuvveti etki ediyorsa cisimde eğilme meydana gelir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Eğilme diyagramı

Şekil 3.2.a'da elemanın ilk konumu ve momentin elemana etkimesi görünmektedir. Şekil 3.2.b'de ise elemanın moment kuvvetleri etkisi altında α açısı kadar eğilme yaptığı görülmektedir.

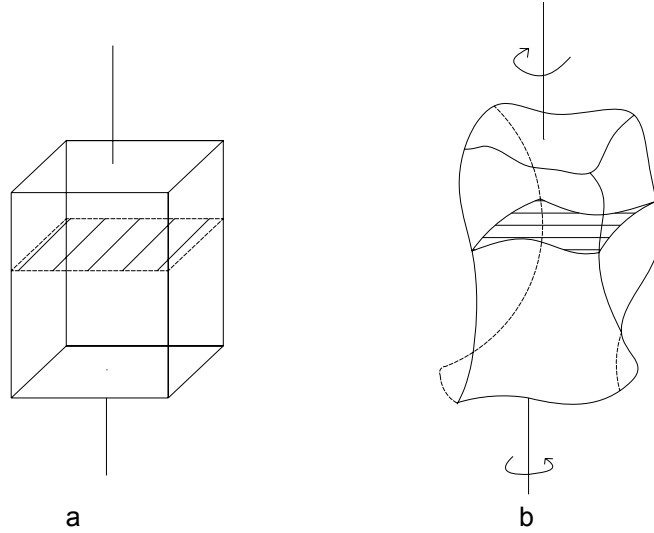
Eğilme momenti ve kesme kuvvetleri elemana birlikte etki ederse basit eğilme, bunlara ilave olarak normal kuvvetler de etki ederse bileşik eğilme meydana gelir. Şekil 3.3'de C ve D noktalarına sadece momentler etkinken, DB ve AC aralıklarına moment ve kesme kuvvetleri birlikte etkimekte ve basit eğilme meydana gelmektedir.



Şekil 3.3 Eğilme diyagramı

3.2.1.2 Burulma

Elemanın değişik moment kuvvetlerinin ve yüklerin etkisi altında düzgün geometrik bir şekilden düzensiz bir şekle dönüşmesi durumudur (Şekil 3.4).

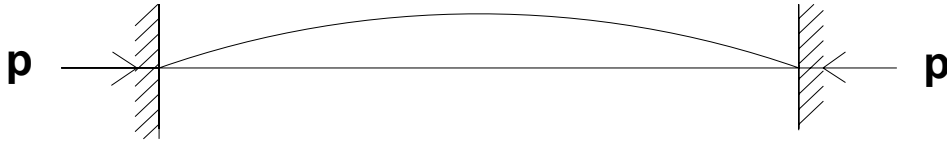


Şekil 3.4 Burulma durumu

Şekil 3.4.a'da düzgün kesitli geometrik yapıya sahip bir eleman ve Şekil 3.4.b'de ise burulma etkisi ile düzensiz kesite sahip bir şekil değiştirme oluşumu görülmektedir.

3.2.1.3 Burkulma

Belli miktardaki bir basınç etkisiyle eleman mukavemetini kaybetmekte ve eleman eksenini yanal deplasmanlar yaparak başlangıçtaki doğru konumundan eğri konumuna geçmektedir. Bu duruma burkulma denir. Şekil 3.5’de p kuvvetinin etkisiyle meydana gelen burkulma görülmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Burkulma durumu

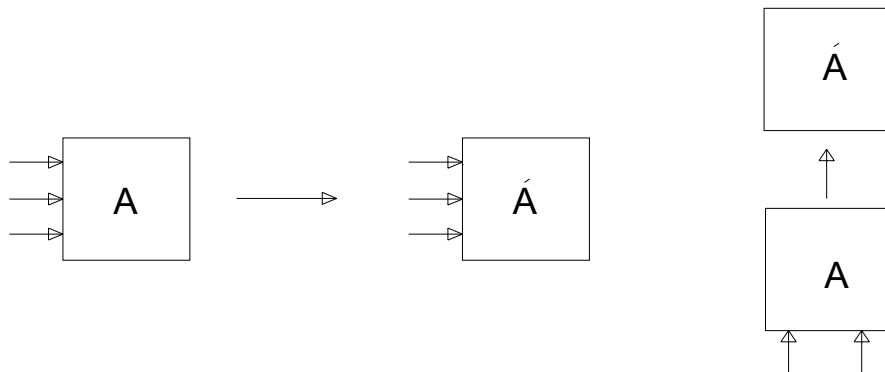
3.2.2 Dış Geometrik Değişimler

3.2.2.1 Ötelenme

Bir eleman bir kuvvetin etkisi altında yer değiştiriyor ise buna ötelenme denir (Şekil 3.6).

Hareket yatay kuvvetlerin etkisiyle yatay düzlemde etkiliyor ise yatay ötelenme, düşey kuvvetlerin etkisiyle düşey düzlemde etkiliyor ise buna düşey ötelenme denir.

Yatay ötelenme düzenli bir harekettir. Elemana ait her noktanın x 'i veya y 'si ya da her ikisi birden eşit miktarda hareket ederler. Burada bir yüzeyin şekli korunarak, başka bir yere ötelenmesi söz konusudur.



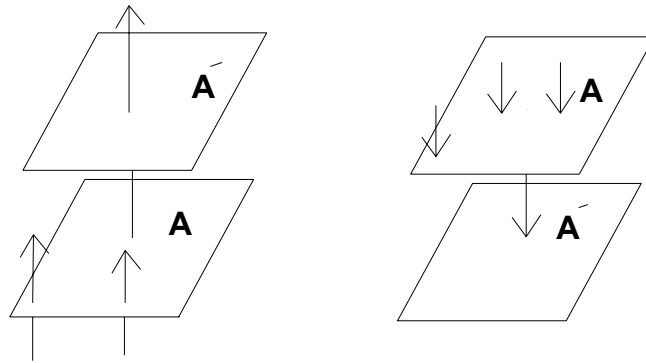
Şekil 3.6 Ötelenme x ve y yönünde

Şekil 3.6.a’da eleman P kuvvetinin etkisiyle x düzleminde hareket etmektedir. Şekil 3.6.b’de ise eleman P kuvvetinin etkisiyle y düzleminde hareket etmektedir.

Ötelenme elemana etkiyen itme kuvvetinin sürtünme kuvvetinden büyük olması durumunda söz konusu olabilir.

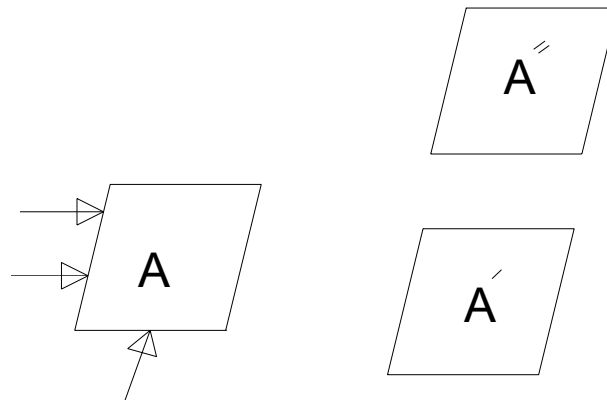
Yapının oturduğu zemin, düşey yüklerin tamamını karşılayacak taşıma gücüne sahip değil ise düşey ötelenme meydana gelir.

Düşey ötelenme aşağı veya yukarı yönde oluşabilir. Şekil 3.7’de elemanın düşey ötelenmesi görülmektedir.



Şekil 3.7 Düşey Ötelenme durumu

Eğer hareket hem düşey hem de yatay yönde meydana geliyorsa bu tür bir ötelenmeye karma hareket denir. Karma hareket elemana etkiyen kuvvetlerin bileşkesi yönünde meydana gelir. Şekil 3.8 ’de düşey ve yatay kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen karma hareket görülmektedir. Burada A elemanı yatay kuvvetlerin etkisiyle A' konumuna, düşey kuvvetlerin etkisiyle de A'' konumuna gelmektedir.

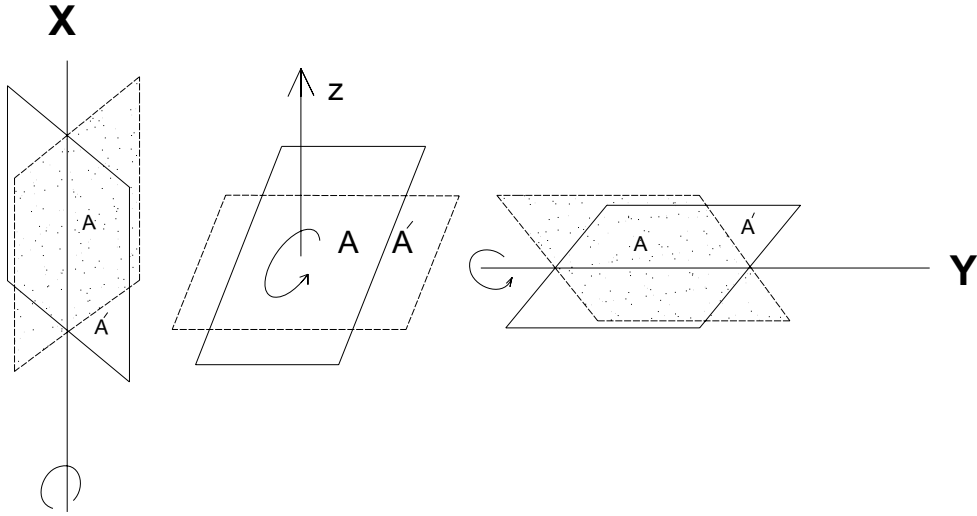


Şekil 3.8 Karma Ötelenme durumu

3.2.2.2 Dönme

Döndürme momentinin etkisi ile elemanda meydana gelen dönel harekettir. Elemanın yatay düzlemde düşey eksen etrafında yaptığı harekete yatay dönme denir. Elemanın düşey

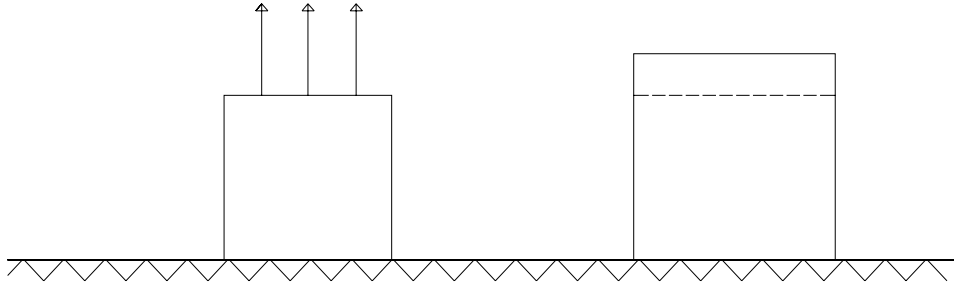
düzlemde yatay eksen etrafında yaptığı harekete de düşey dönme denir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Dönme durumu

3.2.2.3 Uzama

Bir çekme kuvveti ya da basınç kuvveti etkisi altında elemanın boyunda meydana gelen değişimdir. Bunun yanı sıra, sıcaklığın etkisiyle genleşme veya büzülmeden de söz edilebilir. Şekil 3.10'da P kuvvetinin etkisiyle elemanda meydana gelen uzama görülmektedir.



Şekil 3.10 Uzama durumu

Deformasyonları türlerine göre de iki gruba ayırmak mümkündür:

a) Küçük deformasyonlar: Yapıda tehlike yaratmayan deformasyonlardır.

b) Büyük deformasyonlar: Yapıda veya yer kabuğunda zaman içerisinde fiziksel olarak gözle görülebilen büyüklükte ve sürekli olarak etkiyen deformasyonlardır. Bu tür deformasyonlar çok tehlikeli olabilirler.

Bütün bunlardan farklı olarak eleman üzerinde meydana gelen düzensiz deformasyonlar da mevcuttur. Aksesuarların zeminde oluşturduğu aşınmalar sonucu oynamalar, meteorolojik ve

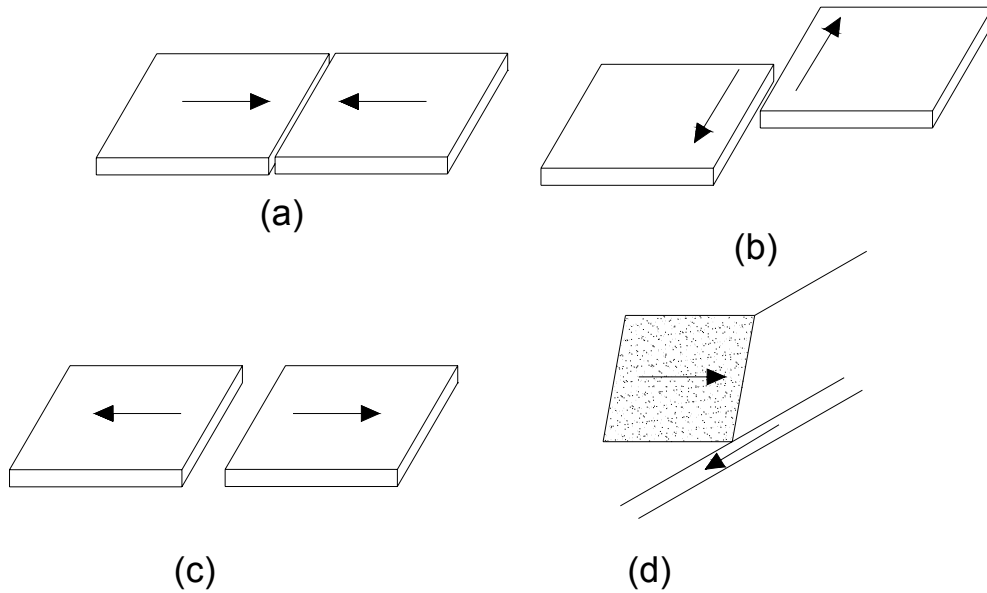
jeolojik olaylardan dolayı oluşan çatlama, parçalanma gibi yüzey bozulmaları bu gruba örnek olarak verilebilir.

3.3 Deformasyona Neden Olan Faktörler

Çok çeşitli olan bu hareketler içinde, oluşumu can kaybına ve çevre felaketlerine neden olabilecek niteliktekiler araştırılmıştır. Bu hareketlerin irdelenmesi onların oluşum mekanizmalarını kavramak ve böylece isabetli tahminlerde bulunarak tehlikeyi önleyici tedbirler almak bakımından çok gerekli ve önemlidir. Araştırılması gereken etkenler Tektonik ve Lokal hareketler olarak sınıflandırılabilir.

3.3.1 Tektonik Hareketler

Yerkabuğu, hareketli bir takım plakalardan oluşmaktadır. Tektonik plaka hareketleri Şekil 3.1’de görülmektedir. Şekil 3.11.a’da plakalar birbirinden uzaklaşmaktadır. Bu tür bir hareket şiddetli bir sarsıntıya sebep olmakla birlikte, Şekil 3.11.b’de plakaların yan yana sürtünmeleri sonucu zayıf noktada oluşan çatlak boyunca ilerleyen kırılmalar meydana gelmektedir. Şekil 3.11.c’de karasal plakalar arasındaki yaklaşma çarpma ile sonuçlanmakta ve büyük sarsıntıya neden olmaktadır. Şekil 3.11.d’de ise okyanus plakalarının kara plakalarının altına kayması görülmektedir. Bu durumda zemin üzerinde büyük çatlaklar meydana gelmektedir. Bütün bu tektonik hareketler aslında dünya yüzeyi oluşumunun henüz tamamlanmadığının bir göstergesidir.



Şekil 3.11 Tektonik hareketler

3.3.2 Lokal Hareketler

Toprak kayması bu tür hareketlere karakteristik bir örnek oluşturur. Çoğu kez bu durum dış etkiler altındaki tabakanın altında bulunan ve dış etkilerden etkilenmeyen tabakadan ayrılması şeklinde oluşur.

Bunlarla birlikte, aşağıdaki etkenler de deformasyonlara neden olmaktadır.

- Yeraltı zenginliklerinin alınması halinde meydana gelen hareketler. Örneğin, kapalı bir maden işletmesinde açılan galerinin çökmesi. Bu gibi hareketlerde çoğu zaman jeolojik yapının dengesi bozulur. Bu denge yeniden sağlanıncaya kadar hareket devam eder.
- Okyanuslarda, gel git olayının etkisiyle okyanus tabanında oluşan ve sarsıntıya yol açan hareketler.
- Güneş ışınları, ısı değişiklikleri, fırtınalar gibi bazı meteorolojik etkilerden doğan hareketler.
- Yapıya etki eden dış yükler.
- Yapım, proje ve işletme hatalarından kaynaklanan hareketler.
- Trafik yoğunluğu veya makine tesislerinin meydana getirdiği küçük çaptaki sarsıntılar sonucu temelde oluşan gevşemeler.
- Büyük kentleşme sonucu yerkabuğuna aşırı yüklemeye doğan hareketler.

3.4 Deformasyon Modelleri

Deformasyonlar, beklenen hareket tarzına, yerel koşullara ve meteorolojik koşullara bağlı olarak belirlenen ölçme yöntemleri ile tespit edilirler. Ölçme yöntemleri de problemin şekline ve uygulama yapılacak bölgenin büyüklüğüne göre seçilir. Bütün bunlar için de farklı modeller geliştirilmiştir. Bu modeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

1- Statik model

2- Dinamik model

3- Kinematik model

3.4.1 Statik Model

Bu modelde, deformasyon ölçmesi yapılacak bölgede ölçümler tamamlanıncaya kadar karakteristik noktaların sabit kaldığı kabul edilir. Yani deformasyonun ölçüm esnasında zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi ilkesine dayanır. Geometrik

değişimlerin başlangıç zamanı ölçümler tamamlandıktan sonra kabul edilir ve belli periyotlarla yenileme ölçüleri yapılır. Deformasyon analizi bu iki ölçü zamanı arasındaki değişimlere göre istatistik hesapların da yardımıyla yapılabilir.

3.4.2 Dinamik Model

Bu modelde geometrik değişimlerle beraber deformasyona neden olan kuvvetlerin zamana ve dış etkenlere bağlı olarak değişimi, birbiriyle olan ilişkileri ve kuvvetlerin oluşmalarına neden olan dönüşüm fonksiyonu irdelenmektedir. Örneğin bir su tüneli ele alınacak olunursa suyun miktarındaki değişim, suyun akış hızı, kaplama içindeki gerilmeler, tünel etrafındaki yerkabuğu hareketleri deformasyon nedeni olarak gösterilebilir. Deformasyonların oluşumu, buna etkiyen kuvvetlere yapı karakteristiklerinden oluşan bir dönüşüm fonksiyonun zamana bağlı olarak belirlenmesi, nedenleri ve oluşan deformasyonların yer, zaman ve frekans ilişkilerinin ortaya konmasıdır.

3.4.3 Kinematik Model

Bu model üzerinde deformasyon araştırması yapılacak karakteristik noktaların yaptığı hareketler ve bu hareketlerin hızları incelenmektedir.

Deformasyon araştırması, bölgenin uzun bir süre gözlenmesiyle elde edilmektedir. Örneğin bir bölgede yerkabuğunun hareketlerini belirlemek için ölçümler yapılırken sadece nivelman ölçülerinin yenilenmesi 3-4 yıl sürmektedir. Bu süre içinde nivelman noktalarına ait yükseklikler olası bir hareketin sonucu değişebilir ve değerlendirme sonuçları pek güvenilir olmayabilir. Bu durumda değerlendirme kriteri olarak noktaların yükseklikleri değil yüksek değişimleri zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınmalı ve düşey hareketin hızı incelemelidir.

Deformasyon ölçümlerinde temel prensiplerden biri de ölçülerin kısa bir sürede tamamlanma gereğidir. Fakat kinematik modelde uzun bir zaman söz konusudur.

3.5 Tünellerde Deformasyona Neden Olan Faktörler

Tünellerde deformasyona neden olan faktörler zeminin jeolojik yapısı ve tünelin inşa yöntemi olmak üzere iki başlık altında toplanabilir.

a) Zeminin jeolojik yapısı

Yer yüzeyinden derinlere doğru inildikçe yumuşak ve ayrılmış zemin yerini kaya ya da sağlam zeminlere bırakır. Zeminin homojenliğini bozan değişik yüzeylerdeki tabakalanmalar, kırıklar, çatlaklar, fay kuşakları ve yeraltı suyu hareketlerinin etkisi, sağlam zeminden beklenen mukavemeti azalır. Bu nedenden dolayı tünel güzergahının jeolojik yapısı

araştırmalıdır. Bunun için yüzeyde uygun görülen sıklıkla belirli noktalarda sondaj işlemi yapılmalıdır. Sondaj işlemleri sonucu, jeolojik yapılanmaya göre oluşabilecek yaklaşık deformasyon miktarı belirlenir ve tünel güzergahı boyunca ne oranda takviye yapılacağı bulunur.

Bunlardan başka mevcut yapılanma da deformasyona sebep olabilir. Bu da binaların boyutları, taşıyıcı sistemleri ve yapının yaşı gibi kriterler hakkında bilgi edinmeyi zorunlu kılar. Bunlardan başka kanalizasyon, gaz ve su borularının (bunlar için kullanılan malzemeler) tünel hattına göre konumları da belirlenmelidir.

b) Tünel inşa yöntemi

Tünelin derinliği, çapı ve tünel açma yöntemi tünel içinde deformasyonlara yol açar. Derinliği ve çapı büyük olan tünellerde ve patlayıcı madde ile açılan tünellerde daha büyük deformasyonlar gözlemlenir.

Zeminin gevşemesi sonucu, kendi kendini taşıma direnci azalarak deformasyonlar meydana gelir. Bu nedenle olası gevşemeler önlenmeye çalışılır. Gevşemeyi önlemek için oluşturulacak iksalar ve aralıkları olası beklenen deformasyona göre belirlenir. Fakat kazı uzunluğunun fazla olduğu durumlarda deformasyon miktarı artacağından dolayı kontrol altına almak oldukça güçtür. Hatta bazen göçükler bile meydana gelebilir. Bunun için, beklenen deformasyona göre kazı uzunluğu da ayarlanmalıdır. Zeminin gevşemesini önleyebilecek bir başka tedbir de kazı yüzeyinin havayla temasını kesmektir. Bunun için kazının hemen ardından kazı yüzeyi shotcrete (püskürtme beton) ile kaplanır. Kazı sonrası iksa yerleştirme ve shotcrete ile kaplama mümkün olduğunca hızlı yapılmalıdır. Duvarlarda iksa yapıldıktan sonra ise taban kazısına başlanır.

Bütün bunlara rağmen, bir kesitte iksa tamamlansa bile deformasyon devam edebilir. Bunun nedeni ise zeminde henüz sönümlenmemiş gerilme değişimleri, yeraltı suyunun drene olmaması ve tünel kabuğunun arkasını zorlaması olabilir. Yeraltında açılan her boşluk drenaj vazifesi görerek su ile dolar. Bu mevcut suyun tünel dışına tahliye edilmesi zorunludur. Çünkü üzerini kapatmak da bir şekilde su basıncına yol açar. Su uzaklaştırıldıktan sonra ise oluşan boşluklar, gerilmelerden doğan hareketlerin sönümlenmesini engelleyeceği için betonla doldurulurlar (Özhan N., 1994)

3.6 Tünel Üzerinde Yer Alan Zemin Tabakalarının Deformasyonu

3.6.1 Teorik Çalışmalar

Geçen yüzyıldan başlayarak uzmanlar maden galerinin açılışının zemin üst yüzeyindeki etkisini incelemiştir. Bu incelemeleri yaparken belli tecrübelerini ve mekanik kanunları kullanmışlardır.

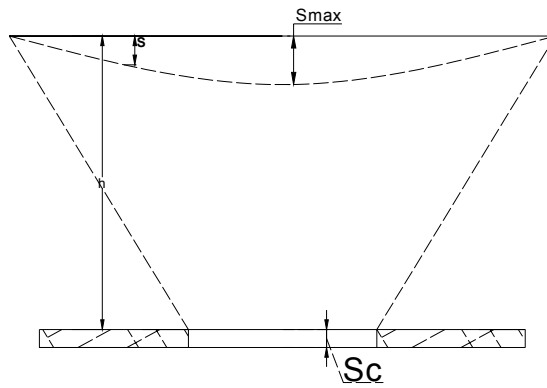
Tünel inşaatlarıyla ilgili hesap yöntemleri ilk önce madenciler tarafından gözlem ve deneyime bağlı olarak geliştirilmiştir.

Yüzeye yakın tüneller civarındaki deformasyonlar, literatürde sık olarak basit oturma olarak ele alınmıştır. Değişik çalışmalar arasındaki farklılık oturma bölümünün geometrisinden ve yayılımın idealize edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Teoriler başlıca iki grupta toparlanabilir. İlk grupta, oturma çanağının genişliği ve en büyük oturma miktarından oturma çanağının şeklini tayin etme, ikinci grupta ise zeminin mekanik özelliklerinden ve tünel civarındaki oturmalarından yola çıkarak zemin yüzeyindeki oturmaların bulunması yer alır.

Tünelcilik alanında yaklaşık yüz yıldır zemin yüzeyindeki maksimum oturma miktarını, tünel en kesit alanına ve örtü tabakası kalınlığına bağlayan çalışmalar yapılmaktadır.

Briggs (1929) zemin yüzeyindeki maksimum oturmayı ampirik olarak aşağıdaki şekilde vermiştir (Şekil 3.12).

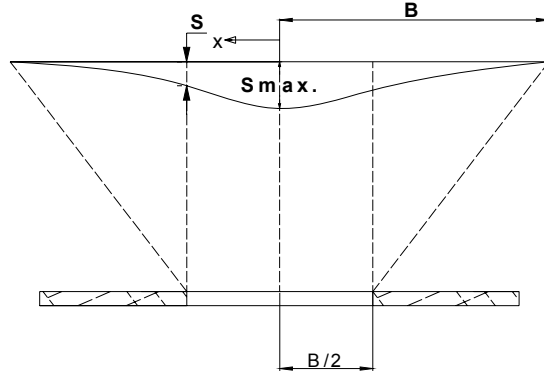


Şekil 3.12 Zemin yüzeyindeki maksimum oturma, (Briggs, 1929)

$$S_{\max} = S_c \cdot \frac{2.2}{2.2 + \sqrt{h/100}} \quad (3.1)$$

Burada, S_c kazı yüksekliğini (tünel çapını) ve h zemin yüzeyine uzaklığı (örtü kalınlığı) metre olarak gösterilmektedir.

Bir başka ampirik eşitlik ise Beyer (1945) tarafından Şekil 3.13’de görüldüğü gibi (3.2) eşitliğinden ileri sürülmüştür.

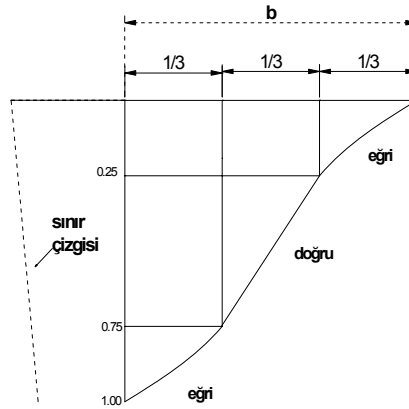


Şekil 3.13 Zemin yüzeyindeki oturma çanağının hesabı, (Beyer, 1945)

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{2B}\right)^2 \quad (3.2)$$

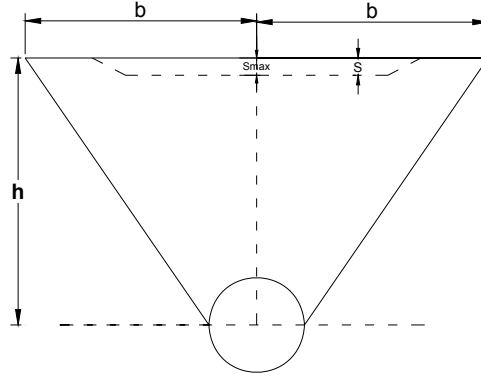
Burada, S_{\max} yüzeydeki en büyük oturma değerini ve x eksenden itibaren uzaklığı ifade etmektedir.

Kramer (1974) üst yüzey oturma çanağının şeklini zemin yüzeyindeki maksimum oturmaya bağlı olarak aşağıdaki şekilde vermiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Üst yüzey oturma çanağı, (Kramer, 1974)

Tünellerde üst yüzey oturmalarının hesabı ile ilgili ilk çalışmalar Aversin (1954) ve Limanov (1957) tarafından yapılmıştır. Aversin (1954) zemin yüzeyindeki maksimum oturma miktarından oturma çanağının şeklini olasılık eğrisini kullanarak belirlemiştir (Şekil 3.15).



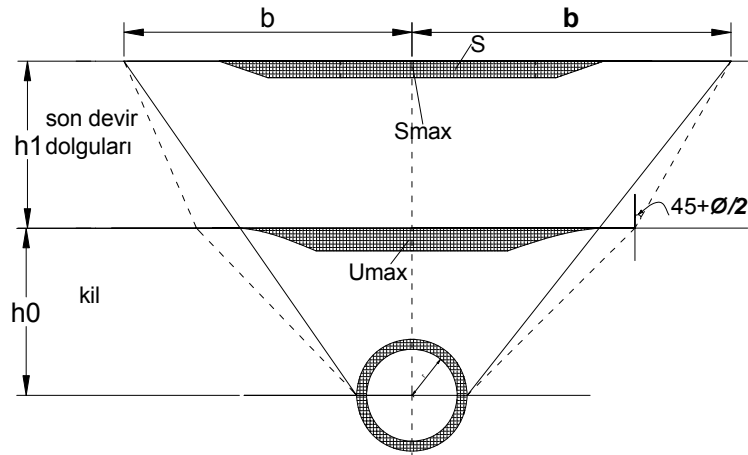
Şekil 3.15 Zemin yüzeyindeki oturmaların hesabı, (Aversin ,1954)

Buna göre merkezden x kadar uzaklıktaki oturma,

$$S = S_{\max} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{b}\right)^4 \cdot e^{\frac{4x}{b}} \quad (3.3)$$

Olarak bulunabilir. Burada S_{\max} zemin yüzeyindeki en büyük oturma değeri ve b merkezden itibaren oturma çanağının genişliğidir.

Limanov (1957) kalkan yöntemi ile açılan Leningrad (senpeterzburg) metrosunun oturma hesapları için bir yöntem geliştirerek elastik bir ortamda derinde açılan bir galeriden dolayı meydana gelen deformasyonları hesaplamıştır. Analitik hesap Jeffery (1921) tarafından dairesel boşluk için geliştirilen eşitlikle uyum göstermektedir. Aynı şekilde Limanov (1957) Şekil 3.16'da görüldüğü gibi iki tabakalı bir zemin profilinde tabakaların üst yüzlerinde meydana gelen oturmaları da hesaplamıştır.



Şekil 3.16 Tabakalı zeminlerde oturmaların hesabı, (Limanov, 1957)

Zemin yüzeyindeki oturma çanağının merkezindeki en büyük oturma değeri S_{\max} , her iki zemin tabakasının yüzündeki oturma alanlarını eşitleyerek aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$S_{\max} = \frac{V_1}{b} \quad (3.4)$$

Burada, b zemin yüzeyindeki oturma çanağının merkezden itibaren genişliği olup Eşitlik 3.5'den metre olarak elde edilmektedir.

$$b = 2a + h_1 = g(45^\circ - \frac{\phi^\circ}{2}) \quad (3.5)$$

V_1 , zemin yüzündeki oturma çanağının hacmi olup (3.6) eşitliğinden elde edilmektedir

$$V_1 = U_{\max} \cdot a \cdot \pi \quad (3.6)$$

Burada, U_{\max} ikinci zemin tabakasının yüzündeki maksimum oturma değeri olup Eşitlik 3.7'de verilmiştir.

$$U_{\max} = (1 - \nu^2) \cdot \frac{\sigma_2}{E} \cdot \frac{4r_0^2 h_0}{h_0^2 - r_0^2} \quad (3.7)$$

Burada, ν poisson oranı, E elastisite modülü, σ_2 ölçülen gerilme değeri, h_0 ikinci tabakanın kalınlığı ve r_0 tünel yarıçapıdır.

Mortos (1958) tünel üzerindeki oturmanın şeklini, düzlem cevher yatakları üzerindeki oturmaların arazi gözlemlerini istatistiksel yöntemlerle değerlendirerek Eşitlik 3.8'de verilen bir hata fonksiyon eğrisi ile elde edebileceğini belirtmiştir.

$$S = S_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (3.8)$$

Burada, S tünel ekseninden itibaren x mesafedeki yüzey oturması, S_{\max} tünel merkezindeki en büyük zemin yüzü oturması ve i eğrinin standart sapması, eğrinin dönme noktasındaki x değeridir.

Steinfeld (1962) tünel tavanının S_c oturmasından dolayı hacimsel deformasyon hacmi V_0 'ı, deformasyonların tünel tabanından başlayarak düşeyle 30° lik açı yapan bir doğru ile sınırlı olduğunu kabul ederek hesaplamıştır (Şekil 3.17).

Szechy (1969), daha önce belirlenen tünel tavanının S_c oturmasından oturma sonucu oluşan boşluğa doğru hareket eden zemin kütlelerinin V_0 hacmini, oturma çanağının eksen üzerindeki S_{max} ve eksen doğrultusundaki S' en büyük oturma miktarlarını aşağıdaki eşitlikler ile ifade etmektedir.

$$S_{max.} = \frac{\psi r S_c}{tg \alpha' \left[r \left(1 - \cos \left(\frac{\psi}{2} \right) + h \right) \right]} \quad (3.12)$$

$$S' = \frac{3\pi r^2 tg \alpha}{\left(\frac{4}{\sin \beta} \right) \cdot (h + r) + (4 + r^2 + 2h + \frac{h^2}{r})} \quad (3.13)$$

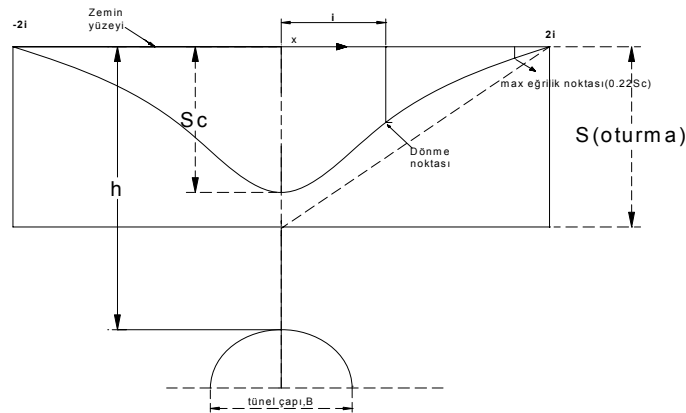
$$S = S' + S_{max} \quad (3.14)$$

$$V_0 = V_1 \quad (3.15)$$

Szechy zemin yüzündeki oturma çanağının genişliğinin tünel tabanından başlayıp yatay ile $(45 + \frac{\phi}{2})$ 'lik bir açı yapan doğruyla sınırlı olduğunu belirtmiştir.

Steinfeld yalnızca iki boyutlu durumu ele alırken Szechy kalkan yöntemindeki tecrübelerinden de yola çıkarak tünel eksenini doğrultusunda gelişen oturmaları da göz önüne almıştır.

Schmidth (1969) oturmayı istatistik bir problem olarak formüle etmiş ve yüzeydeki oturma eğrisini amprik olarak bir Gauss hata eğrisi olarak belirtmiştir. Bu yaklaşımın kohezyonsuz gevşek zeminlerdeki, tünel açılımı nedeniyle meydana gelen, yüzey oturmalarını yeterli gerçeklikte ifade edeceğini göstermiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Üst yüzey oturmalarının Gauss hata fonksiyon eğrisi ile belirlenmesi, (Schmidth, 1969)

Şekil 3.19'da anlaşıldığı üzere yer değiştiren zemin kütesinin hacmi

$$V_1 = 2,5.i.S_{\max} \quad (3.16)$$

ile ifade edilmiştir. i üst yüz oturma eğrisinin dönme noktasının merkeze uzaklığı (ft) ve S_{\max} tünel merkezindeki en büyük oturma değeri (ft) dır.

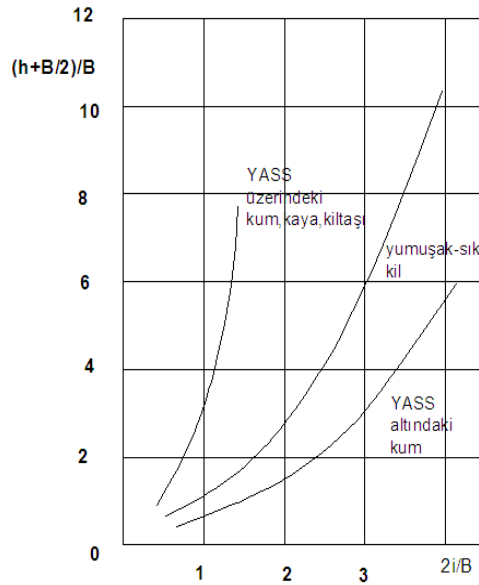
Schmidth (1969) zemin yüzeyindeki oturmanın, bina ve altyapı tesisleri ile çevredeki yapılara olası etkileri nedeni ile en büyük yüzey eğriliği ve en küçük eğrilik yarıçapı değerlerinin en büyük oturmadan daha önemli olduğunu belirterek aşağıdaki eşitlikleri vermiştir.

$$\text{En büyük eğim} = 0,6 \frac{S_{\max}}{i} \quad ; \quad x = \pm i \quad (3.17)$$

$$\text{En küçük eğrilik yarıçapı} = \frac{i^2}{S_{\max}} \quad ; \quad x = 0 \quad (3.18)$$

$$\text{En büyük eğrilik yarıçapı} = \frac{2i^2}{S_{\max}} \quad ; \quad x = \sqrt{3}.i \quad (3.19)$$

Peck (1969), zemin özelliklerine bağlı olarak, arazi gözlemlerinden elde edilen değişik zeminlerdeki tünel inşaatları sonucu meydana gelen zemin yüzündeki oturmaları incelemiş, oturma çanağının etkili genişlik parametresi i 'yi tünel üstü zemin yüksekliği ve zeminin özelliği ile belirtmiştir (Şekil 3.20). B tünel genişliği, h tünel üstündeki zemin kalınlığı ve i tünel eksenine ve dönüm noktası arasındaki yatay mesafe olarak Şekil 3.19 da gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Değişik zeminlerdeki birçok tünel için oturma çanağının etkili genişlik parametresinin tünel genişliğine oranı $2i/B$ ile tünel taban derinliğinden itibaren zemin yüksekliğinin tünel genişliğine oranı $(h+B/2)/B$ arasındaki bağıntı, (Peck, 1969)

Müller (1971), Szechy gibi oturma çanağının şeklini bir dağılım fonksiyonu ile vermeye çalışmış olup Hamburg Metro inşaatı yüzey deformasyonu en büyük oturma değerini ve oturma çanağının genişliğini hesaplamıştır.

Atwell ve Farmer (1974), zemin üst yüz oturmalarının artan üst zemin yüksekliği ile orantılı olarak azalmasını göstererek, üst yüzey oturmalarını etkileyen ana faktör olarak şekil değiştiren zemin hacmini vermişlerdir.

Acar (1980), elastik bir oturmadaki dairesel açıklıkların dış yüklerle veya zeminin kendi ağırlığı altında yüklendikleri zaman zemin yüzeyindeki ve açıklık civarındaki deplasmanları ve gerilme durumunu analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözmüştür.

O'Reilly ve New (1982), verdikleri bilgisayar destekli hesap yöntemi ile oturma çanağının şekli ile zemindeki gerilme-deformasyon yayılışını arazi ölçüm sonuçlarına dayanarak incelemiş ve sonuçları model deneyleri ile karşılaştırmışlardır. Lineer regresyon hesabı ile oturma çanağı genişliği ile zemin üst yüksekliği arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir.

O'Reilly (1991) ve Fujita (1989), inşa edilen tünellerde ölçülen oturmaları analiz ederek bu oturma okumalarını bir Gauss oturma eğrisinde göstermişlerdir (Şekil 3.21).

$$S = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (3.20)$$

S , x mesafesindeki yüzey oturması, S_{\max} tünel merkezindeki maksimum oturma, i merkez çizgisi ile oturma bükülme noktasındaki yatay mesafe ve x merkez çizgisi ile yatay mesafedir. “ i ” değeri Eşitlik 3.21 yardımıyla bulunabilir.

$$i = k \cdot z_0 \quad (3.21)$$

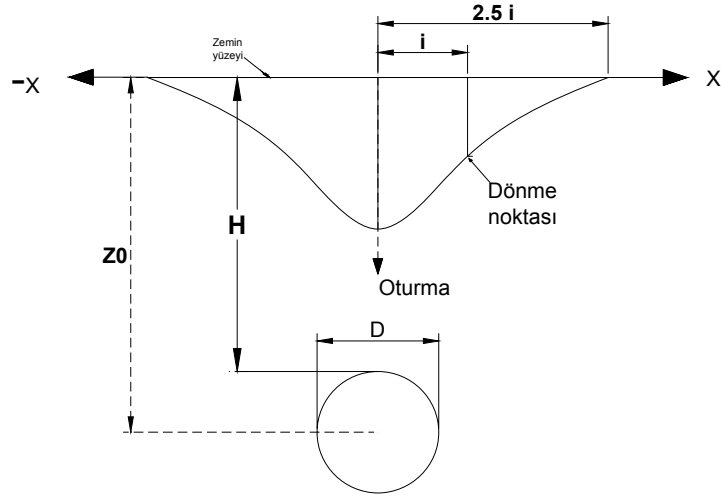
Burada, k genişlik parametresi olup tünellerde genelde 0.50~0.25 değerleri arası verilmektedir.

Hacim kaybı parametresi V_s ise Eşitlik 3.22 ile bulunabilir.

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \quad (3.22)$$

Genelde hacim kaybı (V_s) Eşitlik 3.23'deki ile elde edilebilir. Burada, $\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)$ tünel daire kesit alanıdır. “ D ” tünel daire çapını, V_1 ise hacim oranını göstermektedir.

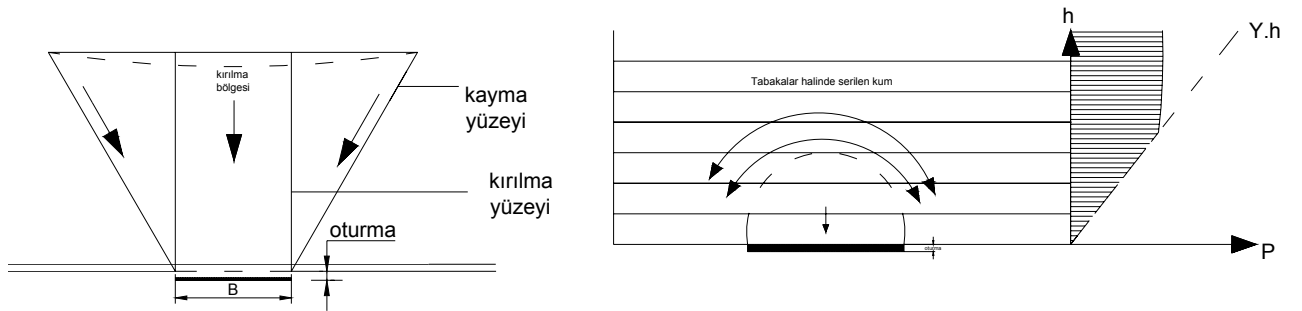
$$V_s = V_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.23)$$



Şekil 3.21 Gauss oturma eğrisi

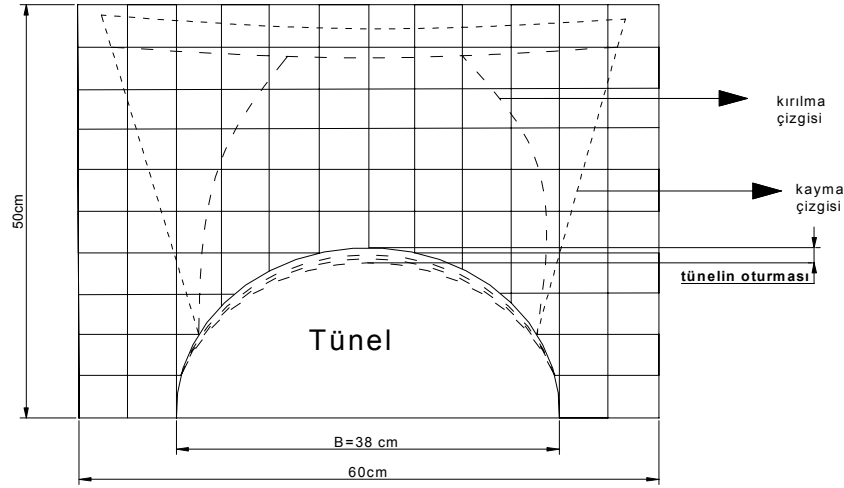
3.7 Deneysel Çalışmalar

Mevcut çok sayıdaki arazi ölçüm sonuçlarına kıyasla yüzeye yakın tünellerdeki deformasyonlarla ilgili az sayıda teorik ve deneysel çalışma vardır. Model çalışmaları, daha çok tünel açılımı ile zeminde meydana gelen gerilmeleri belirlemek amacıyla yapılmış olup tünel civarındaki yer değişimleri gözlenmiştir. Yamaguti (1930) jelatin model üzerinde iki boyutlu deneyler yapmıştır. Terzaghi (1936) yaptığı düşen kapak sistemli deneyi ile esnek kaplamalı tüneller üzerindeki zeminlerde kemerlenme olayını incelemiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 Düşen kapak deneyi, (Terzaghi, 1936)

Loos ve Breth (1949) kumda yaptıkları model çalışmasında esnek kaplamalı tüneller üzerindeki yer değiştirmeleri ve tünele etki eden gerilmeleri belirlemek amacıyla orta ve ince kum malzemesi kullanarak bir seri deney yapmışlardır (Şekil 2.23).



Şekil 3.23 Tünel tavanının oturmasına bağlı olarak zeminde meydana gelen yer değiştirmeler, (Loos ve Breth, 1949)

Atkinson, Brown ve Potts (1975), yüzeye yakın tünellerde statik ve santrifüj deneyler yapmışlardır. Cambridge üniversitesinde kaplamasız sığ tüneller üzerinde yapılan deneylerde deformasyonların meydana gelişi gözlenmiştir. Teorik analiz yöntemlerini inceleyerek yeni hesap yöntemleri geliştirilmişlerdir.

Potts (1976), kumda yaptığı model tünel deneylerinde kaplamaya gelen basınçları ölçmüş, deformasyon durumunu incelemiştir. Sığ tünellerde zemin yüzü oturmalarının hata fonksiyon eğrisi ile ifade edebileceğini belirtmiştir. Potts yaptığı deneyler sonucunda tünelde göçme meydana gelinceye kadar efektif genişlik parametresindeki değişimin çok az olduğunu, tünel göçtüktan sonra ise büyük deformasyonların meydana geldiğini ve zemin yüzü oturma çanağının hata fonksiyon eğrisinden saptığını belirtmiştir.

Atkinson, Potts ve Shofield (1977), yüzeye yakın tünellerde yaptıkları model deneylerinde, model santrifüj aletinde döndürülürken, tünel iç basıncını σ_T azaltarak göçme anındaki σ_T değerini ve göçme şeklini tespit etmişlerdir.

Atkinson ve Potts (1979), gevşek zeminlerdeki sığ tüneller civarındaki gerilme ve yer değiştirmeleri belirlemek amacıyla model deneyleri yapmışlardır. Cambridge üniversitesinde yapılan deneylerde tünel tavanının oturmasına bağlı olarak tünel üstü zeminindeki yer değiştirmeleri araştırmışlardır. Tünel tavanının oturmasını tünel iç basıncını azaltarak simüle etmişlerdir.

Tünel üstü zemindeki yer değiştirmeler radyografi tekniğiyle belirlenmiş, model malzemesi olarak kum ve kil kullanılmıştır. Atkinson ve Potts (1979) model deneyleri sonucunda tünel üstü zemindeki yer değiştirmelerin zeminin cinsine ve tünel üstündeki örtü kalınlığına bağlı

olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte tünelde meydana gelen deformasyonların zemin yüzünde oturmalar meydana getirdiğini saptayarak bu oturmaların tünel tavanının oturmasına ve tünel üstündeki örtü kalınlığına bağlılığı amprik olarak vermişlerdir.

Sauer (1976), yüzeye yakın tünellerde gerilme dağılışı ve üst yüzey oturmalarını belirlemek için yaptığı 1/30 ölçeğindeki model çalışmasında özellikle bitişik iki metro tüneli arasındaki duvardaki gerilmeleri incelemiş ve sonuçları inşa halindeki Frankfurt metrosunda çeşitli noktalardaki ölçüm sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Kimura ve Mair (1981), santifüj aletinde inşa ettikleri geomekanik modele yer ivmesinin birkaç katına varan ivmeler uygulayarak deney gövdesinde arazideki gerçek gerilmelere eşdeğer yüksek gerilmeler meydana getirmişlerdir.

Egger (1983), değişik detayların simüle edilebilmesi amacıyla gevşek zeminde yüzeye yakın 1/20 ölçekli bir model tünel üzerinde normal ve ön gerilmeli ankrajlar kullanarak deneyler yapmıştır.

Graf (1984), kohezyonsuz zeminlerdeki tünellerde tavana gelen zemin basınçlarını teorik olarak rijit ve esnek kaplama halinde ayrı ayrı incelemiş ve bulunduğu sonuçları geçerliliğini küçük ölçekli model deneyleri ile kontrol etmiştir.

Melix (1986), kohezyonlu ve sürtünmeli homojen bir zemindeki yüzeysel tünellerin denge durumunu incelemek amacıyla yaptığı model çalışmasında ($0.5 < h/B < 3.0$), tünel iç basıncı olmadan dengede kalan tünellerde, zeminin kohezyon değerini $0.5\gamma B$ olarak belirlemiştir. Bu değer geliştirdiği diğer hesap yöntemlerinden elde ettiği C_{\min} değerine eşit olduğunu saptamıştır.

B.R.Wu ve C.J. Lee (2003) yaptıkları model deney sonuçlarına dayanarak z derinliğinde D çapında tek tünel için maksimum yüzey oturması ile hacim kaybı ve arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$\frac{S_{\max}}{D} = 0.00327\left(\frac{z}{D}\right)^{-0.43} V_i \quad (3.24)$$

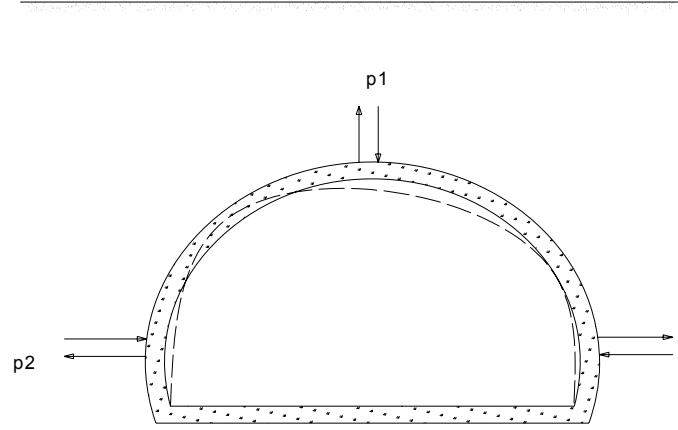
Paralel çift tünel de $d/D=1.5$ koşulu sağlanmak şartıyla

$$\frac{S_{\max}}{D} = 0.00494\left(\frac{z}{D}\right)^{-0.39} V_i \quad (3.25)$$

Eşitliğini geliştirmişlerdir.

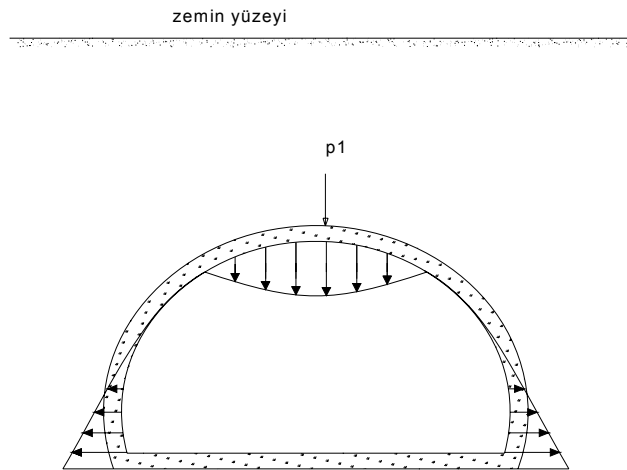
3.8 Tünelde Beklenen Deformasyonlar

Tünel güzergahı boyunca kazı devam ederken oluşan boşluk nedeniyle tünel kesitine bir takım kuvvetler etkir. Bu kuvvetler arazinin yükü ve iç kaplamalar nedeniyle oluşan sistemin kendi ağırlığıdır. Yine tünel kesitinde jeolojik yapının değişmesinden dolayı nadiren de olsa tünel tabanında kabarma veya çökme de olabilir (Şekil 3.24).



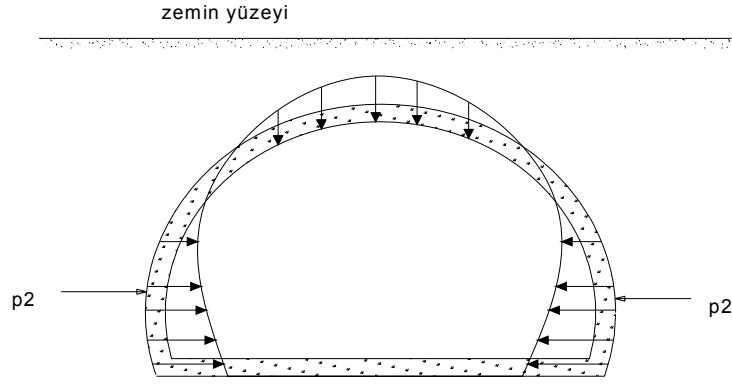
Şekil 3.24 Tünel etkiyen kuvvetleri

P_1 kuvvetinin etkisiyle tünel tavanında aşağı doğru bir eğilme gözlenir. Buna bağlı olarak da tünel duvarları yana doğru açılabilir. Şekil 3.25’de P_1 kuvvetinin etkisiyle meydana gelen şekil değişikliği görülmektedir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 P_1 etkisiyle tünel deformasyonu

P_2 kuvvetinin etkisiyle de tünel duvarları tünel içine doğru şekil değiştirirler. Buna bağlı olarak da bu değişim tünel tavanının yukarı doğru itilmesine sebep olur. Şekil 3.26’da P_2 kuvvetinin etkisinden dolayı meydana gelen şekil değiştirmeler görülmektedir.



Şekil 3.26 P_2 etkisiyle tünel deformasyonu

Tünel hattının geçirildiği zeminin yapısından dolayı blok halinde kaymalar da olabilir. Örneğin bir heyelan veya yersarsıntısı zemin kütlelerinin bir bölümünü blok halinde kaydırabilir. Bu da tünel içinin şeklini değiştirmeden tünel hattının yerinin değişmesine neden olur. Tünel kazısı nedeniyle, tünel içinde mevcut yapıyı bozan konum ve şekil değişikliklerini belirlemek, etkiyen kuvvetlerin büyüklüklerini, yönlerini ve kaynaklarını tespit etmek amacıyla yapılan ölçümlere “geoteknik ölçümler” veya “aletsel geoteknik gözlem” denir (Özhan N.,1994)

4. TÜNEL İNŞAATINDA ALETSEL GÖZLEM

4.1 Giriş

Tünel inşaatı sırasında tünelin yer aldığı jeolojik ortamda deformasyonlar ile gerilme değişikliklerini gözlemek, tünelde ve çevre yapılar da meydana gelebilecek göçme ve aşırı deformasyonları tespit edilerek, gerekli önlemleri zamanında almak, ekonomik ve can güvenliği yönünden önemli bir kazançtır.

Tünel hattı boyunca yapılan araştırma sondajlarının sonuçlarına ve çevrede yer alan yapıların durum ve konumuna göre geoteknik ölçü noktalarının yerleri belirlenir. Bir tünel projesinde kullanılacak izleme aletleri, izlemenin amacını oluşturan unsura bağlı olarak üç ana bölüme ayrılmıştır:

- Tünel kaplaması
- Alt yapı tesisleri
- Binalar

İlk seviye, tünel kaplamasının kendisidir. Ölçüm cihazları ile donatılmış bir segment ringini kontrol etmek için temel beş unsur bulunmaktadır. Bunlar, zemin basıncı, inşaat demirlerinin (dowel) iç deformasyonu (eksenel ve eğilme) ve global halka deformasyonudur (ovalleşme, nispi yer değişme).

Zemin basıncı: segmentlerin dış yüzeyine, betonla hem yüz olacak şekilde gömülen ve beton içindeki inşaat demirlerine sabitlenen titreşimli telli basınç hücreleri ile ölçülürler.

Zemin gerilmeleri nedeni ile inşaat demirlerinin iç deformasyonu: strain (şekil değiştirme) ölçerler kullanılarak ölçülebilir. Geniş veya ince beton durumunda, bu ölçüm cihazları eksenel deformasyonun (iki değerin ortalamasının) ve sapmanın (iki değer arasındaki farkın) hesaplanmasına olanak sağlamak amacıyla çiftli olarak takılabilir.

Basınç hücreleri ve deformasyon (strain) ölçerler, segment demir sahasında monte edilmektedir. İnşaat demirine sabitlenmiş ve bu işlemler beton dökme işleminden önce gerçekleştirilmiştir. İşlem yerleştirilen her cihaz için yaklaşık bir saat sürmektedir. Üretim tesisinin durmasını önlemek için işlemin bir kısmı inşaat demiri kalıba girmeden önce (cihazların ortalama işlemi beton girişinden önceki son ana bırakılarak) yapılmalıdır. Bu işlem için yalnızca (kalıplara yakın) bir kaç metrekarelik bir yere ihtiyaç vardır.

Bütün inşaat demirleri aynı ölçüm cihazıyla donatılmış olduğu için segment ringinin konumu

önemli değildir. Önemli olan husus, inşaat demiri içindeki cihazların konumu olup, aralarındaki mesafenin sabit kalması gerekmesidir.

Ovalleşme, uzama (ekstensometrik) ölçüm cihazları gibi topografiya araçlarının kullanılmasıyla kontrol edilebilir. TBM ile tünel açmada muhtemelen bunlar kullanılmamaktadır. Zira TBM destek ünitelerinin (back up) varlığı ölçülebilecek bölümlere ulaşmayı veya kaplamanın iç yüzeyine sabitlenmiş prizmalar üzerindeki otomatik teodolit ile ölçüm yapmayı zorlaştırabilir. Destek ünitelerinin (backup) geçişi okumayı hemen tamamen önleyecek olmasından dolayı, benimsenen herhangi bir çözüm yolu, orta ve uzun dönemdeki ovalleşmeyi ölçecektir.

Ringler ya da segman elemanları arasında nispi yer değişme meydana geldiğinde genelde büyük çaplı yer değişmeler olmaktadır. Bu durumda özel olarak tasarlanmış bir ölçüm şeridi ile kolayca ölçüm alınabilecektir.

Yine de tünel içindeki topografik izleme elemanlarının ayrıntılı bir tasarımı “kesin izleme tasarımı”na bırakılmıştır. Bu ilk seviye izlemenin kapsamı, kaplamanın davranışının kontrol edilmesi ve teknik şartname şartlarının yerine getirilmesi, ayrıca yapısal tasarım hipotezinin teyidi için kaplama üzerinde meydana gelecek gerçek yüklerinin tetkik edilmesi ile sınırlıdır.

Tünelin çevresindeki ve üzerindeki zemin bölümü ikinci seviyedir. Bu seviye, derin çökme noktalarının, çubuk ekstansometrelerin (genleşmeölçer) ve inklinometrelerin (eğilme ölçer) kullanılması yoluyla izlenmektedir. Sonda deliğinin uzunluğundaki her metreye ilişkin genleşme bilgileri veren çubuk tip ekstansometrelerin iptal edilmesi ve artışı ekstansometrelerin kullanılması önerilmiştir. Bazı ekstansometre türleri, herhangi bir performans ve hassasiyet kaybı söz konusu olmaksızın, ekstansometre ve inklinometre sensörlerinin birlikte aynı muhafazadan okunmasına imkan vererek büyük avantaj sağlamaktadır. İşte bu olgudan yararlanılarak yalnızca inklinometre için sondaj deliği delinmeyerek sonda deliği sayısı da optimum seviyede tutulacaktır. Bu nedenle yalnızca inklinometrelerin okunması için ayrı sondaj deliği kullanılmayacaktır. Zemin izlemenin amacı tünel hafriyatından kaynaklanan gerçek zemin kaybı ve ayrıca çökme araştırması tasarımı için kullanılan hipotezin geçerliğini sınamak amacıyla çökme yayılışını kontrol etmek şeklindedir.

Zemin seviyesindeki hareketler, yüksek hassasiyetli topografik aletlerle kontrol edilmelidir. Yatay hareketlerin elde edilmesi amacıyla otomatik teodolit ile okunan prizmalar, yüzey hareketi izleme noktalarını oluşturmaktadır. Düşey hareket ise aynı noktaya uygulanan yüksek hassasiyetli nivo kullanılarak kontrol edilmektedir. Her inklinometre cihazı için açılan cebin,

üst kısmıyla bağlantılı bir yüzey izleme noktası bulunduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir.

Diğer yüzey hareketi kontrol noktaları, zeminde 0.5 metre derinde sabitlenen yuvarlak başlı çelik çubuklardan oluşmaktadır. Bu noktalar yüksek hassasiyetli nivo kullanılarak okunmaktadır. Bu cihazlara ilişkin okumaların baz alacağı nivo röperleri (benchmarks), topoğraf ekibinin performans ve hassasiyetiyle ilgili kriterlerine uygun olması için tünel eksenine yeterli bir uzaklığa yerleştirilmelidir. Tünele yakın ve beklenen çökme alanının içinde kalan çevre binaları ve alt yapı tesisleri üçüncü seviye aletlerle kontrol edilmektedir. Hedef prizmalar zemin yüzeyindeki bir otomatik teodolit ile görülebilecek şekilde bina yapılarının temel noktalarına yerleştirilmektedir. Genel prensip olarak binalar, birinci kat ve en üst kat seviyesinde prizmalarla donatılmaktadır. Yüksek veya hassas binalarda topografik malzemeyle ölçüm yapmayı önleyecek kadar önemli görünürlük kaybı söz konusu ise düşeylikte ortaya çıkan değişiklikleri ölçmek üzere inklinometre cihazları kullanılmaktadır. Topografik hedeflerle bina izleme, herhangi bir farklı oturmanın eşzamanlı olarak kontrol edebilmesine ve bir inklinometre çok daha büyük hassasiyette takip edilmesine olanak tanımaktadır. İnklinometre cihazları ise açısız bozulmayı yalnızca tek bir duvar veya sütuna atfedilebilecek temelde tetkik etmeye yarayacak bilgi verirler. Prensip olarak, üç veya daha fazla katlı binalar, birinci ve en üst katlara yerleştirilen en az iki sıra prizmayla izlenmelidir. Tünelin ilk 500 metrelik hafriyatında elde edilen deneyimlere bağlı olarak, bina izlemenin ne kadar yoğun yapılacağına karar verilir. Planlama amacıyla, tünel hattı üzerinde bulunan ve tünel üstü zemin katmanı kalınlığı (örtü kalınlığı) iki buçuk tünel çapından az olan bölgelerdeki tüm binaların izleneceği ve yalnızca tarihi önemi olan veya hassas binaların daha kalın zemin örtüsü olduğu yerlerde de izleneceği söylenebilir.

Tünelin yakınlarındaki binaların çoğu dar ve yüksek olduğu için iki yerine yalnızca bir prizma sütunu yerleştirilmesi yeterli olmaktadır.

Tünel delme işlemine hassasiyet gösterebilecek alt yapı tesisleri de bu alet seviyesinin bir parçasını oluşturmaktadır. Bu tesisler gerektiği zaman elektronik nivo, alt yapı tesisi izleme noktaları ve ekstansometre gibi farklı türlerde unsurlar kullanılarak incelemelidir (Otogar-Bağcılar Hafif Metro projesi Temel İzleme Tasarımı Teknik Şartname, 2005).

4.2 Yüzey İzleme Noktaları (SMP) ve Bina İnceleme Prizmaları (BMP)

Tünel kazısı devam ederken, zeminde oluşan bir takım boşluklar ve bunun sonucu olarak da zemindeki hareketlenmeden dolayı yakın çevredeki mevcut yapılar zarar görebilir. Örneğin bir binanın temelini oynatabilir. Bunun sonucu, bina duvarlarında çatlaklar oluşabilir veya bina çökme eylemine gidebilir. Asfaltın altında kazı devam ederken de bu hareketlenmeler

asfaltı deforme edebilir. Bu mevcut hareketleri takip edebilmek için düşey doğrultudaki değişmelerin bilinmesi gereklidir. İşte yüzey izleme noktaları (SMP), yüzey üzerinde düşey doğrultudaki yer değiştirmelerin belirlenmesi için kullanılırlar. Başka bir deyişle yüzeydeki kritik noktaların izlenebilmesi amacıyla izleme noktalarına (SMP) nivelman yapılır.

İzleme noktaları (SMP), güzergah eksenine ve eksen etrafındaki belli mesafelere yerleştirilirler. SMP'lerin yerleştiriliş şekilleri zeminin yapısına göre değişir. Tüm izleme noktaları SMP'ler yerleştirildikten sonra düzgün bir şekilde numaralandırılır. SMP'lerin üst ucu zemin seviyesinden 0.5 m aşağıya yerleştirilir. Bunun nedeni ise bulonu korumaktır. Örneğin asfalt üzerinde seyreden trafik bulonu zedeleyebilir. SMP yatay yer değişme verilerini elde etmek için nivonun yanı sıra teodolit ile de okuma yapılmalıdır. Bu durumlarda portatif bir topoğrafik prizma çubuğun başına tutturulacaktır.



Şekil 4.1 Yüzey izleme noktası

SMP tesisine, yerleştirileceği zeminin kazılmasıyla başlanır ve daha sonra bulon yerleştirilir. Eğer asfalt ya da beton üzerindeyse dipte yaklaşık 30 cm'lik bir kısım betonlanır. Sonra bulon üzerinde PVC ya da çelikten yapılmış bir boru geçirilir ve etrafı kum ile doldurulur. Bunun nedeni bulonun rahat hareket etmesini sağlamaktır. Daha sonra üzerine yine asfalt veya beton malzeme dökülür, koruyucu kapağı kapatılır. Ölçü esnasında bulon koruyucu kapak açılır ve mira boru üzerine yerleştirilir (Şekil 4.2).



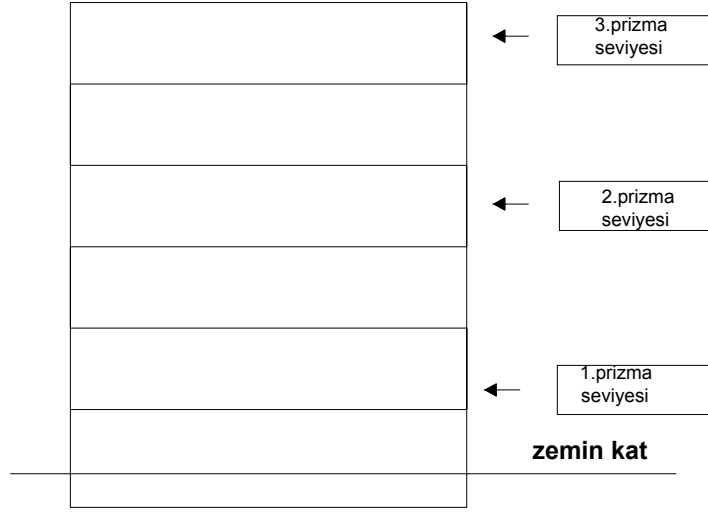
Şekil 4.2 SMP okumalarının alınmasıyla ilgili bir uygulama

Ayrıca bir teodolit yardımıyla da hat çevresindeki kritik bölgelerde bulunan binaların deformasyonları gözlemlenebilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Reflektör lazer ve bina ölçüm uygulaması

Bina inceleme prizmaları bina cephelerine, yapısal olarak temel nitelikteki noktalara ve bina yüksekliğine göre farklı seviyelere sıkıca sabitlenmelidir. İki katlı binalar için (zemin kat + 1 normal kat) bir seviyede prizma, beş kata kadar binalarda (zemin kat + 4 normal kat) iki seviyede prizma, beş kattan daha yüksek binalara Şekil 4.4’de gösterilen diyagramda gösterildiği gibi en üst kata bir ek prizma seviyesi monte edilmelidir (0togar-Bağcılar Hafif Metro projesi Temel İzleme Tasarımı Teknik Şartname, 2005)



Şekil 4. 4 BMP okumalarında prizma seviyeleri

4.3 İnklinometreler (Eğilme Ölçerler)

İnklinometreler, tünel kazısı sırasında oluşabilecek yatay yöndeki deformasyonları ve bunların kaynağını belirlemek için kullanılırlar. Sondaj aksı boyunca oluşabilecek deformasyonlara ait profil detaylı olarak çıkarıldığından dolayı hareketin kaynağı da tespit edilmiş olur.

İnklinometreler, tesis edilmiş bir tüpün eğilme açısını ölçme prensibine göre yapılmışlardır. Aygıt, bir algılayıcı, kablo, kablo makarası ve okuma tertibatından oluşmaktadır ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilmiştir (Şekil 4.5).

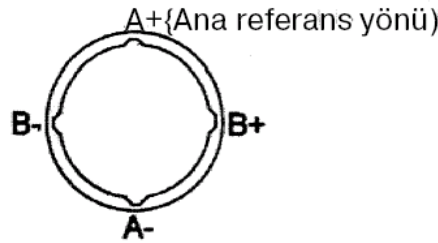


Şekil 4.5 İnklinometre ölçüm düzeneği

İnklinometre sondaj yerleri, beklenen hareketin yön ve büyüklüğü göz önüne alınarak, zeminin jeolojik hareketinin incelemesi sonucu seçilirler. Daha sonra inklinometre borusu

birbirine eklenmek suretiyle doğru bir şekilde montajları yapılır ve sonra da sondaj deliği içine yerleştirilirler.

İnclinometre borusunun içinde birbirine dik açıyla duran dört adet yarık bulunmaktadır. Bu yarıklar bütün boru boyunca devam etmektedir. Bu yarıkların karşılıklı iki tanesi A yarıkları, diğer ikisine de B yarıkları isimleri verilmiştir (Şekil 4.6). İnclinometre borusu yerleştirilip çimento enjeksiyonu prizini alır almaz ilk okuma alınmalıdır. Daha sonra yapılacak bütün ölçümler bu ilk referans ölçümüne göre değerlendireceğinden referans ölçümü en önemli ölçümdür. Bu nedenle referans okumalarını iki kez yapmakta yarar vardır. Yapılan okumaların birbirine uyumlu olup olmadığı kontrol edilmelidir. En az iki set okumanın uyum içinde olduğu görüldüğü takdirde referans okumalarının sağlıklı bir şekilde gerçekleştirildiği varsayımı yapılabilir.



Şekil 4.6 İnclinometer borusu en kesiti

Bir okuma ya da bir set okuma şu şekilde yapılmalıdır; öncelikle probun tekerlekleri borunun yarıklarına oturur. Bu işlem yapılırken bu ilk ölçüm için probun ön yüzünün A^+ yönü ile karşılaştırılmasına dikkat edilmelidir. Borunun içine yerleştirilen prob yarıklarından hareket ederek borunun en alt noktasına kadar indirilir. Hassas ölçüm aleti olan probun yeraltı ve yerüstü arasındaki sıcaklık farkına uyum sağlaması için ilk ölçüm alınmadan önce kısa bir süre beklenilmesinde yarar vardır. İlk ölçüm alındıktan sonra (A^+ ve B^+ değerleri) prob bir üst seviyeye çekilir ve aynı işlem tekrarlanır.

Okuma seviyeleri genellikle okuma ünitesi ile prob arasındaki bağlantı elektrik kablosunun üzerinde belirlenmiştir. Karışıklığa sebep olmamak için okuma aralıklarını kablo üzerindeki aralıklarla eşit yapmakta fayda vardır. Okuma aralıkları genellikle 0.5 m'de bir yapılmalıdır. Bununla birlikte okuma aralıklarını belirlemek ölçümü yapan kişinin değerlendirilmesine kalmaktadır.

Her seviyede okumalar alınmakta ve okuma ünitesine kaydedilmektedir. En üst seviyedeki okuma da alındıktan sonra prop borudan çıkarılır ve bu sefer 180° döndürülerek yeniden borunun içine yerleştirilir. Bu durumda probun ön yüzü A^- yönü ile karşılaştırılmıştır. Borunun

en alt seviyelerinden itibaren yukarıda anlatıldığı gibi yeniden prop okumaları alınır. Bu şekilde bir set okuma tamamlanmış olur.

Çift transdüserli bir prob aynı anda birbirine dik olan iki ekseninde de ölçüm yapabildiği için bu tip bir probta çalışıldığı durumda B yarıkları ile ölçüm yapmak gerekmemektedir. Tek transdüserli bir prob da ise B yönü yarıkları için de tekrarlanması gereklidir.

Bir inklinometre borusundan alınacak ölçümlerin sıklığı başta deformasyonların hızı olmak üzere değişik etkenlere bağlıdır. Bunun için ilk önce borunun yerleştirmesinden sonra sık sık okumalar alınmalı, oluşan deformasyonların hızına göre optimum bir okuma sıklığı belirlenmelidir(SIS Geo, 2006).

4.3.1 İnklinometre Gözlemlerin Hassasiyetini Etkileyen Etkenler

İnklinometrik gözlemin hassasiyetini etkileyecek bazı etkenler aşağıdaki şekilde belirlenmektedir. Bununla birlikte unutulmamalıdır ki ölçümleri en çok etkileyebilecek etken insan etkisidir. Borunun yerleştirilmesinden okumaların alınmasına kadar, ölçümü yapan kişilerin bilgili ve deneyimli olmaları gereklidir.

4.3.1.1 Transdüserlerin Hassasiyeti

Üretici firmalar normal koşullarda ürettikleri transdüserlerin hassasiyetini ve hata paylarını belirtmektedir. Bu hata payının ölçüm için gerekli olan hassasiyeti sağlaması önemli bir etkidir.

Transdüserin yanlışları başlıca üç kategoriye ayrılabilir. Kalibrasyon sırasında yapılabilecek yanlışlıklar olabilir. Bu durum probun inceliğini önemli bir ölçüde etkileyecektir. Ayrıca ofset yanlışlığı olabilir. Ofset yanlışlığı probun tam düşey durumda durması durumunda okuduğu değerdir. Bunların yanında bir de transdüserin eksenine probun tekerleklerinin eksenine arasında bir miktar dönme bulunabilir. Bu da probun hassasiyetini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

4.3.1.2 Probun Tekerleklerinin Durumu

Probun tekerlekleri iyi bir şekilde tasarlanmış olmalıdır. Uzun vadeli kullanımda yaylı oldukları için en çok tekerlekler aşınmaktadır ve zarar görmektedirler. Bu gibi bir durum oluştuğunda tekerleklerin kolayca değiştirilebiliyor olması gerekmektedir. Ayrıca tekerleklerin yerleştirilme konumları inklinometre borusunun yarıklarına oturabilecek şekilde uyumlu olmalıdır.

4.3.1.3 Probuun Doğrusallığı

Yatay deplasmanların ölçümlerini sağlayan düşey boru ne kadar düşeylikten uzaklaşırsa yapılan ölçümün hassasiyetini de azalacaktır.

Daha Geniş Çaplarda Boru Kullanılması ölçümün hassasiyetini arttırıcı yönde etki yapar. Boru çapı büyüdükçe burulma riski de azalacaktır.

4.3.1.4 İnklinometre Kuyusunun Doldurma Biçimi

Kuyunun iyi biçimde doldurulmaması borunun sabit bir konumda durmasını engelleyecektir. Bu da her okuma da farkı değerlerin elde edilmesine dolayısıyla ölçümün hatalı olmasına yol açabilir. Kuyu borunun yerleştirilmesinden hemen sonra çok iyi şekilde doldurulmalıdır. Çimento enjeksiyonu doldurma işleminde genellikle daha iyi sonuç vermektedir.

4.3.1.5 Borunun Düzlüğü

İnklinometre borusu kuyunun içine yerleştirildiği zaman belirli bir açısal dönme yapabilmektedir. Bu dönme alüminyum borular için 30 m'de 1 dereceye kadar varabilmektedir. Özellikle plastik abs boruları yerleştirme işleminden önce güneş ışığı altında bırakılmamalıdır. Güneş ışığı borunun düzlüğüne olumsuz yönde etki edebilmektedir.

4.3.1.6 Okumaların Tekrarlanabilirliği

İnklinometrelerden alınan okumalara hep aynı derinliklerden başlanmalıdır. Kablonun üzerindeki derinlikler doğru ve kalıcı şekilde işaretlenmelidir.

4.3.1.7 Sıcaklık Etkisi

Öncelikle transdüserli problar sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenirler. Bu durumda prob yeraltına indirildiğinde veya suya indirildiğinde sıcaklık farkından dolayı okumalarda değişimler görülebilir ve hatalı okumalar yapılabilir. Prob kuyuya indirildiğinde okumaya başlanmadan önce bir süre beklenilmesi sıcaklık farkından dolayı oluşabilecek hatalara karşı bir önlem olarak düşünülebilir.

4.4 Ekstansometre (Genleşme Ölçer)

Ekstansometreler, sondaj kuyusu boyunca zemin profilinde oluşan hareketleri ölçmek için kullanılan hassas cihazlardır. Ekstansometreler,

- Yeraltı deliklerindeki düşey ve yatay deformasyonları gözlemlenmede,
- Tünellerde ve tünel yolu çalışmalarında,

- Baraj ve termik santral yapılarında,
- Eksenel deformasyon verileri geliştirmede sıklıkla kullanılırlar.

Ekstansometre ölçüm düzeneği bir algılayıcı, kablo, kablo makarası ve okuma tertibatından oluşmakta olup ekstansometre korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Ekstansometre ölçüm düzeneği

İnklinometre-ekstansometre borusundaki 1 metre mesafede yerleştirilen magnetik ringler zeminin oturması nedeniyle birbirine yaklaşmaktadır. Ekstansometre bu mesafeleri tespit ederek zeminin oturma değerini ölçmektedir.

Ekstansometre üzerinde magnetik ringlerin uzaklığını ölçen sensörler vardır. Tipik olarak ölçüm, kuyunun başından başlatılmakta ve kuyu dibine doğru devam etmektedir. Ölçümler genellikle her bir metre için okunur ve kaydedilir.

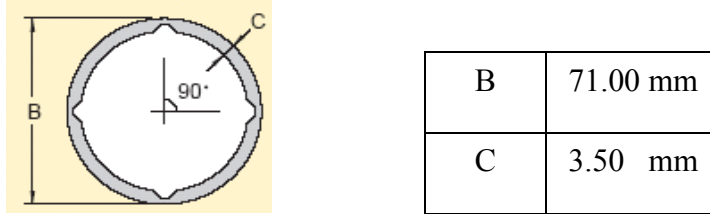
İnklinometre-ekstansometre borusu belirlenen kuyuya yerleştirildiğinde ekstansometre ile ringler arası mesafeler ölçülür. Bu değerler baz değer olarak kabul edilir. Daha sonra belirli aralıklarla ekstansometre ölçümleri tekrarlanır ve bu ölçümler baz ölçüm değerleriyle kıyaslanır. Eğer ringler arası mesafe azalmış ise sıkışma (oturma), mesafe artmışsa kabarma (şişme) gerçekleşmiştir.

Genellikle ölçülen veriler, yerel (her derinlikteki noktanın yer değiştirmesi) ve toplam (her noktadaki yukarıdan aşağıya toplam yer değiştirmesi) olarak tablo ve grafiksel olarak düzenlenir (SIS Geo, 2006).

4.5 İnklinometre- Ekstansometre Borusunun Yerleştirilmesi

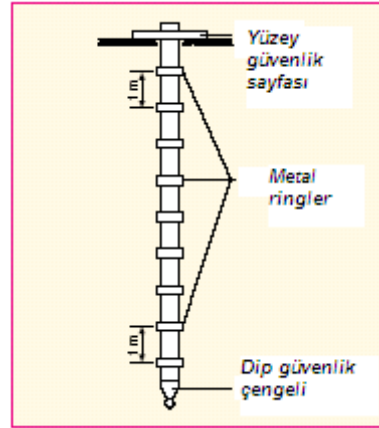
4.5.1 İnklinometre-Ekstansometre Borusu

İnklinometre boruları yapıldıkları malzemeye göre üç tip olabilmektedir. Alüminyum, fiberglas veya ABS plastik. Her üç tür borunun da içlerinde birbirine dik açılar yapan dört adet yarık bulunmaktadır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Ekstansometre-inklinometre borusu en kesit

Bu tezde incelenen proje için kullanılan ABS plastik boruları özel olarak inklinometre ve ekstansometre ölçümleri için üretilmiştir. Dış çapları 71 mm olmakta ve uzunlukları da standart olarak 3 m olmaktadır. Bu malzemenin 350 kPa kadar basınç dayanımı vardır. Boruların birleşmesi için özel birleşim parçaları kullanılmakta ve her 1 m'de bir ekstansometre ölçümleri için metal manyetik ring yerleştirilmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 İnklinometre-ekstansometre borusu boy kesit

4.5.2 Borunun Yerleştirilmesi

İnklinometre-ekstansometre borusunun yerleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem, 100-200 mm çapında düşey bir kuyu delgisi yapmak ve boruyu bu kuyunun içine indirmektir. Kuyu derinliğinin, deformasyon yapması beklenen kesitlerden daha derin olması gerekmektedir. Bu şekilde, boru hiç deformasyon yapmayacağı kabul edilen bir derinliğe ankastre edilecek, deforme olan kesitte ölçülecek deformasyonlar sabit bir noktaya göre

göreceli deformasyonlar olacaktır. Borunun çevresi granüler dolgu veya çimento enjeksiyonu ile doldurularak bulunduğu yere sabitlenmelidir. Boru içine çimento enjeksiyonu veya herhangi bir başka yabancı madde sızıntısını engellemek için boruların birleşim yerleri ve alt kapağı çok iyi izole edilmelidir. Bu yalıtım da yapılacak herhangi bir hata borunun tamamen kullanım dışı kalmasına neden olabilir. Boruların birbirine montajı esnasında yarıkların birbirini tam karşıladığından emin olunmalıdır. Bu işlemde yapılacak hata borunun kullanılamaması sonucuna neden olur.

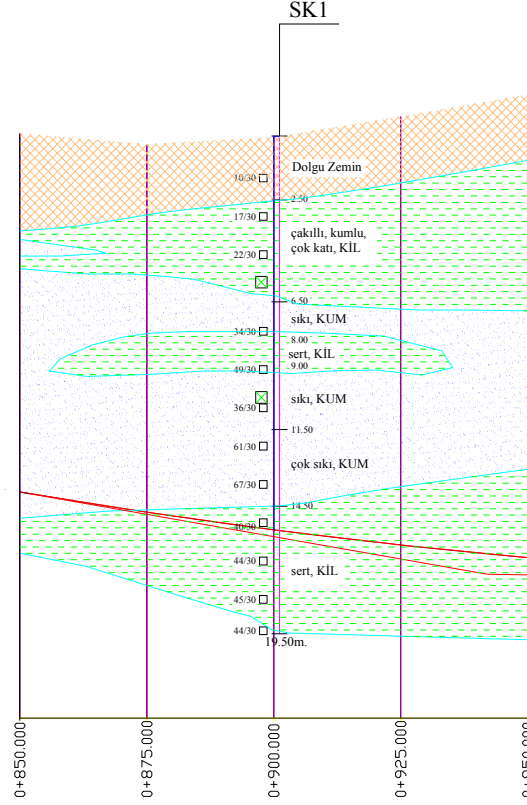
Borunun boyu 15 m den fazla olduğu zaman burulma kontrolü de yapılmalıdır. Uç uca eklendiği zaman çok narin bir yapıya sahip olan inklinometre-ekstansometre boruları (özellikle de plastik oldukları için) önemli burulma potansiyeline sahip olurlar. Bu nedenle boru kuyuya indirilirken burulma yapmamasına özen gösterilir. Aksi halde ölçülerin hatalı sonuç vermesine yol açabilir. Boru yerine yerleştikten hemen sonra üst kapağı kapatılmalı boru koruma altına alınmalıdır. Bazen çok sert kayalı zeminler de kesme kuvvetlerinden dolayı boru kırılıp kullanım dışı kalabilmektedir (SIS Geo, 2006).

SİSTEM	ALT SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA
KUVATERNER			Alüvyon	Qal		Çakıl-kum-silt-kil
TERSİYER	MİYOSEN	ÜST MİYOSEN	Bakırköy	Tb		Çoğunlukla kil-marn arakatlı, beyaz, kirli beyaz, Kireçtaşı. Bol maktra fosilli, kırılğan ince tabakalı
			Güngören	Tg		Sarı-gri kil ve marn ardalanması ince tabakalı laminalı maktralı
			Çukurçeşme	Tç		İnce orta daneli kumkötü boylanmış çakıl. Yer yer kil-silt katmancıkları
	OLİGOSEN	ÜST OLİGOSEN	Gürpınar	Tog		Çoğunlukla, gri kil, kiltası, silttaşı ardalanmaları. İnce orta tabakalı, tabanda kum çakıl içerikli
			Kırklareli	Tek		Üstte sarı-beyaz şeyl, kiltası alta doğru gri marn, beyaz resifal kireçtaşı. Kireçtaşı kumtaşı geçişleri sert ve orta sert
	EOSEN	ORTA ÜST EOSEN				
KARBONİFER		ÜST ORTA ALT	Trakya	Kt		Şeyl, koyu gri, türbidit kumtaşı-çamurtaşı ara tabakalı

Şekil 5.2 İstanbul'a hakim olan formasyonlar, (Oktay ve Eren, 1994)

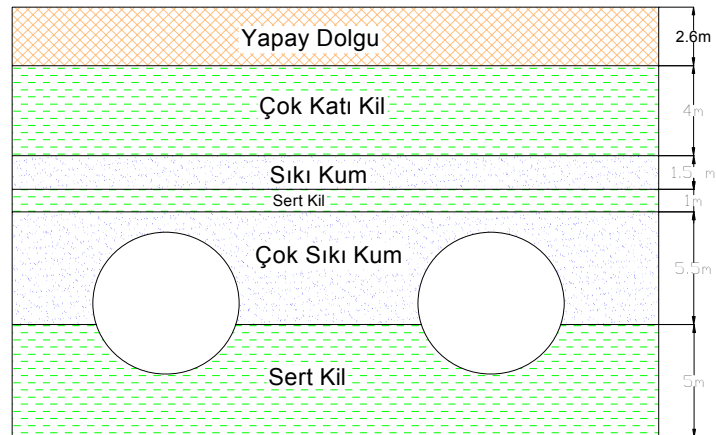
Proje alanı 2. derece deprem kuşağı içinde yer almakta ve bölge Kuzey Anadolu fay zonunun Marmara denizi içlerine uzanan batı kollarının etkisi altındadır. Bölgeyi etkileyebilecek olan depremler KAF zonunda meydana gelecek olan depremlerdir. Bu fay zonundaki hareketlilik halen devam etmektedir ve yakın geçmişte büyük hareketler olmuştur. Bu nedenle tünel 10 şiddetinde depreme dayanıklı olacak şekilde dizayn edilmiştir. İncelenen tünel kesimi KM 0+850 ile KM 0+950 arası zemin profili için SK1 sondajından yararlanılmıştır. 19.5 m

derinlikte açılan SK1 sondajına göre yüzeyden itibaren üstte 2.5 m kalınlığında çakıllı-kumlu bir dolgu tabakası ve bunun altında ise yüzeyden 14.50 m derinlikteki kil tabakasına kadar sırası ile 2.5 m kalınlıkta bir kum, 1 m kalınlıkta bir kil ve 5.50 m kalınlıkta bir kum tabakası yer almaktadır. Bu kesimin jeolojik kesiti Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 KM (0+850)-(0+950) arası jeolojik durum

KM 0+900 tünel en kesit profili ise Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 KM 0+900 tünel en kesit profili

Sondajlar sırasında belirli aralıklar ile SPT deneyleri yapılmıştır. Zemin profilini oluşturan tabaka kalınlıkları ve her tabaka için ortalama SPT(N) değerleri ve zemin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Zemin tabakaları özellikleri

Tabaka İsmi	H tabaka kalınlığı (m)	birim hacim ağırlık γ (KN/m ³)	içsel sürtünme açısı ϕ (°)	Kohezyon c' (KN/m ²)	Ortalama SPT (N)
Yapay Dolgu	2.6	18	22	5	10
Katı Kil	4	18	26	5	22
Sıkı Kum	1.5	19	37	-	60
Sert Kil	1	19	28	5	49
Çok Sıkı Kum	5.5	19	42	-	60
Sert Kil	5	20	28	10	45

5.1.3 Tünel Kazı Yöntemi

Güzergâh üzerinde ve civarında bulunan yapılaşma göz önüne alınarak yapılan fizibilite çalışmaları sonucu tünelin kazılmasında zemin basıncını dengeleyen (EPB) tam cephe kazı yapabilen tünel açma makinesi TBM ile iyi sonuç alınabileceğine karar verilmiştir. TBM’in zırh (Şild) çapı 6.38m kesici kafa ise 6.40m çapındadır. Kazılan malzeme kazı odasının tabanına bağlı bir burgulu (screw) konveyör vasıtası ile dışarı alınmaktadır. Ayna yüzeyindeki basıncın izlenebilmesi için kazı odasında farklı seviyelerde ve burgulu konveyörde basınç sensörleri bulunmaktadır.

Zemin özelliğine bağlı olarak bentonit bulamacı veya köpük malzemesi ile “zemin dengelemesi” yapılmaktadır. Çakıllı kumlu bölgelerde dengeleme köpük ile killi ve siltli kısımlarda bentonit bulamacı ile sağlanmaktadır. Zemin dengelemesi ile zemin özellikleri iyileştiğinden ayna stabilitesi daha güvenli bir şekilde sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra kesme kafasına gelen yük azalmakta ve kazılan malzeme kolaylıkla dışarıya alınabilmektedir.

5.1.4 Segmentler

Bir halka iç çapı 5.70m olacak şekilde 5 çember yayı ve bir de anahtar konumunda olan segment ile toplam 6 parçadan oluşmaktadır. Bu segmentlerin kalınlığı 30 cm olup genişliği 120 cm’dir. Segmentlerin diziliş sırası gidiş yönüne göre değişmektedir. Anahtar segmentin pozisyonu ile birlikte 14 farklı kombinasyon yerleştirilebilmekte ve bu sayede yatay ve düşey dönüşler sağlanmaktadır. Segment parçaları şekil 5.5 de gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Segment parçaları

Kazı alanı ile segmentler arası dolgu harcı ile doldurulmaktadır. Harcın içine ince kum ve çimento dışında iki çeşit katkı maddesi daha ilave edilmektedir.

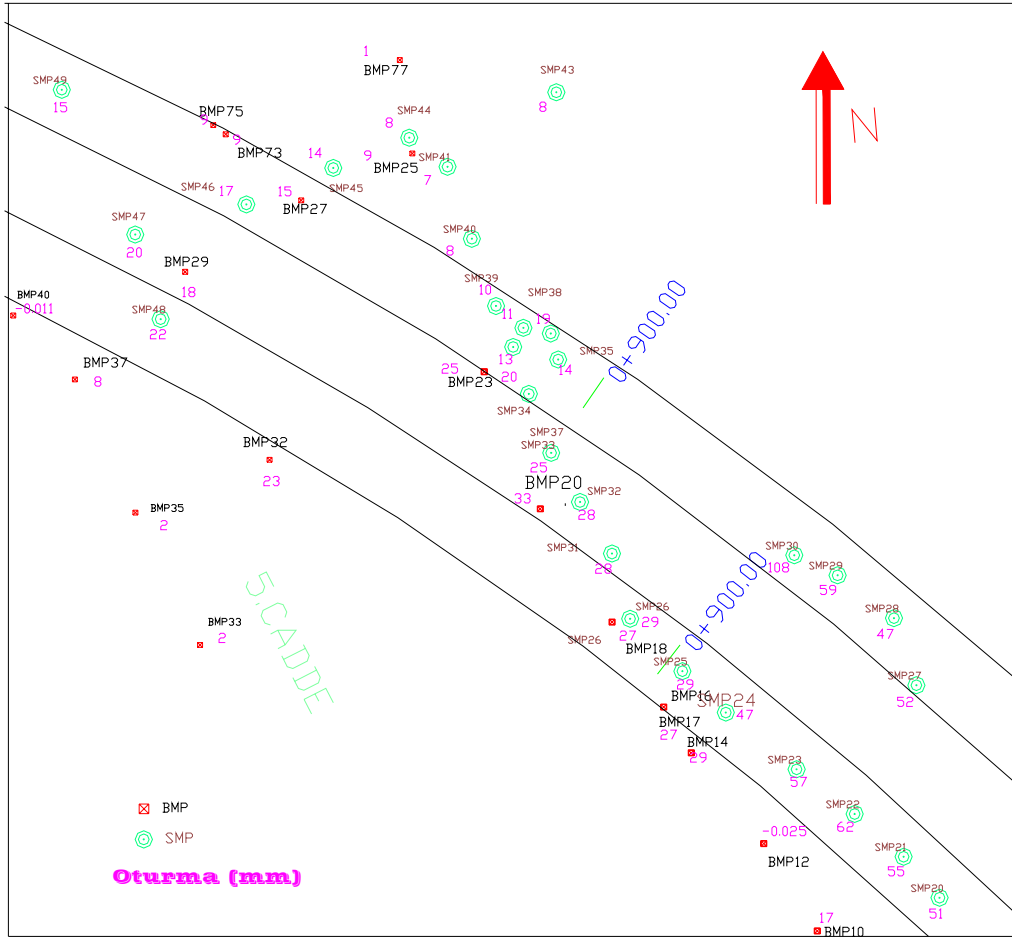
Yerine ulaşan harcın çabuk betonlaşmasını sağlamak amacıyla tünel içinde de segment ile kazı alanı arasındaki boşluğa bir katkı maddesi pompalanmaktadır.

5.1.5 Kazı uygulaması

Kazı işlemi kazma ve kaplama olmak üzere iki aşamada yapılmaktadır. Kazı işlemi için motorlara güç verilmesiyle kazıcı kafa saat yönünde dönerek kazmaya başlamakta ve itme silindirleri ile segmentlere dayanarak makine hem ileri doğru hareket etmekte hem de ileri doğru kazıyı gerçekleştirmektedir. Kazı yapılırken de dizilmiş olan segmentler ile kazı alanı arasında kalan boşluğa beton harcı pompalamaktadır. Bir segment boyu ilerleme olduğunda kazı işlemi duraklatılıp segmentler yerleştirilmektedir. Yerleştirilmiş segmentin bulunduğu bölgedeki itme silindirleri çekilerek segmentler erektör ile yerine konulmaktadır. Erektör 3 yönlü hareket kabiliyetinde ve segmentleri tutabilecek vakumlu kola sahip olup normal şartlarda 24 saatte 12-16 arasında segment yerleştirebilmektedir.

5.2 Aletsel Gözlem

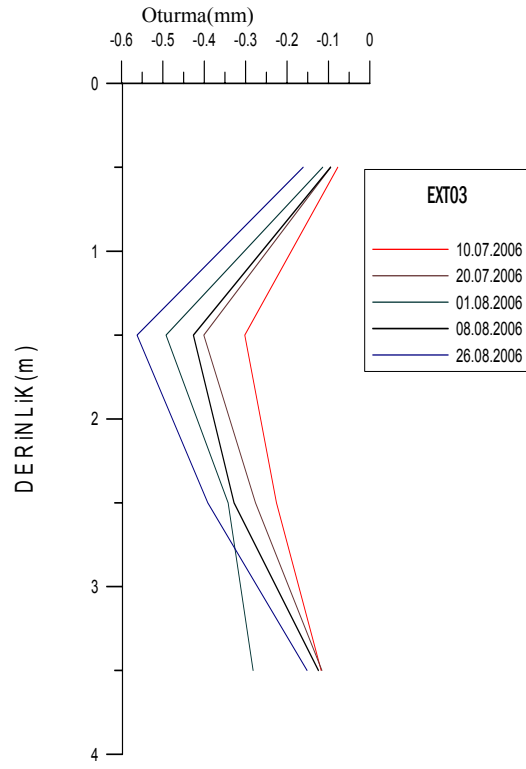
Kazı işlemine başlamadan önce kazı faaliyetlerinden kaynaklanacak yeryüzü oturma hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla tünel güzergâhı boyunca zemin yüzeyinde ve binalarda oturma ölçüm noktaları tesis edilmiştir. 25 Eylül 2006 tarihine kadar 90 adet yüzey ölçüm noktası (SMP) ve binalarda da 73 adet ölçüm noktası (BMP) yerleştirilmiştir. SMP ve BMP konumları ve ölçüm oturma değerleri plan üzerinde Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



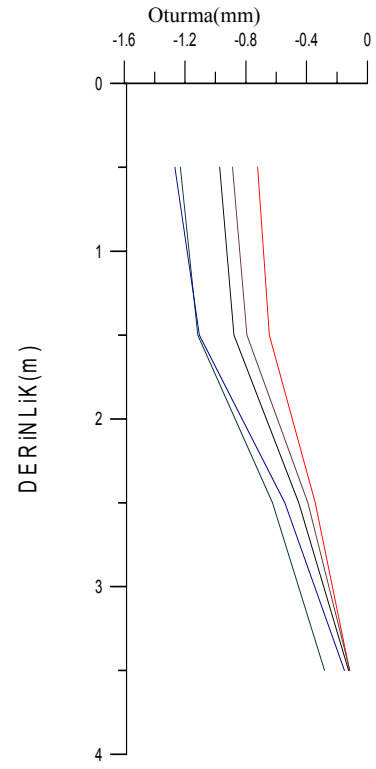
Şekil 5.6 SMP ve BMP oturma değerleri (m)

Zemindeki yanal ve düşey hareketlerin izlenmesi amacıyla Eylül 2006'ya kadar toplam 22 adet inklinometre-ekstansometre ölçüm kuyuları oluşturulmuş, ayrıca tünelin etki alanı içinde yer alan bütün yapılarda fotografik durum tespiti yapılmış olup yapısal kusurlar kayda alınmıştır. KM 0+850-KM 0+950 arası ekstansometre ve inklinometre okumaları grafiksel olarak Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Ekstansometre grafiklerinde (-) okumalar oturma değerlerini, (+) okumalar ise kabarma değerlerini göstermektedir. Ayrıca tünel'in başlangıç noktasına yakın çevrede, dere yatağı ve dolgu malzemesi olmasından dolayı, tünel hattı bu bölgeden geçene kadar bu bölgenin içinde ve kritik olacak kadar yakın mesafede bulunan evler yüklenici tarafından kiralanıp boşaltılmıştır.

YEREL :

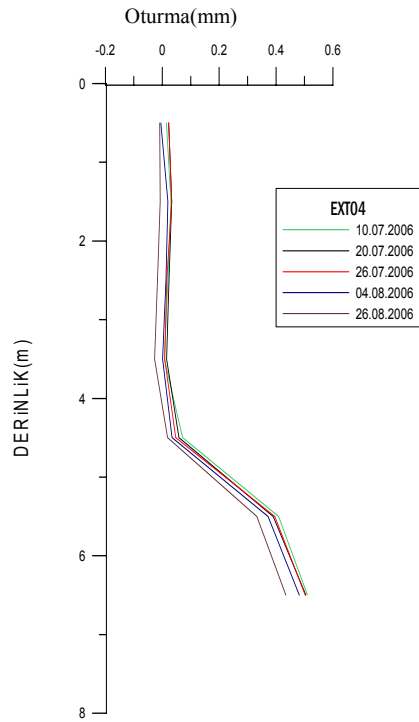


TOPLAM:

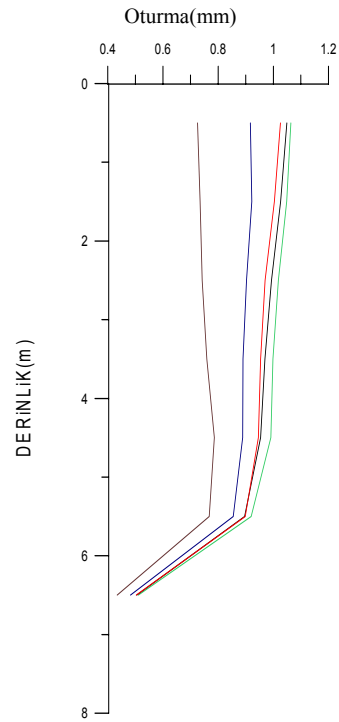


Şekil 5.7.a Ekstansometre 3' de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri

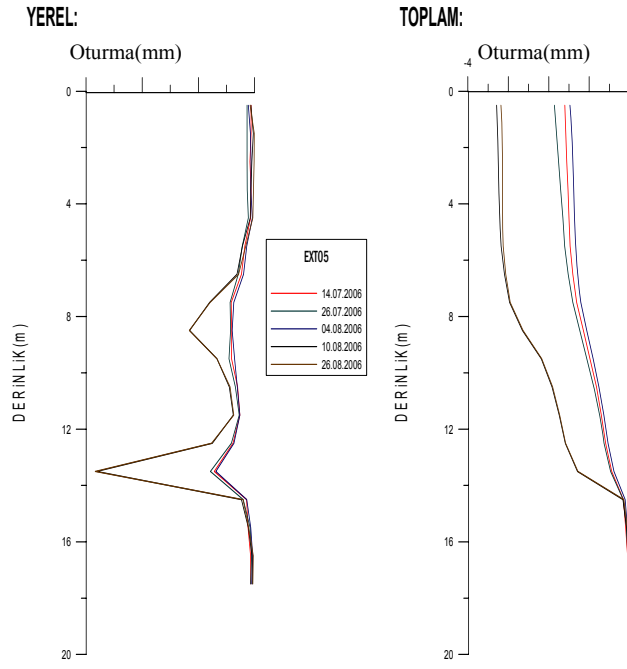
YEREL:



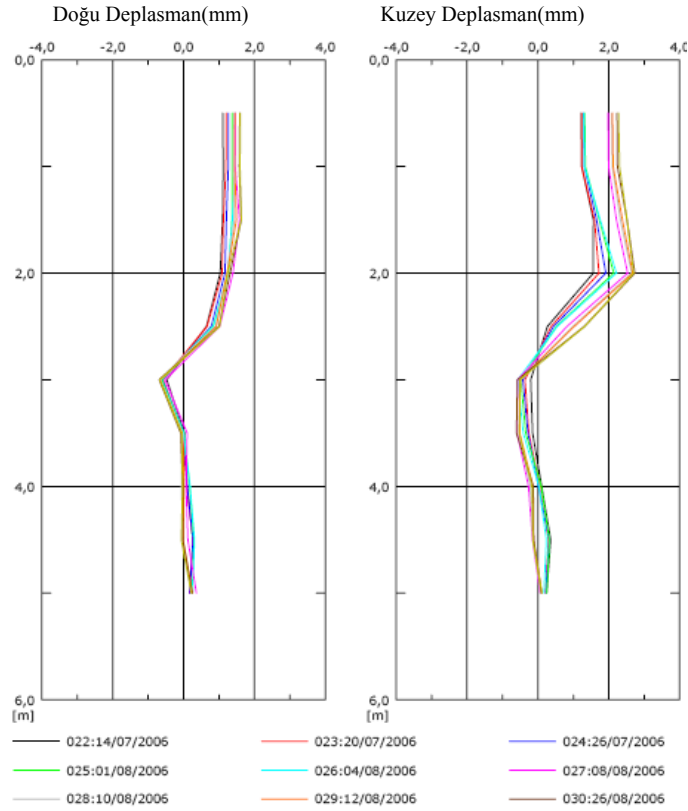
TOPLAM:



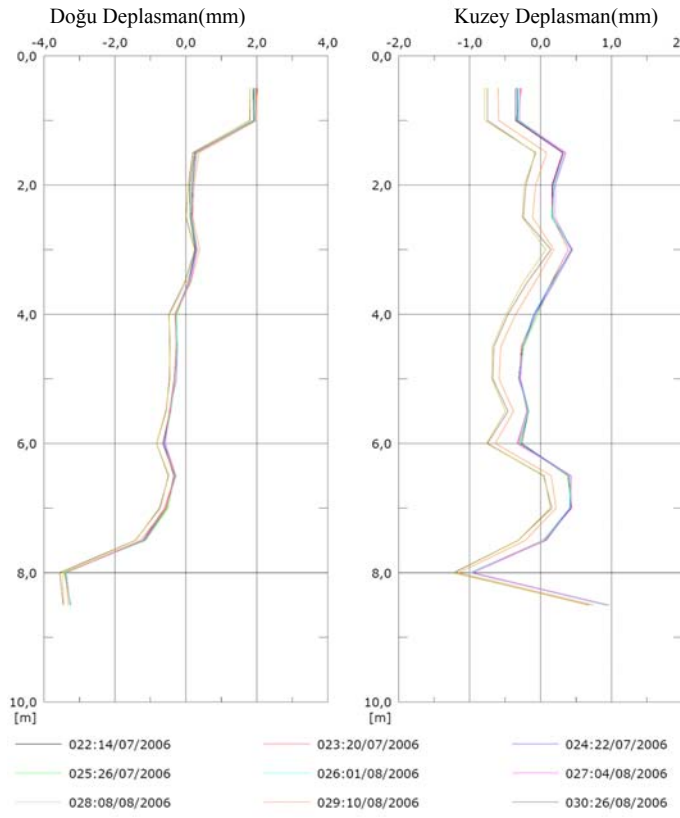
Şekil 5.7.b Ekstansometre 4' de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri



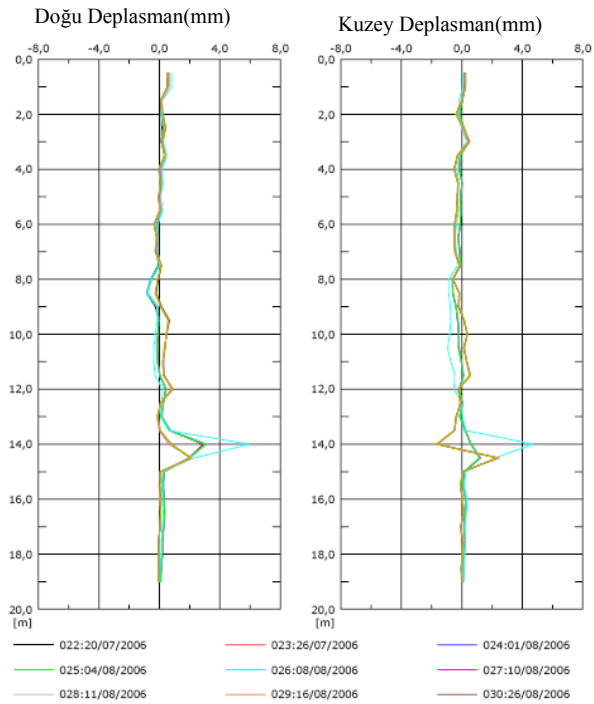
Şekil 5.7.c Ekstansometre 5 'de zamana bağlı oturma-derinlik eğrileri



Şekil 5.7.d İnklinometre 3 'de zamana bağlı yanal deplasman-derinlik eğrileri



Şekil 5.7.e İnklinometre 4 de zamana bağlı yanal deplasman-derinlik eğrileri



Şekil 5.7.f İnklinometre 5 de zamana bağlı yanal deplasman-derinlik eğrileri

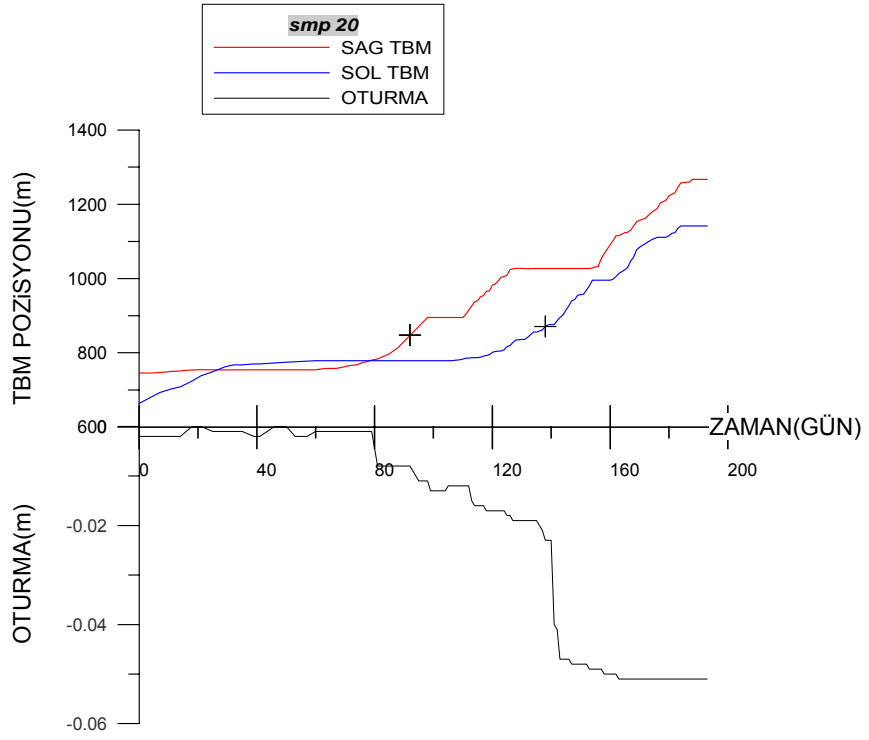
5.2.1 Yüzey Oturma Plakaları (SMP) Ölçümleri

Kazı işlemine başlamadan önce, kazı faaliyetlerinden kaynaklanacak yeryüzü oturma hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla tünel güzergahında zemin yüzeyinde oturma ölçüm noktaları tesis edilmiştir. 25 Eylül 2006 tarihine kadar tesis edilen zeminde yüzey ölçüm plakası (SMP) sayısı 90 adettir.

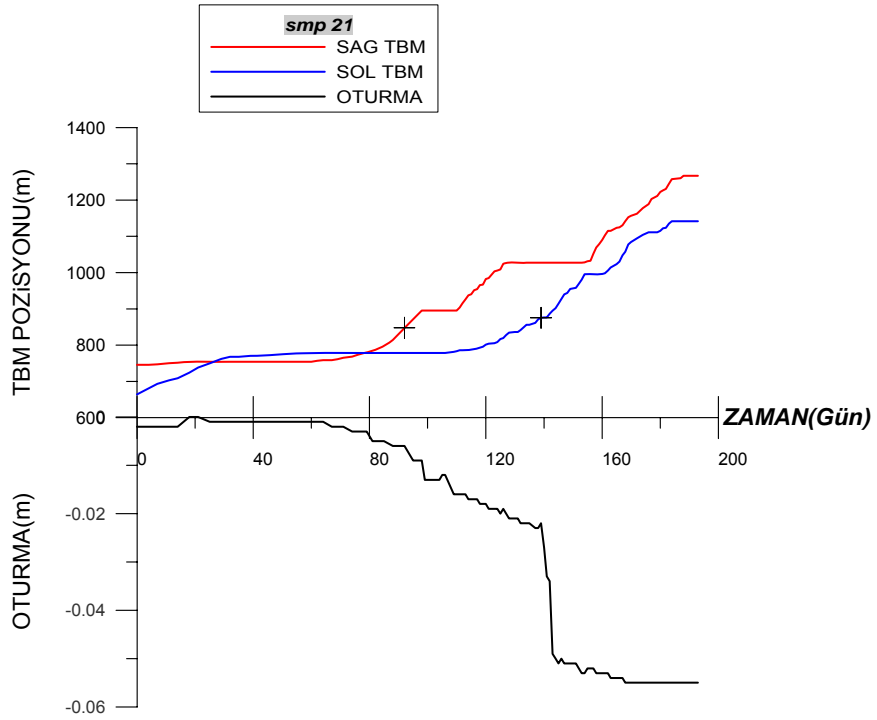
TBM'lerin hareketi ile birlikte, Bölüm 3'de değinildiği gibi, zeminde bir takım oturmalar ve deformasyonlar oluşmaktadır. Zemin yüzeyindeki oturma değerleri (SMP-yüzey oturma noktaları) hassas olarak nivo ile ölçülerek belirlenmektedir. Bu oturmalar TBM'in hareketi ve konumu ile ilişkilidir. Doğal olarak, SMP oturma değeri ile TBM-SMP arasındaki mesafe birbiriyle ters orantılıdır. Dolayısıyla TBM SMP noktasına yaklaştığında oturma değeri de artmaktadır. Şekil 5.8'de bazı SMP'lerin oturma değerleri makinelerin hareketine bağlı olarak gösterilmektedir. Grafiklerin üst kısmında makinelerin hareketi zaman değişimi ile gösterilmiştir. Okumaların birinci günü (16 Mart 2006) TBM'lerin çalışma başlangıç günü olarak kabul edilmiştir. Sonraki günler sırayla bu gün baz alınarak numaralanmıştır. Örneğin 12.06.2006 günü 88 ve 25.09.2006 günü de 200 değerini almıştır.

Bu tez çalışmasının kapsamı içindeki SMP değerleri 200 gün içinde gerçekleşen makine hareketlerinin oturmalara etkisini dikkate almış ve 25 Eylül 2006 TBM'lerin son hareket günü olarak kabul edilmiştir. Bu tarihten sonraki TBM hareketinin belirlenen SMP'lere etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. TBM hareketi zaman-km değişimi ile grafiğin üst kısmında gösterilmiştir. Alt kısımda ise okunan SMP oturma değerleri yine 16 mart 2006 tarihi baz alınarak metre (m) cinsinden çizilmiştir.

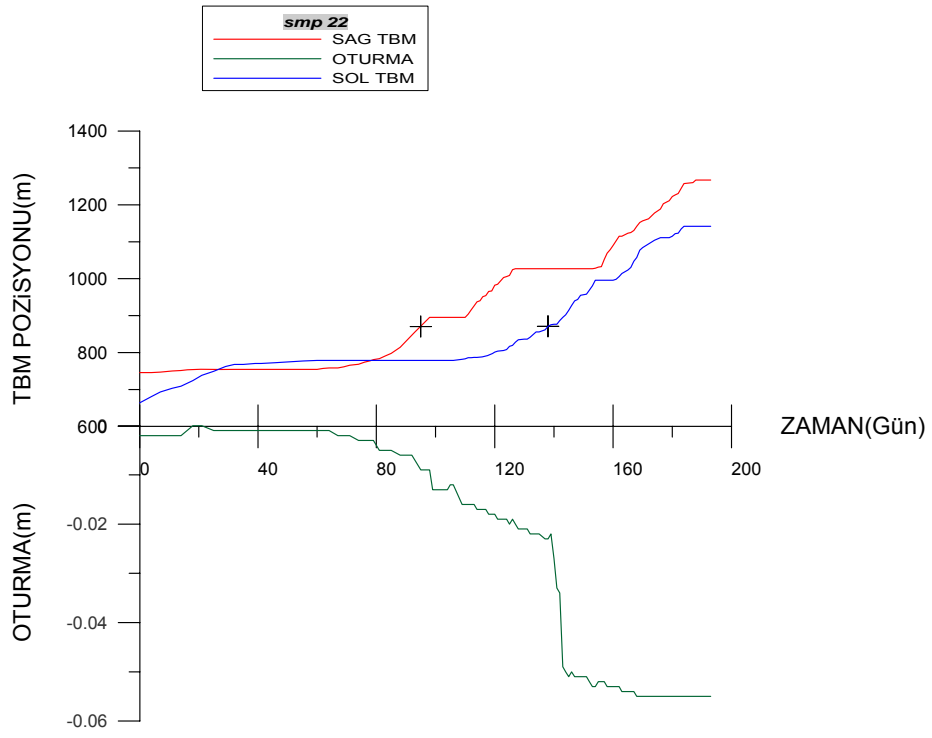
Grafiklerin üst kısmında iki artı işareti görülmektedir. Bu işaretler, SMP'nin km'sini göstermektedir. Örneğin SMP 35 için çizilmiş olan grafikte SMP'nin km'si 0+921,14 her iki makinenin hareketi için gösterilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere TBM tam SMP noktasının altında olduğu zaman SMP oturma değerinde ani bir artış gerçekleşmektedir.



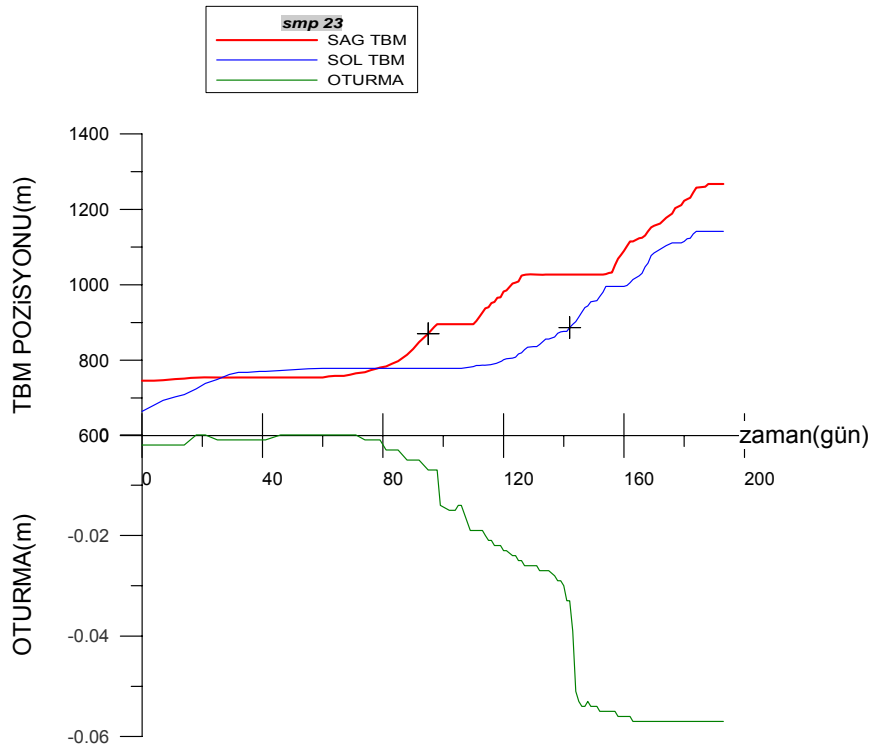
Şekil 5.8.a SMP 20 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



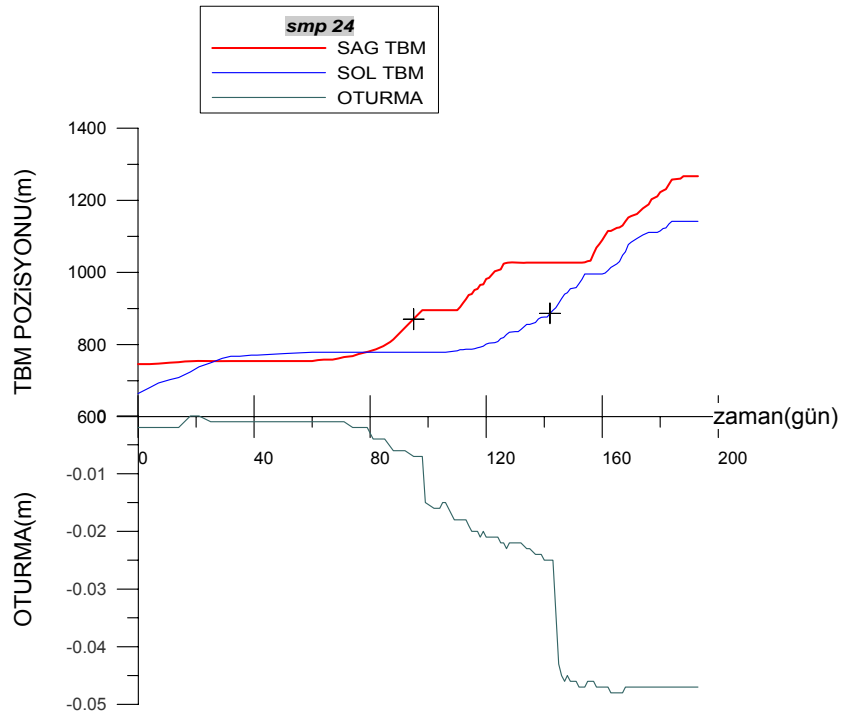
Şekil 5.8.b SMP 21 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



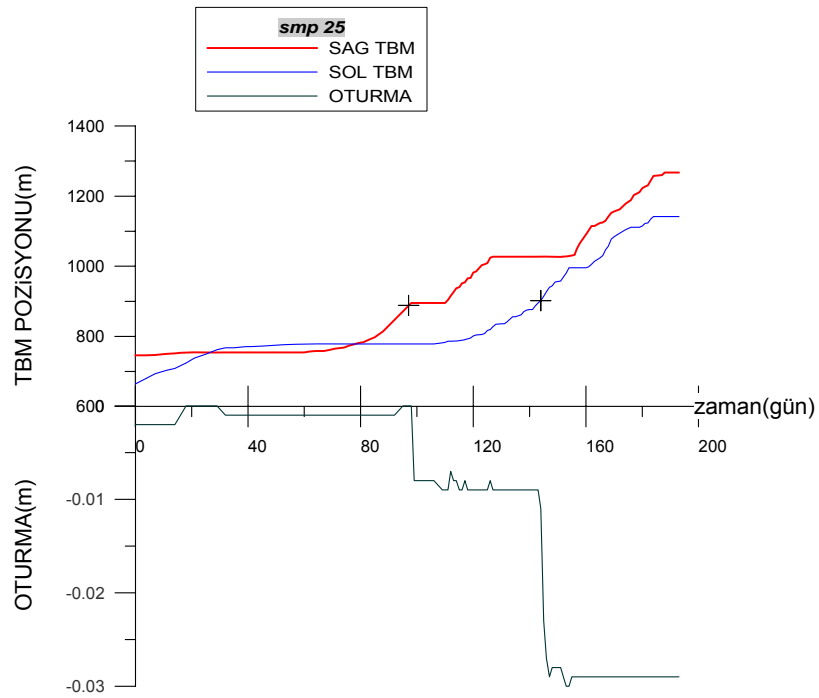
Şekil 5.8.c SMP 22 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



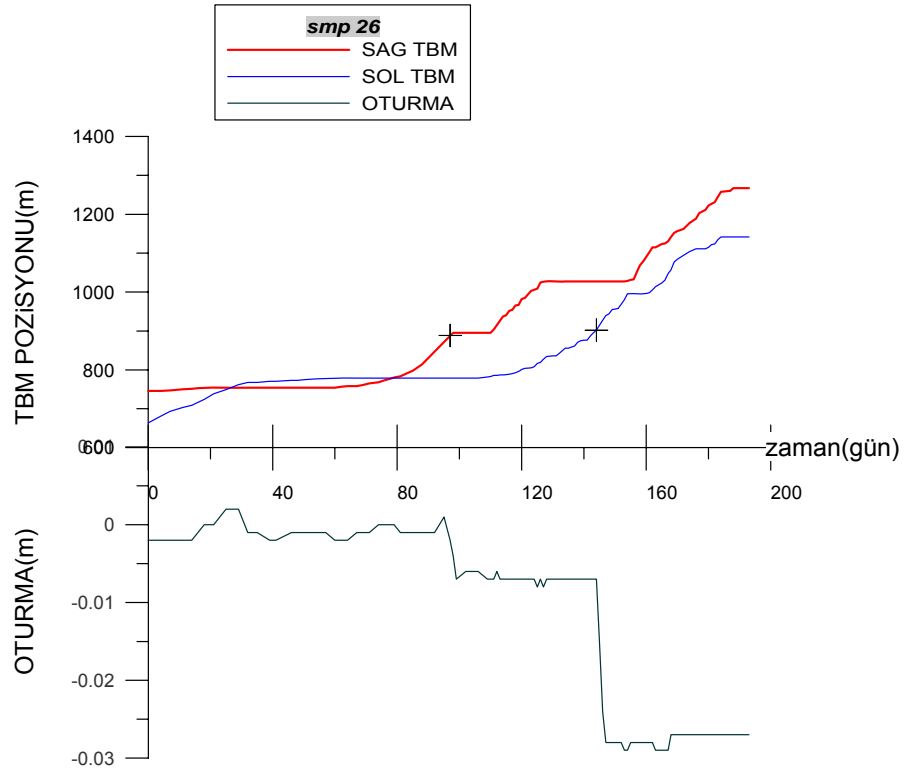
Şekil 5.8.d SMP 23 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



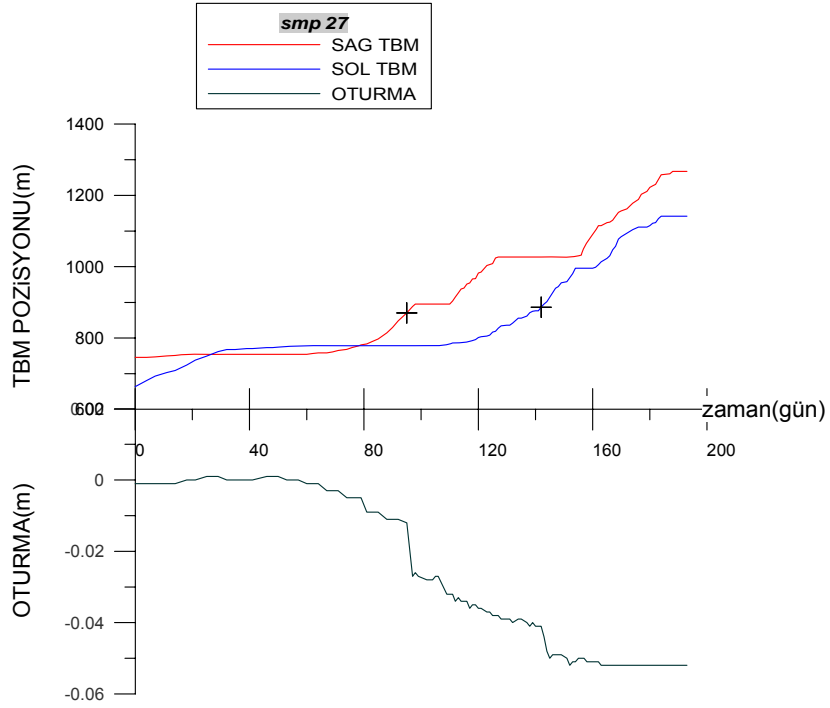
Şekil 5.8.e SMP 24 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



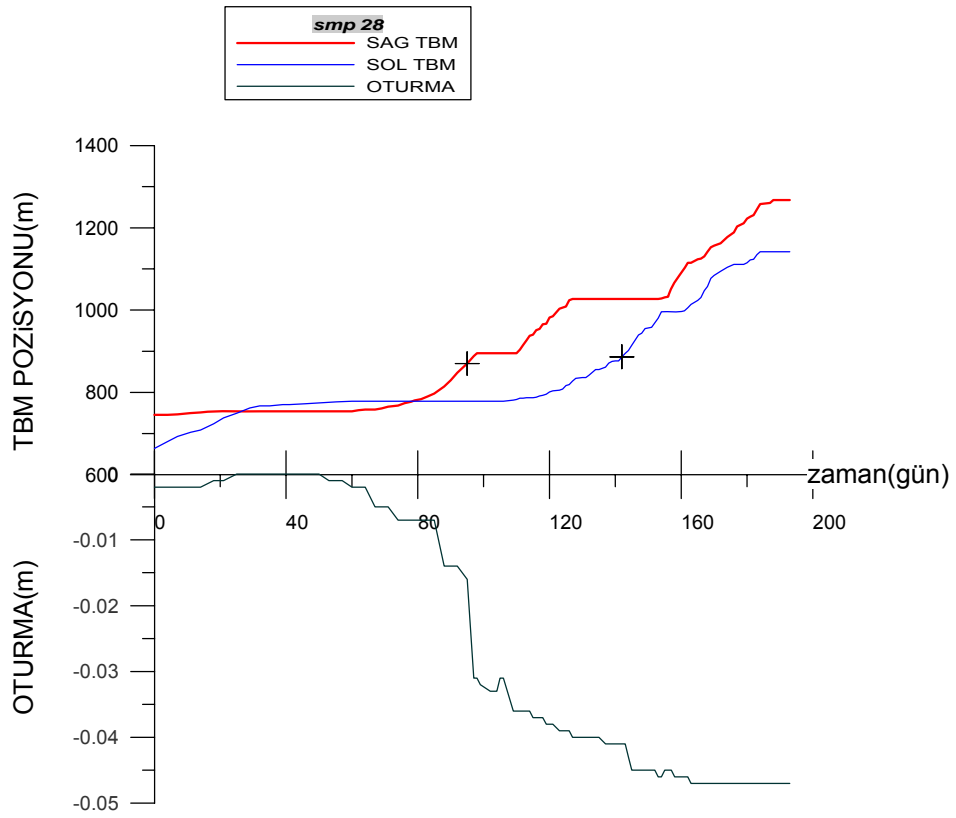
Şekil 5.8.f SMP 25 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



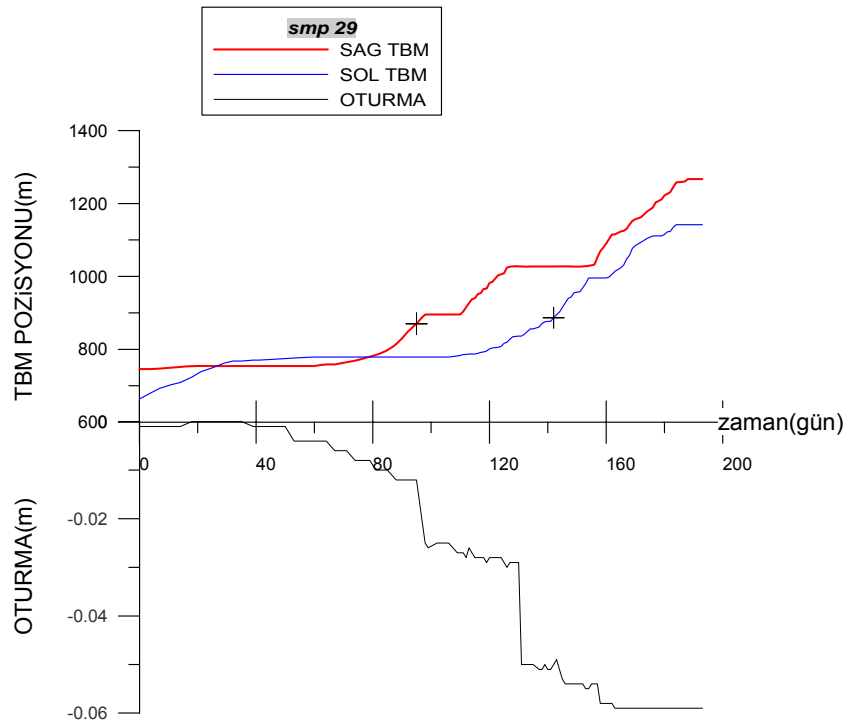
Şekil 5.8.g SMP 26 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



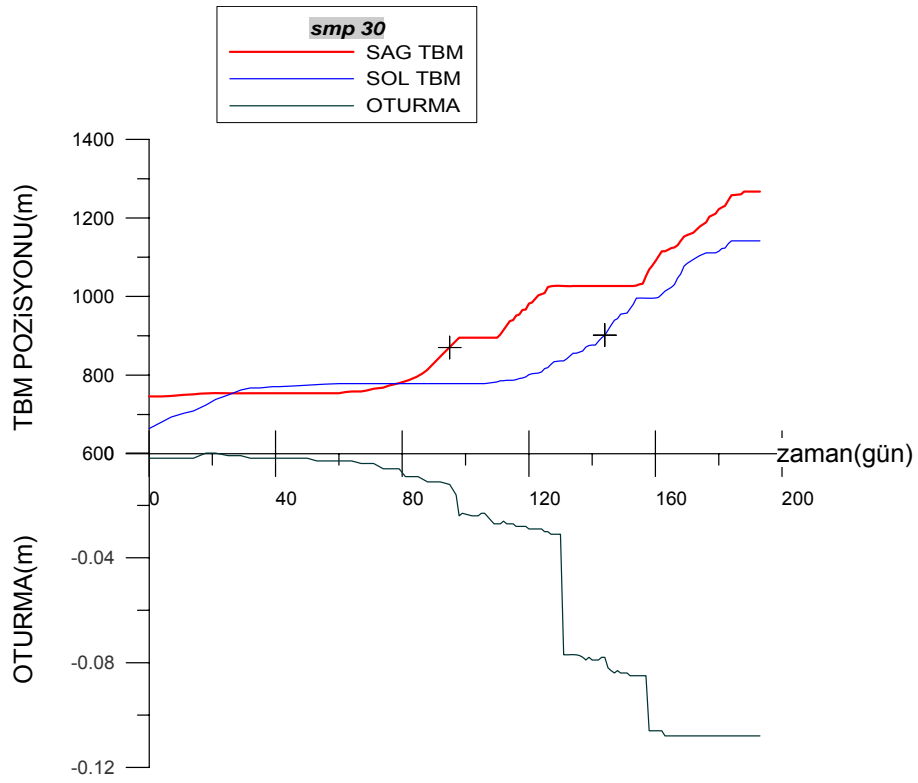
Şekil 5.8.h SMP 27 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



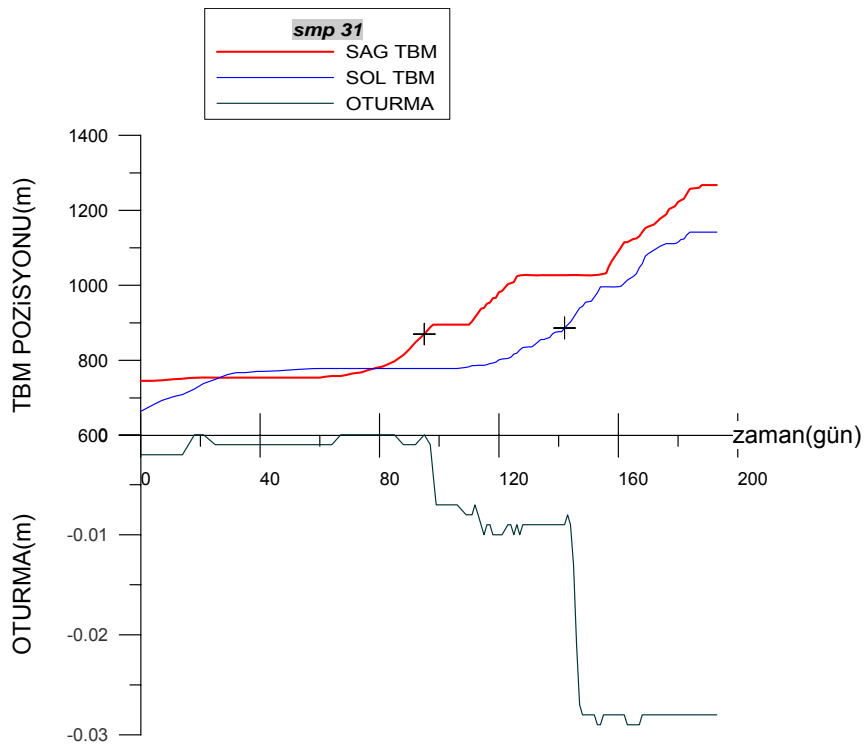
Şekil 5.8.i SMP 28 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



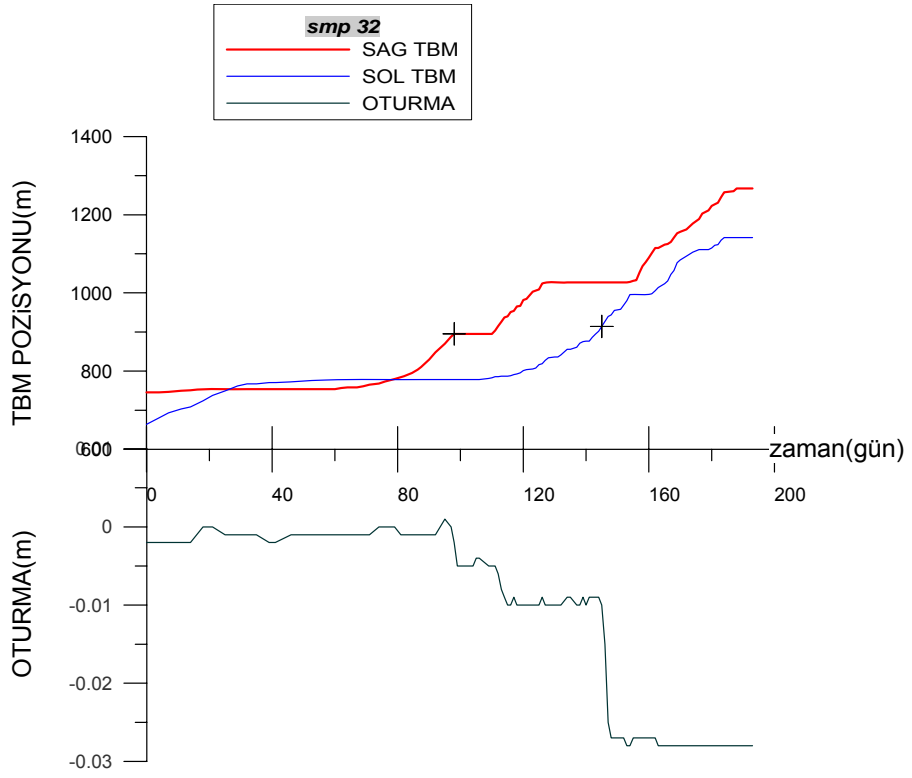
Şekil 5.8.j SMP 29 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



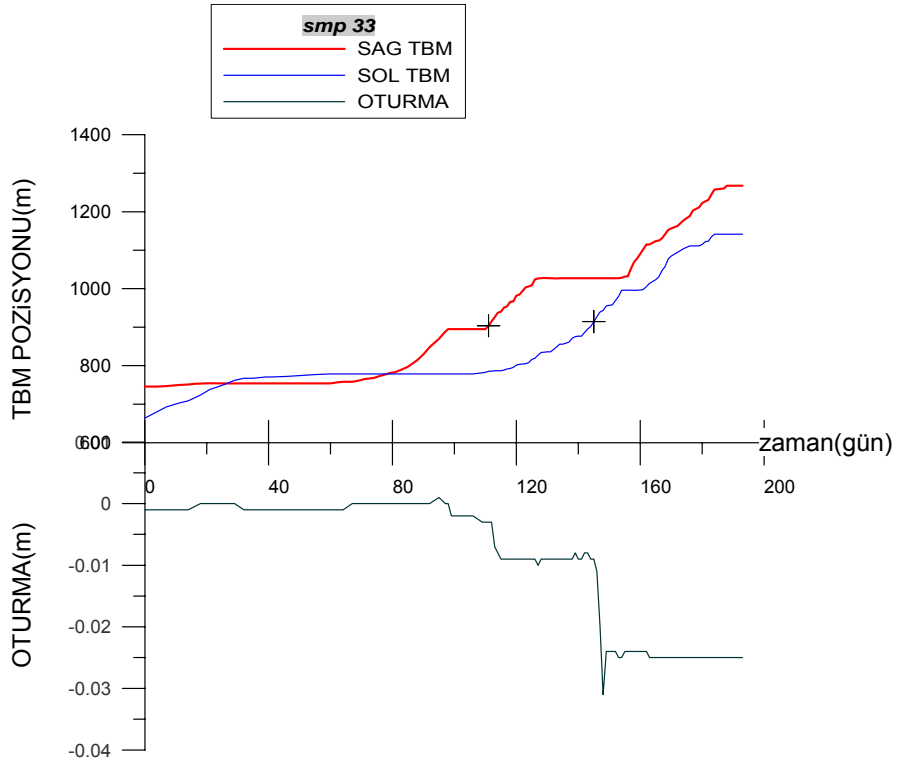
Şekil 5.8.k SMP 30 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



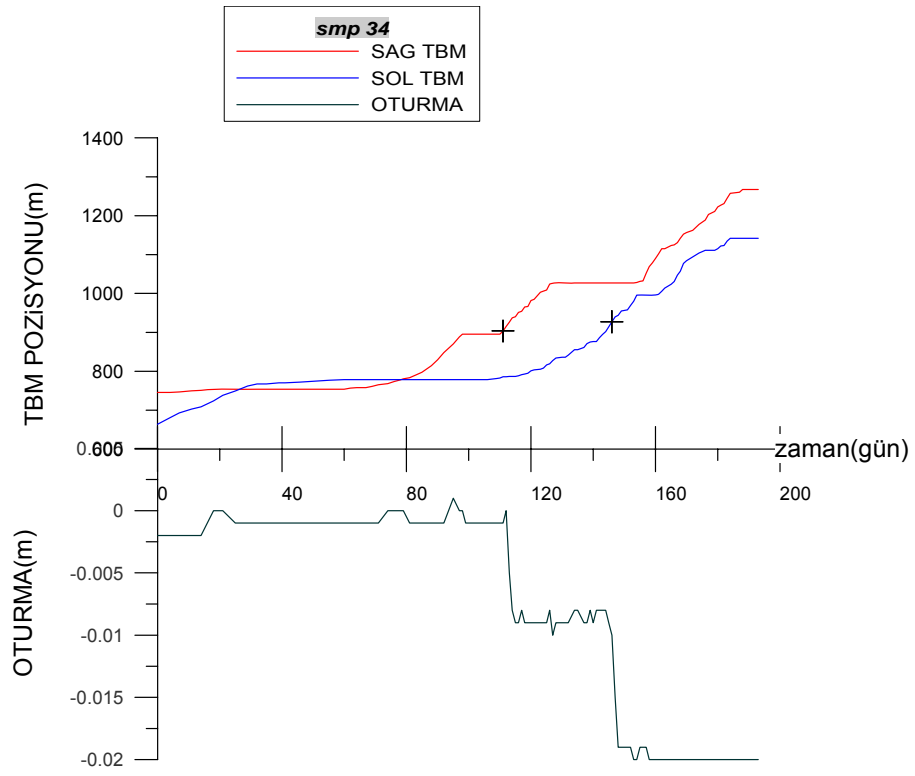
Şekil 5.8.1 SMP 31 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



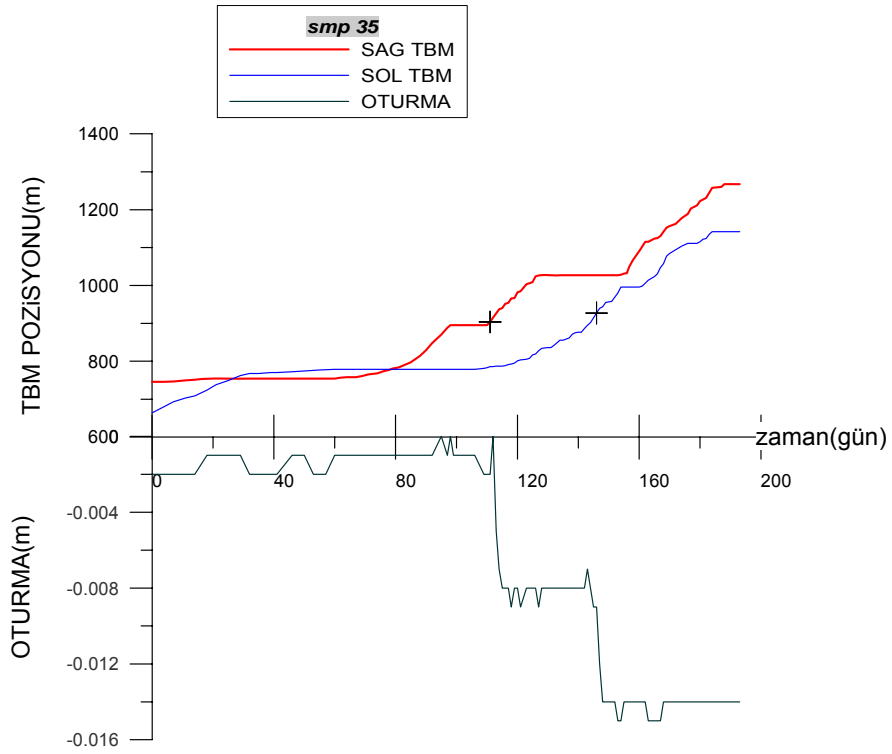
Şekil 5.8.m SMP 32 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



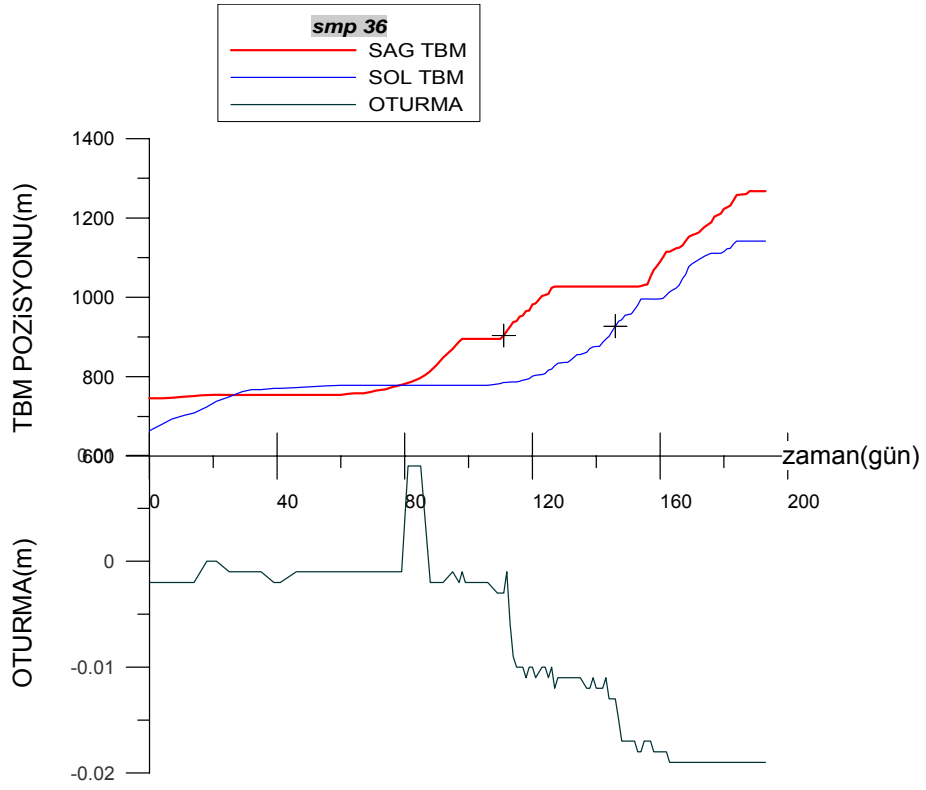
Şekil 5.8.n SMP 33 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



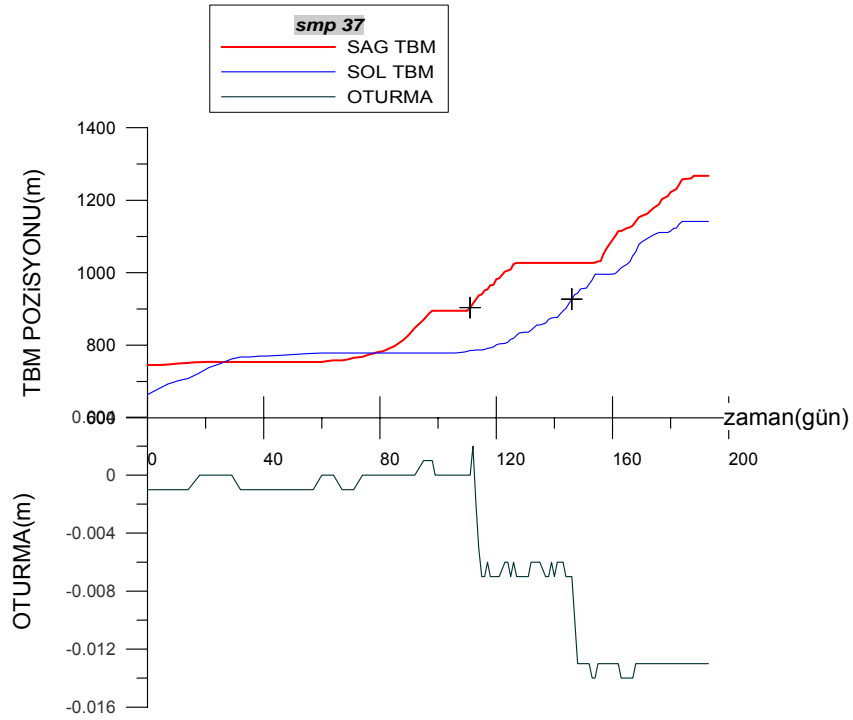
Şekil 5.8.o SMP 34 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



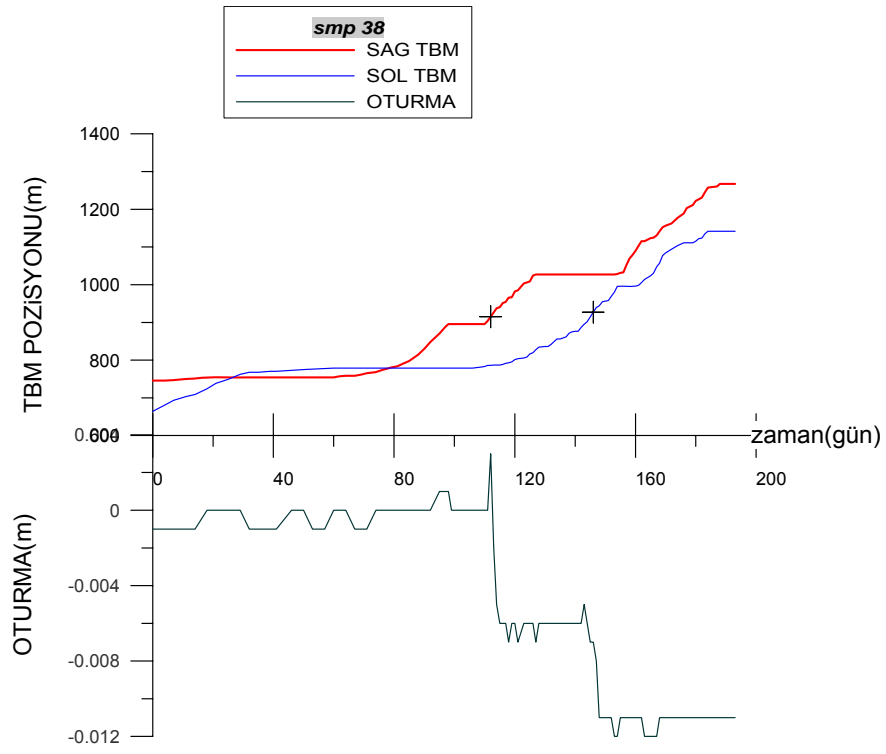
Şekil 5.8.p SMP 35 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



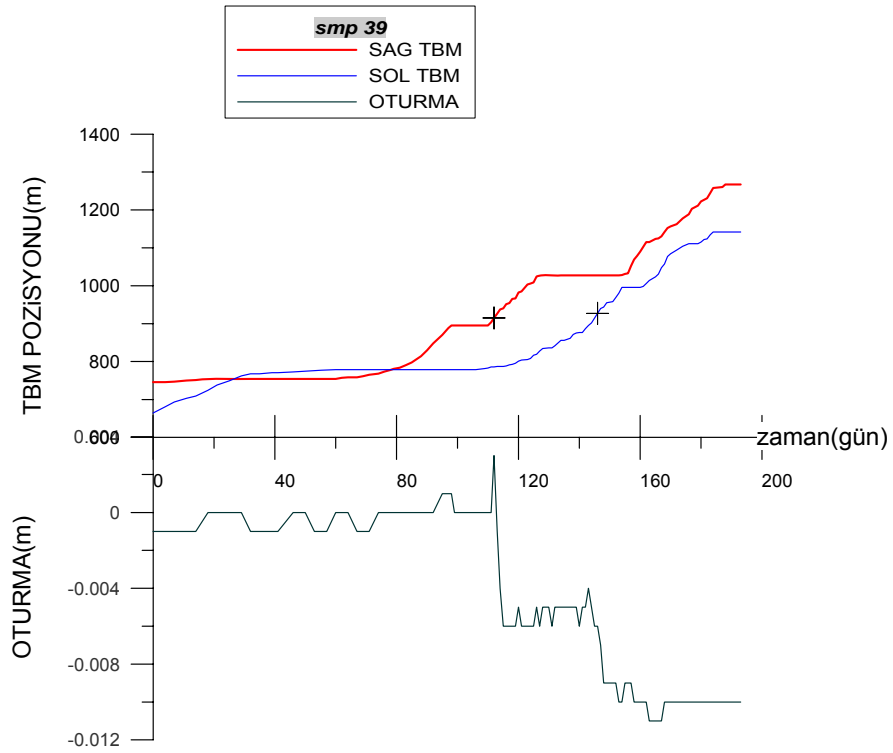
Şekil 5.8.q SMP 36 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



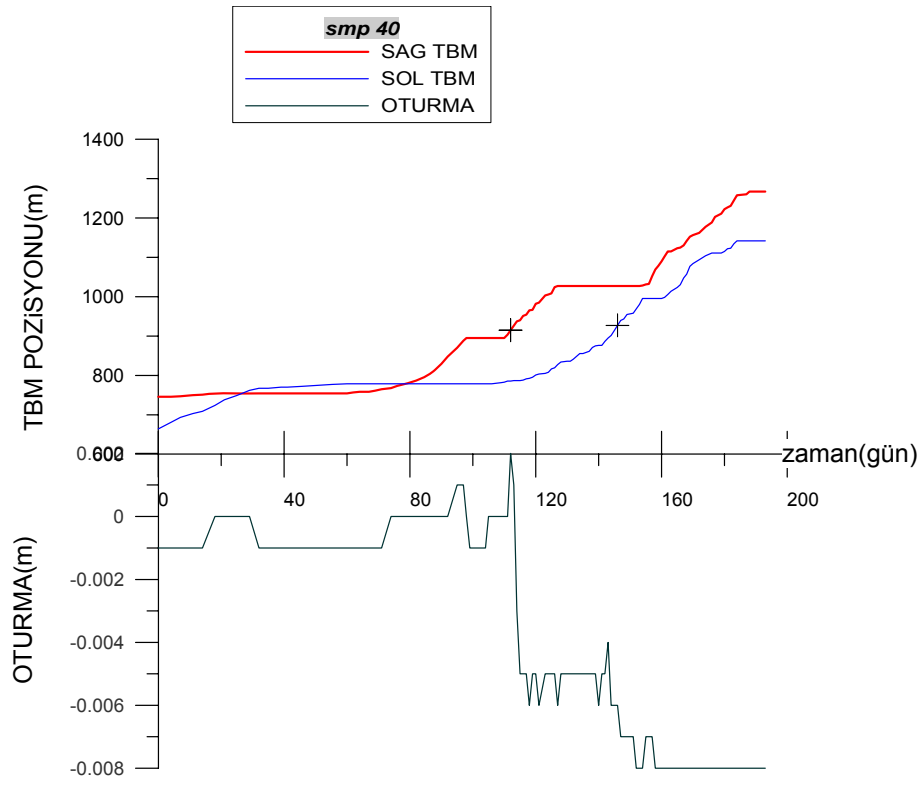
Şekil 5.8.r SMP 37 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



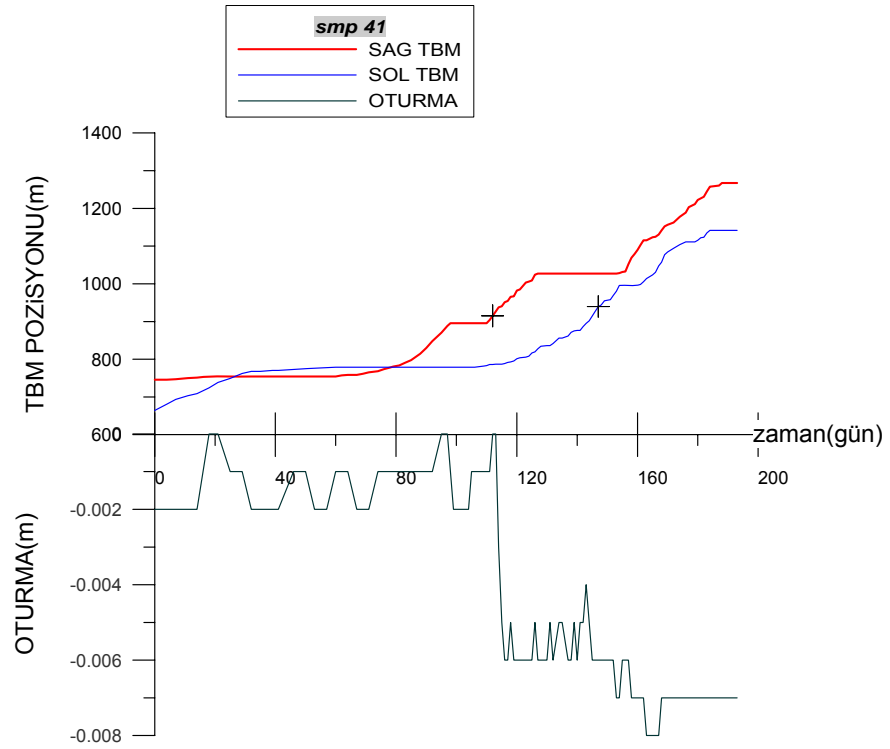
Şekil 5.8.s SMP 38 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



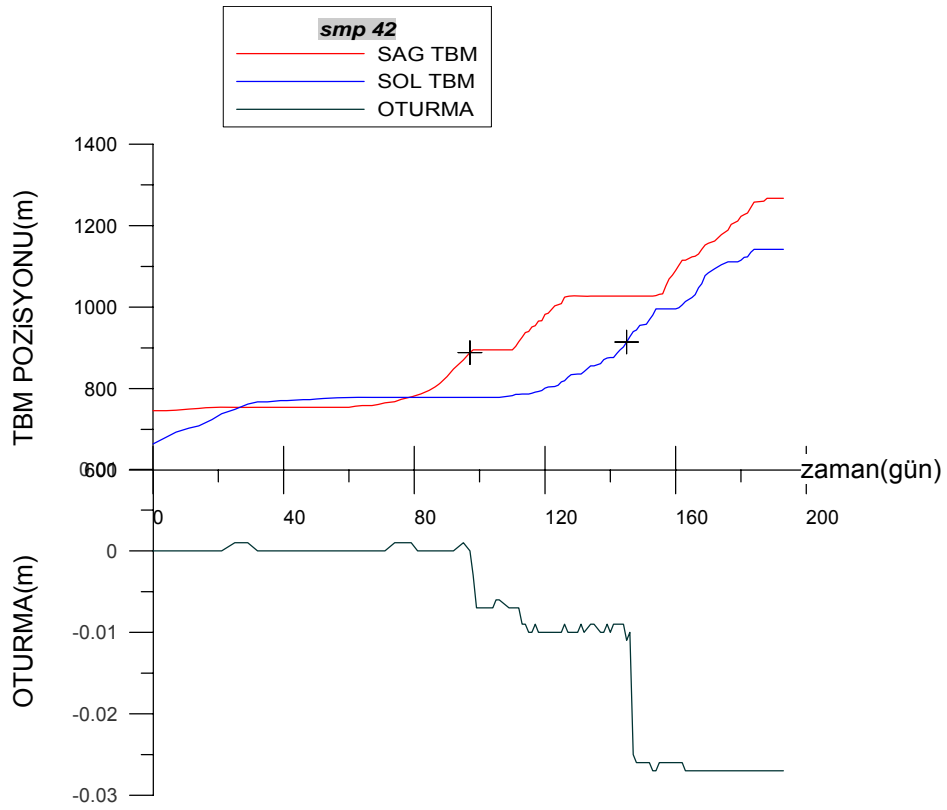
Şekil 5.8.t SMP 39 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



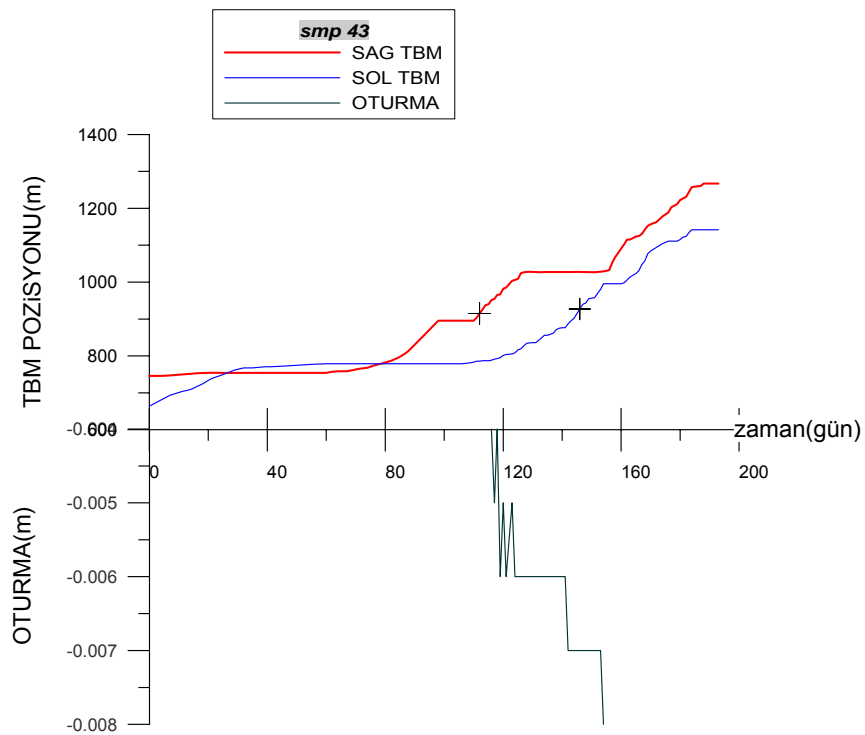
Şekil 5.8.u SMP 40 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



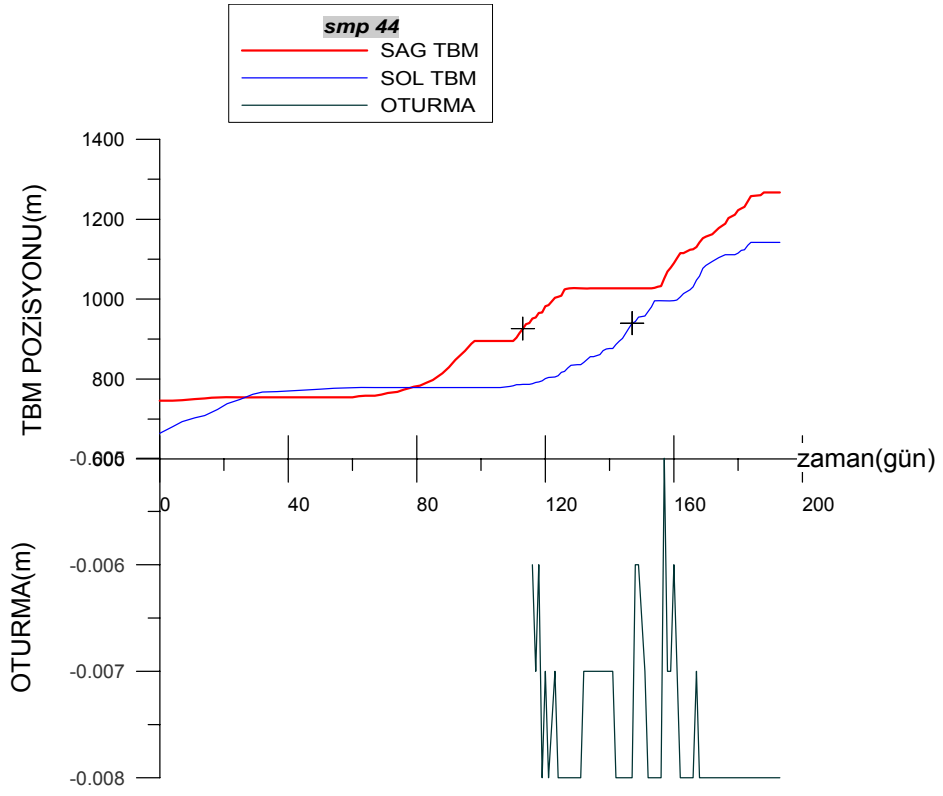
Şekil 5.8.v SMP 41 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



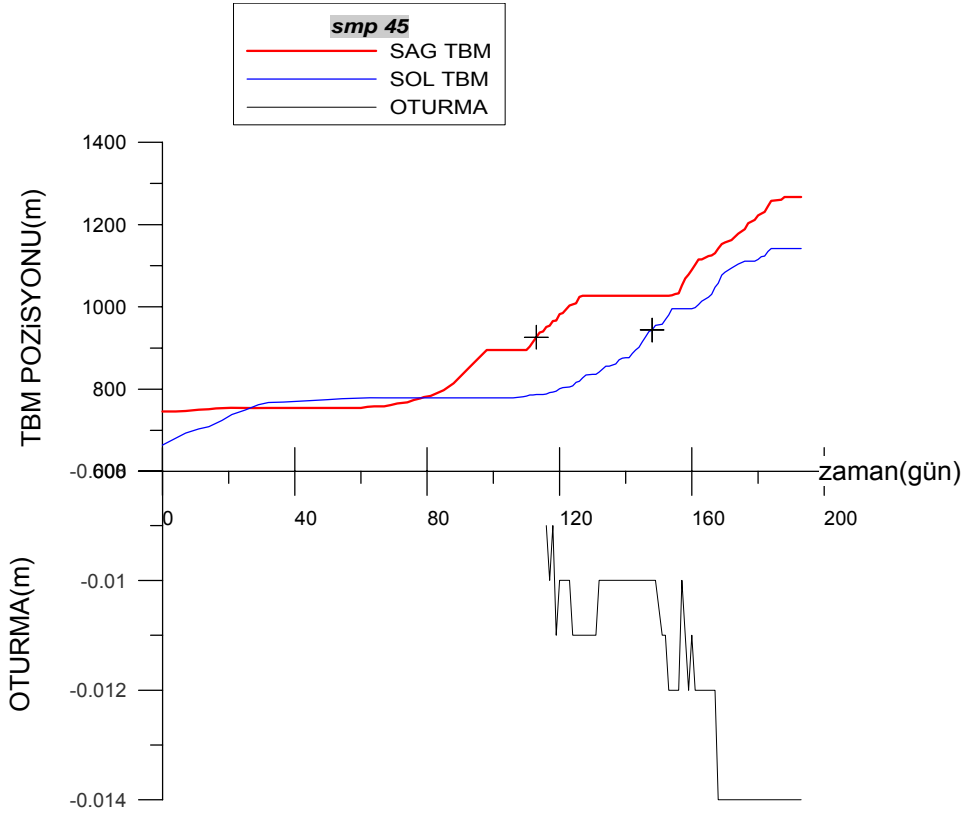
Şekil 5.8.w SMP 42 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



Şekil 5.8.x SMP 43 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



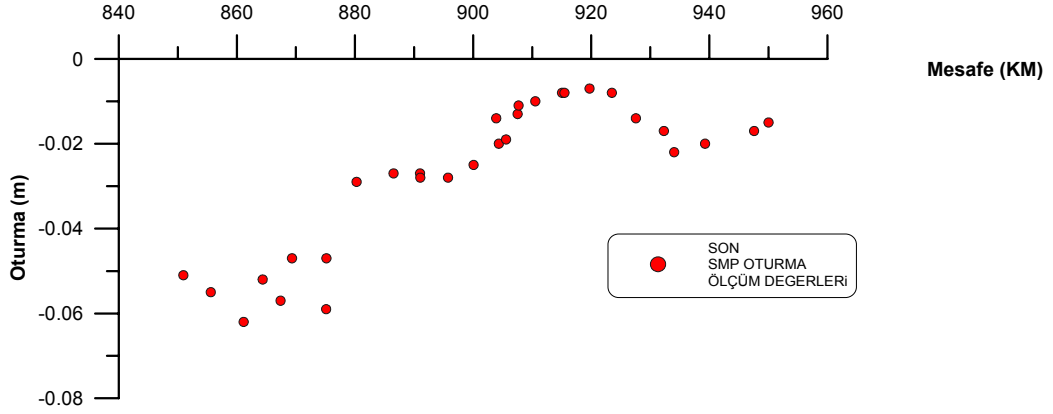
Şekil 5.8.y SMP 44 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi



Şekil 5.8.z SMP 45 (Yüzey Oturma Noktası) ve TBM'lerin hareketi

Tünel inşaatının tamamlanan ilk 100 metrelik kısmında güzergah boyunca oluşan yüzey

oturmaları Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

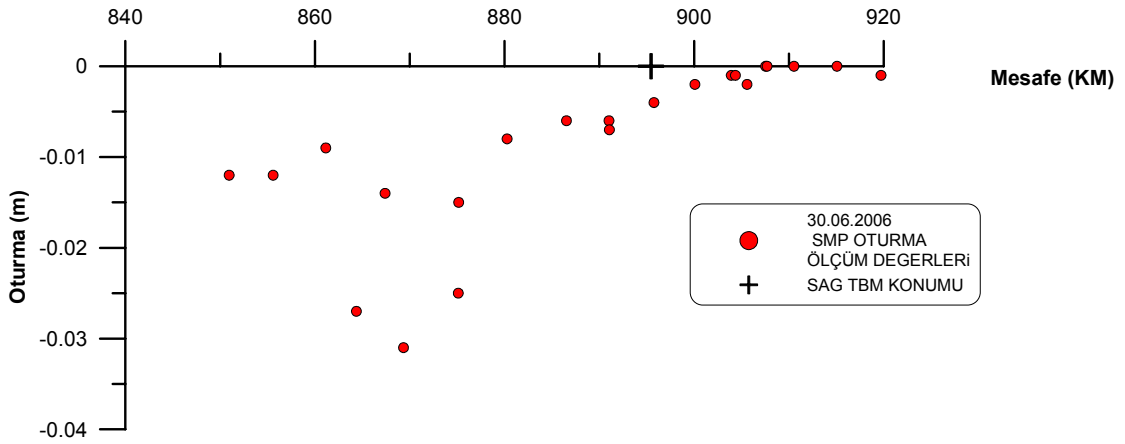


Şekil 5.9 (25.09.2006) tarihinde SMP oturma değerleri

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi 25.9.2006 tarihine kadar gerçekleşen maksimum oturmalar 0.06 - 0.07 m arasında olup KM 0+860 civarında 25 Eylül 2006 da gerçekleşmektedir.

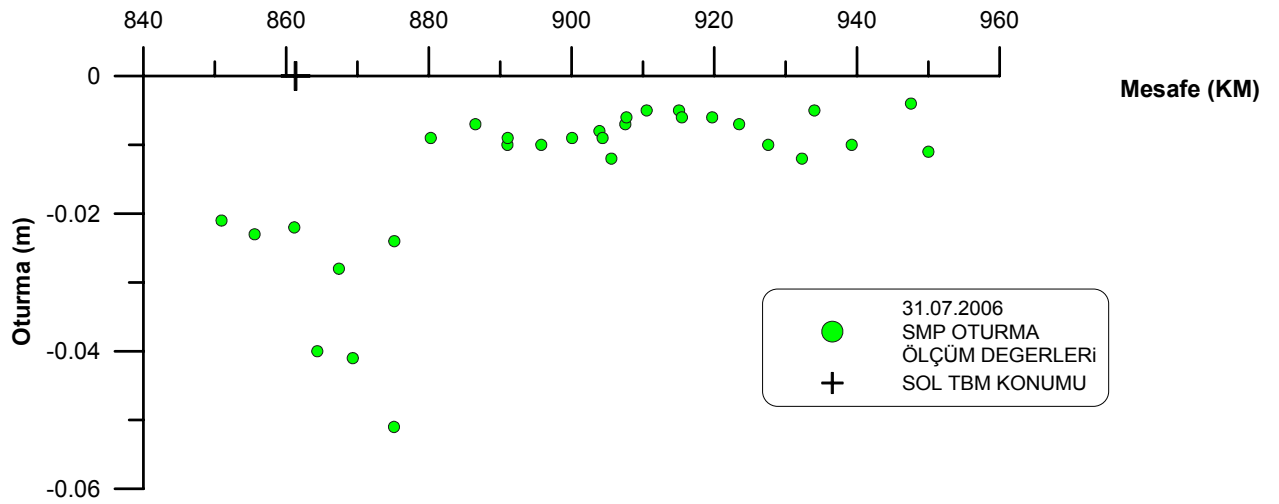
TBM pozisyonlarına göre kesitte oluşan yüzey oturmalar ise aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

30.06.2006 tarihindeki SMP oturmaları Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Bu tarihte sağ TBM konumu: 0+895.45 KM ve sol TBM in pozisyonu ise 0+ 778.72 KM’ dir.



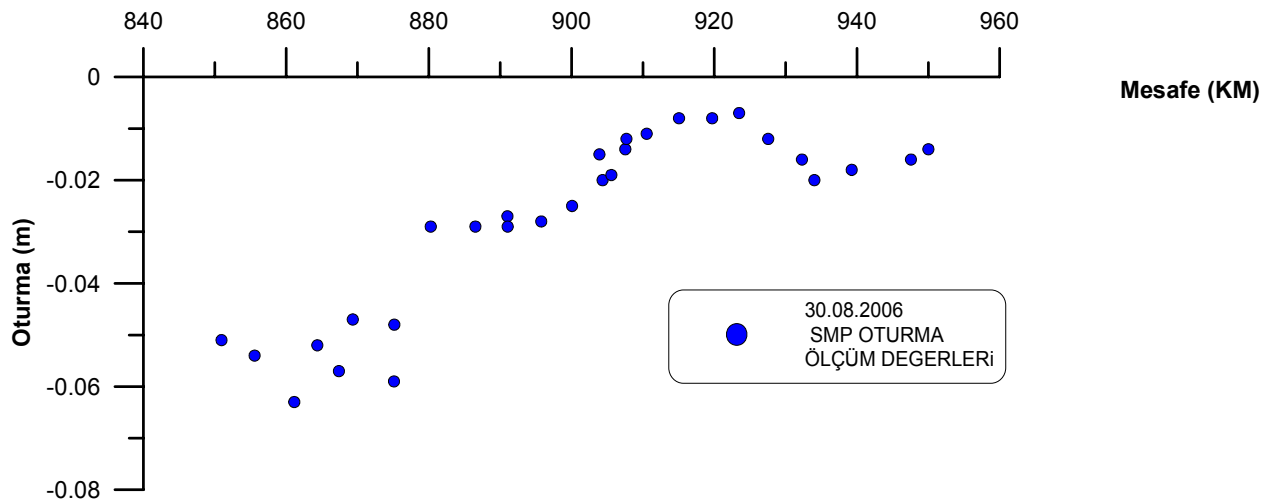
Şekil 5.10 (30.06.2006) tarihinde SMP oturma değerleri

31.07.2006 tarihinde ki SMP oturmaları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Bu tarihte sağ TBM konumu: 0+1027.05 KM ve sol TBM’in pozisyonu ise 0+ 861.32 KM dir.



Şekil 5.11 (31.07.2006) tarihinde SMP oturma değerleri

30.08.2006 tarihindeki SMP oturmaları Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Bu tarihte sağ TBM konumu: 0+1141.85 KM ve sol TBM in pozisyonu ise 0+1047.52 KM dir.

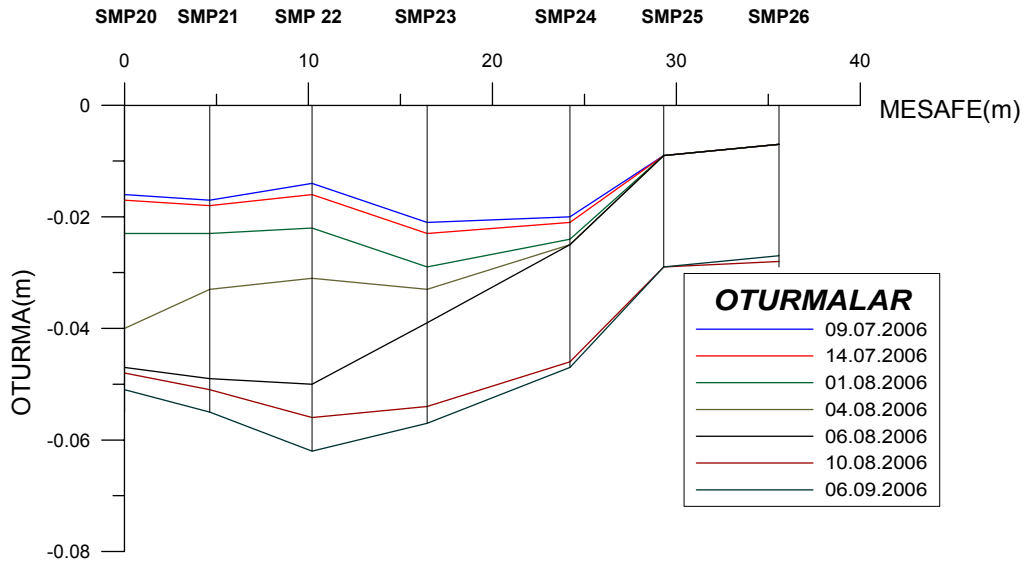


Şekil 5.12 (30.08.2006) tarihinde SMP oturma değerleri

TBM hareketi doğrultusunda SMP 20, 21, 22, 23, 24, 25 ve 26 noktaları yaklaşık aynı doğrultu üzerinde yer almaktadırlar. Şekil 5.13’de bu noktaların 9 farklı tarihte oturma değerleri aralarındaki uzaklığa göre gösterilmiştir.

Tarih seçimi TBM’lerin konumu ve pozisyonuna göre alınmıştır. TBM ilgili SMP noktasına varmadan, tam altındayken ve geçtikten sonra, tarihler belirlenmekte ve belirlenmiş tarihlerde

oturma değeri aralarındaki uzaklığa göre ilgili grafiğe yerleştirilmektedir. SMP 20 başlangıç noktası (0 m) olarak alınıp SMP 26'ya kadar 0-40 m arasında mesafe içinde oturma değerleri farklı tarihler için Şekil 5.13'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Bir doğrultudaki SMP'lerin belirli tarihlerdeki oturma değeri değişimleri

Şekil 5.13 için seçilmiş tarihlerde makine konumları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

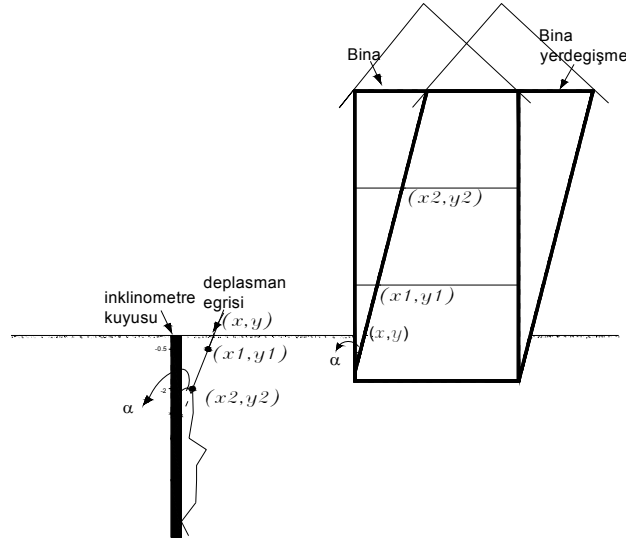
Çizelge 5.2 Makine konumları

Tarih	Sağ Makine	Sol Makine
09.07.2006	0+940.25	0+787.1
14.07.2006	0+982.25	0+801.2
01.08.2006	0+1027.05	0+871.12
04.08.2006	0+1027.05	0+876.32
06.08.2006	0+1027.05	0+894.92
10.08.2006	0+1027.05	0+939.72
06.09.2006	0+1177.99	0+1103.99

5.3 BMP ve İnklinometre okumaları ve Yanal Hareketler

Zemin içerisinde yanal deformasyonlar inklinometre ölçümleri ile, üst yapılarda meydana gelen deformasyonlar ise üst yapıya yerleştirilmiş olan BMP noktalarında teodolit aracılığıyla belirlenmektedir. Bu deformasyon değerlerinin bir arada değerlendirilmesinin büyük bir önemi vardır. Ancak değinildiği gibi, inklinometre okumaları zemin içi ve tabakalarının yanal deplasmanlarını, BMP okumaları ise üst yapılarda meydana gelen deformasyonları

ölçmektedir. Bu nedenden dolayı, değerlerin bir arada gösterilmesi için, bu değerlerin zemin yüzeyindeki eşdeğer miktarlarının bulunması gerekmektedir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 BMP ve inklinometre yanal deplasmanların zemin yüzeyi eşdeğerleri

İnklinometrelerin zemin yüzeyine en yakın okumaları 0.5 m derinlikte gerçekleşmektedir. Bu okumaların zemin yüzeyindeki eşdeğerini bulmak için 2 m ve 0.5 m derinlikteki değerlerini doğrusal kabul edip, zemin yüzeyindeki deformasyonların hesaplanması mümkündür. İnklinometre deformasyon değerlerinin en son tarihteki okumaları (maksimum değer) alınmaktadır. İnklinometre ölçümlerinden zemin yüzeyinde x yönündeki tahmini deplasman değerleri Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 İnklinometrelerin ölçümlerinden elde edilen yer değiştirmelerin zemin yüzeyindeki x yönündeki bileşeni

İnc. No:	X_1 (mm)	X_2 (mm)	Kot ₁ (m)	Kot ₂ (m)	$\tan(\alpha)$	Zemin Yüzeyinde X Doğrultusundaki Deplasman (mm)
3	6.88	1.65	0.5	2	-0.00349	8.62
4	-8.17	-11.99	0.5	2	-0.00255	-6.90
5	7.06	5.86	0.5	2	-0.00080	7.46
6	104.7	89.3	0.5	2	-0.01027	109.83
7	9.88	9.88	0.5	2	0.00000	9.88
8	-5.51	-5.95	0.5	2	-0.00029	-5.36
9	27.05	23.73	0.5	2	-0.00221	28.16
10	-3.12	-2.08	0.5	2	0.00069	-3.47

İnclinometre ölçümlerinden zemin yüzeyinde y yönünde interpoleze edilmiş deplasman değerleri Çizelge 5.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 inclinometre ölçümlerinden elde edilen yerdeğişirmelerin zemin yüzeyinde y yönündeki bileşeni

İnc. No:	y_1 (mm)	y_2 (mm)	Kot ₁ (m)	Kot ₂ (m)	$\tan(\gamma^\circ)$	Zemin Yüzeyinde y Doğrultusundaki Deplasman (mm)
3	9.88	2.79	0.5	2	-0.00473	12.243
4	-6.7	-4.43	0.5	2	0.00151	-7.457
5	-2.08	-2.57	0.5	2	-0.00033	-1.917
6	1.07	0.25	0.5	2	-0.00055	1.343
7	-9	-8.22	0.5	2	0.00052	-9.260
8	0.64	1.56	0.5	2	0.00061	0.333
9	5.48	3.43	0.5	2	-0.00137	6.163
10	-4.45	-1.89	0.5	2	0.00171	-5.303

İnclinometrelerden $x_1, y_1, 0.5$ metredeki ve $x_2, y_2, 2$ metre derinliğindeki deplasman okumaları, bina üzerindeki BMP okumalarından ise (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) noktalarından geçen doğrunun eğimi (α) elde edilmektedir. Çizelge 5.5’de inclinometre okumalarından elde edilen zemin yüzeyi deplasman değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 İnclinometrelerden belirlenen zemin yüzeyindeki deplasman değerleri

İnc. No:	Zemin Yüzeyinde x (mm)	Zemin Yüzeyinde y (mm)	Zemin Yüzeyinde H (mm)
3	8.62	12.243	14.975
4	-6.90	-7.457	10.157
5	7.46	-1.917	7.702
6	109.83	1.343	109.842
7	9.88	-9.260	13.541
8	-5.36	0.333	5.374
9	28.16	6.163	28.823
10	-3.47	-5.303	6.336

BMP okumaları için de aynı yöntem izlenerek her binadaki okumalardan zemin yüzeyindeki tahmini deplasman değerleri bulunmuştur. x_1, y_1 , alt katın x, y yönlerindeki deplasman değeri, x_2, y_2 ise üst kattaki x, y yönlerinin deplasmanlarıdır. Şekil 5.14'de gösterildiği gibi $\tan(\alpha)$, (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) noktalarından geçen doğrunun eğimini ve H birinci katın zemin yüzeyinden yüksekliğini göstermektedir. x yönündeki interpolize edilmiş deplasman değerleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 BMP ölçümlerinden elde edilen zemin yüzeyindeki x yönündeki yerdeğişmeler

BMP. No:	X_1 (mm)	X_2 (mm)	Kot ₁ (m)	Kot ₂ (m)	H	$\tan(\gamma^\circ)$	Zemin Yüzeyinde X Doğrultusundaki Deplasman (mm)
12,13	26	37	61.56	69.56	4600	0.0014	19.675
14,15	27	39	61.286	69.827	4186	0.0014	21.119
16,17	21	28	61.102	69.753	3902	0.0008	17.843
18,19	20	24	63.28	68.689	5990	0.0007	15.570
20,21	18	20	63.225	68.734	5715	0.0004	15.925
31,32	-2	-5	63.048	71.496	4248	-0.0004	-0.491
23,24	12	12	62.677	71.266	4987	0.0000	12.000
25,26	-1	-2	62.46	71.221	4210	-0.0001	-0.519
27,28	-2	-6	62.614	71.253	3864	-0.0005	-0.211
29,30	-6	-12	62.789	71.048	3799	-0.0007	-3.240
73, 74	-7	-8	63.975	69.732	4875	-0.0003	-5.588
75,76	-6	-9	64.091	72.291	3991	-0.0004	-4.752

BMP ölçümlerinden y yönünde interpolize edilmiş yer değışme değerleri Çizelge 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 BMP ölçümlerinden zemin yüzeyindeki y yönünde yerdeğiştirme değerleri

BMP. No:	y_1 (mm)	y_2 (mm)	Kot ₁ (m)	Kot ₂ (m)	H	$\tan(\gamma^\circ)$	Zemin Yüzeyinde y Doğrultusundaki Deplasman (mm)
12,13	31	39	61.56	69.56	4600	0.0010	26.400
14,15	35	42	61.286	69.827	4186	0.0008	31.569
16,17	28	33	61.102	69.753	3902	0.0006	25.745
18,19	26	28	63.28	68.689	5990	0.0004	23.785
20,21	20	21	63.225	68.734	5715	0.0002	18.963
31,32	2	2	63.048	71.496	4248	0.0000	1.995
23,24	13	12	62.677	71.266	4987	-0.0001	13.581
25,26	-8	-12	62.46	71.221	4210	-0.0005	-6.078
27,28	-7	-9	62.614	71.253	3864	-0.0002	-6.105
29,30	-4	-6	62.789	71.048	3799	-0.0002	-3.080
73,74	-9	-11	63.975	69.732	4875	-0.0003	-7.106
75,76	-8	-11	64.091	72.291	3991	-0.0004	-6.429

BMP ölçümlerinde elde edilen zemin yüzü deplasman değerleri Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 BMP ölçümlerinden zemin yüzeyindeki yerdeğiştirme değerleri

BMP. No:	Zemin Yüzeyinde X (mm)	Zemin Yüzeyinde Y (mm)	Zemin Yüzeyinde H (mm)
12,13	19.675	26.400	32.925
14,15	21.119	31.569	37.982
16,17	17.843	25.745	31.323
18,19	15.570	23.785	28.428
20,21	15.925	18.963	24.763
31,32	-0.491	1.995	2.055
23,24	12.000	13.581	18.123
25,26	-0.519	-6.078	6.100
27,28	-0.211	-6.105	6.109
29,30	-3.240	-3.080	4.470
73,74	-5.306	-8.847	10.316
75,76	-4.566	-5.513	7.159

İnklonetreler ve BMP Ölçümlerinden elde edilen zemin yüzündeki deplasman Şekil Ek-1’de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi başlangıç kilometrelerindeki deplasman

değerlerinin son kilometrelere göre daha fazla oldukları gözlenmektedir. Bunun birinci nedeni, başlangıç kilometrelerde (0+850) tünel tabanı ile zemin yüzeyi arasındaki mesafesinin (yaklaşık 7.017 m) son kilometrelere (0+950) göre (yaklaşık 9.07 m) daha az olması yani tünelin yeryüzüne daha yakın mesafede açılmasıdır. İkinci nedeni ise başlangıç kilometrelerde dolgu tabakasının (yaklaşık 1.9 m) son kilometreye göre (yaklaşık 1.2 m) daha kalın olmasıdır. 6 numaralı inklinometrede ise olağan dışı bir yer değiştirme görülmektedir. Bu büyük deplasmanın, inklinometrenin doğusunda bir kanalın mevcut olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

5.4 BMP ve SMP Ölçümlerinin Değerlendirmesi (Gauss Eğrileri)

Bölüm 3.6 da değinildiği gibi tünel inşaatı nedeniyle zemin yüzeyinde oluşan oturmaların değişim eğrisi farklı yöntemler kullanılarak çizilebilir. O'Reilly (1991) ve Fujita(1989), tarafından geliştirilen yöntemler (Eşitlik 3.20-23) göz önünde bulundurularak, 5 farklı kesit için Gauss eğrileri çizilerek tünellerden dolayı yüzeyde oluşan oturmaların şekli ve hacim kayıpları tahmin edilmiştir (Şekil 5.15 –Şekil 5.24).

$$S = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (3.20)$$

S , x mesafesindeki yüzey oturması, S_{\max} tünel merkezindeki maksimum oturma, i merkez çizgisi ile oturma bükülme noktasındaki yatay mesafe ve x merkez çizgisi ile yatay mesafedir. “ i ” değeri Eşitlik 3.21 yardımıyla bulunabilir.

$$i = k \cdot z_0 \quad (3.21)$$

Burada, k genişlik parametresi olup tünellerde genelde 0.50~0.25 değerleri arası verilmektedir. Hacim kaybı parametresi V_s ise Eşitlik 3.22 ile bulunabilir.

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \quad (3.22)$$

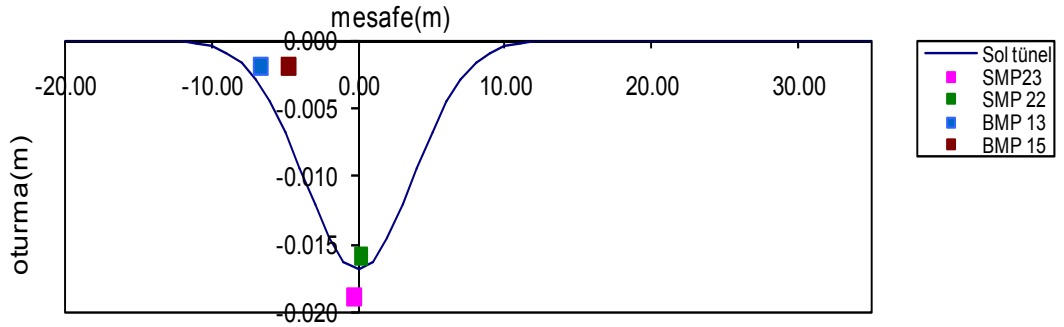
Genelde hacim kaybı (V_s) Eşitlik 3.23'deki ile elde edilebilir. Burada, $\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)$ tünel daire kesit alanıdır. “ D ” tünel daire çapını V_1 ise hacim kaybı oranını göstermektedir.

$$V_s = V_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.23)$$

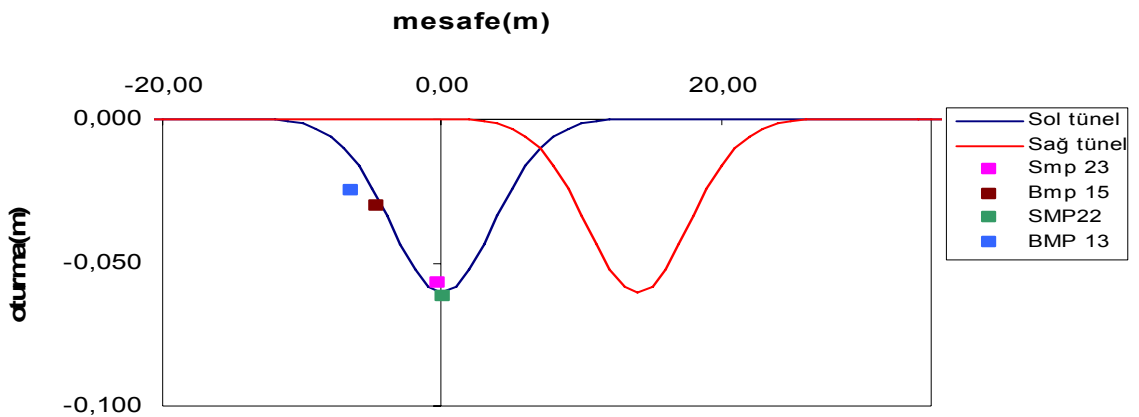
Bu kesitlerdeki oturma SMP okumaları ve BMP- Δz oturma okumaları değerleri tünel eksenine göre yerleştirilmiştir. BMP okumalarında alt kat yani zemine en yakın BMP'nin

Δz değeri alınmalıdır. Hem SMP hem de BMP değerleri için her iki TBM'in çalışma nedeniyle maksimum okuma değerleri kullanılmıştır. Her kesitin zemin özelliklerine dikkat edilerek göz önüne alınan kesitteki okuma değerlerini kapsayan eğri, zemin kaybı oranı değişimine göre çizilmiştir. Bu eğriler iki durum için çizilmektedir. Birinci grafikte, ilk TBM'in çalışmasından dolayı oluşan oturmalar, ikinci egride ise diğer TBM'in hareketinden kaynaklanan oturmaların grafiği çizilmektedir. Her iki durum için de en uygun zemin kaybı bulunmuştur. Bu eğri her kesitteki tüm okuma değerlerinden geçmese de hepsini kapsayan en yakın eğri olarak çizilmektedir. Bu çalışmada elde olan bilgi ve okuma değerlerine göre 850-950 KM'leri arası Çizelge 5.3'de verilen beş kesit seçilip kesitlerde oturma eğrisi her iki durum için de çizilmiştir. Toplam zemin kaybı oranı her iki TBM çalışmasından kaynaklanan zemin kaybı oranının toplamıdır.

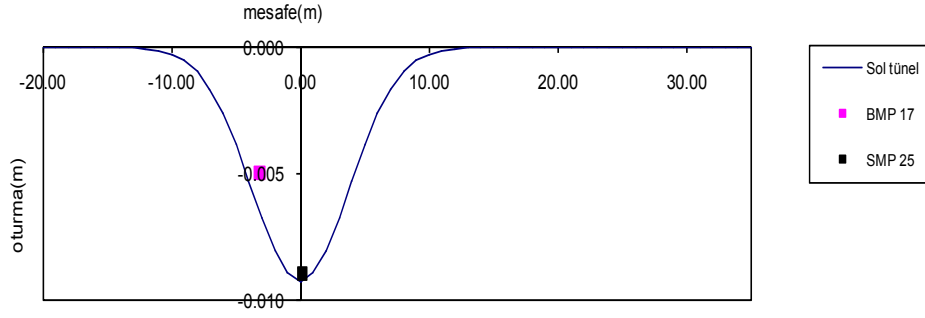
$$V = V_{L1} + V_{L2} \quad (5.1)$$



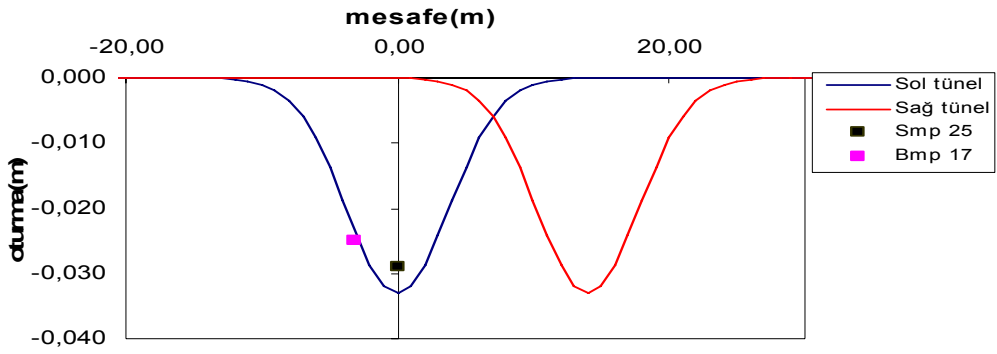
Şekil 5.15 1. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



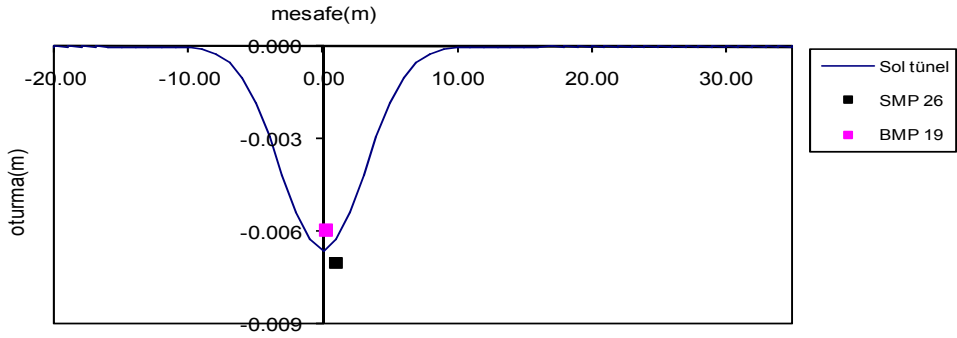
Şekil 5.16 1. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



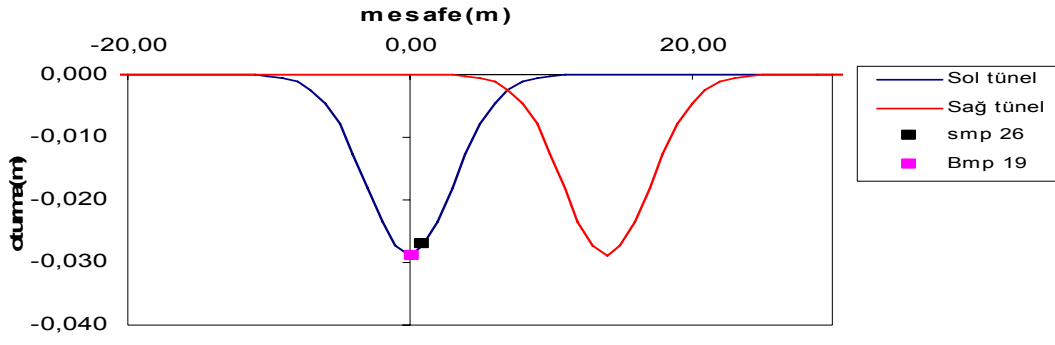
Şekil 5.17 2. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



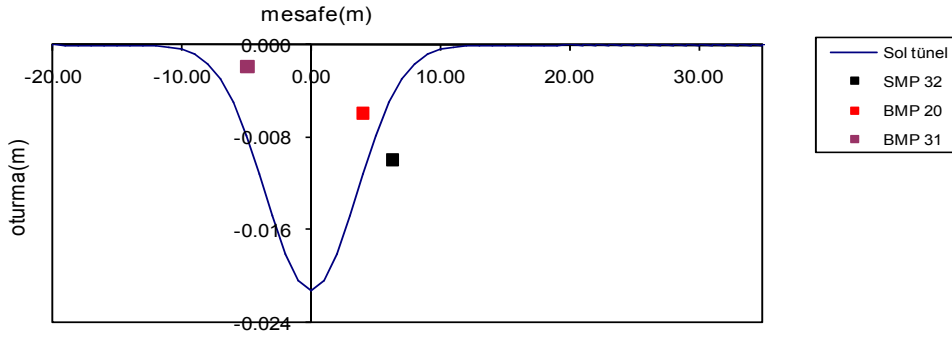
Şekil 5.18 2. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



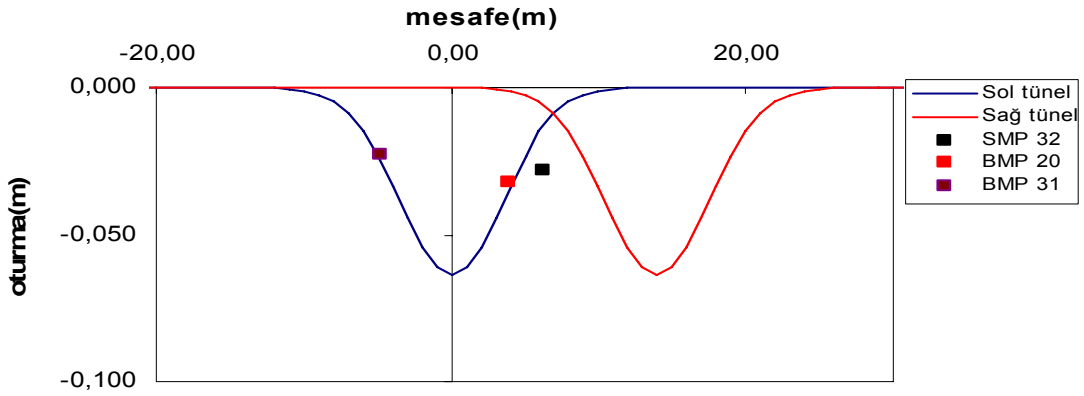
Şekil 5.19 3. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



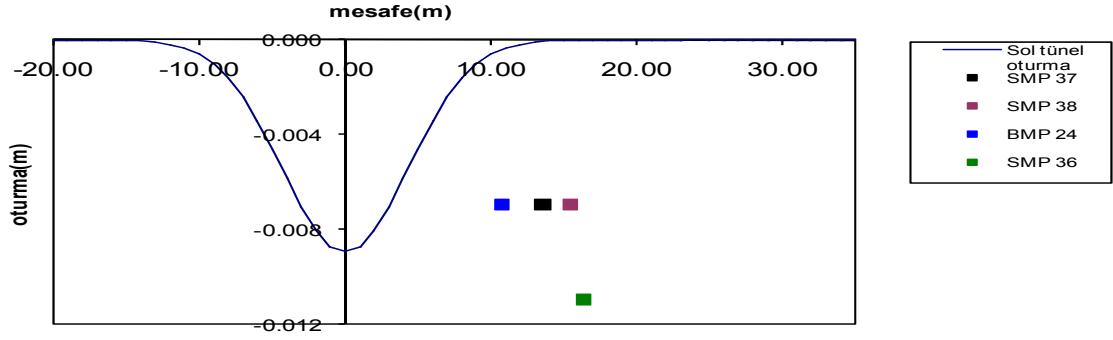
Şekil 5.20 3. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



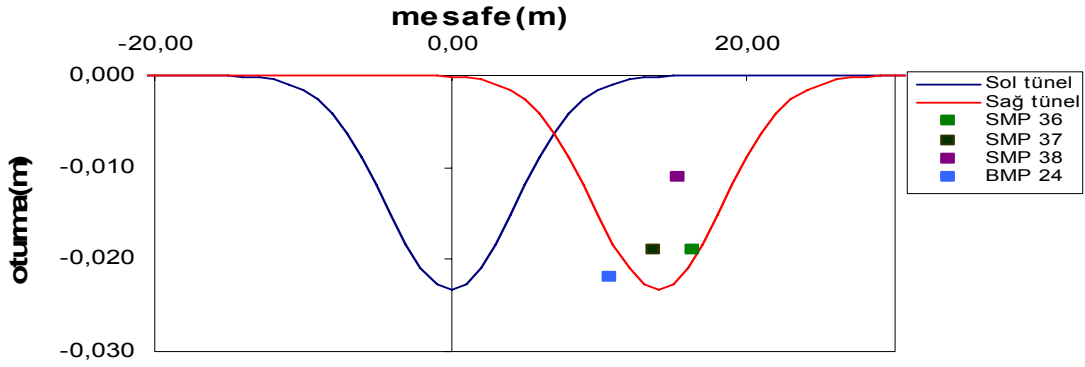
Şekil 5.21 4. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



Şekil 5.22 4. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



Şekil 5.23 5. Kesitte birinci makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi



Şekil 5.24 5. Kesitte her iki makine geçişi nedeniyle oluşan oturma eğrisi

Yukarıdaki eğrilerden incelenen kesitler için bulunan hacim kaybı değerleri Çizelge 5.9'da özetlenmektedir. V_{11} birinci TBM için ve V_{12} ikinci makine için bulunan hacim kaybıdır. Burada S_{max} eğrilerden bulunan maksimum oturma değeridir.

Çizelge 5.9 Kesitler için bulunan hacim kaybı

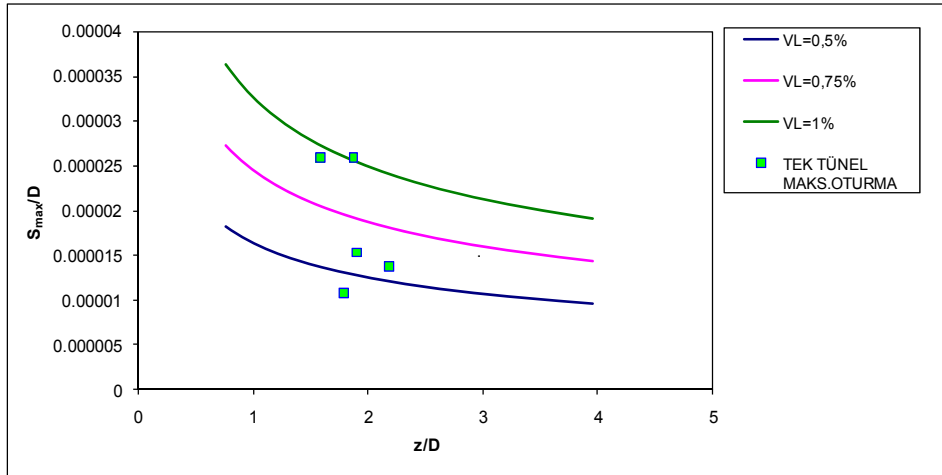
kesit no.	Oturma Ölçüm Noktaları	k	Z_0 m	S_{max} m	V_{11} (%)	V_{12} (%)	ΣV_i (%)
1	SMP 23, SMP 22, BMP13, BMP15	0.3	12.33	0.057	0.50	1.30	1.8
2	SMP 25, BMP 17	0.3	12.51	0.033	0.28	0.72	1
3	SMP 26, BMP 19	0.3	10.39	0.029	0.17	0.55	0.72
4	SMP 32, BMP 20, BMP 31	0.3	11.75	0.064	0.6	1.20	1.8
5	SMP 36,SMP 37, SMP 38,BMP 24	0.3	14.39	0.023	0.31	0.50	0.81

KM 0+850 – KM 0+950 arasındaki oturma ölçümlerinden maksimum yüzey oturması S_{max} ile zemin kaybı arasındaki ilişkinin Wu ve Lee (2003) tarafından önerilen tek tünel için (3.24) ve çift tünel için (3.25) eşitlikleri yardımı ile incelenmesi göz önüne alınan tünel güzergahı boyunca, göz önüne alınan tünel güzergahı boyunca oturma hacim kaybı ve derinlik ilişkisinin görülmesi bakımından oldukça yararlıdır.

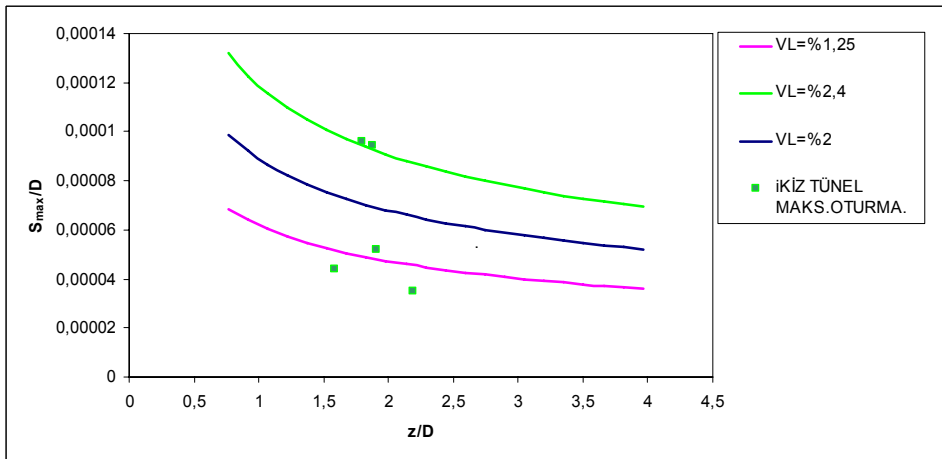
$$\frac{S_{max}}{D} = 0.00327\left(\frac{z}{D}\right)^{-0.43} V_l \quad (3.24)$$

$$\frac{S_{max}}{D} = 0.00494\left(\frac{z}{D}\right)^{-0.39} V_l \quad (3.25)$$

Şekil 5.25’de bu karşılaştırma tek tünel açılması durumu için, Şekil 5.26 ise ikiz tünel açılması durumu için verilmiştir.



Şekil 5-25 Tek tünel için karşılaştırma



Şekil 5.26 İkiz tünel için karşılaştırma

5.5 Alın Basınçlarının Hesaplanması

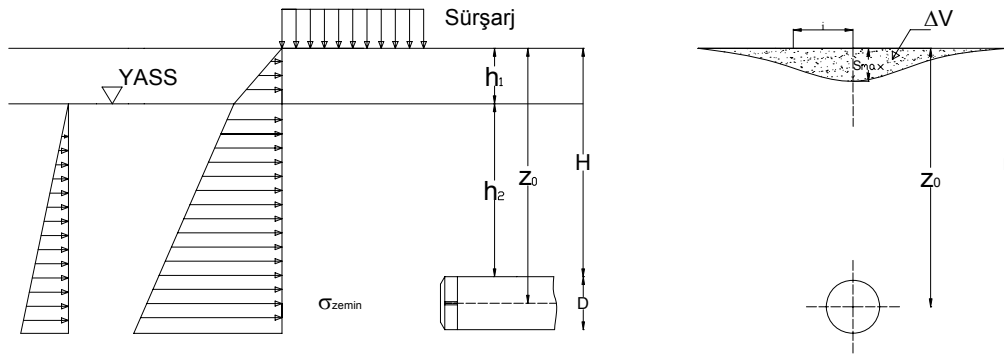
Yüzeydeki oturma hasarlarının en az düzeyde olması ve emniyetli çalışma koşullarının sağlanması bakımından uygulanacak alın basıncı değerlerinin güzergâh boyunca sık aralıklarla hesaplanması gerekmektedir. Tünel kazı faaliyeti sırasında, uygulanan tünel teknolojisine ve geçilen zeminin özelliklerine bağlı olarak bir kısım zemin tünel alınına doğru mobilize olur ve yüzeyde oturmalar oluşur. Bu oturmaların civar binalarda hasar oluşturmaması için çökme teknesi eğrisi maksimum değerinin belirli bir değerin altında olması gerekmektedir. Söz konusu büyüklük “hafif hasar” düzeyi için 1/500-1/250 aralığındadır (Skempton, vd., 1956). Prensip olarak alında oluşacak basınç, yanal zemin basıncı (σ_{zemin}), su basıncı σ_{su} , ve trafik/bina yüklerinden (sürşarj) kaynaklanan ek yanal basınç (σ_{ek}) toplamında, oluşur. Makine tarafından alına uygulanacak basınç, tünel eksenindeki bu basınçların toplamına eşit olmalıdır (Şekil 5.27).

$$\sigma_a = \sigma_{zemin} + \sigma_{su} + \sigma_{ek} \quad (5.2)$$

Alın stabilitesinin ölçüsü olarak bilinen “N” büyüklüğü,

$$N = \frac{\sigma_{ek} + \gamma \cdot Z_0 - \sigma_a}{c_u} \quad (5.3)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. (Broms-Bennermak, 1967; Peck, 1969).



Şekil 5.27 Tünel alın basıncı ve yüzey oturma

N’in aldığı değerlere göre alın stabilitesi şu şekilde ayırt edilmektedir:

0 < N < 2 Az akma-elastik koşullar

2 < N < 4 Sınırlı akma

4 < N < 6 Plastik akma

N>6 Alın da ciddi stabilite problemi

Oturma büyüklüklerini sınırlayan yaklaşımla alın basıncı hesabı için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

- Zemin kaybı oranı (Mitchell,1993):

$$K = \frac{\Delta V}{V} = \frac{c_u}{E_m} \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{su} + \sigma_{ek} + \gamma \cdot Z_0 - \sigma_a}{2c_u}\right) \quad (5.4)$$

- Maksimum oturma miktarı (Schmidt,1969)

$$S_{maks} = 0,314 \cdot K \frac{D^2}{i} \quad (5.5)$$

- Oturma değerinin maksimum eğimi:

$$\left(\frac{dS}{dx}\right)_{maks} = 0,606 \cdot \frac{S_{maks}}{i} \quad (5.6)$$

- Yukarıdaki bağıntılarda sadeleştirmeler yapılırsa;

$$\sigma_a = (\sigma_{ze\ min} + \sigma_{su} + \sigma_{ek}) - 2c_u \cdot \left\{ \ln \left[2,544 \cdot \left[\frac{Z_0}{D} \right]^{1,408} \cdot \left(\frac{dS}{dx} \right) - \ln \left(\frac{c_u}{E_m} \right) \right] \right\} \quad (5.7)$$

elde edilir.

Burada: σ_a = tünel eksenindeki alın basıncı (kPa), σ_{ek} = bina ve trafik yüklerinden kaynaklanan ek yüküdür.

Bu çalışmada trafik yükü için 10 kPa, bina yükleri için 16 kPa kabul edilmiştir. σ_{su} = su basıncı, $\sigma_{su} = \gamma_{su} \cdot (Z - h_1)$ (kPa), eşitliğinden bulunmaktadır. h_1 = yeraltı su seviyesinin yüzeyden derinliğidir (m).

γ =Zemin ortalama birim hacim ağırlığı (kN/m^3) farklı tabakalara ait kalınlıklar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Z_0 = tünel ekseninin derinliği, $Z_0 = (H + D/2)$ (m) eşitliğinden bulunur. c_u = geçilen zeminin drenajsız kohezyonunun (kPa), ağırlıklı ortalama değeri, E_m = geçilen zeminin elastisite modülünün (kPa), ağırlıklı ortalama değeridir.

S_{max} = Tünel ekseninde yüzeyde ölçülen oturma değeri (m) ve i =yüzey oturma eğrisinin dönüm noktasının tünel eksenine olan uzaklığı (m)'dir.

Tünel güzergahı boyunca farklı kesitlerde gerekli alın basınçları, Eşitlik 5.7 ile, tünel çapı

D=6.3 m ve hafif hasar düzeyi için sınır oturma eğimi $\left(\frac{dS}{dx}\right)_{maks} = 1/250$ değeri kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 5.28’de gösterilmiştir.

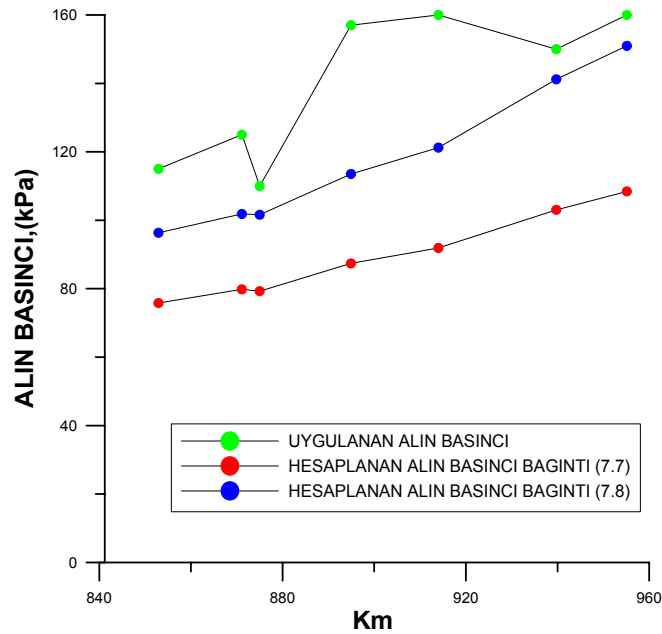
Ayrıca bir ön tasarım olarak alın basıncı:

$$\sigma_F = K_0 \cdot \gamma \cdot Z_0 + \sigma_{su} + 20, kPa \quad (5.8)$$

eşitliği ile hesaplanabileceği öngörülmektedir.(Boere, 2001; COB, 1996’dan alıntı).

Burada K_0 = Sükunette yanal zemin basınç katsayısı (Esenler-Bağcılar Tüneli’nde geçilen zeminler için $K_0 = 0,4 - 0,5$ aralığındadır)

Şekil 5.28 üzerinde Eşitlik 5.7 ve 5.8’den hesaplanan alın basınçları, 2. tünelde uygulanan alın basıncıyla bir arada gösterilmiş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.28 Farklı yöntemler ile hesaplanan ve uygulanan alın basıncı değerlerinin güzergah boyunca değişimleri

Şekil 5.28’de görüldüğü gibi hesaplanan alın basınçları değerleri projede uygulanan alın basıncı değerlerinden düşüktür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnşaatı devam etmekte olan Otogar - Bağcılar Raylı Toplu Taşıma Sistemi'nde yüzey örtüsü ve zemin yapısı bakımından kritik olduğu belirlenen KM 0+850 ile KM 0+950 arasında tünel davranışının belirlenmesi amacı ile, tünelin bu kesiminde yapılan zemin yerdeğiştirmesi farklı yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda göz önüne alınan tünel güzergâhı civarında yer alan yüzey oturma plakaları (SMP), bina oturma noktaları (BMP) ve inklinometre-ekstansometre ölçüleri, zemin özellikleri, TBM pozisyonu ve tünel derinlikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş, farklı kesitler için yüzey oturma eğrileri ve zaman kaybı oranları elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Göz önüne alınan tünel güzergahı boyunca önemli bir geoteknik sorunu ile karşılaşılmadığı anlaşılmaktadır. Bunda zemin arazi profilinin sıkı kum ve çakıllı katı kil tabakalarından oluşması ve EPB/TBM tünel kazı yöntemi kullanılmasının büyük rolü olduğuna inanılmaktadır.

Tünel inşaatı dolayısıyla meydana gelen zemin kayıpları ve yüzey oturmaları projede öngörülen sınırlar içinde kalmıştır.

Tüm güzergah boyunca kuramsal değerlerin üzerinde alın basınçları uygulanmıştır.

Yüzey ve bina ölçümlerinin değerlendirilmesi ile elde edilen bulgulardan yararlanarak güzergah çevresinde yer alan yapılarda literatürde yer alan yöntemlere göre hasar değerlendirmeleri yapılabilir ve izin verilebilir değerler ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Acar, Y.,(1980) Circular Openings Semi-Infinite Medium, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- Ata, A. A. (1996) : “Ground settlements induced by slurry shield tunneling in stratified soils”, Proc. North American Tunneling96 Özdemir, I. L (ed.), Vol. 1, pp, 43-50
- AFTESS.,(2000),Choising Mechanized Tunneling Techniques, Web:www.aftes.fr/FicherPDF/mechanised.pdf.
- Arioğlu B., Yüksel A., Arioğlu E., “İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli’nde Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu (EPBM) Uygulaması”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- Atkinson, J.H., Potts, D. M., (1979) Subsidence Above Shallow Tunnels in Soft Ground ASCE, GT4, April, pp.307-325.
- Atkinson, J.H., Brown, E.T. , Potts D.M., (1975) Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand, Tunnels and Tunnelling, Nr.3, 83-87.
- Atkinson, J.H., Potts, D.M., Schofield, A.N. (1977) Centrifugal Model test on shallow Tunnels in Sand, Tunnels and tunneling Nr. 1, 59-64.
- Atkinson, J.H., Brown, E.T. , Potts D.M., (1979), Subsidence Above Shallow Tunnels in Soft Ground, ASCE, GT4, April, pp.307-325.
- Attewell, P .B .(1979a), “Ground movement caused by tunneling in soil”, Proc., Cnf. on Large Ground Movements and structures, Halstead Press, New York, N.Y., 812-948.
- Aversin, S.G., (1954), Bergbauarbeiten Untertage und unter Grundwasser
- Beyer, F., (1945), Über die Vorausbestimmung der beim abbau flachgerter Flöze auftretenden Bodenverformungen- Habilitationsschrift aus dem Markscheide Institut der TH Berlin; Berlin.
- Briggs, H.,(1929), Mining Subsidence, London
- Boere, W.,(2001), “Tunnel Face Stability and New CPT Applications”,PhD Thesis, Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft Universty Press, Netherlands.
- Brooms, B.B., Bennermark, H.,(1967)”Stability of Clay at Vertical Openings”, ASCE Journal o the Soil Mechanics and Foundation Division, SM1, pp. 71-44.
- DUAB.,(1997), “Recommendations for Selecting and Evaluating Tunnel Boring Machines”, Alman yer altı inşaatları birliği, Tunnel 5/97.
- Egger, P., (1987), Räumliche Modellversuche für geankerte eichtliegende Tunnel, VI. Conf. ISRM Montreal
- Fujita, K. (1989): “Special lecture B: Underground construction, tunnel, underground transportation," Proe. 12th Int. Conf. On SMFE Rio de Janeiro, Vol. 4, pp.2159-2176.
- Geddes, I. D. (1977). “Construction in are as of large ground movements”, Stateof the Art Report, Proc., Conf. on Large Ground Movements and Structures, Halstead Press, New York, 949-974.
- Graf, B., (1984), Teoretische und experimentell Ermittlung des verticaldrucks auf eingebettete Bauwerke. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und felsmechanik der universität Karlsruhe Heft 96.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2005), “İstanbul/Otogar-Bağcılar Hafif Metro Projesi İnşaat ve Elektro Mekanik İşler Temel İzleme Tasarımı, Teknik Şartname”

Jeffery , G.B., (1921) , Plane Stres and plain Strain in Bipolar Co-ordinates; Philos. Transact.

Kimura, T., Mair, R.J., (1981), Centrifugal Testing of model Tunnels in soft Clay. In Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechasnics and Foundational Engineering, Stockholm (Rotterda: Balkema) Vol. 1, 319-22.

Kramer, J.,(1974) , Einfluss von Tunnel bauten auf die Geländeoberfläche-Strasse-Brücke-Tunnel, 26. Jg. H.9:225-231;Berlin

Limanov, I. A. ,(1957), Oberflächensenkungen im kambrischem Ton infolgeTunnelbau;

Loos , W. ve Breth , H., (1949), Kritische Betrachtung des Tunnel-und Stollenbaus und der Berechnung des Gebirgdruckes, der Bauingenieur, 24, H.5,s.

Mair, R. J. (1979), “Centrifuge modeling of tunnel construction in soft clay”, Ph.D Thesis, University Of Cambridge.

Mair, R. J. ,Taylor, R. N. And Bracegirdle, A.(1993), “Subsurface settlement profiles above tunnels in clays, Geotechnique, Vol.43, No. 2,pp. 315-320

Melix, P., (1986), Modellversuche und Berechnungen zur Standsicherheit oberflächennäher Tunnel. Veröff. Inst.Boden-und Felsm. Univ. Karlsruhe, H.103.

Milligan, G. W. E. (1974), “The behavior of rigid and flexible retaining walls in sand”, Thesis presented to Cambridge University, Cambridge, England, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Mori, H.,Nomoto, T, Matsumoto, M.,(1995),”Overview oGround Movements During the Schield Tunnellin-A Srvey on Japanes Scheild Tunnelling”, Underground Construction in soft Ground, Fujitsa and Kusabeeke (end), Balkema.

Mortos, F., (1958) , “Concerning an Approximate Equation of the Subsidence Trough and its Time Factors”, In International Srata Control Congress, Leipzig (Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Section Für Bergbau, 191-205.

Müller-Salzburg, L.,(1978), Der Felsbau 3. Band: Tunnelbau-Stuttgart.

New, B. M. & O’Reilly, M. P. (1991), “Tunneling induced ground movements-Predicting their magnitude and effects, Proc. Of 4th Int. Conf. On Ground Movements and Structures, Cardiff, Invited Review Paper, pp. 671-697

O’Reilly, M. P. And New, B.M. (1982), “Settlement above tunnels in the united kingdom-their magnitude and prediction”, tunnelling 82, london, IMM, pp. 173-181.

Oktay, F.Y.,Eren, R.H (1994), İstanbul Megapol alanının 50000 Ölçekli jeolojisi, İ.B.B Planlama ve imar Daire Başkanlığı

Özhan N. N. (1994), “Deformasyon Ölçü Yöntemleri Ve İstanbul Metro’sunda Yapılan Deformasyon Ölçmeleri, Yıldız Üniversitesi F.B.E

Peck, R. B (1969), “Deep excavation and tunnelling in soft ground”, Proc.of the 7th Int.Conf. on SMFE(mexico), State of the Art Volume, PP. 225-290.

Potts, D. M., (1976), Behavior of Lined and Unlined Cylindrical Vavities in Sand, thesis

presented to the University of Cambridge, at Cambridge, England, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Sauer, G., (1976), Spannungsumlagerung und Oberflächensenkung beim Vortrieb Von Tunneln mit geringer Überdeckung. Veröff. Inst. Boden-und Felsm. Univ. Karlsruhe, H.67.

Royal Soc. London, series A, Vol. 221

Schmidt, B. , (1969), "Settlements and Ground Movements Associated With Tunneling in soil", Ph.D.Thesis, University of Illinois, Urbana.

Skempton, A.,W.,& Macdonald, D, H, (1956) The allowable Settlements of buildings. Proc. Inst. Civ. Eng. Part III 5, 727-768

Steinfeld, K.,(1962), Gutachten zur Bemessung des Tunnels, "U-Bahn-Neubau Innenstadt".- Baubehörde Hamburg, unveröffentlicht.

Szechy, k.,(1969) ,The art of Tunelling Akademi kiado, Budapest.

SIS Geo(2006) "Instrumentation for measuring and monitoring geotechnical parameters in

Terzaghi, K.V.,(1936) , Stress Distribution in dry and in Saturated sand Above a Yielding Trape-door.-Proc. Int. Conf. Soil Mech., Cambridge, Mass, Vol.I,307-311 .

Ulusay R., Aydan Ö.,(1997) "Tünel açma makinalarıyla yapılan kazı işlemlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi" Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

Vardar M.,(1977) Yer altı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri, İ.T.Ü

SIS Geo(2006) "Instrumentation for measuring and monitoring geotechnical parameters in tunnels, canvers and underground works"

Wu, B.R. , Lee, C.J. ,(2003) "Ground Movement And Collapse Mechanisms Induced By Tunneling In Clay Soil". IJPMG-International Journal Of Physical Modelling in Geotechnics 4: 15-29

Yamaguti, N., (1930), "One the Investigation of stres Distribution in a tunnel with the Agar-Agar Model Experiments", Proc.III. Congr. Applied Mech Stockholm Vol 2.

Yıldırım, S.,(2006), Otogar-Bağcılar Raylı Sistemi KM 0+850 İle 0+950 Arası Tünel Yapımında Ölçülen Zemin Hareketlerinin Değerlendirilmesi Hakkında Rapor, YTÜ

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.08.1979	
Doğum yeri	Orumiyeh-İran	
Lise	1993-1996	Shahid Chamran Lisesi
Üni. Hazırlık	1996-1997	Ebne Sina Üni.Hazırlık Mer.
Lisans	1997-2001	Orumiyeh Azad Eslami Üniversitesi Müh.Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

şekil ek 1

