

İSTANBUL METROSU PROJELERİNİN PARAMETRELERİ VE BOYUTLANDIRILMASI

(*) Dr. Nuri Çelebi

1. GENEL

Yer altındaki kayalar üst tabakaların ağırlığı, yanal deformasyonların kısıtlanması ve tektonik sebeplere bağlı olarak karmaşık birtakım kuvvetlerin etkisi altındadır. Tünel açılınca, başlangıçta dengede olan bu kuvvetler değişir. Tünel çevresinde bazı deformasyonlar ortaya çıkar. Deformasyonları belli sınırlar içinde tutarak yeni bir denge sağlamak için genellikle tünellerin desteklenmesi gereklidir.

Tünel desteklerinin projelendirilmesi diğer yerüstü yapılarında olduğu kadar rasyonel metodlara dayandırılamamaktadır. Çünkü kayanın davranışına etkileyen faktörler çok çeşitlidir ve bunların hepsinin doğru ve eksiksiz bir biçimde önceden tesbiti pratik bakımdan imkansızdır. Bu yüzden tünel açılmaya başlandıktan sonra karşılaşılan yeni durumlara göre projelerin revize edilmesi olağandır.

Tünel projelennin hazırlanmasında "Yeni Avusturya Metodu" benimsenmiştir. Yeni Avusturya Metodu tünel projesinin ve inşaatının her safhasını yönlendiren bazı prensipleri ortaya koymaktadır.

- a) Yüklerin önemli kısmı, tüneli çevreleyen kaya tabakası tarafından taşınmaktadır. Destek elemanlarının birinci görevi yükleri taşımak değil, deformasyonları sınırlandırarak tünel çevresindeki kayaların stabilitesinin bozulmasını önlemektir.

(*) *İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.*

- b) Kayacın kontrollü şekilde, bir miktar gevşeme yapmasına izin verilerek tünel çevresinde plastik zon denilen bir halka oluşturulur. Desteklemenin uygun zamanda yapılması çok önemlidir. Destekler çok erken konulursa bahsedilen halka tam olarak oluşamayacak ve destekleme üzerine gelen yük çok fazla olabilecektir; geç konursa kayalar fazla gevşediği için tünel stabilitesi sağlanamaz hale gelebilecektir.
- c) Tünel içindeki gerilme ve deformasyonlar düzenli aralıklarla ölçülmelidir. Bu ölçümler, destek elemanlarının ne zaman konulacağı gerektiğine ışık tutacağı gibi destek boylarının artırılıp azaltılmasına yönelik kararlara da esas teşkil etmektedir.
- d) Tünel, kayaç ve desteklerinin kompozit olarak çalıştığı bir boru olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden kaya mukavemetinin yetersiz kaldığı durumlarda püskürtme betonu tünel tabanına da tatbik edilerek kaplamanın tüneli çepeçevre kuşatması sağlanmaktadır.

2. İSTANBUL METROSUNDA KULLANILAN TÜNEL TİP KESİTLERİ

İstanbul Metrosu yeraltı kazıları Tıp A/Tıp B1, Tıp B2, Tıp B3 ,Tıp P ve Tıp T olarak adlandırılan kesitlerin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Tıp A olarak tariflediğimiz tünel kesiti esas kazı kesiti olup, Şekil 1 'de gösterilmektedir.

Tüneller, metro vagonlarının geçtiği birbirine aks mesafeleri 16 m ile 32 m arasında değişen yanyana iki hat şeklinde inşa edilmekte, yaklaşık 250 m de bir tıp B1 tünelleri ile bağlanmaktadır. Taksim ,Osmanbey ve Şişli gibi delme tünel platform olarak inşa edilen istasyonlarda Tıp P tünel kesiti kullanılmaktadır. Bu istasyonlarda yolcu bağlantılarını sağlayan Tıp B2 bağlantı tünelleri ve Tıp B3 merdiven tünelleri mevcuttur.

Yanyana olan Tıp A tünellerinden araçların birbirine geçmesi için yapılan makas bölgelerinde ise en büyük ebatlı Tıp T tünel kesitleri kullanılmaktadır.

Bütün bu tünel kesitlerinin kazısının yapılması ,ön kaplama ve son kaplamanın projelendirilmesinde kullanılan parametreler zemin karakteri, inşaat metodu ve malzeme cinslerine göre tespit edilmişlerdir.

Yeni Avusturya metodu ile tünel kazısı ve inşası konusunda Türkiye' de uygulanan bir standart olmaması sebebiyle buradaki hesaplarda Avusturya ve Viyana metrosu standart ve yönetmelikleri ile DİN 1045 Alman normu kullanılmıştır.

3. TÜNEL DESTEKLEMESİ

Destekleme iki safhada yapılmaktadır. Birinci safhada çelik iksa, kaya balonu hasır çelikli püskürtme betonu kullanılmakta ikinci safhada betonarme bir iç kaplama yapılmak suretiyle tünelin emniyetli ve konforlu kullanımı sağlanmaktadır.

Tünel dış kaplamasının ana elemanı olan püskürtme betonu BS20 kalitesindedir. Donatı olarak Q225 hasırçelik kullanılmıştır. Yüklerin taşınmasını daha ziyade püskürtme betonu üstlenmekle beraber, desteklemede iksa ve kaya balonunun da önemi büyüktür.

İhsanın görevleri şöyle özetlenebilir :

- Kazıdan sonra olabilecek küçük kaya düşmelerini önlüyerek çalışma emniyetini temin eder.
- Sürgü çubuğuna destek verir.
- Bulonların öngerme kuvvetlerini (yumuşak püskürtme betonunu ezmeden) dağıtır.
- Püskürtme betonu pirizini alana kadar kayanın gevşemesine engel olur.
- İksa olarak donatıdan bükülmüş bir kafes kemer kullanılırsa hem püskürtme betonunun tatbiki kolaylaşmakta, hem de püskürtme betonuna ek bir donatı elde edilmektedir.

Bidonların görevleri şunlardır :

- Lokal kaya düşmelerini veya gevşemelerini önler.
- Tünel açımında, yüklerin üç boyutlu taşınması sırasında, daha piri/ini tam almamış püskürtme betonuna gelecek ek yükleri azaltır.
- Plastik zonda kayacın kesme mukavemetini artırır.

4. TÜNEL DIŞ KAPLAMASINI ANALİZİ

Tünel hesapları için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu metodun yer mekaniği konusunun birçok probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Bunun en büyük avantajı karmaşık geometri ve özellikleri değişken malzemelerde bile çözüm imkanı tanınmasıdır. Sonlu elemanlar metodu bilgisayarların hız ve kapasitelerinin artmasına paralel olarak son zamanlarda mühendisliğin hemen her sahasında yaygın olarak uygulanır hale gelmiştir.

İstanbul Metrosu tünellerinin sonlu eleman analizleri TPSIO isimli hazır bir program vasıtasıyla Geoteknik und Tunnelbau firması tarafından yapılmıştır. (Kay. I) Tip A tünelleri için kullanılan sonlu eleman ağı Şekil 2'de verilmiştir. Buradan görüleceği gibi tünel tipleri ve etraflarındaki

kayaç birarada modellenmektedir. Sonlu eleman ağı ile hesaplanan kısmın ebatları yeterince büyük seçilerek tünel kazısından etkilenen bölgenin tümü incelenmiş olmaktadır. Başka bir deyişle model ebatları, kazı sebebiyle kayaçtaki gerilme ve deformasyonlarda ortaya çıkan değişmelerin, modellenen bölgenin sınırlarına doğru ihmal edilecek mertebeye düştüğü kontrol edilerek belirlenmiştir.

Tünel kazısı (zaman boyutunu saymazsak) 3 boyutlu bir olaydır. Ancak sonlu eleman modelinin 3 boyutlu seçilmesi halinde, bilgisayarla yapılan hesapların kapsamı çok büyüyecektir. Burada iki boyutlu "plane strain" elemanları kullanılmıştır.

Kayacının Mohr - Columb kanununa göre elasto plastik davrandığı kabul edilmektedir.

Kayma yüzeyi için

Drucker Prager'e göre:

$$F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - k$$

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$J_2 = 1/6 \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \}$$

$$\alpha = 2 \sin \phi / \sqrt{3} (3 - \sin \phi) \quad k = c \cdot \cos \phi / \sqrt{3} (3 - \sin \phi)$$

Burada Kohezyon ve içsel sürtünme açısını gösteren c ve ϕ plastikleşmenin hangi gerilme durumunda oluşacağını belirleyen önemli parametrelerdir. Her tünel tipi için iki hesap yapılmıştır. Kullanılan parametreler geoteknik rapordan faydalanarak aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Hesap 1:

$$\phi = 35^\circ$$

$$c = 10.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi = 0.2$$

$$\gamma = 2.3 \text{ t/m}^3$$

$$E = 3000 \text{ kg/cm}^2$$

Hesap 2:

$$\phi = 28^\circ$$

$$c = 0.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned}\varnothing &= 0.2 \\ \gamma &= 2.3 \text{ t / m}^3 \\ E &= 3000 \text{ kg / cm}^2\end{aligned}$$

A tipi tünellerde kazı genellikle üst kazı ve taban kazısı olmak üzere iki aşamada yapılmaktadır. Ayrıca geliş ve gidiş hatlarındaki kazılar ve desteklemelerde belli bir faz farkı mevcuttur. Bütün bunları gözönüne almak için analiz (aşağıda daha detaylı açıklanan) yedi adımda gerçekleştirilmektedir. Her adımda deformasyon ve gerilmedeki değişim bir önceki adımdaki gerileme durumundan faydalanılarak ve model geometresi ile malzeme özelliklerinde gerekli ayarlamalar yapılmak suretiyle hesaplanmaktadır.

Hesap adımları

- LSO :** Tünel açılmadan önce kayacın zati ağırlığı altındaki gerilme durumu hesaplanırken, modelin sağ ve sol yanlarındaki düğüm noktaları yatay yönde, modelin altındaki düğüm noktaları ise hem düşey hem yatay yönde tutulmaktadır. Bütün mesnetler mafsal ildir. Bu hesap adımında bulunan deformasyonlar gözönünde alınmayacaktır. Dolayısıyla bu hesap adımı tamamladıktan sonra bütün daformasyonlar sıfırlanmaktadır. Ayrıca modelin yanlarındaki mesnetler düşey yönde tutularak sınır şartlarında bir kareye mahsus bir değişiklik yapılmaktadır. (Bundan sonraki hesap adımlarında sınır şartları aynı kalmaktadır.)
- LSI :** Tünelin tavan bölgesindeki kazı, incelenen kesit hizasına geldiği anda tavan bölgesindeki ön gevşeme burudaki elemanların elastik modüllerinin %50 azaltılması suretiyle hesaba katılmıştır (Şekil -3)
- LS2 :** Tünel tavan bölgesindeki kazı tamamlanınca o bölgedeki elemanlar çıkartılarak püskürtme betonu elemanları elastik modülleri %75 azaltılmıştır. Tavan bölgesindeki püskürtme betonu elemanlarının elastik modülleri ise $E = 10 \times 10^{-1} \text{ mPa}$ olarak alınmıştır. (Şekil-4)

LS3 : Bu hesap adımımda taban kazısı durumu incelenmiştir. Tavan bölgesinde ve gövdedeki püskürtme betonu elemanların elastik modülleri $E = 25 \times 10^3$ m Pa değerine yükseltilmiş tabandaki elemanlarda ise $E = 10 \times 10^3$ mPa olarak verilmiştir. (Şekil- 5)

LS4-MS6: Birinci tünel için açıklanan hesap adımları LSI, LS2, LS3' deki safhalar »aynen ikinci tünel için LS4, LS5 ve LS6 da incelenmiştir. Benzer analizler P ve T tipi tünellerde da yapılmıştır.

5. TÜNEL KAZISI VE DESTEKLEME TİPİNİN SAPTANMASI

A- tipi tünellerde A1, A2 ve A3 kazı ve destekleme tiplerinin hangi şartlar altında kullanacağı gösteren kriterler tablolar halinde Eki de verilmiştir. Tablolar kazı ve destek tipinin belirlenmesi için kabaca bir fikir vermektedir. Karar verilirken tablolarda öngörülen sınır değerler, yerinde yapılan gözlem ve tecrübeye dayanarak değiştirilmiştir. Çıkılacak bulon sayısı, yer ve yönleri ile sürgü çubuk aralıkları jeolojik duruma göre tespit edilmiştir.

6. KAZI VE DESTEKLEME SIRASINDA ALINAN ÖNLEMLER

İstanbul Metrosu tünelleri inşaatı esnasında yüzeyde oluşabilecek oturmalardan dolayı binaların hasar görmelerini önlemek amacıyla yüzeyde binalarda ve tünel galerisi içinde değişik aşamalarda jeoteknik ölçümler gözlem ve kontroller yapılmış ve bunlara bağlı olarak kazı ve destekleme aşamalarında gerekli önlemler alınmıştır. Söz konusu ölçüm, gözlem ve önlemlerin ayrıntıları aşağıda özetlenmiştir.

Tünel delme işlemleri hat üzerinde veya yakınında binaların bulunduğu, önlem alınacak bölgeye henüz ulaşmadan, binaların mevcut durumu tespit edilmiştir. Tünel aynası hat üzerinde ve noktalarda ve yeryüzünde düzenli olarak ni ve İman ölçümleri yapılmıştır. Binalarda izin verilen değişken oturma sınırının $S < 1:500$ olarak alınmıştır. Bina üzerinde ve yeryüzünde yapılacak olan nivelman ölçümlerine en geç ayna kazısına 30 m kadar yaklaşıldığı andan itibaren başlamıştır.

Kritik binaların bulunduğu bölgelerin geçişinde bir dizi önlemlerin alınması, kontrollü olarak kazı metodu uygulanması, jeolojik belirlemelerin

ve jeoteknik ölçülerin hassasiyetle yapılması büyük bir önem taşımaktadır. Bu sebeple kazı binalara yaklaştıkça, aynadan ilerleme yönüne doğru deneme amaçlı sondaj delikleri açılmıştır. Söz konusu kiritik kısımlarda kaya bulonlarının çakılmasına özel itina gösterilerek, jeolojik duruma göre yerleri, uzunlukları ve yönleri ayarlanmıştır. Jeolojik durum ve jeoteknik ölçüm değerlendirmelerine göre kazı ve desteklemede aşağıda belirtilen önlemlere başvurulmuştur.

Kazı adımlarının küçültülmesi ,

Ayna kazı kesitinin daha küçük parçalara bölünerek açılması.

Sürgü çubuğu aralıklarının küçültülmesi,

Püskürtme betonu kalınlığının arttırılması,

Radyenin daha çabuk ve kısa mesafede (3-4m.) kapatılması, eğer bu konuda zorlukla karşılaşır ise üst yarıda geçici radye yapılması.

7. TÜNEL İÇ KAPLAMASININ ANALİZİ

Tünel iç kaplaması 40 cm kalınlıkta, 10-12 m.lik anolar halinde dökülmüştür. Bu izolasyon su geçirimsiz beton anolar arasında konulan su tutucular ile sağlanmaktadır. Esasen yeraltı suyu olarak çok az bir su akımı mevcut olduğu zemin, raporlarından anlaşılmaktadır.

İç kaplama hesaplarında kullanılan statik sistem, ışınsal ve dış kaplama ile iç kaplama arasında aktırılan sürtünmeyi gözönüne alan teğetsel yaylarla çepeçevre tutulmuş bir halkadan oluşmaktadır. (Şekil 6 ve 7) Yaylar iki ucu mafsalı giriş elemanları ile modellenmiştir. Işınsal yayların yatak katsayısı 60,000 kN/m³ teğetsel yayların yatak kat sayısı ise 30,000 kN/m³ alınmıştır. Işınsal yayların sadece basınç aktarabileceği gözönüne alınarak hesap esnasında çekme kuvveti bulunan noktalarda ışınsal ve teğetsel giriş elemanları sistemden çıkarılmaktadır.

Yük Kombinasyonları

YH.1 Ölü Yük : İç kaplama zati ağırlığı

YH.2 Olu Yük + Zemin Yüğü : Zemin yüğü Terzaghi'ye göre hesaplanmıştır. Yatay zemin yüğü için sükunetteki zemin katsayısı olan 0,5 alınmıştır.

YH.2A Yük Hali 2 + Bina Yükü : Bina yükü Viyana metrosundaki gibi kat başına 10kN/m² ve binanın binanın 15 katlı olduğu kabul ile bulunmaktadır.

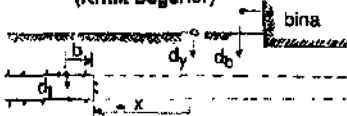
YH.3 l Yuk + Kayanın Kohezyon Deėerinin 0 Alınması Halinde Oluřan Zemin Yükü: Emniyet katsayısı 1.2 alınmıştır.

Yh.4 Yük Hali 3 +Deprem : Genellikle zemine gömülü yapılarda deprem hesabı yapılmamaktadır. Bununla beraber tünel kesitleri deprem yüklerine göre de tahkik edilmiştir. Analiz sonunda ite ve dışta 443/221 elik hasır ve B25 beton kullanılmıştır. Böylece tünelin enine yönünde 2 x 4.43 cm²/m, boyuna yönde 2 x 2,21 cm² donatı konulmuştur. Yapılan tahkiklere göre hiçbir yerde kesme donatısına gerek olmadığı bulunmuştur.

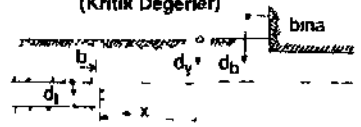
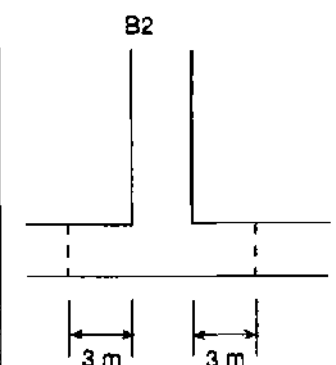
KAYNAKLAR:

. istanbul Metrosu IAsama inşaatı Hesap Raporları, Nejad Ayaydın, IGT Geotechnik und Tunnelbau

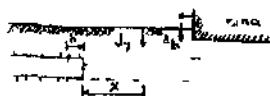
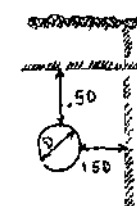
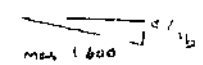
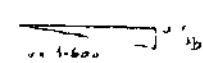
EK 1 - TABLO 1 • A1 TİPİ KAZI VE DESTEKLEME

ÖRTÜ KALINLIĞI (Tünel tavanı - Yeryüzü)	JEOLOJİK DURUM	JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER (Kritik Değerler) 	İLERLEME MESAFESİ	PÜSKÜRTME BETONU	NOT
> 15 m	Kumtaşı, Silttaşı fazla ayrışmamış, yer yer killi çatlak dolguları, su ve su etkisi az.	$+x = 5-10 \text{ m}$ $d_{y\max} = 5 \text{ mm}$ $x = 0 \text{ m}$ $d_{y\max} = 10 \text{ mm}$	1.5 m	10 cm	
8 - 15 m		$-x = 10 \text{ m}$ $d_{y\max} = 12 \text{ mm}$ $-x = 20 \text{ m}$ $\Delta d_y = 0 \text{ mm}$ $b \approx 3 \text{ m}$ $d_{t\max} = 10 \text{ mm}$	1.2 m	15 cm	
8 - 15 m	Diabaz, masif kaya	$b > 10 \text{ m}$ $\Delta d_t = 0 \text{ mm}$ $d_t < 20 \text{ mm}$	1.5 m	10 cm	

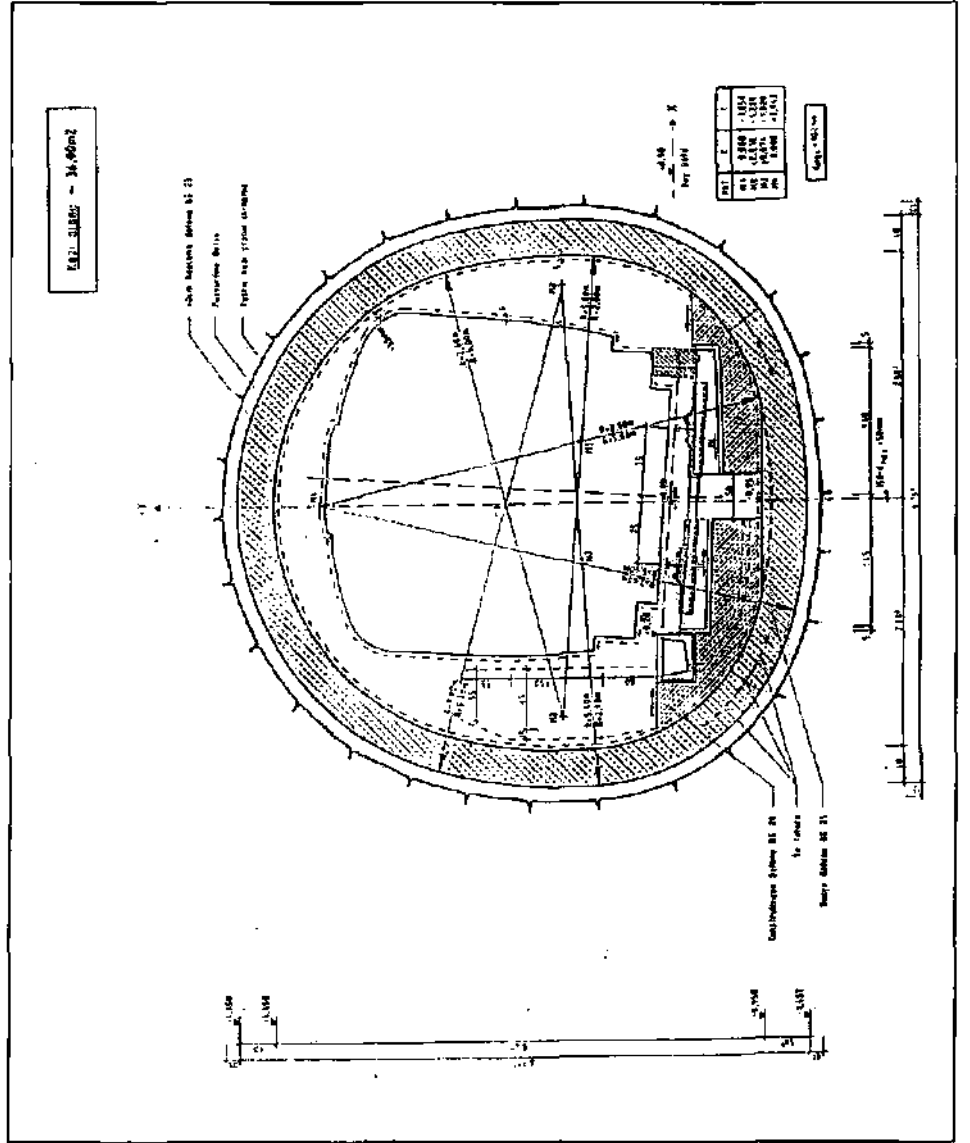
EK 1 - TABLO 2 - A2 TİPİ KAZI VE DESTEKLEME

ÖRTÜ KALINLIĞI (Tünel tavanı - Yeryüzü)	JEOLOJİK DURUM	JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER (Kritik Değerler)	ILERLEME MESAFESİ	NOT
> 15 m	Kumtaşı Kırtaşı, Silttaşı orta dere- cede ayrışmış, kısmi ezilmiş, su orta dere- cede etkili	 $+x = 10 \text{ m}$ $d_{y\max} = 10 \text{ mm}$ $x = 0 \text{ m}$ $d_{y\max} = 15 \text{ mm}$	12 m	 B2 3 m 3 m
8 - 15 m	Diabaz parçalanmış Diabaz/Trakya for- masyonu karışımı yer yer kılı çalılık dol- guları su ve su etkisi az	$x = 10 \text{ m}$ $d_{y\max} = 20 \text{ mm}$ $-x = 20 \text{ m}$ $\Delta d_y = 0 \text{ mm}$ $b \approx 2 \text{ m}$ $d_{t\max} = 15 \text{ mm}$		
5 - 8 m		$b > 10 \text{ m}$ $\Delta d_t = 0 \text{ mm}$ $d_t < 25 \text{ mm}$	10 m	

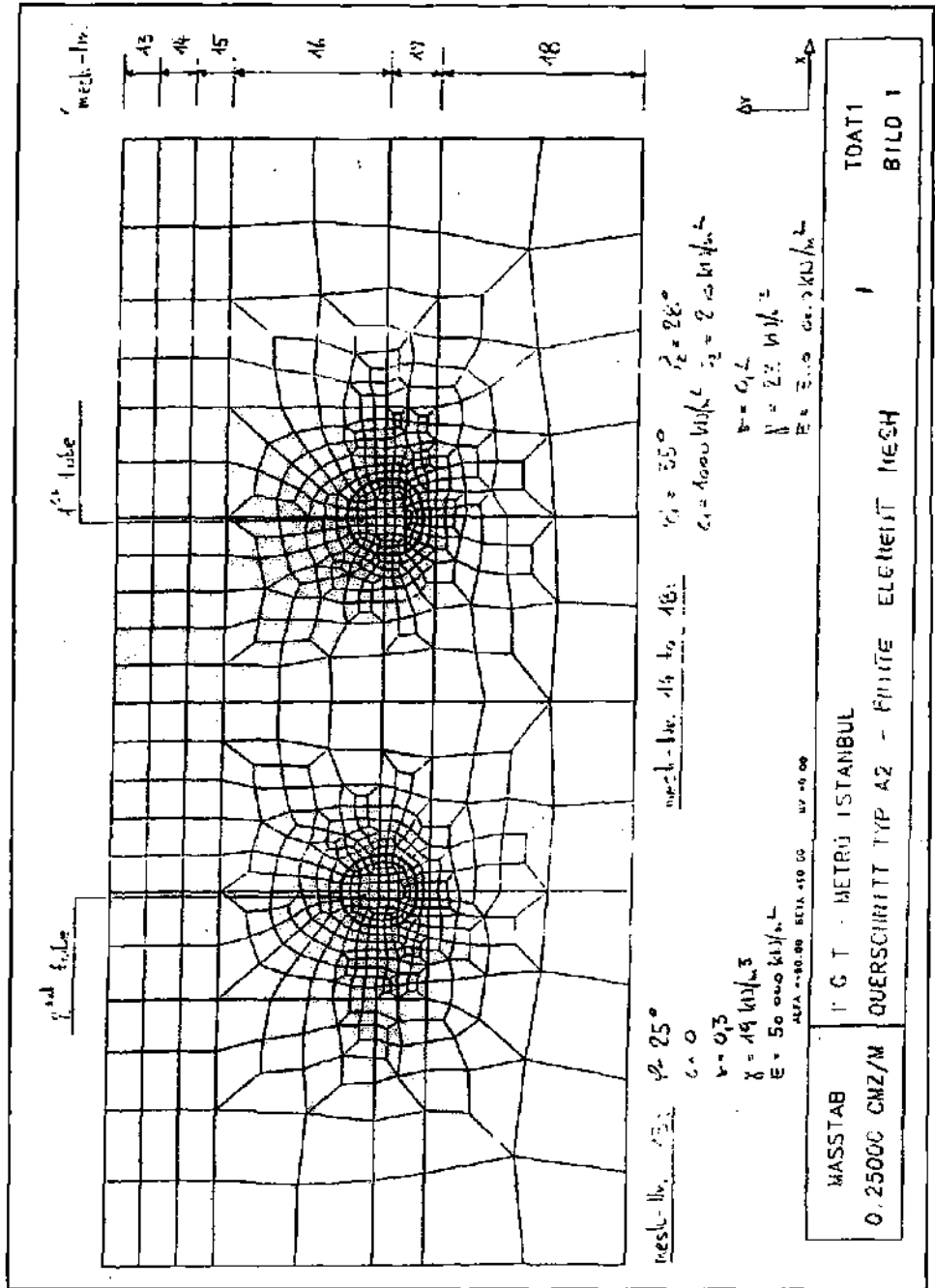
EK 1 - TABLO 3 - A3 TIPI KAZI VE DESTEKLEME

ORTU KALINLIĞI (Tünel tavanı-Yeryüzü)	JEOLOJİK DURUM	JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER (Kritik Değerler)	İLERLEME MESAFESİ	NOT
8-15 m	Kumtaşı Kıtaşı Silttaş parçalanmış kırılmış kalın milonitleşmiş kısım kısmı tamamen ezilmiş Fay zonları		max 10m	A3 tipi A/P ve A/T birleşim noktalarında da kullanılacaktır
5-8 m			0-8m	
Binılara yaklaşım durumunda 	"A3" tipi iyi zemin koşulları altında binaya 15-20m kala orta veya zayıf zeminlerde 30m kala kullanılmalıdır	+x = 20m d_{max} 5 m	10m	
		+x = 10m d_{max} 10 m		
		+x = 10m d_{max} 15 m'n veya 		
		+x = 10m d_{max} 20 m'n veya 	0-6m	Yerinde karar verecek ek ölçümler alınacaktır

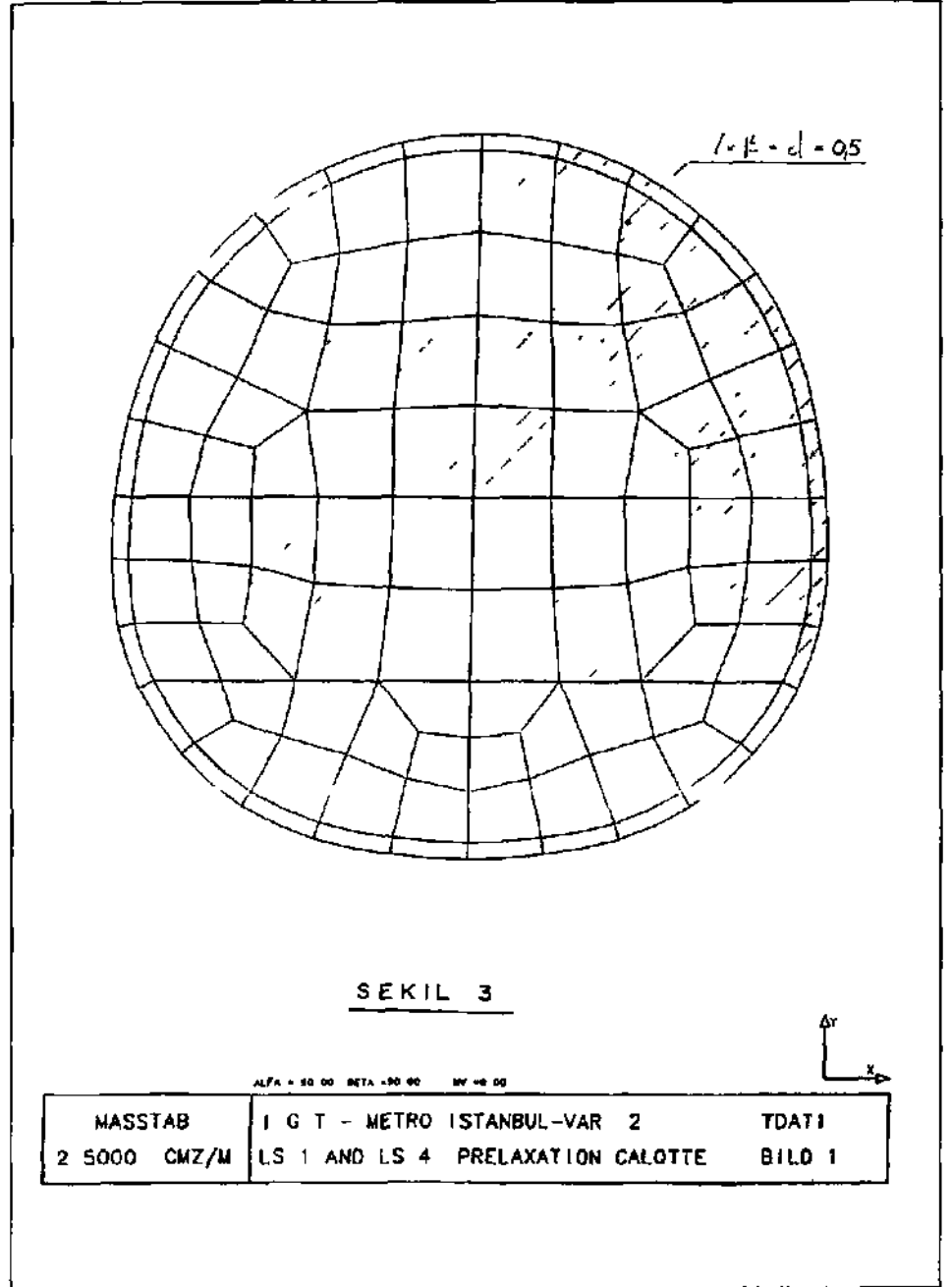
DC



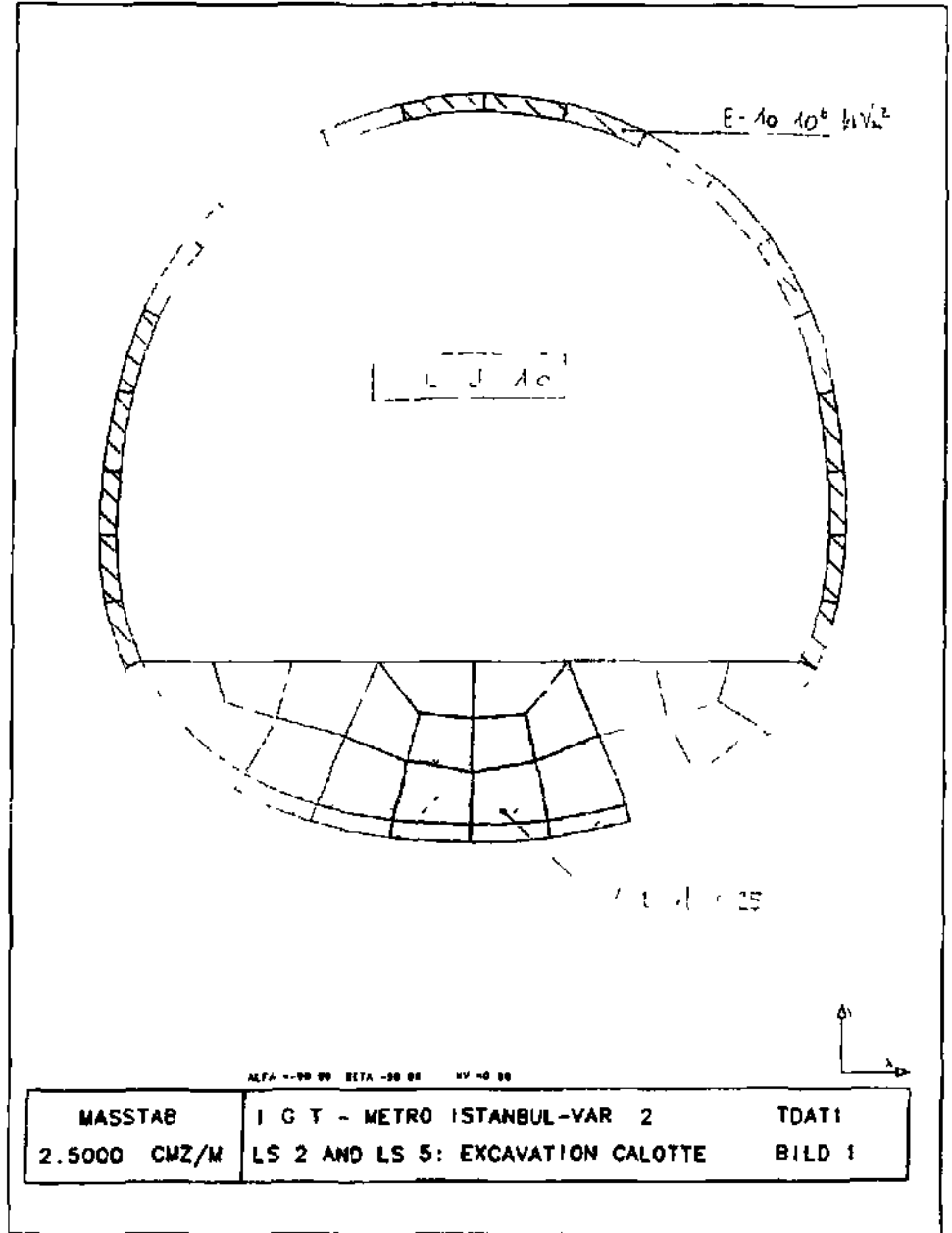
Şekil. 1



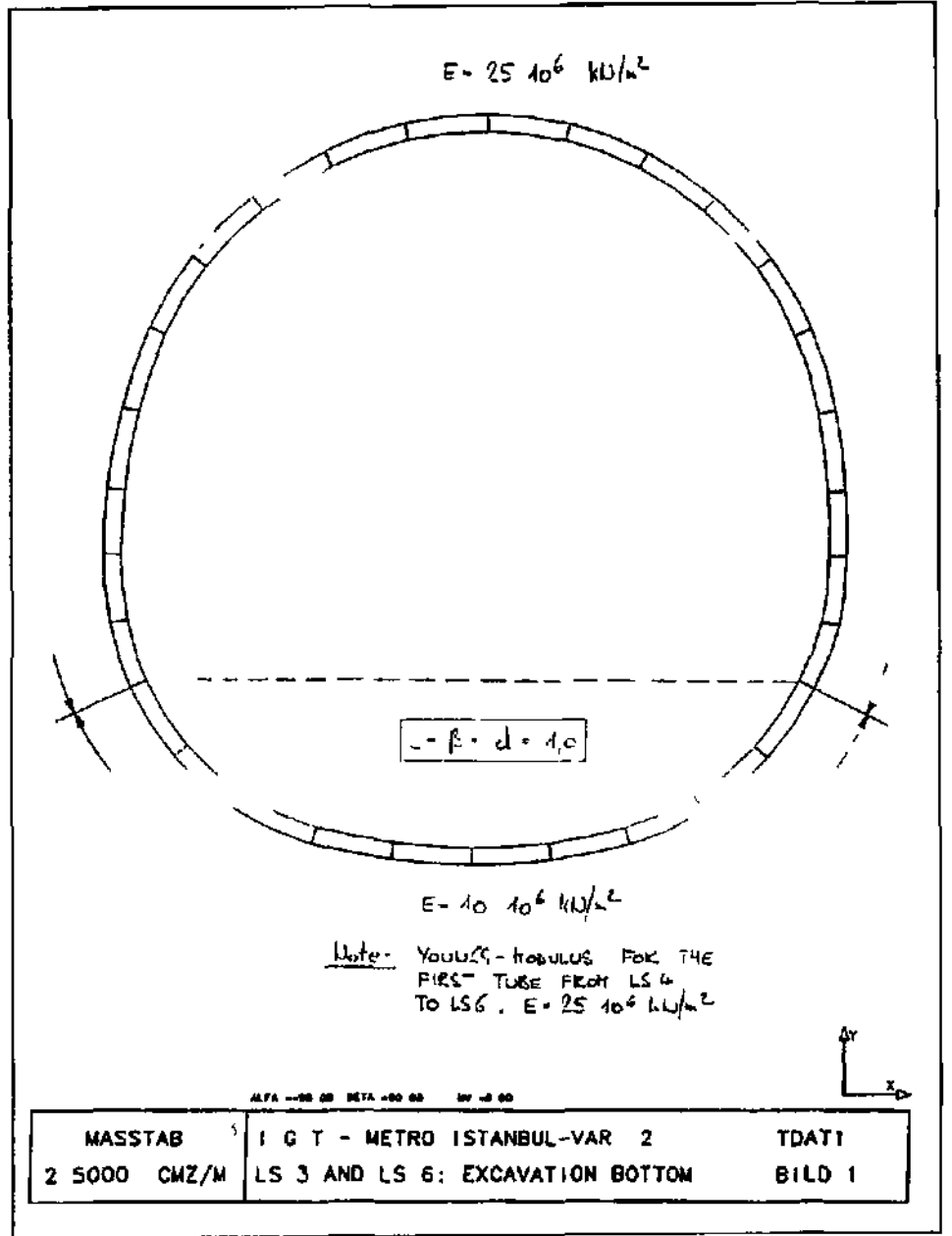
Şekil. 2



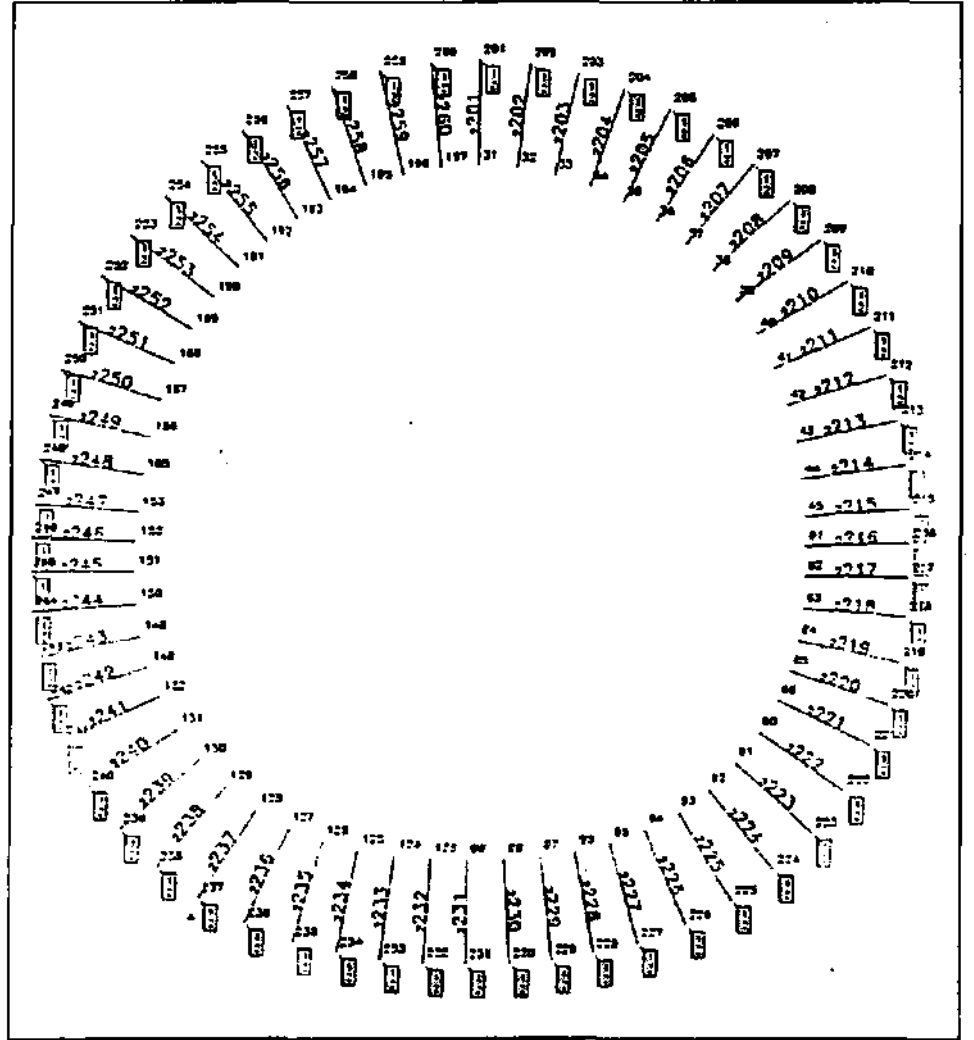
Şekil. 3



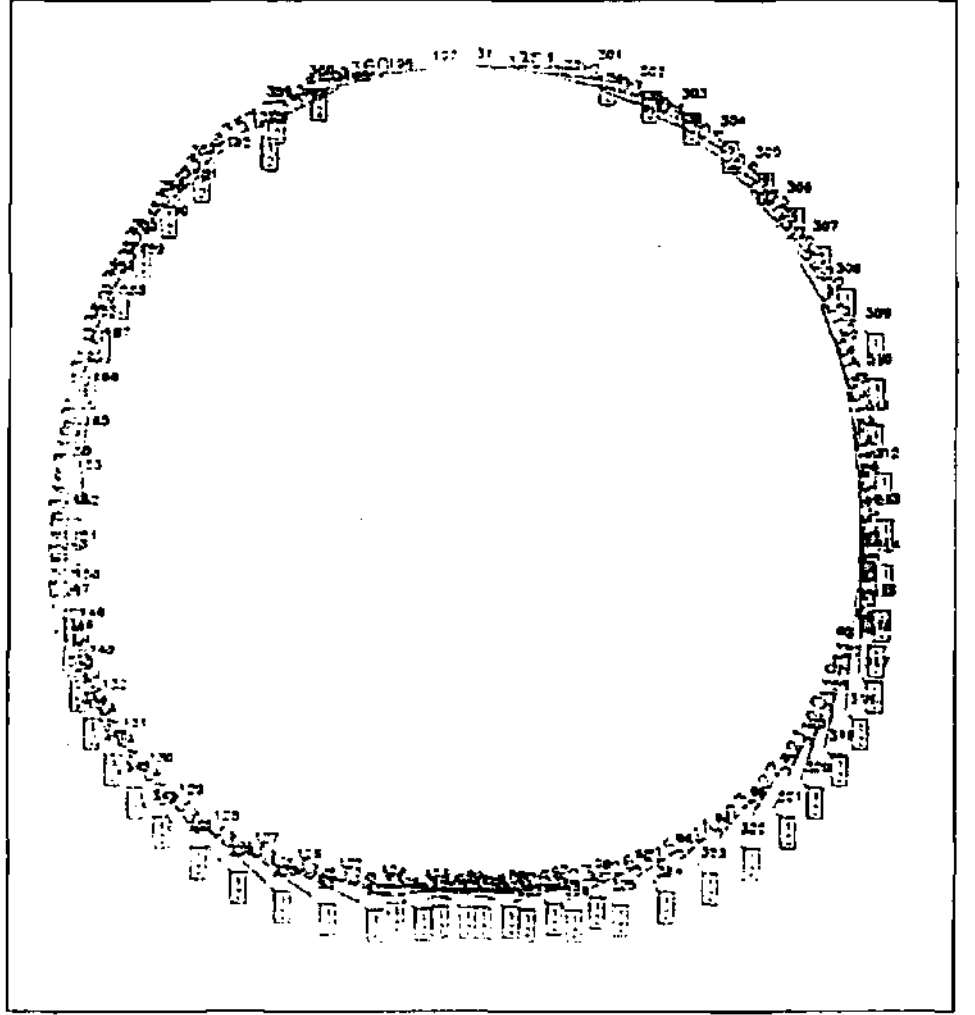
Şekil. 4



Şekil. 5



Şekil. 6 Işınsal Yayılar



Şekil. 7 Teğetsel Yaylar